

รามานสเปกโทรสโกปีและการประยุกต์ใช้

Raman Spectroscopy and Applications

ณัฐกมลวรรณ ศรีจันทเพช

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) E-mail: Nathakamolwan@vru.ac.th

Received: February 2,2022

Revised: February 28,2022

Accepted: March 17,2022

บทคัดย่อ

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญในการใช้วิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลโดยอาศัยหลักการกระเจิงแสงที่ฉายลงไปยังชิ้นงานตัวอย่าง ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคนี้อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้ในเชิงเคมี การใช้ในการวิเคราะห์พอลิเมอร์ การใช้ในเคมีสิ่งแวดล้อม ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ใช้ในวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับไม้ ใช้ในการวิเคราะห์เชิงการแพทย์และใช้ในงานวิเคราะห์ในวิทยาศาสตร์อีกหลากหลายสาขา และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและในเชิงปริมาณ รามานสเปกตรัมแสดงฟังก์ชันของมุมฟังก์ชันที่เกิดจากการกระเจิงแสง การศึกษาโดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีจะศึกษาการเลื่อนของความถี่ที่เกิดการกระเจิงแสง ความเข้มของฟังก์ชันรูปร่างของฟังก์ชัน

คำสำคัญ: รามานสเปกโทรสโกปี, การประยุกต์ใช้รามานสเปกโทรสโกปี, พูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโทรสโกปี

Abstract

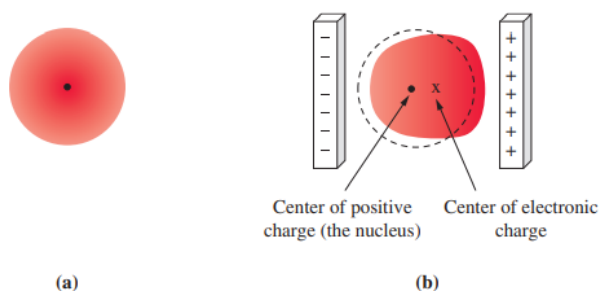
Raman spectroscopy is a useful technique used to characterize molecular structure of substances based on light scattering on the specimen. At present it is applied extensively to study in various fields such as chemistry, polymers, environmental chemistry, forensic science, wood science, biomedical science and etc. Raman technique will collect both quantitative and qualitative data from the matters. Raman spectra illustrates functional group of the materials. The technique may focus on raman band frequency shift, intensity of the raman band and raman band shape.

Keywords: Raman spectroscopy, Applications of Raman spectroscopy, Fourier Transform Raman Spectroscopy

บทนำ

1. รามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นการศึกษาการสั่นของโมเลกุลที่เกิดจากการกระเจิงแสงโดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง โมเลกุลที่มีนิวเคลียสเหมือนกันเมื่อนำมาทดสอบด้วยอินฟราเรด สเปกโทรสโกปีจะไม่ปรากฏพีก แต่สามารถปรากฏพีกในรามานสเปกโทรสโกปี การสั่นที่พบในรามานสเปกตรัมเกิดจากการเปลี่ยน polarizability ซึ่งหมายถึงการบิด (distortion) ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) รอบๆ อะตอมที่เกิดการสั่น (ภาพที่ 1) โมเลกุลที่มีสองอะตอมที่เหมือนกัน เช่น Cl_2 ไม่ดูดกลืนแสง IR เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ การยืดหดของพันธะ Cl-Cl เป็น IR inactive คือไม่ปรากฏพีกใน IR แต่โมเลกุลนี้มีการเปลี่ยนแปลง polarizability เมื่อเกิดการยืดหดของพันธะ เนื่องจากเป็นรามาน active เราจึงเห็นพีกการยืดของ Cl-Cl ในรามานสเปกตรัม บางโมเลกุลปรากฏพีกใน IR ไม่ปรากฏพีกในรามานสเปกตรัม แต่บางโมเลกุลกลับกัน บางโมเลกุลปรากฏพีกทั้งใน IR และรามานสเปกตรัม การสั่นแบบสมมาตร ให้พีกรามานที่เข้ม ส่วนการสั่นแบบไม่สมมาตรให้พีกรามานที่ความเข้มต่ำ หรืออาจจะไม่ให้พีกรามานเลย เทคนิครามานสามารถทดสอบสารตัวอย่างที่บรรจุในขวดแก้วหรือพลาสติกได้เลย-Ma et al., (2019) น้ำและพลาสติกปรากฏพีกรามานที่ความเข้มต่ำ ไม่มีสารสองชนิดใดๆ ปรากฏพีกรามานที่เหมือนกัน ซึ่งทำให้เราสามารถบอกความแตกต่างของสารได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ความเข้มของพีกรามานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณสารที่ตรวจสอบ (Qiao et al., 2021) เทคนิคนี้จึงเป็นได้ทั้งการทดสอบในเชิงคุณภาพและในเชิงปริมาณ (Du et al., 2021; Robinson, Frame, & Frame II, 2014)



ภาพที่ 1 การเกิดโพลาริเซชันของอะตอม (a) อะตอมที่ไม่เกิดโพลาริเซชัน มีการกระจายของประจุในนิวเคลียสเป็นทรงกลม (b) อะตอมเกิดโพลาริเซชันในสนามไฟฟ้ามีการกระจายของประจุไม่เป็นทรงกลม จุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบไม่ตรงกัน

ที่มา: Petrucci, Herring, Madura, Bissonette, (2017)

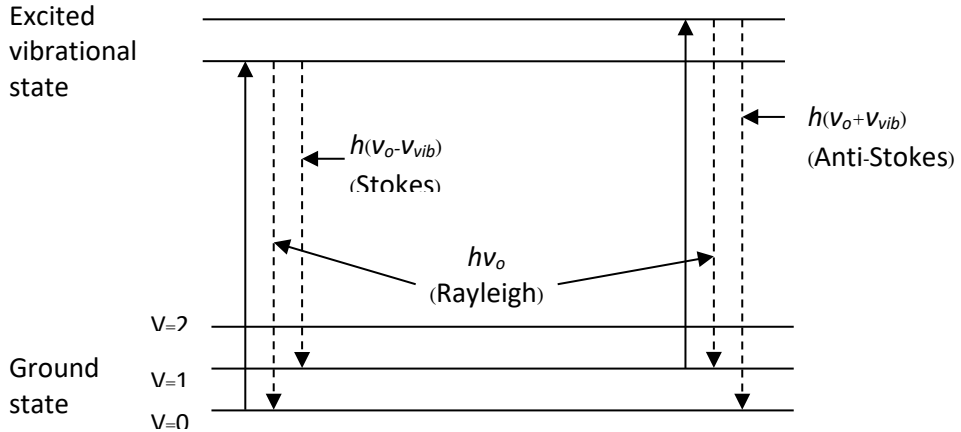
2. การกระเจิงแสงด้วยรามาน

เมื่อรังสีหรือแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังสารตัวอย่าง จะมีการกระเจิงแสงของโมเลกุลของสารตัวอย่างเกิดขึ้น โดยการกระเจิงแสงเกิดขึ้นสามแบบได้แก่ 1) การกระเจิงแสงแบบ Rayleigh 2) การกระเจิงแสงแบบ Stokes และ 3) การกระเจิงแสงแบบ Anti-stokes รังสีที่กระเจิงออกมาส่วนใหญ่มีความถี่เหมือนกับแสงจากแหล่งกำเนิดแสง เรียกว่าเป็นการกระเจิงแบบ Rayleigh ซึ่งเป็นผลมาจากการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนและโมเลกุลในสารตัวอย่าง ไม่มีการสูญเสียพลังงานระหว่างการชน แต่เมื่อโฟตอนถูกกระเจิงโดยมีพลังงานน้อยกว่าหลังจากเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุล และมีบางโฟตอนกระเจิงแสงโดยมีพลังงานเพิ่มขึ้น เรียกว่าเกิดการกระเจิงแบบ Raman ซึ่งตั้งชื่อตาม Sir Chandrasekhara Venkata Raman ซึ่งเป็นผู้ค้นพบการกระเจิงแสงแบบนี้ในปี ค.ศ. 1928 (Raman, 1928)

การกระเจิงแสงแบบ stokes เป็นการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่นมีความถี่ $V_0 - V_{vib}$ โดย V_{vib} คือความถี่การสั่นของโมเลกุล และ V_0 คือความถี่ของรังสีตกกระทบ กระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากโฟตอนสูญเสียพลังงานจากการกระตุ้นโมเลกุลขึ้นไปสู่ระดับพลังงานการสั่นและการหมุนที่สูงขึ้น การสูญเสียพลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับการเพิ่มพลังงานของโมเลกุล การกระเจิงแสงแบบนี้เกิดที่ความถี่ต่ำกว่าและความยาวคลื่นที่ยาวกว่าเมื่อเทียบกับความถี่ของรังสีตกกระทบ (Prasithphol, 2004)

การกระเจิงแสงแบบ anti-stokes เป็นการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่นเช่นกัน พบที่ความถี่ความถี่ $V_0 + V_{vib}$ เนื่องจากโฟตอนได้รับพลังงานจากการสั่นและการหมุนของโมเลกุล และทำให้โมเลกุลสูญเสียพลังงาน กระบวนการนี้ทำให้เกิดฟลักซ์รามานที่ความถี่สูงกว่าและความยาวคลื่นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับรังสีตกกระทบ (Prasithphol, 2004) ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานสำหรับการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

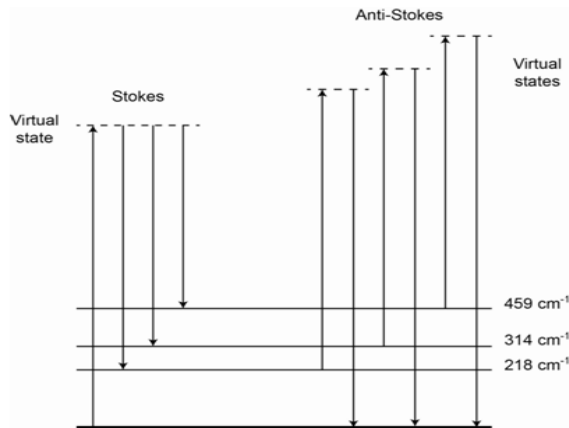
การเลื่อน (shift) ของพลังงาน ทำให้เกิดการเลื่อนของความถี่ของโฟตอนที่กระเจิงออกมา โดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของโมเลกุล โดยทั่วไปรามานสเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (intensity) กับการเลื่อนของเลขคลื่น (cm^{-1}) ถ้าการสั่นทำให้เกิด IR active และรามาน active จะพบพีกที่เลขคลื่นเดียวกันของทั้ง IR และรามานสเปกตรัม ซึ่งอาจมีความเข้มต่างกัน ลักษณะของรามานสเปกตรัมจะคล้ายกับ IR สเปกตรัม ซึ่งมีประโยชน์ในการระบุหมู่ฟังก์ชันของสารได้ (Du et al., 2021)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานสำหรับการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Stokes Raman and anti-stokes raman light scattering)

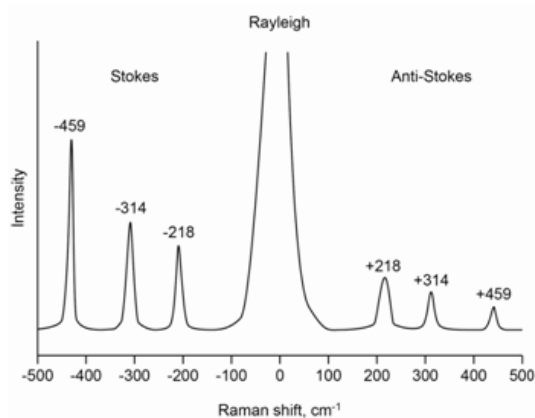
ที่มา: Prasithphol, (2004)

ภาพที่ 3 แสดงระดับพลังงานการกระเจิงแสงแบบ stokes และ anti-stokes ของคาร์บอนเทตระคลอไรด์และภาพที่ 4 แสดงรามานสเปกตรัมของคาร์บอนเทตระคลอไรด์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพีคที่เกิดจากการกระเจิงแสงแบบ stokes และ anti-stokes



ภาพที่ 3 แผนภาพระดับพลังงานแสดงระดับพลังงานการกระเจิงแสงแบบ stokes และ anti-stokes ของคาร์บอนเทตระคลอไรด์ (CCl₄)

ที่มา: Wenzel & Charles, (2021)



ภาพที่ 4 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄)

ที่มา: Wenzel & Charles, (2021)

3. เรโซแนนซ์รามาน

เมื่อมีการใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นโมเลกุลสารตัวอย่างที่อยู่ในช่วงที่ทำให้สถานะทางไฟฟ้าของโมเลกุลถูกกระตุ้น ความเข้มของฟลักรามานจะเพิ่มขึ้น 10^3 - 10^6 เท่า ซึ่งมากกว่าความเข้มของรามานธรรมดา เรียกว่าผลของเรโซแนนซ์รามาน เรียกเทคนิคนี้ว่า เรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปี โมเลกุลต้องมีหมู่ที่มีโครโมฟอร์ ที่สามารถดูดกลืนรังสียานตามมองเห็นหรือยูวี สเปกตรัมที่ได้จะดูง่ายกว่ารามานสเปกตรัมปกติ เพราะการสั่นแบบสมมาตรทั้งหมดร่วมกับโครโมฟอร์ ทำให้ความเข้มเพิ่มขึ้น ทำให้เทคนิคนี้มีความเฉพาะเจาะจงกับโครโมฟอร์ที่จำเพาะ เรโซแนนซ์รามานใช้ศึกษาสารที่มีความเข้มข้นต่ำของโมเลกุลชีวภาพ เช่น ฮีโมโกลบิน แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นช่วงยูวีและวิสิเบิลของสเปกตรัม ถูกใช้สำหรับเรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปี เรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปียังมีประโยชน์ในการวิเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีคอนจูเกตสูงๆ และพอลิเมอร์ที่มีวงแหวนแอโรมาติกอยู่ในโครงสร้างมาก (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

4. โพลาริซรามานสเปกโทรสโกปี

โพลาริซรามานสเปกโทรสโกปีให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสมมาตรของรูปแบบการสั่นของพันธะและการจัดเรียงตัวของสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ เช่น ผลึกพอลิเมอร์ การจัดเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังเดี่ยว โพลาริเซอร์ คือวัสดุที่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงตัวจำเพาะในทิศทางหนึ่งผ่านไปได้ ใช้ในการผลิตแสงโพลาริซ์ แสงที่กระเจิงจากสารตัวอย่างประกอบด้วยแสงที่โพลาริซ์ในแนวขนานและแสงที่โพลาริซ์ในแนวตั้งฉากกับแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ การวัดการกระเจิงแสงด้วยเทคนิครามานธรรมดา

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1

วารสารวิจัยและนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

จะแสดงฟลักทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบที่เกิดจากแสงทั้งแนวขนานและแนวตั้งฉาก แต่การทดสอบด้วยเทคนิคโพลาไรซ์รามานจะใช้ตัวกรองโพลาไรซ์ (polarizing filter) ในการให้ฟลักรามานของแต่ละองค์ประกอบแยกกัน สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นชนิดแอนไอโซทรอปิก จะให้ฟลักรามานและความเข้มของฟลักที่ขึ้นกับทิศทางการจัดเรียงตัวในสารตัวอย่าง อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (Depolarization ratio) สำหรับฟลักรามานหนึ่งๆ นิยามได้ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน} = I_{\text{perpendicular}}/I_{\text{parallel}}$$

$I_{\text{perpendicular}}$ คือความเข้มการกระเจิงแสงรามานเมื่อทิศทางการดีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ

I_{parallel} คือความเข้มการกระเจิงแสงรามานเมื่อทิศทางการดีโพลาไรเซชันขนานกับแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ

ข้อมูลเหล่านี้แสดงถึงรูปแบบการสั่นและโครงสร้างของสารตัวอย่าง (Tanaka & Young, 2006)

5. เครื่องมือวิเคราะห์รามาน

เครื่องมือวิเคราะห์รามานประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (laser source) อุปกรณ์ใส่สารตัวอย่าง (sample holder) อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (interferometer) ตัวตรวจวัด (detector) อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณ (data processing) และอุปกรณ์แสดงผล (read out) สัญญาณฟลักรามานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของแหล่งกำเนิดแสง จึงมีการนำแสงเลเซอร์ ซึ่งมีสมบัติเป็นแสงสีเดียวและความเข้มมากมาใช้ จึงทำให้มีการนำเทคนิครามานมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง แสงเลเซอร์ที่นำมาใช้ในเครื่องรามานคือ ฮีเลียม/นีออนเลเซอร์ (633 nm) อาร์กอนเลเซอร์ (488 nm) และคริปตอนเลเซอร์ (532 nm) ความเข้มของการกระเจิงด้วยรามานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของแสงกระตุ้นยกกำลังสี่หรือสามารถเขียนในรูปความยาวคลื่นคือ $1/\lambda^4$ ความถี่สัมพันธ์กับเลขคลื่นดังสมการ

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{f}{\mu}}$$

$\bar{\nu}$ คือ เลขคลื่นของการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด (cm^{-1})

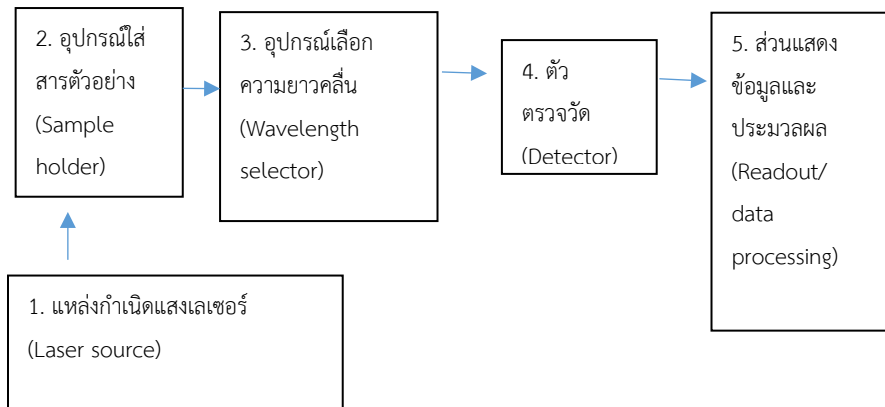
c คือ ความเร็วแสง (cm/s)

f คือ ค่าคงที่ของแรงของพันธะ (dyne/cm)

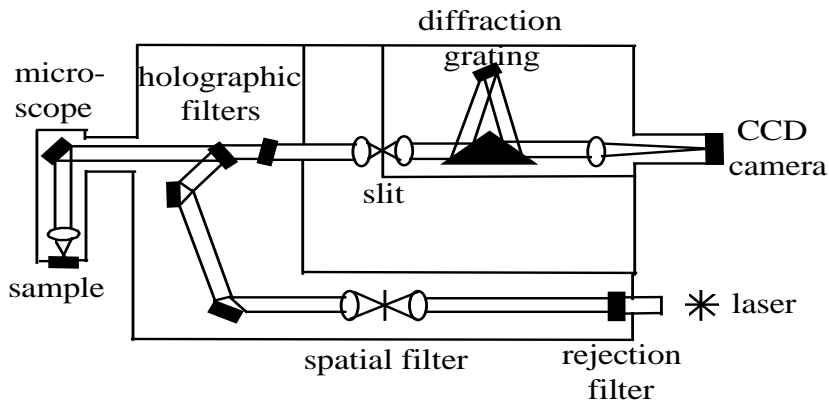
μ คือ มวลลดทอน (g) (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

แสงความยาวคลื่นต่ำ เลเซอร์สีน้ำเงินและเขียว จึงมีประโยชน์มากกว่าแสงเลเซอร์สีแดงฮีเลียม/

นีออนเลเซอร์ ข้อเสียของแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นสั้นคือ การเกิดการสลายตัวของสารตัวอย่าง หรืออาจทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์ นอกจากนี้ NIR เลเซอร์ (Near infrared laser) เช่น Nd/YAG (1064 nm) และ 785 nm ไดโอดเลเซอร์ มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างบางชนิด เช่น สารชีวภาพ เพราะไม่ทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์ หรือไม่ทำให้เกิดการสลายตัว ระบบสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจายแสงแสดงดั่งภาพที่ 5 มีการใช้ตัวกรองสัญญาณแสง (Holographic interference filters) (ภาพที่ 5 ส่วนที่ 3) เพื่อช่วยลดการกระเจิงแสงแบบ Rayleigh ไม่ให้เข้าไปในตัวตรวจวัด อย่างไรก็ตามระบบกระจายแสงโดยทั่วไปจะใช้ Visible เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง ตัวตรวจวัดที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น charge injection device (CID) หรือ (charge-coupled device (CCD) ต้องมีการหล่อเย็นตัวตรวจวัด การแยกของพีก (resolution) บอกลึถึงรายละเอียดที่เราเห็นในพีกรามาน ถ้าการแยกต่ำจะไม่สามารถแยกพีกสารประกอบที่คล้ายๆ กันได้ ถ้าการแยกมากเกินไป พีกจะถูกรบกวนทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ดี การแยกของพีกขึ้นอยู่กับเกรตติ้ง หรืออุปกรณ์ทางแสงที่ออกแบบมาในเครื่อง ภาพที่ 6 แสดงแผนผังเครื่องมือรามานผลิตจากบริษัท Renishaw



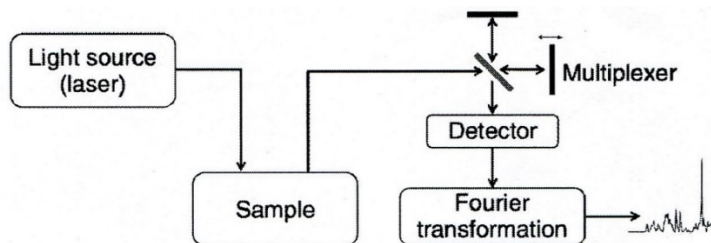
ภาพที่ 5 แผนผังเครื่องมือวิเคราะห์รามาน
ที่มา: Robinson, Frame, & Frame II, (2014)



ภาพที่ 6 แผนผังเครื่องรามาณผลิตจากบริษัท Renishaw
ที่มา: Prasithphol, (2004)

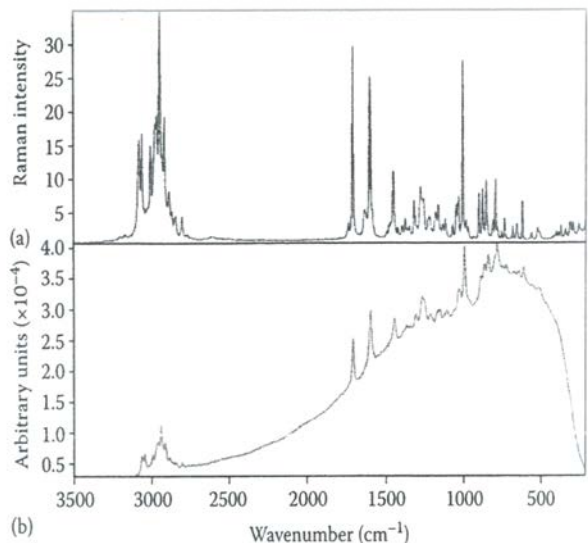
เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มรามาณ (FT- raman)

เครื่อง FT-raman (ภาพที่ 7) โดยปกติจะใช้แหล่งกำเนิดแสง NIR เลเซอร์ (near infrared laser) เช่น Nd/YAG เลเซอร์ ตัวตรวจวัดที่ใช้เช่น Ge หรือ InGaAs สำหรับ FT-raman (Vandenabeele, 2013) จะให้ปริมาณแสงออกมาสูง มีการตรวจวัดที่ความยาวคลื่นต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน (signal to noise ratio) โดยการเฉลี่ยสัญญาณและมีความแม่นยำของความยาวคลื่นที่ตรวจวัดในเครื่อง การใช้ NIR เลเซอร์ ช่วยลดการเกิดฟลูออเรสเซนส์ในตัวอย่งได้ เพราะ NIR เลเซอร์มีพลังงานต่ำ ไม่ทำให้เกิดสถานะเสมือน (virtual state) ที่ไปซ้อนเกยกับสถานะกระตุ้นทางไฟฟ้า (excited electronic state) เหมือนกับเลเซอร์ในช่วงที่ตามองเห็น NIR เลเซอร์จึงไม่ทำให้เกิดฟลูออเรสเซนส์ ภาพที่ 8(a) คือฟิกรามาณที่ได้จาก FT-raman และภาพที่ 8(b) แสดงพีคที่เกิดฟลูออเรสเซนส์ ที่ต่ำกว่า 2000 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันที่พบในโคเคนในภาพที่ 8 ได้มีผู้รวบรวมไว้ในเอกสารอ้างอิง (Penido, et al., 2016) เครื่อง FT-raman ใช้งานได้ดีกับสารที่เกิดฟลูออเรสเซนส์หรือมีสารปนเปื้อนที่เกิดฟลูออเรสเซนส์ได้ FT-raman จึง ใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ยา (Vandenabeele, 2013; Robinson, Frame, & Frame II, 2014)



ภาพที่ 7 แผนผังเครื่องมือ FT-raman

ที่มา: Vandenabeele, (2013)



ภาพที่ 8 สเปกตรัมโคเคน (a) ภาพที่ได้จาก FT-Raman (b) ภาพได้จาก 785 nm จากเครื่องรามานแบบกระจายแสงและมีการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

ที่มา: Robinson, Frame, & Frame II, (2014)

6. การเตรียมตัวอย่าง

เทคนิครามานสามารถใช้วิเคราะห์สารที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตรได้ (Arthisree et al., 2021) เนื่องจากแสงเลเซอร์สามารถโฟกัสเป็นจุดเล็กๆ ได้ สารตัวอย่างของเหลวสามารถใส่ในบีกเกอร์ หลอดทดลอง หลอดแก้วควมพิลารี หรือหลอดสำหรับวิเคราะห์โดยนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR) ได้ สารตัวอย่างที่เป็น สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Qiao et al., 2021) สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานได้ เพราะน้ำ กระเจิงแสงรามานได้ต่ำ ซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือเทคนิค IR สเปกโทรสโกปี ตัวทำละลายที่ใช้ได้กับเทคนิครามานคือ คลอโรฟอร์ม คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อะซิโตนไนโตรล และคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Robinson, Frame, & Frame, 2014) สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งสามารถบรรจุใส่หลอดควมพิลารี ถุงพลาสติก หรือ ขวดที่เป็นแก้วได้ ถ้าเป็นสารจำพวกเส้นใย สามารถทดสอบได้โดยตรง (Prasithphol, 2004) โดยอาจวาง บนกระจกนาฬิกาและใช้ลำแสงโฟกัสไปยังเส้นใยได้โดยตรง สารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส ต้องใส่ในแก๊สเซลล์ สารตัวอย่างบางชนิดต้องใส่ในอุปกรณ์ที่หมุนได้ เพื่อกระจายแสงเลเซอร์ที่ผ่านไปยังสารตัวอย่าง เพื่อ ป้องกันการสลายตัวเนื่องจากถูกแสงเลเซอร์พลังงานสูง การหมุนสารตัวอย่างขณะทดสอบใช้กับเรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปี ภาพที่ 9 และภาพที่10 แสดง IR และ รามานสเปกตรัมของน้ำ ส่วนการทดสอบ

ด้วย IR สามารถหยดของเหลวลงบนแผ่นเกลือเกิดเป็นฟิล์มบาง แผ่นเกลือที่ใช้คือ NaCl KBr AgCl ถ้าสารตัวอย่างมีน้ำ ต้องไล่น้ำออกก่อนที่จะบรรจุในเซลล์สำหรับการวิเคราะห์ด้วย IR เพราะแผ่นเกลือละลายน้ำได้ ส่วนสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งสามารถเตรียมเพื่อทดสอบด้วย IR โดยบดผสมกับ KBr แล้วอัดด้วยความดันสูงเป็นแผ่นกลม โดย KBr ต้องใช้เป็น IR เกรดและต้องอบก่อนใช้ (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิครามานต้องมีการวัดความเข้มของฟลักรามานแล้วสร้างกราฟสอบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับความเข้มของฟลัก โดยความเข้มของฟลักรามานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นดังสมการ

$$I = KJV^4c$$

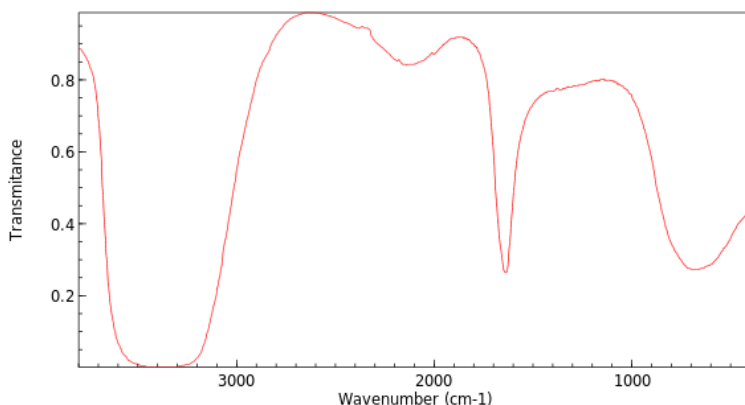
โดย I คือความเข้มของสัญญาณรามานที่ความถี่ V

K คือ ค่าคงที่สัดส่วนซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของเครื่องมือ เช่น กำลังของแสงเลเซอร์ที่ใช้

J คือ ค่าคงที่การกระเจิงแสงของฟลักรามาน

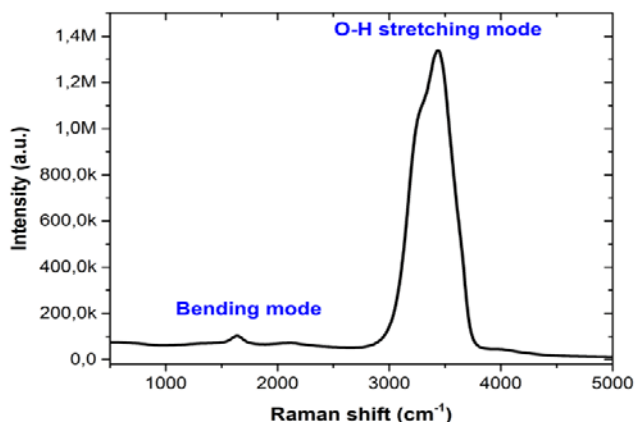
V คือ ความถี่การกระเจิงแสงของฟลักรามาน

c คือ ความเข้มข้นของสารตัวที่วิเคราะห์ (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)



ภาพที่ 9 แสดง IR สเปกตรัมของน้ำ

ที่มา: Nist chemistry webbook, (2022๗)



ภาพที่ 10 รามานสเปกตรัมของน้ำ

ที่มา: Le, 2017

7. การเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสงเพื่อขยายสัญญาณรามาน

การเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้เกิดการกระเจิงแสงได้ดี ทำให้สามารถวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยได้ เช่น การวิเคราะห์หินทางนิติวิทยาศาสตร์ (Braz et al., 2013) หรือสามารถวิเคราะห์สารที่เจือจางได้ ชัดจำกัด สำหรับการวิเคราะห์การเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสงอยู่ในระดับนาโนกรัม

การเพิ่มความเข้มของสัญญาณการกระเจิงแสงมีสองวิธีคือ 1. เพิ่มการเกิดเรโซแนนซ์โดยการเลือกใช้แสงเลเซอร์ที่เหมาะสมกับชนิดของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ 2. เพิ่มพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดการกระเจิงแสงโดยทำให้สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์สัมผัสหรือถูกดูดซับอยู่บนสับสเตรทโลหะ (metal substrate) ทำให้เกิดอันตรกิริยาของแสงเลเซอร์กับการสั่นของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะที่เกิดอันตรกิริยากับสารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ ทำให้สัญญาณรามานเพิ่มขึ้นโดยขนาดของอนุภาคโลหะที่ใช้ต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ฉายลงไปยังอนุภาคโลหะ โลหะที่ใช้ทำพื้นผิวเพื่อเพิ่มสัญญาณรามานคือ ทอง เงิน ทองแดง แพลทินัม พัลลาเดียม (Vandenabeele, 2013) (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

7.1 การเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสงเพื่อขยายสัญญาณรามานด้วยวิธีการทางเคมี

วิธีนี้จะทำให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ถูกดูดซับอยู่บนผิวโลหะ อันตรกิริยาของโมเลกุลสารตัวอย่างที่ถูกวิเคราะห์กับสับสเตรท จะทำให้สัญญาณรามานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเราใช้สารเคลือบเป็นสารละลายและเนื่องจากน้ำมีแรงดึงผิว จะทำให้การเคลือบเกิดไม่ดี อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวโลหะกับสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์อาจเป็นการดูดซับทางกายภาพโดยมีอันตรกิริยา เช่น แรงไดโพล แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เป็นต้น หรือการดูดซับทางเคมีจะมีการเกิดพันธะเคมีระหว่างสับสเตรท

และสารที่จะถูกวิเคราะห์ ทำให้เราเห็นพันธะนี้ในรามานสเปกตรัมได้ จึงต้องมีการเปรียบเทียบสเปกตรัมนี้กับสเปกตรัมของเนื้อสารที่จะวิเคราะห์ นอกจากนี้การเกิดพันธะดังกล่าวอาจทำให้เกิดการเลื่อนของพีคได้

อีกปัจจัยหนึ่งคือปัจจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัว สารที่มีการจัดเรียงตัวที่ดี จะทำให้มีสัญญาณรามานที่เข้มข้น ซึ่งปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาของสารตัวอย่างกับสับสเตรท เช่น สับสเตรทเกิดอันตรกิริยากับ π -electron ของโมเลกุลเบนซีน ทำให้เบนซีนจัดเรียงตัวขนานกับพื้นผิวของสับสเตรท (Vandenabeele, 2013)

นอกจากนี้ระดับพลังงานของโมเลกุลอาจเลื่อน ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของโมเลกุลสารตัวอย่างกับโลหะที่เป็นสับสเตรท ทำให้กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนของโมเลกุลถูกรบกวน ทำให้ระดับพลังงานเลื่อนไปจากเดิมและเกิดเรโซแนนซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณรามานเข้มข้น และมากไปกว่านั้น ในระหว่างการฉายแสงเลเซอร์ จะมีการถูกกระตุ้นของแถบการนำไฟฟ้าของโลหะที่ใช้ จึงทำให้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างการสั่นที่สถานะพื้นของโมเลกุลและแถบการนำไฟฟ้าของโลหะ (Vandenabeele, 2013)

7.2 การเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรามานที่ตรวจวัดได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ใช้ ถ้าโมเลกุลถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์พลังงานสูง กล่าวคือมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สั้นมาก จะทำให้สามารถเพิ่มสัญญาณรามานได้เมื่อสารตัวอย่างเคลือบด้วยโลหะที่มีผิวขรุขระแล้วถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์ความเข้มสูง เนื่องจากอิเล็กตรอนบนผิวของอนุภาคโลหะได้รับแรงกระทำและมีการเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง และอิเล็กตรอนสั่นเฟสเดียวกับ (in phase) รั้งสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ ทำให้เกิดสิ่งที่เรียกว่า surface plasmon และสร้างสนามไฟฟ้าที่สั้นด้วยความถี่เดียวกับความถี่อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ ทำให้เกิดสัญญาณรามานเพิ่มขึ้น

การเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงแสงของโลหะที่ใช้ โดยโลหะควรจะต้องสะท้อนช่วงความถี่ของแสงเลเซอร์ได้ดี โดยทั่วไปจะใช้ Ag สับสเตรทกับเลเซอร์สีน้ำเงินหรือสีเขียว Au สับสเตรทใช้กับเลเซอร์แสงสีแดง นอกจากนั้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาครวมทั้งความขรุขระของพื้นผิวโลหะก็เป็นสิ่งสำคัญในการที่จะเพิ่มสัญญาณรามาน ขนาดอนุภาคโลหะต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของเลเซอร์มากๆ รูปร่างของอนุภาคโลหะก็มีความสำคัญเพราะทำให้พื้นผิวมีความโค้งต่างกันได้ (Vandenabeele, 2013)

การเตรียมสับสเตรทสำหรับการเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสง

สับสเตรทมีอายุที่จำกัดและสลายตัวได้เมื่อเวลาผ่านไป เช่นเกิดการรวมตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น พื้นผิวโลหะถูกออกซิไดซ์ หรือพื้นผิวอาจปนเปื้อนด้วยสารที่อยู่ในบรรยากาศ จึงต้องเตรียมก่อนการทดสอบ หรือต้องเก็บในบรรยากาศที่เฉื่อยเป็นเวลา 2-3 วัน ถึง 2-3 สัปดาห์ได้ สารที่ใช้เตรียมสับสเตรทต้องบริสุทธิ์มากและเตรียมตามขั้นตอนอย่างระมัดระวัง มิเช่นนั้นจะทำให้รูปร่างและขนาดอนุภาคเปลี่ยนแปลงได้ ส่งผลให้สัญญาณรามานไม่ตี และต้องระวังสารปนเปื้อนที่ทำให้รูปร่างอนุภาค

เปลี่ยนไป

สับสเตรทที่ใช้โดยทั่วไปคือ คอลลอยด์ของอนุภาคโลหะ โดยอนุภาคโลหะจะเก็บในรูปแบบสารแขวนลอยและมีการควบคุมการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคโลหะ การเตรียมเริ่มจากเกลือของโลหะจะถูกรีดิวซ์ภายใต้สภาวะที่ควบคุม และควบคุมคุณภาพโดยใช้ UV-Visible สเปกโทรสโกปี การควบคุมคุณภาพทำได้โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับพลังงานที่ต่างกันที่เกิดขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

วิธีการเตรียมทำได้โดยใช้สารละลายคอลลอยด์โลหะ 2-3 ไมโครลิตร (เส้นผ่าศูนย์กลางโลหะขนาด 20-100 นาโนเมตร) แขวนลอยในสารละลาย ในปริมาณเท่ากับสารตัวอย่างที่เราต้องการวิเคราะห์ แล้วนำไปเคลือบบนแผ่นกระจกที่สะอาด แล้วทำให้แห้ง แล้วจึงนำไปฉายแสงเลเซอร์ได้ การเตรียมต้องใช้เครื่องแก้วที่สะอาดมาก ต้องเตรียมอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างที่ต้องการ คอลลอยด์และอุปกรณ์บรรจุสารตัวอย่างสามารถซื้อได้จากบริษัทที่ขายเครื่องมือรามาาน (Vandenabeele, 2013) (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

การเตรียมชิ้นงานสับสเตรทอีกวิธีหนึ่งคือการทำให้อนุภาคโลหะระเหยและตกตะกอนบนผิวสับสเตรทแก้วหรือสับสเตรทเงิน แล้วทำให้เย็นตัวลง หลังจากนั้นจึงเคลือบด้วยสารละลายของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ต้องเก็บสิ่งที่เตรียมได้ในบรรยากาศที่เฉื่อยในสุญญากาศ เพื่อป้องกันความชื้นหรือออกซิเจนที่ทำให้พื้นผิวชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างอีกวิธีหนึ่งคือการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยวิธีการนี้ใช้อิเล็กโทรดเงิน นำมาขัดแล้วประกอบเข้ากับเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีสารละลาย KCl และอิเล็กโทรดอีกอันหนึ่งคืออิเล็กโทรดคาโลเมล (Kalomel electrode) พื้นผิวของอิเล็กโทรดจะถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หลายๆ ครั้ง ในขั้นตอนแรกพื้นผิวของเงินถูกออกซิไดซ์เป็น Ag^+ และต่อมา Ag^+ ถูกรีดิวซ์ที่ผิวของโลหะเงิน (Ag^0) ในขั้นแรกผิวของโลหะถูกออกซิไดซ์ และส่วนของอิเล็กโทรดถูกนำลงไปในสารละลาย ต่อมาไอออนในสารละลายถูกทำให้ตกตะกอนที่พื้นผิวและถูกรีดิวซ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหลายๆ รอบพื้นผิวที่เตรียมจะถูกนำออกมาจากเซลล์ แล้วล้างด้วยน้ำและสารตัวอย่างที่จะทำการทดสอบจะสัมผัสกับผิวขรุขระของโลหะที่เตรียมได้ (Vandenabeele, 2013)

การกัดผิวโดยใช้กรดไนตริกเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเตรียมชิ้นงานเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสง จะทำให้ผิวชิ้นงานขรุขระ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายแต่การเพิ่มของสัญญาณรามาานไม่ดีเท่ากับการเตรียมชิ้นงานโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Vandenabeele, 2013) (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)

8. ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเทคนิครามาน และเทคนิค IR

ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่างเทคนิครามานและเทคนิค IR

รามานสเปกโทรสโกปี	IR สเปกโทรสโกปี
1.รามานสเปกโทรสโกปีขึ้นกับการเปลี่ยนแปลง polarizability ของโมเลกุล	1. IR ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุล
2.รามานสเปกโทรสโกปีคือปรากฏการณ์กระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่นเพื่อตรวจวัดการสั่นของโมเลกุล ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล	2. IR เกี่ยวกับการดูดกลืนแสง การส่งผ่านแสง หรือการสะท้อนรังสี IR ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล
3.รามานว่องไวกับโมเลกุลที่มีนิวเคลียสเหมือนกัน เช่น พันธะ C-C C=C	3. IR ว่องไวกับหมู่ที่มีอะตอมของนิวเคลียสต่างกัน และพันธะมีขั้ว เช่น C-Cl
4.การเตรียมตัวอย่างทำได้ง่ายหรืออาจจะไม่ต้องเตรียมตัวอย่างเลย สามารถนำชิ้นงานไปวัดได้โดยตรงเลย (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)	4. IR ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง (Robinson, Frame, & Frame II, 2014)
5.เทคนิครามานทดสอบแล้วอาจจะเกิดฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์	5. IR ไม่เกิดฟลูออเรสเซนซ์
6.ใช้ตรวจสอบสารที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ได้โดยไม่ต้องเปิดบรรจุภัณฑ์ (Gupta et al., 2021)	6. ใช้วิเคราะห์โดยต้องฉายรังสีผ่านสารที่เตรียมตัวอย่างแล้ว
7.วิเคราะห์สารที่มีน้ำได้ (Qiao et al., 2021)	7. เกิดฟีกเนื่องจากน้ำทำให้บดบังรายละเอียดที่ต้องการศึกษาได้

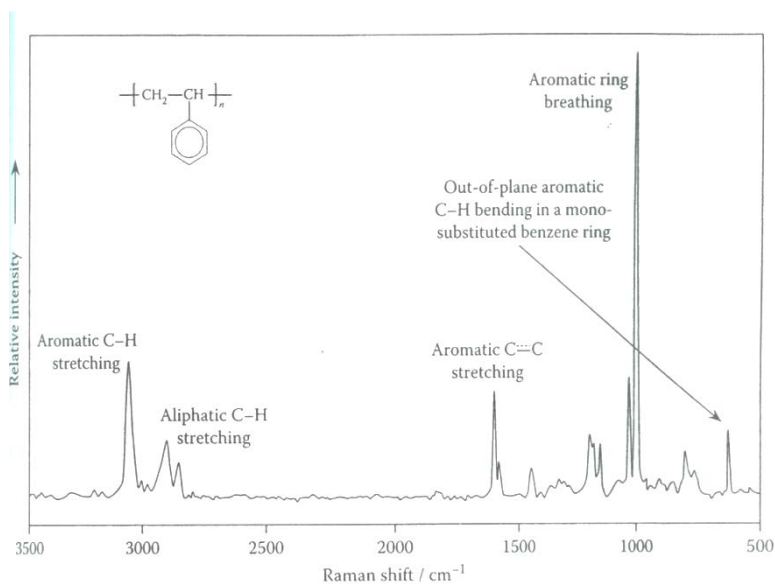
9. การประยุกต์ใช้รามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิครามานสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ทั้งในเชิงคุณภาพและในเชิงปริมาณ สามารถใช้วิเคราะห์สารในระหว่างกระบวนการผลิตได้ สามารถวิเคราะห์ภาพทางเคมี (chemical imaging) ในสารประกอบอินทรีย์ (Qiao et al., 2021) อนินทรีย์ โลหะอินทรีย์ พอลิเมอร์ (Arthisree et al., 2021) สารชีวภาพ และสารนาโนคาร์บอนได้ (Farnsworth et al., 2021) รวมทั้งใช้วิเคราะห์ในเชิงนิติวิทยาศาสตร์ได้อีกด้วย (Braz et al., 2013) โดยวิเคราะห์สารระเบิด ยาเสพติด และวิเคราะห์สารจำนวนมากน้อยจำพวกผม น้ำหมึกและเส้นใยต่างๆ (Prasithphol, 2004)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิครามานต้องมีการวัดความเข้มของฟิกรามาน และมีการใช้กราฟสอบเทียบ (Du et al., 2021) เพื่อสร้างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารและความเข้มของฟิกรามานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร นอกจากนี้เทคนิครามานยังใช้หาร้อย

ละความเป็นผลึกในพอลิเมอร์ได้ (Robinson, Frame, & Frame II, 2014) เนื่องจากความถี่และความเข้มของพิกจะเลื่อนเมื่อความเป็นอัญฐานของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปจนกระทั่งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยเทคนิครามานเป็นส่วนเติมเต็มของเทคนิค IR สเปกโทรสโกปี เทคนิครามานว่องไวกับการวิเคราะห์โครงสร้างหลักของโมเลกุล (molecular backbone) พิกการเลื่อนของเลขคลื่นรามานจะเท่ากับพิกเลขคลื่นการดูดกลืนรังสี IR สำหรับการสั่นที่เดียวกัน รามานสเปกโตรสโกปีใช้สำหรับบอกหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของสารอินทรีย์ (Du et al., 2021) อนินทรีย์และพอลิเมอร์ได้สามารถใช้เป็นรอยพิมพ์นิ้วมือ (fingerprint) ได้ในทำนองเดียวกับ IR เช่นภาพที่ 11 แสดงรามานสเปกตรัมของพอลิสไตรีน รามานสเปกโตรสโกปีสามารถใช้ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดสายโซ่เชื่อมโยงในการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ ใช้ศึกษาโครงสร้างของพอลิเมอร์ การเกิดผลึกในพอลิเมอร์ ศึกษาคอนฟอร์เมชันของสายโซ่พอลิเมอร์ แอนไอโซโทรปีในวัสดุพอลิเมอร์ศึกษาโดยใช้โพลาไรซ์รามาน และยังใช้ศึกษากลศาสตร์การเสียรูปทรงระดับจุลภาคของเส้นใยพอลิเมอร์และคอมโพสิตเพราะพิกรามานเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต่ำลงเมื่อให้ความเค้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน (Prasithphol, 2004) พบว่าพันธะคู่และพันธะสามว่องไวกับการเปลี่ยนแปลงความเค้น



ภาพที่ 11 รามานสเปกตรัมของพอลิสไตรีน

ที่มา: Young & Lovell, (2011)

จำนวนแบนด์ใน IR กับรามานเหมือนกันคือ 3N-6 แบนด์ สำหรับโมเลกุลไม่เป็นเส้นตรง และ 3N-5 สำหรับโมเลกุลเป็นเส้นตรง โดย N คือจำนวนอะตอม และอาจมีจำนวนแบนด์น้อยลงเนื่องจากการมีพลังงานเท่ากัน และการมีโหมดที่ไม่ถูกกระตุ้น รามานแบนด์จะไม่แสดงการรวมกันของแบนด์ จะปรากฏ

พิกเช่นนี้มีความเข้มที่ต่ำกว่า IR พิกที่เข้มใน IR จะมีความเข้มที่ต่ำในแบนด์ของรามาน และพิกที่ปรากฏเข้มในรามาน จะเป็นพิกที่มีความเข้มที่ต่ำใน IR โมเลกุลที่มีศูนย์กลางที่สมมาตร เช่น CO₂ จะเป็นไปตามอีกกฎหนึ่งคือ ถ้าแบนด์ปรากฏใน IR จะไม่ปรากฏแบนด์ในรามาน สิ่งที่กลับกันก็เป็นจริง การยืดที่สมมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ จะปรากฏพิกในรามาน แต่ไม่ปรากฏพิกใน IR ขณะที่การยืดแบบไม่สมมาตร จะปรากฏพิกใน IR แต่ไม่ปรากฏพิกในรามาน

รามานเป็นเครื่องมือที่ดีมากในการวิเคราะห์สารที่มีความแตกต่างทางเคมีแม้เพียงเล็กน้อยก็ตามสามารถใช้ รามานในการบอกความแตกต่างของไอโซเมอร์ สารแอนไฮเดรต และไฮเดรตได้ และยังใช้วิเคราะห์สารที่มีความแตกต่างทางเคมีที่ต่างกันน้อยๆ ได้ ความเข้มของพิกรามานคือสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารที่ไม่รู้จัก โดยทั่วไปจะทำทั้ง IR และรามาน หรือจับคู่รามานกับฐานข้อมูลรามานที่มีในเครื่องมือวิเคราะห์ การลบสเปกตรัมของสารที่เรารู้ออกจากสารที่เราไม่รู้เพื่อหาสารประกอบในของผสมนั้น ใช้งานได้ดีกับเทคนิครามานเมื่อเทียบกับ IR พบว่ารามานให้พิกที่คมชัดทั้งตำแหน่งและรูปร่างของพิกเนื่องจากไม่ถูกรบกวนโดยพันธะไฮโดรเจน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
<p>มีผู้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนด้วยกละมาะพร้าว และใช้เป็นตัวเติมในเส้นใยพอลิเมอร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ในการทดลองนี้ มีการประยุกต์ใช้รามานในการศึกษาระดับการเกิดเป็นกราฟต์ของคาร์บอนกละมาะพร้าวโดยใช้แสงเลเซอร์พลังงานต่ำความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร มีการศึกษาความเข้มของพิกรามานที่ลดลงบ่งบอกถึงขนาดอนุภาคคาร์บอนที่เล็กลง</p>	<p>D แบนด์ สำหรับผงกละมาะพร้าวที่นำมาบดก่อนเกิดที่ 1323.7 cm⁻¹ G แบนด์เกิดที่ 1598.5 cm⁻¹ กราไฟต์ที่เป็นระเบียบพบ G แบนด์ที่ 1580-1600 cm⁻¹ และ D แบนด์พบที่ 1350 cm⁻¹ D แบนด์ และ G แบนด์ในอนุภาคนาโนของคาร์บอนกละมาะพร้าว แสดงถึงพอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนและกราฟต์คาร์บอนตามลำดับ D แบนด์ คือพิกของกราฟต์ ซึ่งคือพิกการยืดในระนาบของ sp² ไฮบริดคาร์บอน D แบนด์คือ บริเวณที่เป็นข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้างกราฟต์ (Umerah et al., 2020)</p>
<p>มีการศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วยกราฟีนควอนตัมดอท (GQD) พอลิ-แอนิลิน (PANI) พอลิไวนิลปิวิโรลและพอลิ (β,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน)(PEDOT) พอลิสไตรีน-</p>	<p>รามานสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมบริสุทธิ์ แสดงพิก D แบนด์และ G แบนด์ที่ 1333.39 และ 1572.37 cm⁻¹ แสดงถึงหน่วยคล้ายกราฟต์ที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ</p>

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
ซัลโฟเนต (PSS) สำหรับใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด	ของ PANI และ PEDOT:PSS ที่มารวมกันเมื่อมีการผสม GQD ในพอลิเมอร์ 0.5-1.5 wt% พบว่าความเข้มของ D แบนด์เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการรวมกันของกราฟไฟต์และส่วนที่มีไซโครกราฟไฟต์ (ส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน) ของระบบคอมโพสิตของพอลิเมอร์/GQD D แบนด์เกิดที่ 1333.39 cm^{-1} คือพีคของ sp^3 คาร์บอน และ G แบนด์เกิดที่ 1532.37 cm^{-1} คือพีคของ sp^2 คาร์บอน (Arthisree et al., 2021)
มีการใช้รามานสเปกโทรสโกปีในวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับไม้ (wood science) เนื่องจากเทคนิครามานสามารถใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายได้และสามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็ว แต่พีคการกระเจิงแสงด้วยรามานอาจเกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้ จึงมีการใช้รามานเพื่อทดสอบลิกนินโดยใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนนาโนไฟเบอร์ (PANI) รวมกับโทลูอิดีนบลู (TB) โดย TB จะเป็นตัวบ่งบอกว่ามีลิกนิน และ PANI ใช้เป็นวัสดุเสริมในงานนี้เพื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณรามานของ TB เมื่อไม่ถูกซุบด้วย TB/PANI ลิกนินในไม้จะบ่งบอกด้วย TB โดยทำให้ความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นสามเท่า	พีครามานที่ 1627 cm^{-1} พบใน TB ส่วนพีครามานที่ 1594 cm^{-1} พบใน PANI เมื่อผสม TB กับ PANI อัตราส่วน 2:1 โดยปริมาตรความเข้มของพีค TB ที่ 1627 cm^{-1} เพิ่มขึ้นจาก 3000 a.u. เป็น 8000 a.u. ทำให้บอกได้ว่ามีลิกนินได้ชัดเจนขึ้น และพบว่าลิกนินอยู่ที่หัวมุมของเซลล์ของไม้ที่ผ่านเป็นแผ่นบาง (Zhang et al., 2021)
ในระหว่างการแพร่ระบาดของโควิด-19 ทำให้ต้องมีการใช้สารฆ่าเชื้อเช่น แอลกอฮอล์สำหรับล้างมือ จึงมีการใช้ spatially offset รามานสเปกโทรสโกปี ซึ่งใช้วิเคราะห์สารที่อยู่ในขวดได้ ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ชนิดของแอลกอฮอล์ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการลบพีครามานที่ได้จากเทคนิคดั้งเดิม (พีคของบรรจุภัณฑ์) กับพีครามานที่ได้จาก offset รามานสเปกตรัม จะให้พีคของสารที่อยู่ในขวดที่ทดสอบทำให้ทราบว่าแอลกอฮอล์ชนิดใดและมีสารปนเปื้อนชนิดใดอยู่ในขวดบ้างโดยไม่ต้องเปิดขวด	พีคที่ 1130 และ 1296 cm^{-1} เป็นพีคของขวดพอลิเอทิลีน และพีคที่ 882 , 1049 , 1092 cm^{-1} เป็นพีคของแอลกอฮอล์ สำหรับเอทานอล พีคที่ 882 cm^{-1} คือพีคการยืดของพันธะ C-C พีคที่ 1049 cm^{-1} คือพีคการยืดของพันธะ C-O พีคที่ 1092 cm^{-1} คือพีคการสั่นแบบโยกของ CH_3 พีคที่ 1454 cm^{-1} คือพีคการรอกของพันธะ CH_3 ส่วนเมทานอลจะปรากฏพีคที่ 1030 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการยืดของพันธะ C-O

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
<p>แอลกอฮอล์</p>	<p>2-โพรพานอล จะปรากฏพีก 818 cm^{-1} ของการยืดของพันธะ C-C และ 950 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกการยืดของพันธะ C-O</p> <p>1-โพรพานอลจะปรากฏพีก 859 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกการยืดของพันธะ C-C และ 968 cm^{-1} เป็นพีกการยืดของพันธะ C-O</p> <p>ในเอทานอลซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหลักในสารฆ่าเชื้อบางยี่ห้อ พบเมทานอลและ 1-โพรพานอลอยู่ด้วยในปริมาณน้อย (2.5%) พีกที่พบคือ 1030 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกการยืดของ C-O ของเอทานอลเกิดพีกหัวไหล่ (shoulder) ที่ 1049 cm^{-1} และพบพีก 859 cm^{-1} และ 888 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของการยืด C-C ของ</p> <p>1-โพรพานอล ซึ่งทำให้เกิดเป็นพีกกว้างและเกิดพีกหัวไหล่ที่ 882 cm^{-1}</p> <p>(Gupta et al., 2021)</p>
<p>มีผู้วิเคราะห์เส้นผมมนุษย์โดยศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาของ ^{60}Co บนเส้นผมมนุษย์ในขนาดต่างๆ พบจากรามานสเปกตรัมว่าการฉายรังสีทำให้รูปร่างของพีกและความเข้มของพีกที่ 1370 cm^{-1} (D) และ 1589 cm^{-1} (G) เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากโครงสร้างของเส้นผมเปลี่ยนแปลงไป และมีการหาอัตราส่วนความเข้ม (I) ของทั้งสองพีกนี้เป็นฟังก์ชันกับโดสที่ให้ค่า I_D/I_G ที่ต่ำเกี่ยวข้องกับกาลลดลงของปริมาณอะตอมออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งเกิดเนื่องจากความร้อนของการฉายรังสี โดยค่า I_D คือความเข้มของพีก 1370 cm^{-1} และ I_G คือความเข้มของพีก 1589 cm^{-1}</p>	<p>งานวิจัยนี้ศึกษารามานสเปกตรัมในช่วง $0\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ พีกที่ $1370 \pm 18\text{ cm}^{-1}$ คือพีก D แบนด์ (defect band) ซึ่งเป็น พีกการสั่นในระนาบของโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก พีกที่ $1589 \pm 11\text{ cm}^{-1}$ คือพีก G แบนด์ ซึ่งเป็นพีกของกราฟิตเป็นพีกการยืดในระนาบของ sp^2 คาร์บอน พีกกว้างๆ ที่พบในช่วง $2500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ พบจากเส้นผมมนุษย์เป็นแถบความถี่เกิน (overtone band) ของ D แบนด์ และแถบความถี่เกินของพีกที่รวมกันของ D แบนด์และ G แบนด์ คือพีกที่พบในเส้นผมที่ถูกฉายรังสี (Lam et al., 2021)</p>

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา	
<p>มีผู้วิเคราะห์การใช้แวกซ์เคลือบผิวแอปเปิลเพื่อรักษาความสดใหม่ของแอปเปิล โดยแวกซ์ที่ใช้เคลือบผิว เช่น Carnuba wax ใช้เพื่อลดการแลกเปลี่ยนแก๊สลดการสูญเสียน้ำและรักษาความสดใหม่ แต่พบว่ามีการนำพาราฟินแวกซ์ซึ่งมีราคาถูก เป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็งมาใช้ จึงมีการใช้รามาน-สเปกโทรสโกปีมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของแวกซ์ที่นำมาใช้เคลือบผิวแอปเปิล รวมทั้งการวิเคราะห์ว่ามีแวกซ์ผ่านเข้าไปในเนื้อของแอปเปิลหรือไม่ โดยใช้ พิกรามานที่ 1417 ถึง 1462 cm^{-1} ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของแวกซ์และใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของแวกซ์เคลือบแอปเปิลในเชิงอุตสาหกรรมด้วย โดยในการทดลองนี้ใช้ 532 nm. และ 785 nm. เลเซอร์ ในการศึกษา</p>	<p>พีกที่พบในแวกซ์อุตสาหกรรมที่ใช้เคลือบผิวแอปเปิล</p>	<p>พีกที่พบใน Carnuba Wax</p> <p>รูปแบบของการสั่น</p> <p>การยืด C-O</p> <p>การยืด C-C</p> <p>การยืด C-C</p> <p>การยืดแบบมาตรฐานของ C-C ในวงแหวนเบนซีน</p> <p>พีกการเสียรูปของ CH_2</p> <p>พีกการเสียรูปของ CH_3</p> <p>พีกการงอแบบไม่มาตรฐานของ CH_2</p> <p>พีกการงอและการกระดิกของ CH_2</p>
	1062	1062
	1172	1132 1172 1204
	1296	1296
	1447	1418 1441
	1459	1460

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา	
	1607	พิกการยืด C-C-H ของ วงแหวน อะโรมาติก
	1632	การยืด แบบ บ สมมาตร ของ C-C
2726	2726	พิกการยืด $\text{CH}_3\text{-CH}_2$
2849	2848	การสั่น แบบ บ สมมาตร ของ CH_2
2879	2882	การสั่น แบบ บ ไม่ สมมาตร ของ CH_2
2928	2928	การสั่น แบบ บ สมมาตร ของ CH_3

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณจะนำพาราฟิน แวกซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมาเตรียมให้มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (0, 1.52, 2.88, 3.38, 5.58 และ 8.45 mg/cm^2) และทดสอบด้วยรามาน 10 สเปกตรัมต่อหนึ่งความเข้มข้น แล้วทำการหาพื้นที่ใต้พีก 1417-1462 cm^{-1} แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีกกับความเข้มข้น (ได้กราฟเส้นตรง) แล้วใช้พื้นที่ใต้พีกสอบเทียบนี้ในการหาความเข้มข้น

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
	ของแวกซ์บนผิวแอปเปิ้ลตัวอย่าง (Du et al., 2021)
มีผู้ประยุกต์ใช้รามานสเปกโทรสโกปีในการวิเคราะห์พืช โดยการหาปริมาณเม็ดสี (pigment) ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของใบชาที่บริเวณต่างๆ ของใบชา การกระจายของเม็ดสีที่ใบเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความเค็มทางสิ่งแวดล้อม เช่น คัดรูกพืช โรคพืช และโลหะหนักที่พืชได้รับ งานวิจัยนี้ศึกษาคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์โดยใช้รามานและเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของเม็ดสีในแต่ละพืชเซลล์กับโมเดลที่จัดทำขึ้น	คลอโรฟิลล์ a พบพิกที่ 788, 800, 1046, 1073, 1114, 1222, 1553 cm^{-1} ส่วนคลอโรฟิลล์ b พบพิกที่ 1128, 1160, 1210, 1380, 1465, 1523, 1567, 1644 cm^{-1} เบตาแคโรทีนพบพิกที่ 971, 1133, 1137, 1149, 1157, 1172, 1191, 1216, 1226, 1281, 1310, 1322, 1347, 1450, 1485, 1562 cm^{-1} ลูทีนพบพิกที่ 1518 cm^{-1} (Zeng et al., 2021)
ไนโตรพีนอลคือสารมลพิษที่เป็นพิษ พบในสิ่งแวดล้อมและพบว่าเป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวช้า เป็นพิษกับมนุษย์แม้ว่าได้รับเข้าไปในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงมีการหาวิธีวิเคราะห์ไนโตรพีนอลโดยใช้เครื่องมือหลากหลายชนิด เช่น โครมาโทกราฟีแบบของเหลว – แมสสเปกโทรเมทรี, โครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (HPLC) – แมสสเปกโทรเมทรี, การสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง และโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง ซึ่งเป็นวิธีที่ยากและซับซ้อน จึงได้มีผู้ประยุกต์ใช้รามานสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายกว่าในการวิเคราะห์ความแตกต่างของ o-, m-, p- ไนโตรพีนอลในเฟสที่เป็นของแข็งและเฟสที่เป็นของเหลวโดยใช้ตัวทำละลายคือเมทานอลและแอสีโตน และยังสามารวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ด้วย	สำหรับการวิเคราะห์ในเฟสที่เป็นของแข็งพบว่าพิกรามานที่ 1134 และ 1232 cm^{-1} ปรากฏในสเปกตรัมของ o-ไนโตรพีนอล และพิกที่ 1268 และ 1343 cm^{-1} พบในสเปกตรัมของ m-ไนโตรพีนอล พิกที่ 1167, 1279, 1333 และ 1430 cm^{-1} พบในสเปกตรัมของ p-ไนโตรพีนอล ส่วนการวิเคราะห์ไอโซเมอร์ในเฟสที่เป็นของเหลวโดยมีเมทานอลเป็นตัวทำละลายพบพิกที่ 1343 cm^{-1} ของ m-ไนโตรพีนอล พบพิกที่ 1333 cm^{-1} ของ p-ไนโตรพีนอล ส่วนของผสมของทั้งสามไอโซเมอร์ในเมทานอลพบพิกที่ 1343 และ 1333 cm^{-1} การวิเคราะห์ไอโซเมอร์ในเฟสของเหลวโดยมีแอสีโตนเป็นตัวทำละลายพบพิกที่ 1134 cm^{-1} ในสเปกตรัมของ o-ไนโตรพีนอล ส่วนพิกที่ 1333 พบในสเปกตรัมของ p-ไนโตรพีนอล ของผสมของทั้งสามไอโซเมอร์ ปรากฏพิกที่ 1134 และ 1333 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกของ o- และ p- ไนโตรพีนอลตามลำดับ

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
	<p>ในงานวิจัยนี้คำนวณความเข้มข้นของไอโซเมอร์ไนโตรฟินอลจากความเข้มของฟลักรามานโดยใช้ความสัมพันธ์คือ</p> $I_{\text{รามาน}} = E_0 N \eta (d\sigma_{\text{รามาน}}/d\Omega) d\Omega_{\text{det}}$ <p>โดย E_0 คือ ความเข้มแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ N คือ ความเข้มข้นของสาร</p> <p>η คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงของระบบการตรวจวัด</p> <p>$d\sigma_{\text{รามาน}}/d\Omega$ คือ พื้นที่หน้าตัดการกระเจิงแสงแบบดิฟเฟอเรนเชียล</p> <p>$d\Omega_{\text{det}}$ คือ receiving solid angle</p> <p>เมื่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ และปริมาตรในการตรวจวัดคงที่ ความเข้มของการกระเจิงแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารโดยมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง</p> <p>ในงานวิจัยนี้เตรียม m- และ p- ไนโตรฟินอลในเฟสที่เป็นของเหลวโดยมีเมทานอลเป็นตัวทำละลายโดยเตรียมที่ความเข้มข้น 0.3%, 0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%, 3.0% และ 3.6% และเตรียม o- และ p- ไนโตรฟินอลโดยมีแอซิโตนเป็นตัวทำละลาย โดยเตรียมสารละลายเข้มข้น 0.3%, 0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%, 3.0% และ 3.6% พบว่าความเข้มของฟลักรามานที่ 1343, 1333, 1134 และ 1333 cm^{-1} เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น</p> <p>ผลการหาปริมาณสารที่สนใจดังกล่าวได้ค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เตรียมซึ่งผู้วิจัยเรื่องนี้แสดงผลเป็นกราฟที่แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง</p> <p>(Qiao et al., 2021)</p>

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
<p>มีผู้ศึกษาผลของแอนติออกซิแดนซ์ของน้ำมันกานปูและน้ำมันอบเชยในการหน่วงปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโปรตีนของอาหารพร้อมปรุงเนื้อสันนอกติดกระดูก (pork chops) ระหว่างการเก็บรักษาในตู้เย็นที่ 4 ± 1 °C โดยการเคลือบเนื้อสันนอกตัวอย่างด้วยน้ำมันกานปูและอบเชยและเก็บรักษาในตู้เย็น 13 วัน งานวิจัยนี้ใช้รามานสเปกโทรสโกปีวิเคราะห์ชั้นเนื้อตัวอย่างเป็นระยะ</p>	<p>เนื้อหมูสันนอกเมื่อตรวจสอบด้วยรามานปรากฏพีกที่ 2938 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะ C-H พีกที่ 1658 cm^{-1} คือพีกการยืดของพันธะ C=C และพีกการเสีรูปของ CH_3 และ CH_2 พบที่ 1448 cm^{-1} และพีกที่ 1332 cm^{-1} บ่งบอกถึงการเสีรูปของหมูเมทิลีน พีกรามานที่ 1083 cm^{-1} แสดงถึงการสั้นของพันธะ C-C ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีก 1448 cm^{-1} และเวลาในการเก็บรักษาชั้นเนื้อหมู พบว่า พื้นที่ใต้พีกดังกล่าวลดลงเมื่อเก็บรักษาชั้นเนื้อหมูไว้ 13 วัน ซึ่งบ่งบอกถึงการเพิ่มความไม่อึดตัว และการเสีรูปของพีก C-H ผลการศึกษาพบว่าน้ำมันกานปูและน้ำมันอบเชยช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมันในเนื้อหมูได้ (Zhang et al., 2018)</p>
<p>มีการใช้รามานสเปกโทรสโกปีในการศึกษาการยึดติดของเส้นใยทวารอน (Twaron) ซึ่งเป็นเส้นใย poly(p-phenylene terephthalamide) หรือเส้นใย PPTA ว่ายึดติดกับเมทริกซ์อีพอกซี (epoxy matrix) ได้ดีเพียงใด ในงานวิจัยนี้ใช้แสงเลเซอร์ชนิด near IR ซึ่งเป็นแสงสีแดงความยาวคลื่น 785 nm. ในการศึกษาโดยไฟกัลส่าแสงลงไปยังเส้นใยที่ฝังในเมทริกซ์อีพอกซี</p>	<p>ผลการศึกษาระลอกของพีก 1610 cm^{-1} เมื่อมีการให้ความเครียด (strain) กับเส้นใยพบว่าอัตราการเลื่อนของพีกขึ้นกับมุมดูลัสของเส้นใย จากผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราการเลื่อนของพีกรามานเป็นค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวเส้นใยที่ฝังในเมทริกซ์อีพอกซี ทำให้บอกได้ว่าเส้นใย 5 ชนิดที่นำมาทดสอบที่ปรับสภาพพื้นผิวในการยึดเกาะกับเมทริกซ์อีพอกซีที่ต่างกัน เส้นใยชนิดใดยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดีที่สุด (Prasithphol, 2004)</p>
<p>มีการศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยเทคนอรา (Technora) ที่มีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยกับเส้นใยที่ไม่ได้มีการปรับสภาพพื้นผิวโดยใช้รามานสเปกโทรสโกปีโดยศึกษาการเลื่อนของพีก 1610 cm^{-1} เมื่อให้ความเครียด (strain) กับเส้นใย</p>	<p>ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราการเลื่อนของพีก 1610 cm^{-1} เป็นค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์อีพอกซีที่ใช้ฝังเส้นใยเพื่อทำวัสดุคอมโพสิต พบว่าเส้นใยเทคนอราที่ปรับสภาพพื้นผิวกับเส้นใยที่ไม่ได้มีการปรับสภาพพื้นผิวในการยึดเกาะ ไม่ได้</p>

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	ผลการศึกษา
<p>มีการประยุกต์ใช้รามานสเปกโทรสโกปีในการศึกษาความแตกต่างของน้ำหมึกที่มีองค์ประกอบต่างกันที่อยู่บนเอกสารต้องสงสัยในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ โดยใช้เทคนิคเรโซแนนซ์รามานสเปกโทรสโกปี และเทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวการกระเจิงแสง</p>	<p>แสดงความแตกต่างของค่าแรงเฉือนระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (Prasithphol, 2004)</p> <p>น้ำหมึกที่ต่างกันให้รามานสเปกตรัมที่ไม่เหมือนกัน และในงานวิจัยนี้ยังศึกษาเส้นหมึกที่ถูกขีดกากบาททับกันโดยใช้ลำแสงเลเซอร์โฟกัสที่ผิวเอกสารที่มีรอยกากบาทและโฟกัสลึกลงไปจากผิว ปรากฏว่าให้รามานสเปกตรัมที่มีรูปแบบแตกต่างกัน และนอกจากนั้นในงานวิจัยนี้นอกจากศึกษาหมึกปากกาแล้วยังศึกษารามานสเปกตรัมจากหมึกปริ้นเตอร์อีกด้วย (Braz et al., 2013)</p>

บทสรุป

เทคนิควิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี สามารถวิเคราะห์โครงสร้างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ รวมทั้งวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร โครงสร้างทางโมเลกุลของสาร องค์ประกอบทางเคมีของสาร โดยสารที่นำมาวิเคราะห์อาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลวและแก๊ส นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยไม่ต้องเปิดขวดบรรจุภัณฑ์ วิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์ วิเคราะห์ทางเคมี สิ่งแวดล้อมและยังสามารถวิเคราะห์การยึดติดของเส้นใยที่ฝังอยู่ในเมทริกซ์ของวัสดุคอมโพสิตได้ด้วย โดยวิธีการวิเคราะห์และการเตรียมตัวอย่างไม่ซับซ้อนและวิเคราะห์ได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับหลายๆ เทคนิค และยังสามารถนำเครื่องรามานชนิดพกพา ออกไปวิเคราะห์สารนอกสถานที่ได้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

Arthisree, D., Madhuri, W., Saravanan, N. B., Dinesh, B. & Saikrithika, S. (2021). A ternary polymer nanocomposite film composed of green-synthesized graphene quantum dots, polyaniline, polyvinyl butyral and poly(3,4- ethylene dioxythiophene) polystyrene sulfonate for supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 35(102333), 1-12.

Braz, A., Lopez-Lopez, M., Garcia-Ruiz. & Garcia-Ruiz, C. (2013) Raman spectroscopy for forensic analysis of inks in questioned documents. *Forensic science international*,

232, 206-212.

Du, X., Wang, S., Wang, P., Gu, Q., Xin, J., Zhang, Z., Wang, J. & Yao, C. (2020) Characterization of paraffin-waxed apples by raman spectroscopy. *Analytical Letters*, 53(2), 217-227.

Farnsworth, A., Chirima, G. & Yu, F. (2021) Raman spectroscopy: A key technique in investigating carbon-based materials. *Spectroscopy*, 36(8), 9-14.

Gupta, N., Rodriguez, J.D. & Yilmaz, H. (2021) Through – container quantitative analysis of hand sanitizers using spatially offset raman spectroscopy. *Communications Chemistry*, 4(126), 1-9.

Lam, S.E., Mat Nawi, S.N., Abdul Sani, S.F., Khandaker, M.U. & Bradley, D.A. (2021) Raman and photoluminescence spectroscopy analysis of gamma irradiated human hair. *Scientific Reports*, 11(7939), 1-10.

Larkin, P. (2011). *Infrared and Raman Spectroscopy*. Waltham, Massachusetts, USA: Elsevier.

Le, K.C. (2017). raman spectrum of pure water. Retrieved March 22, 2022 from https://www.researchgate.net/figure/Raman-spectrum-of-pure-water_fig14_331895879

Ma, P., Wang, L., Xu, L., Li, J., Zhang, X. & Chen, H. (2019) Rapid quantitative determination of chlorpyrifos pesticide residues in tomatoes by surface- enhanced raman spectroscopy. *European Food research and technology*, 246, 239-251.

Nist chemistry webbook. (2022). Retrieved March 22, 2022 from <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Type=IR-SPEC&Index=1>

Prasithphol, W. (2004). Structure of aramid fibres and their behavior in composites. Ph.D. thesis, UMIST, UK.

Penido, C .A. F. d. O., Pacheco, M. T. T. & Silveira Jr, L.S. (2016). Raman spectroscopy in forensic analysis: identification of cocaine and other illegal drugs of abuse. *Journal of raman spectroscopy*, (47), 28-38.

Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D. & Bissonnette, C. (2017). *General chemistry: principles and modern application: The periodic table and some atomic properties*. USA: Pearson Canada Inc.

Qiao, W., Tao, Jin., Peng, L., Xing, M., Yang, H., Chen, J. & Su, M. (2021) Determining nitrophenol isomers using raman spectroscopy. *Spectroscopy*, 36(10), 31-36.

Raman, C.V. (1928). A new type of secondary radiation. *Nature*, 121(3048), 501-502.

Robinson, J.W., Frame, E.M.S., & Frame II, G.M. (2014). *Undergraduate instrumental analysis:*

- Infrared, Near-Infrared, and Raman spectroscopy*. New York, USA: CRC Press.
- Tanaka, M. & Young, R.J. (2006). Review polarised raman spectroscopy for the study of molecular orientation distributions in polymers. *Journal of material science*, (41), 963-991.
- Umerah, C.O., Kodali, D., Head, S., Jeelani, S. & Rangari, V.K. (2020). Synthesis of carbon from waste coconutshell and their application as filler in bioplast polymer filaments for 3D printing. *Composite Part B*, 202, 108428.
- Vandenabeele, P. (2013). *Practical raman spectroscopy- an introduction*: Enhancement of the raman signal. Chichester, UK: John wiley & sons.
- Wenzel. T. & Charles, A.D. (2021). Raman spectroscopy. Retrieved March 22, 2022 from [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Molecular_and_Atomic_Spectroscopy_\(Wenzel\)/5%3A_Raman_Spectroscopy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Molecular_and_Atomic_Spectroscopy_(Wenzel)/5%3A_Raman_Spectroscopy)
- Young, R.J., Lovell, P.A. (2011). *Introduction to polymers: Chemical composition and molecular microstructure*. London, England: CRC press.
- Zeng, J., Ping, W., Sanaeifar, A., Xu, X., Luo, W., Sha, J., Huang, Z., Huang, Y., Liu, X., Zhan, B., Zhang, H. & Li, X. (2021). Quantitative visualization of photosynthetic pigments in tea leaves based on Raman spectroscopy and calibration model transfer. *Plant Methods*, 17(4), 1-13.
- Zhang, H., He, P., Li, X. & Kang, H. (2018). Antioxidant effect of essential oils on RTC pork chops and its evaluation by raman spectroscopy. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(5), 1-7.
- Zhang, H., Li, J., Zhou, L. & Liu, S. (2021). A novel polyaniline nanofiber combined with toluidine blue as sensitive detection platform for Lignin by raman spectroscopy. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1-9.