



การพัฒนาระบบรามานสเปกโตรสโคปีของแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร  
สำหรับวิเคราะห์แบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ

DEVELOPMENT RAMAN SPECTROSCOPY USING A 532 NANOMETRE LIGHT SOURCE  
FOR TRANSMISSION AND BACKSCATTERING

เดชะวิทย์ เปาอินทร์ เจริญฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565



การพัฒนาระบบรามานสเปกโตรสโคปีของแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร  
สำหรับวิเคราะห์แบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DEVELOPMENT RAMAN SPECTROSCOPY USING A 532 NANOMETRE LIGHT SOURCE  
FOR TRANSMISSION AND BACKSCATTERING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of MASTER OF SCIENCE  
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบรามานสเปกโตรสโคปีของแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

สำหรับวิเคราะห์แบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ

ของ

เดชะวิทย์ เปาอินทร์ เจริญฤทธิ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ)
..... ที่ปรึกษาร่วม	..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์)	(รองศาสตราจารย์ ดร.สมค์ร์ พิमानแพง)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนากระบวนการสเปกโตรสโคปีของแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร สำหรับวิเคราะห์แบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ
ผู้วิจัย	เดชะวิทย์ เปาอินทร์ เจริญฤทธิ์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ พลายุพิชิต
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรวุฒิ วิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาและออกแบบระบบรามานสเปกโตรสโคปี รามานสเปกโตรสโคปีเป็นสเปกโตรสโคปีรูปแบบหนึ่งที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารจากปรากฏการณ์การกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่นของโมเลกุล เรียกว่า การกระเจิงรามาน การกระเจิงรามานจะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปจากความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ โดยความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปสัมพันธ์กับพลังงานการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้การกระเจิงรามานสามารถให้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของสารในตัวอย่างได้ โครงสร้างของระบบรามานสเปกโตรสโคปีประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวหรือเลเซอร์ สำหรับกระตุ้นตัวอย่างสารให้เกิดการกระเจิงรามาน เนื่องจากแสงที่การกระเจิงรามานมีค่าที่น้อยมาก (ประมาณ 1 ใน  $10^7$  ของแสงกระเจิงทั้งหมด) จึงต้องมีฟิลเตอร์ตัดแสงเพื่อทำการตัดความยาวคลื่นแหล่งกำเนิดแสงออกไป อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของรามานสเปกโตรสโคปี นั่นคือ สัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงของตัวอย่าง ซึ่งจะบดบังสัญญาณรามานสเปกตรัมของสาร ทำให้คุณภาพของสัญญาณรามานที่ได้มีความไม่ชัดเจน ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขด้วยการเลือกใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมและเทคนิคที่ใช้วัดตัวอย่าง เทคนิคที่ใช้วัดในระบบรามานสเปกโตรสโคปี ได้แก่ เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ เป็นเทคนิคที่รวบรวมข้อมูลสัญญาณรามานที่สะท้อนจากพื้นผิวตัวอย่าง และเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน เป็นเทคนิคที่ใช้แสงกระตุ้นภายในตัวอย่างสารและรวบรวมข้อมูลสัญญาณที่ด้านตรงข้ามแหล่งกำเนิดแสง เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับจะให้ความเข้มสัญญาณรามานที่สูงสำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่านจะเกิดสัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงที่ต่ำเหมาะสำหรับตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีความสม่ำเสมอ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาและออกแบบระบบรามานสเปกโตรสโคปีที่รวมเอาโครงสร้างของทั้งสองเทคนิคการวัดเข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้สามารถวัดทั้งสองเทคนิคได้ในระบบเดียว และเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบระบบ ได้แก่ ยาพาราเซตามอลและสารละลายอะซิโตน ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถให้ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างได้ถูกต้องทั้งการวัดเชิงคุณภาพและการวัดเชิงปริมาณ

คำสำคัญ : การกระเจิงรามาน รามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน รามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ

Title	DEVELOPMENT RAMAN SPECTROSCOPY USING A 532 NANOMETRE LIGHT SOURCE FOR TRANSMISSION AND BACKSCATTERING
Author	TACHAWIT PAO-IN CHAROENRIT
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Suwan Plaipichit
Co Advisor	Assistant Professor Dr. Surawut Wicharn

This research concerns the development and design of a Raman spectroscopy system. Raman spectroscopy is a spectroscopy that examines the chemical makeup of substances using the Raman scattering phenomenon, an inelastic light-scattering property of molecules. The wavelength of Raman scattering is different from the wavelength of incident light. The vibrational energy and changing wavelengths of intramolecular bonds are connected. The structure of the Raman spectroscopy system was comprised of a laser or single-frequency light source that stimulates the sample to produce Raman scattering. A cut-off filter is needed to obstruct the wavelength of the light source since the light at Raman scattering is so minute (about  $1/10^7$  of the total scattered light). However, a significant drawback of Raman spectroscopy is the fluorescence noise of the sample, which masks the Raman spectrum substance, leading to the poor Raman signal quality received by choosing the proper wavelength and measurement method, and such issues can be fixed. Backscattering Raman spectroscopy is one of the measurement methods used in Raman spectroscopy. It is a method for gathering data on the Raman signal reflected off the surface of the sample and the transmission of Raman spectroscopy. The excitation light is used inside a sample in this method, and signal data is gathered on the other side of the light source. Backscattering Raman spectroscopy provides high Raman intensity for solid and homogeneous samples. Transmission Raman spectroscopy, on the other hand, produces low luminescence noise, which is suitable for inhomogeneous and non-uniform samples. In this study, the researchers created and devised a Raman spectroscopy system that combined the structural elements of two measuring techniques to enable the measurement of both in a single system. According to the test results, the system can accurately deliver Raman spectra of samples for both qualitative and quantitative analyses.

Keyword : Raman scattering Backscattering Raman spectroscopy Transmission Raman spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่องจากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรอุฒิ วิจารณ์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญาานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา รวมทั้ง รองศาสตราจารย์

ดร.สมศักดิ์ พิमानแพง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ เพื่อนร่วมงาน ที่บัณฑิตวิทยาลัยสำหรับข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงความช่วยเหลือและกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อน ๆ สาขาวิชาฟิสิกส์ รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

เดชะวิทย์ เปาอินทร์ เจริญฤทธิ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่จะได้รับ .....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
วรรณกรรม ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 การกระเจิงแสงแบบรามาน .....	4
2.2 ทฤษฎีการกระเจิงแบบรามาน.....	5
2.2.1 ทฤษฎีคลื่น(Wave Theory).....	5
2.2.2 ทฤษฎีอนุภาค(Particle Theory) .....	7
2.3 การสั้นของโมเลกุล .....	9
2.4. กฎการเลี้ยว .....	13
2.5 รามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับและแบบส่งผ่าน.....	14

บทที่ 3.....	16
วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 การออกแบบการทดลอง .....	16
3.2 ขั้นตอนเตรียมการดำเนินงาน .....	18
3.3 ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง .....	19
บทที่ 4.....	20
ผลการวิจัย .....	20
4.1 การวัดตัวอย่างสารเชิงคุณภาพ .....	20
4.1.1. ยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม .....	20
4.1.2. สารละลายอะซีโตน .....	25
4.2 การวัดตัวอย่างสารเชิงปริมาณ.....	29
4.2.1. ยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม .....	29
4.2.2. สารละลายอะซีโตน .....	31
บทที่ 5.....	34
สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	34
5.1 สรุปผล .....	34
5.1.1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ .....	34
5.1.2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ.....	35
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	37
บรรณานุกรม.....	2
ประวัติผู้เขียน .....	5

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 เปรียบเทียบเทคนิค Backscattering Raman Spectroscopy และ Transmission Raman Spectroscopy .....	15
ตาราง 2 เปรียบเทียบค่าการเลี้ยวรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอลเทียบกับ ตัวอย่าง A .....	24
ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าการเลี้ยวรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอลเทียบกับ ตัวอย่าง B .....	24
ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าการเลี้ยวรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอลเทียบกับ ตัวอย่าง C .....	25
ตาราง 5 เปรียบเทียบค่าการเลี้ยวรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของอะซิโตนเทียบกับตัวอย่าง สารละลายอะซิโตน .....	28

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ปราบกฏการณ์การกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบกับ โมเลกุล .....	5
ภาพประกอบ 2 ปราบกฏการณ์การกระเจิงเรย์ลีและการกระเจิงรามาน .....	8
ภาพประกอบ 3 รูปแบบการสั่นของโมเลกุล.....	10
ภาพประกอบ 4 ระบบเต็มทีที่ประกอบระบบ Transmission Raman system และระบบ Backscattering Raman system เข้าด้วยกัน .....	16
ภาพประกอบ 5 ระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน (Transmission Raman system).....	17
ภาพประกอบ 6 ระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ (Backscattering Raman system) ..	17
ภาพประกอบ 7 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ A เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ .....	20
ภาพประกอบ 8 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ B เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ .....	21
ภาพประกอบ 9 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ C เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ .....	21
ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมรามานมาตรฐานของพาราเซตามอล .....	23
ภาพประกอบ 11 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของสารละลายอะซิโตนความเข้มข้น 1,3,5,7,9 และ 11 M(mol/dm <sup>3</sup> ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ.....	26
ภาพประกอบ 12 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของสารละลายอะซิโตนความเข้มข้น 1,3,5,7,9 และ 11 M(mol/dm <sup>3</sup> ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน .....	26
ภาพประกอบ 13 สเปกตรัมรามานมาตรฐานของอะซิโตน.....	27
ภาพประกอบ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลื่อนรามานและความเข้มสัญญาณรามานของพาราเซตามอลของตัวอย่างเม็ดยาทั้งสามยี่ห้อ เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ.....	29
ภาพประกอบ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลื่อนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของพาราเซตามอลของตัวอย่างเม็ดยาทั้งสามยี่ห้อ เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน .....	30

ภาพประกอบ 16 กราฟเปรียบเทียบพีคความเข้มของรามานฟลักของยาพาราเซตามอลทั้งสามชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ .....	30
ภาพประกอบ 17 กราฟเปรียบเทียบพีคความเข้มของรามานฟลักของยาพาราเซตามอลทั้งสามชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน .....	31
ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรามานฟลักของอะซิโตนกับ โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ.....	32
ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรามานฟลักของอะซิโตนกับ โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน.....	32



# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

**รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)** เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโมเลกุล เนื่องจากสเปกตรัมของรามานบอกข้อมูลในส่วนของการสั่นภายในโมเลกุล หรือการสั่นภายในโครงผลึกตาข่าย (Buckley & Matousek, 2011; Raman & Krishnan, 1928) เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการศึกษาวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สได้ (Drescher & Kneipp, 2012) เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีมีข้อดีคือเป็นเทคนิคการวัดที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง และไม่ต้องทำการเตรียมสารตัวอย่าง โดยต้องการเพียงแค่แหล่งกำเนิดแสงสำหรับฉายแสงไปยังวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทำการวัด ก็สามารถให้ข้อมูลของสารที่ต้องการวัดได้ และยังสามารถวัดสารตัวอย่างที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยเทคนิค **อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy)** ได้อีกด้วย เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีได้ถูกพัฒนาให้มีการประมวลผลที่สามารถกำจัดการกระเจิงแสงของหีบห่อโปร่งใสออก เช่น แก้วหรือพลาสติกออกได้ (Eliasson et al., 2008) และได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ หรือวิเคราะห์องค์ประกอบทางด้านเคมีของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ การจำแนกวัตถุพยานหรือจำแนกยาเสพติดในงานด้านอาชญากรรมวิเคราะห์องค์ประกอบของยา ใช้พิสูจน์หรือจำแนกยาชนิดต่าง ๆ ใช้หาสารพิษในน้ำ และยังสามารถจำแนกประเภทของอัญมณีหรือหาสิ่งปนเปื้อนในเนื้ออัญมณีได้อีกด้วย

**เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน (Transmission Raman spectroscopy: TRS)** เป็นเทคนิคประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นพร้อมสัญญาณที่อยู่ด้านตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสงซึ่งสามารถประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ทางด้านเภสัชกรรม โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง มีความสะดวกรวดเร็ว สามารถใช้ในการตรวจสอบสารตัวอย่างที่ละลายในน้ำ และมีศักยภาพในการวิเคราะห์วัสดุที่ไม่ดูดกลืนแสง จึงนำไปสู่การใช้ในงานในด้านอื่น อาทิ การปรับปรุงสูตรยา รวมทั้งการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารตั้งต้นและสารปรุงแต่งในยาได้ (Hargreaves et

al., 2011) เมื่อเปรียบเทียบกับ **เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ** (Backscattering Raman spectroscopy: BRS) ซึ่งเป็นเทคนิครวบรวมสัญญาณที่อยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง ผลเสียคือมีความไวต่อการเรืองแสงมาก ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการใช้ **เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี** (Near Infrared spectroscopy: NIR) เพื่อลดการเรืองแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Cullum et al., 2000)

เนื่องจากเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับมีข้อดีคือ สัญญาณของรามานสเปกตรัมที่ได้จะให้ความเข้มของสัญญาณรามานที่มากกว่าเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน เหมาะสมกับการวัดตัวอย่างที่เป็นของแข็งที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่านมีข้อดีคือ สัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงจะน้อยกว่าเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ และเหมาะสมกับการวัดตัวอย่างที่ไม่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น สารละลาย จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้คิดออกแบบระบบรามานสเปกโตรสโคปีที่สามารถรวมเอาเทคนิคทั้งสองแบบเข้าเป็นระบบเดียวกันได้ ซึ่งระบบที่ออกแบบนี้มีข้อดีคือ เป็นระบบที่สามารถวัดได้ทั้งสองเทคนิค ทำให้ไม่ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนเทคนิคการวัด และสามารถเลือกเทคนิคการวัดที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่แตกต่างกันได้

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบรามานสเปกโทรสโคปีที่สามารถวัดแบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับได้ในระบบเดียวกัน
- 1.2.2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายอะซิโตนกับความเข้มสัญญาณรามานของอะซิโตน รวมทั้งศึกษาความเข้มสัญญาณรามานของพาราเซตามอลจากตัวอย่างยาพาราเซตามอลทั้งสามชนิด
- 1.2.3. ศึกษา เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการวัดของยาพาราเซตามอลและสารละลายอะซิโตนด้วยระบบกระเจิงกลับและระบบส่งผ่าน

### ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.3.1. ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีมากขึ้น
- 1.3.2. สามารถพัฒนาระบบการวัดที่รวมเอาเทคนิคทั้งสองแบบเข้าไว้ด้วยกันได้
- 1.3.3. สามารถวัดความเข้มข้นของสารละลายอะซีโตนด้วยระบบรามานได้

### ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1. ศึกษาเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีทั้งแบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ
- 1.4.2. ออกแบบและสร้างระบบที่รวมทั้งสองเทคนิคเข้าด้วยกันโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรได้
- 1.4.3. ระบบที่ออกแบบสามารถระบุสเปกตรัมรามานของพาราเซตามอลได้อย่างถูกต้องและสามารถวิเคราะห์ผลการวัดเชิงปริมาณได้
- 1.4.4. ระบบที่ออกแบบสามารถระบุรามานสเปกตรัมรามานของอะซีโตนและสามารถแยกแยะความเข้มข้นของสารละลายอะซีโตนได้อย่างถูกต้อง

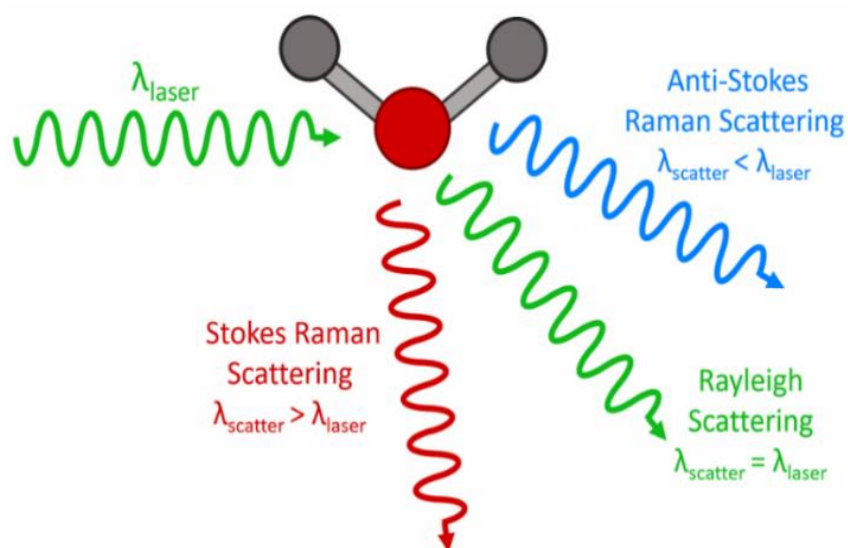


## บทที่ 2

### วรรณกรรม ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การกระเจิงแสงแบบรามาน

เมื่อแสงตกกระทบกับสสาร แสงจะทำอันตรกิริยากับสสาร หากแสงที่ชนกับโมเลกุลมีพลังงานที่สอดคล้องกันกับระดับชั้นพลังงานของโมเลกุลของสาร โมเลกุลจะดูดกลืนแสงและเข้าสู่สถานะกระตุ้น จากนั้นโมเลกุลจะกลับสู่สถานะพื้นโดยปล่อยโฟตอนของแสงที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างระดับชั้นพลังงานของโมเลกุล อย่างไรก็ตาม แสงสามารถทำอันตรกิริยากับโมเลกุลของสสารและเกิดการกระเจิงได้โดยไม่จำเป็นต้องมีพลังงานที่สอดคล้องกับระดับชั้นพลังงานของโมเลกุล ซึ่งแสงส่วนใหญ่ที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานที่เท่ากับพลังงานของแสงที่ตกกระทบ เรียกว่า **การกระเจิงเรย์ลี (Rayleigh Scattering)** ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนของแสงกับโมเลกุลของสาร ขณะเดียวกัน ลำแสงที่กระเจิงออกมานั้น มีโฟตอนของแสงจำนวนหนึ่งซึ่งมีค่าที่น้อยมากๆ (ประมาณ 1 ใน  $10^7$ ) เกิดการกระเจิงที่เรียกว่า **การกระเจิงรามาน (Raman Scattering)** การกระเจิงชนิดนี้เกิดขึ้นจากการชนอย่างไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนของแสงกับโมเลกุลของสาร ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกัน หลังจากเกิดการชนกัน โฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยแสงส่วนที่ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น เรียกว่า **การกระเจิงแบบสโตกส์ (Stokes Scattering)** และแสงส่วนที่ความยาวคลื่นลดลง เรียกว่า **การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์ (Anti-Stokes Scattering)** (Ewen Smith & Geoffrey Dent, 2005) ดังแสดงในภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ปรากฏการณ์การกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบกับโมเลกุล

ที่มา : <https://www.edinst.com/blog/what-is-raman-spectroscopy/> (สืบค้นเมื่อวันที่

13 มกราคม พ.ศ 2566)

## 2.2 ทฤษฎีการกระเจิงแบบรามาน

### 2.2.1 ทฤษฎีคลื่น(Wave Theory)

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนเข้ากับโมเลกุลของสาร สนามไฟฟ้าของรังสีจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในพันธะระหว่างอิเล็กตรอนที่มีประจุลบกับนิวเคลียสไอที่มีประจุบวก เหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนและนิวเคลียสไอเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าและเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่ค่าหนึ่ง (ความถี่การสั่นเท่ากับความถี่ของรังสี) การสั่นของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการแยกกันของประจุ เรียกว่า **ไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้า(Electric Dipole Moment)** ขึ้นภายในพันธะของโมเลกุล

กำหนดให้  $\vec{\mu}$  แทนโมเมนต์ไฟฟ้าในพันธะของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำ เมื่อโมเลกุลอยู่ในสนามไฟฟ้าของรังสีที่มีขนาดของสนามไฟฟ้า  $E$  โมเมนต์ไฟฟ้าของโมเลกุลจะแปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\bar{\mu} = \alpha \bar{E} \quad (1)$$

$\alpha$  คือ **สภาพมีขั้วได้**(Polarizability) ของพันธะ เป็นการวัดความผิดปกติของสนามไฟฟ้า

สำหรับรังสี ขนาดสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฟังก์ชันโคไซน์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$|\bar{E}| = E_0 \cos(2\pi\nu t) \quad (2)$$

เมื่อ  $E_0$  คือ แอมพลิจูดสูงสุดของคลื่น และ  $\nu$  คือ ความถี่ของคลื่น

สภาพมีขั้วของโมเลกุลจะเปลี่ยนไปเมื่อโมเลกุลที่มีสองอะตอมเกิดการสั่นแบบยืดหด สภาพมีขั้วของอะตอมจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอะตอม โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างนิวคลีไอและอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อพันธะหดสั้นลง ระหว่างที่พันธะของโมเลกุลเกิดการสั่นแบบยืดหดนี้ ค่า  $\alpha$  ของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นจังหวะด้วยอัตราเร็วที่กำหนด โดยอนุพันธ์ย่อยของสภาพมีขั้วได้เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง  $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right)$  สภาพมีขั้วได้ขณะใดขณะหนึ่งเขียนแทนด้วย

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) r_0 \cos(2\pi\nu_m t) \quad (3)$$

เมื่อ  $r_0$  คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมที่ตำแหน่งสมดุล และ  $\nu_m$  คือความถี่การสั่นของโมเลกุล

แทนค่าสมการ (2) และสมการ (3) ในสมการ (1) จะได้

$$\bar{\mu} = \left[ \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) r_0 \cos(2\pi\nu_m t) \right] \left[ E_0 \cos(2\pi\nu t) \right]$$

$$\bar{\mu} = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu t) + \left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) r_0 \cos(2\pi\nu_m t) \right] \left[ E_0 \cos(2\pi\nu t) \right] \quad (4)$$

จากความสัมพันธ์ของเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

$$\cos \theta_1 \cos \theta_2 = \frac{1}{2} \left[ \cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2) \right] \quad (5)$$

แทนค่าลงใน (4) จะได้ว่า

$$\bar{\mu} = \alpha_0 \bar{E}_0 \cos(2\pi\nu t) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \bar{E}_0 \bar{r}_0 \cos^{-1} 2\pi t (\nu_m + \nu) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \bar{E}_0 \bar{r}_0 \cos^{-1} 2\pi t (\nu_m - \nu) \quad (6)$$

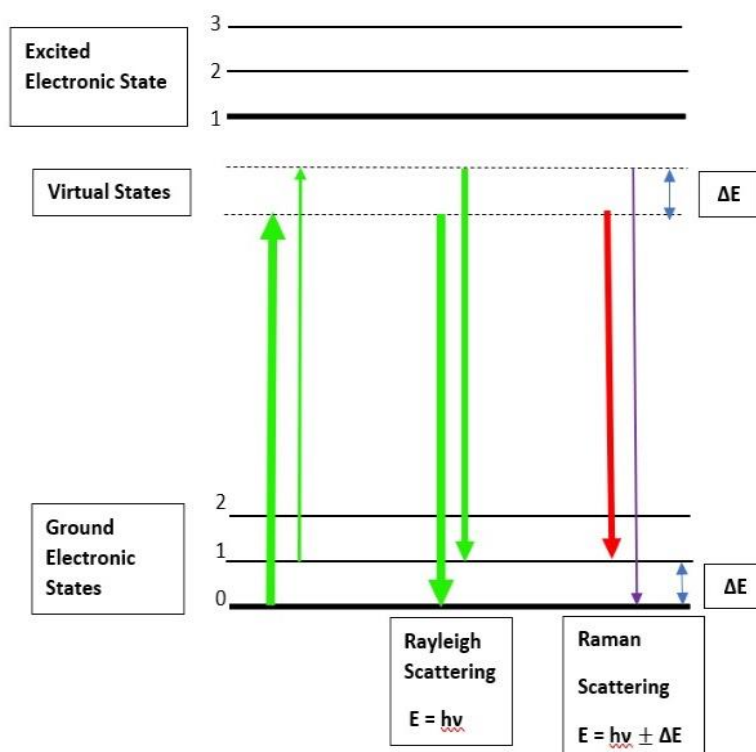
เทอมแรกของสมการ (6) จะให้ผลลัพธ์เป็นการกระเจิงเรย์ลี ส่วนเทอมที่สองและสาม จะให้การกระเจิงรามาน ได้แก่ การกระเจิงแบบสโตกส์ และการกระเจิงแบบแอนติสโตกส์ ตามลำดับ โดยความถี่คลื่นของแสงที่กระเจิงออกมาจะมีค่าที่เปลี่ยนไปเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุล  $\nu_m$  ซึ่งการกระเจิงแบบรามานทั้งสองแบบจะเกิดขึ้นได้เมื่อการสั่นของพันธะของโมเลกุลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพมีขั้วของโมเลกุลที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง  $\left( \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)$  ไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าการสั่นของพันธะนั้นเป็น Raman Active (ไชยสุต, 1998)

## 2.2.2 ทฤษฎีอนุภาค (Particle Theory)

จากทฤษฎีคลื่น สามารถทำนายการเกิดขึ้นของการกระเจิงแบบสโตกส์และแอนติสโตกส์ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว การกระเจิงแบบสโตกส์จะมีความเข้มมากกว่าการกระเจิงแบบแอนติสโตกส์ ซึ่งทฤษฎีคลื่นไม่สามารถอธิบายได้ ดังนั้น เราจึงใช้ทฤษฎีอนุภาคเพื่ออธิบาย

แสงสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคได้ เรียกว่า โฟตอน เมื่อโฟตอนชนเข้ากับโมเลกุลของสาร การชนส่วนใหญ่จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น โฟตอนแสงที่กระเจิงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางแต่ไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงาน ส่วนโฟตอนที่เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นนั้นมีน้อยกว่ามาก โดย

พลังงานการสั่นของพันธะของโมเลกุลจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่มีความถี่เปลี่ยนไป กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วย **ภาพประกอบ 2**



ภาพประกอบ 2 ปรากฏการณ์การกระเจิงเรย์ลีและการกระเจิงรามาน

ที่มา : <http://old-book.ru.ac.th/e-book/c/CH335/ch335-7.pdf> (สืบค้นเมื่อวันที่ 13

มกราคม พ.ศ 2566)

เส้นหนาทงซ้าย แทนโฟตอนที่มีความถี่หนึ่งชนโมเลกุลที่อยู่ใน **สถานะพื้นอิเล็กทรอนิกส์** (Ground Electronic States) แล้วเปลี่ยนสถานะไปสู่ **สถานะเสมือน** (Virtual State) กระบวนการนี้มีพลังงานที่ไม่แน่นอนไม่เหมือนกับกระบวนการดูดกลืนที่เปลี่ยนสถานะไปที่ **สถานะกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์** (Excited Electronic State) เส้นบางทางซ้าย แทนพลังงานที่เปลี่ยนไปเนื่องจากโฟตอนที่มีความถี่เท่าเดิมชนกับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นและมีพลังงานการสั่นเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลที่อยู่ในสถานะนี้ (ระดับที่ 1) จะมีน้อยจึงแสดงเป็นเส้นบาง (โอกาสน้อย) เส้นทึบตรงกลางแทนการกระเจิงเรย์ลี (เปลี่ยนสถานะการสั่นจากสถานะเสมือนสู่สถานะพื้น) เส้นบางตรงกลางแทนการกระเจิงเรย์ลีเช่นกัน แต่มีโอกาสน้อยกว่า เส้นสีแดงและเส้นสีม่วงแทนการกระเจิงแบบสโตกส์และแอนติสโตกส์ ตามลำดับ ทั้งสองเส้นนี้มีความถี่ต่างจากความถี่ของการ

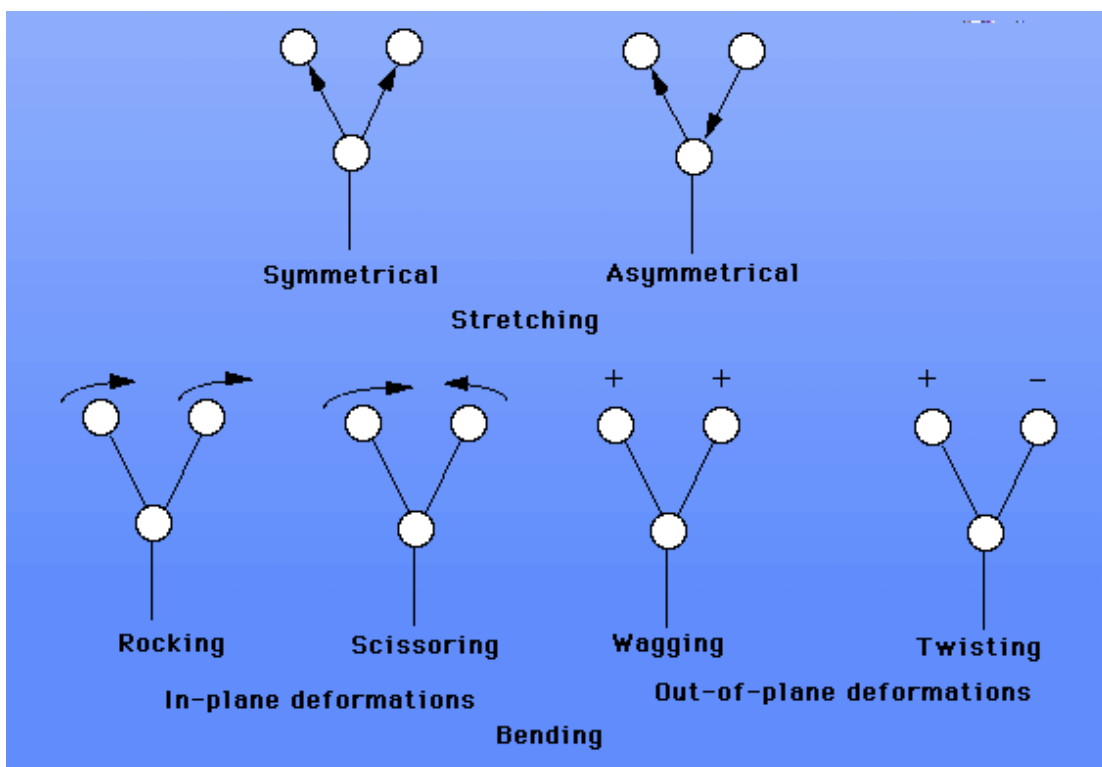
กระเจิงเรย์ลีเท่ากับ  $\pm\Delta E$  การสั่นของพันธะที่ให้ Infrared active จะมีการดูดกลืนพลังงานเท่ากับ  $\Delta E$  ความถี่ของเส้นรามานที่เลื่อนไปจึงมีค่าเท่ากับค่าของความถี่ของการดูดกลืนอินฟราเรด

จำนวนประชากรของการกระเจิงแบบสโตกส์จะมีมากกว่าแอนติสโตกส์ เส้นสโตกส์จึงแสดงด้วยเส้นที่ต่ำกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลีมีโอกาสมากกว่าการกระเจิงรามาน ความเข้มของเส้นสโตกส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเส้นสโตกส์เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น(ไชยสุต, 1998)

### 2.3 การสั่นของโมเลกุล

การสั่นของโมเลกุลเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานสอดคล้องกับความถี่ในการสั่น จะทำให้โมเลกุลขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ส่งผลให้อะตอมในโมเลกุลเคลื่อนไหว ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีความถี่ในการสั่นที่จำเพาะแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำสมบัตินี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารแต่ละชนิดได้ โดยทั่วไปโมเลกุลไม่เชิงเส้นที่มีจำนวน N อะตอม จะมีโหมดการสั่น เท่ากับ  $3N-6$  โหมด แต่โมเลกุลเชิงเส้นจะมีโหมดการสั่น  $3N-5$  โหมด เนื่องจากไม่พิจารณาการหมุนที่แกนของโมเลกุล(B. Schrader, 2008)

รูปแบบการสั่นของโมเลกุล สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ **การสั่นแบบยืดหด(Stretching vibrations)** คือการสั่นที่ทำให้ความยาวของพันธะเปลี่ยนไปเนื่องจากอะตอมเคลื่อนที่ตามแนวยาวของพันธะ โดยอาจเคลื่อนที่ออกจากกันทำให้พันธะยืดออกหรือเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้พันธะหดสั้นได้ การสั่นแบบยืดหด สามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีกสองแบบ นั่นคือ **การสั่นแบบสมมาตร(Symmetric vibrations)** และ **การสั่นแบบไม่สมมาตร(Asymmetric vibrations)** สำหรับการสั่นอีกแบบ คือ **การสั่นแบบงอ(Bending vibrations)** เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ การเปลี่ยนมุมพันธะนี้อาจเกิดการเปลี่ยนมุมบนระนาบเดียวกันหรือต่างระนาบก็ได้ สำหรับการสั่นบนระนาบเดียวกันนั้นได้แก่ การงอแบบ Scissoring และ การงอแบบ Rocking และ การสั่นแบบต่างระนาบ ได้แก่ การงอแบบ Wagging และ การงอแบบ Twisting รูปแบบการสั่นดังกล่าวไว้ข้างต้นของโมเลกุลสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 รูปแบบการสั่นของโมเลกุล

ที่มา : <http://www.shodor.org/succeed-1.0/compchem/labs/vibrations/index.html>

สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ 2566)

การสั่นของโมเลกุลสามารถพิจารณาอย่างง่ายเป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกของมวลติดสปริง โดยแทนพันธะของโมเลกุลด้วยสปริง โดยแรงของสปริงที่กระทำกับวัตถุเป็นไปตามกฎของฮุค(Hook's Law) ดังนี้

$$\vec{F} = -k\vec{x} \quad (7)$$

โดยที่  $\vec{F}$  คือแรงดึงของสปริง  $k$  คือค่าคงที่ของสปริง และ  $x$  คือการกระจัดจากตำแหน่งสมดุล เครื่องหมายลบแสดงว่าแรงที่กระทำมีทิศทางตรงข้ามกับการกระจัด

จากกฎของที่สองของนิวตัน

$$\vec{F} = m \frac{d^2\vec{x}}{dt^2} \quad (8)$$

แทนค่าลงใน (7) จะได้

$$m \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} = -k\bar{x} \quad (9)$$

$$m \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} - k\bar{x} = 0$$

$$\frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} - \omega^2 \bar{x} = 0 \quad (10)$$

เมื่อ

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) เราจะได้สมการอนุพันธ์สำหรับการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกใน 1 มิติ โดย  $\omega$  เป็นความถี่เชิงมุม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมกับคาบ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (12)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (13)$$

แทนค่า (11) ลงใน (13) จะได้

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (14)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างคาบกับความถี่ จะได้ว่า



$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (15)$$

สำหรับโมเลกุลสองอะตอม ค่าคงที่ของสปริงคือค่าคงที่ของพันธะภายในโมเลกุล มีมวลอะตอม  $m_1$  และมวล  $m_2$  การสั่นของโมเลกุลจะพิจารณามวล  $m$  ในสมการ (15) ให้เป็นมวล Reduced Mass ( $\mu$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (16)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความยาวคลื่น

$$c = \nu \lambda \quad (17)$$

เมื่อ  $c$  คืออัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

แทนค่า (17) ลงใน (15) จะได้

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (18)$$

โดยทั่วไป ความยาวคลื่นแสงมีหน่วยเป็นนาโนเมตรซึ่งสเปกตรัมรามานจะพิจารณาจากเลขคลื่น (Wavenumber ;  $\tilde{\nu}$ ) ของการสั่น มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$

$$\frac{1}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1}{\lambda(\text{cm}^{-1})} \times 10^7 = \tilde{\nu}(\text{cm}^{-1}) \times 10^7 \quad (19)$$

จากสมการที่ (17) จะได้

$$\begin{aligned}\tilde{\nu}(cm^{-1}) \times 10^7 &= \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \\ \tilde{\nu}(cm^{-1}) &= \frac{1}{2\pi c \times 10^7} \sqrt{\frac{k}{\mu}}\end{aligned}\quad (20)$$

จากสมการ (20) ค่าที่ได้จะเป็นค่าของเลขคลื่นซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานพันธะภายในโมเลกุลซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพันธะและอะตอมคู่ร่วมพันธะ (T. Shimanouchi, 1967) เมื่อเรานำค่าที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการเลื่อนรามาาน (Raman Shifting) ที่เป็นค่าที่บอกการเลื่อนของเลขคลื่นของสเปกตรัมซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (21) คือ

$$\Delta\tilde{\nu} = \left( \frac{1}{\lambda_0 (nm)} - \frac{1}{\lambda_1 (nm)} \right) \times 10^7 cm^{-1} \quad (21)$$

จะทำให้เราสามารถทราบโครงสร้างของโมเลกุลของสารจากพีคของรามานสเปกตรัมได้

#### 2.4. กฎการเลือก

กฎการเลือกอธิบายถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนชั้นพลังงานภายในโมเลกุล (Glasstone Samuel & David Lewis, 1960) สารบางชนิดเมื่อนำไปวัดโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีหรือรามานสเปกโตรสโคปี พบว่า บางโหมดของการสั่นสามารถให้สัญญาณทั้งแบบอินฟราเรดและรามาน บางโหมดของการสั่น จะให้สเปกตรัมอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยการสั่นของโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) จะเกิดสัญญาณแบบอินฟราเรด ส่วนสัญญาณรามานเกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพขั้วขึ้นมาชั่วคราว (Polarizability) (C.N. Banwell & Elaine M. McCash, 1994; Bernhard Schrader, 2008)

จากสมการที่ (6) ถ้าต้องการให้เกิดการกระเจิงรามาน ค่า  $\alpha$  ของพันธะเคมีในโมเลกุล ต้องมีค่าเปลี่ยนแปลง หรือ  $\left( \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \neq 0$  นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับระดับพลังงานการสั่น

(Vibrational level ;  $\nu$ ) ต้องมีค่า Vibrational transition เป็น  $\Delta\nu = \pm 1$  และระดับการหมุน (Rotational transition) เป็น  $\Delta J = 0, \pm 2$  ด้วย

## 2.5 รามานสเปกโทรสโคปีแบบกระเจิงกลับและแบบส่งผ่าน

รามานสเปกโทรสโคปีแบบกระเจิงกลับ (Backscattering Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคการวัดสัญญาณรามานโดยการวางเครื่องตรวจจับไว้ที่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงเพื่อรวบรวมสัญญาณที่ได้จากสารตัวอย่าง โดยเครื่องตรวจจับจะได้รับสัญญาณบริเวณพื้นผิวจากจุดที่แสงตกกระทบ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเรียบง่าย และไม่ต้องเตรียมสารตัวอย่างมากนัก ส่วนรามานสเปกโทรสโคปีแบบส่งผ่าน (Transmission Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคการวัดสัญญาณรามานโดยการวางเครื่องตรวจจับไว้ที่ด้านตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสงเพื่อรวบรวมสัญญาณรามานที่ได้จากสารตัวอย่าง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบสารตัวอย่างที่มีลักษณะโปร่งแสงและไม่ดูดกลืนแสง (Pevelen & Tranter, 2017)

ข้อดีและข้อเสียของทั้งสองเทคนิค สามารถสรุปได้ดัง **ตาราง 1**

ตาราง 1 เปรียบเทียบเทคนิค Backscattering Raman Spectroscopy และ Transmission Raman Spectroscopy

ที่มา : Pevelen and Tranter 2017) Pevelen, D. D. L. and G. E. Tranter (2017). FT-IR and Raman Spectroscopies, Polymorphism Applications.

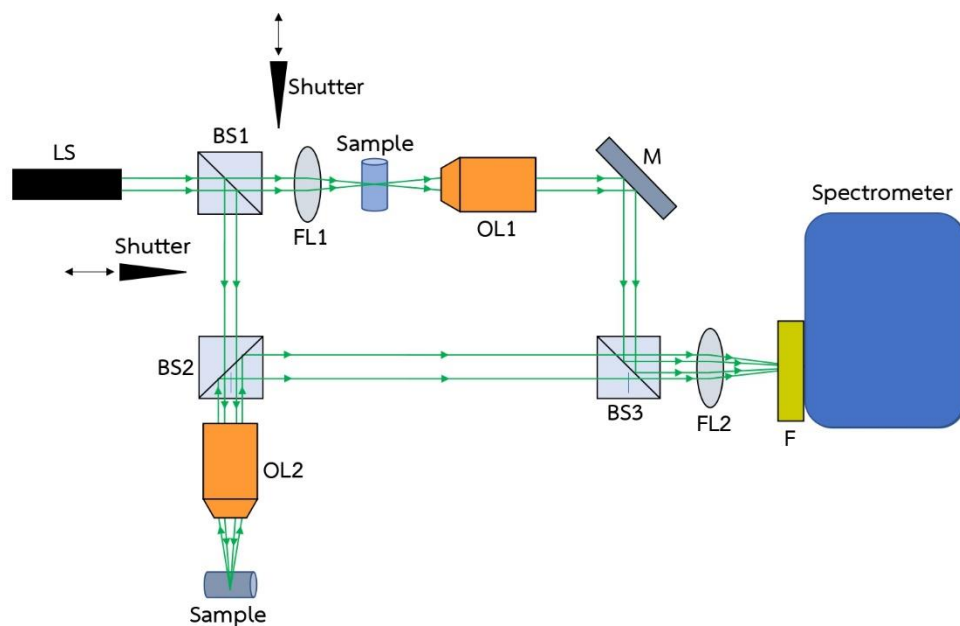
ประเภทของรามานสเปกโตรสโคปี	ข้อดี	ข้อเสีย
Backscattering Raman Spectroscopy	ความเข้มของสัญญาณมีค่าสูง เหมาะกับสารที่เป็นเนื้อเดียวกัน	ตัวอย่างต้องมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ข้อมูลที่ได้มาจากพื้นผิวของตัวอย่างมากกว่าภายในเนื้อสาร เกิดการเรืองแสงที่พื้นผิวอย่างมาก
Transmission Raman Spectroscopy	สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบภายในได้ เหมาะกับตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	ข้อมูลที่ได้มาจากภายในเนื้อสารมากกว่าพื้นผิวของตัวอย่าง ความเข้มสัญญาณมีค่าต่ำ เกิดการเรืองแสงภายในตัวอย่าง

### บทที่ 3

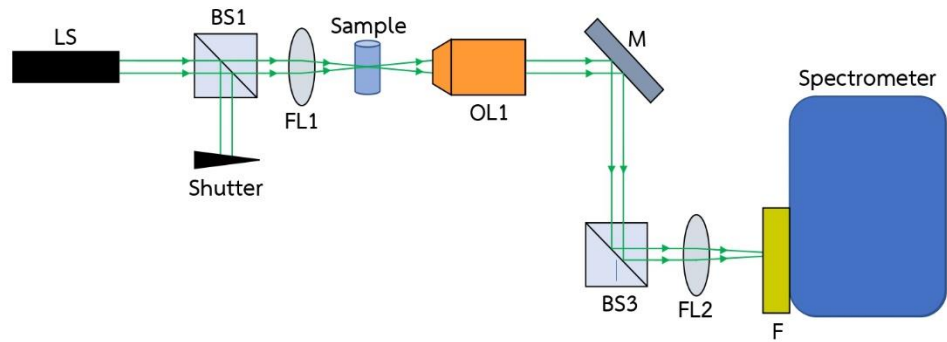
#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 การออกแบบการทดลอง

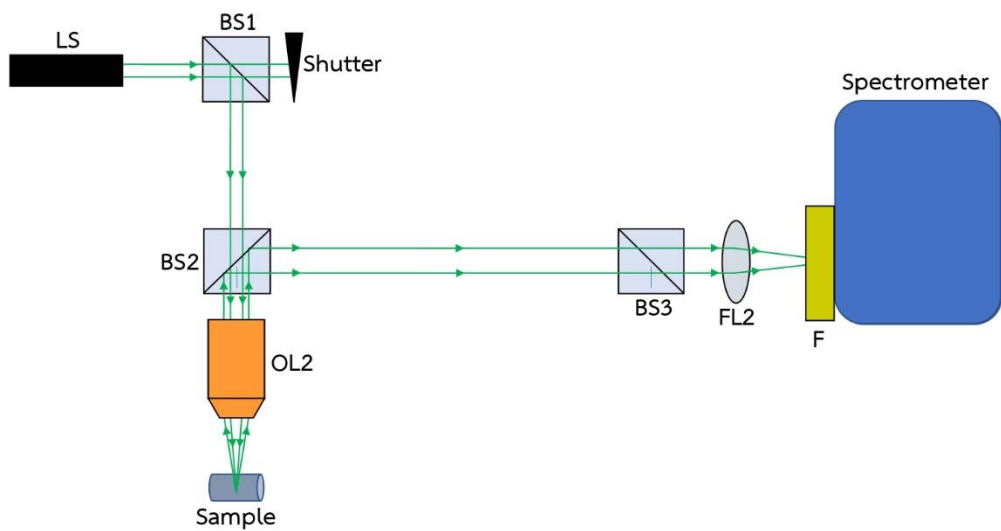
สำหรับการออกแบบระบบรามานสเปกโตรสโคปี ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบที่สามารถวัดได้ทั้งแบบส่งผ่านและแบบกระเจิงกลับ ดังภาพประกอบ 4 ที่รวมระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน(ภาพประกอบ 5)และระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ(ภาพประกอบ 6) เข้าเป็นระบบเดียวกัน



ภาพประกอบ 4 ระบบเต็มทีที่ประกอบระบบ Transmission Raman system และระบบ Backscattering Raman system เข้าด้วยกัน



ภาพประกอบ 5 ระบบรามานสเปกโตรสโกปีแบบส่งผ่าน (Transmission Raman system)



ภาพประกอบ 6 ระบบรามานสเปกโตรสโกปีแบบกระเจิงกลับ (Backscattering Raman system)

### อุปกรณ์ติดตั้งระบบ

1. ไดโอดเลเซอร์ 532 nm,100 mW (LS)	1 ชุด
2. Beam Splitter 50:50 (BS1,BS2,BS3)	3 ชุด
3. Objective Lens (OL1,OL2)	2 ชุด
4. กระจก (M)	1 บาน
5. Longpass Filter (F)	1 ชุด
6. เลนส์นูนโฟกัส (FL1,FL2)	2 ชุด
7. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)	1 เครื่อง

### 3.2 ขั้นตอนเตรียมการดำเนินงาน

3.2.1. ติดตั้งไดโอดเลเซอร์(LS) ทำการเปิดเลเซอร์ และปรับแนวของเลเซอร์จนได้ระดับความสูงเท่ากันตลอดทั้งแนวที่กำหนดไว้

3.2.2. ติดตั้ง Beam Splitter ตัวที่ 1 (BS1) ด้านหน้าไดโอดเลเซอร์หมุน Beam Splitter ให้ทำมุม 45 องศา โดยสังเกตจากลำเลเซอร์สะท้อน ทำการหมุนจนกว่าลำเลเซอร์สะท้อนจะตั้งฉากกับลำเลเซอร์ส่งผ่าน

3.2.3. ติดตั้ง Beam Splitter ตัวที่ 2 (BS2) ทำการหมุนให้ทำมุม 45 องศา (ปรับจนกว่าลำเลเซอร์สะท้อนจะตั้งฉากกับลำเลเซอร์ส่งผ่าน) ในทิศทางที่ลำเลเซอร์สะท้อนพุ่งออกจากระบบ

3.2.4. ติดตั้ง Beam Splitter ตัวที่ 3 (BS3) ทำการหมุนให้ทำมุม 45 องศา ในทิศทางที่ลำเลเซอร์สะท้อนพุ่งออกจากระบบเมื่อวัดด้วยระบบกระจกกลับและลำเลเซอร์ส่งผ่านพุ่งออกจากระบบเมื่อวัดด้วยระบบส่งผ่าน

3.2.5. ติดตั้งกระจก(M) ทำการปรับและหมุนกระจกให้ทำมุม 45 องศา โดยสะท้อนลำเลเซอร์ส่งผ่านจาก BS1 ไปยัง BS3

3.2.6. ติดตั้งเลนส์นูนโฟกัสตัวที่1(FL1) Objective Lense ตัวที่ 1 (OL1) ระหว่าง BS1 กับ M และ OL2 หน้า BS2 ที่ด้านลำเลเซอร์ส่งผ่าน

3.2.7. นำตัวอย่างพาราเซตามอลมาวัดด้วยระบบกระจกกลับ โดยวางไว้ที่ OL2 นำ Shutter ขึ้นระหว่าง BS1 กับ FL1

3.2.8. ติดตั้งเลนส์นูนโฟกัสตัวที่2(FL2) เพื่อโฟกัสสัญญาณจากตัวอย่าง และเลื่อนหา ระยะที่เหมาะสม จากนั้นนำ Spectrometer มาวางไว้ที่ตำแหน่งโฟกัสของ FL2

3.2.9. ติดตั้ง Longpass Filter(F) ด้านหน้า Spectrometer

3.2.10. ต่อสายนำสัญญาณจาก Spectrometer เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์

3.2.11. เปิดโปรแกรม BSV สังเกตสัญญาณที่ได้ ตั้งค่า Integration Time และ Boxcar(ตั้งค่าเท่ากับ 2) จากนั้นทำการปิดเลเซอร์เพื่อบันทึกข้อมูลสัญญาณแสงจาก background

3.2.12. เปิดเลเซอร์เพื่อกระตุ้นตัวอย่างและทำการลบสัญญาณแสงจาก background ที่บันทึกไว้ออกจากสัญญาณของตัวอย่างหลังจากกระตุ้นด้วยเลเซอร์ บันทึกข้อมูลปริมาณ สเปกตรัมของที่ได้จากตัวอย่างพาราเซตามอล

3.2.13. นำตัวอย่างพาราเซตามอลเดิมมาวัดด้วยระบบส่งผ่าน(สำหรับพาราเซตามอล จะต้องทำการฝนตัวอย่างให้บางพอที่เลเซอร์สามารถทะลุผ่านได้ก่อนทำการวัดด้วยระบบส่งผ่าน) นำตัวอย่างที่ฝนแล้วไปวางที่จุดโฟกัสระหว่าง FL1 และ OL1 และนำ Shutter มากั้นระหว่าง BS1 กับ BS2 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลดังข้อที่ 3.3.11. และ 3.3.12.

3.2.14. ทำการวัดตัวอย่างสารละลายอะซีโตนที่เตรียมไว้ความเข้มข้นต่างกัน มาทำ การวัดด้วยระบบกระจกกลับและระบบส่งผ่าน โดยทำตามขั้นตอนที่ 3.2.11. ถึงขั้นตอนที่ 3.2.13.

3.2.15. นำข้อมูลปริมาณสเปกตรัมของของพาราเซตามอลและสารละลายอะซีโตนมา วิเคราะห์และสรุปผล

### 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

สำหรับตัวอย่างที่ผู้วิจัยเลือกใช้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์และทดสอบระบบระบบรา มานสเปกโตรสโคปีที่ได้ออกแบบขึ้น ผู้วิจัยเลือกตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ได้แก่ ยาพาราเซตามอล ขนาด 500 มิลลิกรัม ยี่ห้อ A,B และ C และตัวอย่างที่เป็นของเหลว ได้แก่ สารละลายอะซีโตน จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยเตรียมตัวอย่างสารละลายไว้ที่ความเข้มข้น  $1 \text{ mol/dm}^3$ ,  $3 \text{ mol/dm}^3$ ,  $5 \text{ mol/dm}^3$ ,  $7 \text{ mol/dm}^3$ ,  $9 \text{ mol/dm}^3$ ,  $11 \text{ mol/dm}^3$  และ  $13 \text{ mol/dm}^3$



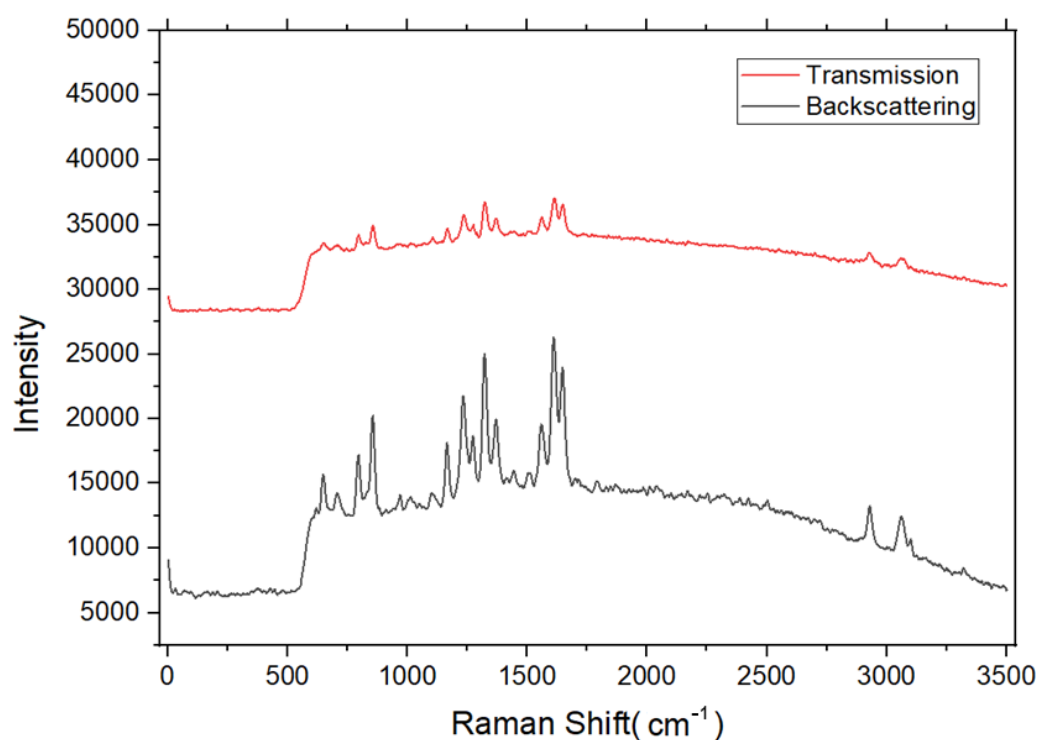
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

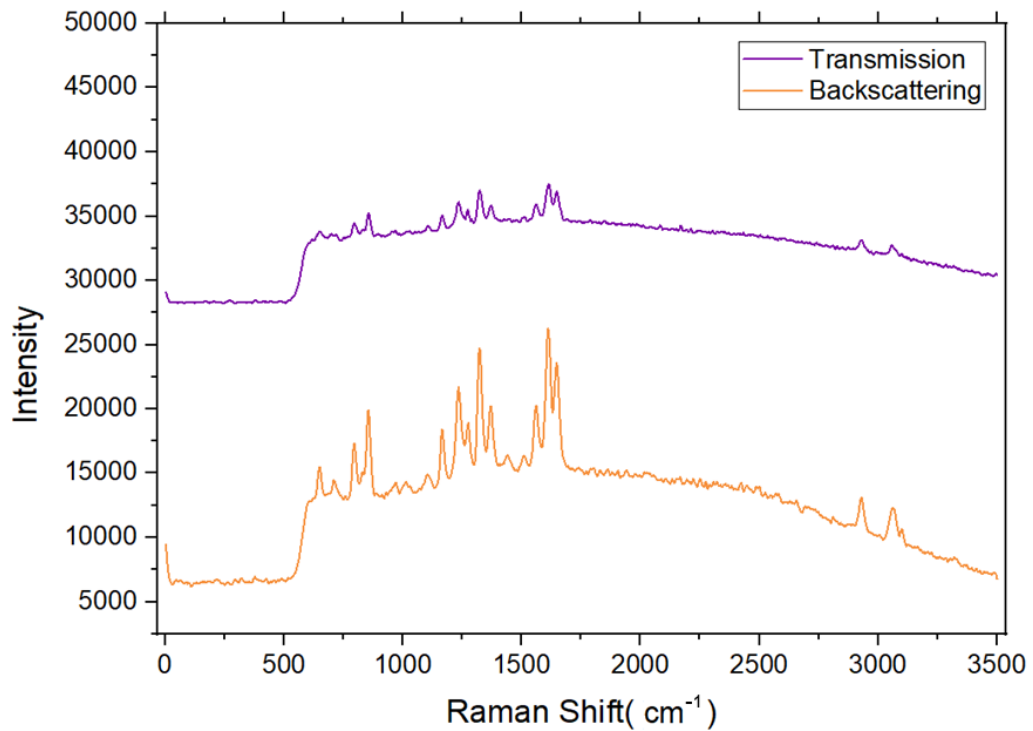
#### 4.1 การวัดตัวอย่างสารเชิงคุณภาพ

##### 4.1.1. ยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม

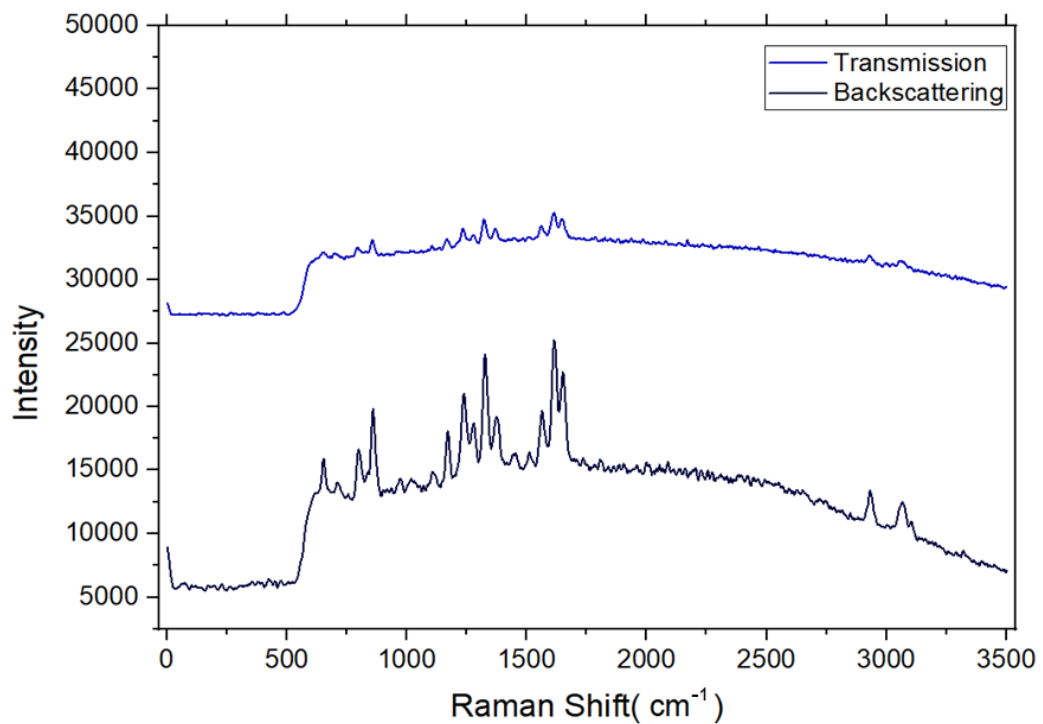
ผลการทดลองที่ได้เมื่อทำการวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์ยาพาราเซตามอลทั้งสามยี่ห้อด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีทั้งระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ โดยตั้งค่า integration time เท่ากับ 8 วินาที แสดงได้ดังภาพประกอบ 7, ภาพประกอบ 8 และภาพประกอบ 9 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 7 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ A เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ



ภาพประกอบ 8 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ B เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ



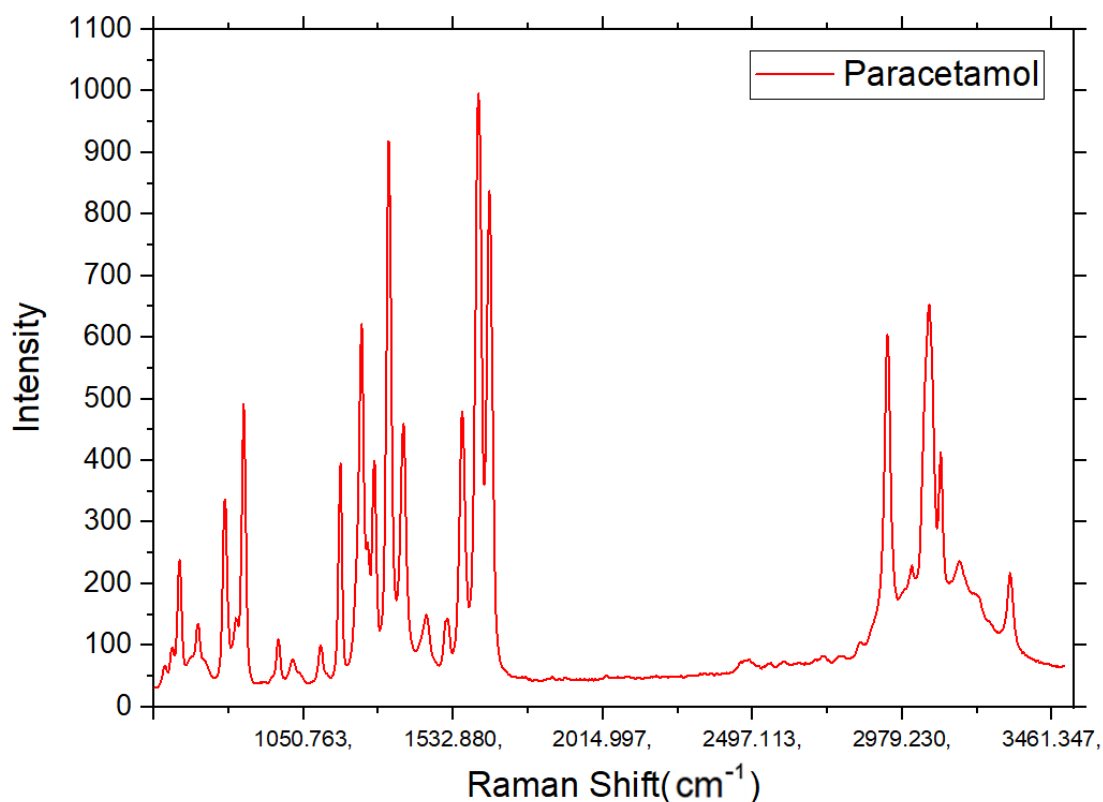
ภาพประกอบ 9 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของตัวอย่างยาพาราเซตามอลยี่ห้อ C เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ

**ภาพประกอบ 7** ผลการวิเคราะห์เม็ดยาชื่อ A ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของพาราเซตามอล พบรามานพีคที่ตำแหน่ง 1164, 1232, 1273, 1321, 1368, 1561, 1611, 1647, 2928, 3061 และ 3100  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ และพบรามานพีคที่ตำแหน่ง 1167, 1235, 1276, 1324, 1368, 1561, 1614 1647, 2925, 3058 และ 3100  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

**ภาพประกอบ 8** ผลการวิเคราะห์เม็ดยาชื่อ B ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของพาราเซตามอล พบรามานพีคที่ตำแหน่ง 1164, 1235, 1276, 1324, 1371, 1561, 1614, 1647, 2931, 3058 และ 3097  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ และพบรามานพีคที่ 1164, 1235, 1273, 1324, 1371, 1558, 1614, 1647, 2931, 3058 และ 3097  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

**ภาพประกอบ 9** ผลการวิเคราะห์เม็ดยาชื่อ C ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของพาราเซตามอล พบรามานพีคที่ตำแหน่ง 1171, 1238, 1280, 1327, 1374, 1565, 1614, 1650, 2931, 3066 และ 3105  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ และพบรามานพีคที่ 1167, 1235, 1276, 1321, 1368, 1561, 1614, 1647, 2925, 3069 และ 3097  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

พิจารณาสเปกตรัมรามานมาตรฐานของพาราเซตามอลดัง**ภาพประกอบ 10** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของพาราเซตามอล พบรามานพีคที่ตำแหน่ง 1170, 1237, 1278, 1324, 1372, 1561, 1613, 1648, 2931, 3066 และ 3102  $\text{cm}^{-1}$  โดยตำแหน่งที่ 1170  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-C ตำแหน่งที่ 1237, 1278, 1324, 1372  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-N ตำแหน่งที่ 1561, 1613, 1648  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C=C และ C=O และที่ตำแหน่ง 2931, 3066 และ 3102  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-H, N-H และ O-H



ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมรามานมาตรฐานของพาราเซตามอล

ที่มา :

[https://ruff.info/repository/sample\\_child\\_record\\_raman\\_full/by\\_minerals/Paracetamol\\_D120007\\_Broad\\_Scan\\_532\\_0\\_unoriented\\_Raman\\_Data\\_Processed\\_22504.txt](https://ruff.info/repository/sample_child_record_raman_full/by_minerals/Paracetamol_D120007_Broad_Scan_532_0_unoriented_Raman_Data_Processed_22504.txt)  
(สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ 2566)

เมื่อนำค่าการเลือนรามานของยาพาราเซตามอลทั้งสามยี่ห้อที่วิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ มาเปรียบเทียบกับค่าการเลือนรามานของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอล(พิจารณาตำแหน่งที่ 1170, 1237, 1278, 1324 และ 1372  $\text{cm}^{-1}$ ) สามารถแสดงผลได้ดังตาราง 2 , ตาราง 3 และ ตาราง 4

ตาราง 2 เปรียบเทียบค่าการเลือนรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอลเทียบกับตัวอย่าง A

ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมมาตรฐาน ของพาราเซตามอล ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง A(ระบบ กระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง A(ระบบ ส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างA( ระบบกระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างA( ระบบส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )
1170	1164	1167	6	3
1237	1232	1235	5	2
1278	1273	1276	5	2
1324	1321	1324	3	0
1372	1368	1368	4	4

ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าการเลือนรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอลเทียบกับตัวอย่าง B

ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมมาตรฐาน ของพาราเซตามอล ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง B(ระบบ กระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง B(ระบบ ส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างB( ระบบกระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างB( ระบบส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )
1170	1164	1167	6	3
1237	1238	1235	1	2
1278	1280	1276	2	2
1324	1327	1321	3	6
1372	1374	1368	2	6

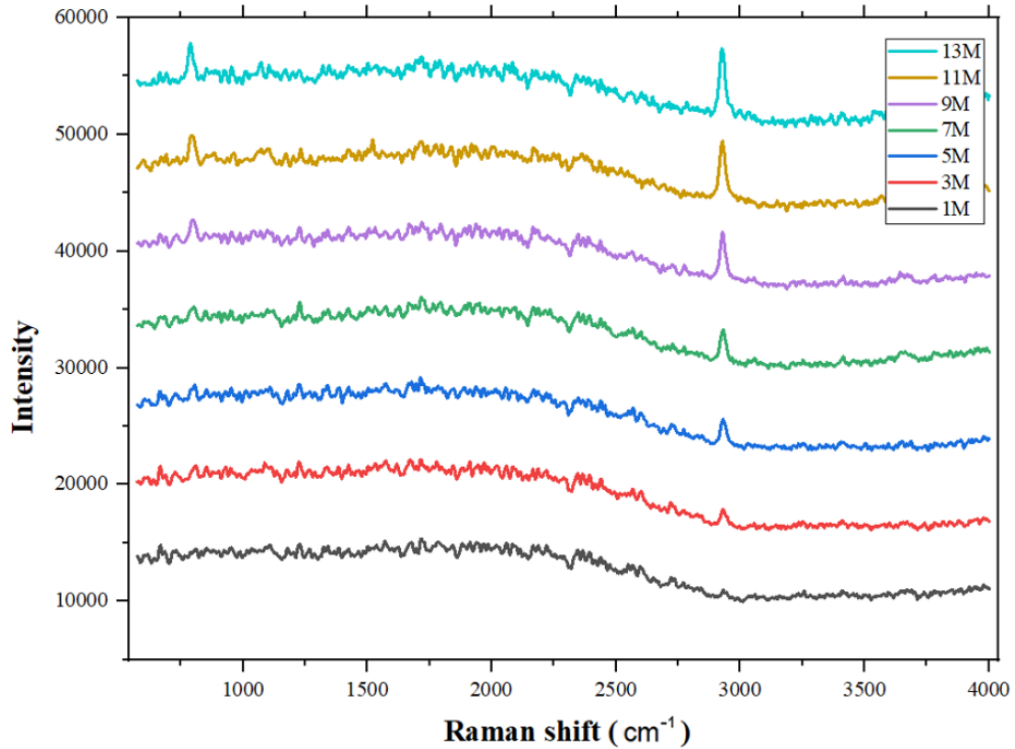
ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าการเลือนรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอล เทียบกับตัวอย่าง C

ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมมาตรฐาน ของพาราเซตามอล ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง C(ระบบ กระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ ตัวอย่าง C(ระบบ ส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างC( ระบบกระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของตัวอย่างC( ระบบส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )
1170	1171	1164	1	6
1237	1235	1235	2	2
1278	1276	1273	2	5
1324	1324	1324	0	0
1372	1371	1371	1	1

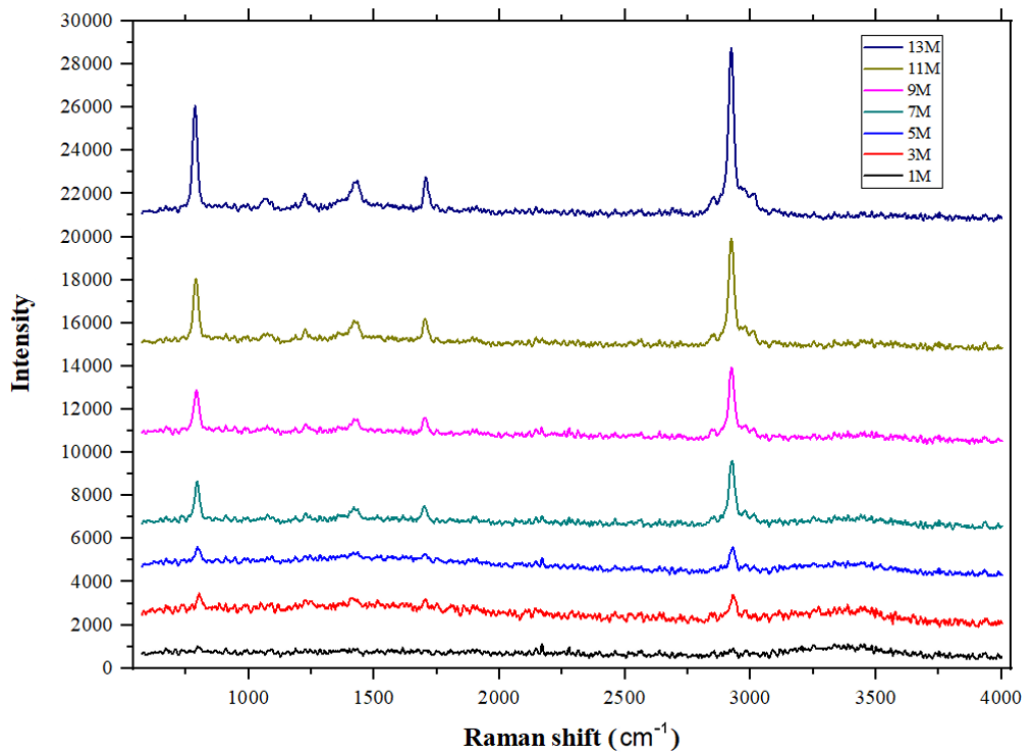
จากการเปรียบเทียบ พบว่า ค่าตำแหน่งการเลือนรามาของสเปกตรัมที่ได้มีความคลาดเคลื่อน 0 ถึง  $6 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อนำค่าผลต่างความคลาดเคลื่อนของการเลือนรามาไปคำนวณเป็นค่าความยาวคลื่นตามสมการการเลือนรามา พบว่า ผลต่างของความยาวคลื่นมีค่า 0 นาโนเมตร ถึง 0.19 นาโนเมตร จึงประมาณได้ว่าระบบที่ออกแบบทั้งสองระบบสามารถวัดรามาของสเปกตรัมของพาราเซตามอลได้ใกล้เคียงกับสเปกตรัมมาตรฐานของพาราเซตามอล

#### 4.1.2. สารละลายอะซีโตน

ผลการทดลองที่ได้เมื่อทำการวัดตัวอย่างสารละลายอะซีโตนโดยเตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน ได้แก่  $1 \text{ mol/dm}^3$ ,  $3 \text{ mol/dm}^3$ ,  $5 \text{ mol/dm}^3$ ,  $7 \text{ mol/dm}^3$ ,  $9 \text{ mol/dm}^3$ ,  $11 \text{ mol/dm}^3$  และ  $13 \text{ mol/dm}^3$  บรรจุสารละลายด้วยขวด vial วิเคราะห์ด้วยระบบรามาของสเปกโตรสโคปีทั้งแบบส่งผ่านและแบบกระจกกลับ โดยตั้งค่า integration time เท่ากับ 8 วินาที แสดงได้ดังภาพประกอบ 11 และ ภาพประกอบ 12 ตามลำดับ

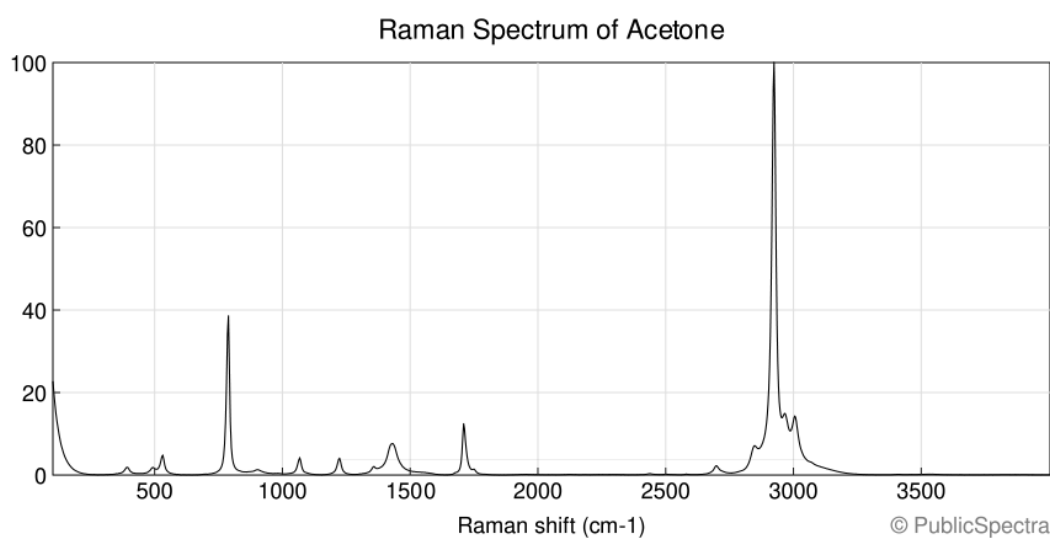


ภาพประกอบ 11 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของสารละลายอะซีโตนความเข้มข้น 1,3,5,7,9 และ 11 M( $\text{mol}/\text{dm}^3$ ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับ



ภาพประกอบ 12 ข้อมูลรามานสเปกตรัมของสารละลายอะซีโตนความเข้มข้น 1,3,5,7,9 และ 11 M( $\text{mol}/\text{dm}^3$ ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่าน

พิจารณารามานสเปกตรัมมาตรฐานของอะซิโตนดัง**ภาพประกอบ 13** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามานของอะซิโตน พบรามานพีคที่ตำแหน่ง 787, 1066, 1221, 1430, 1710, และ 2922  $\text{cm}^{-1}$  โดยตำแหน่งที่ 789  $\text{cm}^{-1}$  และ 1228  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-C ตำแหน่งที่ 1704  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C=O และตำแหน่งที่ 1074, 1434, 2923  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-H (Dillon & Dickinson, 1929; Takehiko Shimanouchi, Matsuura, Ogawa, & Harada, 1978)



ภาพประกอบ 13 สเปกตรัมรามานมาตรฐานของอะซิโตน

ที่มา : <https://publicspectra.com/Raman/Acetone>

เมื่อนำค่าการเลือนรามานของสารละลายอะซิโตนที่วิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ มาเปรียบเทียบกับค่าการเลือนรามานของสเปกตรัมมาตรฐานของอะซิโตน สามารถแสดงผลได้ดัง**ตาราง 5**



ตาราง 5 เปรียบเทียบค่าการเลือนรามาของสเปกตรัมมาตรฐานของอะซิโตนเทียบกับ ตัวอย่างสารละลายอะซิโตน

ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมมาตรฐาน ของสารละลายอะซิ โตน ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ สารละลายอะซิโตน (ระบบกระจกกลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ตำแหน่งค่าการ เลือนรามา สเปกตรัมของ สารละลายอะซิโตน (ระบบส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของสารละลายอะซิ โตน(ระบบกระจก กลับ) ( $\text{cm}^{-1}$ )	ผลต่างระหว่าง ตำแหน่งสเปกตรัม มาตรฐานกับ ตำแหน่งสเปกตรัม ของสารละลายอะซิ โตน(ระบบส่งผ่าน) ( $\text{cm}^{-1}$ )
787	789	789	2	2
1066	1074	1074	8	8
1221	1228	1228	7	7
1430	1434	1434	4	4
1710	1704	1704	6	6
2922	2923	2923	1	1

จากการเปรียบเทียบ พบว่า ค่าตำแหน่งการเลือนรามาของสเปกตรัมที่ได้มีความคลาดเคลื่อน 1 ถึง 8  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อนำค่าผลต่างของการเลือนรามาไปคำนวณเป็นค่าความยาวคลื่นตามสมการการเลือนรามา พบว่า ผลต่างของความยาวคลื่นมีค่า 0.04 นาโนเมตร ถึง 0.26 นาโนเมตร จึงประมาณได้ว่าระบบที่ออกแบบทั้งสองระบบสามารถวัดรามาของสเปกตรัมของอะซิโตนได้ใกล้เคียงกับค่ารามาของสเปกตรัมมาตรฐาน

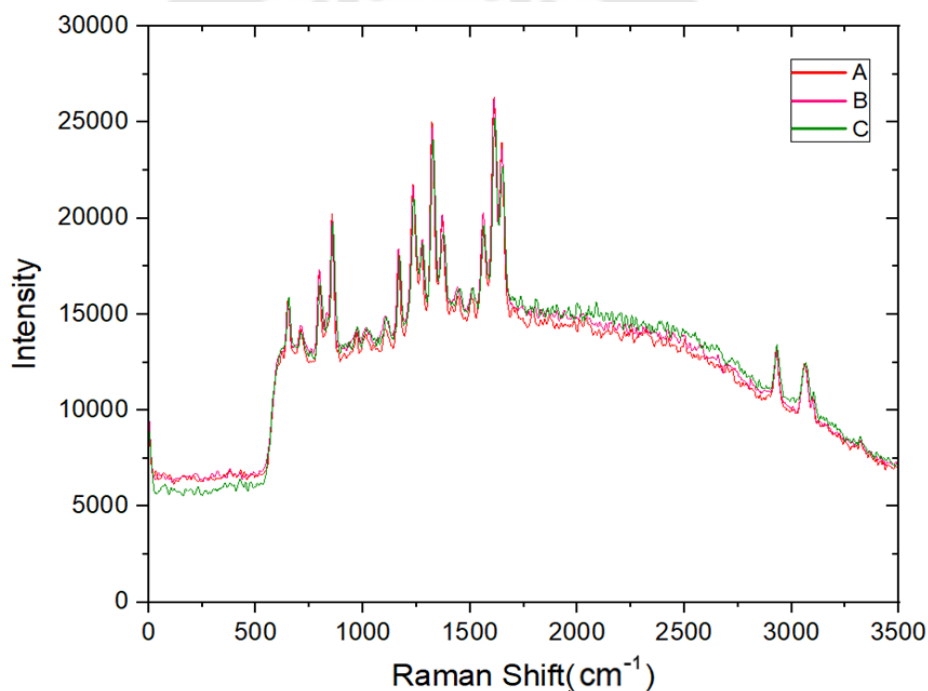
นอกจากนี้ หากพิจารณาผลการวิเคราะห์จาก *ภาพประกอบ 11* และ *ภาพประกอบ 12* จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับจะเกิดสัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงอย่างมากและสัญญาณรบกวนจะบดบังพีคที่ตำแหน่ง 1066, 1221, 1430 และ 1710  $\text{cm}^{-1}$  ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านจะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจากการเรืองแสงน้อยกว่าผลที่วิเคราะห์ได้ด้วยระบบกระจกกลับอย่างมากจนสามารถมองเห็นรามาพีคของอะซิโตนได้อย่างชัดเจนครบทุกพีค และยังสามารถมองเห็นองค์ประกอบของน้ำภายในสารละลาย ซึ่งรามาของสเปกตรัมของโมเลกุลน้ำจะอยู่ในช่วงตำแหน่งการเลือนรามาของระหว่างตำแหน่งที่ 3000  $\text{cm}^{-1}$  ถึง 3750  $\text{cm}^{-1}$

<sup>1</sup>(Takehiko Shimanouchi et al., 1978)

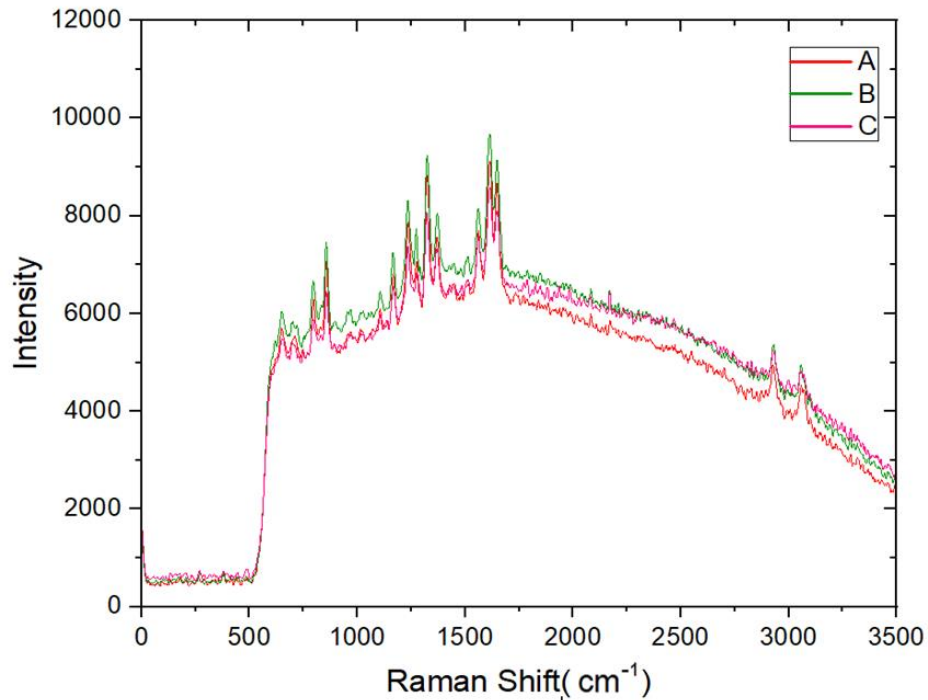
## 4.2 การวัดตัวอย่างสารเชิงปริมาณ

### 4.2.1. ยาพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัม

จากตัวอย่างเม็ดยาพาราเซตามอลทั้งสามยี่ห้อ ได้แก่ ยี่ห้อ A ยี่ห้อ B และยี่ห้อ C ซึ่งทั้งสามยี่ห้อ มีปริมาณของพาราเซตามอล 500 มิลลิกรัมต่อยาหนึ่งเม็ด (น้ำหนักสุทธิ 600 มิลลิกรัม/เม็ด) เมื่อนำตัวอย่างเม็ดยาทั้งสามไปทำการฝนให้มีความหนาที่เท่ากันก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สัญญาณรามานด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระจกกลับ โดยจัดวางตำแหน่งตัวอย่างที่ตำแหน่งโฟกัสของเลนส์ ผลการวิเคราะห์ที่แสดงได้ดัง *ภาพประกอบ 14* และ *ภาพประกอบ 15*

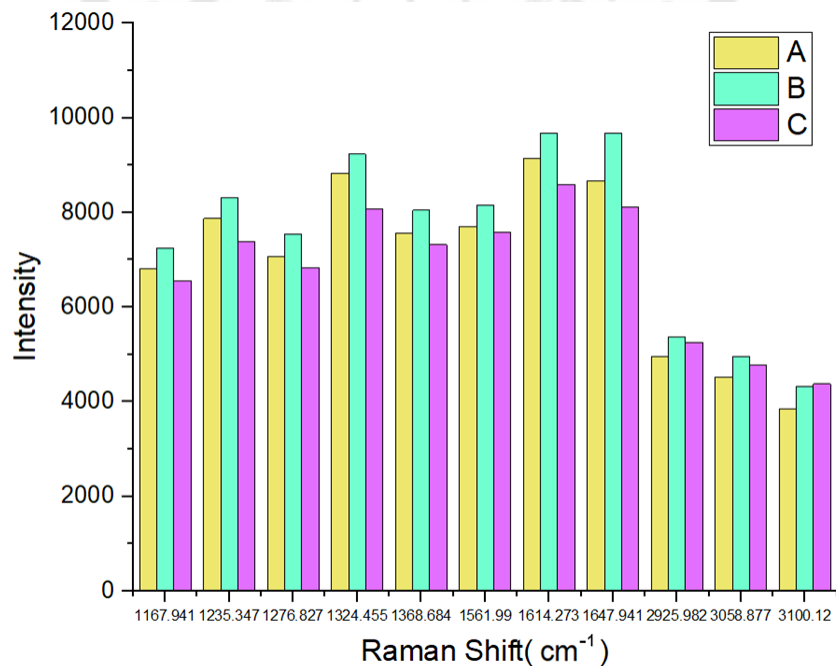


ภาพประกอบ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มสัญญาณรามานของพาราเซตามอลของตัวอย่างเม็ดยาทั้งสามยี่ห้อ เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับ

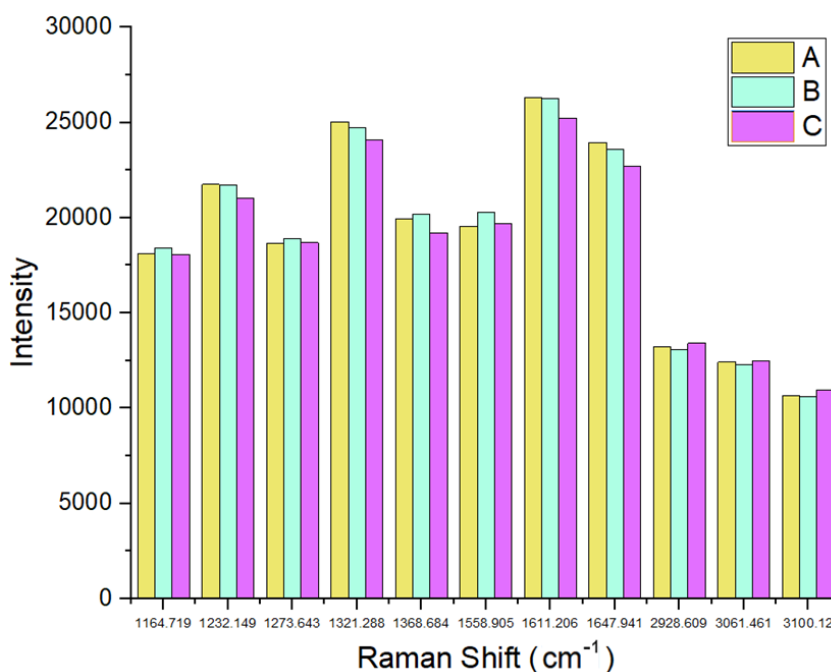


ภาพประกอบ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือนรามานและความเข้มของสัญญาณรามาน ของพาราเซตามอลของตัวอย่างเม็ดยาทั้งสามยี่ห้อ เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

เมื่อนำกราฟความเข้มของรามานพีคที่ค่าการเลือนรามานแต่ละตำแหน่งของยาพาราเซตามอลทั้งสามยี่ห้อเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับและระบบส่งผ่านมาเปรียบเทียบกัน สามารถแสดงได้ดัง *ภาพประกอบ 16* และ *ภาพประกอบ 17* ตามลำดับ



ภาพประกอบ 16 กราฟเปรียบเทียบพีคความเข้มของรามานพีคของยาพาราเซตามอลทั้งสามชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับ

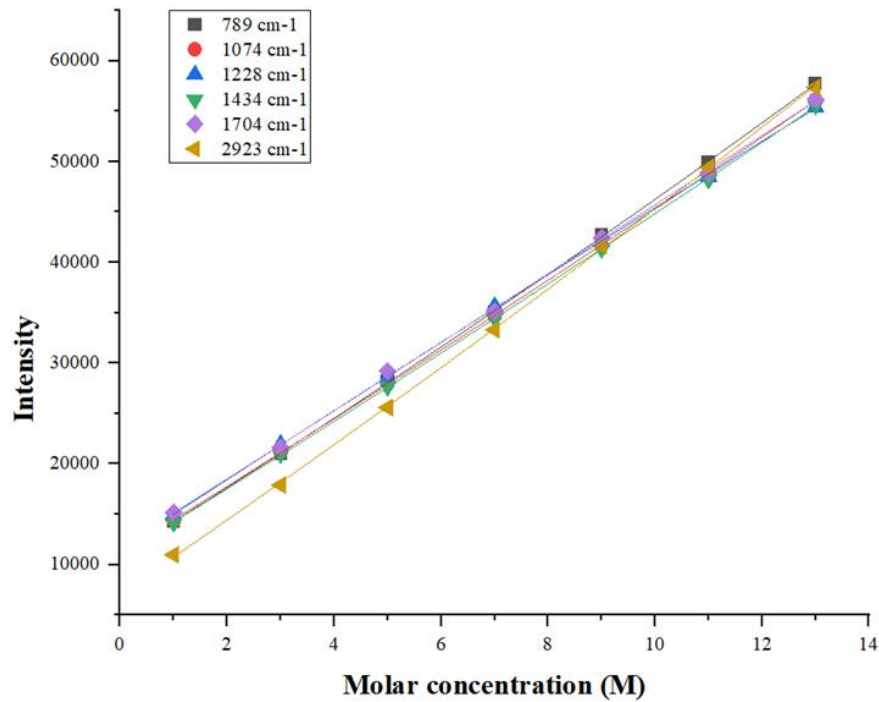


ภาพประกอบ 17 กราฟเปรียบเทียบพีคความเข้มของรามานพิกของยาพาราเซตามอลทั้งสามชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

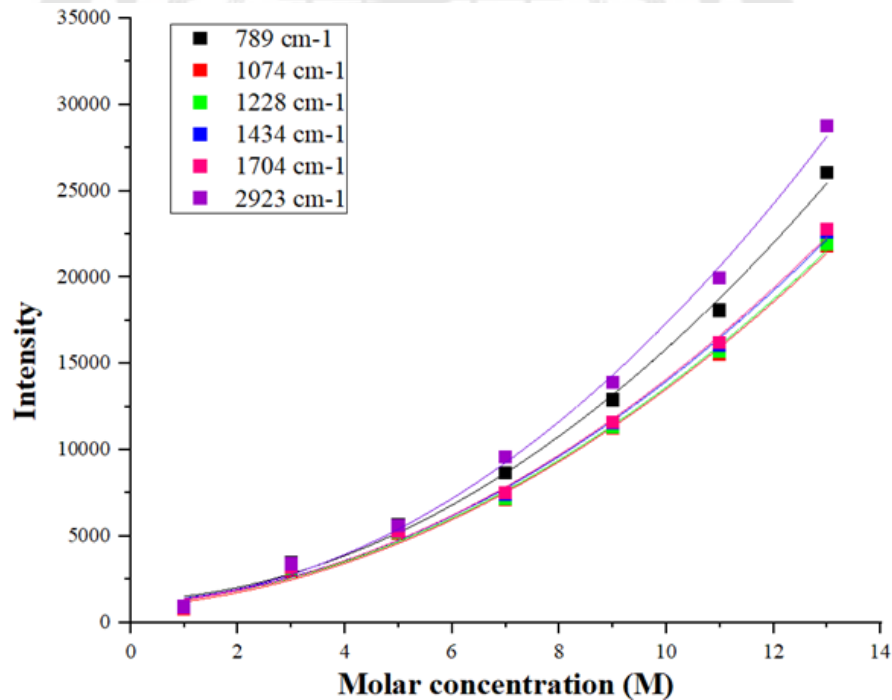
จากภาพประกอบ 14 พบว่าที่ค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง  $1647\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งที่ผลต่างระหว่างพีคที่เข้มมากที่สุดกับพีคที่เข้มน้อยที่สุดมีค่าความต่างเท่ากับ  $1244.666$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลต่างมากที่สุด คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ  $5.11\%$  และภาพประกอบ 15 พบว่าที่ค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง  $1647\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งที่ผลต่างระหว่างพีคที่เข้มมากที่สุดกับพีคที่เข้มน้อยที่สุดมีค่าความต่างเท่ากับ  $1562.666$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลต่างมากที่สุด คิดค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ  $16.15\%$  แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีค่าความคลาดเคลื่อน  $16.15\%$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน และมีค่าความคลาดเคลื่อน  $5.11\%$  เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับ

#### 4.2.2. สารละลายอะซิโตน

จากผลการวัดตัวอย่างสารละลายอะซิโตน เมื่อนำผลการวิเคราะห์สัญญาณรามานด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระจกกลับไปหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างความเข้มของสัญญาณรามานกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่แต่ละรามานพิกอะซิโตน ความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับและระบบส่งผ่าน สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 18 และภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพีคของอะซิโตนกับโมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ



ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพีคของอะซิโตนกับโมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับดัง**ภาพประกอบ16** จะพบว่า กราฟความเข้มสัญญาณของอะซิโตนแต่จะพีคจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่โมลาร์ความเข้มข้น 9 M(mol/dm<sup>3</sup>) เป็นต้นไป เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 9 M ความเข้มสัญญาณพีคความถี่ของอะซิโตนจะมีค่าที่ต่ำ โดยเฉพาะกราฟของพีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> จะมีค่าที่ต่ำกว่าพีคตำแหน่งอื่น สาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจาก ผลกราฟช่วงที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 9M ผลของสัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งอื่นๆจะมีค่าความเข้มที่สูงกว่าความเข้มพีคของอะซิโตนที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านดัง**ภาพประกอบ19** จะพบว่า กราฟความเข้มของแต่ละพีคมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่โมลาร์ความเข้มข้นมีค่าตั้งแต่ 7M ลงไป และเมื่อโมลาร์ความเข้มข้นมากกว่า 7M ผลกราฟความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 1066, 1221, 1430 และ 1710 cm<sup>-1</sup> ยังคงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 789 cm<sup>-1</sup> และ 2923 cm<sup>-1</sup> จะมีค่าความเข้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าพีคของตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก พีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> ที่มีความเข้มสูงมากที่สุดเกิดจากโหมดการสั่นขององค์ประกอบของพันธะ C-H เป็นการสั่นที่ให้ Raman active มากที่สุด ส่วนกราฟที่มีความเข้มสูงรองลงมาคือพีคที่ตำแหน่ง 789 cm<sup>-1</sup> เกิดจากโหมดการสั่นของพันธะ C-C เป็นการสั่นที่ให้ Raman active ที่มากกว่าพีคที่ตำแหน่งอื่นๆ แต่น้อยกว่าพีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ผลการวัดของทั้งสองระบบ สามารถสรุปได้ว่า ค่าความเข้มของสัญญาณรามานของอะซิโตนมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับโมลาร์ความเข้มข้นของสารละลาย โดยพบความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะของกราฟเส้นตรงเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับ และพบความสัมพันธ์ในลักษณะของกราฟ Quadratic function เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ระบบรามานสเปกโตรสโคปีที่ออกแบบขึ้น ประกอบด้วยระบบรามานสเปกโตรสโคปีแบบส่งผ่านและรามานสเปกโตรสโคปีแบบกระเจิงกลับที่ประกอบเข้าเป็นระบบด้วยกัน สารตัวอย่างที่เลือกใช้ทำการวิเคราะห์รามานสเปกตรัมมี 2 ชนิด คือ ยาพาราเซตามอล ขนาด 500 มิลลิกรัม จำนวนสามยี่ห้อ และสารละลายอะซิโตนซึ่งเตรียมที่โมลาร์ความเข้มข้น 1,3,5,7,9,11 และ 13 M ทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ ระบบรามานสเปกโตรสโคปีที่ออกแบบขึ้น มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ ดังนี้

##### 5.1.1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างสาร คือ ยาพาราเซตามอล จำนวนสามยี่ห้อ ได้แก่ ยี่ห้อ A,B และ C วิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเทียบกับค่ามาตรฐานรามานสเปกตรัมของพาราเซตามอล ซึ่งมีค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง 1170, 1237, 1278, 1324, 1372, 1561, 1613, 1648, 2931, 3066 และ 3102  $\text{cm}^{-1}$  โดยตำแหน่งที่ 1170  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-C ตำแหน่งที่ 1237, 1278, 1324, 1372  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-N ตำแหน่งที่ 1561, 1613, 1648  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C=C และ C=O และที่ตำแหน่ง 2931, 3066 และ 3102  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-H, N-H และ O-H พบว่าตำแหน่งการเลื่อนรามานที่วัดได้จากระบบรามานสเปกโตรสโคปีที่ออกแบบมีตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานมากที่สุดคือ 6  $\text{cm}^{-1}$  และคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ 0  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อนำค่าผลต่างความคลาดเคลื่อนของการเลื่อนรามานไปคำนวณเป็นค่าความยาวคลื่นตามสมการการเลื่อนรามาน พบว่า ผลต่างของความยาวคลื่นมีค่า 0 นาโนเมตร ถึง 0.19 นาโนเมตร ส่วนข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างสาร คือ สารละลายอะซิโตน ที่ความเข้มข้น โมลาร์ความเข้มข้น 1,3,5,7,9,11 และ 13 M วิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระเจิงกลับ เมื่อนำผลการวิเคราะห์



มาเทียบกับค่ามาตรฐานรามานสเปกตรัมของอะซิโตน ซึ่งมีค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง 787, 1066, 1221, 1430, 1710, และ 2922  $\text{cm}^{-1}$  โดยตำแหน่งที่ 789  $\text{cm}^{-1}$  และ 1228  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-C ตำแหน่งที่ 1704  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C=O และตำแหน่งที่ 1074, 1434, 2923  $\text{cm}^{-1}$  พบองค์ประกอบของพันธะ C-H พบว่า ค่าตำแหน่งการเลื่อนรามานสเปกตรัมที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐาน 1 ถึง 8  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อนำค่าผลต่างของการเลื่อนรามานไปคำนวณเป็นค่าความยาวคลื่นตามสมการการเลื่อนรามาน พบว่า ผลต่างของความยาวคลื่นมีค่า 0.04 นาโนเมตร ถึง 0.26 นาโนเมตร นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับจะเกิดสัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงอย่างมากและสัญญาณรบกวนจะบดบังพีคที่ตำแหน่ง 1066, 1221, 1430 และ 1710  $\text{cm}^{-1}$  ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านจะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจากการเรืองแสงน้อยกว่าผลที่วัดได้ด้วยระบบกระจกกลับอย่างมากจนสามารถมองเห็นรามานพีคของอะซิโตนได้อย่างชัดเจนครบทุกพีค และยังสามารถมองเห็นองค์ประกอบของน้ำภายในสารละลาย ซึ่งรามานสเปกตรัมของโมเลกุลน้ำจะอยู่ในช่วงตำแหน่งการเลื่อนรามานระหว่างตำแหน่งที่ 3000  $\text{cm}^{-1}$  ถึง 3750  $\text{cm}^{-1}$  จึงประมาณได้ว่าระบบที่ออกแบบทั้งสองระบบสามารถวัดผลรามานสเปกตรัมของพาราเซตามอลและอะซิโตนได้ใกล้เคียงกับค่ารามานสเปกตรัมมาตรฐาน

### 5.1.2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างสาร คือ ยาพาราเซตามอล จำนวนสามยี่ห้อ ได้แก่ ยี่ห้อ A, B และ C วิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระจกกลับ เมื่อนำกราฟความเข้มของรามานพีคที่ค่าการเลื่อนรามานแต่ละตำแหน่งของยาพาราเซตามอลทั้งสามยี่ห้อ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับและระบบส่งผ่านมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง 1647  $\text{cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งที่ผลต่างระหว่างพีคที่เข้มมากที่สุดกับพีคที่เข้มน้อยที่สุดมีค่าความต่างเท่ากับ 1244.666 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลต่างมากที่สุด คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 5.11 % เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระจกกลับ ค่าการเลื่อนรามานที่ตำแหน่ง 1647  $\text{cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งที่ผลต่างระหว่างพีคที่เข้มมากที่สุดกับพีคที่เข้มน้อยที่สุดมีค่าความต่างเท่ากับ 1562.666 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีผลต่างมากที่สุด คิดค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 16.15% เมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่าน ส่วนข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างสาร คือ สารละลายอะซิโตน ที่ความเข้มข้น โมลาร์ ความเข้มข้น 1,3,5,7,9,11 และ 13 M เมื่อนำผลการวัดสัญญาณรามานด้วยระบบส่งผ่านและระบบกระจกกลับไปหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างความเข้มของสัญญาณรามานกับ



ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่แต่ละรามานพีคอะซิโตน พบว่า ค่าความเข้มของสัญญาณรามานของอะซิโตนมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับโมลาร์ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบกระเจิงกลับจะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟเส้นตรง และกราฟความเข้มสัญญาณของอะซิโตนแต่จะพีคจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่โมลาร์ความเข้มข้น 9M(mol/dm<sup>3</sup>) เป็นต้นไป เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 9M ความเข้มสัญญาณรามานของอะซิโตนจะมีค่าที่ต่ำ โดยเฉพาะกราฟของพีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> จะมีค่าที่ต่ำกว่าพีคตำแหน่งอื่น สาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจาก ผลกราฟช่วงที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 9M ผลของสัญญาณรบกวนจากการเรืองแสงที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งอื่นๆจะมีความเข้มที่สูงกว่าความเข้มพีคของอะซิโตนที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> ในขณะที่ผลการวัดด้วยระบบส่งผ่าน พบว่า ค่าความเข้มของสัญญาณรามานของอะซิโตนมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับโมลาร์ความเข้มข้นของสารละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยระบบส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟ Quadratic function และกราฟความเข้มของแต่ละพีคมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่โมลาร์ความเข้มข้นมีค่าตั้งแต่ 7M ลงไป และเมื่อโมลาร์ความเข้มข้นมากกว่า 7M ผลกราฟความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 1066, 1221, 1430 และ 1710 cm<sup>-1</sup> ยังคงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 789 cm<sup>-1</sup> และ 2923 cm<sup>-1</sup> จะมีความเข้มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าพีคของตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก พีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup> ที่มีความเข้มสูงมากที่สุด เกิดจากโหมดการสั่นขององค์ประกอบของพันธะ C-H เป็นการสั่นที่ให้ Raman active มากที่สุด ส่วนกราฟที่มีความเข้มสูงรองลงมาคือพีคที่ตำแหน่ง 789 cm<sup>-1</sup> เกิดจากโหมดการสั่นของพันธะ C-C เป็นการสั่นที่ให้ Raman active มากกว่าพีคที่ตำแหน่งอื่นๆ แต่น้อยกว่าพีคที่ตำแหน่ง 2923 cm<sup>-1</sup>

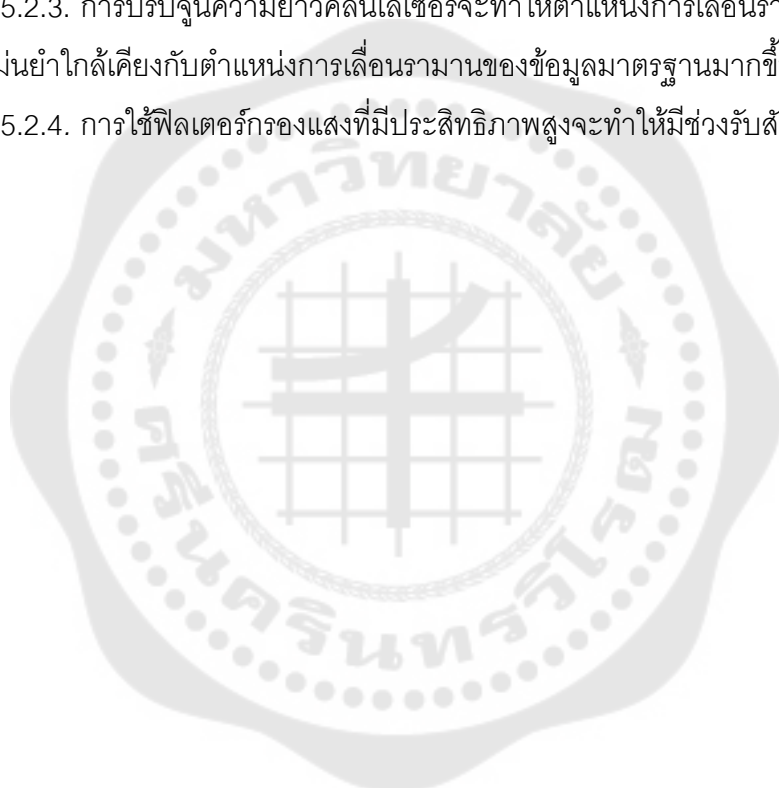
## 5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์มีผลอย่างมากต่อการวัด ควรจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ให้มีความแม่นยำมากที่สุด

5.2.2. การเพิ่มแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นค่าอื่นเข้าไปในระบบจะทำให้ระบบสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างสารได้หลากหลายชนิดมากขึ้น เนื่องจากประเภทของตัวอย่างสารแต่ละชนิดจะมีความยาวคลื่นแสงกระตุ้นที่ให้คุณภาพสัญญาณรบกวนที่ดีแตกต่างกันไป

5.2.3. การปรับจูนความยาวคลื่นเลเซอร์จะทำให้ตำแหน่งการเลือนรบกวนที่ได้จากระบบมีความแม่นยำใกล้เคียงกับตำแหน่งการเลือนรบกวนของข้อมูลมาตรฐานมากขึ้น

5.2.4. การใช้ฟิลเตอร์กรองแสงที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้มีช่วงรับสัญญาณที่มากขึ้น





## บรรณานุกรม

- Buckley, K., & Matousek, P. (2011). Recent advances in the application of transmission Raman spectroscopy to pharmaceutical analysis. *J Pharm Biomed Anal*, 55(4), 645-652. doi:10.1016/j.jpba.2010.10.029
- C.N. Banwell, & Elaine M. McCash. (1994). *Fundamentals of molecular spectroscopy*.: McGraw-Hill New York.
- Cullum, B. M., Mobley, J., Chi, Z., Stokes, D. L., Miller, G. H., & Vo-Dinh, T. (2000). Development of a compact, handheld Raman instrument with no moving parts for use in field analysis. *Review of Scientific Instruments*, 71, 1602-1607. doi:10.1063/1.1150504
- Dillon, R. T., & Dickinson, R. G. (1929). RAMAN SPECTRA FROM ACETONE. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(9), 699-702. doi:doi:10.1073/pnas.15.9.699
- Drescher, D., & Kneipp, J. (2012). Nanomaterials in complex biological systems: insights from Raman spectroscopy. *Chemical Society Reviews*, 41(17), 5780-5799. doi:10.1039/C2CS35127G
- Eliasson, C., Macleod, N. A., Jayes, L. C., Clarke, F. C., Hammond, S. V., Smith, M. R., & Matousek, P. (2008). Non-invasive quantitative assessment of the content of pharmaceutical capsules using transmission Raman spectroscopy. *J Pharm Biomed Anal*, 47(2), 221-229. doi:10.1016/j.jpba.2008.01.013
- Ewen Smith, & Geoffrey Dent. (2005). *Modern Raman Spectroscopy – A Practical Approach*: John Wiley & Sons.
- Glasstone Samuel, & David Lewis. (1960). *Elements of physical chemistry*: van Nostrand Princeton, NJ.
- Hargreaves, M. D., Macleod, N. A., Smith, M. R., Andrews, D., Hammond, S. V., & Matousek, P. (2011). Characterisation of transmission Raman spectroscopy for rapid quantitative analysis of intact multi-component pharmaceutical capsules. *J Pharm Biomed Anal*, 54(3), 463-468. doi:10.1016/j.jpba.2010.09.015

- Pevelen, D. D. L., & Tranter, G. E. (2017). *FT-IR and Raman Spectroscopies, Polymorphism Applications*.
- Raman, C. V., & Krishnan, K. S. (1928). A New Type of Secondary Radiation. *Nature*, 121, 501-502. doi:10.1038/121501c0
- Schrader, B. (2008). *Infrared and Raman spectroscopy: methods and applications*: John Wiley & Sons.
- Schrader, B. (2008). *Infrared and Raman spectroscopy: methods and applications*.: John Wiley & Sons.
- Shimanouchi, T. (1967). *Tables of molecular vibrational frequencies*. : US Government Printing Office.
- Shimanouchi, T., Matsuura, H., Ogawa, Y., & Harada, I. (1978). Tables of molecular vibrational frequencies. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 7(4), 1323-1444. doi:10.1063/1.555587
- ไชยสุต, ณ. (1998). CH335 เครื่องมือวิเคราะห์ (*Instrument Methods of Analysis*) (7 ed.). กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เตชะวิทย์ เปาอินทร์ เจริญฤทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	9 กรกฎาคม 2537
สถานที่เกิด	สงขลา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
ที่อยู่ปัจจุบัน	152/262 ซอยจรัลสนิทวงศ์ 96/2 ถนนจรัลสนิทวงศ์ แขวงบางอ้อ เขตบาง พลัด กรุงเทพฯ 10700

