

การพัฒนาชุดทดลองตรวจจับพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง
แบบเคลื่อนที่

THE DEVELOPMENT OF A MOBILE EXPERIMENTAL KIT FOR DETECTING AND
IDENTIFYING IMPROVISED EXPLOSIVE COMPOUNDS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-067-314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DEVELOPMENT OF A MOBILE EXPERIMENTAL KIT FOR DETECTING AND
IDENTIFYING IMPROVISED EXPLOSIVE COMPOUNDS

KRIANGDACH KLAROD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-M-067-314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชุดทดลองตรวจจับพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสง เครื่องแบบเคลื่อนที่
Thesis Title	The development of a mobile experimental kit for detecting and identifying improvised explosive compounds.
ชื่อนักศึกษา	นายเกรียงเดช กล้ารอด
รหัสประจำตัว	60601213
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อาจันต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งเน้นศึกษาวิจัยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสง
เครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยให้เจ้าหน้าที่
วิเคราะห์วัตถุต้องสงสัย และวางแผนสถานการณ์ในการเข้าเก็บกู้หรือทำลายวัตถุระเบิด ดังนั้นจึงจำเป็นอย่าง
ยิ่งที่จะต้องพัฒนาและปรับปรุงเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบ
เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี จากอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่าย

การพิสูจน์โครงสร้างของสารโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิชีเบล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS
SPECTROSCOPIC) และ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared (IR) spectroscopy) จะอาศัยการดูดกลืน รังสี
แม่เหล็กไฟฟ้าจำเพาะ ของนิวเคลียส อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลของสาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
ที่แตกต่างกัน เกิดเป็นลักษณะลายซี้บ (fingerprint) ในสเปกตรัม ซึ่งเป็นข้อมูลจำเพาะของโครงสร้างสารแต่
ละสาร ส่งผลให้สามารถระบุชนิดของสารได้ในที่สุด

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง
แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีนั้น จะนำกราฟที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุ
ระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีไปเปรียบเทียบกับกราฟจากเครื่อง Thermo Scientific รุ่น
First Defender RMX โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของปัญญาประดิษฐ์ในการวินิจฉัย

Thesis	The development of a mobile experimental kit for detecting and identifying improvised explosive compounds.
Student	Mr.Kriangdach Klarod
Student ID.	60601213
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Arjin Numsomran

ABSTRACT

This thesis Focuses on research on detectors and identification of improvised explosive devices. Spectroscopic techniques Because it is a very important tool in helping officials analyze suspicious objects and plan situations for recovering or destroying explosives. Therefore, it is essential to develop and improve detectors and identification of improvised explosive substances. Spectroscopic techniques from equipment that can be easily found.

Proof of the structure of a substance using ultraviolet-visible spectroscopy (UV-VIS SPECTROSCOPIC) and infrared (IR) spectroscopy will rely on absorption. Specific electromagnetic radiation of nuclei, atoms, ions, or molecules of substances. causing different energy changes Resulting in a characteristic pattern (fingerprint) in the spectrum, which is a specification of the structure of each substance. As a result, the type of substance can finally be identified.

To test the efficiency of detectors and identification of improvised explosive devices. The spectroscopic technique The graph obtained from the detector will be taken and the identification of improvised explosive substances will be identified. Spectroscopic techniques were compared with graphs from the Thermo Scientific First Defender RMX machine using artificial intelligence neural networks for diagnosis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงเพราะได้รับความกรุณาเมตตาจากท่าน รศ.ดร.อาจันต์ น่วมสำราญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย และคอยสั่งสอนการดำเนินชีวิตรวมทั้งเป็นแบบอย่างการใช้ชีวิต ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์ และ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ หน่วยเก็บกู้และทำลายวัตถุระเบิดกรมสรรพาวุธทหารบก ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เกรียงเดช กล้ารอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	5
2.1 วัตถุระเบิดและระเบิดแสงเครื่อง.....	5
2.1.1 วัตถุระเบิดแบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งาน	5
2.1.2 ระเบิดแสงเครื่อง.....	6
2.1.3 ระบบตรวจวัตถุระเบิด.....	8
2.1.4 หลักการทำงานของระบบตรวจวัตถุแต่ละประเภท.....	8
2.2 ทฤษฎีสเปกโตรสโกปี (Spectroscopy Theory).....	12
2.2.1 สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer).....	13
2.2.2 ประเภทของสเปกโตรสโกปี	13
2.2.3 ทฤษฎีอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (infrared spectroscopy Theory).....	13
2.2.4 ไฮโดรคาร์บอน.....	23
2.2.5 แอลกอฮอล์และอะมีน	30
2.2.6 อีเทอร์ (ether)	33
2.2.7 สารประกอบคาร์บอนิล	33
บทที่ 3 หลักของสายอากาศแบบแอคทีฟ.....	37
3.1 การสร้างเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสง เครื่อง แบบเทคนิคทาง สเปกโตรสโกปี.....	37
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	38
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย.....	42
3.5 คุณสมบัติของสารประกอบวัตถุระเบิด.....	57
3.6 ผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง.....	60
3.7 วิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	62
4.1 การสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี.....	62
4.2 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 อภิปรายผล.....	81
5.3 การเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	90
ผลงานวิจัย.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	153

สารบัญรูป

บทที่ 1 รูปที่	หน้า
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4

บทที่ 2 รูปที่	
2.1 ความยาวคลื่นของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.2 สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.3 สเปกตรัมที่วัดเป็น (ก) เปอร์เซ็นต์ความส่งผ่าน (ข) แอ็บซอร์เบ้นซ์ ที่ความยาวคลื่น(หรือความถี่) ต่างๆ.....	17
2.4 การสั่นของโมเลกุลของแอซิเททไดไฮด์.....	17
2.5 แบบการสั่นของหมู่ -CH ₂ (ก) การยืดอสมมาตร (ข) การยืดสมมาตร (ค) การงอในระนาบเดียวกันหรือการหนีบแบบกรรไกร (ง) การออกนอกระนาบหรือการกระดิก (จ) การงอออกนอกระนาบหรือการบิด (ฉ) การงอในระนาบเดียวกันหรือการโยก.....	19
2.6 อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	21
2.7 ช่วงความถี่ที่เกิดจากการยืดหรือของพันธะในหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ.....	21
2.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเฮกเซน และ 3-เมทิลเพนเทน.....	22
2.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเฮปเทน, 1-เฮปทีน และเพนทอีโน.....	27
2.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 1-octene, isopropyl bromide และ <i>n</i> -butylbenzene.....	28
2.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของแอลคีนจากการงอของพันธะ (ก) =C-HRCH=CH ₂ (ข) R ₂ C=CH ₂ (ค) cisRCH=CHR (ง) transRCH=CHR.....	29
2.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของวงเบนซีน.....	30
2.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของ cyclohexanol และ pentanamine.....	31
2.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของ <i>n</i> -propylamine, dipropylamine และ tripropylamine.....	32
2.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของ tert-butyl alcohol ละลายในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	32
2.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของ di- <i>n</i> -propyl ether และ phenetole.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 2-pentanone และ 3,3- dimethyl-2-butanone.....	35
2.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของ buntal และ benzaldehyde.....	36
2.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของ propanoic acid.....	36
2.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของ <i>n</i> -butyl acetate และ ethyl benzoate.....	37
บทที่ 3 รูปที่	
3.1 ห้องปฏิบัติการทางเคมี	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ	40
3.3 โปรแกรมและภาษาที่ใช้ในการควบคุมและสั่งงาน	40
3.4 แสดงตำแหน่งการวัด.....	41
3.5 การตรวจสอบให้ได้ปริมาณตามกำหนด.....	41
3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	43
3.7 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์.....	44
3.8 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมและสั่งการ.....	45
3.9 จอแสดงผล.....	45
3.10 สวิตช์ควบคุม.....	46
3.11 สวิตช์ปรับค่า.....	47
3.12 เซนเซอร์ AMS AS7341.....	47
3.13 ผังฟังก์ชันการทำงานของ AMS AS7341.....	49
3.14 ตำแหน่งการเชื่อมต่อบนเซนเซอร์ AMS AS7341.....	50
3.15 ความสามารถในการตรวจจับและความไวของเซนเซอร์ AMS AS7341....	52
3.16 ความสามารถในการตรวจจับและความไวของเซนเซอร์ AMS AS7341....	53
3.17 สถานะการทำงานหลักของเซนเซอร์ AMS AS7341.....	53
3.18 แผนผังสถาปัตยกรรมช่องสัญญาณของเซนเซอร์ AMS AS7341.....	54
3.19 อาร์เรย์เซนเซอร์ของ AMS AS7341.....	56
3.20 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ของ AMS AS7341กับอุปกรณ์.....	60
3.21 การเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ของ AMS AS7341กับอุปกรณ์.....	60
บทที่ 4 รูปที่	
4.1 ขณะเจ้าหน้าที่กำลังเก็บกู้วัตถุระเบิดแสงเครื่อง.....	64
4.3 ผลลัพธ์ที่แสดงบนจอภาพของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ตรงกับเครื่องคอมพิวเตอร์.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4	ขณะที่เครื่องตรวจจับและฟิสชันทรานสดูเตอร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีกำลังทำงานจะปรากฏกราฟขึ้นที่จอแสดงผล....	65
4.5	เครื่องวัดค่าการดูดกลืน ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น SPECORD 210 PLUS...	66
4.6	สเปกตรัมของสารประกอบ NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)	67
4.7	สเปกตรัมของสารประกอบ KMnO_4 (Potassium Permanganate)	67
4.8	สเปกตรัมของสารประกอบ KNO_3 (Potassium Nitrate).....	67
4.9	ห้องปฏิบัติการทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	68
4.10	ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)	68
4.11	ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)	69
4.12	ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)	69
4.13	ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)	70
4.14	ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ...	70
4.15	ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ...	71
4.16	จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	71
4.17	เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	72
4.18	จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	75

4.19 เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	77
4.20 จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	78
4.21 เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภัยคุกคามจากผู้ก่อการร้ายได้แพร่ขยายไปยังทั่วทุกภูมิภาคในโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ของประเทศไทยที่กำลังประสบปัญหาการถูกลอบวางระเบิด ส่งผลให้ประชาชนได้รับความเดือดร้อน

การก่อเหตุวินาศกรรม ทำให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งอำนาจการทำลายล้างของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง จะขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิด และประเภทของสารเคมีที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิสูจน์ทราบให้ได้ว่าวัตถุระเบิดแสงเครื่องนั้นประกอบไปด้วยสารเคมีอะไรบ้าง เพื่อเป็นข้อมูลให้เจ้าหน้าที่ใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนปฏิบัติการเก็บกู้หรือทำลายวัตถุระเบิดแสงเครื่องนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

วัตถุระเบิดแสงเครื่อง (IED.- Improvised Explosive Device) เป็นรูปแบบหนึ่งของกับระเบิดเป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป ที่จัดหาได้ง่ายมาประดิษฐ์เป็นระเบิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการนำวัตถุระเบิดทางทหารทางพลเรือน สารประกอบทางเคมี และนำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาประกอบรวมกันเป็นระเบิดแสงเครื่อง มีรูปแบบหลากหลายไม่แน่นอนตายตัว สามารถออกแบบได้ สลับซับซ้อน อันตราย เก็บกู้แก้ไขได้ยาก ซึ่งการออกแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน และความชำนาญของผู้ประกอบระเบิด สามารถพกพาซุกซ่อนได้สะดวก แยกองค์ประกอบเคลื่อนย้ายได้ง่าย ตรวจพบได้ยาก ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีอำนาจการทำลายล้างสูง กว่ากรก่อวินาศกรรมแบบอื่นๆ ก่อให้เกิดความหวาดกลัว มีผลต่อขวัญและกำลังใจสูง และที่สำคัญที่สุดคือเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ที่หน่วยงานภาครัฐ และ เอกชน มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงและการดูแลรักษาที่ยุ่งยาก เนื่องจากสภาพภูมิอากาศภาคใต้ของประเทศไทยเป็นแบบร้อนชื้น ส่งผลต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องทำงานผิดพลาดได้ รวมถึงการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ ที่จะต้องนำพาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ไปตรวจสอบวัตถุต้องสงสัยในพื้นที่เปียกชื้นหรือมีฝุ่นผงพร้อมยังเข้าถึงได้อย่างยากลำบาก อาจเกิดการตกกระแทบหรือกระแทกต่อตัวเครื่องทำให้เกิดความเสียหายได้ ซึ่งส่งผลต่อการซ่อมบำรุงที่จะต้องใช้ระยะเวลานาน และหาชิ้นส่วนอะไหล่ได้ยาก เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องฯ หรือศูนย์ซ่อม

บำรุงเครื่องฯ ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ที่ต่างประเทศ ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 สร้างและพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี
- 1.2.2 การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง
- 1.2.3 มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถนำไปใช้ในงานภาคสนามได้อย่างสะดวก
- 1.2.4 เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 สามารถใช้ทฤษฎีสเปกโทรสโกปีแสงในการตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบระเบิดแสงเครื่อง
- 1.3.2 สเปกตรัมพลอตความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนหรือความเข้มของรังสีที่ดูดกลืนซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต
- 1.3.3 แต่ละตำแหน่งของจุดยอดบนเส้นสเปกตรัมสามารถบ่งชี้ลักษณะจำเพาะของสารประกอบ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างสารโดยใช้ทฤษฎีสเปกโทรสโกปี จะสามารถตรวจวัดการดูดกลืน (absorb) หรือการเปล่งแสง (emit) ในช่วง คลื่น Ultraviolet (-200 nm ถึง 400 nm) และช่วงคลื่น visible (-400 nm ถึง 800 nm) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสียูวีและแสงวิซิเบิลที่มีค่าพลังงานเท่ากับ ผลต่างของพลังงานที่สถานะพื้นและสถานะถูกกระตุ้น ความเข้มแสงหรือแอมพลิจูดจะขึ้นอยู่กั กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ซึ่งกฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า รังสียูวีหรือ แสงวิซิเบิลเมื่อผ่านสารละลาย ตัวอย่างแล้วความเข้มแสงหรือแอมพลิจูดของตัวอย่างดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้น ของสารละลาย ส่วนกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวคือ เมื่อ รังสียูวีหรือ แสงวิซิเบิลผ่านสารละลายตัวอย่างแล้ว ความเข้มแสงหรือแอมพลิจูดของตัวอย่างที่ดูดกลืนรังสีจะ แปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านสารละลายตัวอย่าง

Infrared spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลและการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด เลขคลื่นตั้งแต่ 12800 ถึง 10 cm^{-1} จำแนกออกเป็น 3 ช่วง คือ ย่านอินฟราเรดใกล้ Near IR (4,000 – 12,800 cm^{-1}), ย่านอินฟราเรดกลาง Mid IR (200 – 4,000 cm^{-1}) และย่านอินฟราเรดไกล Far IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(10 – 200 cm-1) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสี ย่านอินฟราเรดกลางหรือเรียกว่าความถี่ ทำให้เกิดทรานซิชันการสั่นพร้อมกับ ทรานซิชันการหมุน ซึ่งทรานซิชันการสั่นนี้จะทราบชนิดหมู่ทำหน้าที่ เช่น พันธะคู่ พันธะสาม หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโน หรือภายในโครงสร้างของสาร ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะทำให้ได้ โครงสร้างของโมเลกุลนั้นๆ นำไปสู่การระบุเอกลักษณ์ของสารเคมีได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ประเภทของเครื่องตรวจวัตถุระเบิด มี 5 ประเภท ดังนี้ 1.ประเภทตรวจหาโลหะ 2.ประเภทตรวจหากลิ่น 3.ประเภทตรวจหาโดยใช้รังสีเอ็กซ์ 4.ประเภทตรวจโดยใช้คลื่น 5.ประเภทตรวจหาสารเคมี ซึ่งเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบระเบิดแสงเครื่องนี้ จัดอยู่ในประเภทที่ 5 อาศัยหลักการตรวจจับไอระเหยและอนุภาคขนาดเล็กของสารประกอบทางเคมีที่ใช้สำหรับประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่สามารถทำได้ขึ้นเองอย่างง่าย จากสารระเบิด (Blasting Agent) ซึ่งเป็นสารตั้งต้น ที่มีใช้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน และมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด เช่น ปุ๋ยเคมี น้ำมัน ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ต่างๆ ทับทม ก๊าซหุงต้ม ฯลฯ และหากนำมาผสมรวมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจะกลายเป็นวัตถุระเบิด ปกติแล้วจะประกอบด้วยสารที่มีค่าออกซิเจนสูงๆ (Oxidizer) และสารที่เป็นเชื้อเพลิง (Fuel) เช่น การนำ Ammonium nitrate + Gasoline = ANFO

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบวัตถุ
- 1.6.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องตรวจวัตถุระเบิดประเภทต่างๆ
- 1.6.3 ค้นคว้าองค์ความรู้ระบบตรวจจับตามทฤษฎีสเปกโทรสโกปี
- 1.6.4 ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบระเบิดแสงเครื่อง
- 1.6.5 เก็บรวบรวมข้อมูลและเปรียบเทียบผลลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

2.1 วัตถุระเบิดและระเบิดแสงเครื่อง

วัตถุระเบิด คือสารประกอบทางเคมี ที่มีสถานะต่างๆ ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่เมื่อได้ได้รับปฏิกิริยาจากภายนอกทั้ง ความร้อน เปลวไฟ การกระแทก การเสียดสี หรือคลื่นการระเบิด แล้วจะเปลี่ยนแปลงสภาพจากเดิมกลายเป็นก๊าซปริมาณ มากมายจนจนมหาศาล กระจายออกทุกทิศทาง การขยายตัวของก๊าซที่เกิดจากการระเบิด ก่อให้เกิด แสงสว่าง เปลวไฟ ความร้อน และแรงดันจำนวนมาก วัตถุระเบิดสามารถแบ่งตามความเร็วในการจุดตัว (Velocity Of Detonation) ได้เป็น 2 ประเภทคือ

ประเภทที่ 1 วัตถุระเบิดแรงต่ำ (Low Explosive) จะแปรสภาพจากเดิมเป็นก๊าซได้ อย่างช้าๆ มีความเร็วในการจุดตัวน้อยกว่า 1,000 เมตร/วินาที เช่น ดินดำ ดินส่ง กระสุน พลุ ประทัด ดอกไม้ไฟ สารไพโรเทคนิคต่างๆ สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ หากเป็นการเผาไหม้อย่างรุนแรงในที่ห่อหุ้ม หรือที่บังคับ เช่น การระเบิดของประทัด การระเบิดของดินส่งกระสุนในรังเพลิง

ประเภทที่ 2 วัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive) จะแปรสภาพจากเดิมเป็นก๊าซได้ อย่างรวดเร็ว มีความเร็วในการจุดตัวมากกว่า ๑,๐๐๐ เมตร/วินาที การระเบิดของ วัตถุระเบิดแรงสูง เรียกว่า การปะทุ จะก่อให้เกิด คลื่นการปะทุ (Shock Wave) ซึ่งเป็น สาเหตุสำคัญของการระเบิด พ้อง (ทำให้ระเบิดที่อยู่ในรัศมีระเบิดตามไปด้วย

2.1.1 วัตถุระเบิดสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ได้ 3 ประเภท คือ

2.1.1.1 วัตถุระเบิดทางทหาร เป็นวัตถุระเบิดที่ใช้ในทางทหาร มีความเสถียรมาก มีความปลอดภัยในการเก็บรักษา มีความคงทนต่อการกระแทกเสียดสี เปลวไฟ และความร้อน ต้องใช้ตัวจุดที่เหมาะสมเท่านั้น จึงจะเกิดการระเบิด ได้แก่ ดินระเบิด มาตรฐานทางทหารชนิดต่างๆ เช่น TNT, Comp.4, Military Dynamite ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 วัตถุระเบิดทางพลเรือนเป็นวัตถุระเบิดที่ใช้ในทางพลเรือน ตามเหมืองหินหรืองานก่อสร้างต่างๆ เช่น การขุดหลุม การขุดอุโมงค์ การทำลายโครงสร้างอาคารต่างๆ มีความเสถียรน้อย ต้องใช้ความระมัดระวังในการเก็บรักษา มีความไวต่อการ กระแทกเสียดสี เปลวไฟ และความร้อน มากกว่าวัตถุระเบิดทางทหาร ได้แก่ ANFO, Commercial Dynamite ฯลฯ

2.1.1.3 วัตถุระเบิดทำเอง (Homemade Explosive or Dirty Bomb) เป็น วัตถุระเบิดที่สามารถทำได้ขึ้นเองอย่างง่าย ๆ จากสารระเบิด (Blasting Agent) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่มีใช้ทั่วไปในชีวิตประจำวันและมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด เช่น ปุ๋ยเคมี น้ำมัน ยาปราบศัตรูพืช ยา ย้อมผม ต่างๆทับทิม ก๊าซหุงต้ม ฯลฯ และหากนำมาผสมรวมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจะกลายเป็นวัตถุระเบิดปกติแล้วจะประกอบด้วยที่มีค่าออกซิเจนสูงๆ (Oxidizer) และสารที่เป็นเชื้อเพลิง (Fuel) เช่น การนำ Ammonium nitrate + Gasoline = ANFO

2.1.2 ระเบิดแสงเครื่อง

ระเบิดแสงเครื่อง หมายถึง วัตถุต้องสงสัย ซึ่งภายในมีการบรรจุวัตถุระเบิด (วัตถุระเบิดมาตรฐานและ/หรือสารเคมีต่างๆ) และอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ ด้วยระบบการจุดระเบิดด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง

วัตถุระเบิดแสงเครื่อง (IED.- Improvised Explosive Device) เป็นรูปแบบหนึ่ง ของกับระเบิด เป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป ที่จัดหาได้ง่ายๆ นำมาประดิษฐ์ เป็นระเบิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการนำวัตถุระเบิดทางทหาร ทางพลเรือน สารประกอบทางเคมี และนำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาประกอบรวมกันเป็นระเบิดแสงเครื่อง มีรูปแบบหลากหลาย ไม่แน่นอนตายตัว สามารถออกแบบได้ สลับซับซ้อน อันตราย เกือบๆแก้ไขได้ยาก ซึ่งการออกแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน และความชำนาญของผู้ประกอบระเบิด สามารถพินิจพิจารณาได้สะดวก แยกองค์ประกอบเคลื่อนย้ายได้ง่าย ตรวจพบได้ยาก ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีอำนาจการทำลายล้างสูง กว่าการก่อวินาศกรรมแบบอื่นๆ ก่อให้เกิดความหวาดกลัว มีผลต่อขวัญและกำลังใจสูงและที่สำคัญที่สุดคือเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก

2.1.2.1 องค์ประกอบของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ระเบิดแสงเครื่องมีองค์ประกอบหลายอย่าง มีความแตกต่างกันในระเบิดแต่ละลูก มีส่วนประกอบที่สำคัญโดยทั่วไปดังนี้

1 แหล่งพลังงาน (Power Supply) หรือแบตเตอรี่ ชนิดและขนาดต่างๆ เป็นตัวให้พลังงานไฟฟ้าในการจุดตัวจุดระเบิดหรือเชื้อปะทุไฟฟ้าซึ่งใช้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าในการจุดตัวเพียง 0.7 โวลต์ ในพื้นที่จังหวัดชายแดนภาคใต้ มีใช้ด้วยกันหลายแบบ แต่ที่พบส่วนมาก จะเป็นแบตเตอรี่ ขนาด 1.5, 6, 9, 12 โวลต์ทั้งแบบแห้ง และ แบบเติมน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 วัตถุระเบิด (Explosive) เป็นส่วนประกอบหลักที่ก่อให้เกิดแรงดันจำนวนมาก ความเสียหายที่เกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุระเบิด และปริมาณของวัตถุระเบิดที่ใช้ วัตถุระเบิดที่มีความเร็วในการจุดตัวสูงจะให้อำนาจการระเบิดรุนแรงกว่าวัตถุระเบิดที่มีความเร็วในการจุดตัวต่ำกว่าส่วนใหญ่วัตถุระเบิดที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดหลักจะเป็นดินระเบิดมาตรฐานทางพลเรือน และดินระเบิดชนิดทำเอง

ก. วัตถุระเบิดมาตรฐานทางพลเรือน ที่พบว่ามีการใช้มากและใช้งานมาโดยต่อเนื่องคือ แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium nitrate) ที่มีใช้งานทั่วไปตามเหมืองหินในพื้นที่ นำมาผสม น้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่เหมาะสมกลายเป็นวัตถุระเบิดที่เรียกว่า ANFO (Ammonium nitrate+Fuel) นอกจากนี้ยังสามารถนำ ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0, สารปราบศัตรูพืช (Sodium Chlorate) มาใช้ทดแทนได้ด้วยวัตถุระเบิดมาตรฐานทางพลเรือน และอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจอย่างกว้างขวางและต่อเนื่อง คือ Emulsion Explosive หรือที่เรียกกันว่า Power gel นิยมนำมาใช้เป็นส่วนขยายการระเบิด (Booster) ทำให้การระเบิดสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้ วัตถุระเบิดแรงต่ำประเภท ดินดำ และสารไพโรเทคนิค (สารให้แสงสว่างและสีต่างๆ) มาใช้เป็นวัตถุระเบิดหลักทดแทนวัตถุระเบิดข้างต้น ซึ่งสามารถให้อำนาจการระเบิดได้เช่นกัน ส่วนใหญ่ได้มาจาก ดินดำทำเอง ดินดำ/เทา จาก พลุ ประทัด ดอกไม้ไฟ

ข. วัตถุระเบิดทางทหาร ในช่วงแรกของการก่อเหตุ (ปี ๒๕๔๗-๒๕๕๑) ไม่พบว่ามีการใช้ดินระเบิดมาตรฐานทางทหาร แต่หลังจาก ปี ๒๕๕๒ เป็นต้นมาพบว่ามีการใช้ดินระเบิดทางทหารมากขึ้น ส่วนใหญ่นำมาเป็นส่วนขยายการระเบิดเพื่อให้ การระเบิดมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.1.2.2 ตัวจุดระเบิด หรือเชื้อปะทุ (Detonator) ถือเป็นหัวใจสำคัญของการจุดระเบิด หากขาดเชื้อปะทุก็จะไม่สามารถเกิดระเบิดขึ้นได้ เชื้อปะทุที่ใช้ใน จังหวัดชายแดนภาคใต้ ส่วนใหญ่ เป็นเชื้อปะทุไฟฟ้า ที่มีทั้งแบบมาตรฐานทางพลเรือนและแบบแสงเครื่อง

2.1.2.3 ระบบควบคุมการจุดระเบิด (Switch) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่จะทำให้ระเบิดแสงเครื่องเกิดระเบิดขึ้นตามวัตถุประสงค์ของผู้ก่อเหตุ ที่พบส่วนมากเป็นการดัดแปลงจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทั่วไป

2.1.2.4 ภาชนะที่ใช้บรรจุ (Container) ในพื้นที่จังหวัดชายแดนภาคใต้ มีรูปแบบของภาชนะบรรจุที่มีความหลากหลาย ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน การซ่อนพรางและตามความต้องการของผู้ประดิษฐ์ เมื่อเกิดการระเบิดขึ้น ชิ้นส่วนของภาชนะบรรจุจะแตกออกกลายเป็นสะเก็ดระเบิด (Fragment) สาดกระจายออกไปทุกทิศทาง ก่อให้เกิดความเสียหายสร้างความบาดเจ็บและสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ระบบตรวจวัดระเบิด

2.1.3.1 ประเภทของระบบตรวจวัดระเบิดแบ่งได้ 5 ประเภทดังต่อไปนี้

- 1 ประเภทตรวจหาโลหะ
- 2 ประเภทตรวจหาสารเคมี
- 3 ประเภทตรวจหากลิ่น
- 4 ประเภทตรวจโดยใช้รังสีเอกซ์
- 5 ประเภทตรวจโดยใช้คลื่นวิทยุ

2.1.4 หลักการทำงานของระบบตรวจวัดแต่ละประเภท

2.1.4.1 ประเภทตรวจหาโลหะ

ระบบตรวจวัดระเบิดประเภทนี้จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อในการตรวจโดยทำการยิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังวัสดุที่ต้องการตรวจ คลื่นที่สะท้อนจากวัสดุจะถูกตรวจจับโดยหัววัด (detector) แล้วทำการวิเคราะห์หาความยาวคลื่นของคลื่นสะท้อน ถ้าหากความยาวของคลื่นสะท้อนตรงกับค่าของคลื่นสะท้อน ถ้าหากความยาวของคลื่นสะท้อนตรงกับค่าของคลื่นสะท้อนจากโลหะก็แสดงว่าวัสดุที่ถูกตรวจนั้นมีโลหะเป็นองค์ประกอบซึ่งอาจเป็นวัตถุระเบิดก็ได้ เนื่องจากเครื่องประเภทนี้ตรวจหาโลหะซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิด จึงไม่ถือว่าเป็นเครื่องตรวจวัดระเบิดโดยตรง แต่เป็นเครื่องช่วยตรวจหาวัตถุระเบิด (Accessory to Explosive Detection) เรามักจะใช้เครื่องตรวจประเภทนี้สำหรับตรวจวัดระเบิด ณ ประตูทางเข้าสถานที่สำคัญต่างๆ เช่น ห้องประชุมและทางเข้าห้องพักรอโดยสารเครื่องบินในสนามบิน เป็นต้น เครื่องประเภทนี้นอกจากจะสามารถตรวจหาวัตถุระเบิดได้แล้วยังสามารถตรวจหาอาวุธชนิดอื่นๆ เช่น ปืน มีด และของมีคมอื่นๆ

2.1.4.2 ประเภทตรวจหาสารเคมี

เครื่องตรวจวัดระเบิดประเภทนี้จะตรวจสอบสารเคมีที่เป็นเนื้อของวัตถุระเบิดโดยจะตรวจหาไอ (vapor) หรืออนุภาคขนาดเล็ก (microscopic particle) ซึ่งปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่ทำการตรวจสอบนั้น เนื่องจากไอหรืออนุภาคขนาดเล็กที่ปลดปล่อยออกมานี้มีปริมาณต่ำมากจึงเป็นการยากที่จะตรวจพบและยากที่จะออกแบบให้เครื่องตรวจประเภทนี้มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่นวัตถุระเบิดที่ทำด้วยสารประกอบประเภท Ethylene Glycol Dinitrate (EGDN) ซึ่งถือเป็นวัตถุระเบิดที่มีปริมาณไอสูงสุดของดินระเบิดไดนาไมต์ (dynamite) จะมีความดันไอ (vapor pressure) เพียง 64 ppm (64 ส่วนในอากาศ 10^6 ส่วน) ในกรณีของดินระเบิด Trinitro Toluene (TNT) ค่าความดันไอยิ่งน้อยลงไปอีกหรือมีค่าเพียง 6 ppb (6 ส่วนในอากาศ 10^9 ส่วน) เท่านั้นสำหรับดินระเบิดประเภท Pentaery Tetranitrate (PETN) และ Cyclonite (RDX) ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่มีอยู่ในวัตถุระเบิดชนิด

Datasheet และ C-4 จะมีความดันไอเพียง 6 ppt (6 ส่วนในอากาศ 10^{12} ส่วน) เท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยากที่จะออกแบบให้เครื่องตรวจวัดระเบิดประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการตรวจเท่ากับเครื่องตรวจวัดระเบิดประเภทอื่นๆ

เทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องตรวจวัดระเบิดประเภทนี้มีหลายแบบ เช่น Electron-Capture Detector (ECD), Chemiluminescence, Ion Mobility Spectrometry (IMS) และ Gas Chromatography/Surface Acoustic Wave (GC/SAW) เป็นต้น

เครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดประเภทนี้สามารถตรวจหาวัตถุระเบิดได้หลายชนิด เช่น EGDN, NG, AN, TNT, RDX, และ PETN เป็นต้น ข้อดีของเครื่องประเภทนี้คือมีขนาดเล็ก เคลื่อนที่ได้และมีราคาไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียที่บางครั้งต้องทำการเปิดภาชนะหรือกล่องที่บรรจุสิ่งที่ต้องการตรวจ เพื่อให้สามารถตรวจวัดระเบิดประเภทตรวจสอบสารเคมีนี้เหมาะสำหรับใช้ตรวจบุคคล เพราะไม่เป็นอันตรายต่อถูกตรวจและในปัจจุบันนี้ขายในท้องตลาดทั่วไปอยู่หลายแบบด้วยกัน

2.1.4.3 ประเภทตรวจหากลิ่น

สุนัขดมกลิ่นจัดเป็นเทคโนโลยีในเครื่องตรวจวัดระเบิดประเภทหนึ่งซึ่งสามารถตรวจหาวัตถุระเบิดที่ซุกซ่อนตามสถานที่ต่างๆ ได้โดยการดมกลิ่น สุนัขดมกลิ่นเป็นที่นิยมใช้ในหน่วยงานของรัฐที่รับผิดชอบทางด้านความมั่นคง เช่น หน่วยงานของทหารตำรวจและหน่วยรักษาความปลอดภัย เป็นต้น กระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกาเป็นหน่วยที่ใช้สุนัขดมกลิ่นมากที่สุดและเคยใช้ในสงครามต่างๆ ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 1 โดยใช้ในด้านการเฝ้าตรวจและลาดตระเวน ในปัจจุบันนี้กระทรวงกลาโหมสหรัฐมีสุนัขดมกลิ่นประจำการอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลกประมาณ 13,000 ตัว และมากกว่า 500 ตัวที่สามารถตรวจวัดระเบิดได้

โดยหลักการแล้วถือว่าสุนัขดมกลิ่นสามารถตรวจหาวัตถุระเบิดและยาเสพติดได้ทุกชนิดถ้าได้รับการฝึก และเป็นประเภทการตรวจหาวัตถุระเบิดที่ซุกซ่อนตามสถานที่ต่างๆ ที่ประสิทธิภาพสูงสุดดีกว่าระบบตรวจวัดที่มนุษย์สร้างขึ้นทุกชนิด ข้อดีของสุนัขดมกลิ่นคือมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ เพราะสุนัขสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกจุดที่ผู้ควบคุมสามารถไปได้ แม้แต่จุดที่เป็นอันตราย เช่น สนามกับระเบิด (mine field) และสามารถสะกดรอยหาตำแหน่งซุกซ่อนของวัตถุระเบิดได้ ข้อเสียของสุนัขดมกลิ่นคือไม่สามารถปฏิบัติงานได้เป็นเวลานานโดยต่อเนื่อง โดยปกติจะปฏิบัติงานไม่เกิน 40-60 นาที ต้องหยุดพักดังนั้นจึงไม่เหมาะกับปฏิบัติการที่ใช้เวลานานๆ ข้อเสียอีกอย่างคือไม่สามารถบอกชนิดของวัตถุระเบิดที่ตรวจพบได้ นอกจากนี้การใช้สุนัขดมกลิ่นยังมีข้อจำกัดในการตรวจหาวัตถุระเบิดที่ซุกซ่อนในคนเพราะอาจเป็นอันตรายต่อคนหรือทำให้คนตกใจกลัว

ค่าใช้จ่ายในการใช้สุนัขดมกลิ่น ถือได้ว่าไม่สูงโดยประกอบด้วย ค่าจัดหาสุนัข ค่าฝึก ค่าอาหารและค่ารักษาพยาบาล ซึ่งตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา จะมีค่าหาสุนัขอยู่ระหว่าง 5,000-10,000 เหรียญสหรัฐ ค่าฝึกสุนัขอยู่ระหว่าง 6,000-12,000 เหรียญสหรัฐ ค่าอาหารประมาณ 1,000 เหรียญสหรัฐต่อปีและค่ารักษาพยาบาล 600 เหรียญสหรัฐต่อปี

2.1.4.4 ประเภทตรวจโดยใช้รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีในการตรวจวัดโลหะเปิดโดยใช้รังสีเอกซ์นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ทำการตรวจวัสดุทั้งก่อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์บางอย่างที่เป็นสมบัติของวัสดุนั้น ทั้งนี้เพื่อที่จะวินิจฉัยว่ามีวัตถุระเบิดอยู่ในวัสดุที่ทำการตรวจหรือไม่ การตรวจกระทำโดยการฉายรังสีเอกซ์กราดไปยังวัสดุที่ต้องสงสัยนั้นแล้วทำการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับ จากปริมาณรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุที่ถูกตรวจได้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน (absorption coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์ ของการสะท้อนกลับ (backscatter coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (transmission coefficient) เป็นต้น จากค่าเหล่านี้จะสามารถคำนวณหาค่าที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของสารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ถูกตรวจ เช่น มวล ความหนาแน่น ปริมาณของไนโตรเจน และค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number) เป็นต้นค่าเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการแปลงเป็นภาพถ่ายของวัสดุที่ถูกตรวจซึ่งสามารถแสดงรูปร่างพร้อมสีสั่นบนจอคอมพิวเตอร์ให้ผู้ควบคุมทำการวินิจฉัยได้ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะภาพให้ปรากฏในจอคอมพิวเตอร์ ถ้าผู้ควบคุมได้รับการฝึกอบรมในด้านการอ่านภาพจะสามารถวินิจฉัยได้ว่าวัสดุที่ถูกตรวจนั้นมีวัตถุระเบิดหรืออาวุธหรือไม่ เทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องตรวจวัดโลหะเปิดประเภทนี้มีหลายแบบ เช่น Transmission/Dual-Energy X-Ray, Backscatter X-Ray และ Computed Tomography เป็นต้น

1. Transmission/Dual-Energy X-Ray

การใช้รังสีเอกซ์พลังงานเดียวเพื่อถ่ายภาพวัสดุในแนวเส้นตรงที่รังสีเดินทางผ่านนั้นจะได้ภาพของวัตถุนั้นเดียวไม่ว่าวัสดุที่ถูกถ่ายภาพนั้นจะประกอบด้วยวัตถุชนิดเดียวหรือหลายชนิดดังนั้นเครื่องตรวจวัดโลหะเปิดที่ใช้รังสีเอกซ์พลังงานเดียวจึงไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของวัตถุ 2 ชนิดได้ แต่ถ้าใช้รังสีเอกซ์ 2 พลังงาน (dual-energy-x-ray) จะทำให้ได้ภาพที่สามารถแยกวัตถุ 2 ชนิด ออกจากกันได้ ทั้งนี้เพราะค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรังสีของวัตถุ ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์

อย่างไรก็ตามการอาศัยรังสีเอกซ์ที่มี 2 พลังงานอย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงทิศทางการฉายรังสีเอกซ์ทั้งสองนั้นก็จะไม่สามารถแยกวัตถุระเบิดออกจากชนิดอื่นๆ ได้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะว่าวัตถุระเบิดส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ (low atom number) ซึ่งไม่ค่อยทำอันตรกริยากับรังสีเอกซ์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่วัดได้จะไม่ค่อยถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณค่าเลขอะตอมยังผลของวัสดุที่ถูกตรวจสอบไม่ค่อยตรงตามความเป็นจริง และจะได้ภาพ (image) ที่ไม่สะท้อนความเป็นจริง

วิธีหนึ่งที่จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้คือต้องทำให้เครื่องตรวจวัดโลหะเปิดสามารถวัดความหนาของวัสดุที่ถูกตรวจสอบ แต่โชคไม่ดีที่เครื่องตรวจวัดโลหะเปิดที่ใช้เทคโนโลยีชนิดนี้ไม่สามารถวัดความหนาของวัสดุได้ ดังนั้นวิธีดังกล่าวจึงไม่อาจแก้ปัญหาได้ วิธีการที่แก้ไขปัญหานี้คือต้องทำให้รังสีเอกซ์ 2 พลังงานนั้นอยู่ในแนวแกน 2 แกนที่ต่างกัน โดยแต่ละแกนทำมุม 90 องศาต่อกัน วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าเลขอะตอมยังผลของวัสดุที่ทำการเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความจริงซึ่งทำให้สามารถวินิจฉัยได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามหลักการวินิจฉัยว่ามีวัตถุของเครื่องตรวจวัดระบุเปิดชนิดนี้ยังไม่แม่นยำเพราะไม่ได้วินิจฉัยว่ามีวัตถุระบุเปิดหรือไม่แต่จะวินิจฉัยว่ามีวัตถุที่มีลักษณะคล้ายวัตถุระบุเปิดหรือเปล่าเท่านั้นเอง

2 Backscatter X-Ray

เครื่องตรวจวัดระบุเปิดชนิดนี้จะใช้เทคโนโลยีการสร้างภาพถ่ายโดยอาศัยสัญญาณจากการสะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์ (backscatter x-ray) ร่วมกับสัญญาณการทะลุผ่าน (transmission-x-ray) ในลักษณะนี้จะได้ภาพของวัตถุที่ถูกตรวจสอบจากสัญญาณทั้งสองชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณทั้งสองทำอันตรกิริยากับวัตถุแตกต่างกัน โดยภาพที่ได้จากสัญญาณการสะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์จะมีสีเส้นที่สว่างจ้ามกกว่าภาพที่ได้สัญญาณการทะลุผ่าน เนื่องจากรังสีเอ็กซ์จะสะท้อนกลับได้ดีเมื่อตกกระทบกับวัตถุที่ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ และบังเอิญวัตถุระบุเปิดก็ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ ดังนั้นภาพที่เกิดจากสัญญาณการสะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์ก็คือภาพที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์กระทบกับวัตถุที่น่าจะเป็นวัตถุระบุเปิดนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะภาพที่เกิดจากสัญญาณการทะลุผ่านกับภาพที่เกิดจากสัญญาณการสะท้อนกลับจะทำให้สามารถวินิจฉัย ได้ว่าวัตถุที่ถูกตรวจนั้น เป็นวัตถุระบุเปิดหรือไม่ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีวัตถุอื่นที่มีเลขอะตอมสูง วางอยู่ด้านหลังของวัตถุระบุเปิดอย่างหนาแน่นก็จะเกิดปัญหาในการวินิจฉัยอยู่ดีทั้งนี้เพราะว่าภาพที่ได้จากสัญญาณการสะท้อนกลับไม่มีความแตกต่างจากภาพของสัญญาณการทะลุผ่าน ดังนั้นจึงต้องแก้ไขโดยการใช้อนุภาพ 2 ชุด วางอยู่ในแนวตรงกันข้าม ในลักษณะเช่นนี้ภาพถ่ายที่ได้จากสัญญาณการสะท้อนกลับจะแสดงให้เห็นความแตกต่างกับภาพที่ได้จากสัญญาณการทะลุผ่านซึ่งทำให้สามารถวินิจฉัยได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

3 Computed Tomography (CT)

CT เป็นเทคโนโลยีของการถ่ายภาพสองมิติของวัตถุที่ถูกตรวจสอบโดยอาศัยรังสีเอ็กซ์ที่ทะลุผ่าน ภาพที่ได้จะเป็นภาพของหน้าตัด (cross section) ของวัตถุที่ถูกตรวจสอบในแนวทางเดินของรังสีเอ็กซ์ เมื่อทำการถ่ายภาพของหน้าตัดต่างๆ ที่อยู่ติดกันจำนวนมากๆ แล้วใช้คอมพิวเตอร์ทำการรวมภาพสองมิติของแต่ละหน้าตัดที่อยู่ติดกันเข้าด้วยกันจะกลายเป็นภาพสามมิติของวัตถุที่ถูกตรวจสอบเทคโนโลยีดังกล่าวจะขจัดปัญหาในการวินิจฉัยถึงความแตกต่างของวัตถุที่ต้องสงสัยจากวัตถุอื่นๆ ที่อยู่รอบๆ ทั้งนี้เพราะภาพที่ได้เกิดจากการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรังสีของวัตถุในแต่ละหน้าตัดของวัตถุที่ถูกตรวจสอบซึ่งจะสะท้อนความเป็นจริงมากขึ้น

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าวัตถุระบุเปิดส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ ดังนั้นแม้เครื่องตรวจวัดระบุเปิดชนิดนี้จะสามารถวัดเลขอะตอมยังผลของวัตถุที่ถูกตรวจสอบได้ตรงความเป็นระเบิดเสมอไปทั้งนี้เพราะสิ่งของอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ก็อาจประกอบด้วยวัตถุที่มีเลขอะตอมต่ำ เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลอื่นๆ เพื่อประกอบการวินิจฉัยให้แม่นยำขึ้น เช่น ข้อมูลความหนาแน่น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นับเป็นความโชคดีที่วัตถุระเบิดจะมีความหนาแน่นแตกต่างจากสิ่งของอื่นๆ ดังได้กล่าวมาแล้วและเครื่องตรวจวัตถุระเบิดชนิดนี้ สามารถวัดความหนาแน่นของวัตถุที่ถูกตรวจสอบได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ข้อมูล 2 อย่างนี้ประกอบการวินิจฉัยได้อย่างถูกต้อง ข้อดีของเครื่องตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคโนโลยี CT นี้ นอกจากจะสามารถวินิจฉัยได้อย่างถูกต้องแล้วยังสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติแต่มีข้อเสียคือราคาสูง ระดับรังสีเอ็กซเรย์ที่ใช้สูงและใช้เวลาในการตรวจนาน

2.1.4.5 ประเภทตรวจโดยใช้คลื่นวิทยุ

เครื่องตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคโนโลยีประเภทนี้จะอาศัยหลักการของ Quadrupole Resonance (QR) ซึ่งจะมีหลักการทำงานโดยอาศัยสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของนิวเคลียสของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิด เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของวัตถุระเบิด ดังนั้นเครื่องตรวจวัตถุระเบิดประเภทนี้จะอาศัยสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของนิวเคลียสของไนโตรเจน ($N-14$) เป็นดัชนีในการวินิจฉัย

เนื่องจากนิวเคลียสที่ไม่เป็นทรงกลมทุกชนิดจะมีโมเมนต์ชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า “electric quadrupole moment” โดยโมเมนต์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับค่าเกรเดียนต์ของสนามไฟฟ้า (electric field moment) ที่เกิดจากสิ่งอื่นๆ ที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสทำให้นิวเคลียสดังกล่าวเกิดการหมุนควง (precess) ไปรอบๆ สนามไฟฟ้านั้น การหมุนควงนี้จะทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ซึ่งหมุนควงไปพร้อมๆ กับนิวเคลียสด้วยถี่ที่เท่ากัน ความถี่ดังกล่าวจะเป็นค่าเฉพาะค่าหนึ่ง ซึ่งแสดงถึงสมบัติของนิวเคลียสแต่ละชนิด เมื่อทำการกระตุ้นนิวเคลียสดังกล่าวโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency) จะทำให้นิวเคลียสนั้นอยู่ในภาวะถูกกระตุ้นหรือไม่สมดุลและเมื่อนิวเคลียสเหล่านี้กลับสู่ภาวะสมดุลจะปลดปล่อยอนุภาคโฟตอนที่มีความถี่เฉพาะค่าหนึ่งออกมา อนุภาคโฟตอนนี้จะแสดงสมบัติของนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นนั้น และเมื่อตรวจจับอนุภาคโฟตอนดังกล่าวแล้วทำการวิเคราะห์ก็จะสามารถวินิจฉัยได้ว่าวัตถุที่ถูกตรวจสอบนั้นคืออะไร

ในปี พ.ศ. 2536 ห้องปฏิบัติการของกองทัพเรือสหรัฐฯ ได้สร้างต้นแบบ (prototype) ของเครื่องตรวจวัตถุระเบิดชนิดนี้ขึ้นมา ซึ่งสามารถตรวจวัตถุระเบิดได้ทุกชนิดรวมทั้งระเบิดพลาสติก และบริษัท Quantum Magnetics (San Diego, CA) ได้ทำสัญญากับกองทัพเรือสหรัฐฯ เพื่อสร้างเครื่องตรวจวัตถุระเบิดชนิดดังกล่าวในปี พ.ศ. 2537 เพื่อใช้ในทางพาณิชย์

2.2 ทฤษฎีสเปกโตรสโกปี (Spectroscopy Theory)

วิชาสเปกโตรสโกปี (spectroscopy) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการกระทำของพลังงานของรังสีที่แผ่ออกมายังสาร ความยาวคลื่นต่างๆ ของรังสีที่สารอินทรีย์ดูดกลืนไว้นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารอินทรีย์ ดังนั้นเทคนิคทางสเปกโตรสโกปีจึงมีประโยชน์ใช้หาโครงสร้างของสารอินทรีย์และใช้ศึกษาพันธะต่างๆ ในสารอินทรีย์ที่รู้โครงสร้างแล้วได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer)

เครื่องมือที่ใช้วัดโดยอาศัยหลักวิชาสเปกโทรสโกปีเรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) หรือสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ซึ่งจะบันทึกผลออกมาบนแผ่นกระดาษ เรียกว่าสเปกโตรแกรม (spectrogram) หรือสเปกตรัม (spectrum)

2.2.2 ประเภทของสเปกโทรสโกปี แบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

2.2.2.1 อัลตราไวโอเลตและวิซิเบิลสเปกโทรสโกปี (ultraviolet-visible spectroscopy หรือ UV spectroscopy)

2.2.2.2 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared หรือ IR spectroscopy)

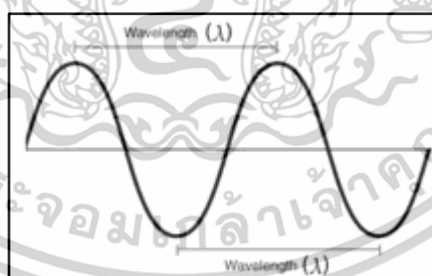
2.2.2.3 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance หรือ NMR spectroscopy)

2.2.2.4 แมสสเปกโตรเมตรี (mass spectrometry หรือ MS)

2.2.3 ทฤษฎีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy Theory)

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) เกิดจากสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้าที่ทำมุมเป็นมุมฉากกัน รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่แผ่ออกไปในรูปของคลื่น เช่น คลื่นวิทยุ (radio wave), แสงอัลตราไวโอเลต, แสงอินฟราเรด และแสงสว่าง (visible) เป็นต้น คลื่นเหล่านี้มีสมบัติที่อธิบายได้ด้วยความถี่ (frequency, ν) และความยาวคลื่น (wavelength, λ)

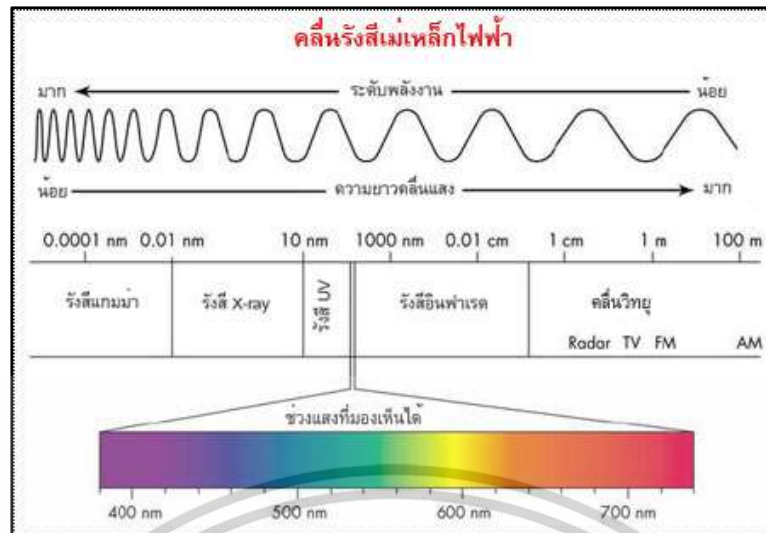
ความยาวคลื่น คือความยาวที่วัดจากยอดคลื่นลูกหนึ่งไปยังยอดคลื่นอีกลูกหนึ่ง ซึ่งอยู่ถัดไปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความยาวคลื่นของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นหลากหลายตั้งแต่รังสีแกมมาที่มีความยาวคลื่นน้อยที่สุด ไปจนถึงคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด แสงที่ตามองเห็นเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ในสเปกตรัมนี้ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-800 นาโนเมตร โดยมีแสงอัลตราไวโอเลตอยู่ติดกับช่วง 400 นาโนเมตร และแสงอินฟราเรดอยู่ติดกับช่วง 800 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้ามีสมบัติคือ ความถี่ หมายถึงจำนวนคลื่นในหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็น รอบ/วินาที (cycles per second, cps) หรือ เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) ซึ่งรังสีที่มีความถี่มาก จึงมีจำนวนคลื่นมากขึ้นในเวลาหนึ่งวินาที ดังนั้นความยาวคลื่นจะสั้นลงด้วย ความยาวคลื่นแปรผกผันกับความถี่ ดังสมการที่ 2.1

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ v = ความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

c = ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^{10} ซม./วินาที

λ = ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

ในอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ความถี่นิยมวัดเป็นเลขคลื่น (wave number) แทน เฮิรตซ์ เลขคลื่น คือ จำนวนคลื่นในระยะหนึ่งเซนติเมตร มีหน่วยเป็น ซม.⁻¹ คำนวณได้จากความยาวคลื่นดังสมการที่ 2.2

$$\text{ความยาวคลื่น, ซม.}^{-1} = \frac{1}{\lambda \text{ ซม.}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปในลักษณะของหมู่คลื่นซึ่งเรียกว่า โฟตอน (photon) หรือควอนตา (quanta) พลังงานของแต่ละโฟตอนเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.3

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของ Planck = 6.626×10^{-34} Joule.sec

พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผันตามความยาวคลื่น โดยที่รังสีที่มีความยาวคลื่นน้อย จะมีพลังงานสูงกว่า ดังนั้น โฟตอนของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยกว่าแสงที่ตามองเห็น (Vis) และคลื่นวิทยุ จึงมีพลังงานสูงกว่า พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นยิ่งสั้น พลังงานยิ่งสูง ดังนั้นแสง UV จึงมีพลังงานสูงสุด รองลงมาคือแสง Vis และคลื่นวิทยุตามลำดับ เมื่อรวมสมการ 2.1 กับสมการ 2.3 จะได้ว่า พลังงานของโฟตอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ ดังสมการที่ 2.4

$$E = h\nu \quad (2.4)$$

โมเลกุลทุกโมเลกุลมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ไม่ได้หยุดนิ่ง การเคลื่อนไหวมี 2 แบบ คือ การสั่น (Vibration) อะตอมในโมเลกุลสั่นไปมา และ การหมุน (Rotation) โมเลกุลหมุนรอบแกนกลาง ซึ่งระดับการเคลื่อนไหวของโมเลกุลขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของโมเลกุลนั้นๆ โมเลกุลที่มีพลังงานสูงจะเคลื่อนไหวมากกว่าโมเลกุลที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งพลังงานที่โมเลกุลดูดกลืนหรือปล่อยออกมา จะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta E = E_f - E_i \quad (2.5)$$

เมื่อ ΔE คือ ความแตกต่างของพลังงานจากระดับ i ไปยังระดับ f

E_i คือ ระดับพลังงานเริ่มต้น

E_f คือ ระดับพลังงานสุดท้าย

โมเลกุลสามารถดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวตามที่ต้องการเท่านั้น เมื่อดูดกลืนพลังงานเข้าไปแล้ว จะมี 2 แนวทางคือโมเลกุลอาจจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นต่อไป หรืออาจจะผ่อนคลาย (relax) กลับไปสู่สถานะพื้น (ground state) ก็ได้ ถ้าหากโมเลกุลเกิดการผ่อนคลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้าย พลังงานจะถูกคายออกมาที่มีปริมาณเท่ากับปริมาณที่ดูดกลืนไปคือ เท่ากับ ΔE ในรูปของความร้อนหรือแสง สำหรับอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและอัลตราไวโอเลตสเปกโทรสโกปีโมเลกุลจะเกิดการผกผันคล้ายไม่เกิดปฏิกิริยา

ถ้าโมเลกุลดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตเข้าไปแล้ว จะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลนั้นถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นได้นั้นต้องเป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปได้ง่ายซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่ไม่สร้างพันธะ (nonbonding orbital) และพายอิเล็กตรอน (pi electron) แต่ไม่ใช่อิเล็กตรอนในพันธะซิกมา (sigma bond) มาเพราะอิเล็กตรอนในพันธะซิกมา (sigma bond) ถูกนิวเคลียสดึงดูดไว้อย่างเหนียวแน่น ถ้าโมเลกุลใดดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) (ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่ารังสีอัลตราไวโอเลต) เข้าไปจะมีผลทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการยืดมากขึ้น การดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโมเลกุลซึ่งเป็นตัวกลางนั้น จะทำให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางออกมามีจำนวนโฟตอนน้อยลง หรือมีความเข้ม (intensity) น้อยลง การวัดความเข้มของแสงจึงเป็นหลักการที่สำคัญในวิชาสเปกโทรสโกปี

2.2.3.1 สเปกตรัมเป็นกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นหรือความถี่ของรังสีกับเปอร์เซ็นต์ความส่องผ่าน (% Transmittance, %T) หรือแอบซอร์เบ้นซ์ (Absorbance, A)

โดยเปอร์เซ็นต์ความส่องผ่าน คือ ร้อยละของความเข้มรังสีที่ผ่านตัวกลางออกมาได้ ดังสมการที่ 2.6

$$\%T = \frac{\text{ความเข้มของแสงหลังผ่านสารตัวอย่าง}}{\text{ความเข้มของแสงก่อนผ่านสารตัวอย่าง}} \times 100 \quad (2.6)$$

ถ้าสารตัวอย่างไม่ได้ดูดกลืนรังสี ความเข้มของรังสีจะเท่าเดิม ค่าเปอร์เซ็นต์ความส่องผ่านเท่ากับ 100% และมีความยาวคลื่นคงที่ แต่ถ้าดูดกลืนรังสี ความเข้มจะลดลงทำให้ภาพสเปกตรัมที่ปรากฏออกมาเป็นร่องลึก เรียกว่า ยอด (peak) หรือแถบการดูดกลืน (absorption band)

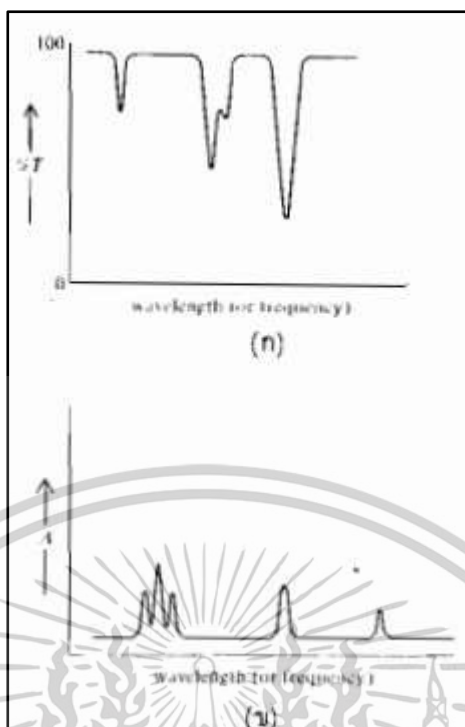
แอบซอร์เบ้นซ์คือ การวัดปริมาณการดูดกลืนรังสีของสารตัวอย่าง มีวิธีคำนวณดังสมการ

$$A = \log \left(\frac{\text{ความเข้มของรังสีหลังผ่านสารตัวอย่าง}}{\text{ความเข้มของรังสีก่อนผ่านสารตัวอย่าง}} \right) \quad (2.7)$$

ในกรณีของการวัดเป็นแอบซอร์เบ้นซ์ ถ้าการดูดกลืนรังสีมากขึ้น สัญญาณที่ปรากฏในสเปกตรัมจะสูงขึ้นตามไปด้วย ภาพสเปกตรัมเมื่อวัดความเข้มของรังสีเป็น %T และ A แสดงไว้ในรูปที่

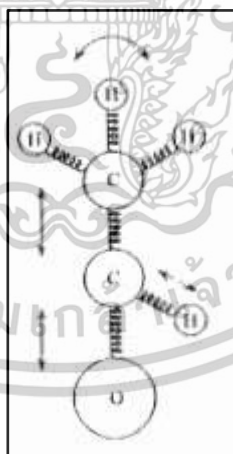
2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมที่วัดเป็น (ก) เปอร์เซนต์ความส่องผ่าน (ข) แอ็บซอร์เบนซ์ ที่ความยาวคลื่น (หรือความถี่) ต่างๆ [1]

2.2.3.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด อะตอมที่เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์มีการสั่นประดุกลูกตุ้มผูกติดกับปลายของสปริง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การสั่นของโมเลกุลของแอซิเทิลไฮด์ [1]

เมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไป พลังงานของรังสีที่ดูดกลืนเข้าไปจะทำให้พันธะยืดออก (stretch) หรืออ (bend) มากขึ้น ดังรูปที่ 2.5 โมเลกุลในขณะนี้จึงเรียกว่าอยู่ในสภาวะการสั่นที่ถูกกระตุ้น (excited vibrational state) และขณะที่โมเลกุลกำลังกลับเข้าสู่สภาวะพื้น (ground state) โมเลกุลจะค่อยๆคายพลังงานของรังสีที่ดูดกลืนเข้าไปออกมาเป็นความร้อนอินฟราเรดสเปกโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รศโกปีจึงเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงการยึดหรือการงอของพันธะในโมเลกุลเมื่อดูดกลืนพลังงานรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่เป็นแสงอินฟราเรดเข้าไป

การสั่นของโมเลกุลขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัว คือ

1. มวลของอะตอมที่ปลายทั้งสองของพันธะ
2. ความแข็งแรงของพันธะ

การสั่นของโมเลกุลอาจเปรียบเทียบได้กับการสั่นของมวลสปริงที่มีลูกตุ้มผูกติดอยู่อะตอม (หรือลูกตุ้ม) ที่มีมวลมากกว่าจะทำให้พันธะสั่นด้วยความถี่ที่ต่ำกว่า และพันธะ (หรือมวลสปริง) ที่แข็งแรงกว่าจะทำให้พันธะสั่นด้วยความถี่สูงกว่า สมการ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของรังสีกับมวลอะตอมและความแข็งแรงของพันธะ

$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{m^*}} \quad (2.8)$$

เมื่อ ν = ความถี่ของรังสีดูดกลืน cm^{-1}

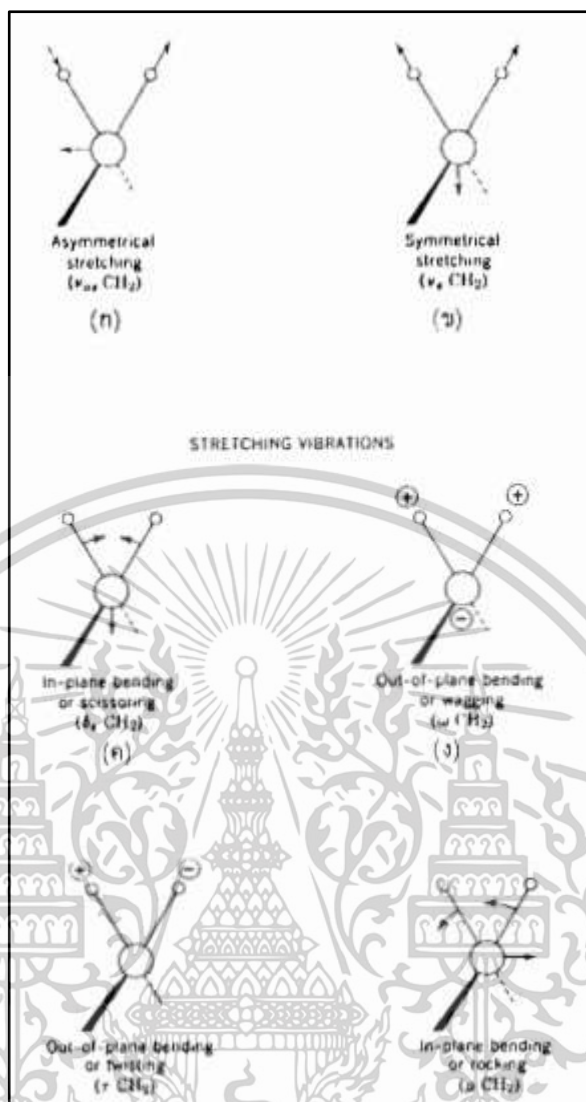
c = ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3.3×10^{10} ซม./วินาที

k = ค่าคงที่ของพันธะ

m^* = มวลลดทอน (reduced mass) ของอะตอมทั้งสองที่ปลาย

$$\text{สองข้างของพันธะ} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

m_1, m_2 = มวลของอะตอมทั้งสอง



รูปที่ 2.5 แบบการสั่นของหมู่ $-\text{CH}_2$ (ก) การยืดอสมมาตร (ข) การยืดสมมาตร (ค) การงอในระนาบเดียวกันหรือการหนีบแบบกรรไกร (ง) การออกนอกระนาบหรือการกระดิก (จ) การงอออกนอกระนาบหรือการบิด (ฉ) การงอในระนาบเดียวกันหรือการโยก [1]

หมายเหตุ $\oplus$ และ $\ominus$ หมายถึงการสั่นในทิศทางตั้งฉากกับหน้ากระดาษเข้าหาผู้อ่านและออกจากผู้อ่านตามลำดับ

สมการ 2.8 อธิบายได้ว่า ความถี่ของการสั่นเป็นส่วนตรงๆกับรากที่สองของค่าคงที่ของพันธะ (k) ค่าคงที่ของพันธะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะ นอกจากนี้แล้วความถี่ของการสั่นยังเป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของมวลลดทอนด้วย มวลของอะตอมยังมีค่ามากขึ้นเท่าใด รังสีที่จะดูดกลืนเข้าไปจะเป็นรังสีที่มีความถี่น้อยลงเท่านั้น ในทำนองเดียวกัน พันธะที่แข็งแรงเพียงใด รังสีที่จะถูกดูดกลืนจะต้องเป็นรังสีที่มีความถี่มากขึ้นเท่านั้น

จากหลักความจริงในสมการ 2.8 เราลองมาเปรียบเทียบค่าความถี่ของการสั่นของพันธะต่างๆ ดูบ้าง จากสมการ 2.8 จะเห็นได้ว่า ถ้าอะตอมที่ปลายทั้งสองของพันธะเหมือนกันแต่พันธะไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกัน พันธะที่แข็งแรงกว่าจะต้องการพลังงานสูงกว่าเพื่อใช้ในการยึดพันธะและเนื่องจากเลขคลื่นสอดคล้องกับระดับของพลังงาน ดังนั้นพันธะที่แข็งแรงจึงต้องการรังสีที่มีเลขคลื่นมากกว่า ตัวอย่างเช่น พันธะ $C\equiv C$, $C=C$, $C-C$ ต้องการรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น $\sim 2,200$ cm^{-1} , $\sim 1,650$ cm^{-1} และ $\sim 1,200$ cm^{-1} ตามลำดับ

ถ้าหากอะตอมสองอะตอมเป็นอะตอมต่างชนิดกัน แต่พันธะระหว่างอะตอมทั้งสองเป็นพันธะชนิดเดียวกัน พันธะที่มีมวลลดทอนมากกว่าจะต้องการรังสีอินฟราเรดที่มีพลังงานต่ำกว่าหรือมีเลขคลื่นน้อยกว่าเพื่อใช้ในการยึดพันธะ

โมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมตั้งแต่สามอะตอมขึ้นไปมีการสั่นได้หลายแบบ ดังนั้นแต่ละพันธะอาจดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่นหลายค่า ตัวอย่างเช่น พันธะ $O-H$ ดูดกลืนพลังงานที่เลขคลื่น $3,300$ cm^{-1} พลังงานที่เลขคลื่นนี้ทำให้พันธะ $O-H$ เกิดการยืดมากขึ้น นอกจากนี้พันธะ $O-H$ ยังดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่นประมาณ $1,250$ cm^{-1} อีกด้วย พลังงานที่เลขคลื่นนี้ทำให้พันธะ $O-H$ เกิดการงอ

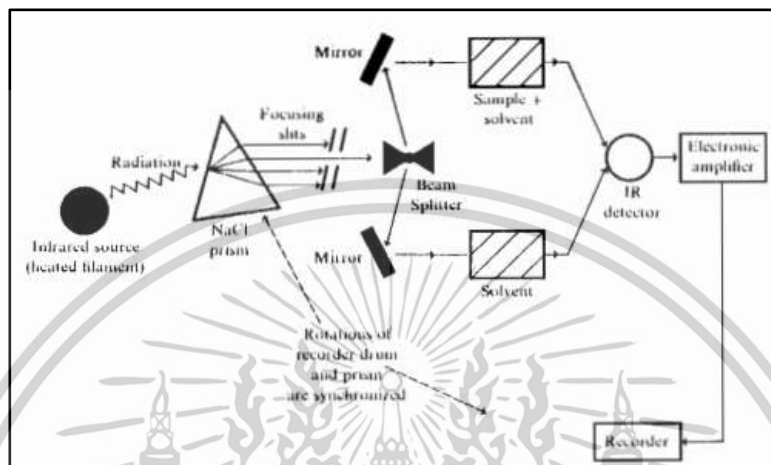
พลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแต่ละพันธะซึ่งเกี่ยวโยงไปถึงโมเมนต์ของพันธะขณะที่ดูดกลืนพลังงานเข้าไป พันธะที่ไม่มีขั้ว เช่น $C-H$ หรือ $C-C$ จะให้แถบการดูดกลืนรังสีที่มีความเข้มข้นน้อย ส่วนพันธะที่มีขั้ว (polar bond) เช่น $C=O$ จะให้แถบการดูดกลืนรังสีที่มีความเข้มข้นมาก

2.2.3.3 อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องมือที่วัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเรียกว่าอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ภาพ 2.6 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดผ่านรังสีซึ่งประกอบด้วยคลื่นแสงที่มีความยาวหลากหลายต่อเนื่องกัน เมื่อแสงอินฟราเรดผ่านปริซึมจะถูกแยกออกตามความยาวคลื่น เมื่อปริซึมหมุนจะปล่อยให้รังสีที่มีความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งเพียงค่าเดียวผ่านช่องโฟกัส (focusing slit) ออกไปที่ละค่า (จากน้อยไปหามาก) ลำแสงที่ประกอบด้วยความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวเรียกว่า ลำแสงเอกรงค์ (monochromatic beam) ต่อจากนั้นลำแสงเอกรงค์จะถูกแยกออกเป็นสองทาง ลำแสงแรกจะส่งผ่านสารละลายซึ่งมีสารตัวอย่างละลายในตัวทำละลาย อีกลำแสงหนึ่งจะส่งผ่านตัวทำละลายซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ละลายสารตัวอย่าง ลำแสงทั้งสองเมื่อผ่านสารละลายและตัวทำละลายแล้วจะผ่านไปยังเครื่องตรวจหาอินฟราเรด (infrared detector) ซึ่งจะทำหน้าที่หักลบความเข้มของแสงที่ผ่านตัวทำละลายออกจากความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลาย ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นความเข้มของแสงที่ผ่านสารตัวอย่างเพียงอย่างเดียว สัญญาณความเข้มของแสงที่ผ่านสารตัวอย่างจะถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นการหมุนของปริซึมและการหมุนของม้วนกระดาษกราฟจะต้องมีความเร็วที่ได้จังหวะสัมพันธ์กันเพื่อว่าความส่องผ่านที่อ่านได้จะได้ตรงกับค่าความยาวคลื่นบนแผ่นกราฟ นอกจากนี้เซลล์ที่บรรจุสารละลายหรือตัวทำละลาย และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่เป็นทางผ่านของแสงในอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จะทำได้ด้วยโลหะไฮไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

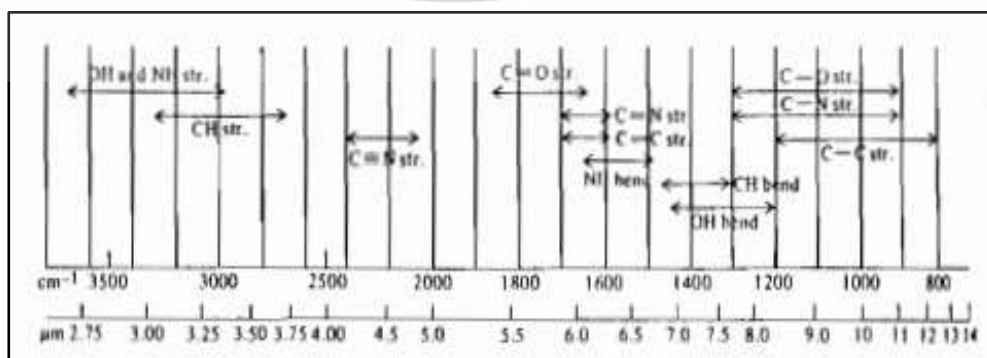
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไรต์ เป็นต้นดังนั้นเมื่อใช้เซลล์เหล่านี้จึงต้องใช้ความระมัดระวังและห้ามถูกน้ำโดยเด็ดขาด ควรเก็บเซลล์เหล่านี้ไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator) เมื่อต้องการทำให้แห้งปราศจากตัวทำละลายควรใช้วิธีเป่าด้วยแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน การที่ต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยโลหะเฮไลต์ก็เพราะว่ารังสีอินฟราเรดจะไม่ส่องผ่านวัสดุที่ทำด้วยแก้ว



รูปที่ 2.6 อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [1]

2.2.3.4 ประโยชน์จากอินฟราเรดสเปกตรัม อินฟราเรดสเปกตรัมช่วยทำให้เราทราบโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยบอกว่าในสารตัวอย่างมีหรือไม่มีหมู่ฟังก์ชันนัลใดบ้าง ในโมเลกุลของสารตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันนัลแต่ละหมู่จะปรากฏเป็นแถบการดูดกลืนรังสีที่เฉพาะแห่งและมีลักษณะเฉพาะตัว รูปที่ 2.7 เป็นแผนภาพแสดงความถี่ของอินฟราเรดที่พันธะในหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ เกิดการยืดหรือการงอ จากแผนภาพจะเห็นได้ว่า สัญญาณที่เกิดจากการยืดของพันธะ O-H, และ N-H อยู่ระหว่างเลขคลื่น $2,900-3,700 \text{ cm}^{-1}$ ($2.7-3.3 \mu\text{m}$) ถ้าสเปกตรัมของสารตัวอย่างมีการดูดกลืนรังสีในบริเวณนี้ เราควรตั้งข้อสงสัยไว้ว่า สารตัวอย่างนั้นอาจมีหมู่ -OH หรือหมู่ -NH อยู่ในโมเลกุล แต่ถ้าบริเวณนี้ไม่มีการดูดกลืนรังสีเลย ก็จะสรุปได้ว่าไม่มีหมู่ -OH หรือหมู่ -NH อยู่ในโมเลกุลอย่างแน่นอน

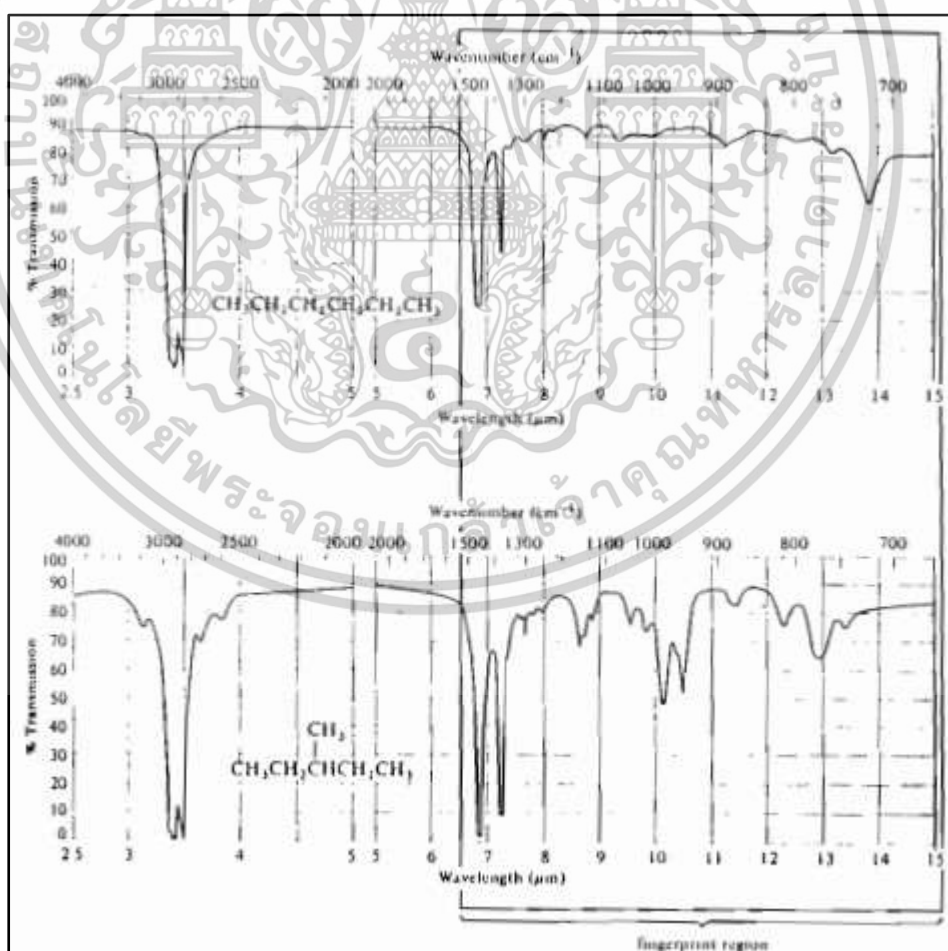


รูปที่ 2.7 ช่วงความถี่ที่เกิดจากการยืดหรือการงอของพันธะในหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณเลขคลื่นระหว่าง 1,500 ถึง 4,000 cm^{-1} ($2.5 \mu\text{m}$ ถึงประมาณ $6.5 \mu\text{m}$) ซึ่งเป็นบริเวณด้านซ้ายของสเปกตรัม เป็นส่วนที่มีประโยชน์ในการบ่งชี้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันนัลใดในโมเลกุล แลพบการดูดกลืนรังสีที่ปรากฏในบริเวณนี้เกิดจากการยืดของพันธะ บริเวณทางด้านขวาของเลขคลื่น 1,500 cm^{-1} เป็นบริเวณที่ค่อนข้างซับซ้อนเพราะเกิดการสั่นทั้งสองแบบคือการยืดและการงอ ในบริเวณทางด้านขวาของเลขคลื่น 1,500 cm^{-1} นี้จึงไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าแลพบการดูดกลืนรังสี แลพบใดเกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันนัลใด สารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีเอกลักษณ์ของแลพบการดูดกลืนรังสี แลพบใดเกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันนัลใด สารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีลักษณะของแลพบการดูดกลืนรังสีที่บริเวณด้านขวาของเลขคลื่น 1,500 cm^{-1} ซึ่งไม่เหมือนกันเลย บริเวณด้านขวาของเลขคลื่น 1,500 cm^{-1} จึงมีชื่อเรียกว่าบริเวณลายนิ้วมือ (fingerprint region) ถึงแม้ว่าสารอินทรีย์สองชนิดที่คล้ายกัน และมีแลพบการดูดกลืนรังสีที่บริเวณด้านซ้ายของสเปกตรัมคล้ายกันมาก ถ้าสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดเป็นสารชนิดเดียวกันต้องมีแลพบการดูดกลืนรังสีที่บริเวณลายนิ้วมือเหมือนกันด้วย รูปที่ 2.8 เป็นภาพสเปกตรัมของแอลเคนสองชนิดคือ n-hexane และ 3-methylpentane ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเหมือนกันคือ C_6H_{14} จงสังเกตว่าสเปกตรัมของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดมีแลพบการดูดกลืนรังสีระหว่าง 1,250 ถึง 4,000 cm^{-1} ($2.5 \mu\text{m}$ ถึงประมาณ $8 \mu\text{m}$) คล้ายกันมาก แต่บริเวณลายนิ้วมือไม่เหมือนกันเลย



รูปที่ 2.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของเฮกเซน และ 3-เมทิลเพนเทน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตีความหมายอินฟราเรดสเปกตรัมอาจจะประสบปัญหาบ้าง เช่น แทบการดูดกลืนรังสีของหมู่ฟังก์ชันนัลสองหมู่อาจเกิดการซ้อนกัน หรือแทบการดูดกลืนรังสีอาจจะปรากฏห่างออกไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น ปัญหาเหล่านี้ อาจจะมีสาเหตุมาจากคอนจูเกชัน (conjugation) การดึงดูดอิเล็กตรอนของหมู่อะตอมที่เกาะกับหมู่ฟังก์ชันนัลนั้น ความเครียดเชิงมุม (angle strain) ความเครียดแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals strains) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) หรือความเข้าใจผิดอันเนื่องมาจากการปรากฏของแทบการดูดกลืนรังสีของหมู่ฟังก์ชันนัลอื่น ต่อไปนี้เราจะรู้จักตำแหน่งและคุ้นเคยกับลักษณะแทบการดูดกลืนรังสีของหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ จากข้อมูลในตาราง 2.1

2.2.4. ไฮโดรคาร์บอน

2.2.4.1 พันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน การยืดของพันธะระหว่าง sp^3 -คาร์บอน กับ sp^3 -คาร์บอน (พันธะ C-C) มักจะปรากฏแทบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความเข้มที่บริเวณ $1,100-1,300 \text{ cm}^{-1}$ ($7.7-9.1 \mu$) การยืดของพันธะระหว่าง sp^2 -คาร์บอนกับ sp^2 -คาร์บอน (พันธะ C=C) ของแอลคีนจะปรากฏแทบการดูดกลืนรังสีที่บริเวณ $1,610-1,680 \text{ cm}^{-1}$ ($5.95-6.2 \mu$) แต่อาจเลื่อนไปที่ $1,600 \text{ cm}^{-1}$ ถ้ามีคอนจูเกชัน ส่วนการยืดของพันธะ C=C ในวงเบนซีนจะปรากฏที่ $1,500-1,600 \text{ cm}^{-1}$ ($6.25-6.67 \mu$) การยืดของพันธะระหว่าง sp -คาร์บอน กับ sp -คาร์บอน (พันธะ $C \equiv C$) ให้แทบการดูดกลืนรังสีที่ $2,100-2,200 \text{ cm}^{-1}$ ($4.4-4.8 \mu$) (รูปที่ 2.9) ถ้าแอลคีนหรือแอลไคน์มีลักษณะสมมาตร จะไม่ปรากฏแทบการดูดกลืนรังสีของการยืดพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน เพราะการสั่นของโมเลกุลที่สมมาตรจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ซึ่งเป็นสาเหตุของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โดยทั่วไปแล้วแทบการดูดกลืนรังสีอันเนื่องมาจากการสั่นของพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนจะให้ข้อมูลที่มีประโยชน์มากกว่า

ตาราง 2.1 ความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ดูดกลืนโดยหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ

Compound Type	Bond Type	Wave Number (Frequency)	Wavelength
Alkane	$\begin{array}{c} \\ -C-H \\ \end{array}$	2,850 – 2,970 (s) * 1,340 – 1,470 (s)	3.37 – 3.51 6.8 – 7.5
Alkane	$\begin{array}{c} & \\ -C & -C- \\ & \end{array}$	1,100 – 1,300 (w)	7.7 – 9.1
Alkane	$\begin{array}{c} \\ -C-D \\ \end{array}$	~2,200 (s)	4.55

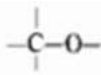
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alkene	$=\text{C}-\text{H}$	3,010 – 3,095 (m) 675 – 995 (s)	3.24 – 3.32 10.1 – 14.8
Alkene	$\text{C}=\text{C}$	1,610 – 1,680 (v)	5.95 – 6.2
Alkyne	$\equiv\text{C}-\text{H}$	3,200 – 3,300 (s)	3.0 – 3.1
Alkyne	$-\text{C}\equiv\text{C}-$	2,100 – 2,260 (v)	4.4 – 4.8
Aromatic	$\text{Ar}-\text{H}$	3,010 – 3,100 (m) 690 – 900 (s)	3.24 – 3.33 11.1 – 14.5
Aromatic ring	$\text{C}=\text{C}$	1,500 – 1,600 (v)	6.25 – 6.67
Monomeric alcohol, phenol	$-\text{O}-\text{H}$	3,590 – 3,650 (v)	2.74 – 2.79

*s=strong, m=moderate, w=weak, v=variable.

Compound Type	Bond Type	Wave Number (Frequency)	Wavelength
Hydrogen-bonded alcohol, phenol	$-\text{O}-\text{H}$	3,200 – 3,600 (v)	2.8 – 3.1
Monomeric carboxylic acid	$-\text{O}-\text{H}$	3,500 – 3,650 (m)	2.79 – 2.86
Hydrogen- bonded Carboxylic acid	$-\text{O}-\text{H}$	2,500 – 3,000 (v, broad)	3.7 – 4.0
Amine, amide	$-\text{N}-\text{H}$	3,300 – 3,500 (m)	2.79 – 3.1
Amine, amide	$-\text{C}-\text{N}$	1,180 – 1,360 (s)	7.4 – 8.5
Nitrile	$-\text{C}\equiv\text{N}$	2,210 – 2,280 (s)	4.4 – 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alcohol, ester, carboxylic acid		1,050 - 1,300 (s)	7.7 – 9.5
Aldehyde, ketone, carboxylic acid, ester		1,690 – 1,760 (s)	5.7 – 5.9
Nitro compound		1,500 – 1,570 (s)	6.4 – 6.67
		1,300 – 1,370 (s)	7.3 – 7.7

*s=strong, m=moderate, w=weak, v=variable.

2.2.4.2 พันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน สารอินทรีย์เกือบทุกชนิดมีพันธะ C-H แถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดอันเนื่องมาจาก การยืดของพันธะ C-H จะปรากฏให้เห็นที่บริเวณ 2,850-3,300 cm^{-1} (3.0-3.5 μ) ตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-H สามารถบอกชนิดของไฮบริดเซชันของคาร์บอนได้ว่าเป็น sp หรือ sp^2 หรือ sp^3 (ภาพ 2.10) ดังนี้

$sp^3\text{C-H}$ (-C-H) : 2,850-2,970 cm^{-1} (3.37-3.51 μ)

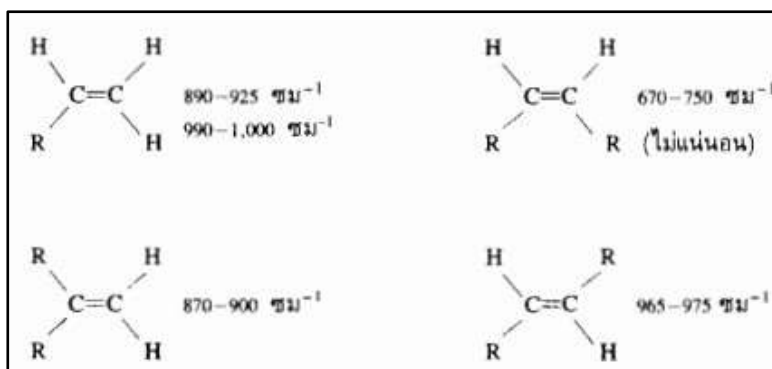
$sp^2\text{C-H}$ (=C-H) : 3,010-3,095 cm^{-1} (3.24-3.32 μ)

$sp\text{C-H}$ ($\equiv\text{C-H}$) : 3,200-3,300 cm^{-1} (3.0-3.1 μ)

แถบการดูดกลืนรังสีอันเนื่องมาจากการงอของพันธะ C-H ซึ่งปรากฏที่ความถี่ต่างๆ สามารถบอกโครงสร้างได้ กล่าวคือหมู่เมทิลและหมู่เมทิลีนจะดูดกลืนรังสีที่ความถี่ประมาณ 1,430-1,470 cm^{-1} สำหรับหมู่เมทิลจะมีแถบการดูดกลืนรังสีอีกแห่งหนึ่งที่ความถี่ประมาณ 1,375 cm^{-1} หมู่ไฮโปไฟรฟิลจะปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นแถบดูดกลืนรังสีคู่ซึ่งมีความเข้มพอๆ กันที่ความถี่ประมาณ 1,370 และ 1,385 cm^{-1} (และมักจะปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอีกแห่งหนึ่งที่ 1,170 cm^{-1} ด้วย) ส่วน tert-butyl จะปรากฏเป็นแถบการดูดกลืนรังสีคู่เช่นเดียวกัน แต่มักมีความเข้มไม่เท่ากัน ที่ความถี่ 1,370 cm^{-1} (เข้มมาก) และ 1,395 cm^{-1} (เข้มปานกลาง) (รูปที่ 2.10)

การงอของพันธะ =C-H ของแอลคีนและวงแอโรแมติก จะมีทั้งการงอในระนาบเดียวกัน (in-plane bending) และการงอออกนอกระนาบ (out-of-plane bending) การงอออกนอกระนาบจะให้ข้อมูลที่มีประโยชน์มากกว่า ถ้าเป็นแอลคีนการงอออกนอกระนาบจะปรากฏเป็นแถบการดูดกลืนรังสีที่เข้มมากที่ความถี่บริเวณ 800-1,000 cm^{-1} ตำแหน่งที่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับชนิดจำนวนของหมู่แทนที่ และสเตอริโอเคมีของแอลคีน (รูปที่ 2.11) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สำหรับวงแอโรแมติก การงอออกนอกระนาบของพันธะ C-H จะปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีที่เข้มข้นมากบริเวณ $670-870 \text{ cm}^{-1}$ ตำแหน่งที่แน่นอนของแถบการดูดกลืนรังสีจะขึ้นอยู่กับจำนวนและตำแหน่งของหมู่แทนที่ที่วงเบนซีน (รูปที่ 2.12) ดังนี้

หมู่แทนที่หมู่เดียว $670-710 \text{ cm}^{-1}$

$710-785 \text{ cm}^{-1}$

หมู่แทนที่สองหมู่ ตำแหน่งออร์โท $735-770 \text{ cm}^{-1}$

ตำแหน่งเมตา $680-710 \text{ cm}^{-1}$

$750-810 \text{ cm}^{-1}$

$855-895 \text{ cm}^{-1}$

ตำแหน่งเมตา $780-840 \text{ cm}^{-1}$

ถ้าหากเรามีอินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง เราจะทราบได้อย่างไร ว่าเป็นสเปกตรัมของแอโรแมติกหรือของแอลิแฟติกล้วน ความแตกต่างของสเปกตรัมของแอโรแมติกและแอลิแฟติกจะสังเกตได้จากรูปที่ 2.10 การดูดกลืนรังสีของสารประกอบแอลิแฟติกจะเข้มข้นมากที่สุดที่ความถี่สูงๆ และจะไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีที่ความถี่ต่ำๆ ซึ่งเกิดจากการงอออกนอกระนาบของพันธะ C-H ที่ความถี่บริเวณ $650-900 \text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้วงแอโรแมติกจะปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอันเนื่องมาจากการยืดของพันธะ C-H ที่บริเวณ $690-900 \text{ cm}^{-1}$ อีกด้วย

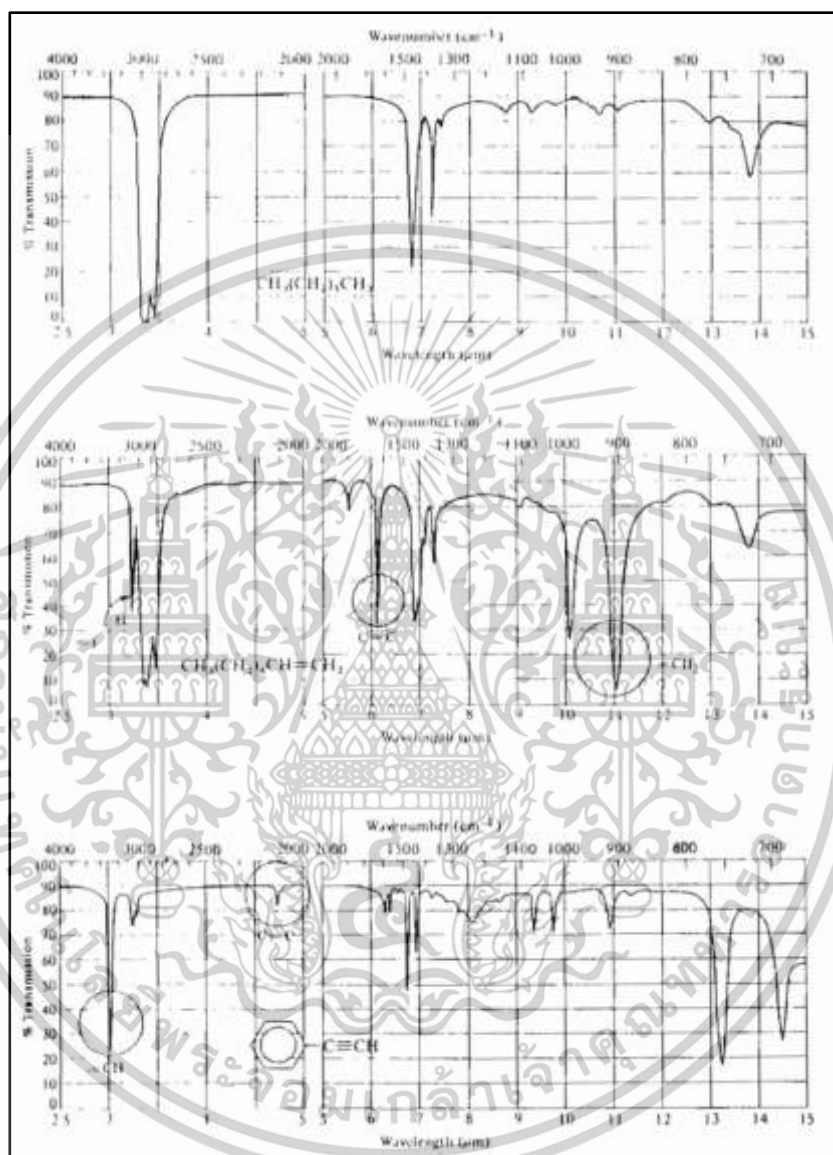
สำหรับแอลคีน แถบการดูดกลืนรังสีอันเนื่องมาจากการยืดของพันธะ C-H จะปรากฏที่ $3,010-3,095 \text{ cm}^{-1}$ และจากการงอออกนอกระนาบของพันธะ C-H จะปรากฏที่ $675-995 \text{ cm}^{-1}$

สำหรับแอลไคน์ที่มีพันธะสามที่ปลายสุดของโซ่ ($\text{RC}\equiv\text{CH}$) จะมีแถบการดูดกลืนรังสีที่เข้มข้นมาก อันเนื่องมาจากการยืดของพันธะ $\text{C}\equiv\text{H}$ ที่บริเวณ $3,200-3,300 \text{ cm}^{-1}$ และจากการยืดของพันธะ $\text{C}\equiv\text{C}$ ที่บริเวณ $2,100-2,260 \text{ cm}^{-1}$ แอลไคน์ที่มีหมู่แทนที่สองหมู่จะไม่มีแถบดูดกลืนรังสีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

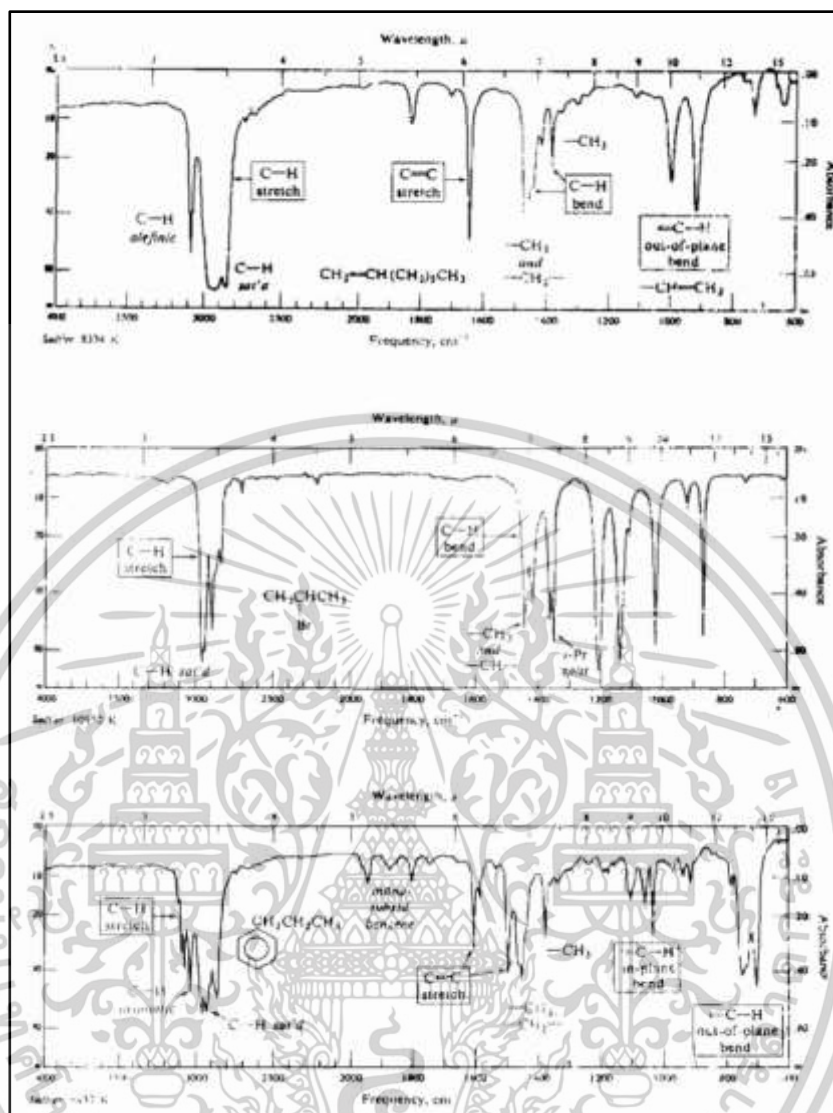
บริเวณ $3,200\text{--}3,300\text{ cm}^{-1}$ และถ้าหมู่แทนที่ทั้งสองคล้ายกันมากอาจจะมีแถบการดูดกลืนรังสีที่ $2,100\text{--}2,260\text{ cm}^{-1}$

รูปที่ 2.9 แสดงการดูดกลืนรังสีของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน และพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนของแอลเคน แอลคีนและแอลไคโน



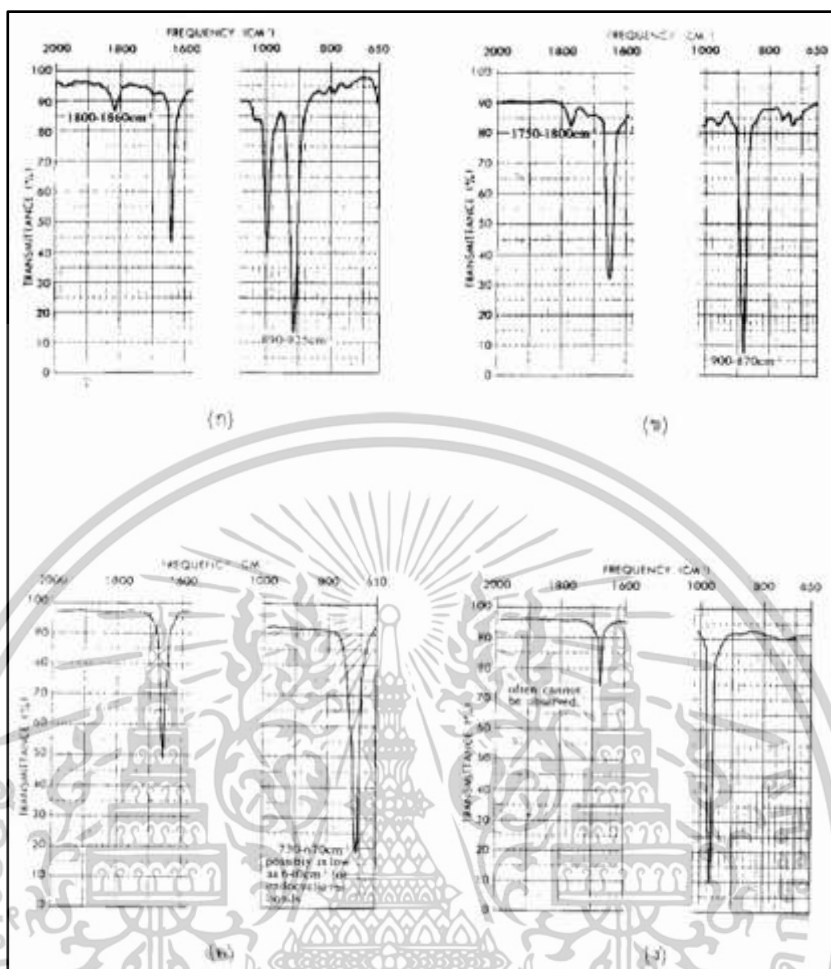
รูปที่ 2.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของเฮปเทน, 1-เฮปทีน และเพนิลอีไธน์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



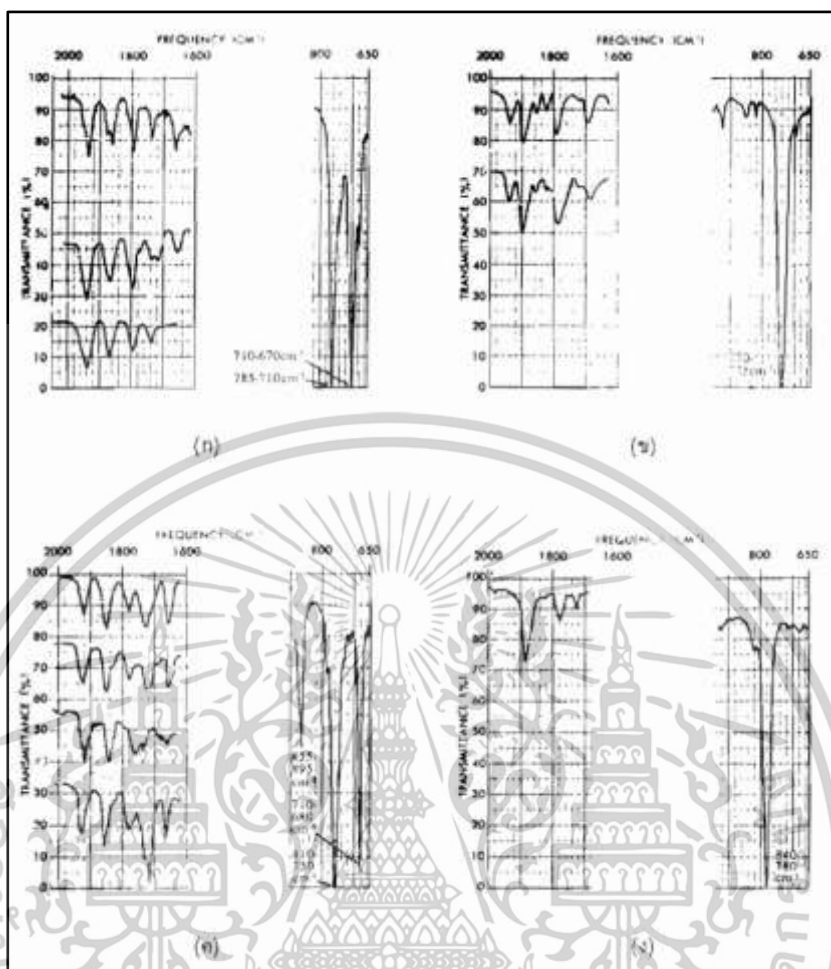
รูปที่ 2.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 1-octene, isopropyl bromide และ n-butylbenzene [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของแอลคีนจากการงอของพันธะ $=C-H$
 (ก) $RCH=CH_2$ (ข) $R_2C=CH_2$ (ค) $cisRCH=CHR$ (ง) $transRCH=CHR$ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

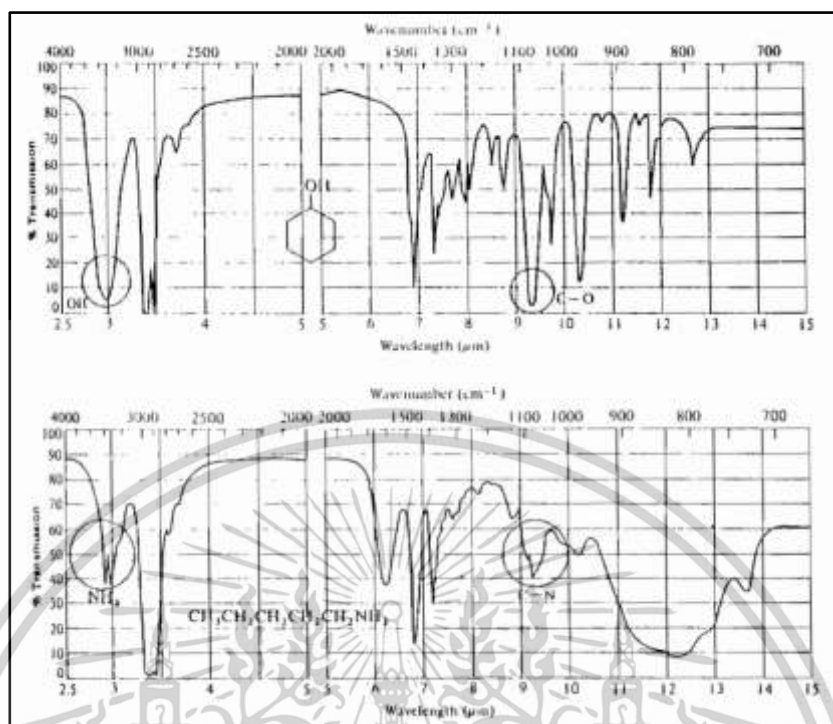


รูปที่ 2.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของวงเบนซีน [1]

- (ก) มีหมู่แทนที่หมู่เดียว (ข) หมู่แทนที่สองหมู่ตำแหน่งออร์โท
(ค) หมู่แทนที่สองหมู่ตำแหน่งเมตา (ง) หมู่แทนที่สองหมู่ตำแหน่งพารา

2.2.5 แอลกอฮอล์และอะมีน ทั้งแอลกอฮอล์ (alcohol) และอะมีน (amine) จะปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสองแห่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการยืดของพันธะ O-H (หรือ N-H) และพันธะ C-O (หรือ C-N) แถบการดูดกลืนรังสีซึ่งเกิดจากการยืดของพันธะ C-O และ C-N มีลักษณะเข้มและกว้าง (broad) อยู่ที่เลขคลื่น $1,050-1,360 \text{ cm}^{-1}$ ($7.4-9.5 \mu\text{m}$) ในบริเวณสายนิ้วมือของอินฟราเรดสเปกตรัม (มักเป็นการยากที่จะชี้ชัดลงไปว่าแถบการดูดกลืนรังสีซึ่งเกิดจากการยืดของพันธะ C-O และ C-N) แต่แถบการดูดกลืนรังสีซึ่งเกิดจากการยืดของพันธะ O-H และ N-H มีลักษณะเฉพาะตัวปรากฏที่เลขคลื่น $3,200-3,600 \text{ cm}^{-1}$ ($2.8-3.1 \mu\text{m}$) ซึ่งอยู่ถัดไปทางซ้ายของแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-H ไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของ cyclohexanol และ pentanamine [1]

รูป 2.13 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับอะมีน แลพบการดูดกลืนรังสีของ O-H และ N-H มีเครื่องหมายวงกลมแสดงไว้อย่างชัดเจน เนื่องจากออกซิเจนอะตอมมีสภาพไฟฟ้าลบสูงกว่าไนโตรเจนอะตอม การยึดของพันธะ O-H จึงทำให้โมเมนต์ของพันธะเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าการยึดของพันธะ N-H จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่า แลพบการดูดกลืนรังสีของพันธะ O-H เข้มกว่าของพันธะ N-H

อะมีนปฐมภูมิ (RNH_2) มีไฮโดรเจนสองอะตอมเกาะอยู่กับไนโตรเจนหนึ่งอะตอม แลพบการดูดกลืนรังสีของพันธะ N-H ใน RNH_2 จะปรากฏให้เห็นเป็นแถบคู่ อะมีนทุติยภูมิ (R_2NH) มีไฮโดรเจนอะตอมเดียวเกาะกับไนโตรเจนหนึ่งอะตอม แลพบการดูดกลืนรังสีของพันธะ N-H ใน R_2NH จะปรากฏให้เห็นเป็นแถบเดียว ส่วนอะมีนตติยภูมิไม่มีพันธะ N-H ดังนั้นจะไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีในบริเวณ $3,300\text{--}3,500\text{ cm}^{-1}$ ดังรูปที่ 2.11

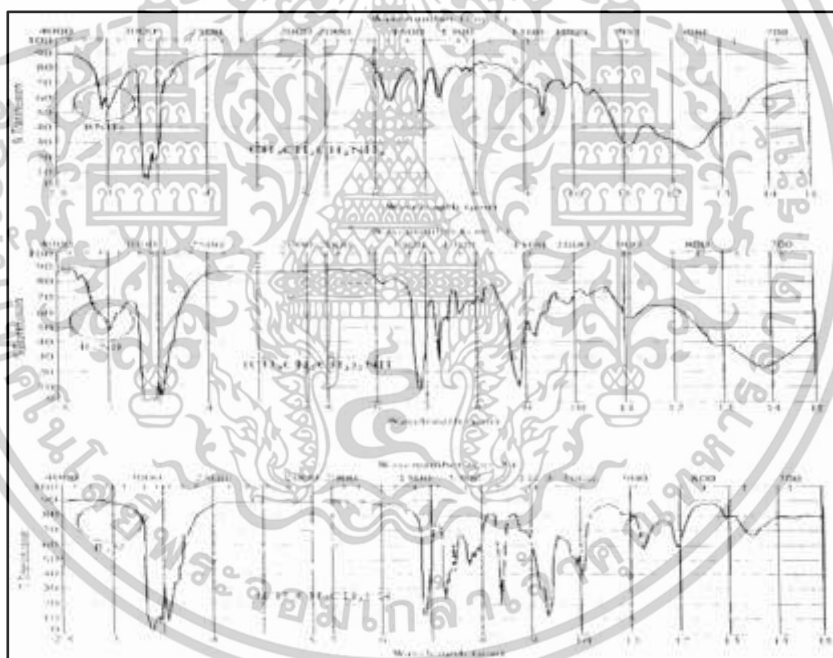
พันธะไฮโดรเจนสามารถเปลี่ยนตำแหน่งและลักษณะของแถบการดูดกลืนรังสีได้ รูปที่ 2.13 และ 2.14 เป็นสเปกตรัมของแอลกอฮอล์และอะมีนบริสุทธิ์ ไม่ได้เจือตัวทำละลายซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนมาก จึงสังเกตแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ O-H ในรูปที่ 2.10 มีลักษณะเป็นแถบกว้างที่เลขคลื่นประมาณ $3,330\text{ cm}^{-1}$ ($3.0\text{ }\mu\text{m}$) ถ้าพันธะไฮโดรเจนเกิดไม่มาก จะได้แถบการดูดกลืนรังสีที่มีลักษณะแหลมและมีความเข้มน้อยลงที่เลขคลื่นประมาณ $3,600\text{ cm}^{-1}$ ($2.75\text{ }\mu\text{m}$)

รูปที่ 2.15 เป็นอินฟราเรดสเปกตรัมของ tert-butyl alcohol ในตัวทำละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (คาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นตัวทำละลายที่ใช้กันมากในการศึกษาอินฟราเพราะว่าคาร์บอนเตตระคลอไรด์เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและให้แสงอินฟราเรดผ่านบริเวณช่วงคลื่นที่สำคัญๆ) จากสเปกตรัมทางซ้ายของภาพ 2.15 แถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ O-H อยู่ที่เลขคลื่น $3,440 \text{ cm}^{-1}$ และมีแถบการดูดกลืนรังสีใกล้เคียงๆ กันอีกแถบหนึ่งเลขคลื่น $3,620 \text{ cm}^{-1}$ มีความเข้มข้นเมื่อเปรียบเทียบกับแถบการดูดกลืนรังสีที่ $3,440 \text{ cm}^{-1}$ แถบการดูดกลืนรังสีทั้งสองแถบนี้เกิดจากการยืดของพันธะ O-H แถบการดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า (พลังงานสูงกว่า) เกิดจากการยืดของพันธะ O-H อิสระ การยืดของพันธะ O-H ที่มีพันธะไฮโดรเจนจะเกิดที่พลังงานต่ำกว่า กล่าวคือ

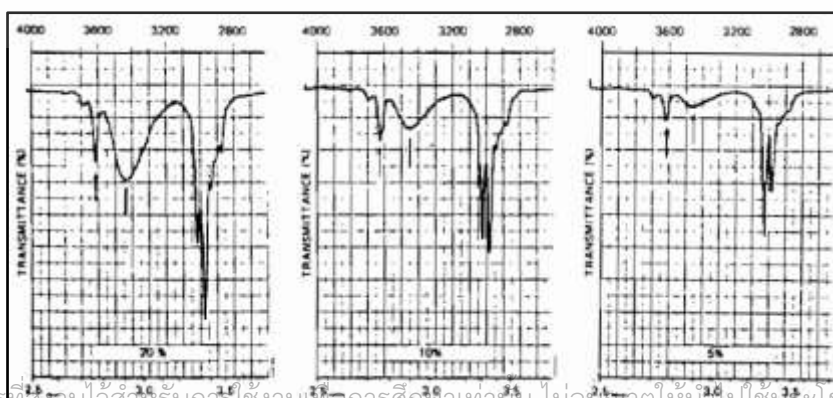
-OH (อิสระ) [O-H] $3,620\text{-}3,640 \text{ cm}^{-1}$

-OH (พันธะไฮโดรเจน [O-H...O]) $3,250\text{-}3,450 \text{ cm}^{-1}$

เมื่อสารละลายเจือจางมากขึ้น โมเลกุลของแอลกอฮอล์จะเป็นอิสระปราศจากพันธะไฮโดรเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของ *n*-propylamine, dipropylamine และ tripropylamine [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของ tert-butyl alcohol ละลายในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน [1]

2.2.6 อีเทอร์ (ether)

แสดงแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-O ที่เลขคลื่นบริเวณ 1,050-1,300 cm^{-1} (7.7-9.5 μ) ซึ่งอยู่ในบริเวณลายนิ้วมือ การดูดกลืนเข้มมากและมีลักษณะกว้าง (รูปที่ 2.16)

การยืดของพันธะ C-O:

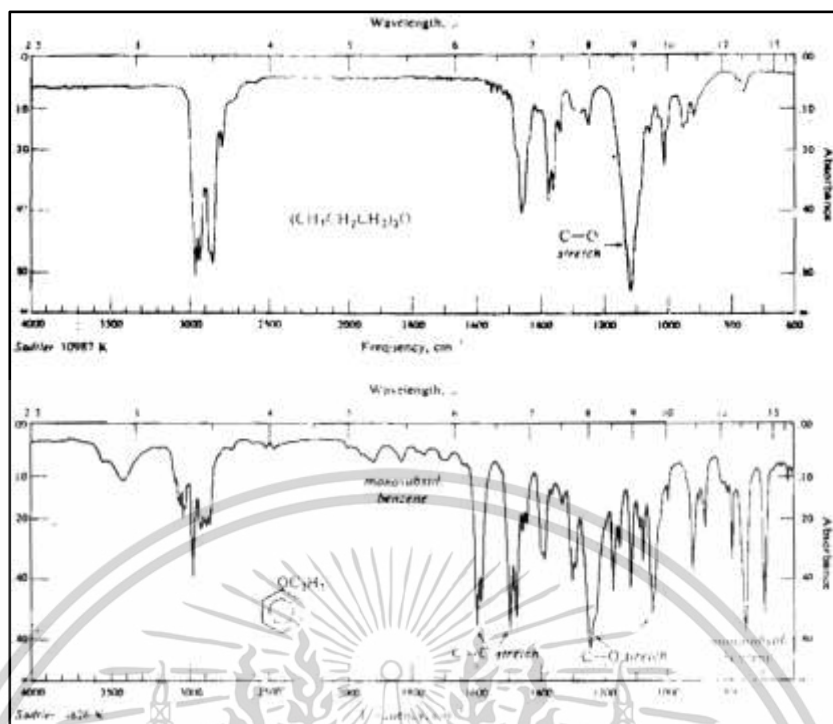
แอลคิลอีเทอร์ 1,060-1,150 cm^{-1}

เอริลอีเทอร์และไวนิลอีเทอร์ 1,200-1,275 cm^{-1}

(และมีอีกแถบหนึ่งที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าที่ 1,020-1,075 cm^{-1})

เนื่องจากออกซิเจนอะตอมมีสภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) สูงกว่าคาร์บอนอะตอม ดังนั้นการยืดของพันธะ C-O จึงทำให้ค่าโมเมนต์ของพันธะสูงขึ้น ทำให้แถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-O มีความเข้มมาก ถ้าสงสัยว่าสารตัวอย่างเป็นอีเทอร์ แถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-O ควรปรากฏให้เห็นเด่นชัด แต่ถ้าปรากฏแถบการดูดกลืนรังสีในบริเวณของพันธะ C-O ก็ยังไม่ควรถือว่าเป็นอีเทอร์ทันที ควรมีข้อมูลอย่างอื่นประกอบด้วย

2.2.7 สารประกอบคาร์บอนิล แถบการดูดกลืนรังสีที่เกิดจากการยืดของพันธะ C=O เป็นแถบการดูดกลืนรังสีที่เห็นเด่นชัด มีความเข้มมากอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1,690 ถึง 1,760 cm^{-1} (5.7-5.9 μm) หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) เป็นส่วนหนึ่งของหมู่ฟังก์ชันนัลหลายชนิดตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีของหมู่คาร์บอนิลในแอลดีไฮด์ คีโตน กรดคาร์บอกซิลิก และเอสเทอร์ แสดงในตาราง 2.2



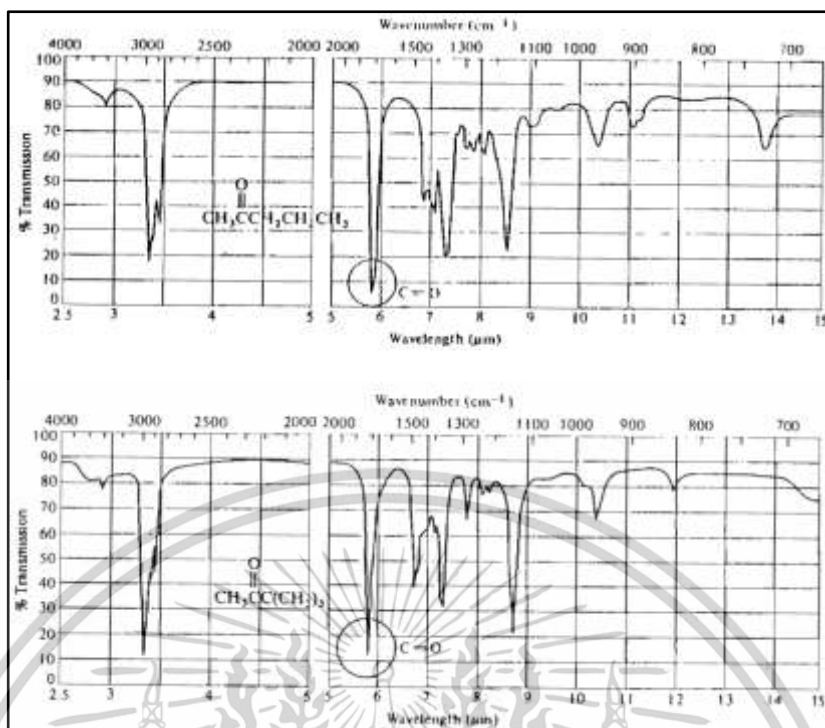
รูปที่ 2.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของ di- η ~ propyl ether และ phenetole [1]

ตาราง 2.2 การสั่นแบบยืดของสารประกอบคาร์บอนิลบางชนิด

ชนิดของสารประกอบ	ตำแหน่งของแถบการดูดกลืน	
	cm^{-1}	μm
แอลดีไฮด์ $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{(RCH)} \end{array}$	1,720 – 1,740	5.75 – 5.80
คีโตน $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{(R}_2\text{C)} \end{array}$	1,705 – 1,720	5.80 – 5.87
กรดคาร์บอกซิลิก $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{(RCOH)} \end{array}$	1,700 – 1,725	5.80 – 5.88
เอสเทอร์ $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{(RCOR)} \end{array}$	1,735 – 1,750	5.71 – 5.76

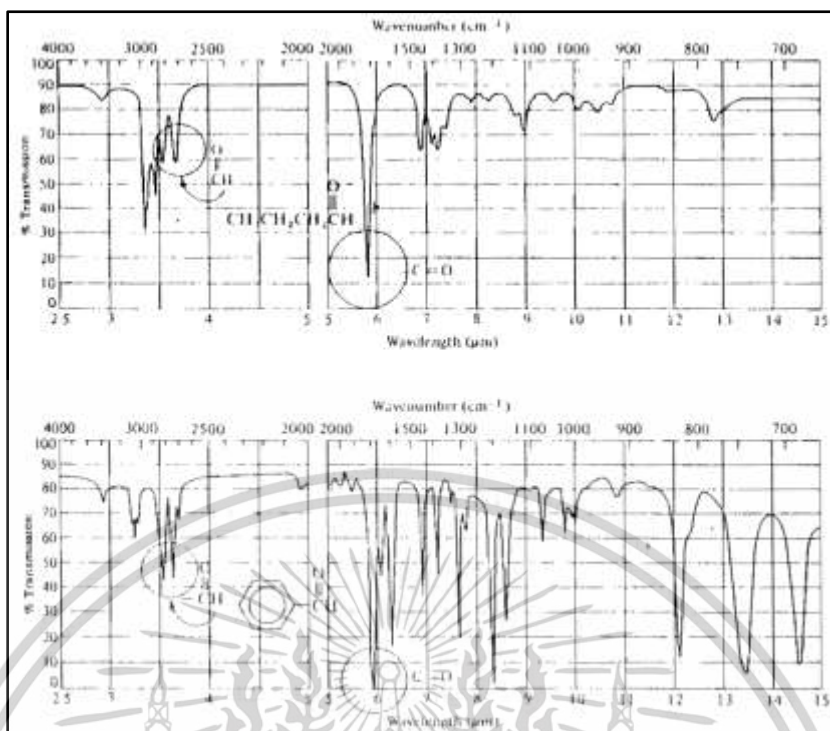
2.2.7.1 คีโตน แถบการดูดกลืนรังสีของคีโตน (ketone) จะเห็นได้เด่นชัด ถ้าเป็น แอลิแพติกคีโตน แถบการดูดรังสีจะเข้มมากซึ่งเป็นการยืดของพันธะ C=O และ C-H อินฟราเรดสเปกตรัมของคีโตนสองชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



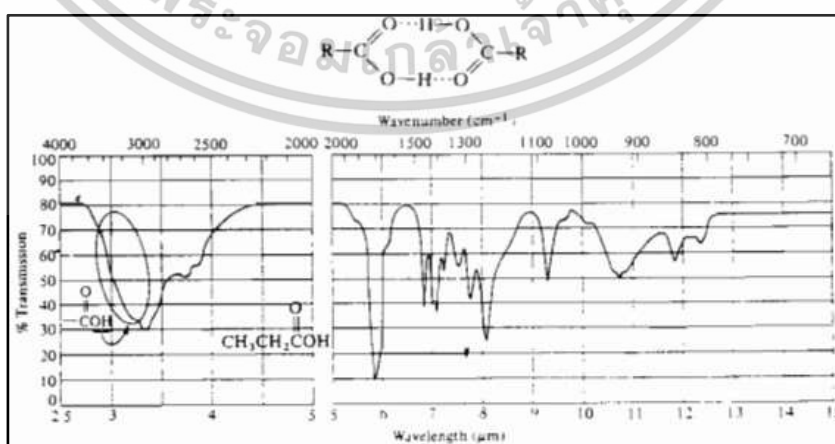
รูปที่ 2.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 2-pentanone และ 3,3- dimethyl-2-butanone [1]

2.2.7.2 แอลดีไฮด์ แอลดีไฮด์ในอินฟราเรดสเปกตรัมคล้ายกับอินฟราเรดสเปกตรัมของคีโตน แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างแอลดีไฮด์และคีโตนก็คือ แอลดีไฮด์มีไฮโดรเจนอะตอมเกาะกับคาร์บอนของหมู่คาร์บอนของหมู่คาร์บอนิล การยืดของพันธะ C-H ในหมู่ -CHO ให้แถบการดูดกลืนรังสีสองแถบที่มีลักษณะเฉพาะตัว คือ ที่เลขคลื่น 2,820-2,900 cm^{-1} (ถัดจากแถบการดูดกลืนรังสีของแอลิแฟติก C-H ไปทางขวาเล็กน้อย) และที่เลขคลื่น 2,700-2,780 cm^{-1} ดังรูปที่ 2.18 แถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-H ของหมู่ -CHO มีความแหลมคมแต่ไม่เข้มมาก แถบการดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น 2,900 cm^{-1} อาจจะเห็นไม่ชัด เพราะอาจถูกแถบการดูดกลืนรังสี C-H ซ้อนทับพันธะ C-H ของหมู่แอลดีไฮด์ให้สัญญาณในเอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัมที่มีลักษณะตัว ถ้าอินฟราเรดสเปกตรัมพิสูจน์ว่าสารประกอบที่สงสัยเป็นแอลดีไฮด์ควรตรวจสอบให้แน่ใจด้วยเอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัม



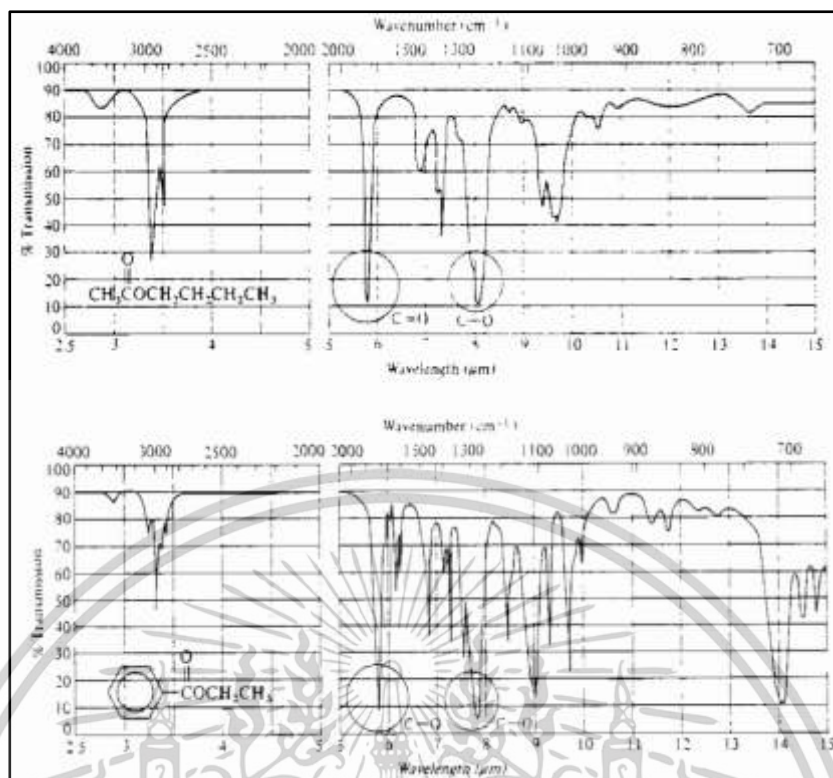
รูป 2.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของ buntal และ benzaldehyde [1]

2.2.7.3 กรดคาร์บอกซิลิก กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) จะแสดงแถบการดูดกลืนรังสีของหมู่ C=O เช่นเดียวกับคีโตนและแอลดีไฮด์ นอกจากนี้กรดคาร์บอกซิลิกยังแสดงแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ O-H ที่มีลักษณะเด่นเฉพาะตัวอีกด้วย แถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ O-H เริ่มที่เลขคลื่น 3,330 cm^{-1} ($3.0 \mu\text{m}$) แล้วย้อยลงไปที่กับแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-H (ดูรูปที่ 2.19) การที่พันธะ O-H ของหมู่คาร์บอกซิลิกให้แถบการดูดกลืนรังสีที่มีลักษณะแตกต่างจากแถบการดูดกลืนรังสีของหมู่ -OH ในแอลกอฮอล์ ก็เพราะว่ากรดคาร์บอกซิลิกจับกันเป็นคู่ๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจน เรียกว่า ไดเมอร์ (dimer) ดังนี้



2.19 อินฟราเรดสเปกตรัมของ propanoic acid [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของ *n*-butyl acetate และ ethyl benzoate [1]

2.2.7.4 เอสเทอร์ เอสเทอร์ (ester) แสดงแถบการดูดกลืนรังสีที่เกิดจากพันธะ C-O และพันธะ C=O (ดูรูปที่ 2.20) การยืดของพันธะ C-O ในเอสเทอร์ทำให้เกิดแถบการดูดกลืนรังสีบริเวณปลายนิ้วมือเช่นเดียวกับการยืดของพันธะ C-O ในอีเทอร์ คืออยู่เลขคลื่น $1,110\text{--}1,300\text{ cm}^{-1}$ ($7.7\text{--}9.0\text{ }\mu\text{m}$) ซึ่งบางครั้งก็ดูยาก อย่างไรก็ตามแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ C-O มีความเข้มมากในบางกรณีอาจใช้บอกความแตกต่างระหว่างเอสเทอร์และคีโตนได้

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 การสร้างเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทาง สเปกโทรสโกปี

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีสร้างจากกล่องพลาสติกขนาด $9 \times 6 \times 2.5$ ซม. ด้านบนเป็นกรอบ พลาสติกใส ใช้สำหรับป้องกันจอภาพแสดงผล ส่วนด้านล่างเป็นกล่องพลาสติกสีดำเจาะรูเป็นรูปวงรีขนาด $2 \times 1.5 \times 1.5$ ซม. ใช้สำหรับให้แสงรอดผ่านได้ ด้านข้างประกอบไปด้วยสวิทช์ขั้วต่อหลอดสีดำ ใช้สำหรับปรับเพิ่ม-ลดกระแสไฟ และสวิทช์ปุ่มกดสีแดง ใช้สำหรับบันทึกภาพหน้าจอแสดงผล ซึ่งภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ประกอบด้วยไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP 32 รุ่น DOIT ESP32 DEVKIT V1 พร้อมทั้งจอแสดงผล TFT LCD ขนาด 2.4” และ AS7341 Spectral Sensor ซึ่งการทำงานของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีนั้นจะต้องต่อสาย USB เข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 3.5V – 5V จากนั้นหลอดไฟ LED ที่ติดตั้งบน AS7341 Spectral Sensor จะเปล่งแสงที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ไปสัมผัสกับสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ทำให้เกิดการตกกระทบและดูดกลืนแสงบางส่วน จากนั้นแสงจะสะท้อนกับเข้าไปยัง AS7341 Spectral Sensor สีและสเปกตรัมของแสงสะท้อนจะถูกนำไปวิเคราะห์แล้วแสดงผลเป็นแท่งกราฟผ่านจอภาพ TFT LCD จากนั้นข้อมูลจากแท่งกราฟจะถูกนำมาแปลงเป็นเส้นกราฟโดยบอร์ดไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด ESP 32 รุ่น DOIT ESP32 DEVKIT V1 เพื่อนำมาเปรียบเทียบรูปแบบลักษณะกับเส้นกราฟมาตรฐานของสารนั้นๆ ซึ่งถ้าเส้นกราฟจากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีและเส้นกราฟมาตรฐานของสารมีรูปแบบลักษณะคล้ายคลึงกันจะทำได้อนุมานได้ว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน

3.2 วัสดุและสารเคมี

3.2.1 Ammonium Nitrate ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$)

3.2.2 Potassium Permanganate (KMnO_4)

3.2.3 Potassium Nitrate (KNO_3)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 เตรียมสถานที่ เครื่องมือที่จะใช้ในการทดสอบ และสารประกอบวัตถุระเบิดแสง
เครื่อง

3.3.1.1 เตรียมสถานที่ โดยกำหนดบริเวณพื้นที่ ที่ใช้ทำการทดลอง, ต้องอยู่ใน
บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก และมีแสงสว่างอย่างเพียงพอ



รูปที่ 3.1 ห้องปฏิบัติการทางเคมี

3.3.1.2 เตรียมเครื่องมือ โดยจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ให้เพียงพอ และเตรียมเครื่องมือ
ทางวิทยาศาสตร์ให้พร้อม โดยกำหนดการอ่านค่าของเครื่องดังนี้

เวลาในการอ่านค่า 500 มิลลิวินาที และ 1000 มิลลิวินาที

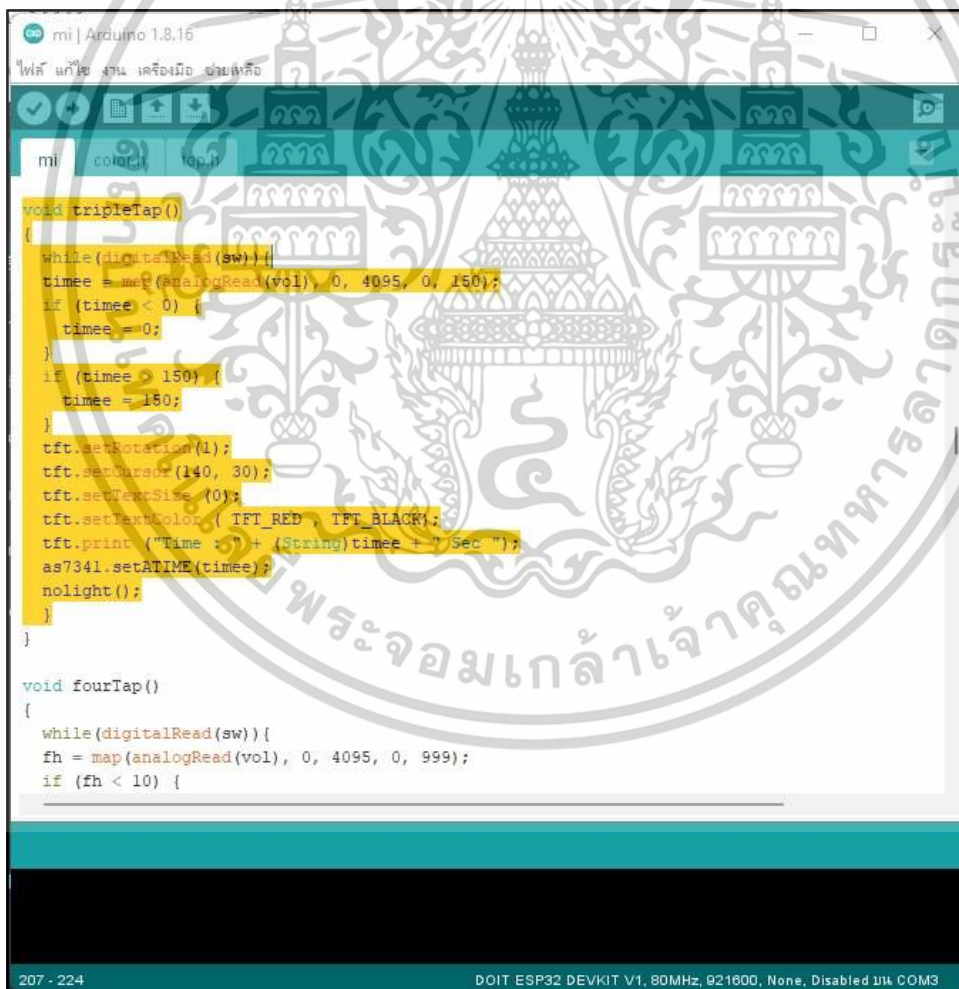
ความถี่ในการอ่านค่า 50 Hz และ 60 Hz

ระยะห่างจากหัวเซนเซอร์ 10 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.3 โปรแกรมและภาษาที่ใช้ในการควบคุมและสั่งงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งการวัด

3.3.1.3 เตรียมสาร ทำความสะอาดเอาสิ่งเจือปนออกจากสาร และตวงปริมาณสาร ตามที่กำหนด ทำการติดฉลากที่ขวด/หลอด โดยเขียนชื่อสารประกอบวัตถุแสงเครื่อง, ปริมาณ, วัน/เดือน/ปี ที่เตรียม โดยเตรียมสาร Ammonium Nitrate ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$), Potassium Permanganate (KMnO_4) และ Potassium Nitrate (KNO_3) ที่ปริมาณสาร 2 ระดับคือ 10 g และ 20 g



รูปที่ 3.5 การตวงสารให้ได้ปริมาตรตามกำหนด

3.3.2 เลือกใช้วิธีการตรวจสอบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแต่ละชนิด เพื่อวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารทั้ง 3 ชนิด ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$, KMnO_4 และ KNO_3) ในย่านความยาวคลื่นต่างๆ

3.3.2.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 300 – 400 นาโนเมตร สำหรับแสงอัลตราไวโอเลต (ULTRAVIOLET) และที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 800 นาโนเมตร สำหรับแสงวิสิเบิล (VISIBLE)

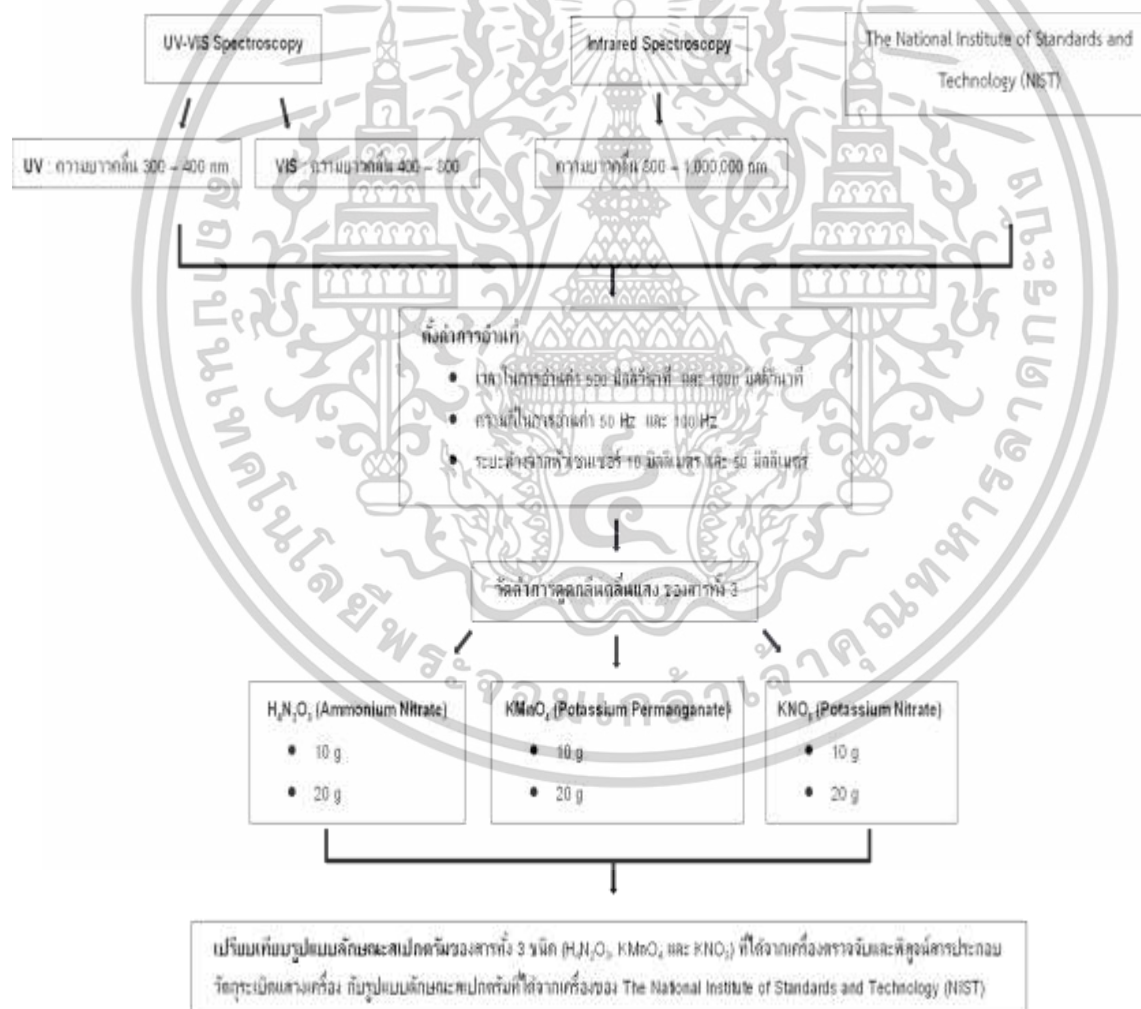
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 800 - 1,000,000 นาโนเมตร

3.3.3 เปรียบเทียบรูปแบบลักษณะสเปกตรัมของสารทั้ง 3 ชนิด ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$, KMnO_4 และ KNO_3) ที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์สารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง กับรูปแบบลักษณะสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องของ The National Institute of Standards and Technology (NIST)

3.3.4 อธิบายผลค่าความคลื่อน จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นต่าง

3.3.5 สรุปผลการทดลองวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องในย่านความยาวคลื่นต่างๆ จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์สารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

3.4.1 DOIT ESP32 DEVKIT V1 highresolution pinout and specs เป็น Micro Controller ที่รองรับการเชื่อมต่อ WiFi , Bluetooth – BLE ในตัว ภาษาที่ใช้ในการการพัฒนาโปรแกรม ศึกษา ภาษา C หรือ ภาษา Python ซึ่งต้องทำการอัปเดตเฟิร์มแวร์ให้รองรับภาษาก่อน โปรแกรม IDE ที่ใช้พัฒนาคือ Arduino IDE หรือ Visual Studio สำหรับ Visual Studio ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้ง Plugin Espressif IDE หรือ Platform IO IDE และต้อง Enable (Arduino) ทั้งยังมีการทำงานที่แบ่งเป็น 2 Core และ Pin i/O เลือกฟังก์ชันการทำงานได้ใน Pin เดียวกัน เช่น การแปลง Analog to Digital หรือ Digital to Analog การเชื่อมต่อ SD Card Camera PWD RWD RTC และ Touch



รูปที่ 3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ที่มา <https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>

3.4.2 ส่วนประกอบ DOIT ESP32 DEVKIT V1 highresolution pinout and specs

3.4.2.1 Xtensa dual – core (or single – core) 32-bit LX6 microprocessor running at 160 or 240 MHz

3.4.2.2 Bootloader Memory : 520 KB SRAM

3.4.2.3 Wi-Fi : 802.11 b/g/n

3.4.2.4 Bluetooth : v4.2 BR/EDR and BLE

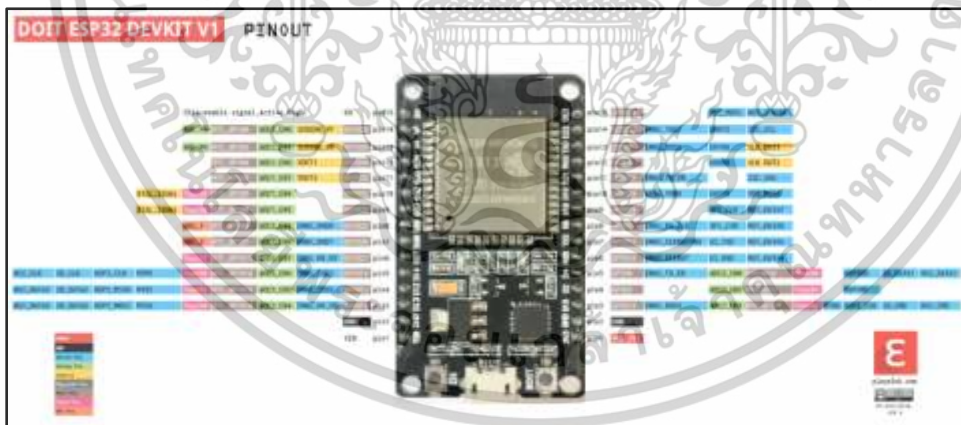
3.4.2.5 12-bit x 18 ADC channels

3.4.2.6 2 x 8-bit DACs

3.4.2.7 10 x touch sensors (capacitive sensing GPIOs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4.2.8 4 x SPI
- 3.4.2.9 2 X I²S interfaces
- 3.4.2.10 2 X I²C interfaces
- 3.4.2.11 3 x UART
- 3.4.2.12 SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC host controller
- 3.4.2.13 SDIO/SPI slave controller
- 3.4.2.14 CAN bus 2.0
- 3.4.2.15 Infraed remote controller (TX/RX, up to 8 channels)
- 3.4.2.16 Motor PWM
- 3.4.2.17 LED PWM (up to 16 channels)
- 3.4.2.18 Hall effect sensor
- 3.4.2.19 Ultra-low-power analog pre-amplifier
- 3.4.2.20 All security feature of IEEE 802.11 standard, like WFA, WPA/WPA2, and WAPI, secure boot, Flash encryption
- 3.4.2.21 Cryptographic hardware acceleration method like AES, SHA-2, RSA, elliptic curve cryptography (ECC), random number generator (RNG)



รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์

ที่มา <https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ส่วนที่เป็น Software คือ ภาษา C / C++ เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload)



รูปที่ 3.9 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมและสั่งการ

ที่มา <https://support.arduino.cc/hc/en-us/articles/360019833020-Download-and-install-Arduino-IDE>

3.4.4 LCD Module TFT 2.4 Inch Screen เป็นหน้าจอแสดงผลขนาด 2.4 นิ้ว พร้อมการเชื่อมต่อการ์ด Micro SD และมีไฟพื้นหลังแบบ LED สีขาวจำนวน 4 ดวง พร้อมทั้งความละเอียด 240 x 320 พิกเซล (18 บิต, 262,000) โดยมีคุณสมบัติทางเทคนิค ดังนี้



รูปที่ 3.10 จอแสดงผล

ที่มา <https://www.mcucity.com/product/1034/lcd-module-tft-2-4-inch-tft-lcd-screen-for-arduino-uno-r3-board-and-support-mega-2560>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4.1 2.4" diagonal LCD TFT display

3.4.4.2 240x320 resolution, 18-bit (262,000) color

3.4.4.3 SPFD5408 controller with built in video RAM buffer

3.4.4.4 8 bit digital interface, plus 4 control lines

3.4.4.5 Uses digital pins 5-13 and analog 0-3. That means you can use digital pins 2, 5. Pin 12 is available if not using the microSD

3.4.4.6 Onboard 3.3V 300mA LDC regulator

3.4.4.7 4 white LED backlight. On by default you can connect the transistor to a digital pin backlight control

3.4.4.8 4-wire resistive touchscreen

3.4.5 สวิตช์กดติด ปลั๊อยดับจิ๋ว สีแดง Ø 7mm (Push Button Switch) แบบ push on/push off เมื่อมีการกด Push button switch หน้าสัมผัสจะเปลี่ยนสถานะจาก NO เป็น NC หรือจาก NC หรือ NO แต่เมื่อปล่อยมือออกจาก Push button switch หน้าสัมผัสจะถูกล็อกไว้โดยกลไกของสวิตช์ ซึ่งสามารถกลับสู่สภาวะปกติในตำแหน่งเดิม จะต้องกด Push button switch อีกครั้ง ทำให้สปริงคลายล็อกแล้วกลับเข้าสู่สภาวะปกติ



รูปที่ 3.11 สวิตช์ควบคุม

ที่มา <https://mall.factomart.com/principle-of-push-button-switch/>

3.4.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ 100k Ohm 3 ขา B100k Volume VR Potentiometer Variable Resistor แกนยาว 17 เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ตลอดเวลา โปเทนชิโอเมเตอร์ใช้ควบคุมแรงดันในวงจรและใช้ปรับสัญญาณต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ความดังของเสียง ความทึบ-แหลม ความสว่าง โดยการปรับปุ่มหมุนรอบแกนหมุนหน้าสัมผัสจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนตำแหน่งสัมผัสทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในวงจรเปลี่ยนไป และกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปทำให้แรงดันไฟฟ้าและระดับของสัญญาณเปลี่ยนไป



รูปที่ 3.12 สวิตช์ปรับค่า

ที่มา <https://mall.factomart.com/principle-of-push-button-switch/>

3.4.7 AS7341 Spectral Color Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อวัดและวิเคราะห์ปริมาณสเปกตรัมของแสงได้อย่างแม่นยำ ซึ่ง AS7341 Spectral Color Sensor สามารถตรวจจับและวัดปริมาณแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะเพื่อให้สามารถแยกแยะสีที่แตกต่างกันและให้ข้อมูลสเปกตรัมโดยละเอียด



รูปที่ 3.13 เซนเซอร์ AMS AS7341

ที่มา <https://ams.com/as7341>

AMS AS7341 เป็นเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ 11 ช่องสัญญาณที่ช่วยให้สามารถระบุสเปกตรัมการสะท้อน, การดูดของแสง, การวิเคราะห์ของเหลว, การวัดแสงโดยรอบแบบพาสซีฟ, การปรับเทียบสี และการตอบสนองของสเปกตรัม โดยช่องสัญญาณแต่ละช่องครอบคลุมความยาวคลื่นประมาณ 350 นาโนเมตรถึง 1,000 นาโนเมตร ซึ่งตรงกลางของโมดูล AS7341 มีช่องสัญญาณจำนวน 8 ช่องใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดสเปกตรัมช่วงที่ตามองเห็น (VIS) พร้อมกับช่องวัดสเปกตรัมช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) จำนวน 1 ช่อง และช่องที่ใช้สำหรับการวัดแสงช่วงความยาวที่ไม่มีกรอง (Clear channel) จำนวน 1 ช่อง รวมถึงช่องสำหรับใช้ตรวจจับแหล่งกำเนิดแสง โดยตรวจจับการสั่นไหวของแสงแบบอัตโนมัติที่มีความถี่ 50/60 Hz อีก 1 ช่อง

ทั้งนี้ AMS AS7341 ได้มีการผสมผสานฟิลเตอร์ออปติกที่มีความแม่นยำสูงเข้ากับซิลิกอน CMOS ตามมาตรฐานเทคโนโลยีฟิลเตอร์อินเทอร์เฟอเรนซ์แบบนาโมออปติก ทำให้สามารถควบคุมแสงที่เข้าสู่เซ็นเซอร์อาร์เรย์ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งแหล่งกำเนิดแสงชนิด LED ที่สามารถควบคุมกระแสไฟได้ การควบคุมอุปกรณ์และการเข้าถึงข้อมูลของสเปกตรัมจะดำเนินการผ่านอินเทอร์เฟซ I²C แบบอนุกรม ส่วนการรับส่งข้อมูลต่างๆ จะกระทำผ่านพอร์ตอเนกประสงค์ชนิด GPIO

3.4.7.1 ประโยชน์และคุณสมบัติของ AMS AS7341 เซนเซอร์ดิจิทัลสเปกตรัมชนิด 11 ช่อง

ลำดับ	ประโยชน์	คุณสมบัติ
1	ใช้วัดสีและการกระจายตัวของสี รวมถึงองค์ประกอบของสเปกตรัมได้อย่างแม่นยำ	ช่องสัญญาณรับแสงจำนวน 8 ช่อง ใช้ในการวัดสเปกตรัมช่วงที่ตามองเห็น และช่วงอินฟราเรดใกล้ รวมถึงช่อง Clear channel สำหรับกรองสัญญาณรบกวน โดยอาศัยเทคโนโลยีนาโนออปติกซิลิกอน
2	การใช้งานพอร์ตสื่อสาร I ² C ได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้พลังงานต่ำ	- ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานแค่ 1.8 VDD - โหมดพักการทำงานของอุปกรณ์สามารถปรับกระแสไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 5 μA - ประหยัดพลังงานและเวลาในการประมวลผล
3	สามารถตรวจจับการกะพริบของแสงโดยรอบได้	- ช่องเฉพาะสำหรับตรวจจับการกะพริบของแสง

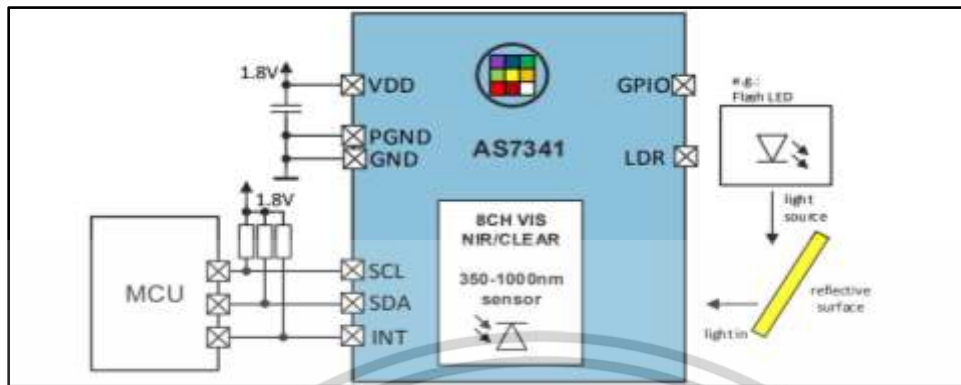
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		- กำหนดให้เพิ่ม/ลด เวลาในการตรวจวัดได้ - สามารถปรับอัตราการตรวจจับการกะพริบได้อย่างอัตโนมัติ - สามารถตรวจจับสัญญาณของแสงที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ได้
4	การควบคุมชุดเตอร์/ทริกเกอร์และซิงค์แบบอิเล็กทรอนิกส์	ใช้พอร์ต GPIO รับ-ส่งข้อมูลหรือควบคุมสัญญาณจากภายในและภายนอกอุปกรณ์ ทำให้เกิดความเร็ว
5	มีการใช้โฟโตไดโอดภายนอกเพื่อขยายระยะการตรวจจับ	ตั้งค่าพอร์ต GPIO ให้รับสัญญาณจากโฟโตไดโอดที่ความยาวคลื่นอินฟราเรดกลางได้

3.4.7.2 การใช้งาน AMS AS7341

- 1 ใช้วัดสีและการสะท้อนของแสงสเปกตรัมได้อย่างแม่นยำ
- 2 ใช้วิเคราะห์สีและความคลาดเคลื่อนของแสงสะท้อนภายในของเหลว รวมทั้งการใช้สารต้านทาน เพื่อวัดความเข้มของส่วนประกอบ
- 3 ใช้อธิบายสีของแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด และเป็นการวัดอุณหภูมิสีของแสงโดยรอบแบบพาสซีฟ
- 4 ใช้ในการจัดการควบคุมปรับแต่งสีให้ตรงตามความต้องการ

3.4.7.3 แผนผังฟังก์ชันการทำงานของ AS7341



รูปที่ 3.14 แผนผังฟังก์ชันการทำงานของ AMS AS7341

1. การจ่ายไฟ

x. เซ็นเซอร์ AS7341 ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ 1.8V ที่เชื่อมต่อกับขา VDD

y. ขา PGND และ ขา GND เชื่อมต่อกับกราวด์

2. การเชื่อมต่อกับหน่วยควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU)

x. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ AS7341 ผ่านขา SCL (Serial Clock Line), SDA (Serial Data Line), INT (Interrupt)

y. สาย SCL และ SDA ใช้สำหรับส่งสัญญาณขั้วจิงหะจากเซ็นเซอร์ไปยัง MCU

z. ขา INT ใช้สำหรับส่งสัญญาณขั้วจิงหะจากเซ็นเซอร์ไปยัง MCU

3. การเชื่อมต่อเพิ่มเติม

x. ขา GPIO บนเซ็นเซอร์ AS7341 ใช้สำหรับฟังก์ชันการรับ-ส่งข้อมูลทั่วไป

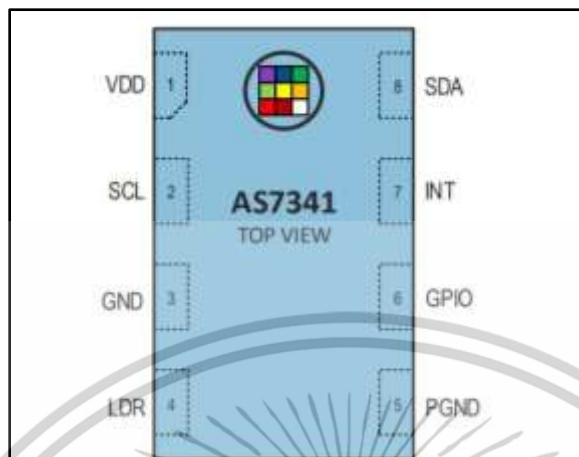
y. ขา LDR เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแสง (LDR) เพื่อการตรวจจับแสง

4. แหล่งกำเนิดแสง

x. แผนผังยังแสดงตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง เช่น ไฟแฟลช LED ที่ใช้ส่องสว่างพื้นผิวสะท้อนแสง

y. แสงที่สะท้อนจากพื้นผิวถูกตรวจจับโดยเซ็นเซอร์ AS7341

3.4.7.4 แผนผังการกำหนดขาเชื่อมต่อบน เซนเซอร์ AS7341



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการเชื่อมต่อบนเซนเซอร์ AMS AS7341

1. VDD (1) ใช้สำหรับจ่ายไฟให้กับชิป โดยทั่วไปจะใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์
2. SCL (2) เป็นขาสำหรับสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่ใช้ในการสื่อสารแบบ I²C
3. GND (3) เป็นขาสำหรับกราวด์ หรือจุดอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า
4. LDR (4) เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อโหลดต้านทาน (Load Resistor) เพื่อ
กำหนดช่วงการวัดแสง
5. PGND (5) เป็นขาสำหรับกราวด์ของส่วนอนาล็อก
6. GPIO (6) เป็นขาสำหรับวัตถุประสงค์ทั่วไป สามารถใช้สำหรับควบคุม
ฟังก์ชันต่างๆ ของชิป
7. INT (7) เป็นขาสำหรับสัญญาณขัดจังหวะ (Interrupt) เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่
กำหนดไว้
8. SDA (8) เป็นขาสำหรับข้อมูล (Data) ที่ใช้ในการสื่อสารแบบ I²C

3.4.7.5 การใช้ขาเชื่อมต่ออุปกรณ์

1. การเชื่อมต่อ เชื่อมต่อขา VDD เข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 3.3 โวลต์, ขา GND และขา PGND เชื่อมต่อกับกราวด์, ขา SCL และขา SDA เชื่อมต่อกับขา I²C ของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU)
2. การตั้งค่า กำหนดค่าการทำงานต่างๆ ของเซ็นเซอร์ผ่านการสื่อสารแบบ I²C โดยใช้ไลบรารีที่เหมาะสมกับภาษา C ของโปรแกรม Arduino IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การอ่านค่า อ่านค่าแสงที่วัดได้จากแต่ละช่องสัญญาณผ่านการสื่อสารแบบ I²C

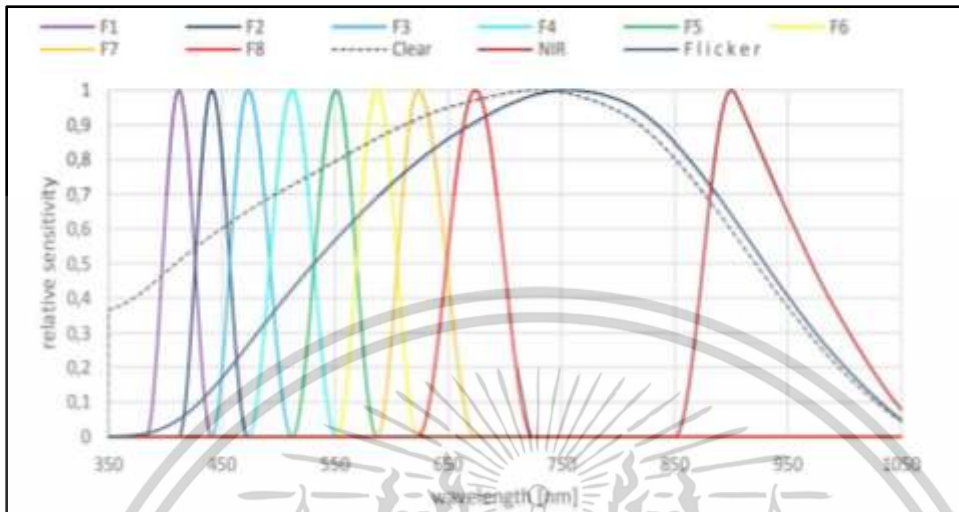
3.4.7.6 สรุปช่องสัญญาณแสง (Optical channel) ของ AS7341 มี 11 ช่องดังนี้

1. ช่องสัญญาณที่มองเห็นได้ (Visible Channels) มี 8 ช่องสัญญาณครอบคลุมสเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้ ช่วยในการตรวจจับสีและวิเคราะห์สเปกตรัม
2. ช่องสัญญาณแสงอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared Channel-NIR) มี 1 ช่องสัญญาณใช้สำหรับวัดแสงอินฟราเรดใกล้
3. ช่องสัญญาณแสงแบบใส (Clear Channel) มี 1 ช่องสัญญาณ เป็นโฟโตไดโอดที่ไม่มีตัวกรอง
4. ช่องสัญญาณตรวจจับการกะพริบของแสง (Flicker Detection Channel) มี 1 ช่องสัญญาณ ใช้สำหรับตรวจจับการกะพริบของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง

Channel	Center Wavelength [nm] typical	Full Width Half Maximum [nm] typical
F1	415	26
F2	445	30
F3	480	36
F4	515	39
F5	555	39
F6	590	40
F7	630	50
F8	680	52
NIR (Near IR)	910	n/a
Clear	Si response/non filtered	n/a
FD (Flicker Detection)	Si response/non filtered	n/a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

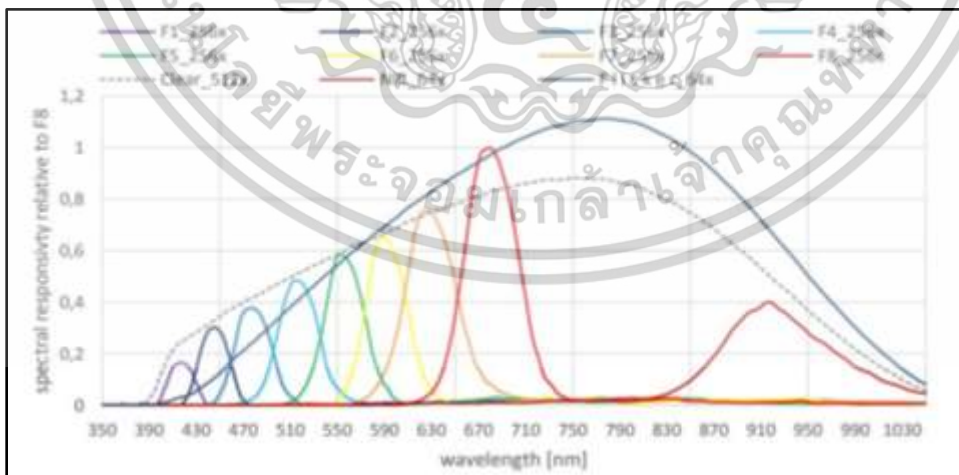
3.4.7.7 การตอบสนองของสเปกตรัมแบบปกติ



รูปที่ 3.16 ความสามารถในการตรวจจับและความไวของเซนเซอร์ AMS AS7341

กราฟนี้แสดงถึง AS7341 สามารถตรวจจับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างและมีความไวต่อแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันไปตามแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การวัดสี, การวิเคราะห์สเปกตรัม และการตรวจจับการกะพริบของแสง

3.4.7.8 การวัดผลตอบสนองของสเปกตรัมเทียบกับแผ่นกระจายแสง (Diffuser) ที่ติดตั้งอยู่บนตัวเซนเซอร์ AS7341



รูปที่ 3.17 ความสามารถในการตรวจจับและความไวของเซนเซอร์ AMS AS7341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกระจายแสง (Diffuser) คือวัสดุที่ใช้กระจายแสงที่ติดตั้งอยู่บนตัวเซ็นเซอร์ AS7341 มีประโยชน์ช่วยกระจายแสงให้สม่ำเสมอ ทำให้แสงที่ตกกระทบบนเซ็นเซอร์มีความเข้มเท่ากันทุกทิศทาง และช่วยลดผลกระทบจากมุกตกกระทบบ เพิ่มความแม่นยำในการวัดแสง แม้แสงจะมาจากหลายทิศทาง ดังนั้น แผ่นกระจายแสง (Diffuser) จึงช่วยให้เซ็นเซอร์ AS7341 วัดแสงได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น โดยไม่ขึ้นกับมุมตกกระทบบของแสง

3.4.7.9 สถานะขณะเซ็นเซอร์ AS7341 ทำงาน

เซ็นเซอร์ AS7341 มี 3 สถานะการทำงานหลัก คือ SLEEP, IDLE และ ACTIVE โดยมี การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเข้าสู่สถานะ SLEEP หลังจากเกิดการขัดจังหวะได้ เพื่อประหยัดพลังงาน และเมื่อใดก็ตามที่เปิดใช้งานการวัดสเปกตรัม (SP_EN=1) อุปกรณ์จะเข้าสู่สถานะ ACTIVE หากปิดใช้งานการวัดสเปกตรัม (SP_EN=0) อุปกรณ์จะกลับสู่สถานะ IDLE



รูปที่ 3.18 สถานะการทำงานหลักของเซ็นเซอร์ AMS AS7341

1. สถานะ power on เมื่อเปิดเครื่อง (POR) อุปกรณ์จะเริ่มต้นการทำงาน (ระยะเวลาประมาณ 200 ไมโครวินาที) จากนั้นอุปกรณ์จะส่งสัญญาณ NAK บน I²C ทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถสื่อสารใดๆได้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถส่งค่าข้อมูลและการขัดจังหวะจากอุปกรณ์ได้ หลังจากนั้นอุปกรณ์จะเริ่มเข้าสู่สถานะ SLEEP

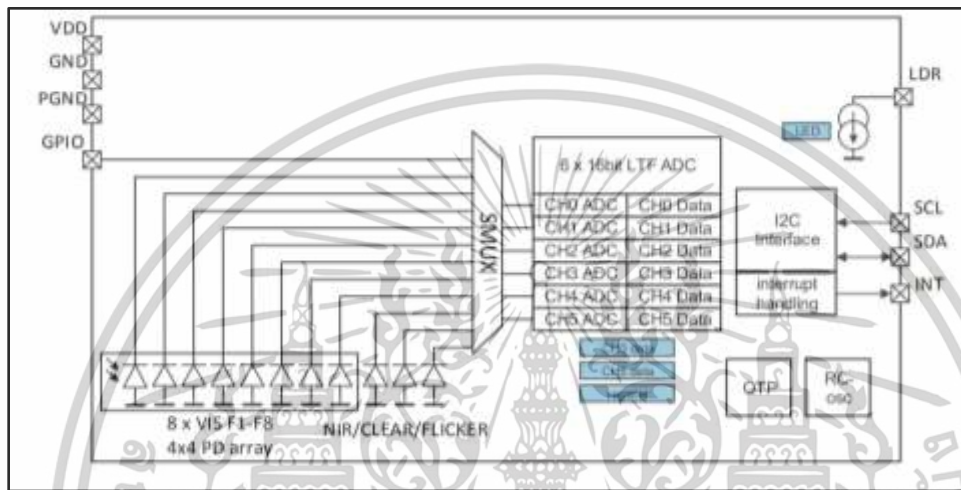
2. สถานะ SLEEP ในสถานะนี้ ออสซิลเลเตอร์และวงจรอื่นๆจะไม่ทำงาน ส่งผลให้อุปกรณ์ใช้ไฟต่ำมาก หากมีการรับส่งข้อมูลในห้วงเวลานี้ แกน I²C จะทำงานชั่วคราวเพื่อตอบสนองการสื่อสาร

3. สถานะ IDLE เมื่อเปิดใช้งานบิต Power ON (PON) อุปกรณ์จะเข้าสู่สถานะ IDLE ซึ่งออสซิลเลเตอร์และวงจรที่เกี่ยวข้องจะทำงาน แต่การใช้พลังงานยังคงต่ำสถานะ ACTIVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7.10 สถาปัตยกรรมช่องสัญญาณ

อุปกรณ์นี้เป็นเซ็นเซอร์วัดแสงที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับแต่งการทำงานได้หลากหลาย และประหยัดพลังงาน เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำ, งานวัดแสงสี, การตรวจจับสี และ การใช้งานทางสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.19 แผนผังสถาปัตยกรรมช่องสัญญาณของเซ็นเซอร์ AMS AS7341

3.4.7.11 องค์ประกอบของแผนผังสถาปัตยกรรมช่องสัญญาณ

1. แหล่งจ่ายไฟและกราวด์

- x. VDD แรงดันไฟฟ้าอินพุตแบบดิจิทัล
- y. GND กราวด์
- z. PGND กราวด์สำหรับวงจรอะนาล็อก

2. อินพุตและเอาต์พุต

- x. GPIO ขาอินพุต/เอาต์พุตเอนกประสงค์ (General Purpose Input/Output)
- y. LDR ตัวต้านทานแบบแปรค่าตามแสง (Light Dependent Resistor) ใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดแสง
- z. LED ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) อาจใช้เป็นไฟแสดงสถานะหรือแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผังหลัก

x. 6x16 bit LTF ADC ตัวแปลงแสงเป็นความถี่ (Light-to-Frequency Converter) 16 บิต จำนวน 6 ช่อง ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณดิจิทัล

y. SMUX มัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer) ทำหน้าที่เลือกสัญญาณจากช่องต่างๆ เพื่อส่งไปยัง ADC

z. I²C Interface อินเทอร์เฟซ I²C ใช้สำหรับสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ และอ่านค่าที่วัดได้

4. ส่วนประกอบอื่นๆ

x. Interrupt handling วงจรจัดการอินเทอร์รัพท์ ใช้สำหรับแจ้งเตือนเมื่อมีเหตุการณ์สำคัญเกิดขึ้น

y. OTP หน่วยความจำแบบอ่านอย่างเดียวที่ตั้งโปรแกรมได้ครั้งเดียว (One-Time-Programmable memory) อาจใช้เก็บข้อมูลการตั้งค่า หรือค่าสอบเทียบ

z. RC-osc ออสซิลเลเตอร์ RC ใช้วงจร RC ในการสร้างสัญญาณนาฬิกา

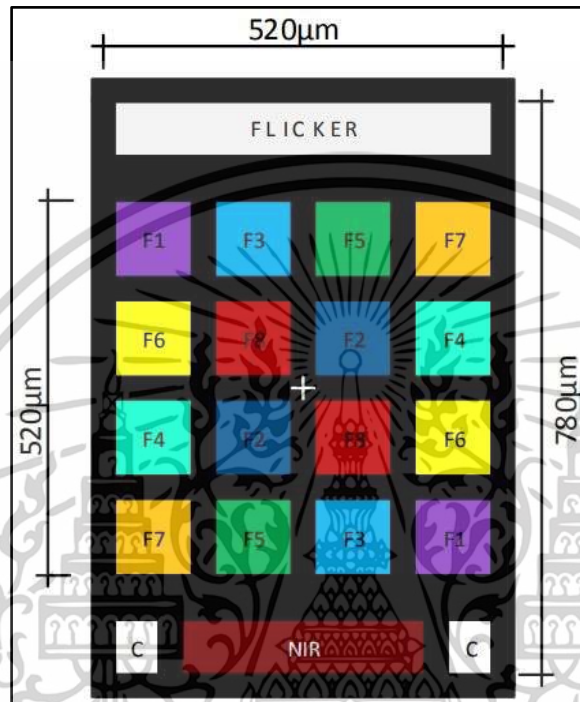
5. เซ็นเซอร์

x. 8xVIS F1-F8 เซ็นเซอร์วัดแสงในช่วงแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) จำนวน 8 ตัว อาจเป็นฟิลเตอร์ หรือเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ

y. NIR/CLEAR/FLICKER เซ็นเซอร์วัดแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) และแสงกระพริบ 4x4 PD array อาร์เรย์โฟโตไดโอด 4x4

6 การทำงาน ระบบนี้จะรับแสงผ่าน LDR และเซ็นเซอร์ต่างๆ จากนั้นแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย LTF ADC SMUX จะเลือกสัญญาณจากช่องต่างๆ เพื่อส่งไปยัง ADC ภายใน ข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลผล และสามารถอ่านค่าได้ผ่าน I²C Interface ระบบยังมีวงจรจัดการอินเทอร์รัพท์และส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อควบคุมการทำงาน และเพิ่มความสามารถของระบบ

7 อาร์เรย์เซ็นเซอร์ อุปกรณ์นี้มีเซ็นเซอร์รับแสงแบบ 4x4 พร้อมเซ็นเซอร์พิเศษสองตัวสำหรับตรวจจับการกระพริบและแสงอินฟราเรด มีช่องรับแสงธรรมดาที่ไม่มีตัวกรองอยู่ที่มุมล่างซ้ายและขวา และสามารถเลือกจับคู่เซ็นเซอร์แต่ละคู่กับตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ภายในได้ 6 ตัว (CH0-CH5)

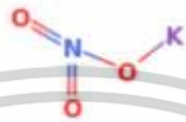


รูปที่ 3.20 อาร์เรย์เซนเซอร์ของ AMS AS7341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 คุณสมบัติของสารประกอบวัตถุระเบิด

3.5.1 สารประกอบวัตถุระเบิดที่มีส่วนผสมของสารโพแทสเซียม ไนเตรท (potassium nitrate)

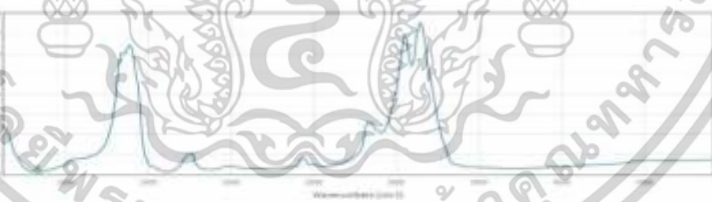
สูตร โครงสร้าง	
สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	KNO_3
มวลโมเลกุล	101.1032 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	400 องศาเซลเซียส
จุด หลอมเหลว	334 องศาเซลเซียส
ความ หนาแน่น	2.109 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ค่าการ ละลายน้ำ	383 กรัมต่อ 1000 กรัม (25 องศาเซลเซียส)
ตัวทำละลาย	เอทานอล, กลีเซอรอล และแอมโมเนีย
Infrared Spectrum	

ที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/โพแทสเซียมไนเตรท> และ

<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=B6000529&Units=SI&Mask=480>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 สารประกอบวัตถุระเบิดที่มีส่วนผสมของสารแอมโมเนียมไนเตรท (ammonium nitrate)

สูตร โครงสร้าง	
สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	$\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$
มวลโมเลกุล	80.05 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	210 องศาเซลเซียส
จุด หลอมเหลว	169.6 องศาเซลเซียส
ความ หนาแน่น	1.172 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ค่าการ ละลายน้ำ	150 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร (20 องศาเซลเซียส)
ตัวทำละลาย	น้ำ อะซิโตน เมทานอล และอีเทอร์
Infrared Spectrum	

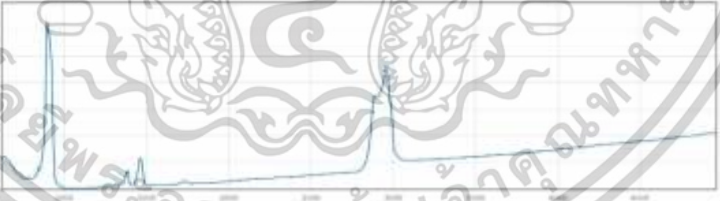
ที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/แอมโมเนียมไนเตรตและ>

<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=NH4NO3&Nolon=on&Units=SI&clR=on&c>

[UV=on](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 สารประกอบวัฏธรมะเบิดที่มีส่วนผสมของสารโพแทสเซียม เพอร์แมงกาเนต (potassium permanganate)

สูตร โครงสร้าง	
สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	KMnO ₄
มวลโมเลกุล	158.034 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	- องศาเซลเซียส
จุด หลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส
ความ หนาแน่น	2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ค่าการ ละลายน้ำ	76 กรัมต่อ 1,000 มิลลิลิตร (25 องศาเซลเซียส)
ตัวทำละลาย	แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายสารอินทรีย์
Infrared Spectrum	

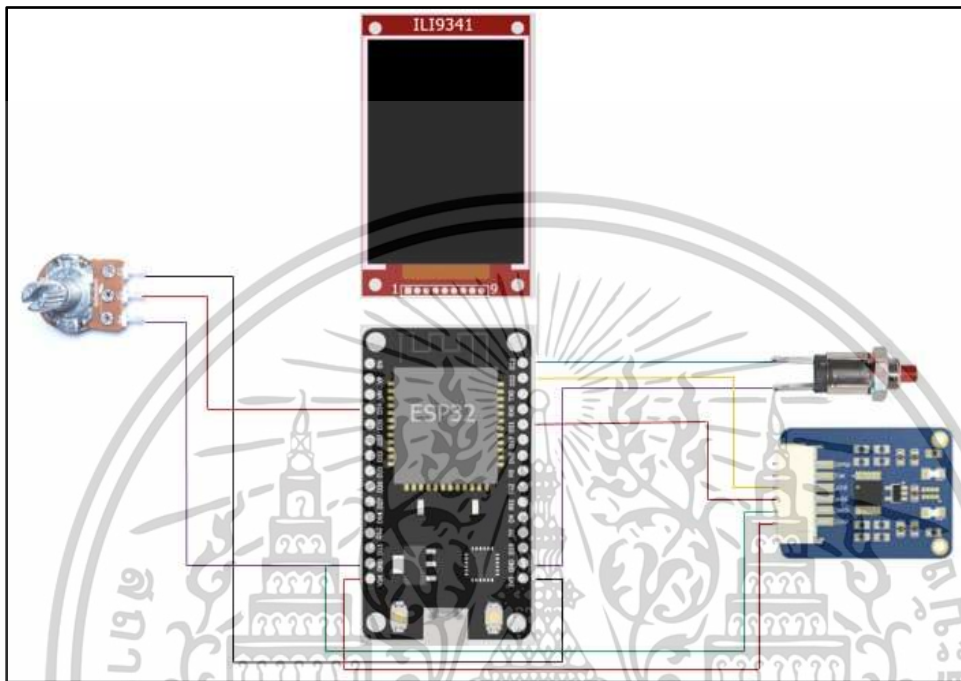
ที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/ด่างทับทิมและ>

<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=KMnO4&Nolon=on&Units=SI&clR=on&cU>

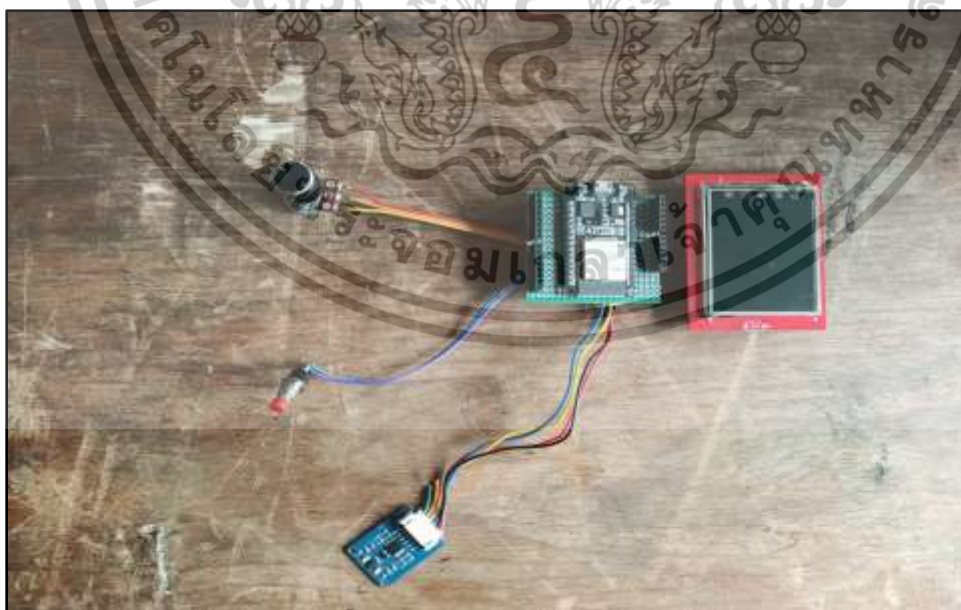
V=on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



รูปที่ 3.21 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ของ AMS AS7341 กับอุปกรณ์



รูปที่ 3.22 การเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์ของ AMS AS7341 กับอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 วิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

3.7.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ Computer เข้ากับ Regulator โดยการต่อสายไฟจากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ช่องพอร์ต Micro USB ผ่าน Regulator เพื่อแปลงไฟให้มีขนาด 3.3V – 5V

3.7.2 Regulator – ESP 32 อุปกรณ์ Regulator จะจ่ายไฟเลี้ยงให้กับส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงกับ ESP 32

3.7.3 ESP 32 – sensor โดยใช้ Pin22 (D14) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ PinSCL บน AS7341 Spectral Color Sensor, Pin11 (D21) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ PinSDA บน AS7341 Spectral Color Sensor, Pin2 (GND) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ PinGND บน AS7341 Spectral Color Sensor, Pin1 (VDD) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ PinVCC บน AS7341 Spectral Color Sensor

3.7.4 ESP 32 – LCD display โดยใช้ i2c ในการส่งสัญญาณขึ้นมาแสดงผลที่จอ LCD Display

3.7.5 ESP 32 – Push Button Switch โดยใช้ Pin15 (D23) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ Pin NO บน Push Button Switch และ Pin14 (D22) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ Pin NC บน Push Button Switch

3.7.6 ESP 32 – Volume VR Potentiometer Variable Resistor โดยใช้ Pin12 (D34) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ Pinแดง (สัญญาณเข้า) บน Volume VR Potentiometer Variable Resistor และ Pin2 (GND) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ Pinม่วง (GND) บน Volume VR Potentiometer Variable Resistor และ Pin1 (VDD) บน ESP 32 เชื่อมต่อเข้ากับ Pinดำ (สัญญาณออก) บน Volume VR Potentiometer Variable Resistor

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการใช้งานเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ในการตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบ NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate), KMnO_4 (Potassium Permanganate), และ KNO_3 (Potassium Nitrate) ตามวัตถุประสงค์เพื่อ

1. สร้างและพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี

2. การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง

3. มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถนำไปใช้ในงานภาคสนามได้อย่างสะดวก

4. เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

ซึ่งผลการดำเนินโครงการ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1. ผลการสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี และ 2. ผลของการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี โดยในการทดลองในครั้งนี้ มีตัวแปรควบคุมดังต่อไปนี้คือ

1. ปริมาณสาร (g) สำหรับการทดสอบใช้ที่ ปริมาณสาร 10 g และ 20 g

2. เวลาในการอ่านค่า (มิลลิวินาที) สำหรับการทดสอบใช้ที่ 500 ms และ 1000 ms

3. ความถี่ในการอ่าน (Hz) สำหรับการทดสอบใช้ที่ 50 Hz และ 60 Hz

4. ระยะห่างจากหัวเซนเซอร์ สำหรับการทดสอบใช้ที่ 10 mm และ 50 mm

4.1 การสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องตามหลักการทฤษฎีสเปกโทรสโกปี

4.1.1 เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ช่วยทำให้เกิดความปลอดภัยในขณะพิสูจน์ทราบวัตถุต้องสงสัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ขณะเจ้าหน้าที่กำลังเก็บกู้วัตถุระเบิดแสงเครื่อง

กลยุทธ์หนึ่งที่ผู้ก่อการร้ายนิยมนำมาใช้ในการก่อเหตุ คือการสร้างกลไกการจุดระเบิด โดยการวางวัตถุต้องสงสัยให้เห็นเด่นชัด เพื่อลวงให้เจ้าหน้าที่เก็บกู้วัตถุระเบิดเข้าไปพิสูจน์ทราบวัตถุต้องสงสัยนั้น เมื่อเจ้าหน้าที่สัมผัสหรือขยับวัตถุต้องสงสัย จะทำให้กลไกการจุดระเบิดที่อยู่ภายในวัตถุต้องสงสัยทำงานแล้วเกิดการระเบิดขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายแก่เจ้าหน้าที่ ดังนั้นการใช้งานเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี โดยการปล่อยคลื่นแสงแล้วสะท้อนกลับเข้ามายังเซ็นเซอร์ จึงมีส่วนช่วยลดการสัมผัสหรือขยับของวัตถุต้องสงสัยได้

4.1.2 เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ไม่ทำให้วัตถุพยานเกิดการบดเปื้อน

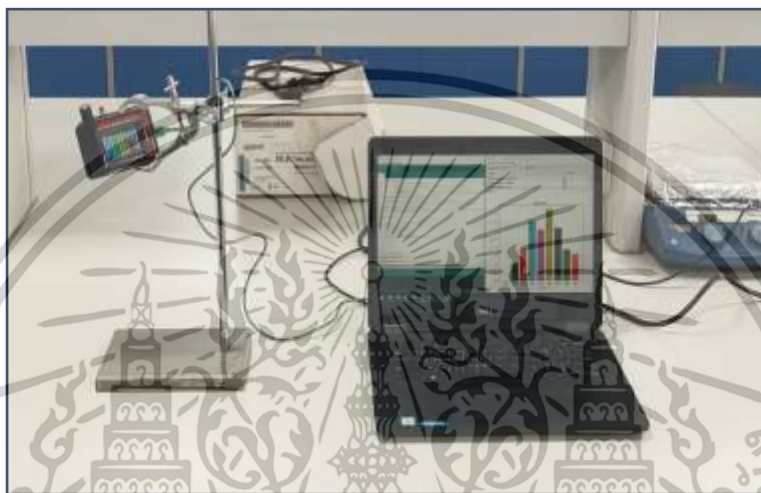


รูปที่ 4.2 วัตถุพยานในที่เกิดเหตุ

การประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องโดยผู้ก่อการร้ายนั้น ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายรวมถึงเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่ใช้ในการประกอบไม่มีมาตรฐานเพียงพอ ทำให้ทั้งร่องรอยไวบนวัตถุระเบิดแสงเครื่องไม่มากนักน้อย จึงเป็นผลให้เจ้าหน้าที่เก็บกู้วัตถุระเบิดสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตามผู้ก่อการร้ายมาดำเนินคดีได้ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดการปนเปื้อนในขณะทำการพิสูจน์ทราบวัตถุพยาน ซึ่งเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี โดยการปล่อยคลื่นแสงแล้วสะท้อนกลับเข้ามายังเซ็นเซอร์นั้น จะไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนที่วัตถุพยาน ซึ่งผลดีต่อรูปคดีในการติดตามผู้ก่อการร้ายมาลงโทษ

4.1.3 เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี สามารถระบุชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่แสดงบนจอภาพของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ตรงกับเครื่องคอมพิวเตอร์

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี มีหน้าจอแสดงผลการดูดกลืนแสงสะท้อนตามย่านคลื่นความถี่ต่างๆ ดังนั้นจึงทำให้ทราบสถานะการทำงานของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และจากหน้าจอแสดงผลจึงพออนุมานได้ว่าเป็นสารประกอบวัตถุระเบิดชนิดใด

4.1.4 เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ใช้ระยะเวลาในการระบุชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทดลองไม่นาน



รูปที่ 4.4 ขณะที่เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีกำลังทำงานจะปรากฏกราฟขึ้นที่จอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี มีหน้าจอแสดงผลการดูดกลืนแสงสะท้อนตามย่านคลื่นความถี่ต่างๆ ดังนั้นจึงทำให้ทราบสถานะการทำงานและผลตอบสนองของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

4.2 การวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

4.2.1 การเตรียมข้อมูล

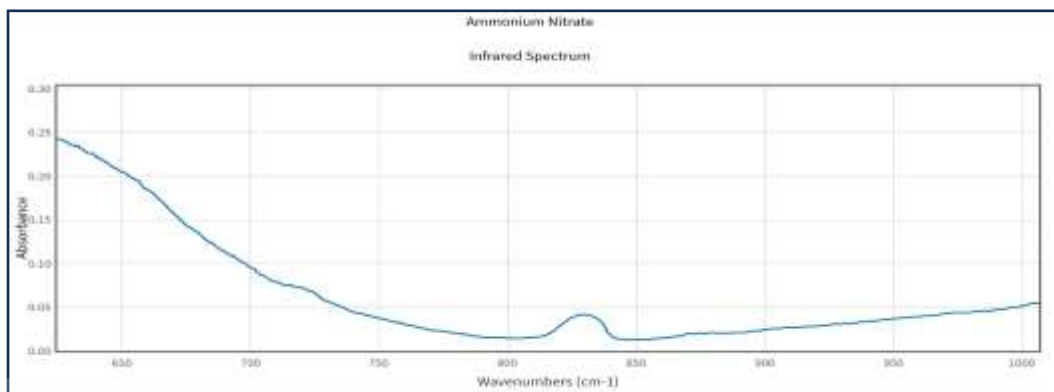
4.2.1.1 การตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง โดยการนำสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate), KMnO_4 (Potassium Permanganate), และ KNO_3 (Potassium Nitrate) วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง UV-Vis จากเครื่องวัดค่าการดูดกลืน ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น SPECORD 210 PLUS ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



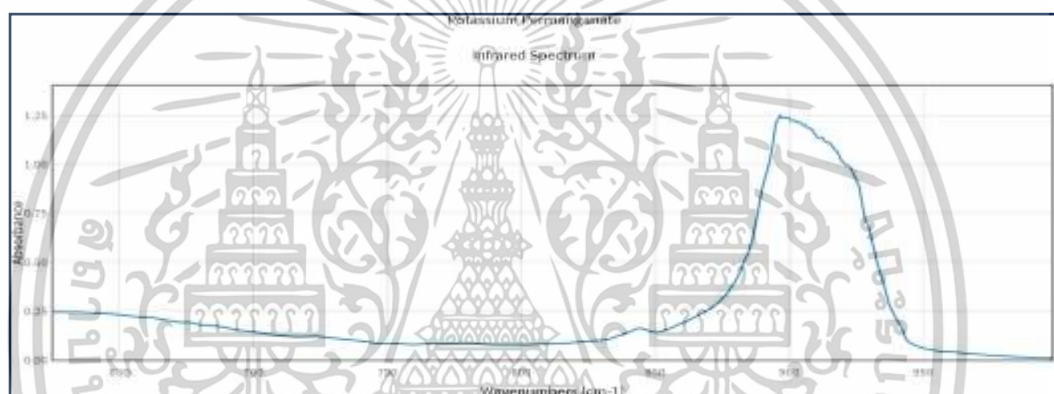
รูปที่ 4.5 เครื่องวัดค่าการดูดกลืน ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น SPECORD 210 PLUS

4.2.1.2 การตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง โดยการศึกษากราฟค่าการดูดกลืนคลื่นแสง อินฟราเรด(IR) ของ NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate), KMnO_4 (Potassium Permanganate), และ KNO_3 (Potassium Nitrate) จาก NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY U.S.DEPARTMENT OF COMMERCE (NIST)

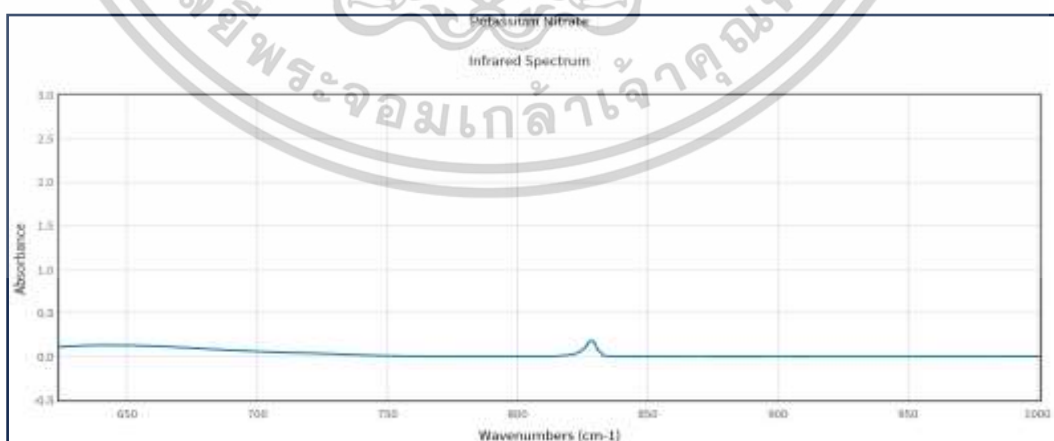
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของสารประกอบ NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)
 ที่มา <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=NH4NO3&Units=SI&clR=on>



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของสารประกอบ KMnO_4 (Potassium Permanganate)
 ที่มา <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=KMnO4&Units=SI&clR=on>



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของสารประกอบ KNO_3 (Potassium Nitrate)
 ที่มา <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=KNO3&Units=SI&clR=on>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 การกำจัด noise หรือ outliers ที่อาจรบกวนส่งผลต่อการวิเคราะห์

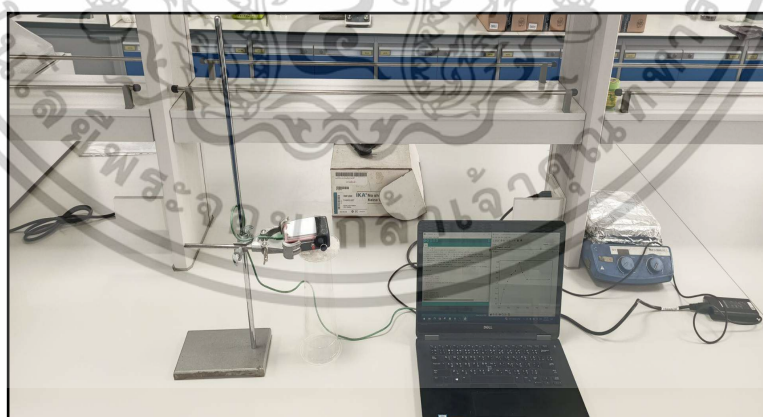
เลือกใช้สถานที่ที่ไม่มีแสงสว่างมากเกินไป และมีอากาศถ่ายเทได้อย่างสะดวก เพื่อลดผลกระทบที่จะมีต่อสัญญาณของเครื่องตรวจจับและฟิวชันทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี



รูปที่ 4.9 ห้องปฏิบัติการทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

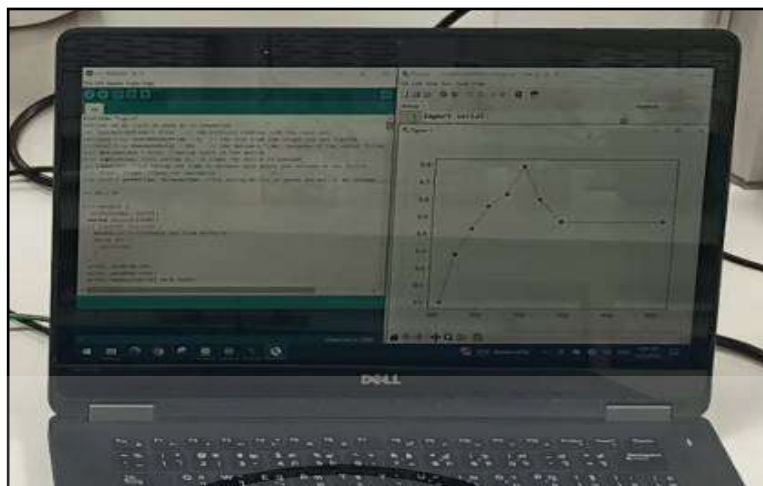
4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.2.1 การวิเคราะห์กราฟการดูดกลืนแสงของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)



รูปที่ 4.10 ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

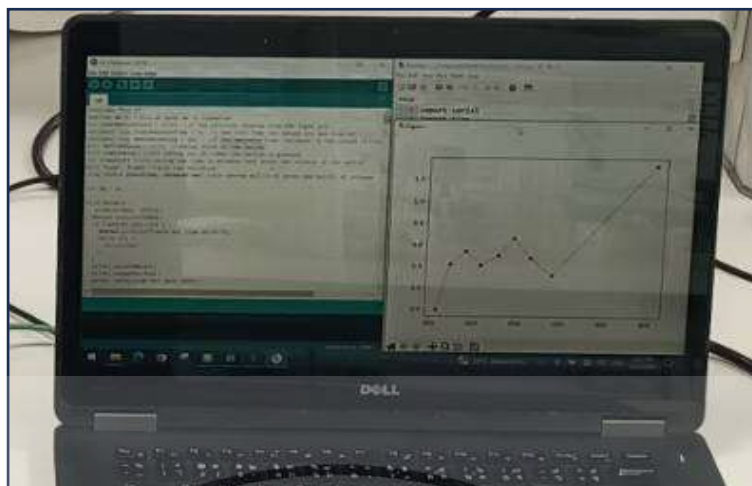
จากกราฟการดูดกลืนแสงของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ปริมาณ 10 g ที่ค่าความถี่ 50 Hz โดยมีระยะห่างของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) กับเซ็นเซอร์ AS7341 เท่ากับ 10 mm กราฟการดูดกลืนแสงที่ได้มีค่าสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 410 nm และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น

4.2.2.2 การวิเคราะห์กราฟการดูดกลืนแสงของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)



รูปที่ 4.12 ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

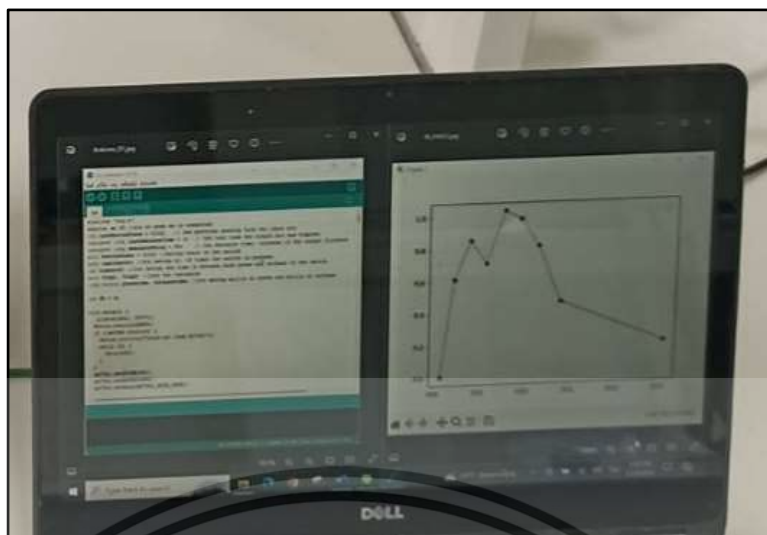
จากกราฟการดูดกลืนแสงของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ปริมาณ 10 g ที่ค่าความถี่ 50 Hz โดยมีระยะห่างของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) กับเซ็นเซอร์ AS7341 เท่ากับ 10 mm กราฟการดูดกลืนแสงที่ได้มีค่าสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 630 nm และ 470 nm ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น

4.2.2.3 การวิเคราะห์กราฟการดูดกลืนแสงของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate)



รูปที่ 4.14 ขณะทำการตรวจวัดค่าสเปกตรัมของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



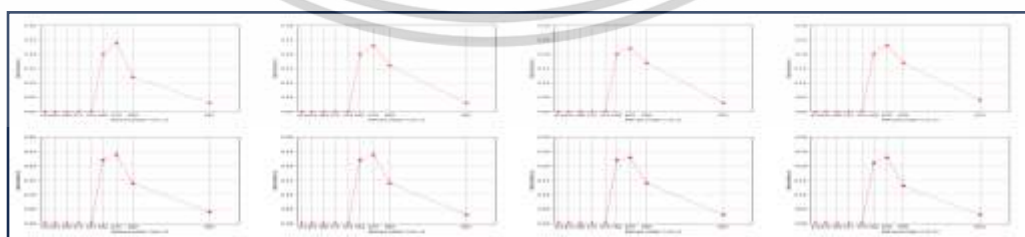
รูปที่ 4.15 ลักษณะของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดสาร KNO_3 (Potassium Nitrate)

จากกราฟการดูดกลืนแสงของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ปริมาณ 10 g ที่ค่าความถี่ 50 Hz โดยมีระยะห่างของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) กับเซ็นเซอร์ AS7341 เท่ากับ 10 mm กราฟการดูดกลืนแสงที่ได้มีค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 nm และ 500 nm ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น

4.2.3 การประเมินผลลัพธ์

4.2.3.1 ความแม่นยำ (Precision) ของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

ทำการตรวจวัดสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ในปริมาณ 10 g, 20 g. ห่วงระยะเวลา 500 ms, 1000 ms. ที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz. จำนวน 8 ครั้ง. นำค่าการดูดกลืนแสงที่จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมมาคำนวณหาความแม่นยำ



รูปที่ 4.16 จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

ณ

ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าสเปกตรัมของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ปริมาณ 10 g. ช่วงระยะเวลา 500 ms. ที่ความถี่ 50 Hz. ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

กราฟ	630 nm	680 nm	910 nm
1	0.25	0.12	0.05
2	0.23	0.11	0.04
3	0.24	0.13	0.06
4	0.26	0.12	0.05
5	0.22	0.10	0.03

1. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 630 nm

$$\text{x. ค่าเฉลี่ย (average, avg)} = (0.25 + 0.23 + 0.24 + 0.26 + 0.22) / 5 = 0.24$$

$$\text{y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)} = 0.016$$

$$\text{ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD)} = (SD/avg) \times 100\% = (0.016/0.24) \times 100\% = 6.67\%$$

2. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 680 nm

$$\text{x. ค่าเฉลี่ย (average, avg)} = (0.12 + 0.11 + 0.13 + 0.12 + 0.10) / 5 = 0.116$$

$$\text{y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)} = 0.011$$

$$\text{ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD)} = (SD/avg) \times 100\% = 9.48\%$$

3. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 910 nm

$$\text{x. ค่าเฉลี่ย (average, avg)} = (0.05 + 0.04 + 0.06 + 0.05 + 0.03) / 5 = 0.046$$

$$\text{y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)} = 0.011$$

$$\text{ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD)} = (SD/avg) \times 100\% = 23.91\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุปผล

x. ค่า RSD ที่ wavenumber 630 nm (6.67%) มีค่าต่ำที่สุด
wavenumber 680 nm (9.48%) และ wavenumber 910 nm (23.91%) มีค่า RSD สูงที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่า

x.1 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 630 nm มีความแม่นยำมากที่สุด

y.2 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 910 nm มีความแม่นยำน้อยที่สุด

4.2.3.2 ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ระหว่างกราฟมาตรฐาน (NIST) กับกราฟที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ปริมาณ 10 g ที่มีค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), 14706 cm^{-1} (680 nm) และ 10989 cm^{-1} (910 nm)



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

1 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของกราฟมาตรฐาน (NIST)

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.24

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

z. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 0.04

2 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานสาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.23

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.12

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 0.03

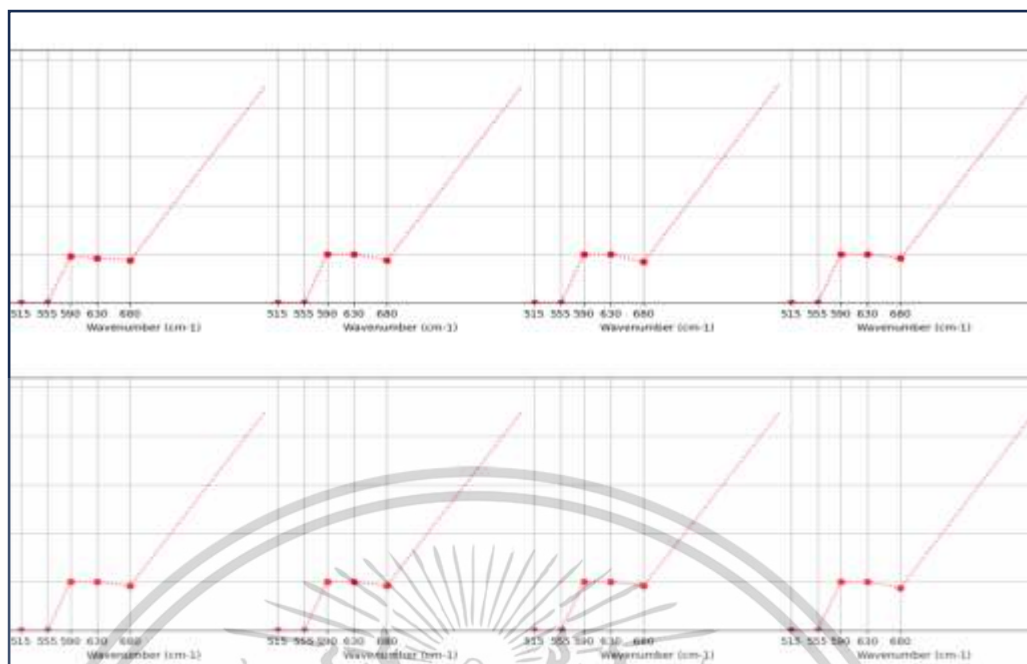
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

Wavenumber (nm)	Accuracy
630	$(0.23/0.24) \times 100 = 95.83\%$
680	$(0.12/0.14) \times 100 = 85.71\%$
910	$(0.03/0.04) \times 100 = 75\%$

4.2.3.2 ความแม่นยำ (Precision) ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

ทำการตรวจวัดสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ด้วยเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานสาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ในปริมาณ 10 g, 20 g. ช่วงระยะเวลา 500 ms, 1000 ms. ที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz. จำนวน 8 ครั้ง. นำค่าการดูดกลืนแสงที่จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมมาคำนวณหาความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

ตารางที่ 4.3 ค่าสเปกตรัมของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ปริมาณ 10 g ที่ได้จากการวัด

กราฟ	630 nm	680 nm	910 nm
1	0.35	0.28	1.20
2	0.38	0.30	1.25
3	0.33	0.25	1.15
4	0.36	0.29	1.22
5	0.37	0.31	1.28

1. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 630 nm

$$\text{x. ค่าเฉลี่ย (average, avg)} = (0.35 + 0.38 + 0.33 + 0.36 + 0.37) / 5 = 0.358$$

$$\text{y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)} = 0.021$$

$$\text{ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD)} = (SD/avg) \times 100\% = (0.021/0.358) \times 100\% = 5.87\%$$

2. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 680 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x. ค่าเฉลี่ย (average, avg) = $(0.28 + 0.30 + 0.25 + 0.29 + 0.31) / 5 = 0.286$

y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) = 0.022
 ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD) = $(SD/avg) \times 100\% = (0.022/0.286) \times 100\% = 7.62\%$

3. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 910 nm

x. ค่าเฉลี่ย (average, avg) = $(1.20 + 1.25 + 1.15 + 1.22 + 1.28) / 5 = 1.22$

y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) = 0.046
 ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation, RSD) = $(SD/avg) \times 100\% = (0.046/1.22) \times 100\% = 3.77\%$

4. สรุปผล

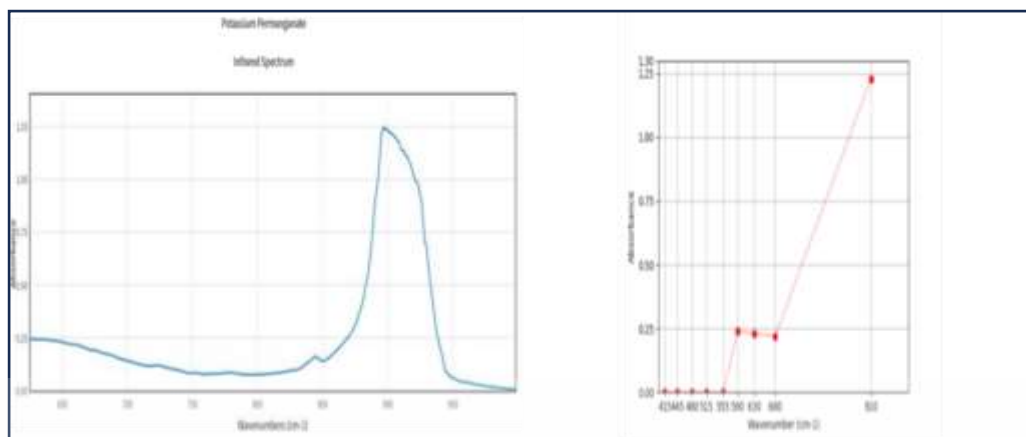
x. ค่า RSD ที่ wavenumber 910 nm (3.77%) มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ wavenumber 630 nm (7.69%) มีค่า RSD สูงที่สุดซึ่งบ่งชี้ว่า

x.1 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 910 nm มีความแม่นยำมากที่สุด

x.2 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 680 nm มีความแม่นยำน้อยที่สุด

4.2.3.2 ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ระหว่างกราฟมาตรฐาน (NIST) กับกราฟที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ของ KMnO_4 (Potassium Permanganate) ปริมาณ 10 g ที่มีค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), 14706 cm^{-1} (680 nm) และ 10989 cm^{-1} (910 nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

1. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของกราฟมาตรฐาน (NIST)

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.25

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.23

z. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 1.24

2. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.24

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.21

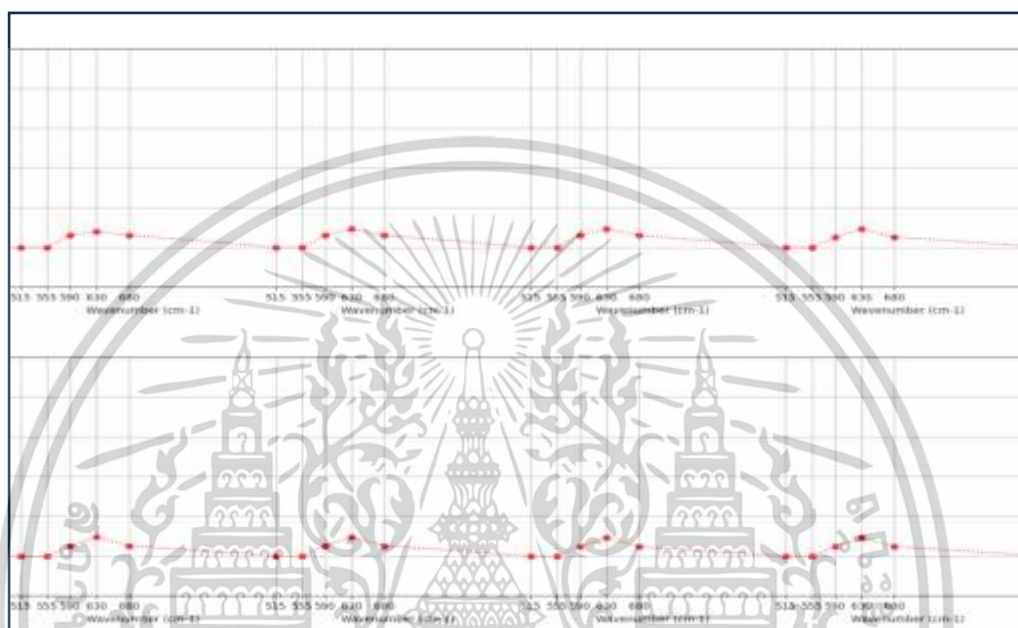
z. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 1.21

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

Wavenumber (nm)	Accuracy
630	$(0.24/0.25) \times 100 = 96\%$
680	$(0.21/0.23) \times 100 = 91.30\%$
910	$(1.21/1.24) \times 100 = 97.58\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.3 ความแม่นยำ (Precision) ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ทำการตรวจวัดสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ในปริมาณ 10 g, 20 g. ห่วงระยะเวลา 500 ms, 1000 ms. ที่ความถี่ 50 Hz, 100 Hz. จำนวน 8 ครั้ง. นำค่าการดูดกลืนแสงที่จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมมาคำนวณหาค่าความแม่นยำ



รูปที่ 4.20 จุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

ตารางที่ 4.5 ค่าสเปกตรัมของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ปริมาณ 10 g ที่ได้จากการวัด

กราฟ	630 nm	680 nm	910 nm
1	0.45	0.65	0.20
2	0.48	0.70	0.25
3	0.42	0.60	0.18
4	0.46	0.68	0.22
5	0.47	0.72	0.28

1. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 630 nm

$$\begin{aligned} \text{x. ค่าเฉลี่ย (average, avg)} &= (0.45 + 0.48 + 0.42 + 0.46 + 0.47) / 5 = 0.456 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) = 0.024
 ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation ,
 RSD) = (SD/avg) × 100% = (0.024/0.456) × 100% = 5.26%

2. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 680 nm

x. ค่าเฉลี่ย (average, avg) = (0.65 + 0.70 + 0.60 + 0.68 + 0.72) / 5 = 0.67

y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) = 0.046
 ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation ,
 RSD) = (SD/avg) × 100% = (0.046/0.67) × 100% = 6.87%

3. ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ย่านความถี่ 910 nm

x. ค่าเฉลี่ย (average, avg) = (0.20 + 0.25 + 0.18 + 0.22 + 0.28) / 5 = 0.226

y. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) = 0.037
 ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation ,
 RSD) = (SD/avg) × 100% =(0.037/0.226) × 100% = 16.37%

4. สรุปผล

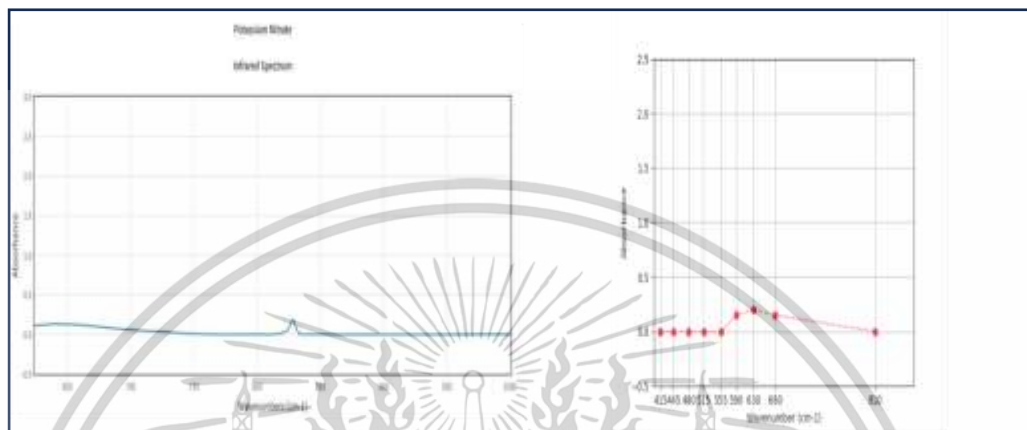
x. ค่า RSD ที่ wavenumber 630 nm (5.26%) มีค่าต่ำที่สุด
 รองลงมาคือ wavenumber 680 nm (6.67%) และ wavenumber 910
 nm (16.37%) มีค่า RSD สูงที่สุดซึ่งบ่งชี้ว่า

x.1 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 630
 nm มีความแม่นยำมากที่สุด

x.2 การวัดค่า absorbance ที่ wavenumber 910
 nm มีความแม่นยำน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ระหว่างกราฟมาตรฐาน(NIST) กับกราฟที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ของ KNO_3 (Potassium Nitrate) ปริมาณ 10 g ที่มีค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) , 14706 cm^{-1} (680 nm) และ 10989 cm^{-1} (910 nm)



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมจากสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ณ ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm)

1. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของกราฟมาตรฐาน (NIST)

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.28

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.25

z. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 0.00

2. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

x. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm) = 0.24

y. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm) = 0.22

z. ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) = 0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate)

Wavenumber (nm)	Accuracy
630	$(0.24/0.28) \times 100 = 85.71\%$
680	$(0.22/0.15) \times 100 = 88\%$
910	$(0.00/0.00) \times 100 = 0.00\%$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

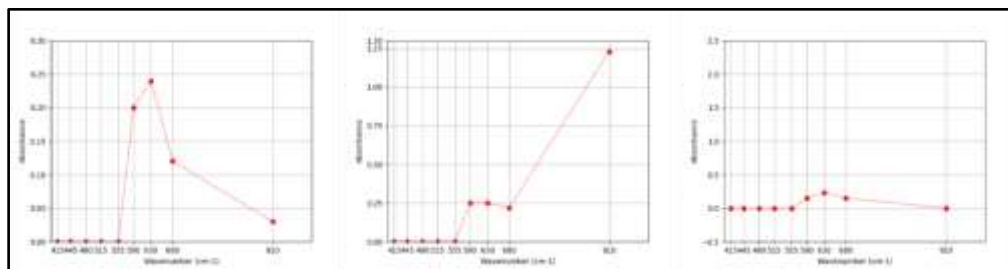
5.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ได้จัดทำขึ้น โดยมีขั้นตอนหลักในการดำเนินงาน ได้แก่ 1.การออกแบบเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ที่สอดคล้องกับการใช้งาน 2.การเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ง่าย 3.การประกอบและเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี 4.สร้างระบบการใช้และการควบคุมเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี 5.ทดสอบการใช้งานและเก็บรวบรวมข้อมูลเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี 6.วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ซึ่งได้เลือกใช้โปรแกรมอาดูโน (Arduino) ในการควบคุมระบบการใช้งานเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี โดยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีที่ได้จัดทำขึ้น ช่วยให้ตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง, คัดแยกวัตถุพยาน, พกพาสะดวก, มีราคาไม่สูงมาก, จัดหาอะไหล่ชิ้นส่วนซ่อมทดแทนได้ง่าย

5.2 อภิปรายผล

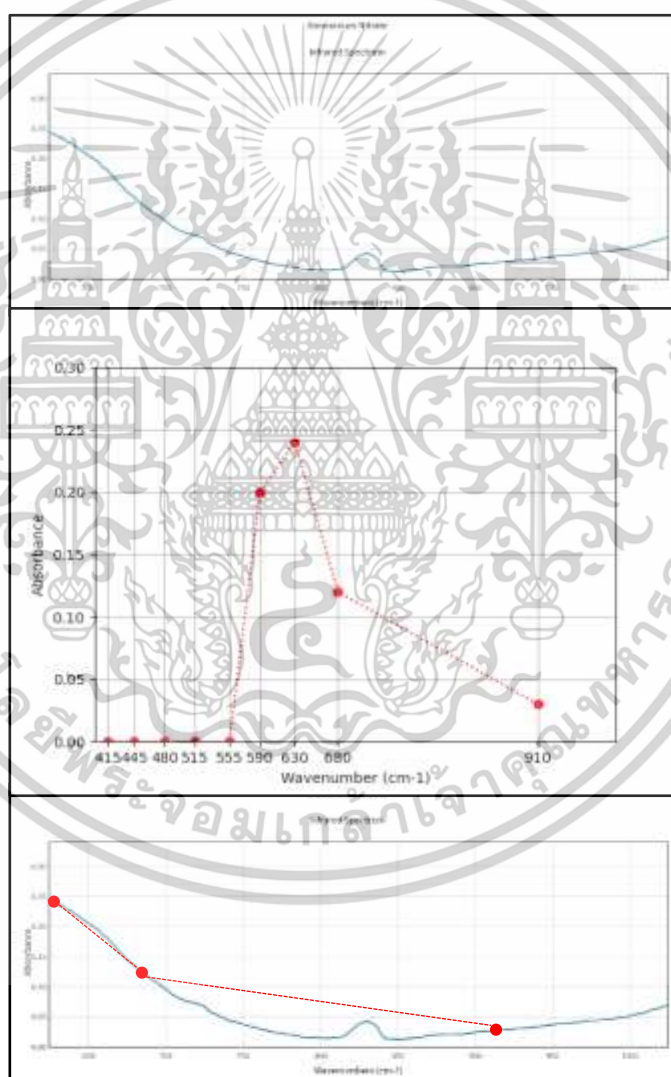
ในการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ซึ่งใช้เซนเซอร์ AS7341 Spectral Sensor นั้นจะได้กราฟสเปกตรัมที่ตำแหน่งย่านความถี่ wavenumber 15873 cm^{-1} (630 nm), wavenumber 14706 cm^{-1} (680 nm), wavenumber 10989 cm^{-1} (910 nm) ของจุดยอด (Peak) จากสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate), KMnO_4 (Potassium Permanganate), และ KNO_3 (Potassium Nitrate) เป็นไปตามรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 กราฟสเปกตรัมที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิด
แสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

5.2.1 วิเคราะห์ผลการวัดค่าการดูดกลืนสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.1 ตำแหน่งของจุดยอด (Peak)

ก. กราฟสเปกตรัมของสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) แสดงจุดยอด (Peak) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 630 nm, 680 nm, 910 nm,

ข. นำกราฟมาตรฐานและกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมาเปรียบเทียบ ตำแหน่งจุดยอด (Peak) พบว่าตำแหน่งจุดยอด (Peak) ทั้ง 3 จุด สอดคล้องกับตำแหน่งจุดยอด (Peak) ในกราฟมาตรฐาน

ค. สิ่งนี้บ่งชี้ว่าสารที่ใช้ทดสอบ มีแนวโน้มสูงที่จะเป็นสาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate)

5.2.1.2 ความสูงของจุดยอด (Peak)

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมีความเข้มของจุดยอด (Peak) ต่ำกว่ากราฟมาตรฐาน อาจเป็นผลมาจาก ความเข้มข้นของสารละลาย, ความไวของเซนเซอร์, สภาวะแวดล้อมในการทดลอง

5.2.1.3 ลักษณะรูปร่างของกราฟ

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีแสดงจุดยอด (Peak) ที่น้อยกว่ากราฟมาตรฐาน โดยเฉพาะจุดยอด (Peak) ที่ความยาวประมาณ 800 nm เป็นต้นไปแทบไม่ปรากฏ

5.2.1.4 สรุป

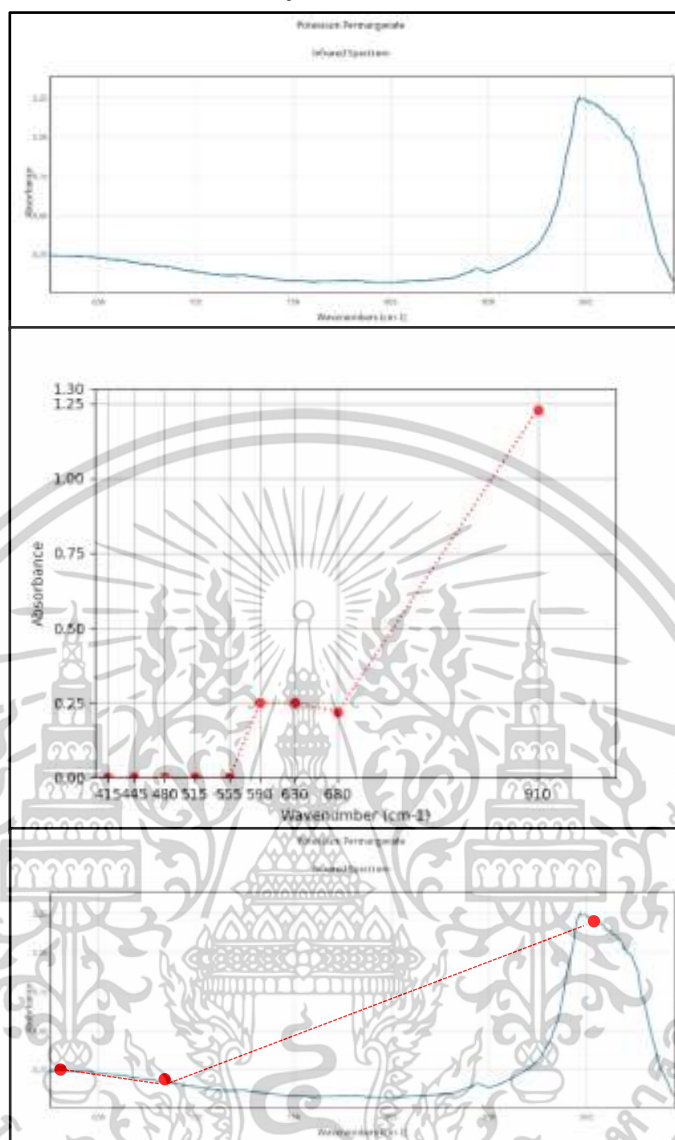
จากการวิเคราะห์จุดยอด (Peak) ของกราฟ มีแนวโน้มสูงที่สารประกอบที่ทดสอบด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี จะเป็น สาร NH_4NO_3 (Ammonium Nitrate) แต่ความเข้มของจุดยอด (Peak) และลักษณะรูปร่างของกราฟ มีความแตกต่างจากกราฟมาตรฐาน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ

5.2.1.5 ข้อเสนอแนะ

ก. ควรควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการทดลอง ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น และใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นที่แน่นอน

ข. หากต้องการความแม่นยำสูง อาจพิจารณาใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงกว่า

5.2.2 วิเคราะห์ผลการวัดค่าการดูดกลืนสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

5.2.2.1 ตำแหน่งของจุดยอด (Peak)

ก. กราฟสเปกตรัมของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) แสดงจุดยอด (Peak) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 630 nm, 680 nm, 910 nm,

ข. นำกราฟมาตรฐานและกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมาเปรียบเทียบตำแหน่งจุดยอด (Peak) พบว่าตำแหน่งจุดยอด (Peak) ทั้ง 3 จุด สอดคล้องกับตำแหน่งจุดยอด (Peak) ในกราฟมาตรฐาน

ค. สิ่งนี้บ่งชี้ว่าสารที่ใช้ทดสอบ มีแนวโน้มสูงที่จะเป็นสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 ความของจุดยอด (Peak)

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมีความเข้มของจุดยอด (Peak) ต่ำกว่ากราฟมาตรฐาน อาจเป็นผลมาจาก ความเข้มข้นของสารละลาย, ความไวของเซนเซอร์, สภาวะแวดล้อมในการทดลอง

5.2.2.3 ลักษณะรูปร่างของกราฟ

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมีลักษณะรูปร่างโดยรวมคล้ายคลึงกับกราฟมาตรฐาน

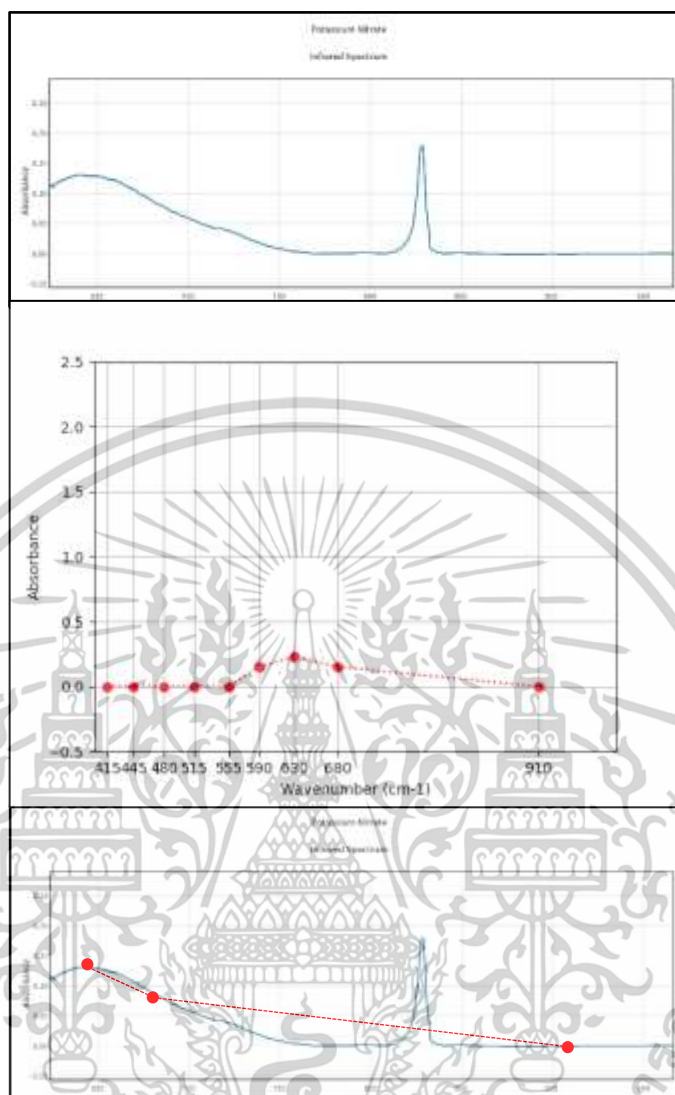
5.2.2.4 สรุป

จากการวิเคราะห์จุดยอด (Peak) ของกราฟ มีแนวโน้มสูงที่สารประกอบที่ทดสอบด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี จะเป็น สาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) แต่ความเข้มของจุดยอด (Peak) มีความแตกต่างจากกราฟมาตรฐาน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ

5.2.2.5 ข้อเสนอแนะ

- ก. ควรควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการทดลอง ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น และใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นที่แน่นอน
- ข. หากต้องการความแม่นยำสูง อาจพิจารณาใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงกว่า

5.2.3 วิเคราะห์ผลการวัดค่าการดูดกลืนสาร KNO₃ (Potassium Nitrate)



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมของสาร KNO₃ (Potassium Nitrate)

5.2.3.1 ตำแหน่งของจุดยอด (Peak)

ก. กราฟสเปกตรัมของสาร KNO₃ (Potassium Nitrate) แสดงจุดยอด (Peak) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 630 nm, 680 nm, 910 nm,

ข. นำกราฟมาตรฐานและกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมาเปรียบเทียบ ตำแหน่งจุดยอด (Peak) พบว่าตำแหน่งจุดยอด (Peak) ทั้ง 3 จุด สอดคล้องกับตำแหน่งจุดยอด (Peak) ในกราฟมาตรฐาน

ค. สิ่งนี้บ่งชี้ว่าสารที่ใช้ทดสอบ มีแนวโน้มสูงที่จะเป็นสาร KNO₃ (Potassium Nitrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.2 ความของจุดยอด (Peak)

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมีความเข้มของจุดยอด (Peak) ต่ำกว่ากราฟมาตรฐาน อาจเป็นผลมาจาก ความเข้มข้นของสารละลาย, ความไวของเซนเซอร์, สภาวะแวดล้อมในการทดลอง

5.2.3.3 ลักษณะรูปร่างของกราฟ

กราฟสเปกตรัมที่ได้เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีมีลักษณะรูปร่างโดยรวมคล้ายคลึงกับกราฟมาตรฐาน

5.2.3.4 สรุป

จากการวิเคราะห์จุดยอด (Peak) ของกราฟ มีแนวโน้มสูงที่สารประกอบที่ทดสอบด้วยเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี จะเป็น สาร KNO_3 (Potassium Nitrate) แต่ความเข้มของจุดยอด (Peak) มีความแตกต่างจากกราฟมาตรฐาน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ

5.2.3.5 ข้อเสนอแนะ

- ก. ควรควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการทดลอง ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น และใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นที่แน่นอน
- ข. หากต้องการความแม่นยำสูง อาจพิจารณาใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงกว่า

5.3 การเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อน ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดของเซนเซอร์ เช่น การปรับแต่งแสงและอุณหภูมิ การศึกษาเหล่านี้อาจช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต การพัฒนาวิธีการปรับปรุง ควรพัฒนาวิธีการปรับปรุงเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด ซึ่งอาจเป็นการปรับแก้การตั้งค่าหรือการใช้งานของเซนเซอร์เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในส่วนของการทดสอบและการตรวจสอบอย่างระมัดระวัง เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลและผลลัพธ์ที่ได้ การทดลองในเชิงลึกอาจช่วยในการพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยีในอนาคต

การใช้งานในสถานการณ์จริง ควรทดลองใช้งานเซนเซอร์ในสถานการณ์จริงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความเหมาะสมของเทคโนโลยีในการใช้งานจริง การทดลองในสถานการณ์จริงอาจช่วยในการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ควรพัฒนาระบบที่ยืดหยุ่นและสามารถปรับได้ตามเงื่อนไขแวดล้อมและการใช้งาน เพื่อให้เทคโนโลยีนี้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้หลากหลายสถานการณ์การวิจัยที่มีความเชื่อถือได้และที่สามารถใช้งานได้จริง อาจจำเป็นต้องใช้เวลาและงบประมาณมากขึ้น แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีและการควบคุมการใช้สารระเบิดในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] วารุณี ยงสกุลโรจน์. “เคมีอินทรีย์ 2 (Organic Chemistry 2).” คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [2] นภาพร ชื้อตระกูล. 2555. “การศึกษาสมบัติเฉพาะทางแสงของสารละลาย TNT โดยเทคนิคยูวีวิสิเบิลและฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปีสำหรับต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ภริภัทร เพชรคง. 2555. “การตรวจวัดสารระเบิดอินทรีย์ที่นิยมใช้ใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย โดยเทคนิคโอออนโครมาโทกราฟี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- (4) ผศ.ดร.สุมิตรา แก้วปัญญา และคณะ, “การวิเคราะห์แบบนาโนสเปกของก๊าซไอโซนด้วยเทคนิค FTIR Spectroscopy” วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยนเรศวร. ปีที่ 19, ฉบับที่ 1. 2561.
<https://www.tcithaijo.org/index.php/RSUJOURNAL/article/view/120766>
- [5] นฤธิดา เกียรติชัยกุล, “การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ Spectroscopy ในการตรวจหาภาวะแพ้ภูมิต้านทานและสารสัมผัสชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร” วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ปีที่ 8, ฉบับที่ 1. 2561.
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/SRUJAS/article/view/154285>
- [6] ฐิติพร บุญอุ่น, “การวิเคราะห์สารประกอบหลักของถั่วลิสงโดยใช้เทคนิค FTIR Spectroscopy” วารสารวิจัยเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, 2560.
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/ija/article/view/104844>
- [7] หน่วยทำลายล้างวัตถุระเบิดอินทรีย์ กรมสรรพาวุธทหารบก, “คู่มือการป้องกันเกี่ยวกับวัตถุต้องสงสัย สำหรับประชาชน”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง

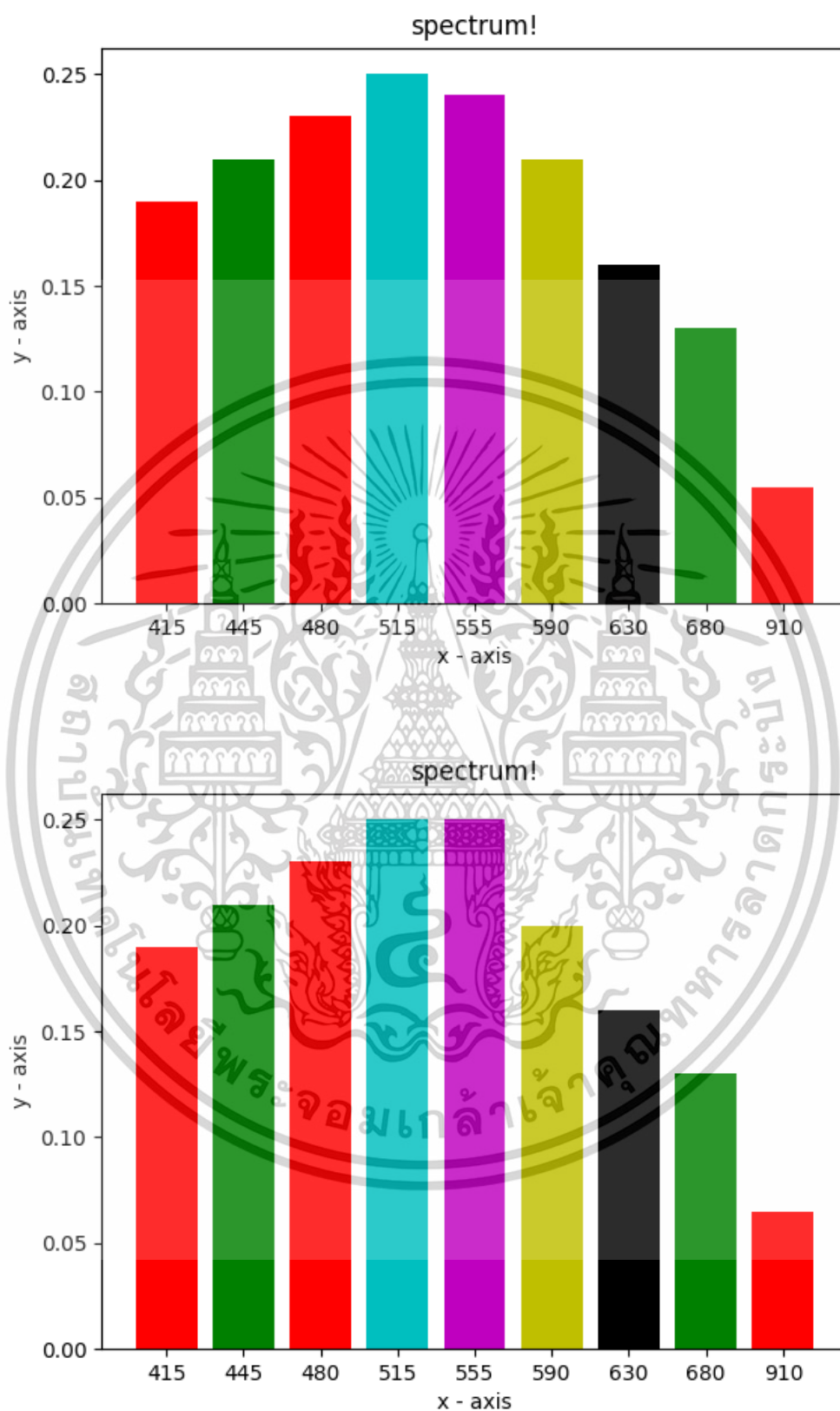
ตารางที่ 5.1 แสดงวิธีการวัดค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

	H ₄ N ₂ O ₃ (Ammonium Nitrate)															
Weight g.	10								20							
Time ms.	500				1000				500				1000			
Frequency Hz.	50		100		50		100		50		100		50		100	
Gap mm.	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50
Status dark= 0 bright= 1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

ตารางที่ 5.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.19	0.21	0.23	0.25	0.24	0.21	0.16	0.13	0.055	
500	50	50	0.19	0.21	0.23	0.25	0.25	0.2	0.16	0.13	0.065	

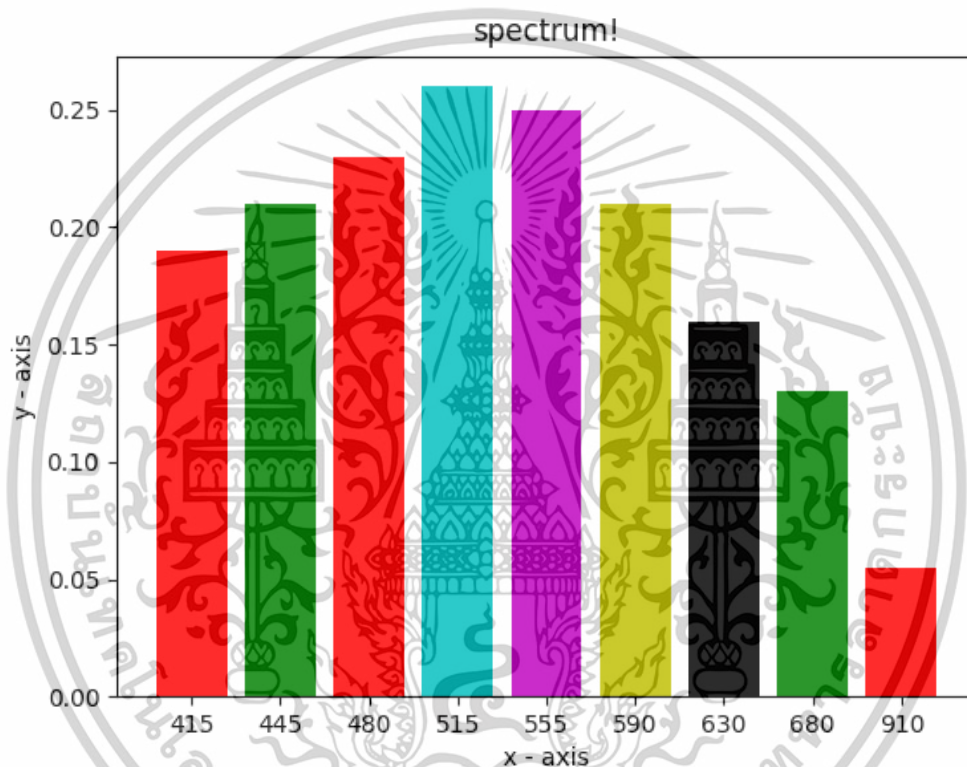
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



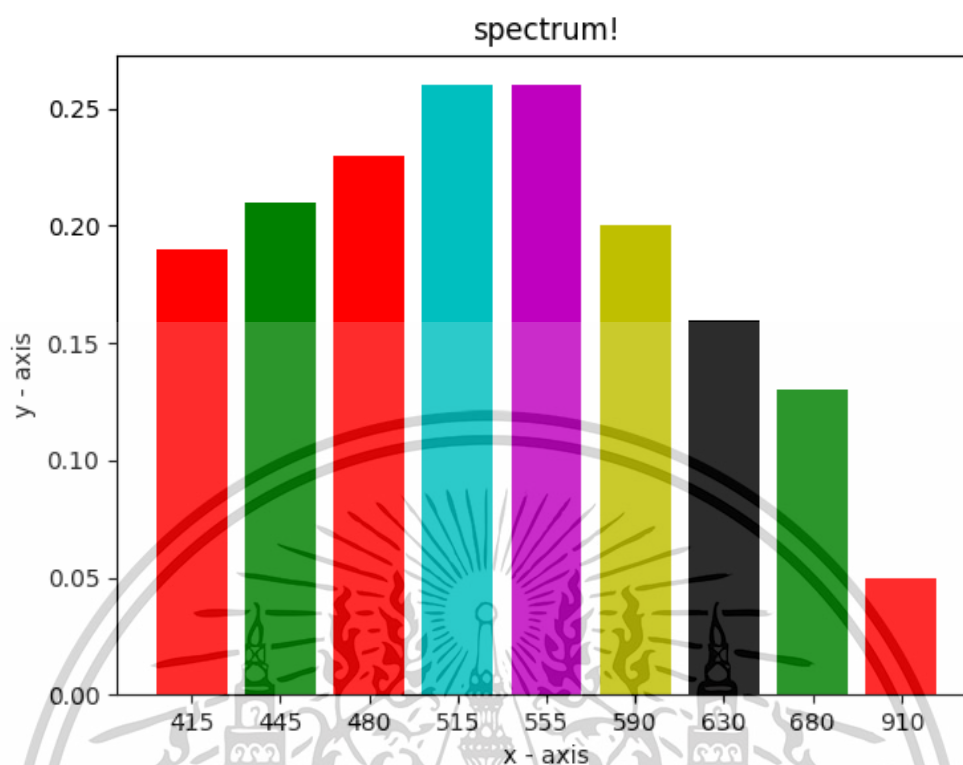
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.19	0.21	0.23	0.26	0.25	0.21	0.16	0.13	0.055	
500	100	50	0.19	0.21	0.23	0.26	0.26	0.20	0.16	0.13	0.05	



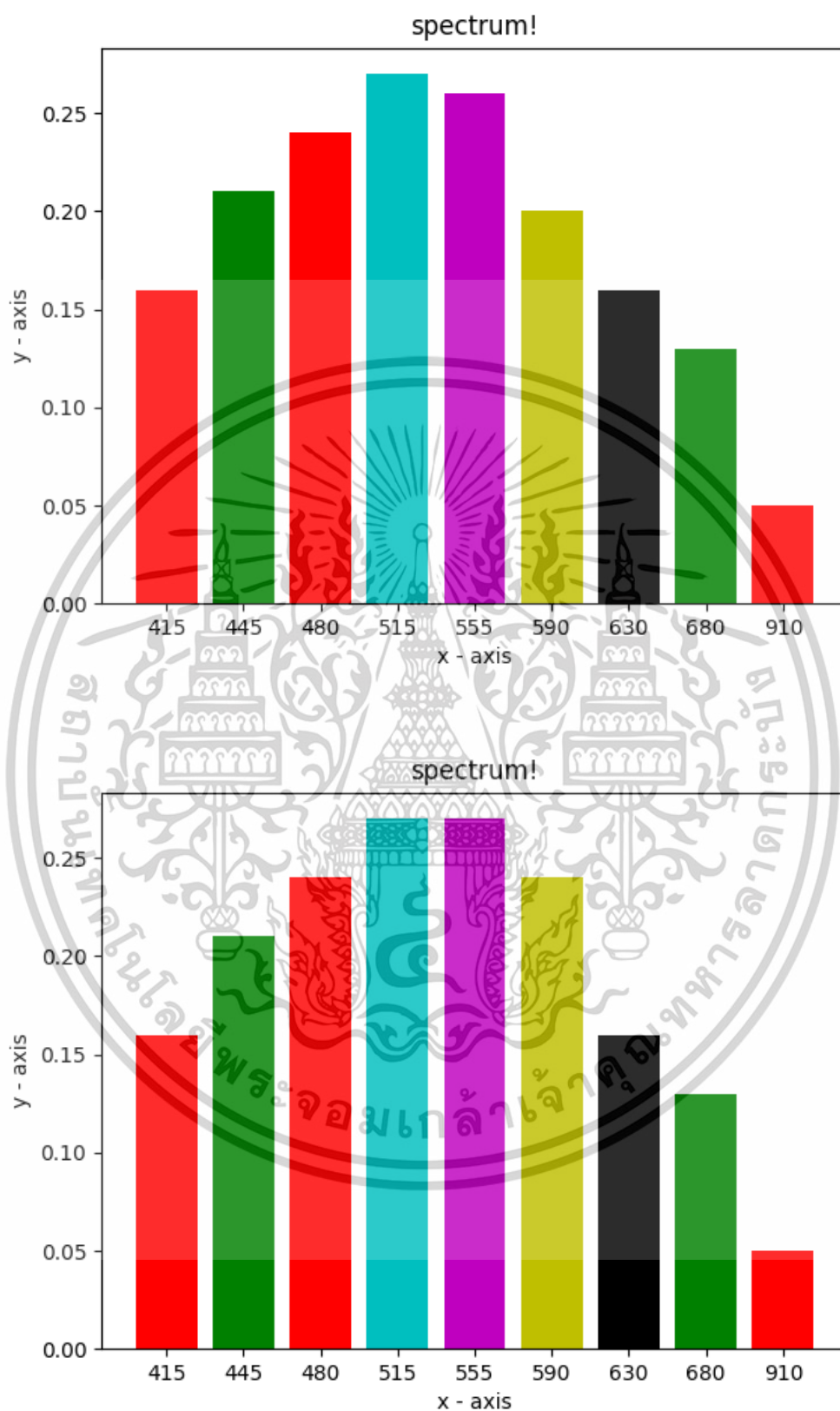
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 5.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.16	0.21	0.24	0.27	0.26	0.2	0.16	0.13	0.05	
1000	50	50	0.16	0.21	0.24	0.27	0.27	0.24	0.16	0.13	0.05	

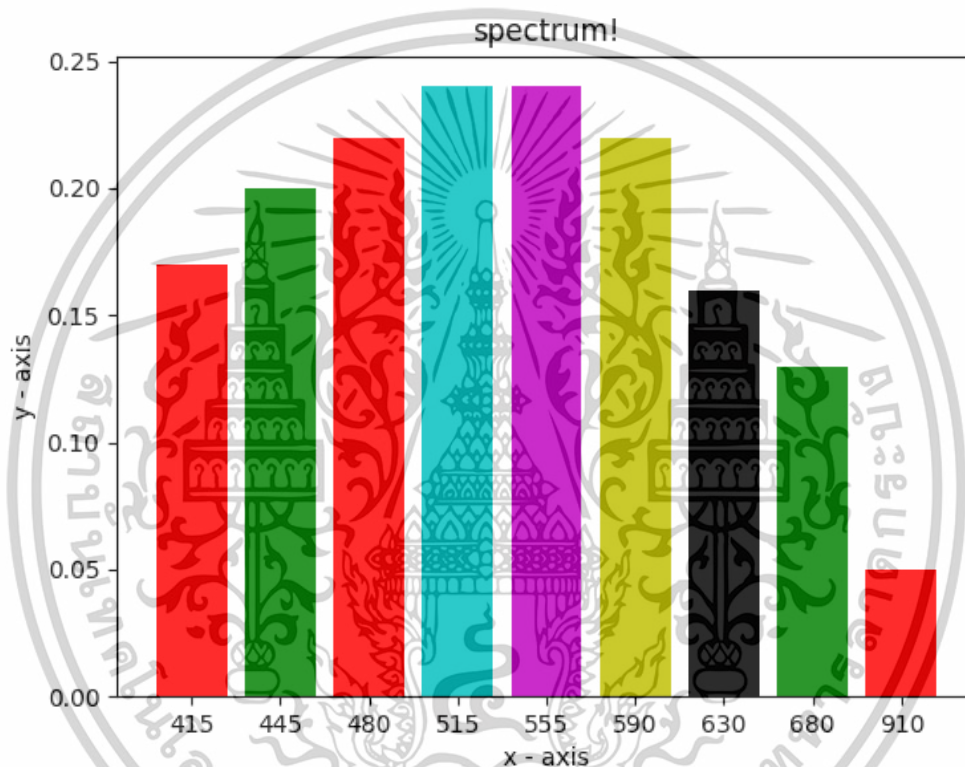
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



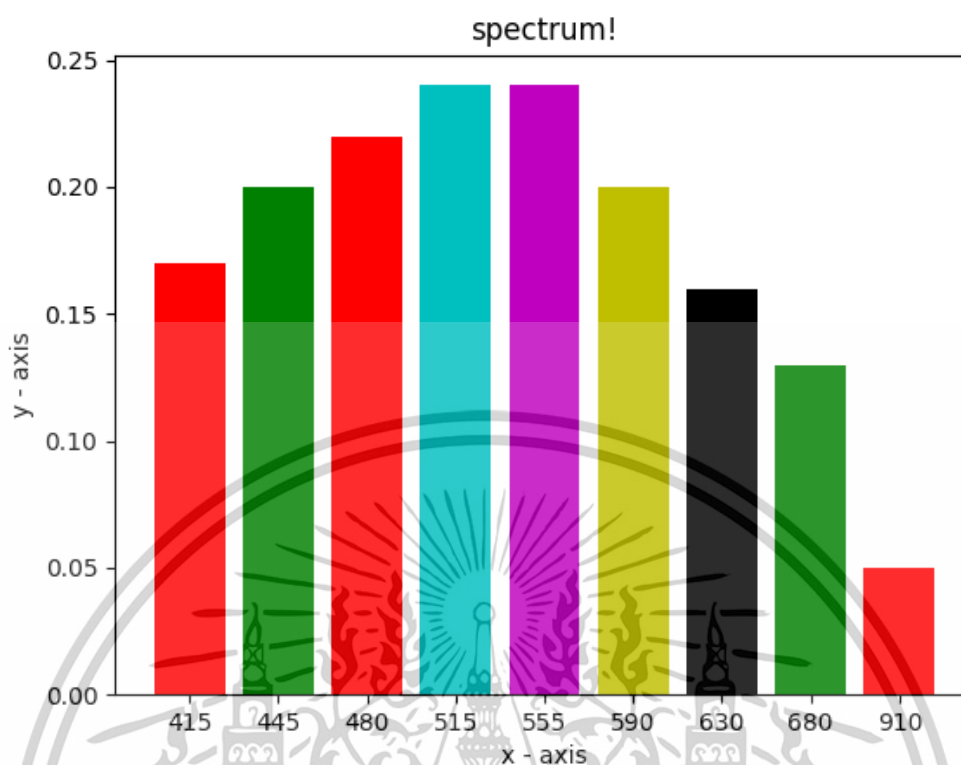
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.17	0.2	0.22	0.24	0.24	0.22	0.16	0.13	0.05	
1000	100	50	0.17	0.2	0.22	0.24	0.24	0.20	0.16	0.13	0.05	



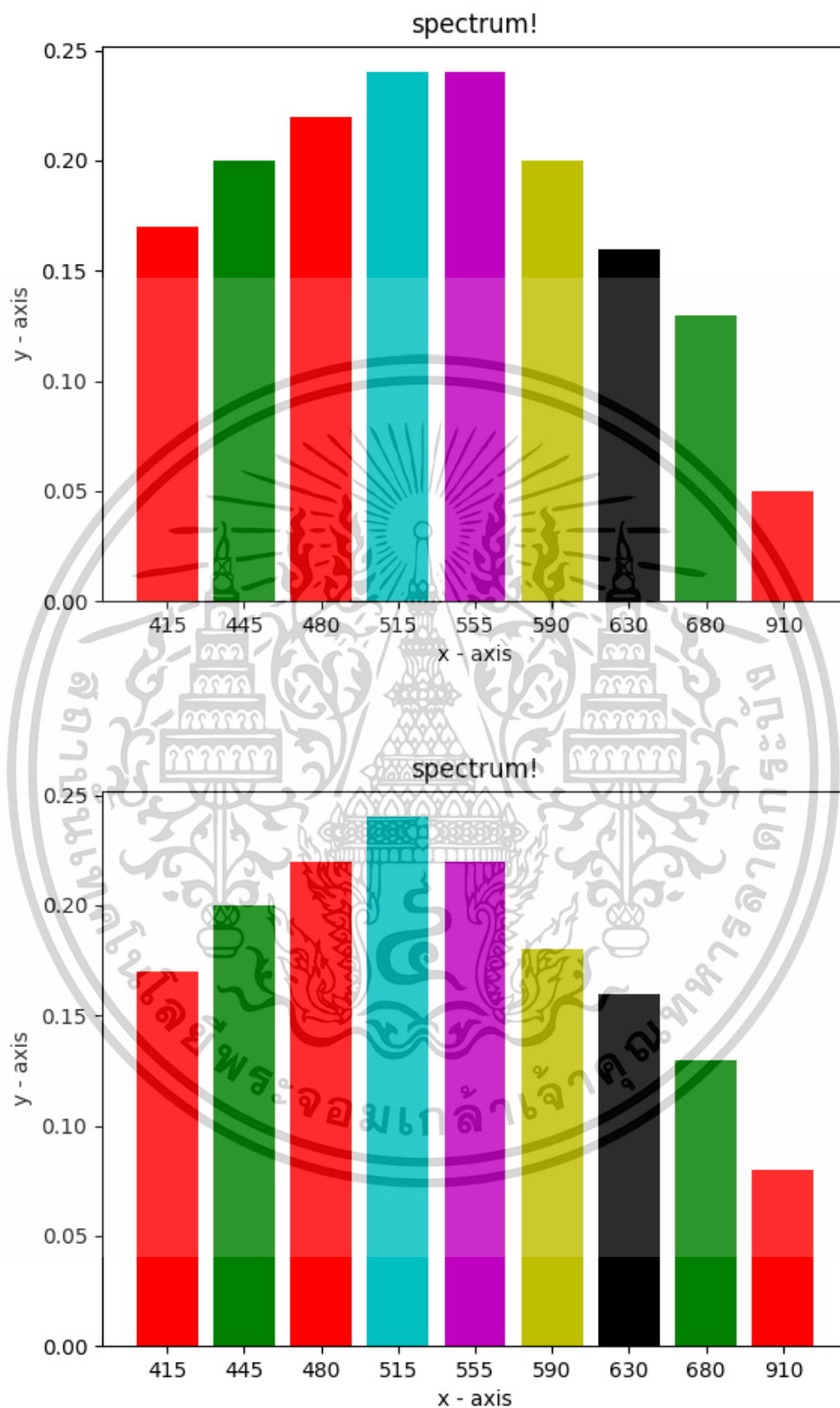
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 5.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.17	0.2	0.22	0.24	0.24	0.20	0.16	0.13	0.05	
500	50	50	0.17	0.2	0.22	0.24	0.22	0.18	0.16	0.13	0.08	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



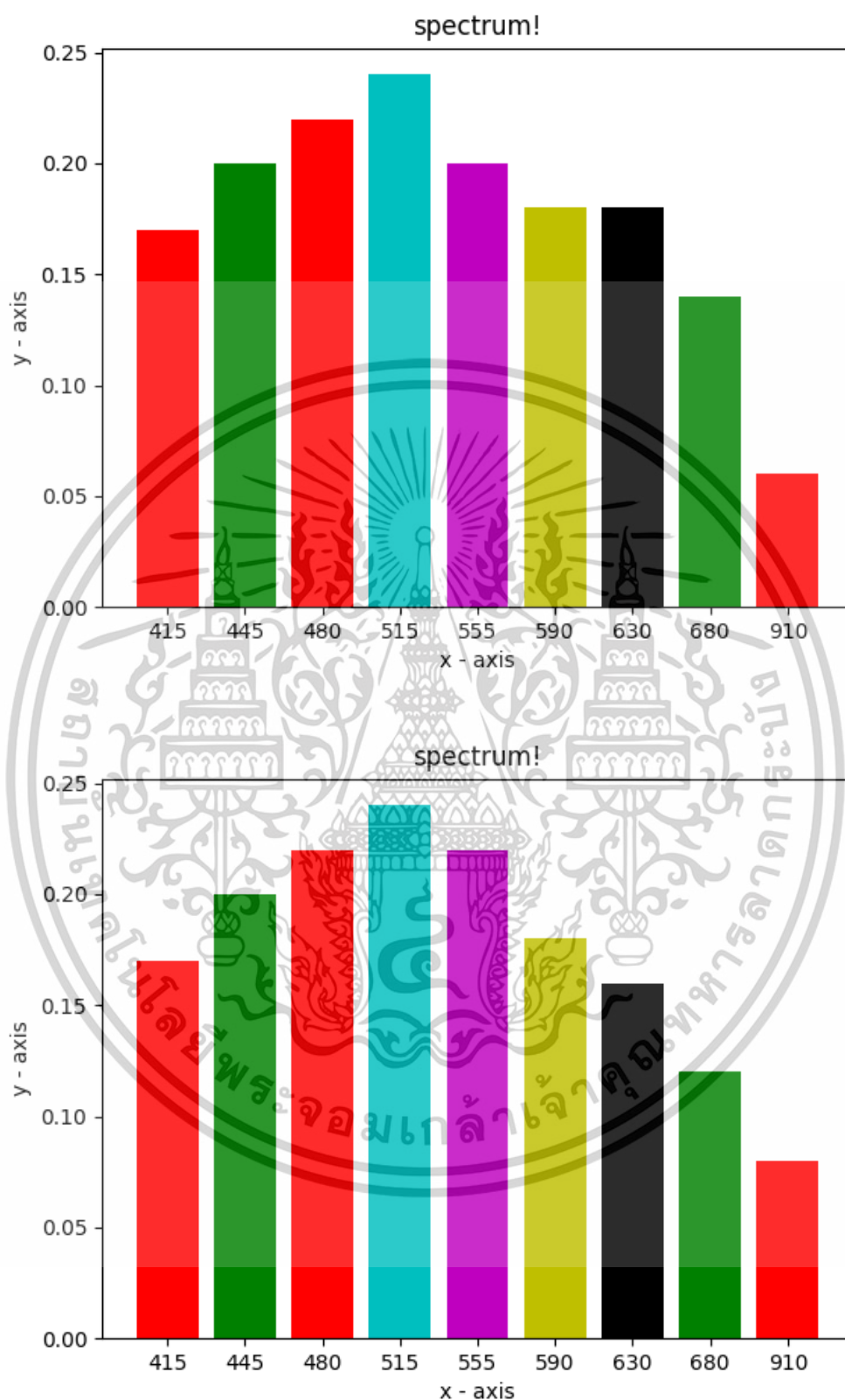
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.17	0.2	0.22	0.24	0.2	0.18	0.18	0.14	0.06	
500	100	50	0.17	0.2	0.22	0.24	0.22	0.18	0.16	0.12	0.08	



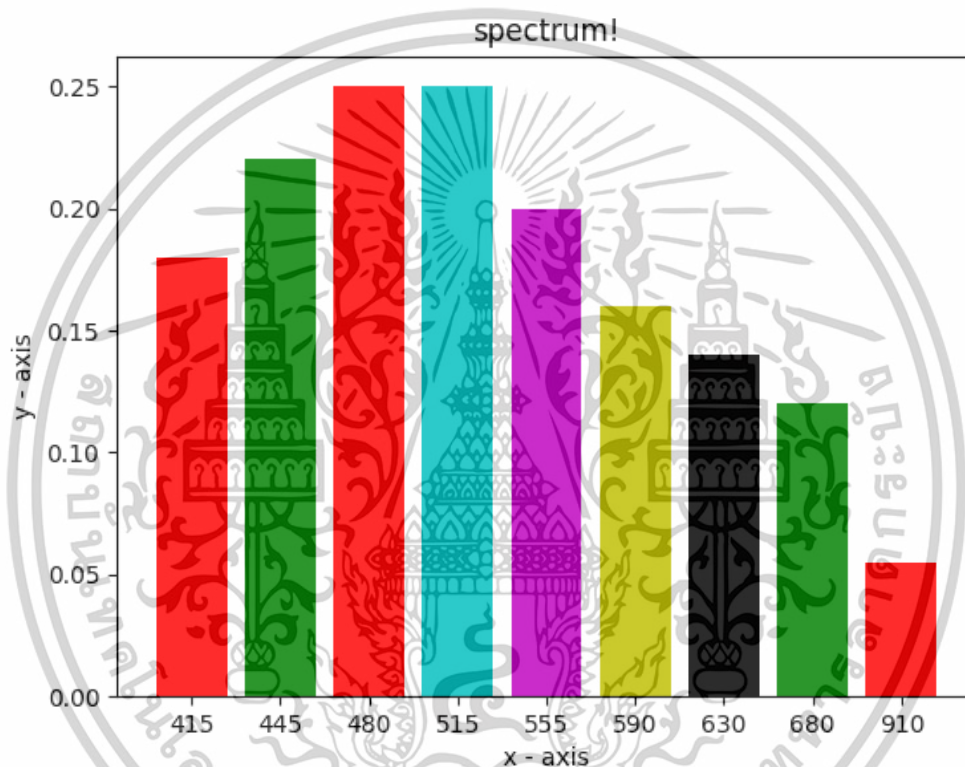
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



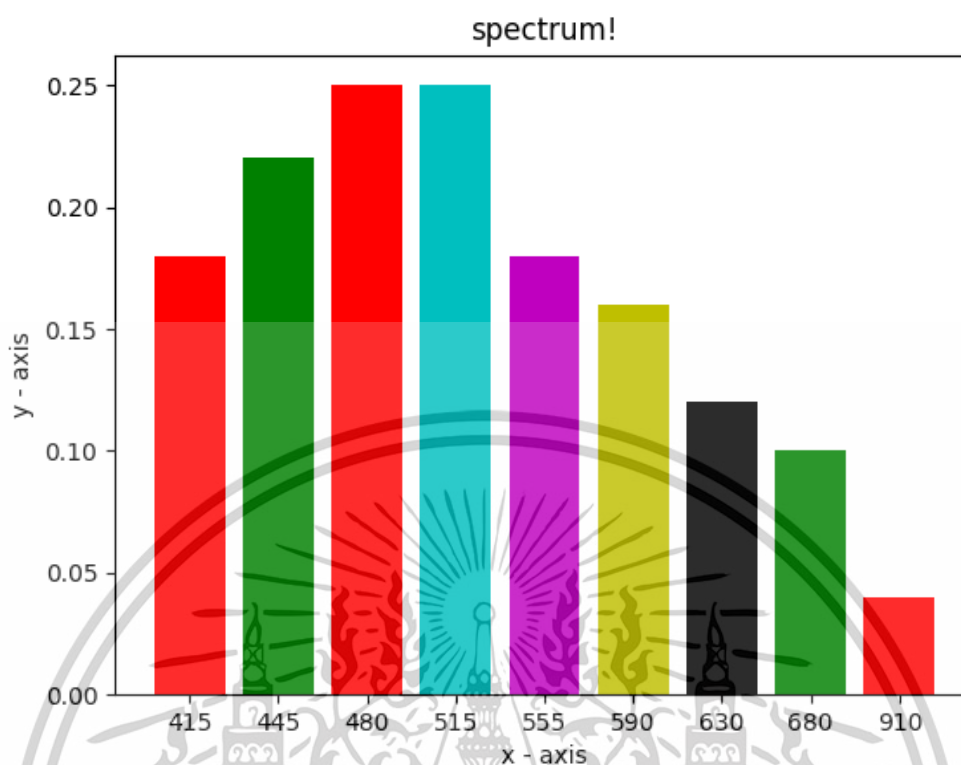
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.18	0.22	0.25	0.25	0.2	0.16	0.14	0.12	0.055	
1000	50	50	0.18	0.22	0.25	0.25	0.18	0.16	0.12	0.10	0.04	



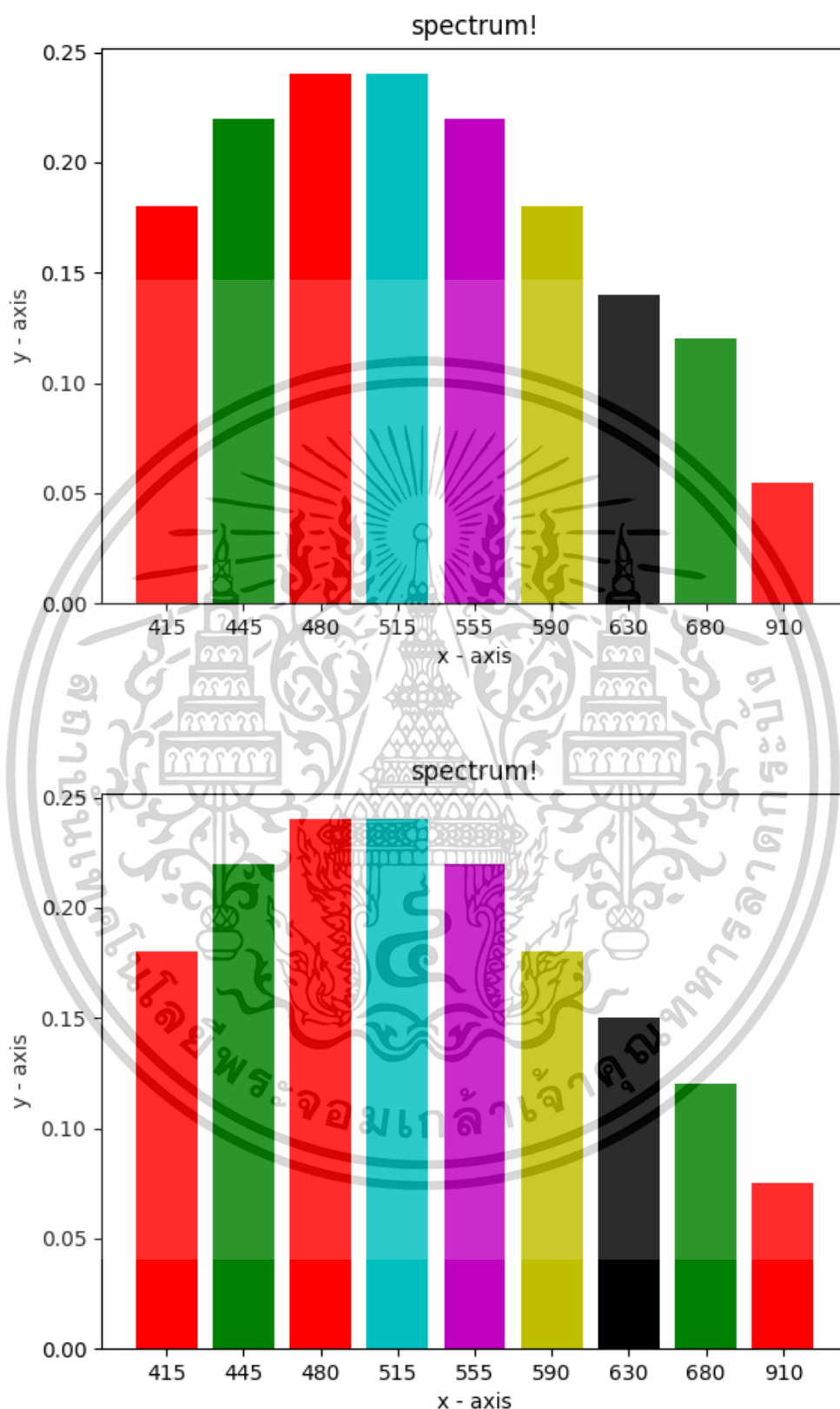
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 5.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.18	0.22	0.24	0.24	0.22	0.18	0.14	0.12	0.055	
1000	100	50	0.18	0.22	0.24	0.24	0.22	0.18	0.15	0.12	0.075	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 6.1 แสดงวิธีการวัดค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) จาก

เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

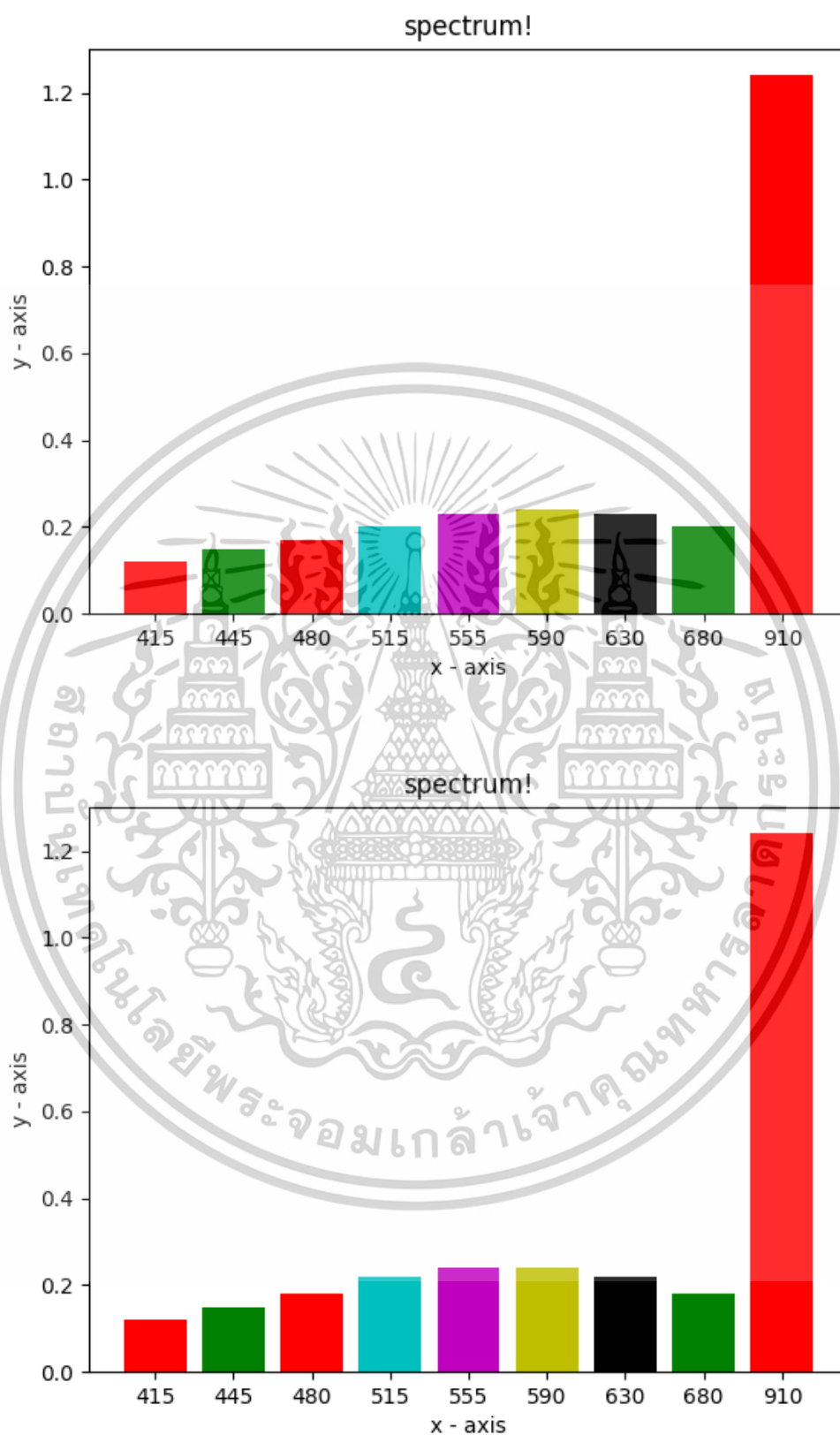
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	KMnO ₄ (Potassium Permanganate)															
Weight g.	10								20							
Time ms.	500				1000				500				1000			
Frequency Hz.	50		100		50		100		50		100		50		100	
Gap mm.	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50
Status	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
dark= 0 bright= 1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

ตารางที่ 6.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO₄ (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.12	0.15	0.17	0.2	0.23	0.24	0.23	0.2	1.24	
500	50	50	0.12	0.15	0.18	0.22	0.24	0.24	0.22	0.18	1.24	

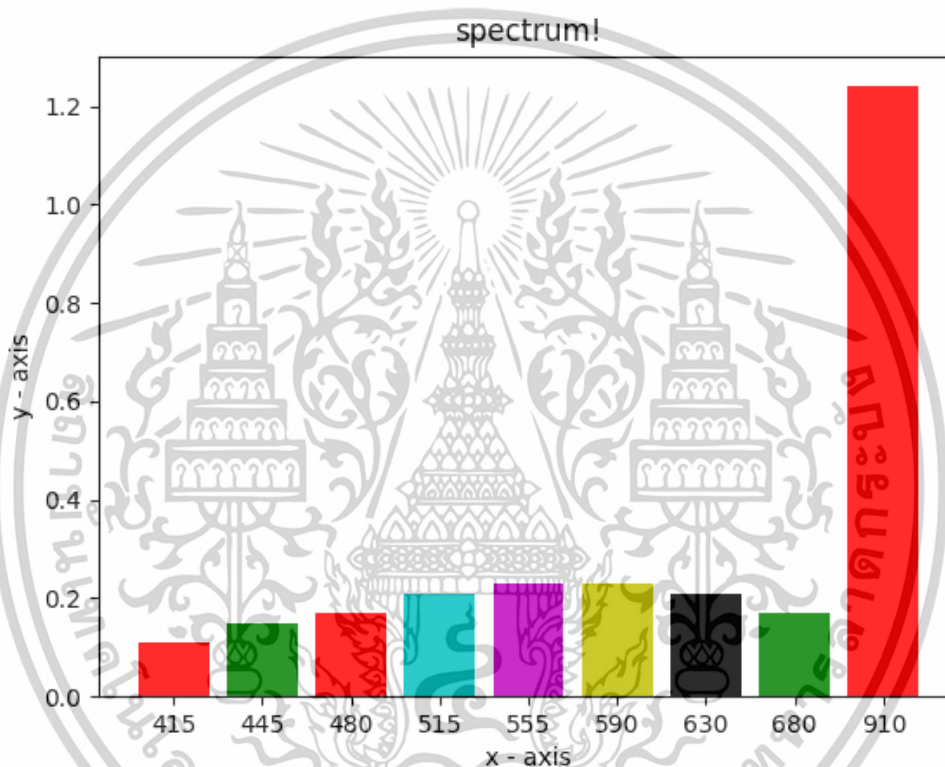
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



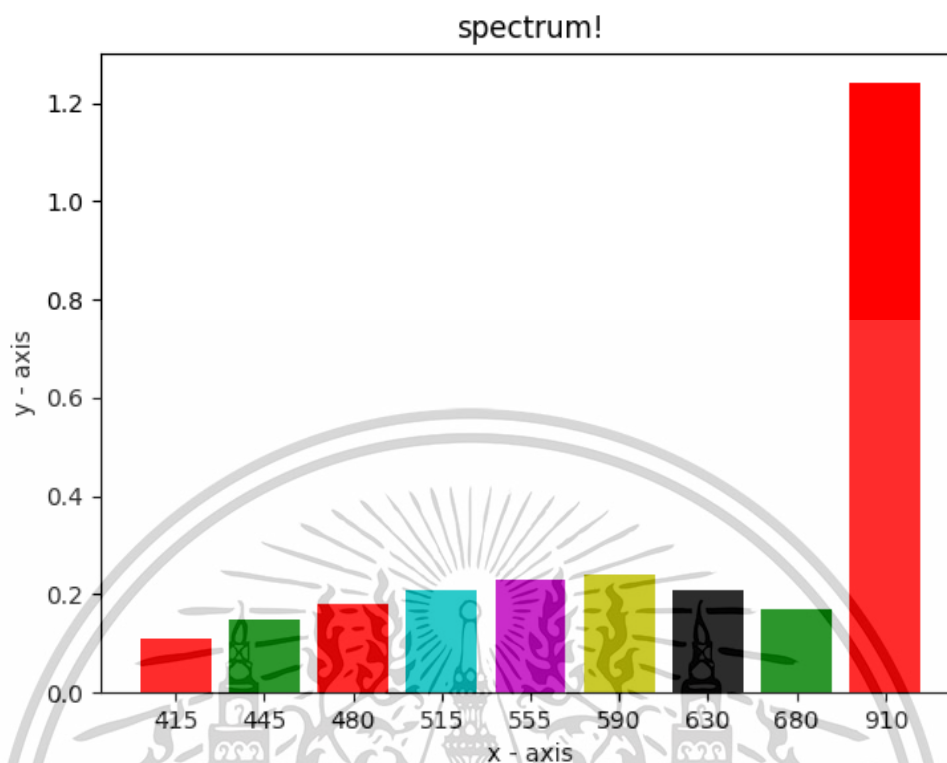
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.11	0.15	0.17	0.21	0.23	0.23	0.21	0.17	1.24	
500	100	50	0.11	0.15	0.18	0.21	0.23	0.24	0.21	0.17	1.24	



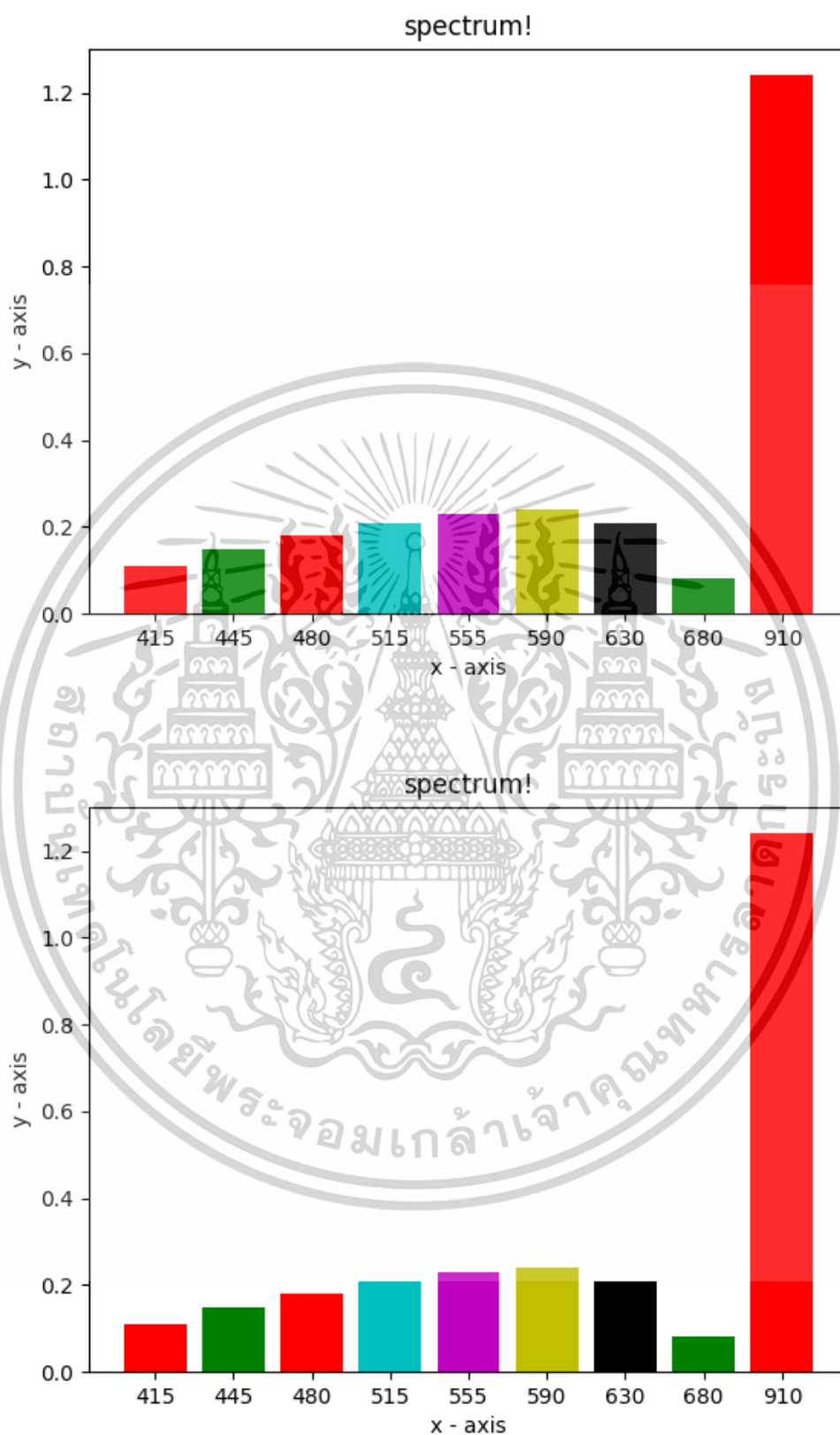
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 6.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.11	0.15	0.18	0.21	0.23	0.24	0.21	0.08	1.24	
1000	50	50	0.10	0.14	0.18	0.21	0.23	0.22	0.22	0.012	1.24	

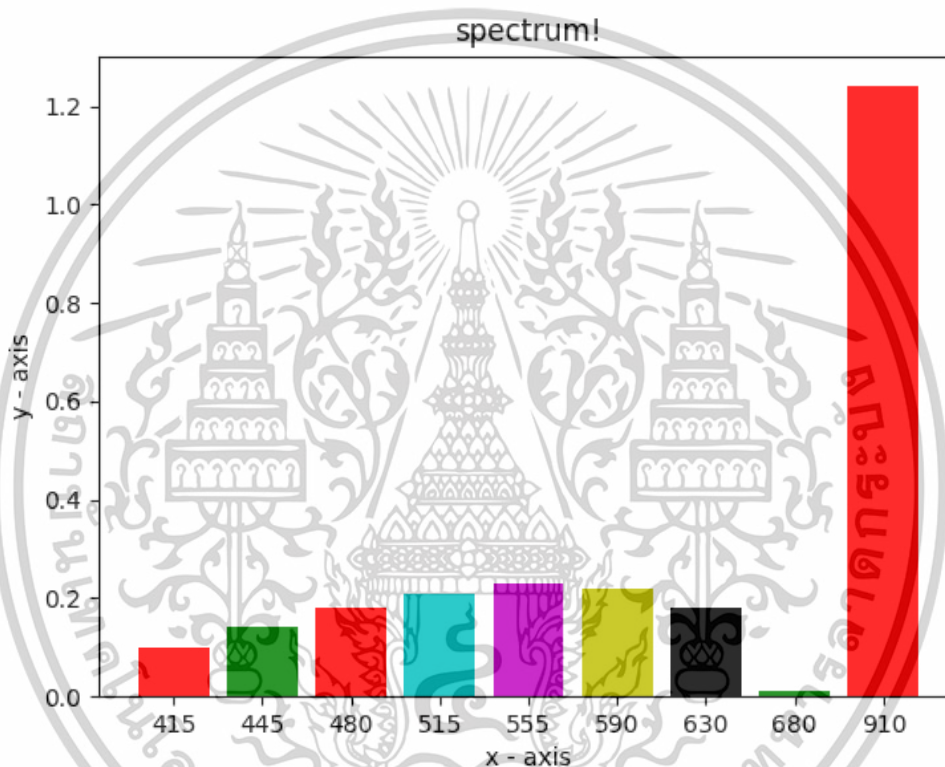
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



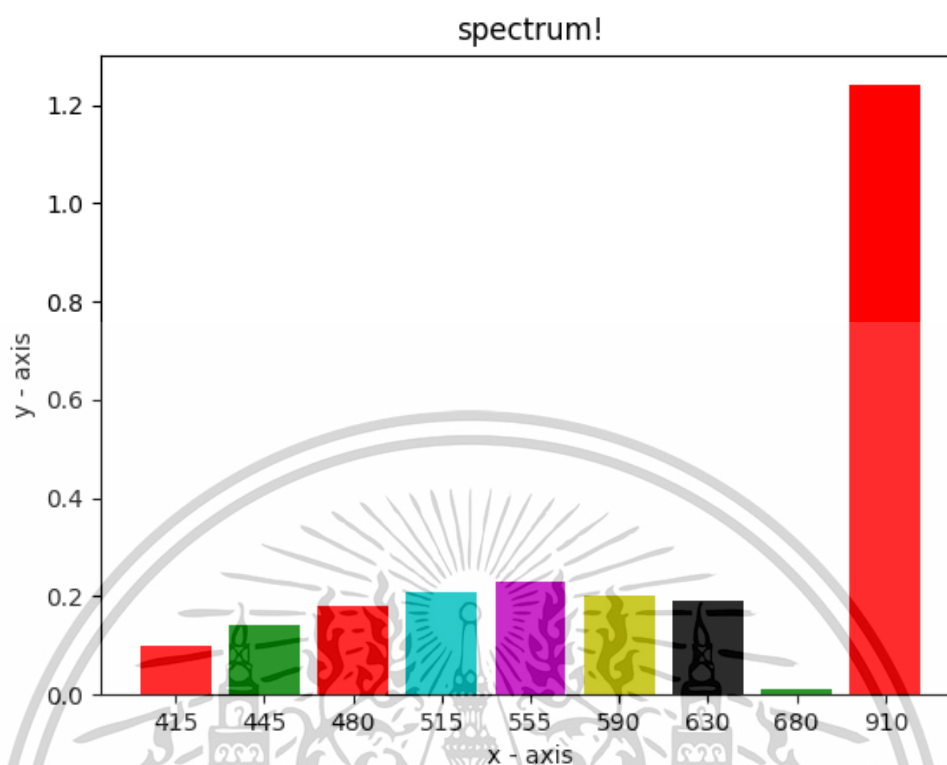
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.10	0.14	0.18	0.21	0.23	0.22	0.18	0.012	1.24	
1000	100	50	0.10	0.14	0.18	0.21	0.23	0.2	0.19	0.01	1.24	



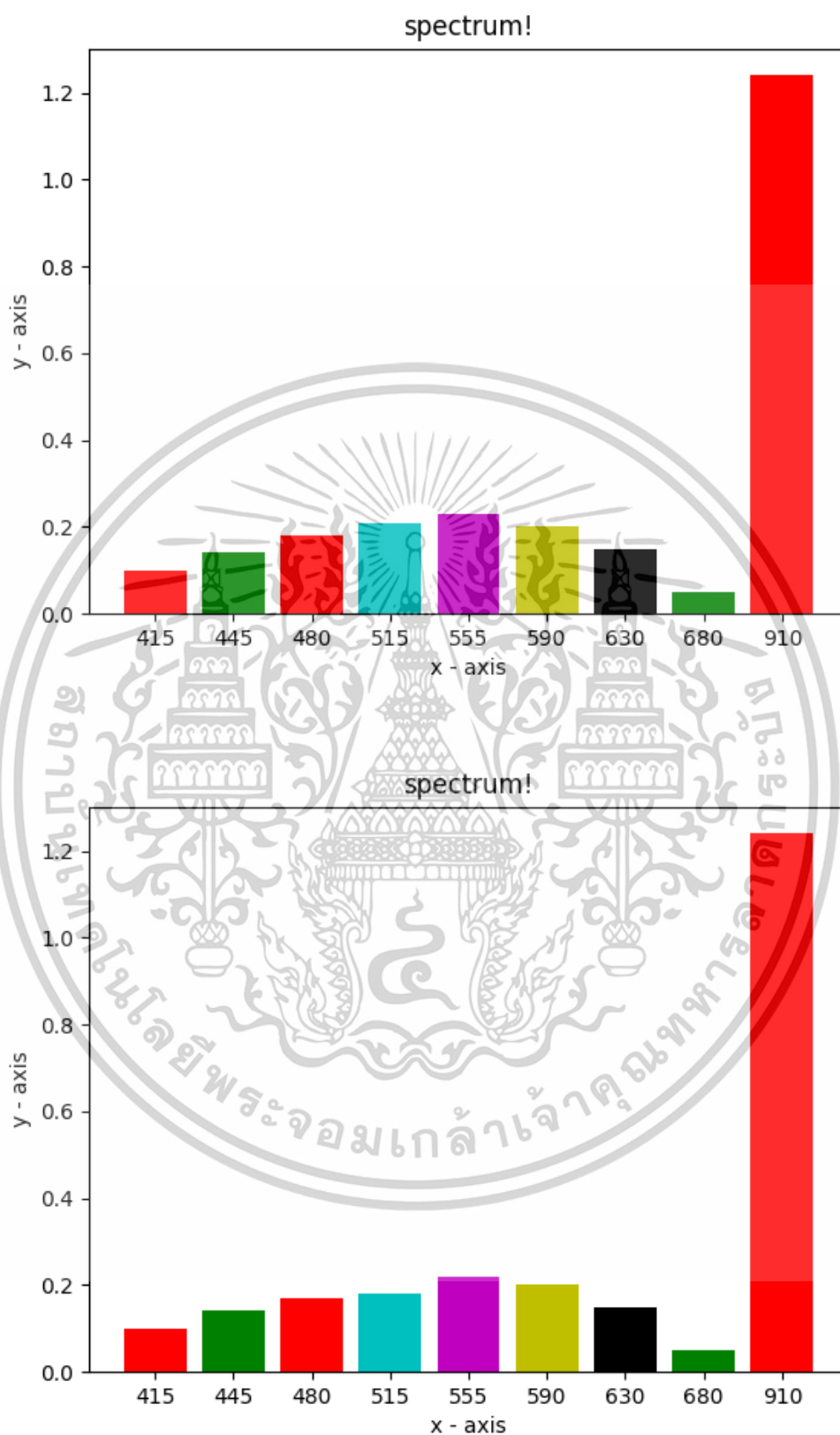
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 6.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและพิสัยนทรภาพสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.10	0.14	0.18	0.21	0.23	0.2	0.15	0.05	1.24	
500	50	50	0.10	0.14	0.17	0.18	0.22	0.2	0.15	0.05	1.24	

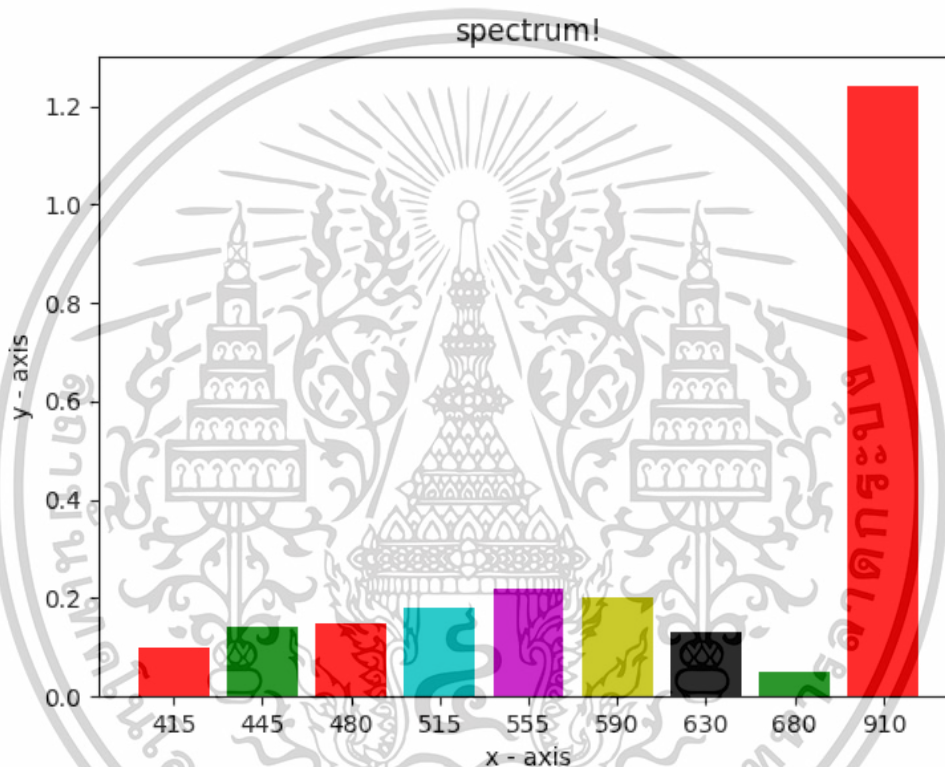
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



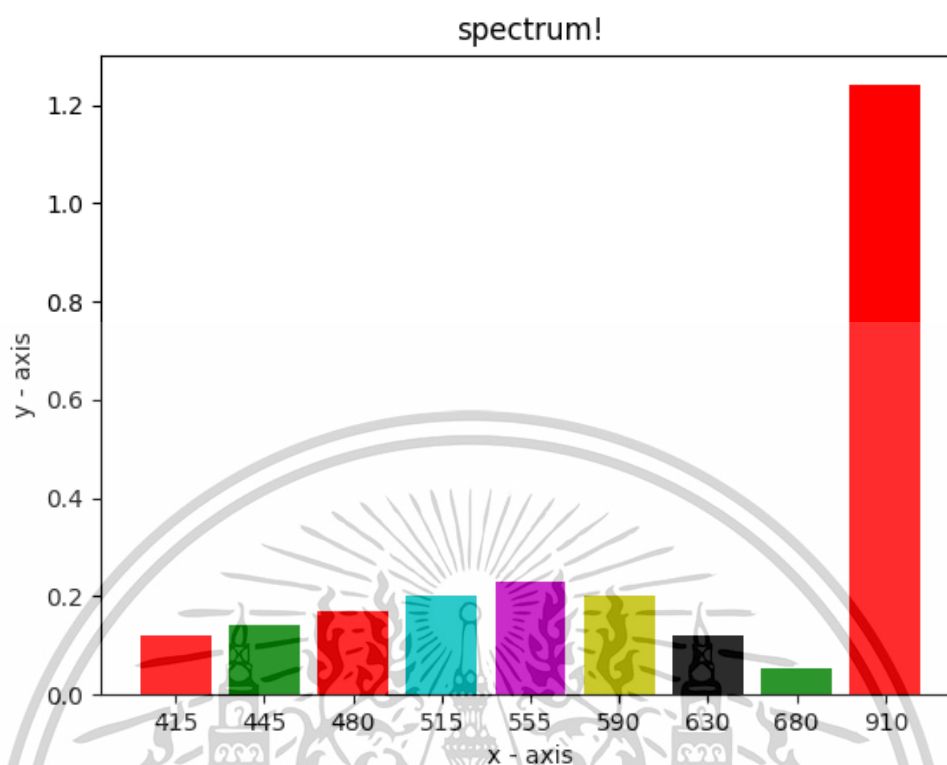
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.10	0.14	0.15	0.18	0.22	0.2	0.13	0.05	1.24	
500	100	50	0.12	0.14	0.17	0.2	0.23	0.2	0.12	0.055	1.24	



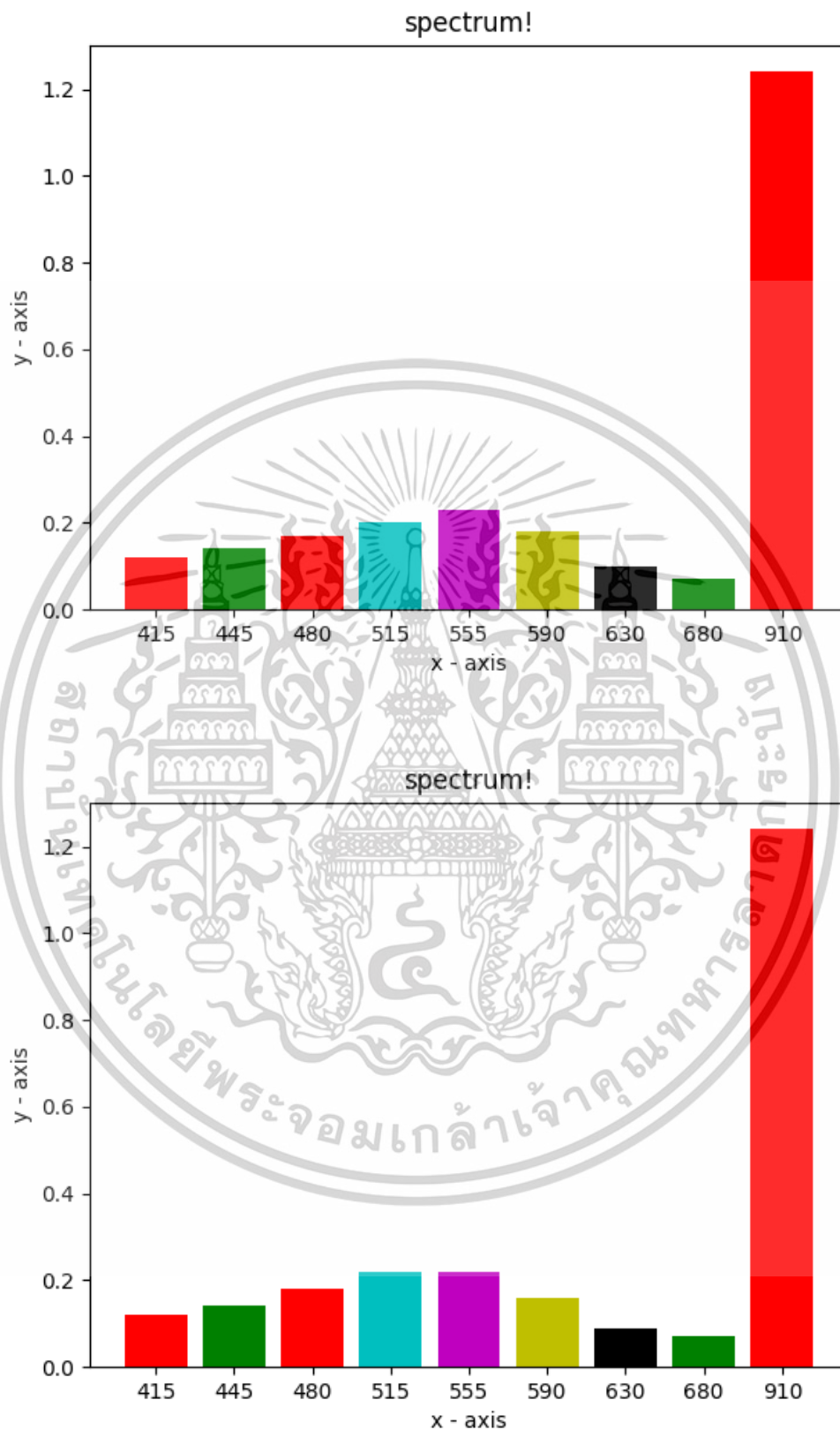
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 6.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.12	0.14	0.17	0.2	0.23	0.18	0.1	0.07	1.24	
1000	50	50	0.12	0.14	0.18	0.22	0.22	0.16	0.09	0.07	1.24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



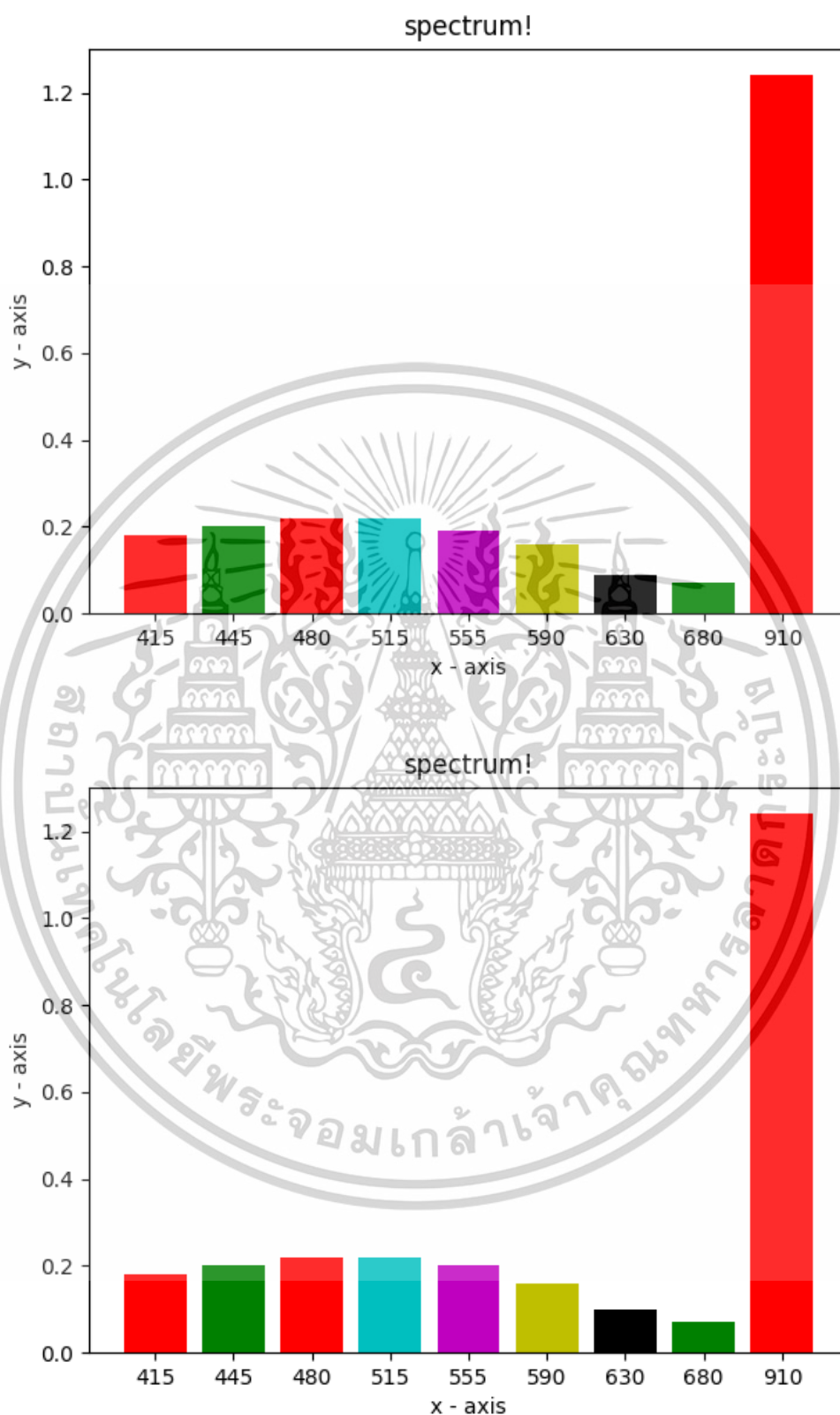
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.18	0.2	0.22	0.22	0.19	0.16	0.09	0.07	1.24	
1000	100	50	0.18	0.2	0.22	0.22	0.20	0.16	0.10	0.07	1.24	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

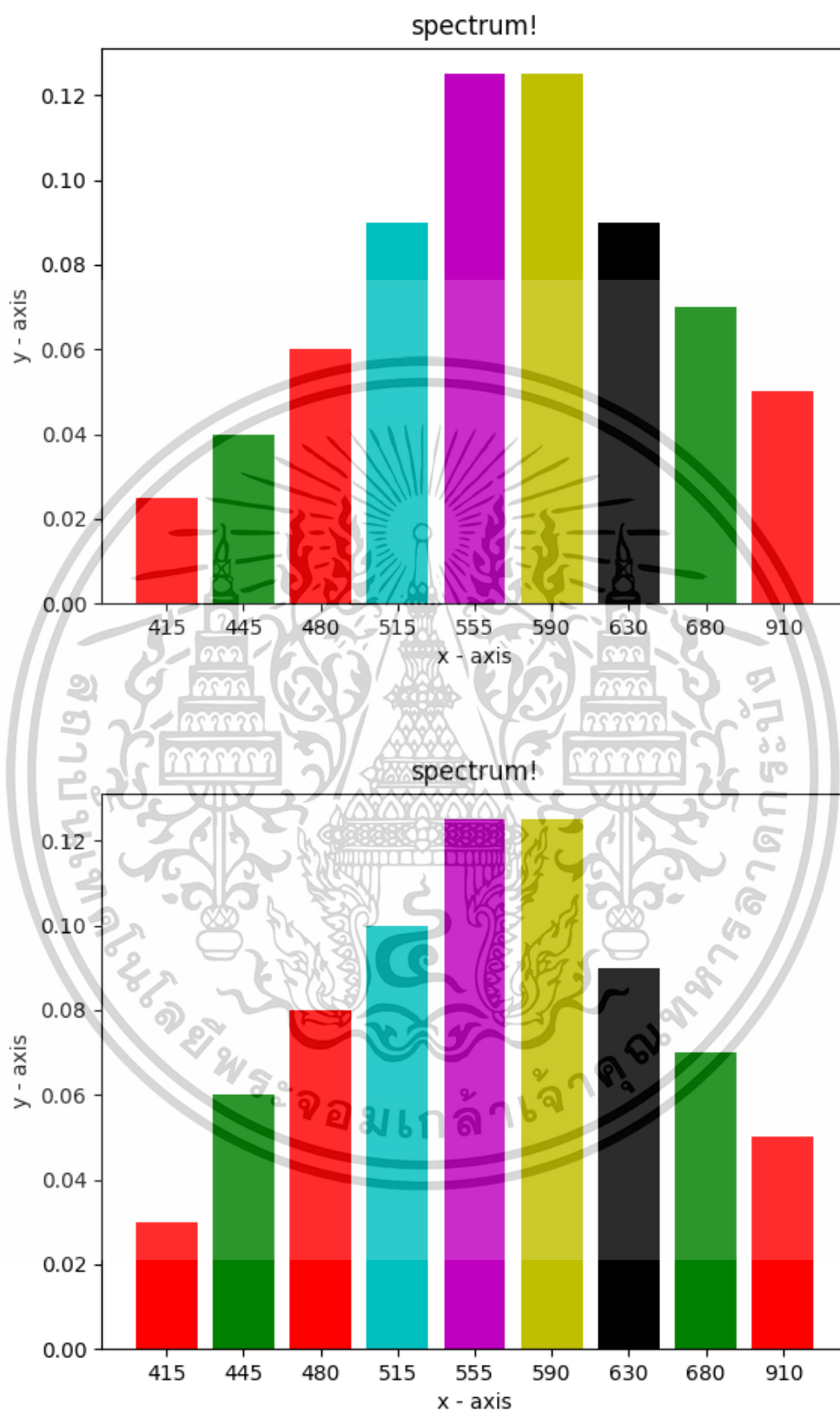
ตารางที่ 7.1 แสดงวิธีการวัดค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) จากเครื่องตรวจจับ และพิสัยจันทราสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

	KNO_3 (Potassium Nitrate)															
Weight g.	10								20							
Time ms.	500				1000				500				1000			
Frequency Hz.	50		100		50		100		50		100		50		100	
Gap mm.	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50
Status dark= 0 bright= 1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

ตารางที่ 7.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสัยจันทราสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.025	0.04	0.06	0.09	0.125	0.125	0.09	0.07	0.05	
500	50	50	0.03	0.06	0.08	0.1	0.125	0.125	0.09	0.07	0.05	

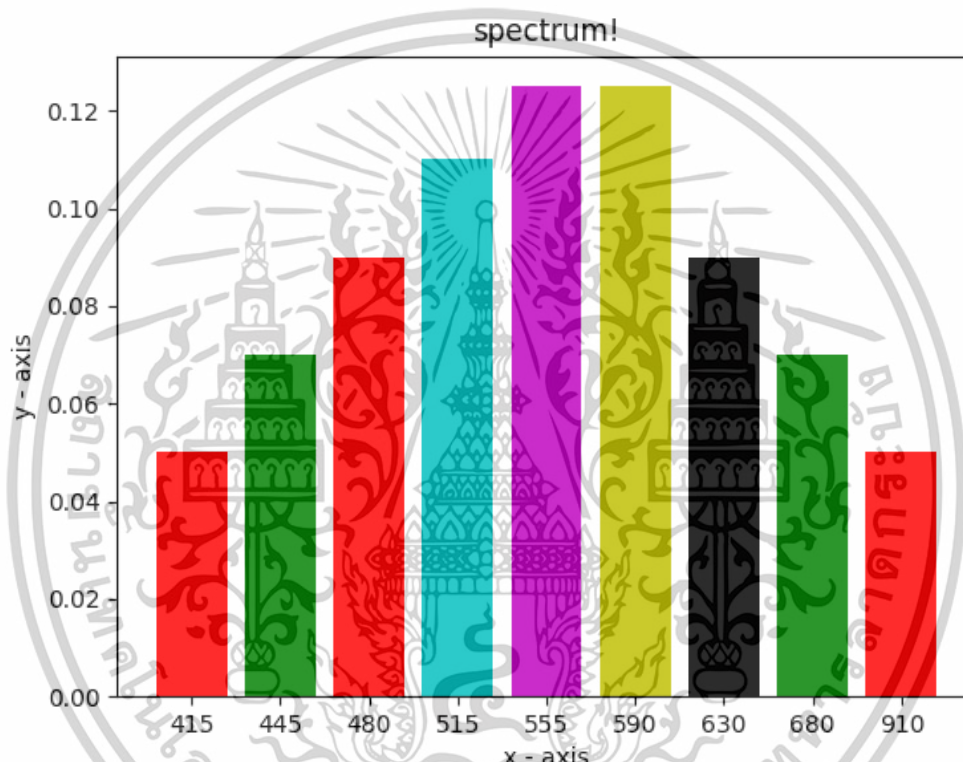
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



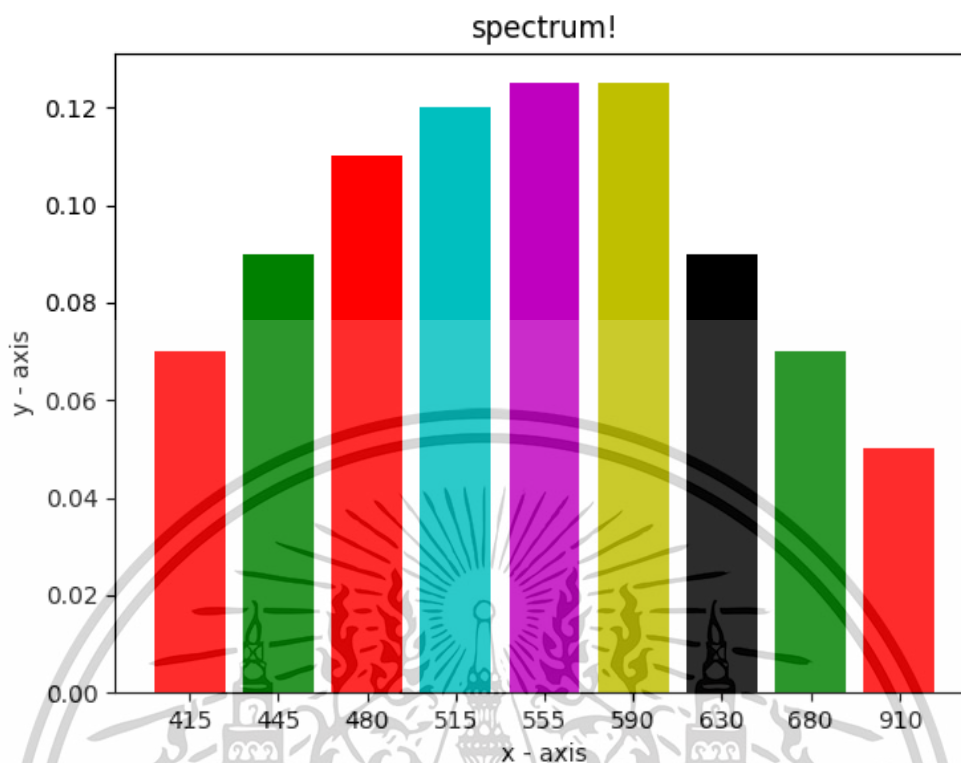
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.05	0.07	0.09	0.11	0.125	0.125	0.09	0.07	0.05	
500	100	50	0.07	0.09	0.11	0.12	0.125	0.125	0.09	0.07	0.05	



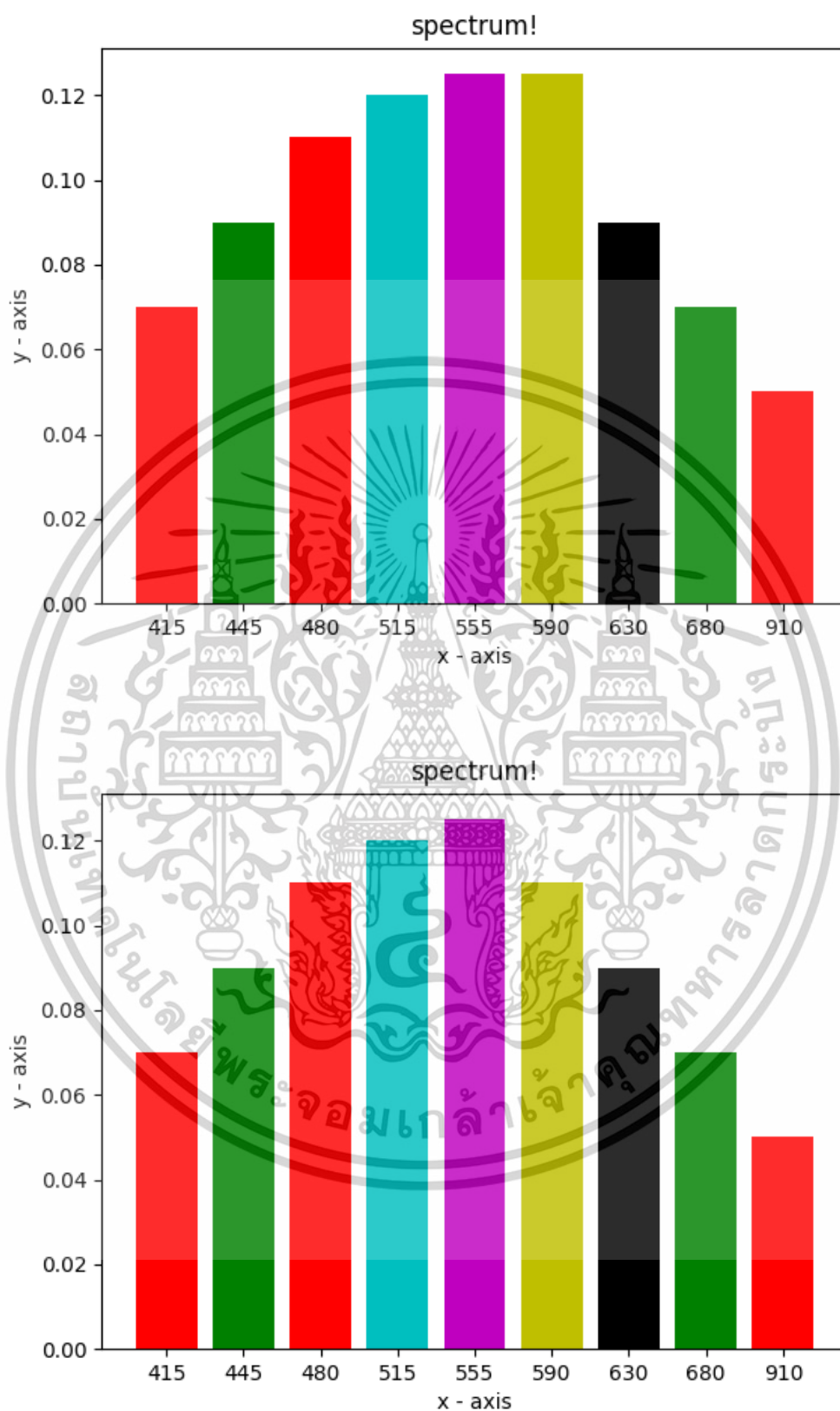
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 7.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO₃ (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.07	0.09	0.11	0.12	0.125	0.125	0.09	0.07	0.05	
1000	50	50	0.07	0.09	0.11	0.12	0.125	0.11	0.09	0.07	0.05	

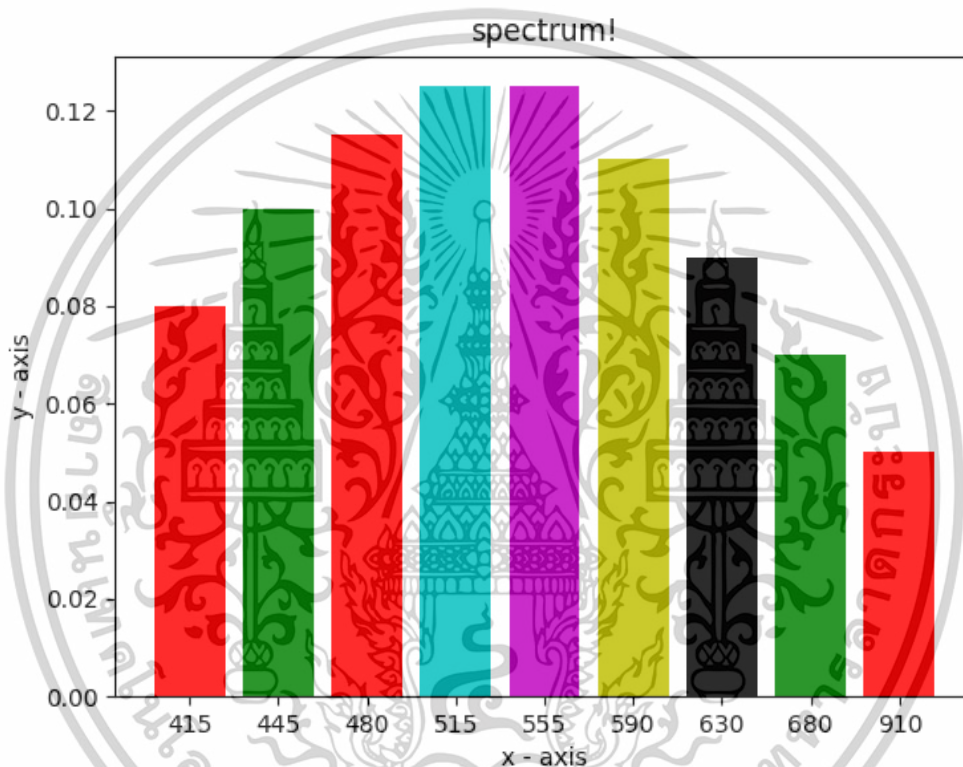
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



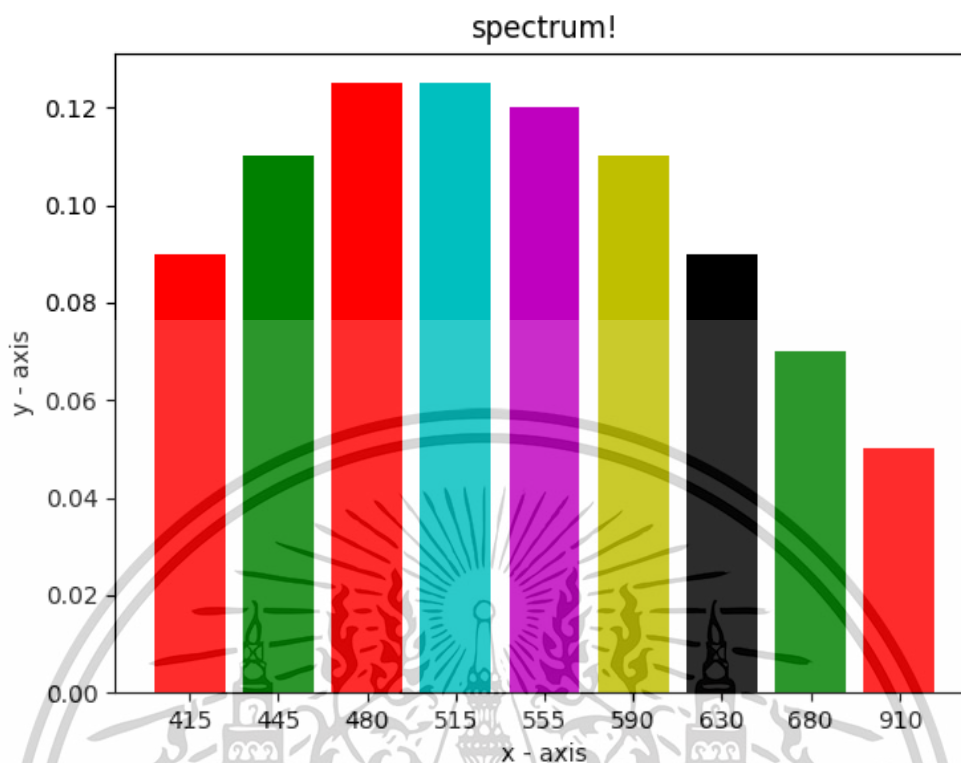
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.08	0.1	0.115	0.125	0.125	0.11	0.09	0.07	0.05	
1000	100	50	0.09	0.11	0.125	0.125	0.12	0.11	0.09	0.07	0.05	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 7.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	50	10	0.09	0.11	0.125	0.125	0.12	0.11	0.09	0.07	0.05	
500	50	50	0.095	0.115	0.125	0.125	0.115	0.10	0.08	0.065	0.05	

ตารางที่ 7.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
500	100	10	0.095	0.11	0.12	0.123	0.115	0.10	0.08	0.065	0.05	
500	100	50	0.08	0.11	0.12	0.123	0.115	0.10	0.08	0.065	0.05	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	50	10	0.09	0.11	0.12	0.123	0.115	0.10	0.08	0.05	0.05	
1000	50	50	0.08	0.1	0.12	0.123	0.115	0.10	0.08	0.06	0.05	

ตารางที่ 7.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

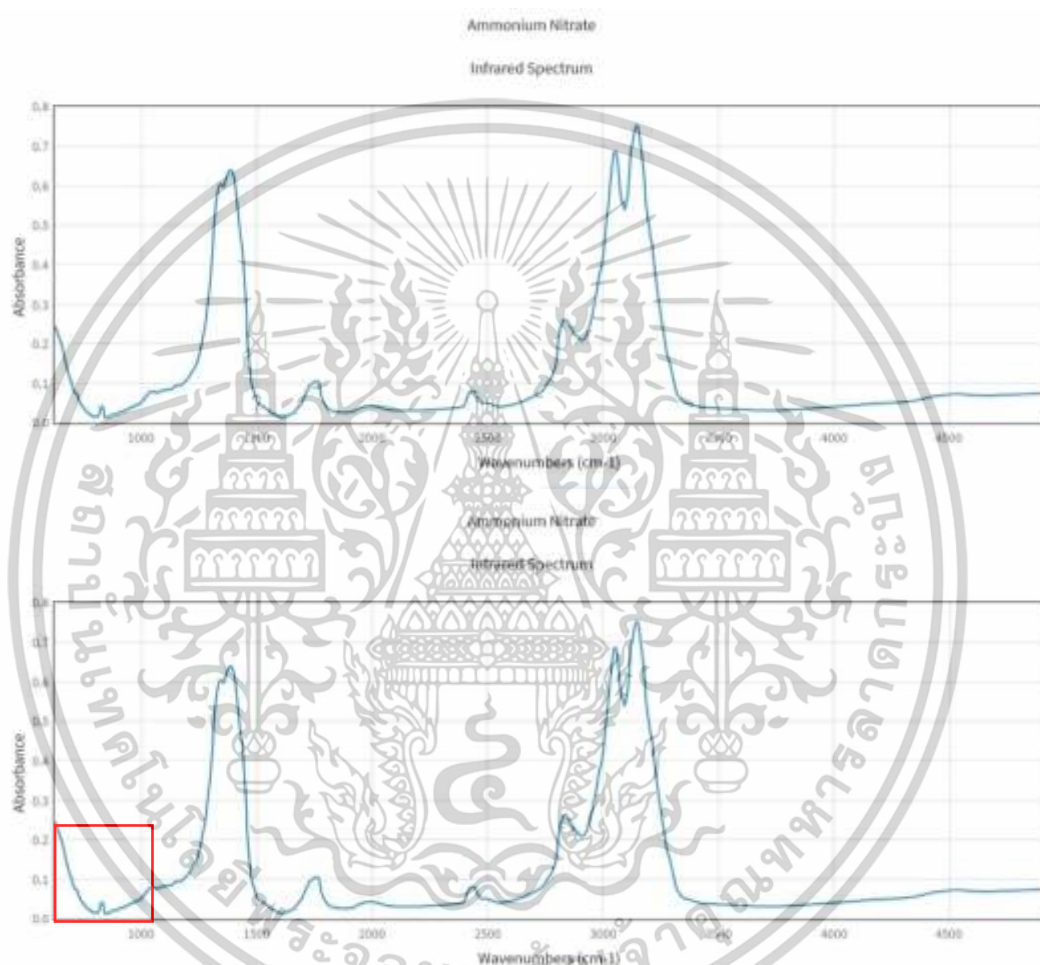
เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ระยะห่าง (mm)	415 nm	445 nm	480 nm	515 nm	555 nm	590 nm	630 nm	680 nm	910 nm	หมายเหตุ
1000	100	10	0.09	0.11	0.12	0.125	0.12	0.11	0.09	0.75	0.055	
1000	100	50	0.09	0.11	0.125	0.125	0.115	0.1	0.09	0.75	0.055	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

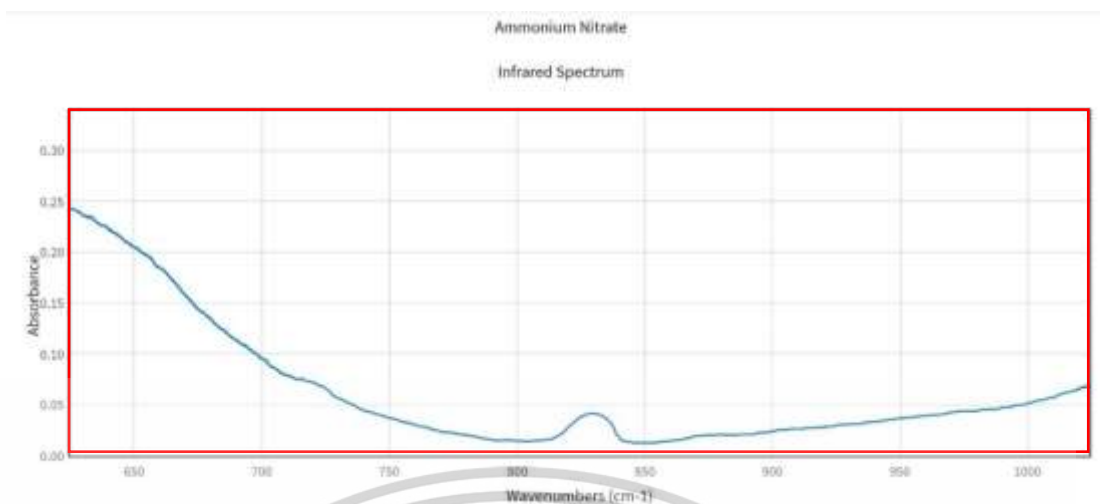
ภาคผนวก ข

ฐานข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

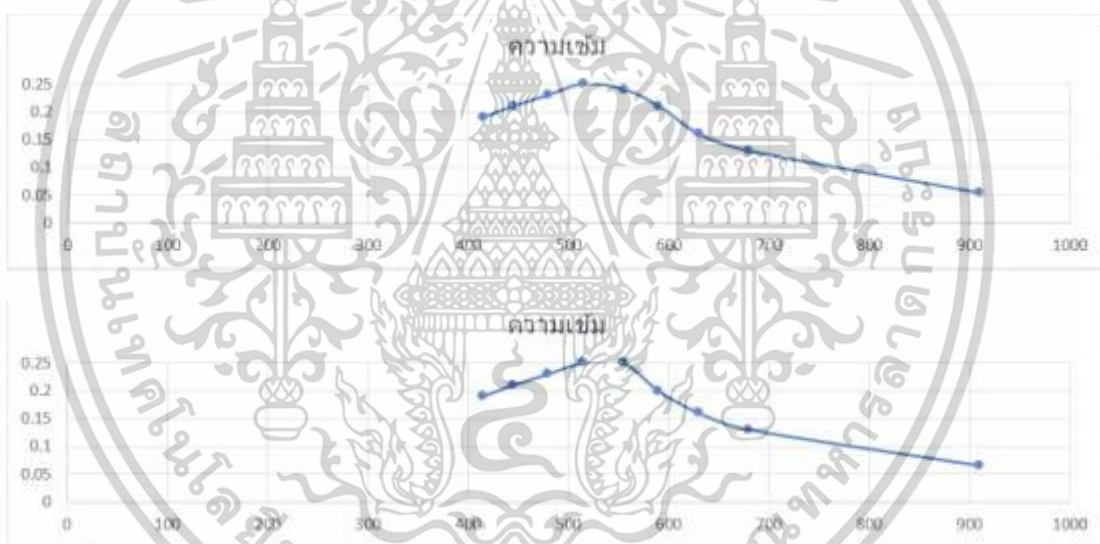
ตารางที่ 8 กราฟค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ของ The National Institute of Standards and Technology (NIST) [NIST Chemistry WebBook](https://www.nist.gov/srd/nistchemistry)



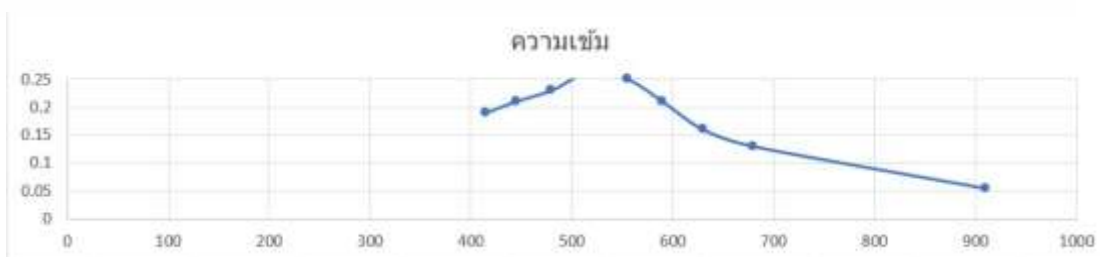
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



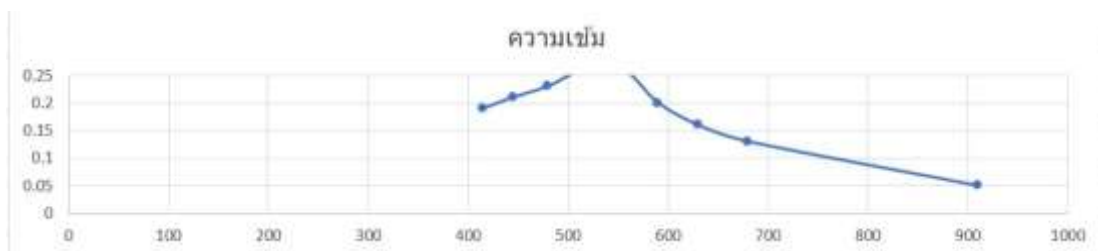
ตารางที่ 8.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสจันทรภาพสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



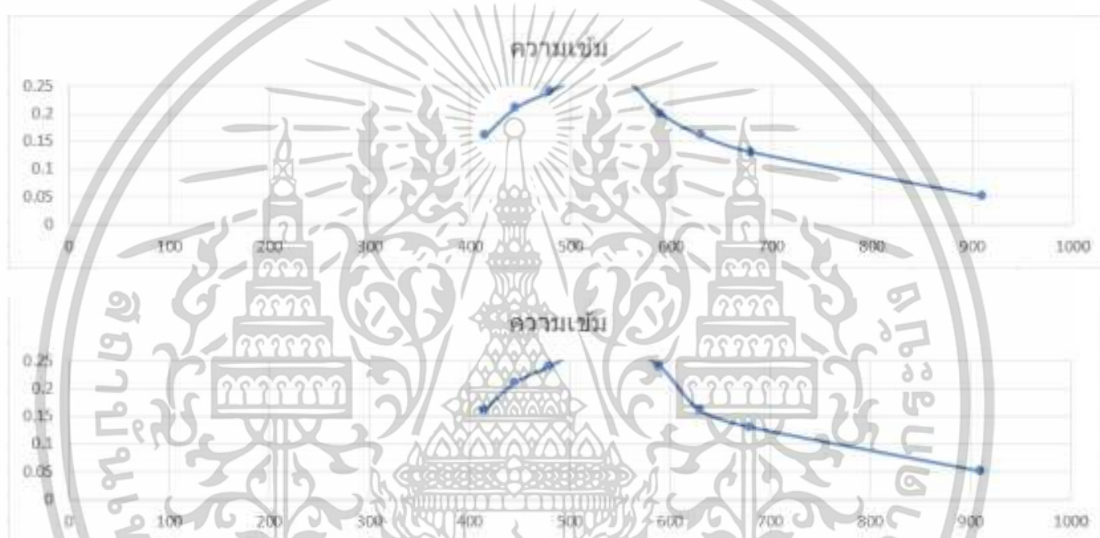
ตารางที่ 8.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสจันทรภาพสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



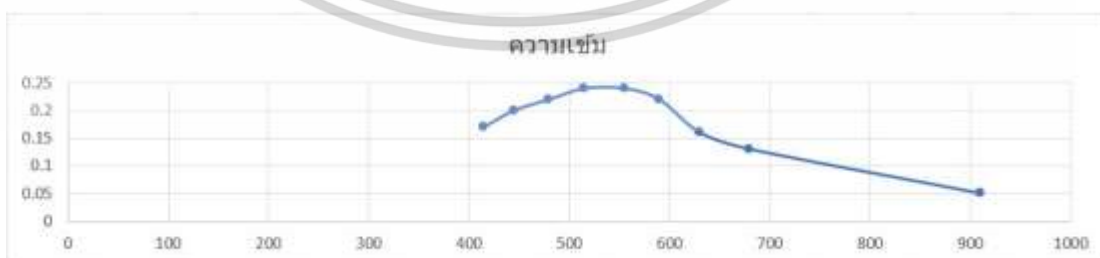
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



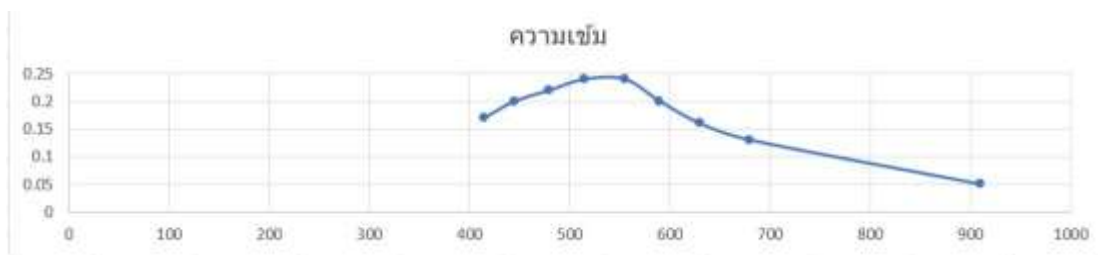
ตารางที่ 8.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



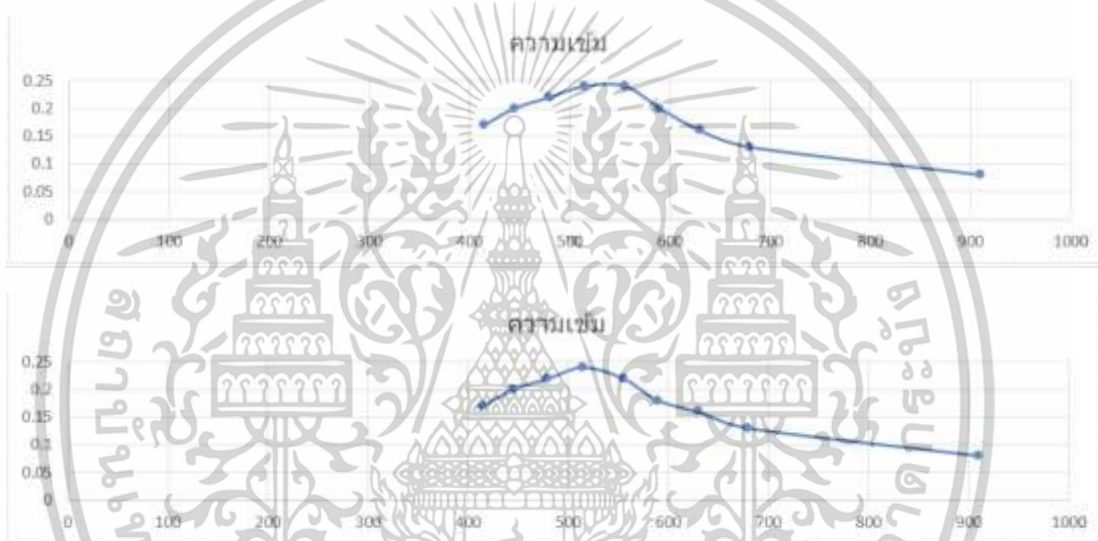
ตารางที่ 8.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



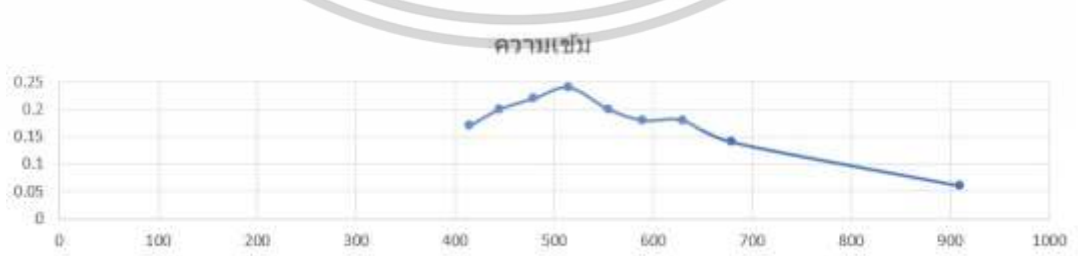
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



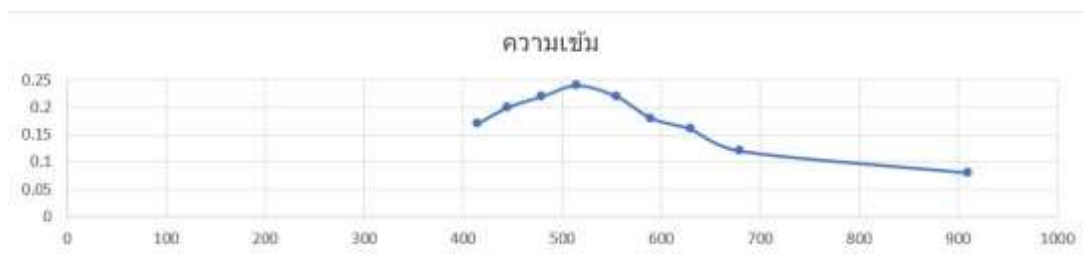
ตารางที่ 8.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานสปาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



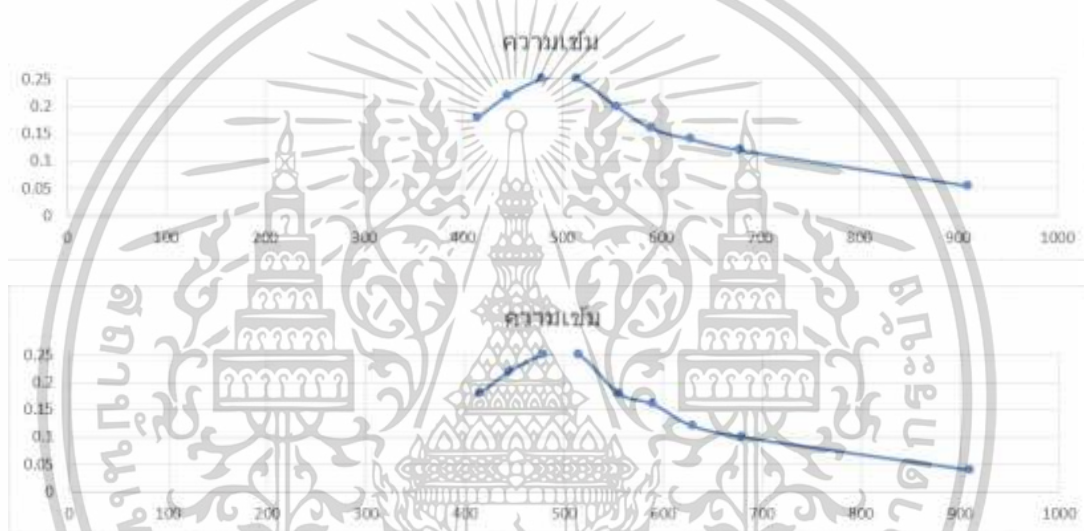
ตารางที่ 8.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานสปาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



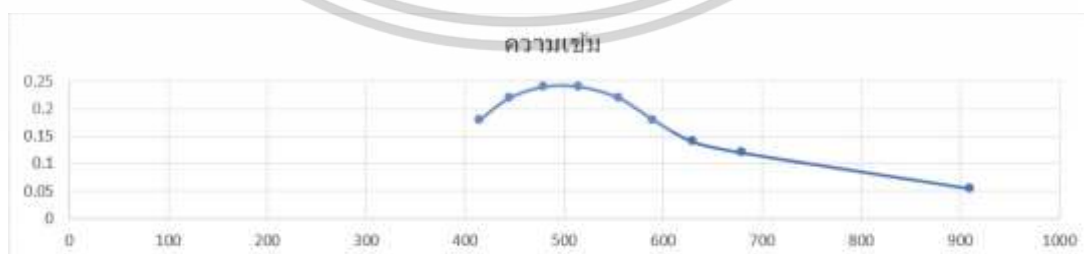
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



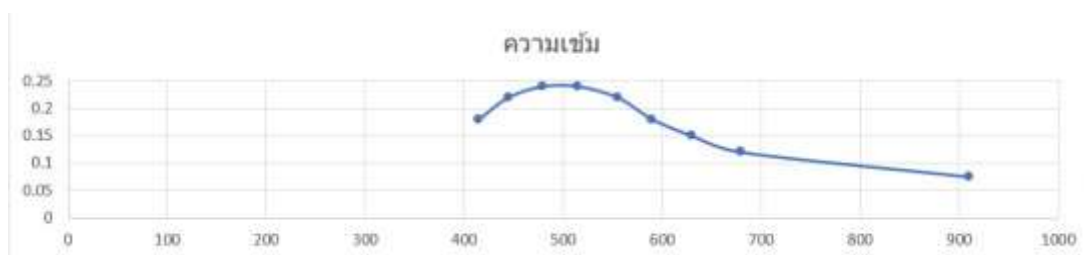
ตารางที่ 8.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



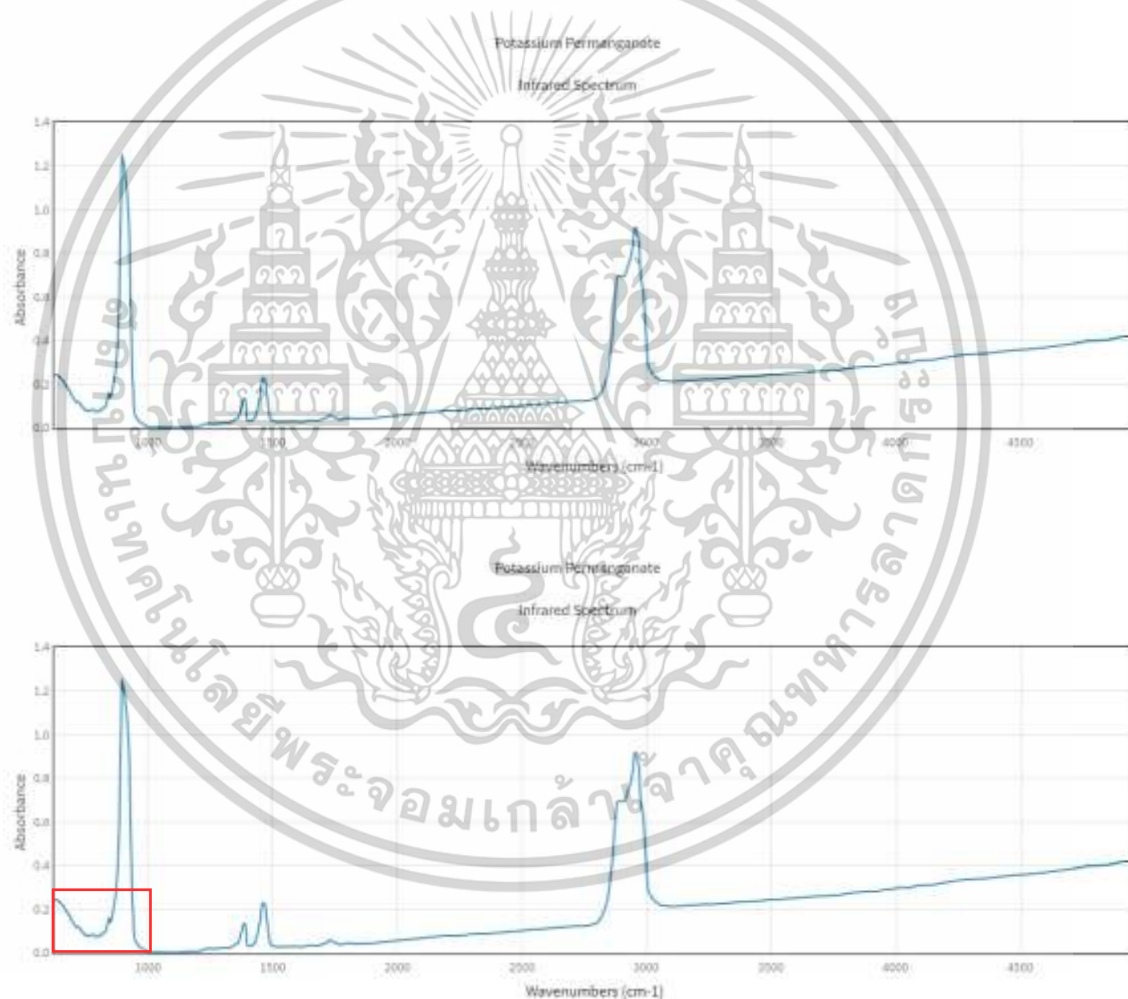
ตารางที่ 8.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ (Ammonium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



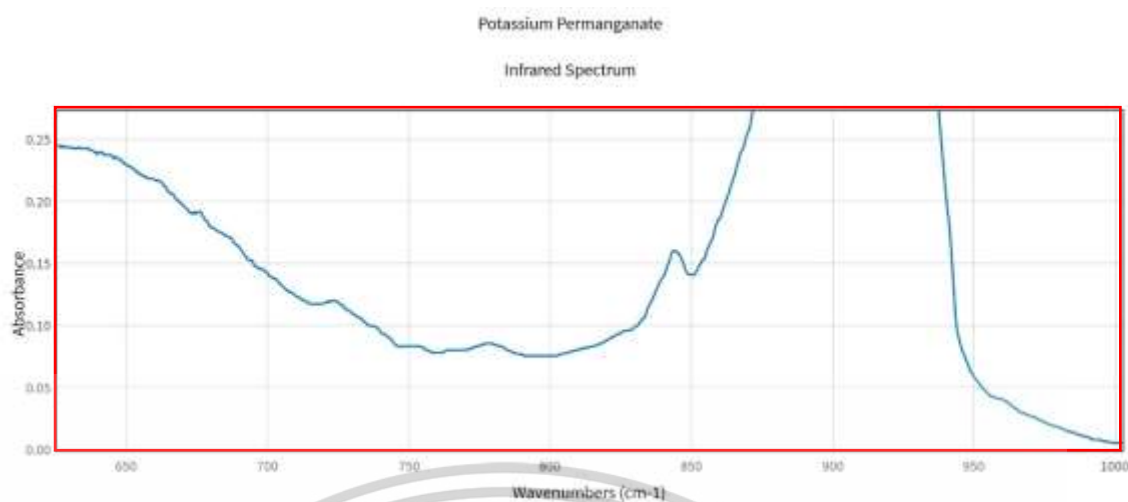
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



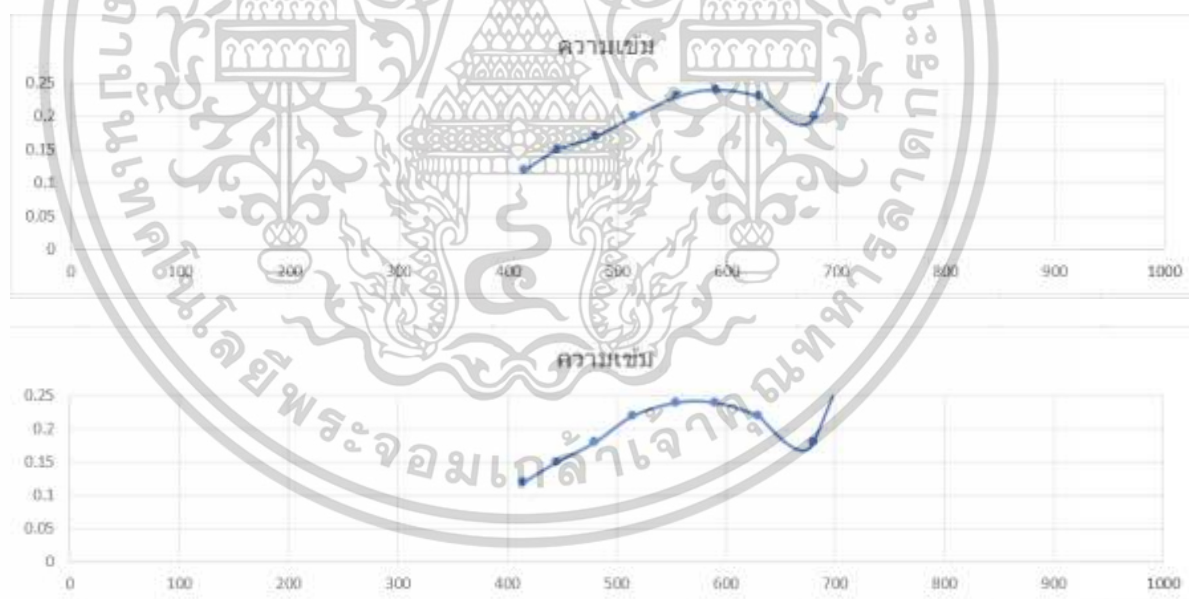
ตารางที่ 9 กราฟค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ของ The National Institute of Standards and Technology (NIST) [NIST Chemistry WebBook](https://www.nist.gov/pml/chemistry/comp/webbook)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

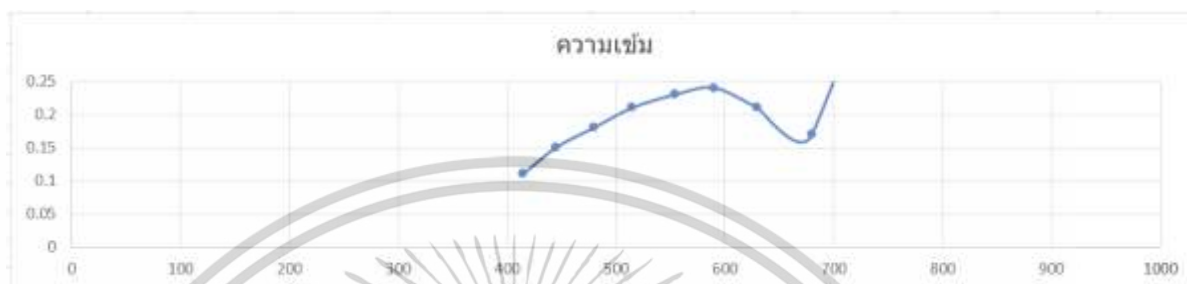
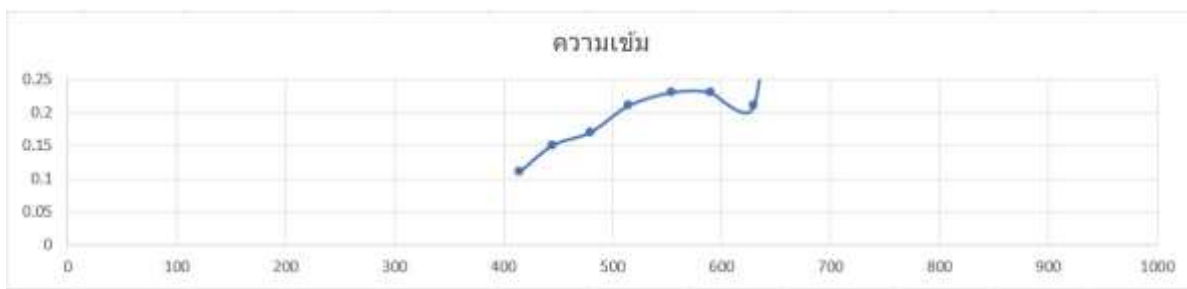


ตารางที่ 9.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

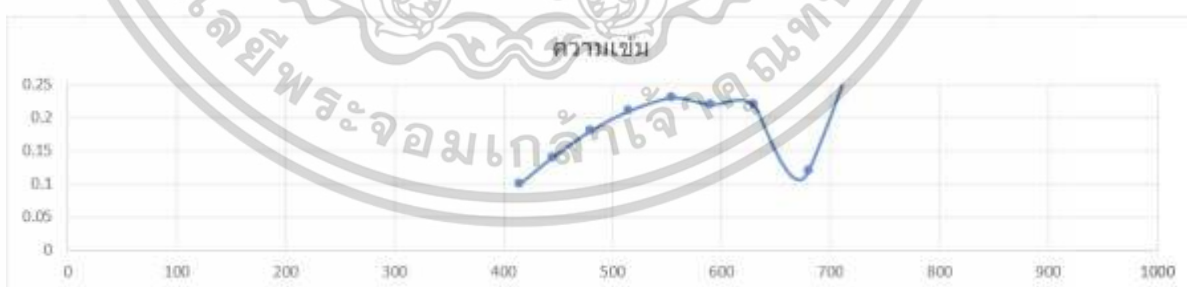
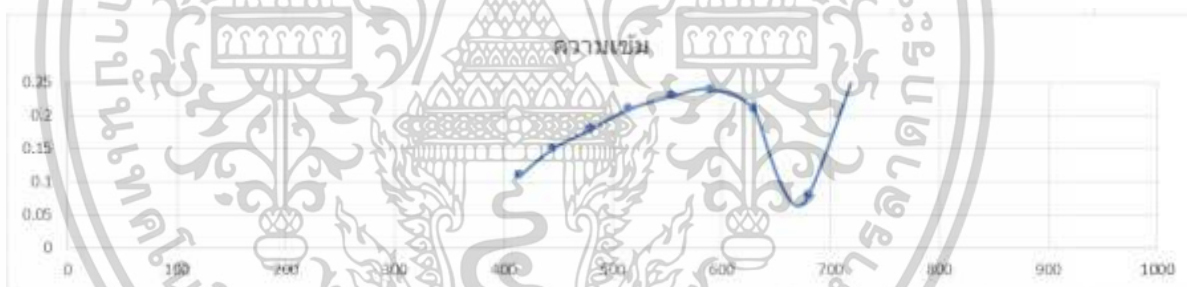


ตารางที่ 9.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

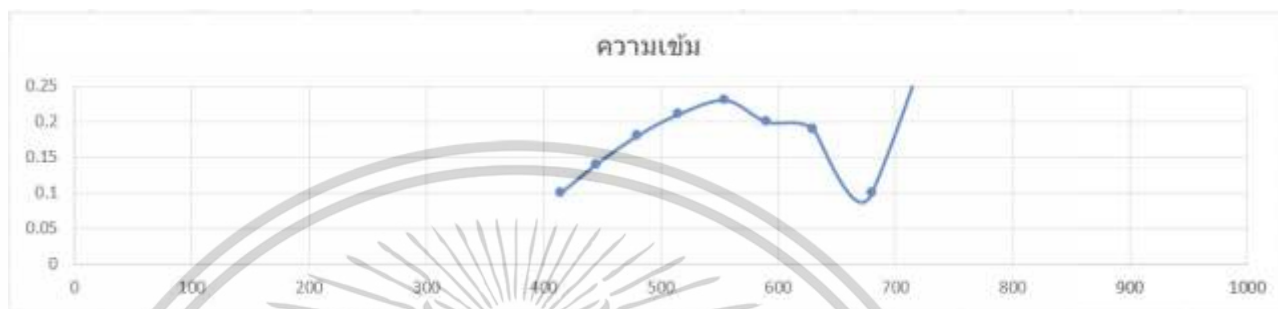
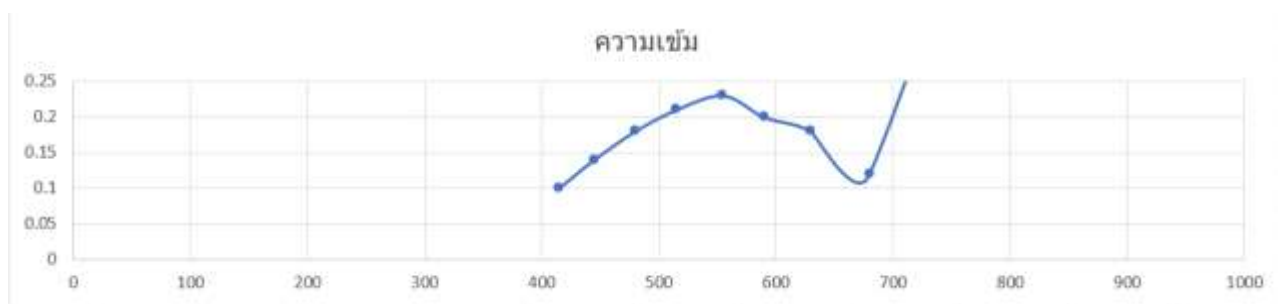


ตารางที่ 9.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

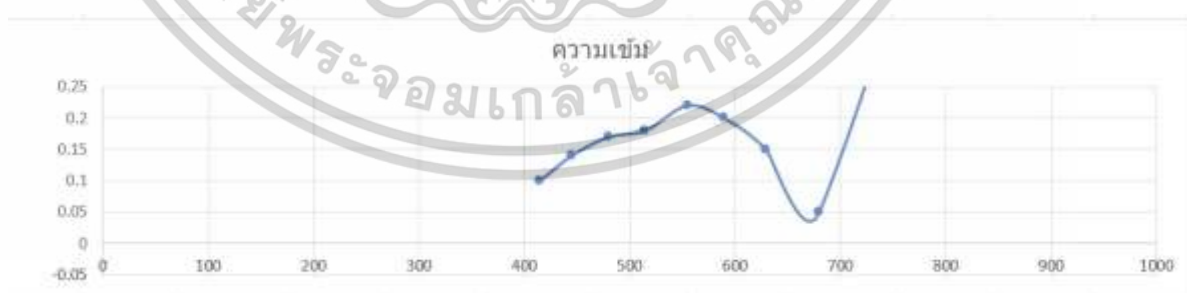
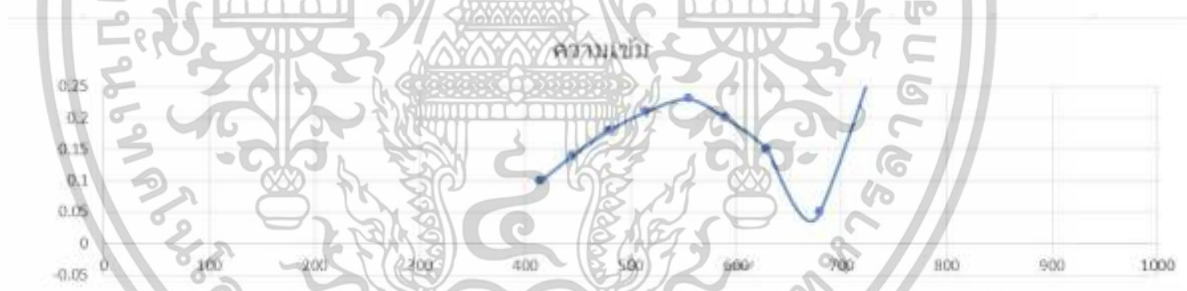


ตารางที่ 9.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

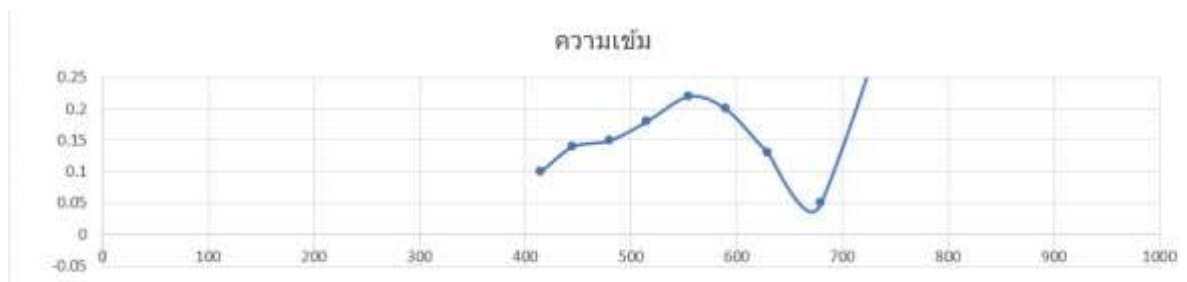


ตารางที่ 9.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

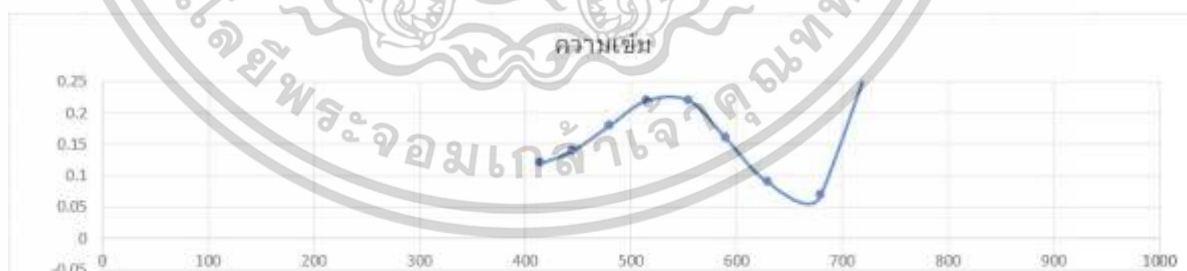
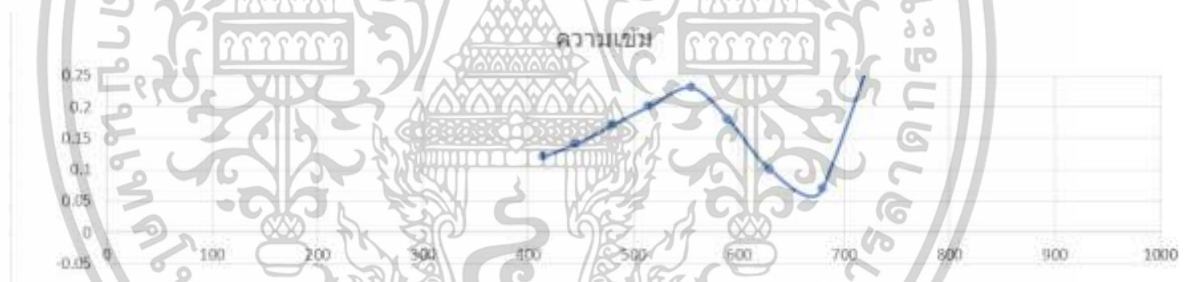


ตารางที่ 9.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

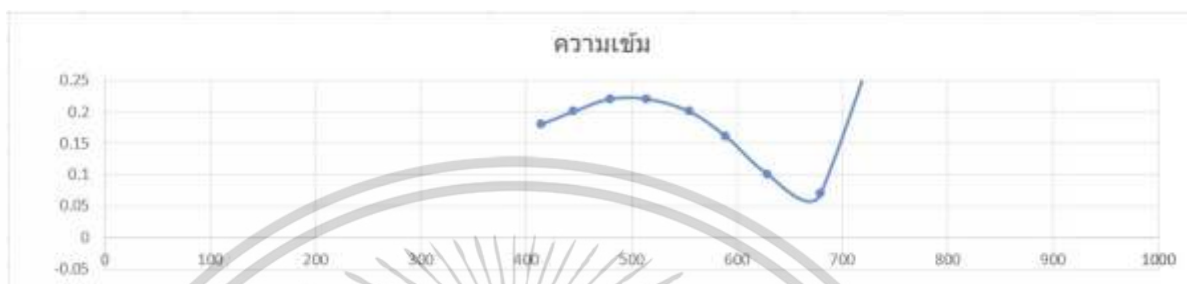
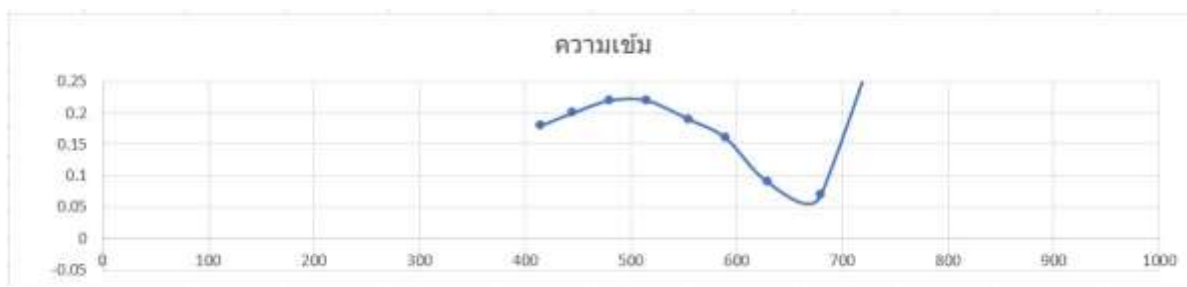


ตารางที่ 9.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

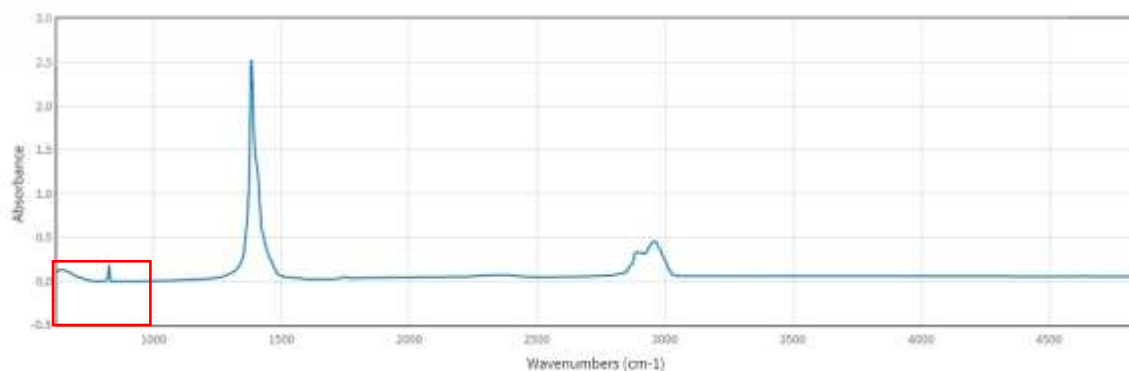


ตารางที่ 9.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร KMnO_4 (Potassium Permanganate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

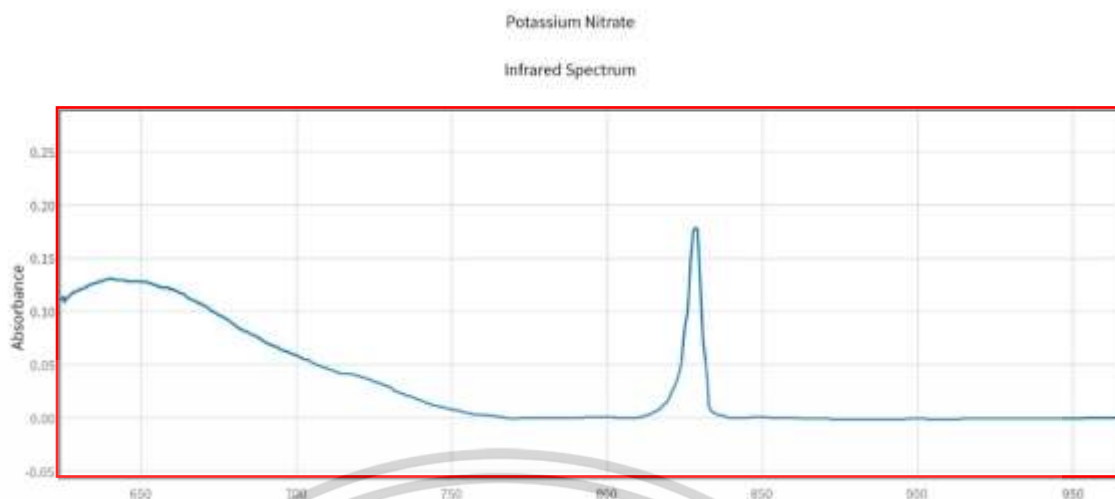
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



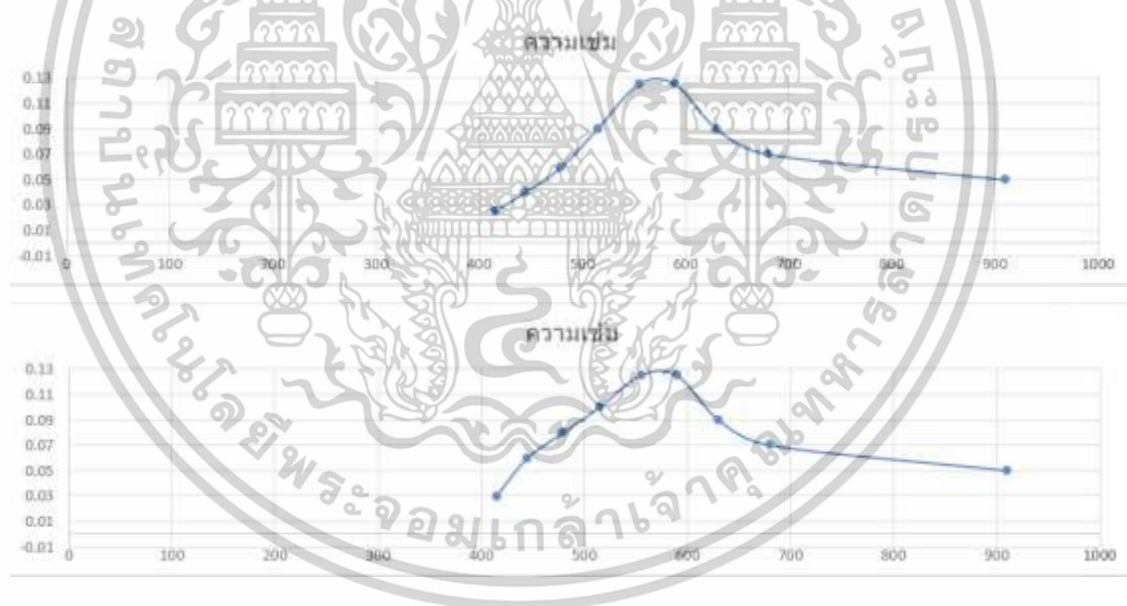
ตารางที่ 10 กราฟค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ของ The National Institute of Standards and Technology (NIST) [NIST Chemistry WebBook](https://www.nist.gov/srd/nistcsl)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

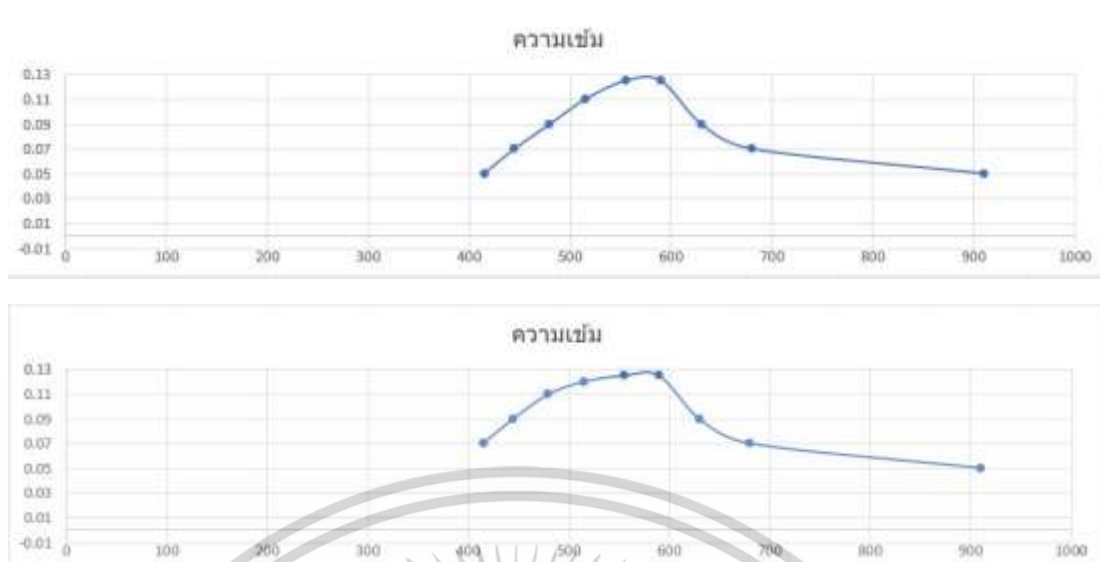


ตารางที่ 10.1.1 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

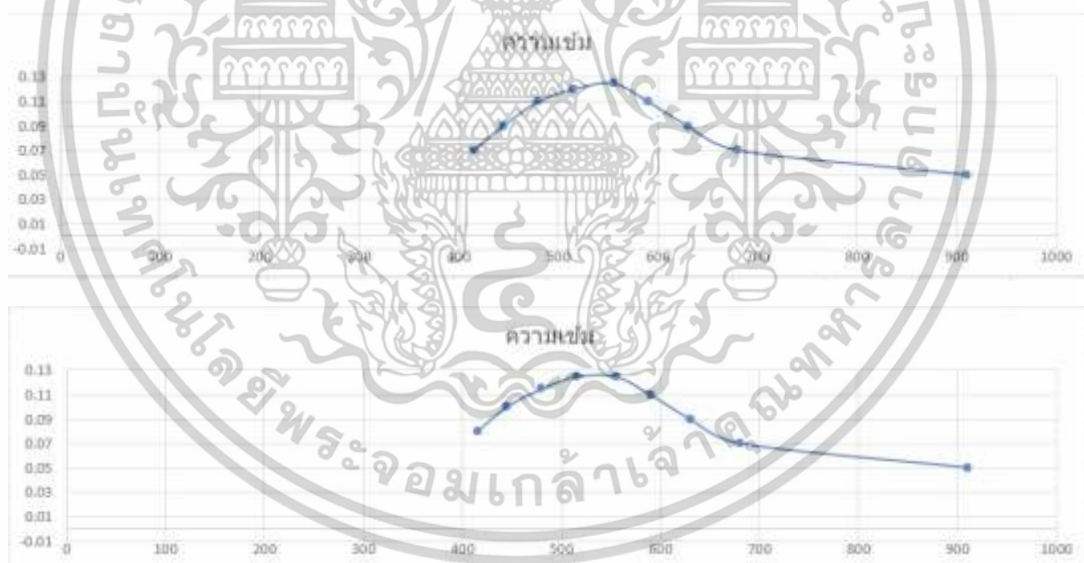


ตารางที่ 10.1.2 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

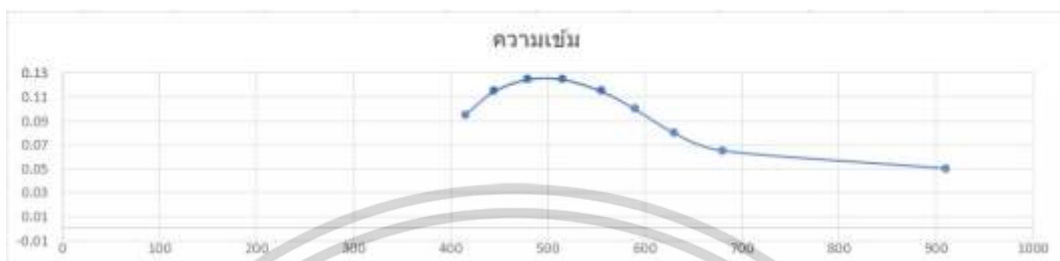
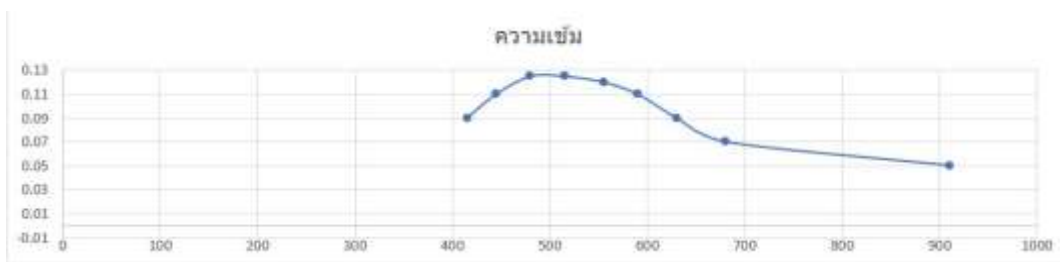


ตารางที่ 10.1.3 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO₃ (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



ตารางที่ 10.1.4 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO₃ (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 10 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

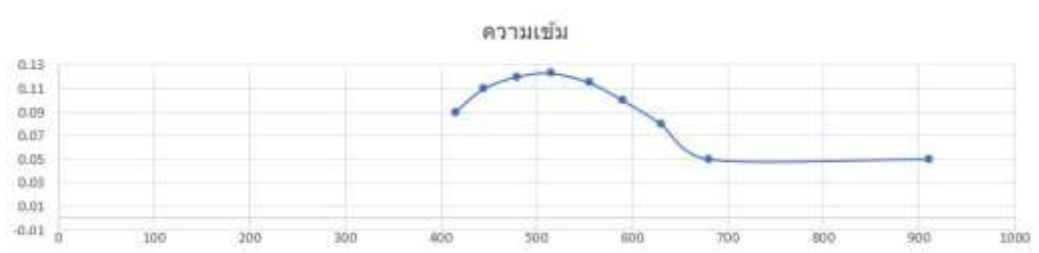


ตารางที่ 10.1.5 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm, จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

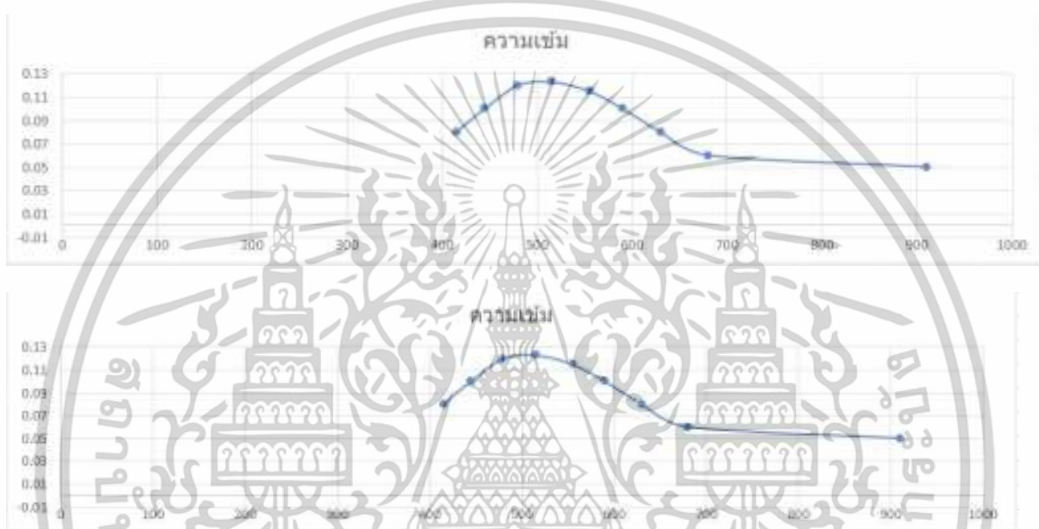


ตารางที่ 10.1.6 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

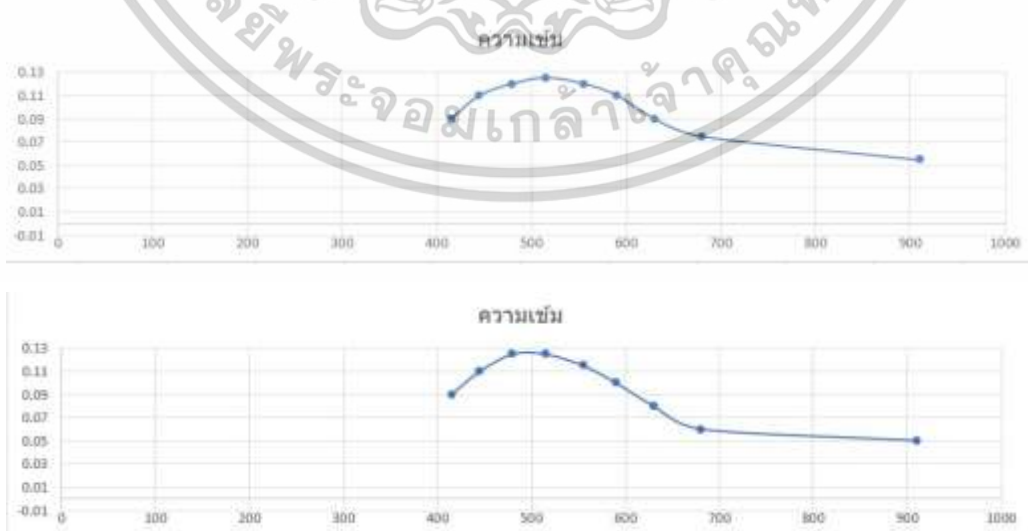
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 10.1.7 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 500 ms., ความถี่ 100 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



ตารางที่ 10.1.8 แสดงค่า Spectral ของสาร KNO_3 (Potassium Nitrate) ที่ปริมาณ 20 กรัม, เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 1000 ms., ความถี่ 50 Hz., ระยะห่างระหว่างสารกับเซนเซอร์ 10, 50 mm. จากเครื่องตรวจจับและฟิสิกส์ทรานซาร์ประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๖
The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

จัดการประชุมโดย
สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ระหว่างวันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566
 ณ โรงแรมดิว่านา พลาซ่า กระบี่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่

(PW) ไฟฟ้ากำลัง	(DS) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	(PE) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
(PH) ไฟโตอิเล็กทรอนิกส์	(CT) ระบบควบคุมและการวัด	(EL) อิเล็กทรอนิกส์
(CM) ไฟฟ้าสื่อสาร	(CP) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ	(RE) วิศวกรรมหุ่นยนต์
(BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์	(GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า	(HS) ระดับบัณฑิตศึกษา
(ETC) วิศวกรรมอื่นๆ		

สนับสนุนโดย

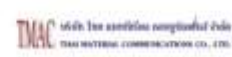











เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารบัญบทความ

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
	ไฟฟ้ากำลัง (PW)	
IPW-1	การประยุกต์ใช้งานอนวนซิลิคอนด้านวิศวกรรมไฟฟ้า	1
PW-1	การออกแบบและติดตั้งระบบการจัดเรียงการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดผลกระทบของการบังเงาบางส่วน	5
PW-2	การเปรียบเทียบการใช้ผลของเวลาที่มาถึงและผลต่างทางเวลาที่มาถึงสำหรับระบบระบุตำแหน่งพื้นที่ฟ้าผ่า	10
PW-3	การศึกษาพฤติกรรมการอัดและคายประจุที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อจ่ายค่าให้ไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	14
PW-4	ระบบการจัดการพลังงานในไมโครกริดโดยใช้การหาพื้นที่เหมาะสมด้วยแบบจำลองเป็นฐาน	18
PW-5	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งฟ้าผ่าด้วยเทคนิค TDoA	22
PW-6	การหาค่าระยะดับประจุแบตเตอรี่ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีปัญหาคู่ประติมากรรมโดยพิจารณาความถี่ของสัญญาณภายในแบตเตอรี่	26
PW-7	การประเมินผลกระทบของกำลังผลิตไฟฟ้าสำรองที่มีต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าของประเทศไทย	30
PW-8	การดัดแปลงวิธีการคำนวณโหลดด้วยค่าความไว้วางใจเพื่อใช้ประมาณค่าโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	34
PW-9	การออกแบบตัวแปลงไฟฟ้าสำหรับโครงการจัดสรรให้เหมาะสมกับการใช้ไฟฟ้าในปัจจุบัน	38
PW-10	การประเมินแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อความถี่สำหรับกริดพลังงานเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาตามมาตรฐาน ANSI/NEMA C29.11-2012 ด้วยระบบโครงข่ายประสาทเทียม	42
PW-11	Reactive Power Planning and Controlling in Active Distribution System	46
PW-12	การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดสำหรับการทดสอบโหลดแบบสุ่มน้ำขึ้นหัวข้อ Short Circuit Impedance and Load Loss	50
PW-13	การจำลองระบบเหนี่ยวนำภายใต้การไม่สมดุลด้วยโปรแกรมแฮสส์โปส	54
PW-14	การควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานของไมโครกริดที่มีแรงเสียดทานต่ำภายใต้การโจมตีแบบปฏิเสธการให้บริการ ด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบยืดหยุ่น	58
PW-15	การประเมินราคาและขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมกับโหลด	62
PW-16	ผลกระทบของการติดตั้งสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้า	66
	กรณีศึกษา : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	
PW-17	การวิเคราะห์เชิงการพึ่งพาของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดความเร็วต่ำ	70
PW-18	การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle ตามมาตรฐาน IEEE C57.104-2019 โดย MATLAB	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-19	การศึกษาและออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของระบบขนส่งทางรางด้วยระบบไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและลดการใช้ปล่อยคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อม	78
PW-20	การวางแผนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสงอาทิตย์	82
	ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)	
CM-1	การสาธิตการทดลองระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณด้วยความเข้ม และการตรวจจับแบบตรง ที่ใช้สองบิตแมมมัสระดับสำหรับไอ-แลน	86
CM-2	ระบบติดตามและระบุตำแหน่งแบบอัจฉริยะ	90
CM-3	การตรวจจับความเร็วรถไฟโดยอาศัยการสะท้อนของคลื่น	94
CM-4	การออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางรูปแบบไมโครสตรักเจอร์สำหรับใช้งานความถี่เอชเอฟ	98
CM-5	การวิเคราะห์การประวิงวิภาคและประวิงกลของไดรฟ์เฟดส์เซอร์	102
CM-6	การออกแบบสายอากาศคั่นหอชมบนตัวถังกว้าง	106
	อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	
PE-1	การเพิ่มแรงดันต้านออกของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโครงสร้างการขยายสูงแบบ ทบระยะตรงกันที่มีการต่ออนุกรมโมดูล	110
PE-2	การควบคุมแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับพลังงานทดแทน	114
PE-3	แบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะของการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังลดหรือถอนแรงดันไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้าแบบเครื่องปั่น เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพการรบกวนไปข้างหน้า	118
PE-4	การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์สายระดับชนิดคราดเคสเซอร์	112
PE-5	พฤติกรรมของการรบกวนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า	126
PE-6	ระบบแอคทีฟพาสส์กรองแอมป์แบบไดโอดเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	130
PE-7	การพัฒนาวงจรสมทวนของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบแหล่งจ่ายกระแสพัลส์เรโซแนนซ์ อัตราการขยายแรงดันทางต้านออกสูงระดับสูง	134
PE-8	การออกแบบวงจรแปลงผันแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเรโซแนนซ์แบบสวิตช์เดี่ยว สำหรับการจ่ายโวลต์พลังงานค่าเฉลี่ยของระบบขับเคลื่อน	138
PE-9	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบพหุ-พัลส์เรโซแนนซ์แบบกลิ้งที่มีอัตราส่วนการขยายแรงดัน เพิ่มขึ้นแบบโวลต์สำหรับใช้เป็นระบบพลังงานทดแทนไฟฟ้าแรงดันต่ำ	142
PE-10	การปรับยกตัววงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบพหุแรงดันที่มีอัตราขยายสูง สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกระแสตรงกำลังไฟฟ้าสูง	146
PE-11	วงจรจับหลอดแม่เหล็กโทรมินัสเซนต์ 12 โวลต์ ด้วยวงจรพหุ-พัลส์อินเวอร์เตอร์	150
PE-12	การออกแบบหน่วยการขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้าออกสำหรับวงจรขยายแรงดัน วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับพหุระดับแรงดันที่มีอัตราขยายสูง	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PE-13	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงในระบบพลังงานทดแทนแบบไฮบริดสำหรับสถานีอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็วในโหมดกระแสตรง	158
PE-14	การปรับปรุงวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กอ่อนตัวสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวร	162
PE-15	ระบบขับเคลื่อนกังหันพลังงานลึกลับที่ใช้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส	166
PE-16	การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้หลักการอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่คงที่	170
PE-17	ภาพรวมแบบสั้นของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงพหุ-พูลคอนเวอร์เตอร์ในการใช้เป็นวงจรส่วนหน้าสำหรับแหล่งพลังงานแรงดันต่ำ/กระแสสูงในเชิงพาณิชย์	174
PE-18	การออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบเครื่องแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ	178
PE-19	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสลับความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000	181
PE-20	การวิเคราะห์ความเสี่ยงเนื่องจากความร้อนของโมดูลไฮบริดกำลังในอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับเครื่องปรับอากาศ	185
PE-22	ค่าตัวต้านทานที่แนะนำสำหรับสมรรถนะสูงสุดของวงจรอินเวอร์เตอร์มอเตอร์	189
PE-23	คุณลักษณะแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการควบคุมความเร็วแบบวงปิด	193
PE-24	เครื่องชาร์จแบตเตอรี่พร้อมกระแสไฟชาร์จแบบแปรผันและการควบคุมกระแสแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ	197
ระบบควบคุมและการวัด (CT)		
CT-1	โมเดลทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับระบบขับเคลื่อน	201
CT-2	ระบบติดตามเป้าหมายเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับ	205
CT-3	การออกแบบตัวควบคุมเพื่อจัดการสมรรถนะสำหรับระบบสองความถี่ด้วยขั้นตอนวิธีเรขาคณิต	209
CT-4	การควบคุมอุณหภูมิของกาวนำไฟฟ้าด้วยการหาอุณหภูมิจุดแบบสลับแบบสลับที่อุณหภูมิควบคุม	213
CT-5	เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบการประกอบวงจรเบ็ดเสร็จเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี	217
CT-6	ระบบควบคุมความเร็วผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน	221
CT-7	วิธีเลือกสมการความผันแปรสำหรับเซมิคอนดักเตอร์ NTC	225
CT-8	การใช้งานซอฟต์แวร์แม่ข่ายในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมสำหรับตัวควบคุมเชิงตัวเลขโปรแกรมได้	229
CT-9	ตัวควบคุมที่อิงจากแบบจำลองการค้นพบแบบกลไกสำหรับการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	233
CT-10	การระบุเอกลักษณ์แบบจำลองด้วยตัวเก็บประจุของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเชิงควม	237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
	อิเล็กทรอนิกส์ (EL)	
EL-1	วงจรรากที่สองอย่างง่ายโดยใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป	241
EL-2	วงจรชนิดตัวเก็บประจุใหม่คละและที่ปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟและควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้โซลูชันเชิงพาณิชย์	245
EL-3	ระบบลดแรงดันขึ้นสูงพื้นฐานที่ปรับรูปแบบได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	249
EL-4	วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ LT1228 เพียงหนึ่งตัว	253
EL-5	หุ่นยนต์ต้นแบบที่ใช้หลักการระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่	257
EL-6	วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสที่ 2 โดยใช้หลักการของ วงจรขยายเครื่องมือวัดแบบสมมูลกระแส	261
EL-7	การพัฒนาชุดช่วยควบคุมการปลูกพืชไร้ดินในโรงเรือนแบบเปิด	265
EL-8	การออกแบบวงจรเซลล์ประสาทสำหรับเครือข่ายประสาทเชิงกล	269
EL-9	เครื่องเสริมสร้างสมรรถภาพ	273
EL-10	เครื่องมือทดสอบ	277
	คอมพิวเตอร์และเครือข่าย (CP)	
CP-1	การพัฒนากระบวนการเรียนรู้ด้วยเครื่องเพื่อทำนายและป้องกันไฟไหม้	282
CP-1	การประมวลผลข้อมูลจากเครื่องดนตรีทางแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับหุ่นยนต์ทางอัตโนมัติ	286
CP-2	การพัฒนากระบวนการเลือกตั้งผู้ดำรงตำแหน่งนักข่าวออนไลน์สำหรับวิทยาลัยและมหาวิทยาลัย	291
CP-3	การศึกษาการใช้พลังงานจากแสงไฟในอาคารสำนักงานประเภทสำนักงานพื้นที่	295
CP-4	การออกแบบและพัฒนาระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์แบบปรับตัวอย่างง่าย	299
CP-5	ตัวแบบพยากรณ์อัตราการส่งออกสินค้าของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมจากประเทศไทยไปยังภูมิภาคอาเซียน	303
CP-6	แอปพลิเคชันเพื่อการจัดการข้อมูลทรัพยากรดินป่าชายเลน	308
CP-7	การฝึกฝนประเภทการพยากรณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19	312
CP-8	เครื่องอ่านค่าตัวต้านทานที่เสถียรและแม่นยำในการประมวลผลภาพ	316
CP-9	การศึกษารูปแบบการพยากรณ์ระดับน้ำด้วยอัลกอริทึม ANN และ XGBoost กรณีศึกษา แม่น้ำป่าสัก	320
CP-10	แบบจำลองการพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับวางแผนต้นทุนในโรงงานผลิตเครื่องจักรแม่พิมพ์ของจังหวัดระยอง	324
CP-11	การพยากรณ์ผลผลิตข้าวนาปรัง ในพื้นที่ภาคกลางประเทศไทย ด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล	328

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CP-12	การศึกษากาการประยุกต์ใช้ Machine Learning และอินดิเคเตอร์ทางการเงิน EMA ในการทำนายการเคลื่อนไหวราคาทองคำในตลาด Forex	332
CP-13	การวิเคราะห์การออกกลางคันของนักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ระหว่างปีการศึกษา 2561-2564 โดยใช้เทคนิควิธีการทำเหมืองข้อมูล	336
CP-14	Development of Heart Rate and Blood Oxygen Monitoring Using IoT	340
CP-15	Lift Me Please, Smart Elevator Development Using IoT	344
CP-16	Pum Puang Truck Mobile App for Supermarket Pickup Truck	348
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)		
DS-1	การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 สำหรับรถไฟฟ้าไร้คนขับ	353
DS-1	การค้นหาลักษณะการหมุนของวัตถุด้วยการสะสมข้อมูลจากเซนเซอร์พอร์มโดเมน	357
DS-2	การวิเคราะห์สมรรถนะวงจรกรองนอกระบบอัตโนมัติแบบปรับตัว โดยพิจารณาจากฟังก์ชันผิดพลาด กำจัดสองเฉลี่ย	361
DS-3	ตัวกรองปรับตัวแบบแอดแอดพทีฟสำหรับระบบควบคุมด้วยอัลกอริทึมแอดแอดพทีฟเกรเดียนต์	365
DS-4	ตัวกรองปรับตัวแบบสไปนด้วยอัลกอริทึมการไล่เลียงน้อยที่สุดแบบบรรทัดฐาน	369
DS-5	การปรับปรุงระบบกำจัดเสียงรบกวนสำหรับระบบเสียงสองทางแบบดิจิทัล	373
DS-6	The Relative Potency Evaluation of The Noise Concealing Algorithm Found on DTBEM on RVIN	377
DS-7	An Extreme Resolution Reconstruction Found on a Myriad Statistic Estimation Multi-Frame SR and A Single Image SR	381
ไฟฟ้กำลัง (PH)		
PH-1	เส้นเซอร์เลนโซนาแสง	385
PH-1	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบกระจายด้วยเส้นใยนำแสง	389
PH-2	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการลำเลียงจาก IM-DD ที่สปีดเบต 4 และ 8 ระดับ ร่วมกับกลไกของสัญญาณทางแสงที่มีความดีสำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงส่วนหน้าของโหนด	393
วิศวกรรมพลังงาน (RE)		
RE-1	ซิลิคอนไดออกไซด์ในเมทริกซ์โพลีเมอร์สำหรับอุปกรณ์เป็นขั้วเคลือบแสงบนเซลล์แสงอาทิตย์	397
RE-1	A preference-based matching mechanism for participants in peer-to-peer energy market	401
RE-2	ผลของอุณหภูมิแวดล้อมกับพื่นผิวนำไฟฟ้าที่มีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองหน้า	405
RE-3	Prediction of Solar Cell Energy Production Using Machine Learning	409
RE-4	เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานลมโดยใช้สายพาน Wind Belt Energy Harvester	413

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
RE-5	การวิเคราะห์สมรรถนะและการสูญเสียทางอุณหภูมิการทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษาพื้นที่กรุงเทพมหานคร	417
RE-6	การทดสอบประสิทธิภาพและตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	421
RE-7	เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพกพา	425
RE-9	การประยุกต์ใช้ป้ายโฆษณาอิเล็กทรอนิกส์ยังอยู่จะทำงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานผสมผสานในระบบนาโนกริด	429
RE-10	การเปรียบเทียบระหว่างวิธีเทียบสัดส่วนขณะแรงดันเปิดวงจรและวิธีการรบกวน และสังเกตสำหรับการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์	433
RE-11	Battery Charger in a Hybrid	437
RE-12	ผลกระทบของจำนวนใบพัดกังหันลมแกนแนวตั้งต่อสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้า	441
RE-13	การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีการประมาณค่าสถานะ ร่วมกับวิธีการรบกวนและสังเกต	445
RE-14	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าโซลาร์เซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน สำหรับบ้านพักอาศัยในปี 2566	449
RE-15	การผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ	453
RE-16	การออกแบบระบบการเพิ่มออกซิเจนอัตโนมัติของพลังงานแสงอาทิตย์	457
RE-17	การฟื้นฟูแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์	462
วิศวกรรมชีวการแพทย์ (SE)		
IBE-1	ระบบรักษาโรคหลอดเลือดสมองแบบพกพาเคลื่อนที่ระยะไกล MSU-SOS	466
BE-1	BreathSmart Pro+ นวัตกรรมเครื่องตรวจสมรรถภาพและบริหารปอด พร้อมกับหน่วยวัดความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด (SpO2) สำหรับการฟื้นฟูหลังจาก Covid-19	471
BE-3	ระบบสนับสนุนการประเมินความเสี่ยงจากการหกล้มด้วยอินเทอร์เนตประสานสรรพสิ่ง และไดนามิกใหม่อย่าง	475
วิศวกรรมเครื่องกล (SE)		
ST-1	การพัฒนาโครงข่ายตรวจจับขยะชายฝั่งทะเลด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์และเทคโนโลยี 5G	479
ST-2	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการปลูกเรซินด้วยระบบอัตโนมัติ	483
ST-3	AI in Home Security: The Potential of Sound and Facial Recognition AI	487
ST-4	อุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมเครื่องกำเนิดไอโซนิจทางเคมีอย่างชาญฉลาดบนเทคโนโลยี IoT	491
ST-5	ระบบตรวจสอบเทียบเคียงแบบเลือกการเรียนรู้ระบบประมวลผลภาพ	496
ST-6	ระบบเฝ้าติดตามสภาพแวดล้อมและการให้น้ำสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม	501
ST-7	ระบบติดตามและรายงานตำแหน่งรถโดยสารภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	505
ST-8	ระบบติดตามสถานะการให้น้ำเกลือแบบไร้สาย	509

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ST-9	รถนำทางอัตโนมัติด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก	513
ST-11	เครือข่ายเซ็นเซอร์เฝ้าติดตามมลพิษทางอากาศกรณีศึกษาในวัดบางช้างเหนือ	517
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)	
GN-1	การศึกษาเบื้องต้นและการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของการอบแห้งพริกแดงจินดา ในต้นแบบโรงเรือนแบบพืชมืดและโรงเรือนแบบอุโมงค์กับพลังงานรังสีอาทิตย์	521
GN-2	อิทธิพลของโครมาติสสารรูปแบบมีอนวนคั่นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ากะหล่ำปลีแดง	524
GN-3	การพัฒนาวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่มีการสวิตช์แบบนุ่มนวล	529
GN-4	ระบบควบคุมและแสดงค่าพลังงานของมอเตอร์บีบน้ำด้วย IOT	533
GN-5	การออกแบบเครื่องกำเนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสร้างกระแสในแม่เหล็กของถาวรเครื่องปั่นจักรยาน YMCA Cycle Ergometer	537
GN-6	การปรับปรุงวิธีการตรวจวัดแรงเสียดทานด้วยวิธีการเบี่ยงตัวของเครื่อง	541
GN-7	การวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับพอร์เจ็คคอนเวอร์เตอร์โดยการจำลองการทำงาน	546
GN-8	การออกแบบชุดจำลองระบบตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานอัตโนมัติ	550
GN-9	ผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าจากการชาร์จรถจักรยานไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ	554
GN-10	อุปกรณ์แจ้งเตือนภัยด้วย IOT แสดงผลบนแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ พร้อมระบบตำแหน่งอีกด้วยด้วยจีพีเอส	558
GN-11	การออกแบบและสร้างวงจรต้นแบบสำหรับเพิ่มสมรรถนะของเซลล์แบตเตอรี่จากดินการเกษตร	562
GN-12	การตรวจจับการตกผลึกโดยเซนเซอร์ LIDAR แบบกระจายภายในอาคาร	566
GN-13	การศึกษาการวัดความถี่ส่วเปลือกหอยมะลิสามหัว (กะย 15) ด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟ	570
GN-14	ผลกระทบของแสงที่มีต่อการเจริญเติบโตของหลอดไฟปลูกภายในโรงเรือนอัจฉริยะ	574
GN-15	การพัฒนาแบบจำลองความเสี่ยงสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นอัตโนมัติ	578
GN-16	การออกแบบและสร้างเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสของเหลว	582
GN-17	ระบบเสาไฟฟ้าอัจฉริยะเพื่อป้องกันการโจรกรรมทรัพย์สินในบริเวณไฟฟ้า	586
GN-19	การพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ค (กรณีศึกษาบริษัททรูคเคอร์ แคมป์ นกนบิล แคมป์ แพคเกจจิ้ง (ประเทศไทย) จำกัด)	590
GN-20	ตัวนับกระแสหลายตัวแบบปรับปรึบ สำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า	594
GN-21	ระบบผู้จัดหาอุปกรณ์ที่มีพัฒนาเคลื่อนที่ได้สำหรับสถานประกอบการ SME	598
GN-22	To Predict the Equatorial Plasma Bubbles based on K-nearest Neighbor Method at Chumphon, Thailand	602
GN-23	การประมาณค่าพลังงานสำหรับวิธีการสุ่มแบบสตรีม-เซลล์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	606
GN-24	ระบบจัดการแบตเตอรี่ สำหรับเครื่องมือสื่อสารทางทหาร	610
GN-25	แบบจำลองระบบควบคุมเครื่องจักรด้วยเทคโนโลยี Industrial IOT	614

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-27	การปรับปรุงการระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณวิทยุวีโมเดมวีไอเอ็มคอนโซล	618
GN-28	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงธรรมชาติจากการสกัดดอกเพ็ญฟ้า	623
GN-29	การพัฒนาชุดปฏิบัติการทำงานรีเลย์กระแสเกินประจิมเวลา	627
GN-30	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมโรงเพาะเห็ดด้วยสมองกลฝังตัวและไอโอที	631
GN-31	การออกแบบและสร้างตู้ฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยไอโซน	635
GN-32	โปรแกรมประเมินผลการติดตั้งระบบไฟฟ้าด้วยการประมวลผลภาพ	640
GN-33	การสร้างโมเดล AI แบบจัดกลุ่ม สำหรับการตรวจจกระดับน้ำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ K210	645
GN-34	การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับการเพาะปลูกกับฮับพืชด้วยแผ่นเพลทียรี	649
GN-35	การออกแบบต้นแบบอุปกรณ์รักษาอาการปวดกล้ามเนื้อในโรคออฟฟิศซินโดรมด้วยการกระตุ้นไฟฟ้าแบบ TENS	653
GN-36	การทำตำแหน่งช่องว่างอากาศที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมชนิด 5 ใบพัดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการไหลสูงสุดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	657
GN-37	การพัฒนาการเรียนรู้แบบฝึกหัดและการแก้ปัญหาด้วยระบบผู้เชี่ยวชาญ การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	662
GN-38	การศึกษาเสียงดังจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าในอุตสาหกรรมอาหารแห่งหนึ่งเพื่อจัดทำโครงการอนุรักษ์การได้ยิน	666
GN-39	การออกแบบระบบสารสนเทศช่วยควบคุมโดรนไร้คนขับ	670
GN-40	การพัฒนาเครื่องตัดต่อและใส่วงจรการบินสำหรับโปรเจกต์	674
GN-41	การปรับปรุงวงจรสะท้อนกระแสสำหรับฮับพลังงานเพื่อวัดการกระจายของระบบไฟฟ้าทั้งงานและอาคารพาณิชย์และระบบงาน	679
งานวิจัยเรื่องเรียนการสอน (HIS)		
HIS-1	การพัฒนาเครือข่ายและกลยุทธ์การเรียนรู้แบบโต้ตอบใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกและฮาร์ดแวร์	683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๘
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
ในปี 13-17 พฤศจิกายน 2566 ณ โรงแรมอสมิธ กรุงเทพฯ จังหวัดภูเก็ต



เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง แบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

IMPROVISED EXPLOSIVES COMPOUND DETECTOR AND IDENTIFIER SPECTROSCOPIC TECHNIQUES

เกรียงเดช อัครธศ¹ และ วิริยะ ทองรัตน์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 6000121 k@kmit.ac.th
²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง kdc@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นต้นแบบความปลอดภัยและตรวจจับอันตรายจากวัตถุระเบิด โดยการพัฒนาเครื่องตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี การประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องจากชุดอุปกรณ์สำเร็จรูปในปัจจุบัน ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องได้มากขึ้น โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์สเปกตรัมของวัตถุระเบิดแสงเครื่องแบบเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีของเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องเพื่อตรวจสอบว่าเป็นสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่องหรือไม่ โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดที่แพงและซับซ้อนเกินไป

คำสำคัญ: เครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง, สเปกตรัม, สเปกโทรสโกปี, สเปกโตรมิเตอร์

Abstract

This research focuses on safety and protection of dangerous from explosives. By developing a detector that can detect safety of compounds of improvised explosive device, then equipment that is available locally. This will reduce operational risk and increase efficiency in identification and provided explosive device compounds with a prototype machine. By using the principle of spectroscopic analysis and computing spectral patterns, it gives an idea of the process of detecting and identifying improvised explosive device which is necessary for the development and improvement of detector to be more efficient.

Keyword: Improved Explosives Compound Detector and Identifier, Spectroscopy, Spectral.

1. บทนำ

วัตถุอันตรายคือทุกสิ่งทุกอย่างที่ก่อการร้ายของประเทศไทย ได้ทวีความรุนแรงขึ้น โดยการพัฒนาวัตถุอันตรายอยู่ทั่วไปจนต้องเกิดความกังวลและระมัดระวังวัตถุอันตรายเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้ถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น ทำให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สิน จึงจำเป็นต้องมีการจัดการกับวัตถุอันตรายอย่างถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับปริมาณ, ชนิด และประเภทของสารเคมีที่นำมาใช้เป็นตัวประกอบของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการพิสูจน์ทราบ ให้ได้วัตถุระเบิดแสงเครื่องที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง เพื่อเป็นข้อมูลให้เจ้าหน้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยดูจากประสิทธิภาพ และปลอดภัย

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบสารประกอบวัตถุระเบิดแสงเครื่อง (Improved Explosives Compound Detector and Identifier) ซึ่งมีความสำคัญในการใช้เพื่อตรวจสอบและพิสูจน์ทราบวัตถุอันตรายที่อาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยการพัฒนาเครื่องตรวจจับและพิสูจน์ทราบวัตถุอันตรายที่อาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน

2.1 องค์ประกอบของวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

วัตถุระเบิดแสงเครื่องมีองค์ประกอบหลักคือสารเคมีที่ก่อให้เกิดการระเบิด

1. แหล่งพลังงาน (Power Supply) หรือแบตเตอรี่
2. วัตถุระเบิด (Explosive)
3. ตัวตรวจจับ (Detector)
4. ระบบควบคุมวัตถุระเบิด (Control)
5. การเชื่อมต่อ (Connector)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเกรียงเดช กล้ารอด
 วัน เดือน ปีเกิด 22 เมษายน 2524 ที่นครราชสีมา
 ที่อยู่ 286 หมู่ที่ 4 ตำบลโพธิ์กลาง อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000
 โทร.0-99145-9691
 ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 ความชำนาญเฉพาะด้าน นายทหาร เคมี ชีวะ รั้งสี่ นิวเคลียร์
 ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
 พ.ศ.2560-2564 นายทหารซ่อมบำรุง กองสรรพาวุธเบา กองพลทหารราบที่ 4
 ปัจจุบัน ครู แผนกวิชานายนต์ กองการศึกษา โรงเรียนทหารสรรพาวุธ
 กรมสรรพาวุธทหารบก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้