



## โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** เซนเซอร์เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานโดยอาศัยปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์  
Colorimetric sensor for detection of water in aviation fuel by complexation reaction of cobalt chloride

**ชื่อนิสิต** นางสาวสรिता เนาว์รุ่งโรจน์

**ภาควิชา** เคมี

**ปีการศึกษา** 2560

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เซนเซอร์เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานโดย  
อาศัยปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์

Colorimetric sensor for detection of water in aviation fuel by  
complexation reaction of cobalt chloride

โดย

นางสาวสริดา เนาว์รุ่งโรจน์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

โครงการ เซนเซอร์เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานโดยอาศัยปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์

โดย นางสาวสรिता เนาว์รุ่งโรจน์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... นตยา งามโรจน์ ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นตยา งามโรจน์วณิชย์)

..... อรรณ ชัยลภากุล ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรณ ชัยลภากุล)

..... เจนจิรา ปานชมพู ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู)

..... ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปกรณ์ วรรณสุภากุล)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ ..... เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ  ดีมาก  ดี  พอใช้

ชื่อโครงการ เซนเซอร์เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานโดยอาศัย  
ปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์

ชื่อนิติโนโครงการ นางสาวสรिता เนารุ่งโรจน์ เลขประจำตัว 5733171123

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.อรรธรณ ชัยลภากุล

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560

### บทคัดย่อ

การตรวจสอบปริมาณน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง หากมีปริมาณน้ำปะปนในน้ำมันเชื้อเพลิงมากเกินไป อาจทำให้คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงและอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบการทำงานของยานพาหนะและเครื่องยนต์ได้ โดยทั่วไปการตรวจหาปริมาณน้ำยังคงเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายและสารเคมีในการวิเคราะห์จำนวนมาก เนื่องจากการวิเคราะห์มักเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อน เช่น การไทเทรตแบบคาร์ลฟีชเชอร์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษแบบใหม่ที่ง่ายและราคาไม่แพงสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้โคบอลต์(II) คลอไรด์เป็นรีเอเจนต์สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสี เมื่อเติมน้ำให้น้ำมันเชื้อเพลิงพบว่าสัญญาณการดูดกลืนแสงของโคบอลต์(II) คลอไรด์ที่ 585 และ 680 นาโนเมตรลดลงและสีน้ำเงินของโคบอลต์(II) คลอไรด์เปลี่ยนแปลงเป็นสีชมพูใสซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต่อมาได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์เชิงสีฐานกระดาษสำหรับการตรวจวัดน้ำอย่างง่ายและรวดเร็วโดยใช้โคบอลต์(II) คลอไรด์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โคบอลต์(II) คลอไรด์และ Triton X-100 ที่เคลือบบนอุปกรณ์ฐานกระดาษ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีทันทีเมื่อมีปริมาณน้ำในระบบ ผู้วิจัยพบว่าขีดจำกัดในการตรวจวัดน้ำมีค่าเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ (โดยปริมาตร) ซึ่งวิธีที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจหาปริมาณน้ำในตัวอย่างจริงจัง นอกจากนี้อุปกรณ์นี้ยังสามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งที่ราคาไม่แพงและให้ผลที่น่าเชื่อถือสำหรับการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน

คำสำคัญ: อุปกรณ์ฐานกระดาษ, การตรวจวัดเชิงสี, โคบอลต์คลอไรด์, ปริมาณน้ำ, น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน

Project Title                   Colorimetric sensor for detection of water in aviation fuel by  
  complexation reaction of cobalt chloride

Student Name               Miss Sarida Naorungroj               Student ID 5733171123

Advisor Name               Prof. Dr. Orawon Chailapakul

Co-advisor Name         Dr. Janjira Panchompoo

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2017

### Abstract

Water determination is important for the quality control of fuel. If there is high water content in the fuel, it might reduce the quality of the fuel itself, which can damage the vehicle injection systems and engines. Assessing water content is also costly and requires many chemicals for the testing as the analysis typically uses sophisticated instrumental techniques like Karl Fischer titration. In this work, we report a novel, simple, inexpensive paper-based analytical device for measuring water in fuel using cobalt(II) chloride as a colorimetric reagent. Upon the addition of water to the fuel, the absorption peak intensity of cobalt(II) chloride at 585 and 680 nm decreased and the blue color of cobalt(II) chloride became clear pink which is visible to the naked eye. A paper-based colorimetric device was then developed for the simple and rapid determination of water using the cobalt(II) chloride. Under optimized conditions, the cobalt(II) chloride and Triton X-100 coated on the test zone of the device immediately changed the color from blue to pink in the presence of water. The limit of detection (LOD) was found to be 0.1 % (V/V). The proposed method was successfully applied to detect water in real samples. Moreover, the proposed device can be used as an alternative tool with inexpensiveness and reliability for water determination in aviation fuel.

**Keywords:** paper-based analytical device, colorimetric method, cobalt(II) chloride, water content, aviation fuel



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้เนื่องด้วยความกรุณาจาก ศาสตราจารย์ ดร.อรรพรรณ ชัยลภากุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นาตยา งามโรจนวิชัย และรองศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์ วรรณสุภากุล ที่ให้ความกรุณาในการเป็นคณะกรรมการในการประเมินโครงการ รวมไปถึงการให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อแก้ไขให้รายงานของโครงการนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.สุดเขต ไชโย ที่คอยให้คำปรึกษา ความใส่ใจ คำแนะนำต่าง ๆ ไปจนถึงแนวทางในการแก้ปัญหา สำหรับโครงการนี้ในทุกขั้นตอนตลอดระยะเวลาในการทำโครงการนี้ รวมไปถึงคอยให้คำแนะนำในการเขียนรูปเล่มโครงการ ทำให้รูปเล่มโครงการนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และสุดท้ายขอขอบคุณ พี่ๆ สมาชิกทุกคนในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชิงเคมีไฟฟ้าและแสง ที่คอยช่วยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยในโครงการนี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1.4.1 โคบอลต์คลอไรด์	3
1.4.2 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน	3
1.4.3 อุปกรณ์ฐานกระดาษ	4
1.4.4 เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี	6
1.4.5 โปรแกรม imageJ	6
1.4.6 เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	6
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
<b>บทที่ 2 การทดลอง</b>	
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	12
2.2 สารเคมี	12
2.3 การเตรียมสารละลาย	13
2.3.1 การเตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์	13
2.3.2 การเตรียมตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีน้ำ 0.10 % โดยปริมาตร	13
2.3.3 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรล์ 0 ถึง 300 ppm	14
2.3.4 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตร	14
2.3.5 น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร	15
2.3.6 น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีสารอื่น ๆ ที่สามารถรบกวนการตรวจวัดปริมาณน้ำของอุปกรณ์ฐานกระดาษ	15
2.4 การเตรียมอุปกรณ์ฐานกระดาษ	16
2.5 วิธีการตรวจวัดการนำในน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยอุปกรณ์ฐานกระดาษ	16
2.6 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเชิงสีของโคบอลต์คลอไรด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ของอุปกรณ์ฐาน กระดาศโคบอลต์คลอไรด์	18
2.7.1 การทดสอบหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสม	18
2.7.2 การทดสอบหาความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาศที่ เหมาะสม	18
2.8 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาศโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัด ปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์	18
2.8.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัว ทำละลายอินทรีย์	18
2.9 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาศโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำใน ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง	18
2.9.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดความเข้มข้นของ น้ำที่เจือจางอยู่ในอะซิโตนไทรคลอไรด์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	18
2.9.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.02 ถึง 20.00 ไมโครลิตรในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	18
2.9.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดปริมาณน้ำที่ใน น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างเมื่อมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่างกัน	18
2.9.4 การทดสอบความจำเพาะของวิธีการตรวจวัด	18
<b>บทที่ 3 ผลการทดลอง</b>	
3.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเชิงสีของโคบอลต์คลอไรด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	19
3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ของอุปกรณ์ฐาน กระดาศโคบอลต์คลอไรด์	20
3.2.1 การทดสอบหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสม	20
3.2.2 การทดสอบหาความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาศที่ เหมาะสม	22
3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาศโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัว ทำละลายอินทรีย์	26
3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาศโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำใน ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง	27
3.4.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดความเข้มข้นของ น้ำที่เจือจางอยู่ในอะซิโตนไทรคลอไรด์ 0 ถึง 300 ppm ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	27
3.4.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตรในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	28
3.4.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาศในการตรวจวัดปริมาณน้ำ ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างเมื่อมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่างกัน	30
3.4.4 การทดสอบความจำเพาะของวิธีการตรวจวัด	31



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 สรุปลผลการทดลอง	33
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	37
ประวัติผู้วิจัย	42



## สารบัญตาราง

หน้า

### ตาราง

1.1	ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ	1
1.2	เกรดและข้อกำหนดของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินในแต่ละประเทศ	4
2.1	ปริมาณน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างน้ำเจือจางที่ในอะซิโตนไตรคลอไรด์มีความเข้มข้นในช่วง 0 ถึง 300 ppm	14
2.2	ปริมาณน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตร	14
2.3	การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร	15
2.4	การเตรียมสารสารอื่น ๆ ที่สามารถรบกวนการตรวจวัดปริมาณน้ำของอุปกรณ์ฐานกระดาษ ปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร	16
3.1	สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	20
3.2	สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	21
3.3	สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	22
3.4	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	23
3.5	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	24
3.6	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	25
3.7	ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของกระดาษที่ใช้ความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษต่าง ๆ โดยวัดความเข้มสีเฉลี่ยของกระดาษด้วยโปรแกรม imageJ	26
3.8	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ในสารละลายเฮกเซน โดยใช้กระดาษเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที	26
3.9	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรคลอไรด์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	28
3.10	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิง 2 มิลลิลิตร	29
3.11	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำ 2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตรต่าง ๆ	30
3.12	ปริมาณน้ำที่เจือปนในน้ำมันเชื้อเพลิงคิดเป็น % โดยปริมาตร	31
3.13	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง	32
A-1	ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษสารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	37
A-2	ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	38

## สารบัญตาราง

	หน้า
<b>ตาราง</b>	
A-3 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	38
A-4 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	39
A-5 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	39
A-6 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที	40
A-7 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ในสารละลายเฮกเซน โดยใช้กระดาษเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที	40
A-8 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไทรคลอโรเอทิลีนในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่าง	41
A-9 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำ 2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิง ปริมาณต่าง ๆ	41
A-10 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง	41



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

### รูปภาพ

1.1 แอนไฮดรรัสโคบอลต์คลอไรด์ (Anhydrous cobalt(II) chloride, $\text{CoCl}_2$ ) และ โคบอลต์คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (Cobalt(II) chloride hexahydrate, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	1
1.2 วิธีการตรวจวัดต่าง ๆ ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	5
1.3 การสร้างรูปแบบบนพื้นผิวกระดาษโดยกระบวนการปรี้นแว็กซ์ซีดี	5
1.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของ 3,5-Dimethyl BODIPYs เมื่อมีน้ำในปริมาณต่าง ๆ	6
1.5 การใช้โปรแกรม imageJ	6
1.6 การเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0 ถึง 10 ไมโครลิตร ในบิวทานอล	7
1.7 การเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์ในเตรตเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นใน สารละลาย	8
1.8 สีของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์กับน้ำในสถานะที่ไม่มีน้ำและสถานะที่มีน้ำ	8
1.9 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย 4-hydroxynaphthalimide เมื่อมีปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ ชนิดต่าง ๆ ภายใต้แสงในสถานะปกติและแสงยูวี	9
1.10 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษที่เคลือบซูดาน-ทรีซึ่งที่ปฏิกิริยากับฟลูออไรด์ ในการตรวจวัดปริมาณน้ำ ในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ	10
1.11 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายไพราซีนไดเอทิลซัลโฟนาไมด์เมื่อมีปริมาณน้ำในช่วง 0 ถึง 3% โดย ปริมาตร	10
1.12 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษที่เคลือบด้วยอนุภาคทองคำนาโน (AuPNs) เมื่อมีปริมาณเมลามินเพิ่มขึ้น	11
1.13 การเปลี่ยนแปลงสีของไบโอเซนเซอร์ $\beta$ -galactosidase ที่สังเคราะห์บนแผ่นกระดาษ เมื่อทำปฏิกิริยา กับยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ	11
2.1 การเตรียมอุปกรณ์ฐานกระดาษ	16
3.1 การดูดกลืนแสงของโคบอลต์คลอไรด์ในสถานะที่ไม่มีน้ำและในสถานะที่มีน้ำในปริมาณ 1 ถึง 10% โดยปริมาตร	19
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลา ที่สัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ	21
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลา ที่สัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ	21
3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลา ที่สัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ	22
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาทีกับระยะเวลาที่สัมพันธ์กับ ความชื้นในอากาศ	23



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
<b>รูปภาพ</b>	
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาทีกับระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ	24
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์ คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาทีกับระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ	25
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง ของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์	27
3.9 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไดรล์ ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	28
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง ปริมาณต่าง ๆ ที่มีน้ำเจือปน 2 ไมโครลิตร	31
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษกับสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง	32
A-1 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น	37



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมันเชื้อเพลิง หรือ Fuel คือของเหลวชนิดหนึ่งที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดปนกัน โดยในการแยกสารผสมออกจากกันนั้นจะอาศัยคุณสมบัติของสารที่แตกต่างกัน คือ มวลโมเลกุล ความหนาแน่น และจุดเดือด แต่จุดเดือดของสารแต่ละชนิดแตกต่างกันน้อยมาก จึงต้องแยกสารออกด้วยวิธีการกลั่นลำดับส่วน (Fractional distillation) ซึ่งจะแยกสารออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีประโยชน์และการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน<sup>1</sup> ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ<sup>1</sup>

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	จุดเดือด (°C)	สถานะ	จำนวนอะตอมของคาร์บอน	ประโยชน์และการนำไปใช้งาน
ก๊าซปิโตรเลียม	ต่ำกว่า 30	ก๊าซ	C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	สารเคมี วัสดุสังเคราะห์ และเชื้อเพลิง
แนฟทาเบา	ต่ำกว่า 70	ของเหลว	C <sub>5</sub> -C <sub>6</sub>	น้ำมันเบนซิน
แนฟทาหนัก	70-170	ของเหลว	C <sub>6</sub> -C <sub>10</sub>	สารเคมี และน้ำมันเบนซิน
น้ำมันก๊าด	170-250	ของเหลว	C <sub>10</sub> -C <sub>14</sub>	เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน และตะเกียง
น้ำมันดีเซล	250-340	ของเหลว	C <sub>14</sub> -C <sub>19</sub>	เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล
น้ำมันหล่อลื่น	340-500	ของเหลว	C <sub>19</sub> -C <sub>35</sub>	น้ำมันหล่อลื่น
ไซฟาราฟิน	340-500	ของแข็ง	C <sub>19</sub> -C <sub>35</sub>	เทียนไข เครื่องสำอาง ยาขัดมัน และวัตถุดิบในการผลิตผงซักฟอก
น้ำมันเตา	สูงกว่า 500	ของเหลว	มากกว่า C <sub>35</sub>	เชื้อเพลิงเครื่องจักร
บิทูเมน	สูงกว่า 700	ของแข็ง	มากกว่า C <sub>35</sub>	ยางมะตอย และวัสดุกันซึม

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบนั้นถูกนำมาใช้เป็นพลังงานแก่เครื่องยนต์ เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน และ เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบเครื่องยนต์ จึงทำให้ การตรวจสอบคุณภาพน้ำมันมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในกรณีที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีคุณภาพต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด อาจทำให้การ ทำงานเครื่องยนต์เสียหายหรือด้อยประสิทธิภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงก่อน นำมาใช้ งาน การตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นของน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากลักษณะที่ปรากฏ สี การระเหย ค่า American Petroleum Institute (API) ปริมาณเอทานอล และปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมัน<sup>2</sup> เป็นต้น

ในปัจจุบันมีวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น วิธีคาร์ล-ฟิสเซอร์ (Karl Fischer titration)<sup>3,4</sup>, แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)<sup>5</sup> และอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy)<sup>6,7</sup> เป็นต้น ซึ่งวิธีมาตรฐานเหล่านี้มีข้อดีคือ มีความไว (Sensitivity) และความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) แต่อย่างไรก็ตามยัง พบข้อจำกัดของวิธีตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้วิธีมาตรฐานดังกล่าวนี้ เช่น ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้มีราคาแพง อีกทั้งผู้วิเคราะห์ต้องมีทักษะและความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ เป็นต้น

อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric paper-based analytical devices) เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐาน กระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสีเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ทำจากกระดาษซึ่งทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ มีวิธีการใช้งานที่ สะดวกและรวดเร็ว ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน พกพาได้สะดวก สามารถใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณ และสามารถนำไปใช้ งานในภาคสนามได้ เป็นต้น อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสีสามารถเคลือบสารที่มีความสามารถในการ เปลี่ยนสีเมื่อมีน้ำปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยสีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังสามารถนำอุปกรณ์นี้ไปใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมัน เชื้อเพลิงในภาคสนามได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเคโรซีน (Kerosene) ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับ เครื่องบิน ซึ่งการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสนิมที่เครื่องยนต์และอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบ เครื่องยนต์และนำไปสู่การอุดตันบริเวณระบบกรองน้ำมันเชื้อเพลิงหลักของเครื่องยนต์ ทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน ของเครื่องยนต์ลดลง นอกจากนี้ประเทศที่หนาวเย็นอาจก่อให้เกิดการแข็งตัวของน้ำในน้ำมันได้ ส่งผลให้เกิดการอุดตันได้ เช่นกัน<sup>8</sup> โดยปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถยอมรับได้ต้องไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)<sup>9</sup> ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการใช้อุปกรณ์ฐานกระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสี โดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์ ซึ่งเมื่อโคบอลต์คลอไรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู ได้ ซึ่งข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือใช้ปริมาตรสารรีเอเจนต์และตัวอย่างน้อยและประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิม นอกจากนี้ยังสามารถนำอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเคโรซีนที่ใช้สำหรับเครื่องบินได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสีที่สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดย อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์
2. เพื่อนำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษร่วมกับการตรวจวัดเชิงสีมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบปริมาณน้ำในตัวอย่าง น้ำมันเชื้อเพลิง







น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินหรือเครื่องบินที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินนั้นมียุหลายประเภท รายละเอียดและข้อกำหนดของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะแสดงไว้ในตารางที่ 1.2 ข้อกำหนดเหล่านี้ในแต่ละประเทศส่วนใหญ่จะเหมือนกัน แต่จะมีในบางจุดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของประเทศนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น จุดเยือกแข็ง จุดวาบไฟ และความหนืด เป็นต้น

การปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันมีความสำคัญอย่างมากในเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน เนื่องจากหากมีปริมาณน้ำในเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินอาจก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การเกิดสนิมในเครื่องยนต์และถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องบินลดลง และอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้งานเครื่องบินได้หากไม่ได้รับการบำรุงรักษา นอกจากนี้สำหรับประเทศที่มีสภาพอากาศที่หนาวเย็น อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ น้ำแข็งแข็งตัวกลายเป็นน้ำแข็งและไปอุดตันท่อในการลำเลียงเชื้อเพลิงและไปเกาะตัวอยู่กับเครื่องยนต์ ทำให้การลำเลียงน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักที่สำคัญของเครื่องบินเกิดการชะงัก ชัดข้อง ซึ่งจะส่งผลเสียแก่ระบบเครื่องยนต์ของเครื่องบินได้

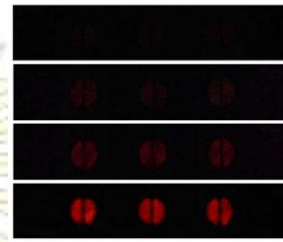
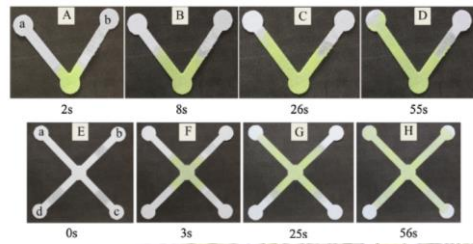
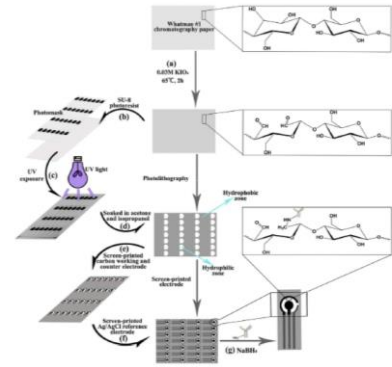
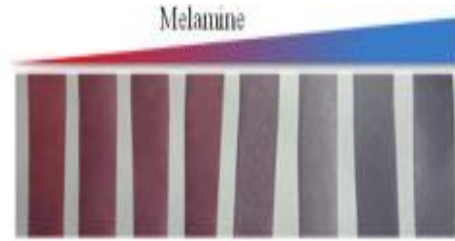
ตารางที่ 1.2 เกรดและข้อกำหนดของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินในแต่ละประเทศ<sup>12</sup>

Fuel Grade	Country/Region	Specification
Jet A	USA	ASTM D1655
Jet A-1	Worldwide	ASTM D1655, DEF STAN 91-91
TS-1	Russia	GOST 10227
Jet Fuel no.3	China	GB 6537
Jet A-1	Canada	CAN/CGSB-3.23

#### 1.4.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ (Paper-based analytical device)<sup>13,14,15</sup>

เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดใหญ่ ราคาแพง ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ ทำให้นักวิจัยได้คิดค้นและพัฒนาวิธีอื่น ๆ เพื่อทดแทนข้อเสียเหล่านี้ ซึ่งวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การใช้กระดาษซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม หาซื้อได้ทั่วไปและราคาถูก มาพัฒนาเพื่อใช้งานในการวิเคราะห์สารสำคัญต่าง ๆ เริ่มต้นจากปี ค.ศ.2007 Whiteside และคณะ ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อตรวจวิเคราะห์สารสำคัญในร่างกาย ต่อมามีการพัฒนากันอย่างกว้างขวางโดยนำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษไปประยุกต์ใช้ในงานวินิจฉัยและติดตามผลการรักษาโรคในประเทศกำลังพัฒนา พบว่าการวิเคราะห์สารด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษนั้นให้ผลที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ จึงเริ่มมีการวิจัยและตีพิมพ์ผลงานเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ฐานกระดาษเพิ่มมากขึ้น<sup>16</sup>

ข้อดีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ คือ ใช้งานง่าย ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ราคาถูก และเนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคสนาม เป็นต้น นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์นี้สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารต่าง ๆ ได้ โดยอาศัยการตรวจวัดร่วมกับวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น การตรวจวัดหาโดยการเทียบสี (Colorimetric Method)<sup>17</sup> การตรวจวัดหาโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)<sup>18</sup> การตรวจหาโดยวิธีการทางเคมีเรืองแสง (Chemiluminescence)<sup>19</sup> และวิธีการทางเคมีไฟฟ้าเรืองแสง (Electrochemiluminescence)<sup>20</sup> เป็นต้น (รูปที่ 1.2) ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นวิธีการตรวจวัดโดยการเทียบสี



รูปที่ 1.2 วิธีการตรวจวัดต่าง ๆ ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ<sup>17,18,19,20</sup>

ในปัจจุบันการตรวจวัดสารสำคัญบนอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษไม่ได้จำกัดในการตรวจวัดเฉพาะการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์เท่านั้น แต่สามารถนำไปตรวจวัดสารอื่น ๆ ได้มากมาย เช่น การตรวจวัดโลหะจากแหล่งน้ำ<sup>21</sup> การตรวจวัดโลหะจากอาหาร<sup>22</sup> การตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์<sup>23</sup> เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ ซึ่งการตรวจวัดปริมาณน้ำบนอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษอาศัยหลักการการดูดซับสารของกระดาษ จึงจำเป็นต้องใช้กระดาษที่มีความละเอียด มีรูพรุนสูง ซึ่งส่งผลทำให้สามารถดูดซับสารที่เป็นรีเอเจนต์ได้มาก จึงทำให้การตรวจวัดน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถตรวจวัดน้ำในปริมาณที่ต่ำได้ และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน

การสร้างรูปแบบบนพื้นผิวกระดาษนั้นทำได้ด้วยกระบวนการปรีนแวกซ์ซีฟี่ลงบนกระดาษโดยใช้เครื่องปรีนแวกซ์ เริ่มต้นจากการออกแบบอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษบนโปรแกรมที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการปรีนลงกระดาษเมื่อแวกซ์ซีฟี่เคลือบบนกระดาษตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ข้างต้น ทำการให้ความร้อนเพื่อละลายแวกซ์ซีฟี่ลงสู่เนื้อกระดาษเพื่อสร้างขอบเขตที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การสร้างรูปแบบบนพื้นผิวกระดาษโดยกระบวนการปรีนแวกซ์ซีฟี่

#### 1.4.4 เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method)<sup>24,25</sup>

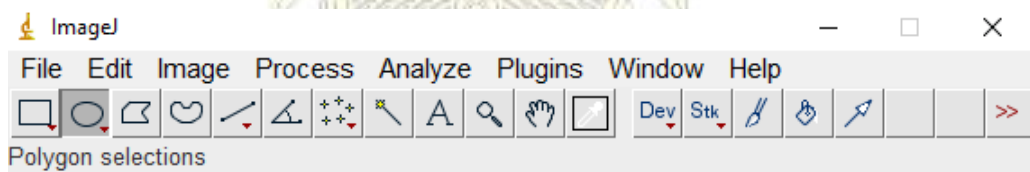
เทคนิคการตรวจวัดเชิงสีเป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดโดยการเทียบสีโดยใช้สารรีเอเจนต์ (Reagent) ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นที่เกิดขึ้นได้ โดยความเข้มสีที่เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน ซึ่งข้อดีของเทคนิคการตรวจวัดเชิงสีคือ เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และราคาถูก โดยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดเชิงสีสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างการตรวจวัดด้วยเทคนิคเชิงสี<sup>26</sup> เช่น การตรวจวัดหาปริมาณน้ำในสารละลายอินทรีย์ ยา และอาหาร โดยใช้ 3,5-Dimethyl BODIPYs เป็นรีเอเจนต์ ในสภาวะที่มีน้ำ สารนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงเป็นสีเขียว โดยเปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของ 3,5-Dimethyl BODIPYs เมื่อมีน้ำในปริมาณต่าง ๆ<sup>26</sup>

#### 1.4.5 โปรแกรม imageJ<sup>27</sup>

โปรแกรม imageJ เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันวิจัย National Institute of Mental Health (NIMH) ประเทศสหรัฐอเมริกา มีประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยที่จำเป็นต้องวัดระยะหรือหาพื้นที่ของวัตถุบนภาพ สามารถเปิดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พร้อม ๆ กันได้หลายภาพในเวลาเดียวกัน สามารถกำหนด Scale, Rotate, Flip ภาพได้ ชุมภาพได้และสามารถคำนวณสัดส่วนพื้นที่และพื้นที่ของวัตถุบนภาพได้ในหน่วย pixel ของรูปนั้นหรือคำนวณหน่วยพื้นที่ตามหน่วยมาตรฐาน เช่น ตารางมิลลิเมตร วัดระยะความยาวของวัตถุบนภาพ วัดความหนาแน่นของรูปภาพ แล้วแสดงในรูปแบบของแผนภูมิแท่ง จัดทำค่าต่าง ๆ ในรูปสถิติได้ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ข้อดีของ imageJ คือ เป็นโปรแกรมแจกฟรี (Freeware) และอนุญาตให้ผู้ใช้แก้ไขตัวโปรแกรมได้ ใช้งานง่าย และนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย



รูปที่ 1.5 การใช้โปรแกรม imageJ

#### 1.4.6 เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy)<sup>28</sup>

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและคำนวณค่าการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี (Ultraviolet) และช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่ถูกวางไว้ในเครื่องมือ ซึ่งสามารถวัดได้ในช่วงความยาวคลื่นที่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

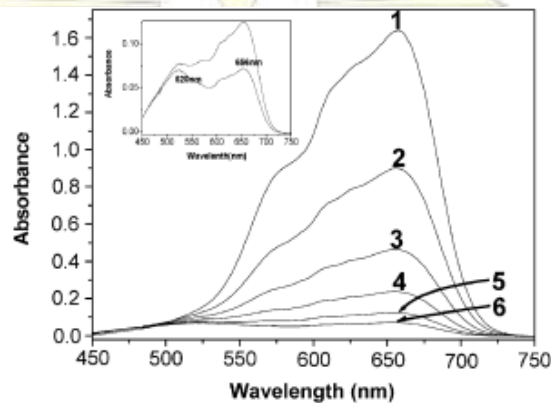
คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น ค่าต่าง ๆ



ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับความเข้มข้นของโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์สารต่าง ๆ ทั้งเชิงคุณภาพ (ต้องใช้ร่วมกับเทคนิค Infrared Spectroscopy และ Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) และเชิงปริมาณได้ นอกจากนี้แล้วยังสามารถวิเคราะห์สารที่มีหรือไม่มีสีที่อยู่ในรูปธาตุหรือสารประกอบได้

### 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

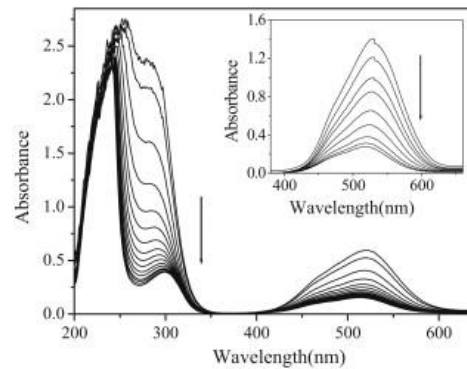
ในปี ค.ศ. 2007 Hai-Xin Bai และคณะ<sup>29</sup> ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล, เอ็น-โพรพานอล, ไอโซ-โพรพานอล และเอ็น-บิวทานอล โดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์(II) คลอไรด์ในการตรวจวัดวิธีนี้สามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความไวในการตรวจวัด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์ เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในบิวทานอล ค่าการดูดกลืนแสงจะค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในรูป 1.6 และสามารถนำไปปรับใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในเอทานอลและเอ็น-บิวทานอลได้ในช่วง 0 ถึง 10 ไมโครลิตร



รูปที่ 1.6 การเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์(II) คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0 ถึง 10 ไมโครลิตร ในบิวทานอล<sup>29</sup>

ในปี ค.ศ. 2010 Zhou และคณะ<sup>30</sup> ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์ในเตรตกับน้ำ โดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงอ่อนเป็นสีชมพูเมื่อมีปริมาณน้ำมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์ในเตรต เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในรูป 1.7 วิธีนี้สามารถตรวจสอบปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ได้โดยปราศจากข้อจำกัดในการตรวจวัด และมีความไวในการตรวจวัดที่ดี





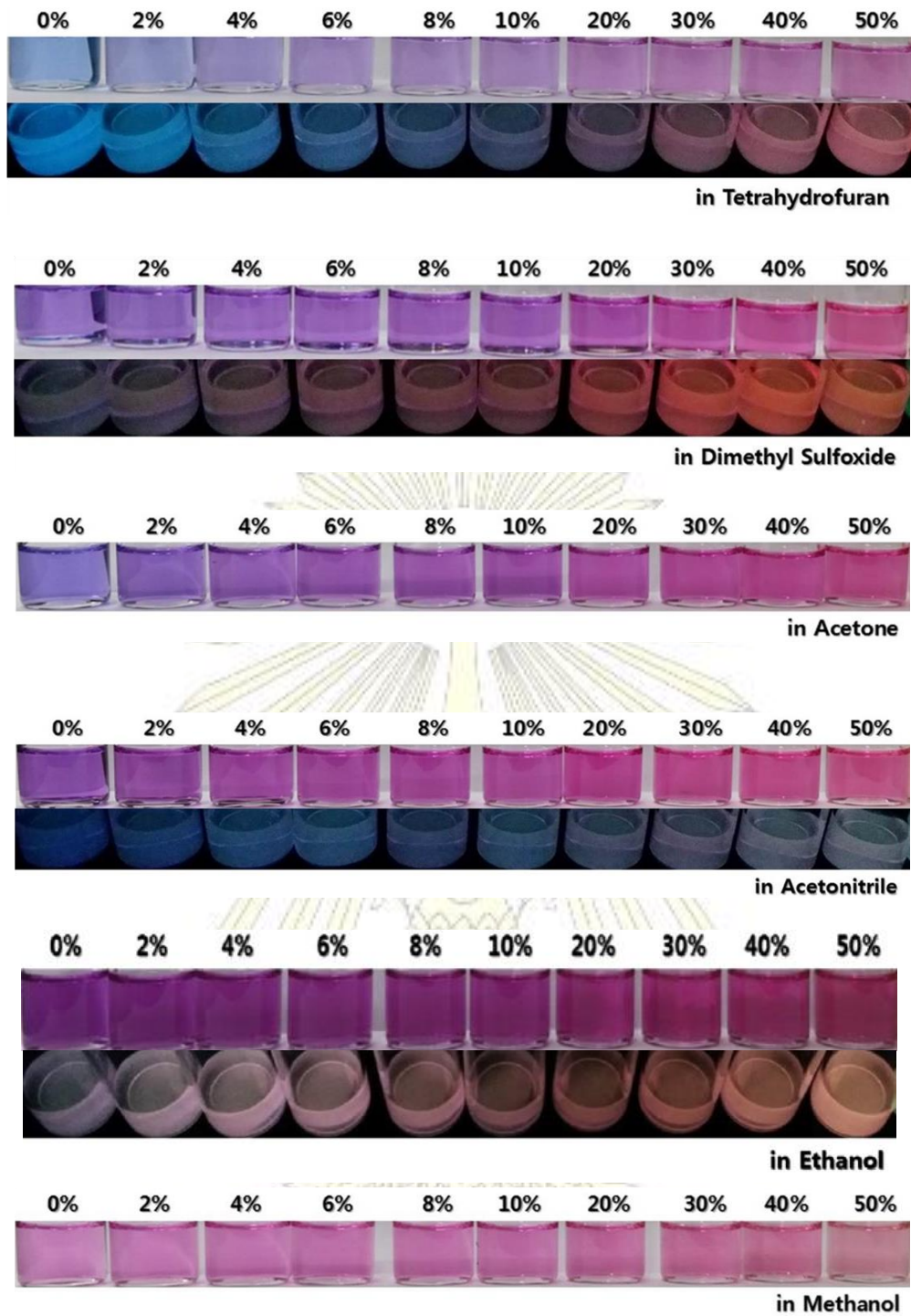
รูปที่ 1.7 การเปลี่ยนแปลงยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายโคบอลต์ในเตรตเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นในสารละลาย<sup>30</sup>

ในปี ค.ศ. 2014 Pereira และคณะ<sup>11</sup> ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันโปอิตีเซลโดยอาศัยการวิเคราะห์การเกิดสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโคบอลต์คลอไรด์กับน้ำ โดยสารละลายโคบอลต์คลอไรด์จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีฟ้ากลายเป็นไม่มีสีเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 1.8 ในงานวิจัยนี้พบว่าสามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันโปอิตีเซลได้ในระดับ 60 ppm และยังสามารถนำไปตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันตัวอย่างได้จริงอีกด้วย



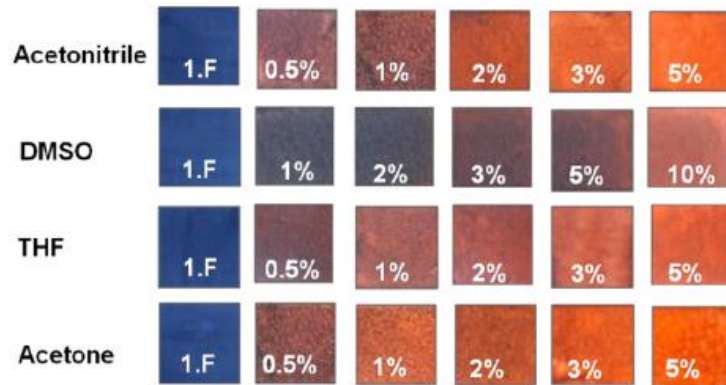
รูปที่ 1.8 สีของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์กับน้ำในสถานะที่ไม่มีน้ำและสถานะที่มีน้ำ<sup>11</sup>

ในปี ค.ศ. 2015 Park และคณะ<sup>31</sup> ได้ทำการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น THF, DMSO, อะซิโตน, อะซิโตนไไตรล์, เอทานอล และเมทานอล โดยอาศัยปฏิกิริยาของ 4-hydroxynaphthalimide โดยในตัวทำละลาย THF สาร 4-hydroxynaphthalimide จะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู ในตัวทำละลาย DMSO, อะซิโตน, อะซิโตนไไตรล์, เอทานอล สาร 4-hydroxynaphthalimide จะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีชมพู และในตัวทำละลายเมทานอล สาร 4-hydroxynaphthalimide จะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู ดังแสดงในรูป 1.9 และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมและฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาขีดจำกัดในการตรวจวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ตัวอย่างได้ในช่วง 0.1% ถึง 0.5% โดยปริมาตร



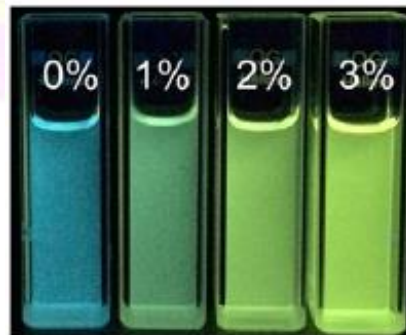
รูปที่ 1.9 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย 4-hydroxynaphthalimide เมื่อมีปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ภายใต้แสงในสภาวะปกติและแสงยูวี<sup>31</sup>

ในปี ค.ศ. 2017 Kumar และคณะ<sup>23</sup> ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้สารย้อมชูดาน-ทรี (Sudan-III) และ อลิซาริน เรด เอส (Alizarin red S) โดยเมื่อชูดาน-ทรีซึ่งมีสีแดงทำปฏิกิริยากับฟลูออไรด์จะได้สารสีน้ำเงิน เมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำ สารละลายจะเปลี่ยนกลับมาเป็นสีแดงดั้งเดิม และอลิซาริน เรด เอส ซึ่งมีสีเหลืองทำปฏิกิริยากับฟลูออไรด์จะได้สารสีม่วง เมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำ สารละลายจะเปลี่ยนกลับมาเป็นเหลืองดั้งเดิม ดังแสดงในรูป 1.10 และในงานวิจัยนี้ยังทำการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดเป็นปากกาไร้น้ำหมึก โดยอาศัยปฏิกิริยาของสารย้อมทั้งสองชนิดกับน้ำ โดยการเคลือบสารย้อมลงบนกระดาษและใช้น้ำแทนน้ำหมึกปากกาในการเขียน ซึ่งทำให้เห็นว่าสารย้อมทั้งสองชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำได้



รูปที่ 1.10 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษที่เคลือบชูดาน-ทรีซึ่งทำปฏิกิริยากับฟลูออไรด์ ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ<sup>23</sup>

ในปี ค.ศ. 2017 Jung และคณะ<sup>32</sup> ได้ทำการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีส่วนประกอบของเอทานอลและบิวทานอล โดยอาศัยปฏิกิริยาในการแตกตัวของโปรตอน (deprotonation) ของโมเลกุลไพราซีน (pyranine) และไพราซีนไดเอทิลซัลโฟนาไมด์ (pyranine diethylsulfonamide) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเขียวเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูป 1.11 และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมและฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัม สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในเอทานอลได้ดีที่สุดโดยใช้ไพราซีนและไพราซีนไดเอทิลซัลโฟนาไมด์ ได้อยู่ที่ 1.9% และ 0.03% โดยปริมาตร ตามลำดับ และสามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในบิวทานอลได้ดีที่สุดโดยใช้ไพราซีนไดเอทิลซัลโฟนาไมด์ ได้อยู่ที่ 0.01% โดยปริมาตร ในขณะที่ไพราซีนไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากไพราซีนไม่สามารถละลายได้หมดเมื่อ มีปริมาณน้ำน้อยกว่า 5% โดยปริมาตร



รูปที่ 1.11 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายไพราซีนไดเอทิลซัลโฟนาไมด์เมื่อมีปริมาณน้ำในช่วง 0 ถึง 3% โดยปริมาตร<sup>32</sup>

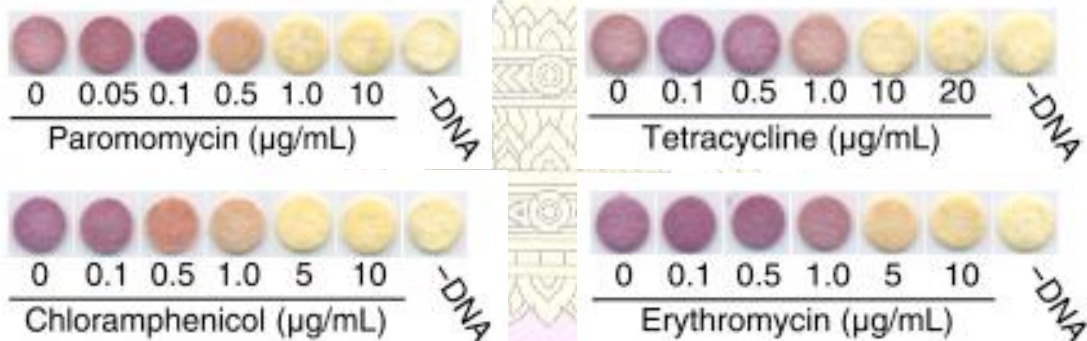


ในปี ค.ศ. 2017 Gao และคณะ<sup>17</sup> ได้พัฒนาวิธีการตรวจหาเมลามีนที่มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว และมีความจำเพาะ โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคทองคำนาโน (AuPNs) กับเมลามีน และมี Triton X-100 เป็นตัวช่วยเพิ่มความเสถียรระหว่างอนุภาคทองคำนาโนกับเมลามีน พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการรวมตัวของอนุภาคทองคำนาโนกับเมลามีน ซึ่งจะเปลี่ยนจากสีไวน์แดงไปเป็นสีน้ำเงินเมื่อมีปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 1.12 และสามารถตรวจวัดเมลามีนได้ต่ำสุดที่ 5.1 นาโนโมลาร์ นอกจากนี้ในงานวิจัยยังมีการนำอนุภาคทองคำนาโนมาเคลือบลงบนกระดาษ เพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ฐานกระดาษสำหรับการตรวจวัดเมลามีน และสามารถนำไปตรวจวัดเมลามีนที่ปนเปื้อนอยู่ในนมตัวอย่างได้จริงอีกด้วย



รูปที่ 1.12 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษที่เคลือบด้วยอนุภาคทองคำนาโน (AuPNs) เมื่อมีปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้น<sup>17</sup>

ในปี ค.ศ. 2017 Duyen และคณะ<sup>33</sup> ได้ทำการพัฒนาไบโอเซนเซอร์แบบ paperimetric paper-based สำหรับการตรวจหายาปฏิชีวนะที่ยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนของแบคทีเรีย ซึ่งได้แก่ อะมิโนไกลโคไซด์ (Aminoglycoside) เตตราไซคลิน (Tetracycline) คลอแรมเฟนิคอล (Chloramphenicol) และแมคโครไลด์ (Macrolide) การเปลี่ยนแปลงสีของไบโอเซนเซอร์นี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของ  $\beta$ -galactosidase ซึ่งถูกสังเคราะห์บนแผ่นกระดาษกับยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงสีดังรูปที่ 1.13 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 1.13 การเปลี่ยนแปลงสีของไบโอเซนเซอร์  $\beta$ -galactosidase ที่สังเคราะห์บนแผ่นกระดาษ เมื่อทำปฏิกิริยากับยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ<sup>33</sup>



## บทที่ 2

### การทดลอง

#### 2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- กระจาดาชกรอง (Nylon 66 Membranes)
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น Classic
- ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 10, 20, 100, 200, 1000, 5000 และ 10000 ไมโครลิตร
- ไมโครปิเปตทิป (Micropipette tip) ขนาด 10, 20, 100, 200 1000, 5000 และ 10000 ไมโครลิตร
- ขวดกำหนดปริมาตร (Volumetric flask) 5, 10, 25, 50 และ 100 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ขนาด 10, 25, 50 และ 100 มิลลิลิตร
- ไมโครทิวป์ (microtube) ขนาด 2,5 และ 10 มิลลิลิตร
- ซ้อนตักสาร
- กระจกนาฬิกา
- ฉลาก
- คีม
- เครื่องเจาะกระจาดาช
- เครื่องเคลือบบัตร ยี่ห้อ Laminator รุ่น HL-1
- แผ่นพลาสติก
- กล้องดิจิทัล DSLR ยี่ห้อ Canon
- นาฬิกาจับเวลา
- กล่องควบคุมแสง
- เครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น (Sonicator) รุ่น IL 60061
- เครื่องเขย่าสาร (Mixture vortex) รุ่น PT 3000L
- ตู้ดูดความชื้น (Dessicator)
- ตู้อบความร้อน
- คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม imageJ
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

#### 2.2 สารเคมี

- โคบอลต์คลอไรด์ (Cobalt(II) chloride), บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา
- อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- เฮกเซน (Hexane), บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- เมทานอล (Methanol), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- เอทานอล (Ethanol), บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส

- Triton X-100, บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- Diethylene glycol monobutyl ether, บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินจาก บริษัท BAFS ประเทศไทย

วันที่เก็บตัวอย่าง: 24 มกราคม พ.ศ. 2561

เกรดตัวอย่าง: Jet A-1

หมายเลขแท่ง: D-01 (H9)

ปริมาตรของตัวอย่าง: 4 ลิตร

ประเภทของตัวอย่าง: drain filter (ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันตัวอย่างแล้ว)

ภาชนะบรรจุ: ขวดแก้วสีชา ฝาปิดสนิท

ลักษณะทางกายภาพ: ของเหลวใส ไม่มีสี กลิ่นแรงเฉพาะตัว ความหนืดน้อยคล้ายน้ำ

## 2.3 การเตรียมสารละลาย

### 2.3.1 การเตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 4 ความเข้มข้น ประกอบด้วย

1. สารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร
  - 1.1 ชั่งผงโคบอลต์คลอไรด์ 0.1623 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
  - 1.2 ละลายโคบอลต์คลอไรด์ด้วยอะซิโตนไตรเอิล
  - 1.3 เทสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรสารละลายด้วยอะซิโตนไตรเอิลจนถึงขีดกำหนดปริมาตร
  - 1.4 นำขวดสารละลายไปสั่นด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น (Sonicator) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้โคบอลต์คลอไรด์บางส่วนที่เหลืออยู่ละลายจนหมด
2. สารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร
  - 2.1 ปิเปตสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
  - 2.2 ปรับปริมาตรสารละลายด้วยอะซิโตนไตรเอิลจนถึงขีดกำหนดปริมาตร
3. สารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร
  - 3.1 ปิเปตสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
  - 3.2 ปรับปริมาตรสารละลายด้วยอะซิโตนไตรเอิลจนถึงขีดกำหนดปริมาตร
4. สารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร
  - 4.1 ปิเปตสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.20 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร
  - 4.2 ปรับปริมาตรสารละลายด้วยอะซิโตนไตรเอิลจนถึงขีดกำหนดปริมาตร

### 2.3.2 การเตรียมตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีน้ำ 0.10 %โดยปริมาตร ปริมาตรรวม 2.00 มิลลิลิตร

1. ปิเปตสารละลายเฮกเซนปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงในไมโครทิวบ์ขนาด 2 มิลลิลิตร
2. ปิเปตน้ำปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร ลงไปในไมโครทิวบ์ที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตรียมจากข้อ 1

### 2.3.3 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรล์ 0 ถึง 300 ppm

1. เตรียมตัวอย่างน้ำเจือจางในอะซิโตนไตรล์ ดังตารางที่ 2.1 ในขนาดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยอะซิโตนไตรล์จนถึงขีดกำหนดปริมาตร
2. ปิเปตตัวอย่างน้ำที่เตรียมได้จากข้อ 1 ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ลงในไมโครทิวป์ที่มีน้ำมันเชื้อเพลิง 2.00 มิลลิลิตร

ตารางที่ 2.1 ปริมาตรน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างน้ำเจือจางที่ในอะซิโตนไตรล์มีความเข้มข้นในช่วง 0 ถึง 300 ppm โดยมีปริมาตรสุดท้าย 10 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไตรล์ (ppm)	ปริมาตรน้ำที่ปิเปต (ไมโครลิตร)
0	0
100	400
150	600
200	800
250	1000
300	1200

### 2.3.4 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตร

1. ปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงในไมโครทิวป์ขนาด 2 มิลลิลิตร
2. ปิเปตน้ำลงในไมโครทิวป์ที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตรียมได้จากข้อ 1 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาตรน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตร โดยมีปริมาตรสุดท้าย 2 ไมโครลิตร

ปริมาณน้ำ (%โดยปริมาตร) ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	ปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำที่ปิเปต (ไมโครลิตร)
0.00	2.00	0.00
0.01	2.00	0.20
0.02	2.00	0.40
0.03	2.00	0.60
0.04	2.00	0.80
0.05	2.00	1.00
0.06	2.00	1.20
0.07	2.00	1.40
0.08	2.00	1.60
0.09	2.00	1.80
0.10	2.00	2.00

ตารางที่ 2.2(ต่อ) ปริมาณน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตร โดยมีปริมาตรสุดท้าย 2 ไมโครลิตร

ปริมาณน้ำ (%โดยปริมาตร) ในน้ำมัน เชื้อเพลิงตัวอย่าง	ปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำที่ปิเปต (ไมโครลิตร)
0.20	2.00	4.00
0.30	2.00	6.00
0.40	2.00	8.00
0.50	2.00	10.00
0.60	2.00	12.00
0.70	2.00	14.00
0.80	2.00	16.00
0.90	2.00	18.00
1.00	2.00	20.00

### 2.3.5 น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร

1. ปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ลงในไมโครทิวบขนาด 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร
2. ปิเปตน้ำลงในไมโครทิวบที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตรียมได้จากข้อ 1 ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร

ปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำที่ปิเปต (ไมโครลิตร)
2.00	2.00
5.00	2.00
10.00	2.00

### 2.3.6 น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีสารอื่น ๆ ที่สามารถบวกรวมการตรวจวัดปริมาณน้ำของอุปกรณ์ฐานกระดาษทั้งหมด 3 ชนิด

1. ปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงในไมโครทิวบขนาด 2 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารอื่น ๆ ที่สามารถบวกรวมการตรวจวัดปริมาณน้ำของอุปกรณ์ฐานกระดาษ ทั้งหมด 3 ชนิด คือ อะซิโตนไตรเอทิล, เมทานอล และเอทานอล ปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร ลงในไมโครทิวบที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตรียมได้จากข้อ 1 ดังตารางที่ 2.4

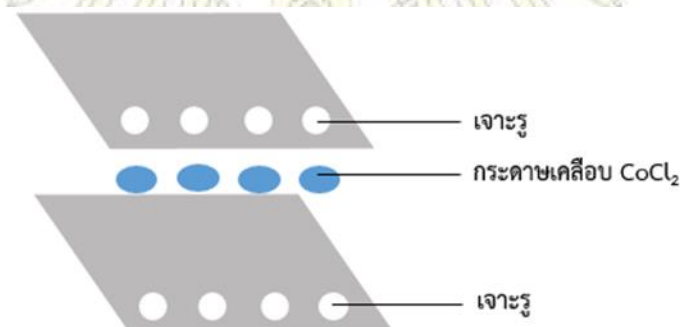


ตารางที่ 2.4 การเตรียมสารสารอื่น ๆ ที่สามารถบวกรวมการตรวจวัดปริมาณน้ำของอุปกรณ์ฐานกระดาษ ปริมาตร 2.00 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร

ชื่อสาร	ปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรสารที่ปีเปต (ไมโครลิตร)
อะซิโตไนไตรล์	2.00	2.00
เมทานอล	2.00	2.00
เอทานอล	2.00	2.00

## 2.4 การเตรียมอุปกรณ์ฐานกระดาษ

1. เจาะแผ่นพลาสติกด้วยเครื่องเจาะกระดาษ
2. เจาะกระดาษกรอง (Nylon 66 Membranes) ด้วยเครื่องเจาะกระดาษ
3. นำกระดาษไปจุ่มในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ และอบในตู้อบความร้อน อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที
4. จากนั้นนำกระดาษที่ได้จากข้อ 3 ไปจุ่มลงในสารเคลือบผิว และอบในตู้อบความร้อน อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที
5. นำกระดาษที่ได้จากข้อ 4 วางระหว่างแผ่นพลาสติก ดังรูปที่ 2.1
6. นำแผ่นพลาสติกที่ได้จากข้อ 5 ไปเคลือบด้วยเครื่องเคลือบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 การเตรียมอุปกรณ์ฐานกระดาษ

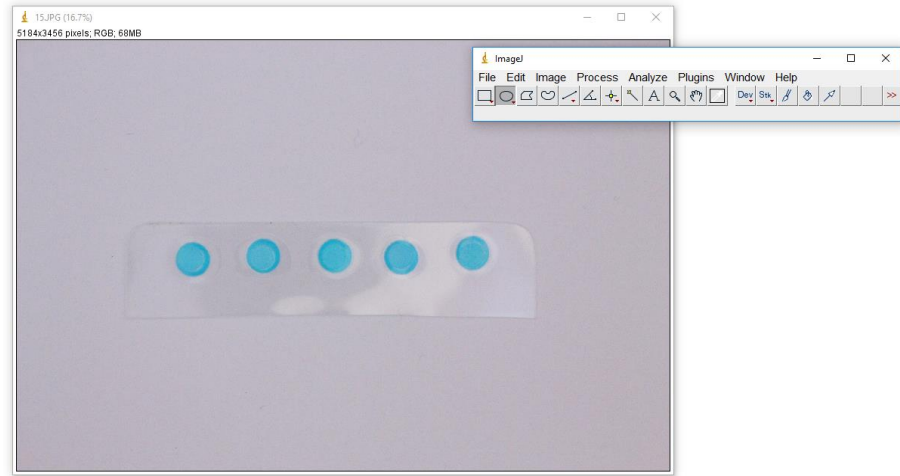
## 2.5 วิธีการตรวจวัดการนำในน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยอุปกรณ์ฐานกระดาษ

1. นำอุปกรณ์ฐานกระดาษใส่ลงในหลอดทดลองบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีน้ำปะปน และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร เป็นระยะเวลา 1 นาที
2. ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลในกล่องควบคุมแสงโดยใช้โปรแกรม EOS Utility ในการถ่ายภาพจากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดค่าต่างๆ ของกล้องดิจิทัล ดังนี้

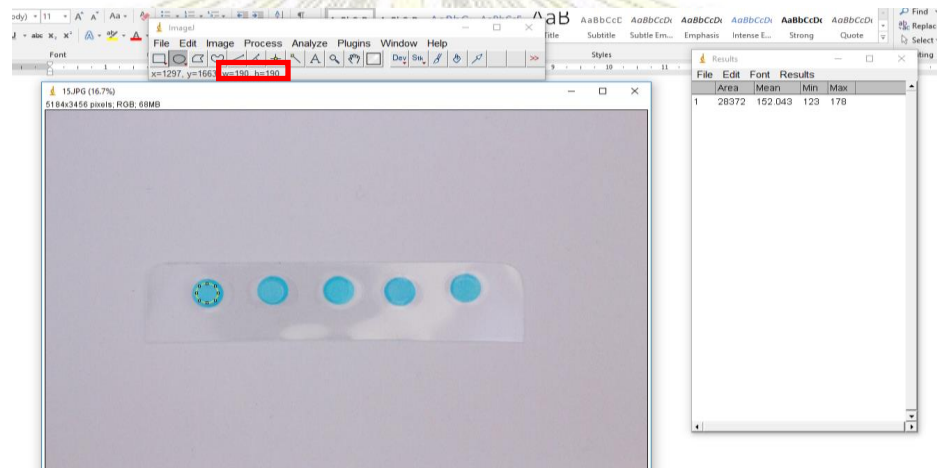
Shutter speed:	1/100
f/no:	f/8.0
ISO:	6400
File:	JPEG
White balance	White fluorescent

3. จะได้รูปภาพที่สามารถนำไปตรวจวัดค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม imageJ ดังต่อไปนี้

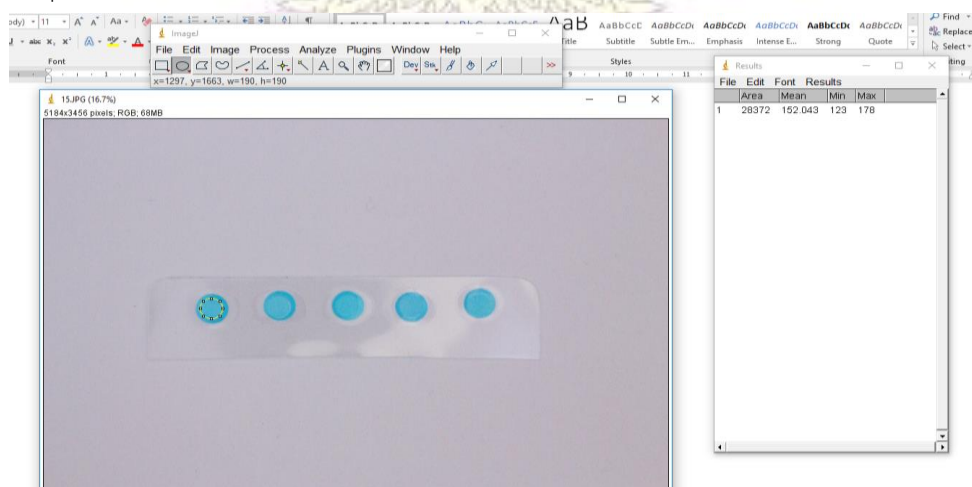
3.1 เปิดโปรแกรม imageJ เลือกคำสั่ง File แล้วคลิก Open เพื่อเลือกรูปถ่ายจากโปรแกรม EOS Utility



3.2 วัดค่าความเข้มสี โดยคลิกรูปวงกลมและกำหนดให้วงกลมกว้าง 190 ยาว 190 ดังรูป



3.3 กดปุ่ม “M” เพื่อวัดความเข้มสี



## 2.6 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเชิงสีของโคบอลต์คลอไรด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

มีลำดับการตรวจวัดดังนี้

1. ใช้สารละลายอะซิโตนไทรล์เป็น blank solution นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
2. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ในสถานะที่ไม่มีน้ำที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
3. เตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่มีปริมาณน้ำ 1 ถึง 10 % โดยปริมาตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 900 นาโนเมตร

## 2.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์

2.7.1 การทดสอบหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสม

2.7.2 การทดสอบหาความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษที่เหมาะสม

## 2.8 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์

2.8.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์

## 2.9 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง

2.9.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำที่เจือจางอยู่ในอะซิโตนไทรล์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

2.9.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.02 ถึง 20.00 ไมโครลิตรในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

2.9.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำที่ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างเมื่อมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่างกัน

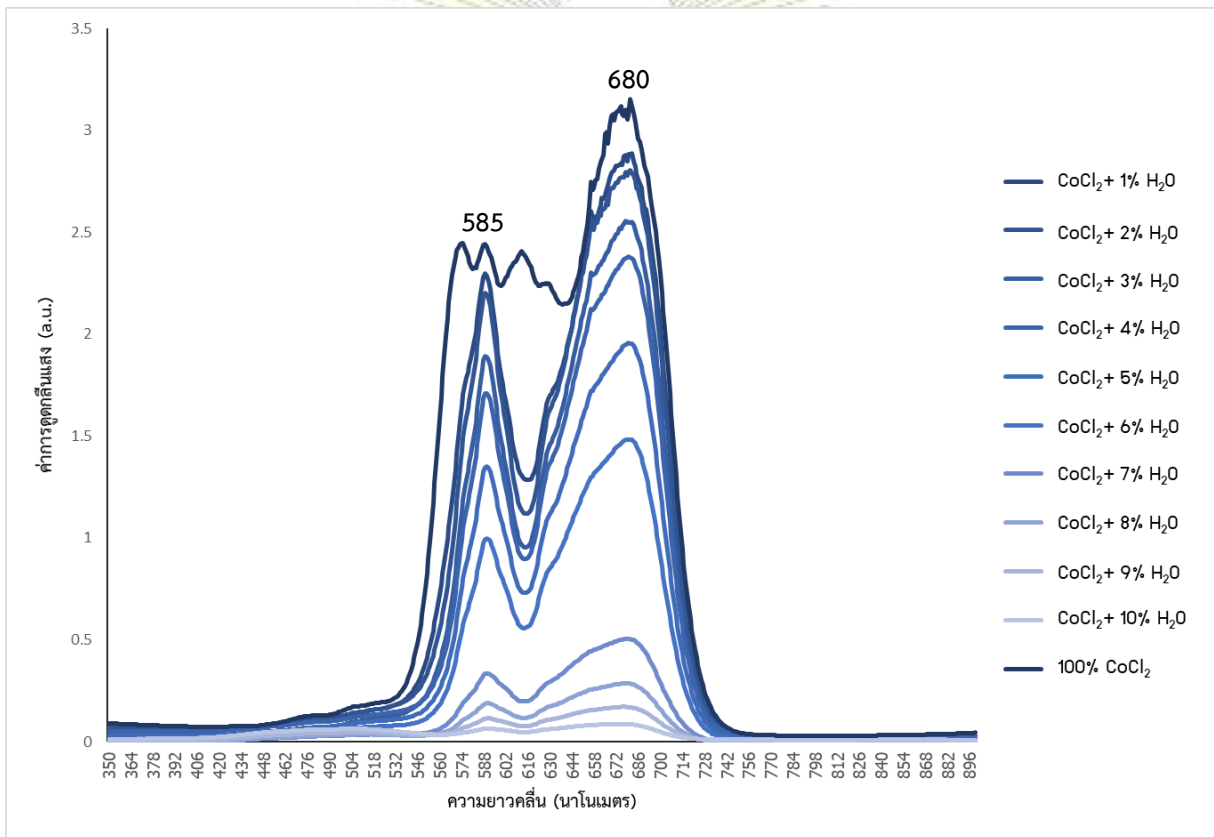
2.9.4 การทดสอบความจำเพาะของวิธีการตรวจวัด

### บทที่ 3

#### ผลการทดลอง

#### 3.1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเชิงสีของโคบอลต์คลอไรด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

ทดสอบสมบัติทางกายภาพและพิสูจน์การเกิดปฏิกิริยาของโคบอลต์คลอไรด์ในอะซิโตนไทรออลเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในสารละลาย โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 350 ถึง 900 นาโนเมตร ใช้สารละลายอะซิโตนไทรออลเป็น blank solution พบว่าสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่มีน้ำ สารละลายจะมีสีน้ำเงินและให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 585 และ 680 นาโนเมตร เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในสารละลาย ค่าการดูดกลืนแสงจะค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสีของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินจนกลายเป็นสารละลายสีชมพูใส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสีของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์สามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินกลายเป็นสารละลายชมพูซึ่งแปรผันตามปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตรวจวัดปริมาณน้ำจากการเปลี่ยนแปลงสีของโคบอลต์คลอไรด์ได้



รูปที่ 3.1 การดูดกลืนแสงของโคบอลต์คลอไรด์ในสถานะที่ไม่มีน้ำและในสถานะที่มีน้ำในปริมาณ 1 ถึง 10% โดยปริมาตร



### 3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ของอุปกรณ์ฐานกระดาษโพลีเอสเตอร์




























#### 3.2.1 การทดสอบหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสม

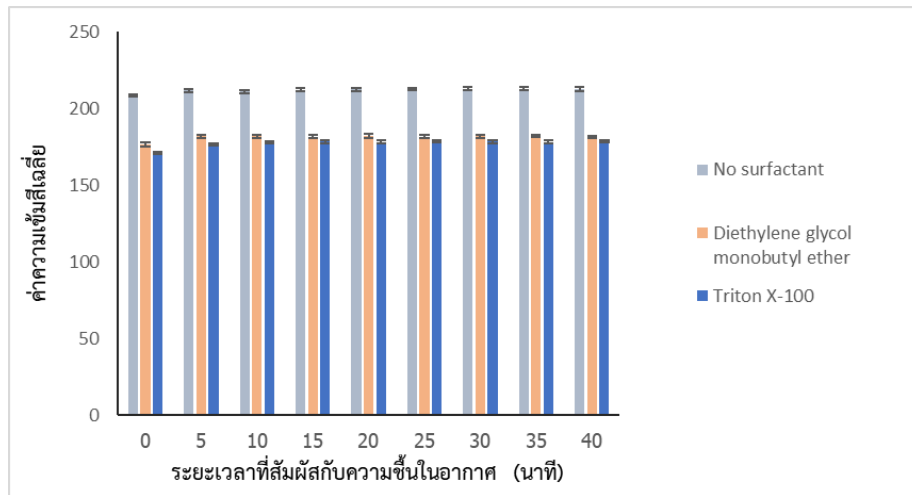
เนื่องจากความชื้นในอากาศส่งผลอย่างมากต่อความเสถียรของสีของโพลีเอสเตอร์ที่เคลือบอยู่บนกระดาษ ดังนั้นจึงต้องมีการเคลือบผิวของกระดาษเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในอากาศทำปฏิกิริยากับโพลีเอสเตอร์ได้ โดยในงานวิจัยได้เลือกศึกษาสารเคลือบผิว 2 ชนิด ได้แก่ Triton X-100 และ Diethylene glycol monobutyl ether โดยในการศึกษาหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสมนี้จะใช้กระดาษจุ่มลงในสารละลายโพลีเอสเตอร์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 40 นาที เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มสี ซึ่งให้ผลต่างของความเข้มสีเฉลี่ยที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 3.1-3.3 และวัดความเข้มสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษด้วยโปรแกรม imageJ และพล็อตกราฟเพื่อดูแนวโน้มความคงที่ของสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษ แสดงดังรูปที่ 3.2-3.4

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษโพลีเอสเตอร์ที่มีการเคลือบผิวและไม่เคลือบผิวนั้น พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที สีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิวเปลี่ยนเป็นน้ำเงินอ่อนทั้งหมด แต่อุปกรณ์ฐานกระดาษที่มีการเคลือบผิวนั้นสียังคงเป็นสีน้ำเงิน และมีความคงตัวตลอดระยะเวลาในการทดลอง และเมื่อพิจารณาความเข้มสีเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม imageJ เนื่องจากการวัดค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม imageJ นั้นเป็นการวัดความสว่างของวัตถุ หากวัตถุมีสีที่เข้ม นั้นหมายความว่าวัตถุนั้นมีความสว่างน้อย ทำให้ค่าความเข้มสีที่วัดน้อยมีค่าน้อย จึงทำให้อุปกรณ์ฐานกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิวนั้นมีค่าความเข้มสีที่สูง และอุปกรณ์ฐานกระดาษที่มีการเคลือบผิวมีค่าความเข้มสีที่ต่ำ และมีค่าคงที่ตลอดระยะที่ตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสกับความชื้นในอากาศเป็นระยะเวลา 40 นาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบผิวสามารถป้องกันไม่ให้โพลีเอสเตอร์ที่เคลือบอยู่บนอุปกรณ์ฐานกระดาษนั้นทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศได้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารเคลือบผิว 2 ชนิด ได้แก่ Triton X-100 และ Diethylene glycol monobutyl ether พบว่าสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดสามารถป้องกันการเปลี่ยนสีจากความชื้นในอากาศได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบความเข้มสีและความเรียบเนียนของสีบนอุปกรณ์ฐานกระดาษแล้ว Triton X-100 จะให้ความเข้มสีและความเรียบเนียนมากกว่า Diethylene glycol monobutyl ether ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ Triton X-100 เป็นสารเคลือบผิวของอุปกรณ์ฐานกระดาษ

**ตารางที่ 3.1** สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโพลีเอสเตอร์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

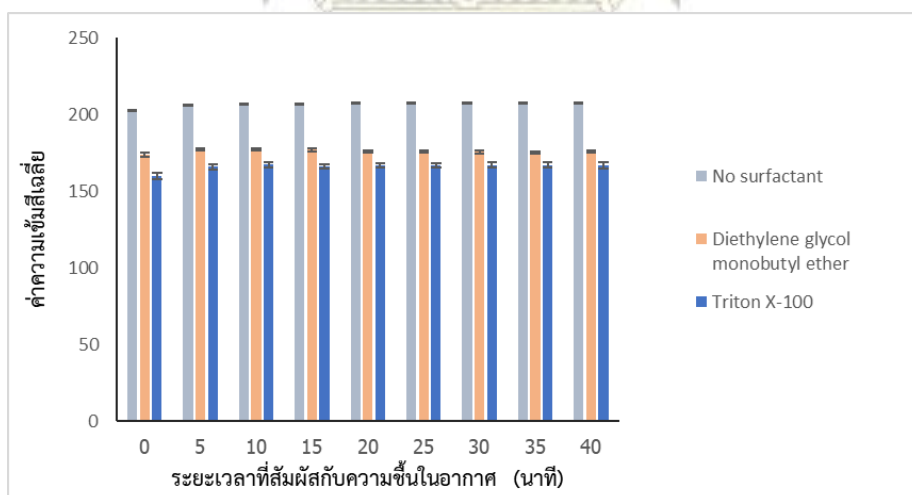
Surfactant Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
No surfactant									
Diethylene glycol monobutyl ether									
Triton X-100									



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลาที่สัมผัสกับความชื้นในอากาศ




























ตารางที่ 3.2 สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

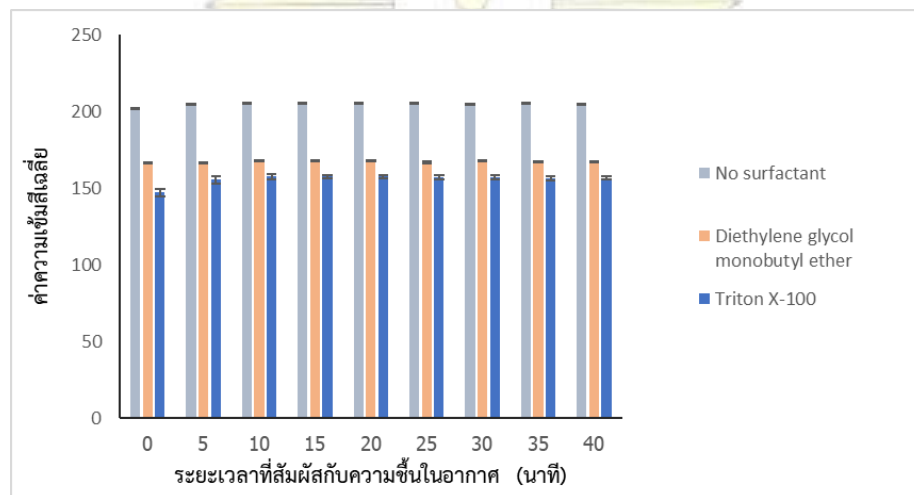
Surfactant Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
No surfactant									
Diethylene glycol monobutyl ether									
Triton X-100									



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลาที่สัมผัสกับความชื้นในอากาศ

ตารางที่ 3.3 สีของสารบนอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

Surfactant / Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
No surfactant									
Diethylene glycol monobutyl ether									
Triton X-100									



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที โดยใช้สารเคลือบผิวต่างกัน กับระยะเวลาที่สัมผัสกับความชื้นในอากาศ

### 3.2.2 การทดสอบหาความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษที่เหมาะสม

ทำการทดสอบหาความเข้มข้นและระยะเวลาในการจุ่มกระดาษเพื่อให้อุปกรณ์ฐานกระดาษมีสีที่เข้ม เรียบเนียน โดยใช้ระยะเวลาและปริมาณสารอย่างเหมาะสม โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่ม 10, 20 และ 30 นาที และใช้สารเคลือบผิวเป็น Triton X-100 ได้ความเข้มสีของกระดาษ ดังตาราง 3.4-3.6 และทำการวัดค่าความเข้มสีเฉลี่ยด้วยโปรแกรม imageJ และพล็อตกราฟเพื่อดูแนวโน้มความคงที่ของสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษ แสดงดังรูปที่ 3.5-3.7 เพื่อให้เห็นถึงค่าความเข้มสีได้ง่ายและชัดเจนขึ้น จึงได้ทำตารางเพื่อเปรียบเทียบความเข้มสีเฉลี่ยของกระดาษที่ใช้ความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษต่าง ๆ โดยวัดความเข้มสีเฉลี่ยของกระดาษด้วยโปรแกรม imageJ แสดงดังตารางที่ 3.7

เนื่องจากโคบอลต์คลอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู พิจารณากระดาษที่จุ่มลงในความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่ 1 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที พบว่ากระดาษมีสีน้ำเงินอ่อนมาก ถ้านำมาใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำให้มองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ยากมาก และหากทิ้งไว้ให้สัมผัส

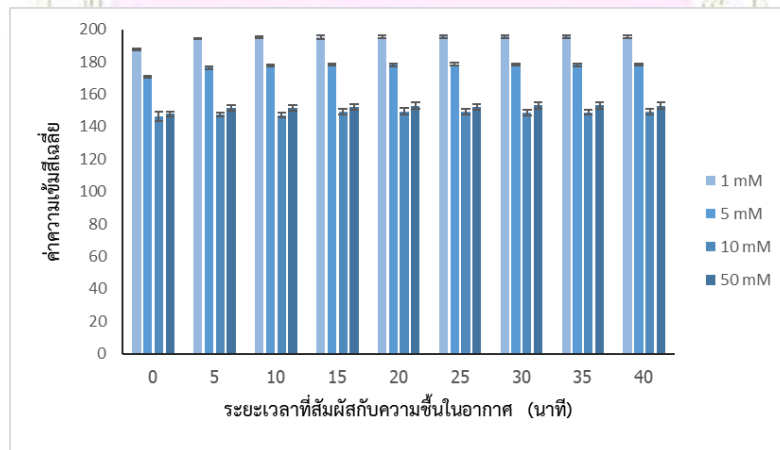
กับความชื้นในอากาศ อาจทำให้กระดาษเปลี่ยนสีกลายเป็นสีชมพูได้เร็วขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่ 1 มิลลิโมลาร์ จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับอุปกรณ์ฐานกระดาษ

ต่อมาพิจารณากระดาษที่จุ่มลงในความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที พบว่า กระดาษที่จุ่มเป็นเวลา 10 และ 20 นาที ยังมีสีน้ำเงินอ่อนอยู่ อาจทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อตรวจวัดน้ำได้ยาก และหากทิ้งไว้ให้สัมผัสกับความชื้นในอากาศ อาจทำให้กระดาษเปลี่ยนสีกลายเป็น ชมพูได้เร็วขึ้น และกระดาษที่จุ่มเป็นเวลา 30 นาที กระดาษมีสีน้ำเงินเข้มชัดเจน (มีความสว่างน้อย) มีค่าความเข้มสีเฉลี่ยน้อยกว่าใช้เวลา 10 และ 20 นาที เนื่องจากการวัดค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม imageJ นั้นเป็นการวัดความสว่างของวัตถุ หากวัตถุมีสีที่เข้มนั้นหมายความว่าวัตถุนั้นมีความสว่างน้อย ทำให้ค่าความเข้มสีที่วัดน้อยมีค่าน้อย

จากนั้นพิจารณาอุปกรณ์ฐานกระดาษที่จุ่มลงในความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่ 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที พบว่าสีของกระดาษมีสีน้ำเงินเข้มที่สุด และกระดาษมีความเข้มสีใกล้เคียงกันจากการทดสอบนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์ 10 มิลลิโมลาร์ และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที เนื่องจากเป็นลดระยะเวลาในการเตรียมอุปกรณ์ฐานกระดาษ และเป็นการใช้สารโคบอลต์คลอไรด์ให้น้อยที่สุด

**ตารางที่ 3.4** การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที





































[CoCl <sub>2</sub> ] (mM) / Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
1									
5									
10									
50									

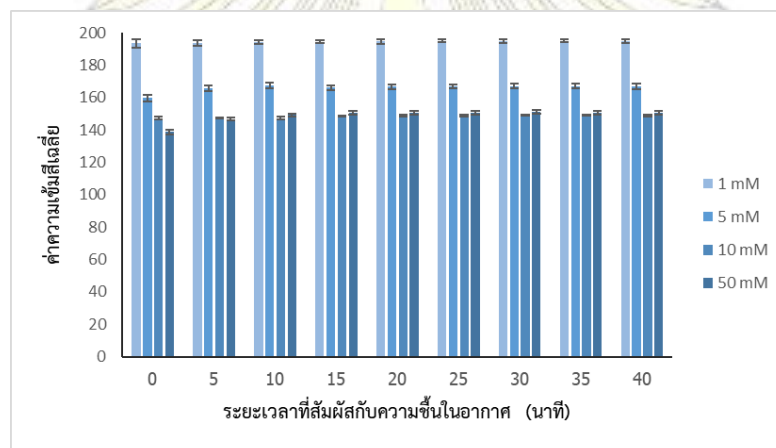


**รูปที่ 3.5** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาทีกับระยะเวลาที่สัมผัสกับความชื้นในอากาศ







































ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

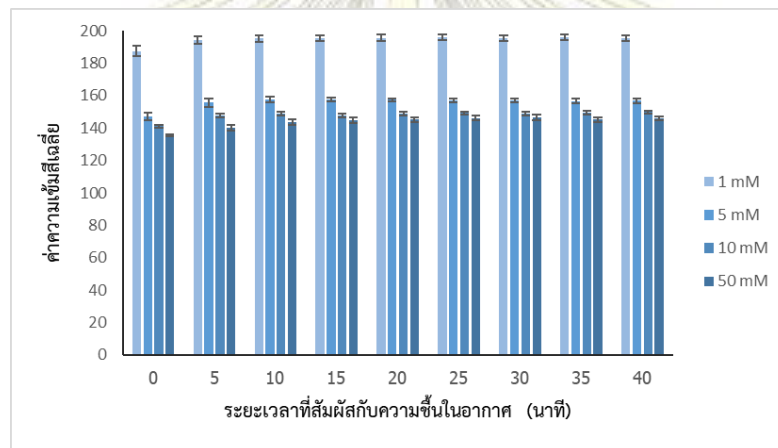
[CoCl <sub>2</sub> ] (mM) Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
1									
5									
10									
50									



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาทีกับระยะเวลาที่สัมพันธ์กับความขึ้นในอากาศ

ตารางที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

[CoCl <sub>2</sub> ] (mM) Time (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
1									
5									
10									
50									



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาทีกับระยะเวลาที่สัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ



ตารางที่ 3.7 ค่าความเข้มข้นของกระดาษที่ใช้ความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์และระยะเวลาในการจุ่มกระดาษต่าง ๆ โดยวัดความเข้มข้นเฉลี่ยของกระดาษด้วยโปรแกรม imageJ

ความเข้มข้นของ โคบอลต์คลอไรด์ (mM)	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย			
	ระยะเวลาใน การจุ่มกระดาษ (min)	10	20	30
1		194-196	194-195	195-196
5		177-179	166-168	156-158
10		148-150	148-149	148-149
50		151-153	149-151	144-146

### 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์

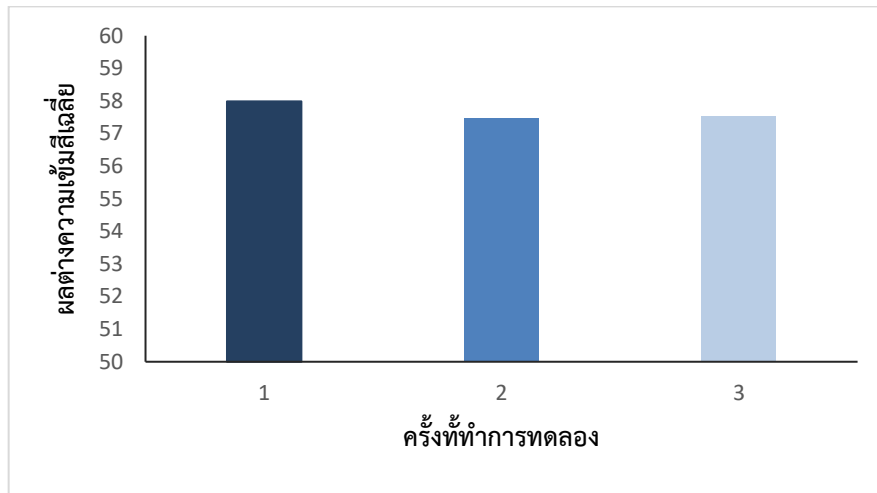
#### 3.3.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์

เมื่อได้สถานะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ฐานกระดาษแล้ว จึงทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเพื่อดูว่าอุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถเปลี่ยนสีได้หรือไม่เมื่อนำไปตรวจวัดน้ำที่ผสมอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ซึ่งใช้แทนสถานะของน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง โดยในการทดลองนี้จะเตรียมสารละลายเฮกเซนที่มีปริมาณน้ำผสมอยู่ 0.1% โดยปริมาตร ปริมาณรวมทั้งหมด 2 มิลลิลิตร ในไมโครทิวป์ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 3.8

จากการทดลองเมื่อนำอุปกรณ์ฐานกระดาษไปทดสอบน้ำในสารละลายเฮกเซน พบว่าสีของกระดาษเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู ซึ่งมองเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า และเมื่อวัดค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษด้วยโปรแกรม imageJ พบว่าค่าความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่ากระดาษสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อมีปริมาณน้ำในสารละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงนำอุปกรณ์ฐานกระดาษเคลือบโคบอลต์คลอไรด์ไปตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงได้

ตารางที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ในสารละลายเฮกเซน โดยใช้กระดาษเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที

ครั้งที่ทำการทดลอง	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง	ผลการทดลอง
1			(+) positive
2			(+) positive
3			(+) positive



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นซีเอสไอของอุปกรณ์ฐานกระดาษในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำลายอินทรีย์

### 3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฐานกระดาษโคบอลต์คลอไรด์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง













#### 3.4.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำที่เจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรล 0 ถึง 300 ppm ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

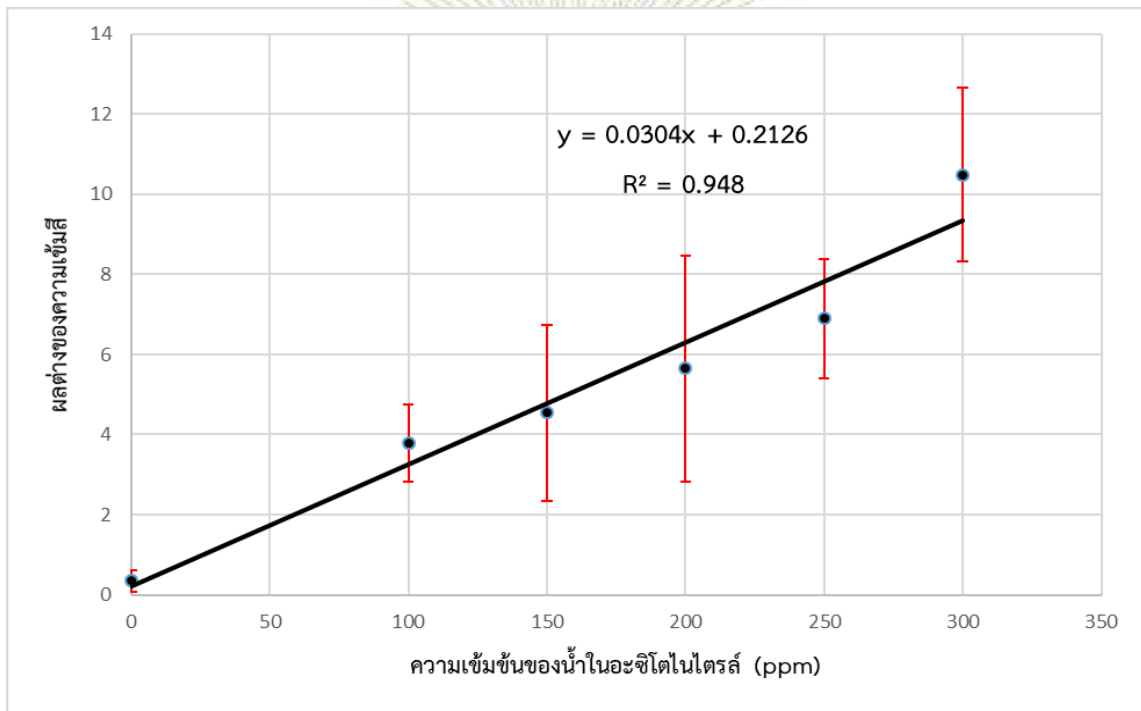
การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำที่เจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรลในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง เป็นการแก้ไขปัญหาในการเตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำน้อยมาก เจือปนอยู่ ซึ่งไม่สามารถทำการเปิดน้ำได้โดยตรง จึงต้องทำการเจือจางน้ำในสารละลายในอะซิโตนไตรลก่อน จากนั้นจึงเปิดอะซิโตนไตรลที่มีน้ำเจือจางอยู่นั้นลงในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างอีกที โดยจะเจือจางน้ำในอะซิโตนไตรลอยู่ในช่วง 0 ถึง 300 ppm แสดงผลการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 3.9 จากนั้นวัดค่าผลต่างความเข้มข้นซีเอสไอเทียบกับความเข้มข้นของน้ำในหน่วย ppm ทำซ้ำ 3 ครั้งที่แต่ละระดับความเข้มข้น นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงโดยใช้ค่าผลต่างความเข้มข้นซีเอสไอเป็นแกน y และความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไตรลเป็นแกน x และหาค่าพหุนามค่า  $R^2$  แสดงผลดังรูปที่ 3.9

จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างความเข้มข้นซีเอสไอกับความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไตรลมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ค่าพหุนามค่า  $R^2$  ได้เท่ากับ 0.9480 แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลแล้วพบว่าข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก นั่นก็เพราะว่าในการทดลองแต่ละครั้ง สีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเปลี่ยนแปลงน้อยมากและไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งตัวกระดาษ เนื่องจากน้ำที่เจือจางในอะซิโตนไตรลมีปริมาณน้อยมาก อาจทำให้อุปกรณ์ฐานกระดาษไม่โดนน้ำทั้งหมดขณะทำการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษจึงมีความไม่สม่ำเสมอ และในความเป็นจริง น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่มีน้ำปนอยู่นั้น น้ำจะแยกชั้นกับน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างชัดเจน ความเข้มข้นของน้ำที่สัมผัสกับอุปกรณ์ฐานกระดาษจะเป็น 100% การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีนี้อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อน ไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีนี้จึงไม่เหมาะสม



ตารางที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไตรล์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

ความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไตรล์ (ppm)	0	100	150	200	250	300
ก่อนทำการทดลอง						
หลังทำการทดลอง						



รูปที่ 3.9 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของน้ำในอะซิโตนไตรล์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง































### 3.4.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20.00 ไมโครลิตรในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำ เป็นการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสภาวะใกล้เคียงกับตัวอย่างจริง โดยจะทำการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิง 2 มิลลิตร เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างที่มีน้ำปริมาณน้อยมาก ๆ นั้นสามารถเตรียมได้ปริมาณน้ำต่ำสุดในน้ำมันเชื้อเพลิงอยู่ที่ 0.20 ไมโครลิตร แสดงผลการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 3.10

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดน้ำจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินกลายเป็นสีชมพู ซึ่งจากการทดลองพบว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 1.80 ไมโครลิตร สีของอุปกรณ์ฐานกระดาษจะเปลี่ยนสีได้ไม่หมดและมีสีที่ไม่สม่ำเสมอทั้งที่กระดาษ นั้นเป็นเพราะว่าในน้ำมันเชื้อเพลิงมีปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่น้อยมาก ทำให้อุปกรณ์ฐานกระดาษสัมผัสกับน้ำได้ไม่ถึง จึงสรุปได้ว่าในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 1.80 ไมโครลิตรนั้น

ให้ผลเชิงลบ (- negative result ) และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อตรวจวัดน้ำในช่วง 2.00 ถึง 20.00 ไมโครลิตร จะเห็นได้ว่าสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพูทั้งหมด นั้นแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ฐานกระดาษจะเปลี่ยนสีได้ทั้งหมดเมื่อมีปริมาณน้ำต่ำสุดอยู่ที่ 2.00 ไมโครลิตร จึงสรุปให้ผลการทดลองในการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 2.00 ถึง 20.00 ไมโครลิตรนั้น ให้ผลเชิงบวก (+ positive result)

**ตารางที่ 3.10** การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 0.20 ถึง 20 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิง 2 มิลลิลิตร

ปริมาณน้ำ (%โดยปริมาตร) ในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำ (ไมโครลิตร) ในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่าง	ก่อนทำการ ทดลอง	หลังทำการ ทดลอง	ผลการทดลอง
0.00	0.00			(-) negative
0.01	0.20			(-) negative
0.02	0.40			(-) negative
0.03	0.60			(-) negative
0.04	0.80			(-) negative
0.05	1.00			(-) negative
0.06	1.20			(-) negative
0.07	1.40			(-) negative
0.08	1.60			(-) negative
0.09	1.80			(-) negative
0.10	2.00			(+) positive
0.20	4.00			(+) positive
0.30	6.00			(+) positive
0.40	8.00			(+) positive
0.50	10.00			(+) positive







0.60	12.00			(+) positive
0.70	14.00			(+) positive
0.80	16.00			(+) positive
0.90	18.00			(+) positive
1.00	20.00			(+) positive

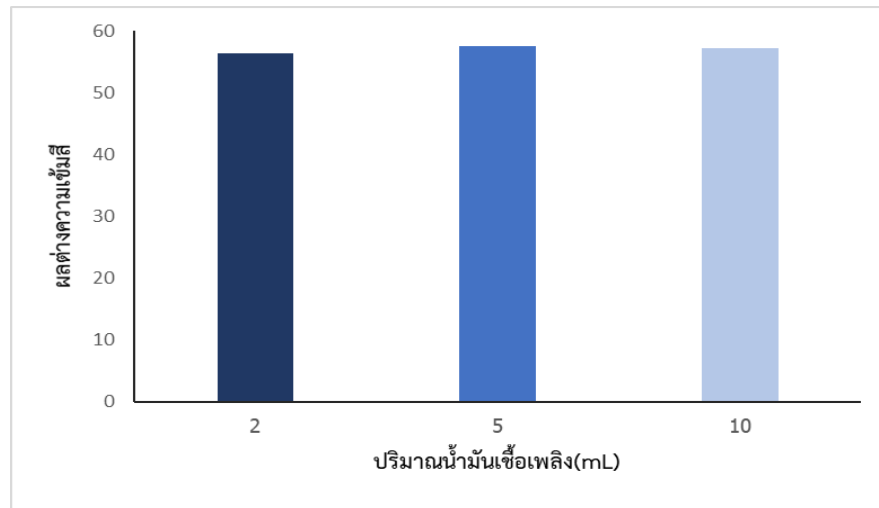
### 3.4.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่างเมื่อมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่างกัน

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างเมื่อมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่างกัน เป็นการทดสอบว่าหากมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และมีปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่เท่าเดิม อุปกรณ์ฐานกระดาษจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือไม่ โดยในการทดลองจะทำการเปิดน้ำปริมาณ 2 ไมโครลิตร ลงในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิตร (อ้างอิงจาก 3.4.2 อุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถเปลี่ยนสีได้ทั้งหมดเมื่อมีปริมาณน้ำ 2.00 ไมโครลิตร) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 3.11

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ตรวจวัด แล้วมีปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่เท่าเดิม อุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีขาวได้ทั้งหมด และมีค่าความเข้มสีเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.10 นั้นแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถตรวจวัดปริมาณน้ำได้ต่ำสุดอยู่ที่ 2.00 ไมโครลิตร และสามารถคิดปริมาณน้ำที่เจือปนในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็น % โดยปริมาตร ได้ดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำ 2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณน้ำที่ปัดเปิด (μL)	ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงรวม (mL)	ปริมาณน้ำ (% โดยปริมาตร) ในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่าง	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง	ผลการทดลอง
2.00	2.00	0.100			(+) positive
2.00	5.00	0.040			(+) positive
2.00	10.00	0.020			(+) positive



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง ปริมาณต่าง ๆ ที่มีน้ำเจือปน 2 ไมโครลิตร

ตารางที่ 3.12 ปริมาณน้ำที่เจือปนในน้ำมันเชื้อเพลิงคิดเป็น % โดยปริมาตร

ปริมาณน้ำ (μL)	ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง (mL)	ปริมาณน้ำ (%โดยปริมาตร) ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง
2.00	1.00	0.200
2.00	2.00	0.100
2.00	5.00	0.040
2.00	10.00	0.020
2.00	20.00	0.010
2.00	30.00	0.007
2.00	40.00	0.005
2.00	50.00	0.004







#### 3.4.4 การทดสอบความจำเพาะของวิธีการตรวจวัด

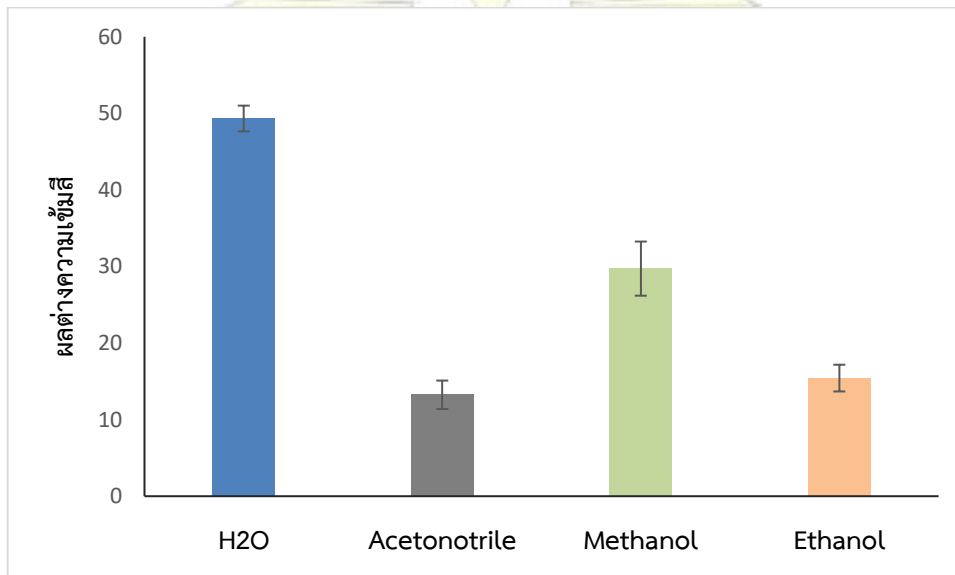
ทำการทดสอบความจำเพาะของอุปกรณ์ฐานกระดาษโดยใช้น้ำและสารอื่น ๆ ที่สามารถรบกวนการวิเคราะห์น้ำได้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ เป็นอะซิโตนไตรล์, เมทานอล และเอทานอล ปริมาณ 2.00 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิง 2.00 มิลลิลิตร เพื่อตรวจสอบว่าสารเหล่านี้สามารถรบกวนการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษในการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงได้หรือไม่

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ฐานกระดาษมีเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีขาวบางส่วนเมื่อในน้ำมันเชื้อเพลิงมีสารรบกวน ถึงแม้ว่าค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสารอื่น ๆ จะได้ค่าแตกต่างกับค่าความเข้มสีเฉลี่ยของน้ำ แต่เมื่อสังเกตที่ตัวกระดาษก็จะเห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ซึ่งแสดงว่าหากนำอุปกรณ์ฐานกระดาษไปใช้ในการตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสารรบกวนเป็นอะซิโตนไตรล์, เมทานอล หรือเอทานอล สารเหล่านี้จะรบกวนการตรวจวัดน้ำได้ ดังแสดงตาราง 3.13 และ รูปที่ 3.11



ตารางที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง

ชนิดของสารอินทรีย์ที่ส่งผล รบกวนการวิเคราะห์	ก่อนทำการ ทดลอง	หลังทำการ ทดลอง	ผลการทดลอง
H <sub>2</sub> O			(+) positive
Acetonitrile			(+) positive
Methanol			(+) positive
Ethanol			(+) positive



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษกับสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาเซนเซอร์เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยอาศัยปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์คลอไรด์ สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ฐานกระดาษเป็นดังนี้ คือใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 10 มิลลิโมลาร์ ใช้ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที และใช้ Triton X-100 เป็นการเคลือบผิวกระดาษเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ จึงนำมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษโดยนำไปตรวจวัดน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ก่อนที่จะนำไปทดสอบกับตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงจริง พบว่าอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู จากนั้นจึงนำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษมาตรวจหาปริมาณน้ำที่ต่ำที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้ โดยทำการตรวจวัดปริมาณน้ำในช่วง 2.00 ถึง 20.00 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาตร 2 มิลลิลิตร พบว่าอุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพูได้ทั้งหมดเมื่อมีปริมาณน้ำต่ำสุดที่ 2.00 ไมโครลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็น 5 และ 10 มิลลิลิตร แต่ยังคงมีปริมาณน้ำอยู่ที่ 2.00 ไมโครลิตร อุปกรณ์ฐานกระดาษสามารถเปลี่ยนเป็นสีขาวได้ทั้งหมดเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษสามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงได้ต่ำสุดอยู่ที่ 2.00 ไมโครลิตร

การตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดฐานกระดาษเชิงสีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จะพบได้ว่าเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็ว พกพาได้สะดวก ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงได้จริง และเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า



## เอกสารอ้างอิง

1. “ปิโตรเลียม.”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก [http://www.nakhamwit.ac.th/pingpong\\_web/Petro\\_Chem.htm](http://www.nakhamwit.ac.th/pingpong_web/Petro_Chem.htm) (accessed April 15, 2018)
2. กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. การตรวจสอบน้ำมันปดอมปนเบื้องต้น. 2557. หน้า 1-6 [เข้าถึง 15 เมษายน 2560]. เข้าถึงได้ที่: [http://www.doeb.go.th/v5/show\\_km.php?tid=66](http://www.doeb.go.th/v5/show_km.php?tid=66)
3. K. Fischer, Neues verfahren zur maßanalytischen bestimmung deswassergehaltes von flüssigkeiten und festen körpern, *Angew. Chem*, **1935**; 48: 394–396.
4. C. Harris, Determination of water, *Talanta*, **1972**; 19: 1523–1547.
5. R. Nubbaum, D. Lischke, H. Paxman, B. Wolf, Quantitative GC determination of water in small samples, *Chromatographia*, **2000**; 51: 119–121.
6. S. H. Cho, H. I. Chung, Y. A. Woo, H. J. Kim, Determination of water content in ethanol by miniaturized near-infrared (NIR) system, *Bull. Korean Chem. Soc*, **2005**; 26: 115–118.
7. D. Citterio, K. Minamihashi, Y. Kuniyoshi, H. Hisamoto, S. I. Sasaki, K. Suzuki, Determination of water contents in leaves by a near-infrared multispectralimaging technique, *Anal. Chem*, 2001; 73: 5339–5345.
8. “ผลของคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงต่อเครื่องยนต์.”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539682159&Ntype=11> (accessed April 15, 2018)
9. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. water in aviation fuels. 1985. page 2 [cited 2017 April 15]. Available from: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC20-125.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC20-125.pdf)
10. “Cobalt Chloride: Colorful Moisture Detector”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <https://chlorine.americanchemistry.com/Science-Center/Chlorine-Compound-of-the-Month-Library/Cobalt-Chloride-Colorful-Moisture-Detector> (accessed April 15, 2018)
11. A. C. Pereira, B. F. Reis, F. R.P. Rocha. An air carrier flow system for the spectrophotometric determination of water in biodiesel exploiting bleaching of the cobalt chloride complex. *Talanta*, **2014**; 13: 121-125
12. S. Baena, S. L. Repetto, Dr C.P. Lawson, Dr. J. K.-W. Lam. Behaviour of Water in Jet Fuel. *Aerospace Sciences*. **2013**; 60: 35-44
13. W. A. Martinez, S. T. Phillips, M. J. Butte, M. G. Whitesides. Patterned Paper as a Platform for inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays. *Angew. Chem. Int. Ed*. **2007**; 46: 1218-1320
14. X. Li, J. Tian, T. Nguyen, W. Shen. Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment. *Anal. Chem*. **2008**; 80: 9131-9134
15. W. A. Martinez, S. T. Phillips, M. J. Butte, M. G. Whitesides. Diagnostics for the Developing World Microfluidic Paper-Based Analytical Devices, Portable Bioassays. *Anal. Chem*. **2010**; 82: 3-10
16. “ประโยชน์ที่อาจคาดไม่ถึงของกระดาษ ในการวิเคราะห์สาร.”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://ost.thaiembdc.org/2016/?p=176> (accessed April 15, 2018)

17. N. Gao, P. Huang, F. Wu. Colorimetric detection of melamine in milk based on Triton X-100 modified gold nanoparticles and its paper-based application. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. **2018**; 192: 174-180
18. L. Cao, C. Fang, R. Zeng, X. Zhao, Y. Jiang, Z. Chen. Paper-based microfluidic devices for electrochemical immunofiltration analysis of human chorionic gonadotropin. *Biosensors and Bioelectronics*. **2017**; 92: 87-94
19. W. Chu, Y. Chen, W. Lui, M. Zhao, H. Li. Paper-based chemiluminescence immunodevice with temporal controls of reagent transport technique. *Sensors and Actuators B: Chemical*. **2017**; 250: 324-332
20. X. Zhang, S. N. Ding. Graphite paper-based bipolar electrode electrochemiluminescence sensing platform. *Biosensors and Bioelectronics*. **2017**; 94: 47-55
21. M. Zhang, L. Ge, S. Ge, M. Yan, J. Yu, J. Huang, S. Lui. Three-dimensional paper-based electrochemiluminescence device for simultaneous detection of  $Pb^{2+}$  and  $Hg^{2+}$  based on potential-control technique. *Biosens Bioelectron*. **2013**; 41: 544-550
22. Y. Zhang, P. Zuo, B. C. Ye. A low-cost and simple paper-based microfluidic device for simultaneous multiplex determination of different types of chemical contaminants in food. *Biosens Bioelectron*. **2015**; 68: 14-19
23. P. Kumar, R. Sakla, A. Ghosh, D. A. Jose. Reversible Colorimetric Sensor for Moisture Detection in Organic Solvents and Application in Inkless Writing. *ACS Appl Mater Interfaces*. **2017**; 30: 25600-25605
24. N. Ratnarathorn, O. Chailapakul, C. S. Henry, W. Dungchai. Simple silver nanoparticle colorimetric sensing for copper by paper-based devices. *Talanta*. **2012**; 99:552-557
25. J. Peng, J. Ling, X. Q. Zhang, Y. L. Zhang, Q. E. Cao, Z. T. Ding. A rapid, sensitive and selective colorimetric method for detection of ascorbic acid. *Sensors and Actuators B: Chemical*. **2015**; 221: 708-716
26. T. Kim, Y. Kim. A Water Indicator Strip: Instantaneous Fluorogenic Detection of Water in Organic Solvents, Drugs, and Foodstuffs. *Anal. Chem*. **2017**; 89: 3768-3772
27. “โปรแกรม ImageJ คืออะไร.” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://comdigest.blogspot.com/2015/10/imagej.html> (accessed April 15, 2018)
28. C. B. Ojeda, F. S. Rojas. Process Analytical Chemistry: Applications of Ultraviolet/ Visible Spectrometry in Environmental Analysis. *Appl. Spectrosc. Rev*. **2009**; 44: 245-265
29. H. X. Bai, X. R. Yang. Spectrophotometric Determination of Water Content in Alcohol Organic Solvents. *Appl. Journal of the Chinese Chemical Society*. **2007**; 45: 619-624
30. L. Zhou, X. H. Liu, H-X. Bai, H. J. Wang. A simple method for determining water content in organic solvents based on cobalt(II) complexes. *Chinese Chemical Letters*. **2010**; 22: 189-192.
31. H. Park, S. K. Chang. Signaling of water content in organic solvents by solvatochromism of a hydroxynaphthalimide-based merocyanine dye. *Dyes and Pigments*. **2015**; 122: 324-330.
32. Y. U. Jung, M. G. Choi, S. H. Lee, S. K. Dual signaling of water contents of biofuel-relevant ethanol and butanol by pyranines. *Sensors and Actuators B: Chemical*. **2017**; 241: 342-348.

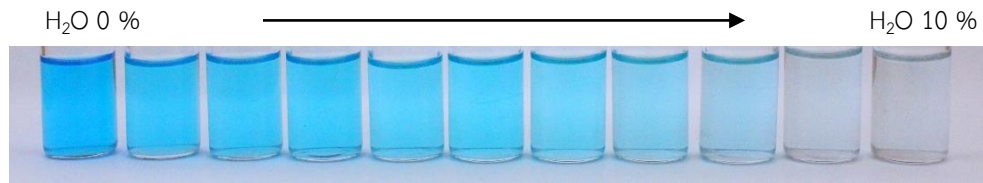


33. T. T. M. Duyen, H. Matsuura, K. Ujiie, M. Muraoka, K Harada, K. Hirata. Paper-based colorimetric biosensor for antibiotics inhibiting bacterial protein synthesis. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2017; 123: 96-100.



### ภาคผนวก

รูปที่ A-1 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น



ตารางที่ A-1 ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษสารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มสีเฉลี่ย		
	No surfactant	Diethylene glycol monobutyl ether	Triton X-100
0	208.322	176.804	170.663
5	211.699	181.797	176.369
10	210.888	181.701	177.643
15	211.951	181.638	178.233
20	212.221	181.742	178.153
25	212.602	181.435	178.509
30	212.679	181.801	178.204
35	212.597	181.979	178.131
40	212.526	181.411	178.322

ตารางที่ A-2 ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลาย โคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มสีเฉลี่ย		
	No surfactant	Diethylene glycol monobutyl ether	Triton X-100
0	202.643	173.669	159.794
5	206.286	177.172	165.784
10	206.844	177.261	167.285
15	206.863	176.980	166.056
20	207.360	175.853	166.678
25	207.277	175.612	166.725
30	207.615	175.620	166.951
35	207.598	175.375	167.086
40	207.206	175.734	166.7483333

ตารางที่ A-3 ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารเคลือบผิวต่างกัน โดยจุ่มกระดาษลงในสารละลาย โคบอลต์คลอไรด์ 5 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มสีเฉลี่ย		
	No surfactant	Diethylene glycol monobutyl ether	Triton X-100
0	202.079	166.848	147.153
5	204.576	166.829	155.581
10	205.508	168.066	157.624
15	205.393	167.821	157.601
20	205.743	167.975	157.523
25	205.607	166.872	157.075
30	205.094	167.897	157.142
35	205.203	167.313	156.698
40	204.555	167.419	156.754

ตารางที่ A-4 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์  
ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มข้น			
	1 mM	5 mM	10 mM	50 mM
0	187.622	170.663	146.227	147.997
5	194.211	176.369	147.379	151.617
10	194.987	177.643	147.039	151.562
15	195.118	178.233	148.958	152.083
20	195.300	178.153	149.246	152.938
25	195.529	178.509	149.239	152.202
30	195.468	178.204	148.576	153.194
35	195.491	178.131	148.889	153.025
40	195.217	178.322	148.977	152.832

ตารางที่ A-5 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์  
ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัสกับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มข้น			
	1 mM	5 mM	10 mM	50 mM
0	193.3893	159.7947	147.2443	138.681
5	193.3893	165.784	147.353	146.7093
10	194.3923	167.2853	147.2987	149.2233
15	194.3463	166.056	148.5067	150.628
20	194.5217	166.6783	148.796	150.4633
25	195.0293	166.7257	148.7693	150.546
30	194.7773	166.9517	149.109	151.0653
35	194.9263	167.0863	148.9593	150.5683
40	194.7297	166.7483	148.981	150.612



ตารางที่ A-6 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษที่ใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาในการจุ่มกระดาษ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

ระยะเวลาที่สัมพันธ์กับ ความชื้นในอากาศ (นาที)	ค่าความเข้มข้น			
	1 mM	5 mM	10 mM	50 mM
0	187.5553	147.1533	141.0177	135.4333
5	194.375	155.5817	147.4843	140.045
10	195.1877	157.6243	148.866	143.6247
15	195.4307	157.601	147.948	144.7643
20	195.5733	157.523	148.86	145.2113
25	195.849	157.0753	149.279	146.1797
30	195.6123	157.1423	148.9383	146.3303
35	195.9383	156.698	149.2583	145.1407
40	195.502	156.7543	149.771	145.822

ตารางที่ A-7 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีน้ำปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ในสารละลายเฮกเซน โดยใช้กระดาษเคลือบสารละลายโคบอลต์คลอไรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที

ครั้งที่ทำการทดลอง	ค่าความเข้มข้น		ผลต่างความเข้มข้น
	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง	
1	142.162	200.148	57.986
2	143.804	201.282	57.478
3	143.461	200.988	57.527

ตารางที่ A-8 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อน้ำเจือจางอยู่ในอะซิโตนไทรล์ในน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง

ความเข้มข้นของน้ำใน อะซิโตนไทรล์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น		ผลต่างความเข้มข้น
	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง	
0	155.141	155.891	0.750
100	154.053	157.839	3.786
150	153.346	157.894	4.548
200	154.561	160.206	5.645
250	156.229	163.123	6.894
300	155.444	165.938	10.494

ตารางที่ A-9 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำ 2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณน้ำที่ ปิเปต ( $\mu\text{L}$ )	ปริมาณน้ำมัน เชื้อเพลิงรวม (mL)	ปริมาณน้ำ (%โดยปริมาตร) ใน น้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่าง	ค่าความเข้มข้น		ผลต่างความ เข้มข้น
			ก่อนทำการ ทดลอง	หลังทำการ ทดลอง	
2.00	2.00	0.100	153.133	209.436	56.303
2.00	5.00	0.040	154.363	211.868	57.505
2.00	10.00	0.020	154.133	211.407	57.273

ตารางที่ A-10 ค่าความเข้มข้นของอุปกรณ์ฐานกระดาษเมื่อมีสารรบกวนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง

ชนิดของสารอินทรีย์ที่ส่งผล รบกวนการวิเคราะห์	ค่าความเข้มข้น		ผลต่างความเข้มข้น
	ก่อนทำการทดลอง	หลังทำการทดลอง	
H <sub>2</sub> O	157.229	206.557	49.328
Acetonitrile	154.209	167.458	13.249
Methanol	155.633	185.357	29.724
Ethanol	154.994	170.422	15.428

## ประวัติผู้วิจัย

นางสาวสรिता เนาว์รุ่งโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 14 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2539 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพรหมานุสรณ์ จังหวัดเพชรบุรี เมื่อปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 353/1 หมู่ 4 ตำบลบ้านหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี รหัสไปรษณีย์ 76000 อีเมล prae.sarida@gmail.com

