



โครงการ  
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ      การพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคเชิงสีเพื่อการตรวจวัด  
ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน  
Development of paper-based analytical device for colorimetric  
determination of water in aviation fuel

ชื่อนิสิต            นายนราธร นินทร์พย์

ภาควิชา             เคมี

ปีการศึกษา        2560

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคเชิงสีเพื่อการตรวจวัด  
ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

Development of paper-based analytical device for colorimetric  
determination of water in aviation fuel

โดย  
นายนรารธ นินทร์พย์

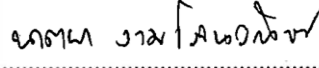
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560

โครงการ การพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคเชิงสีเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมัน  
เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

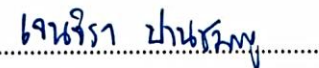
โดย นายนราธร นิตร์พย์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นาตยา งามโรจนวนิชย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ชัยลภากุล)

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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ม.ล.ศิริพัสตร์ ไชยันต์)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

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

วันที่ ..... เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ  ดีมาก  ดี  พอใช้



Project Title           Development of paper-based analytical device for colorimetric determination of water in aviation fuel

Student Name           Mr. Narathorn Nisab    Student ID 5733110923

Advisor Name           Professor Orawon Chailapakul, Ph.D.

Co-advisor Name       Janjira Panchompoo, D.Phil.

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

### Abstract

A low-cost, simple and sensitive colorimetric paper-based analytical device for the determination of water in aviation fuel was developed using Alizarin Red S as the colorimetric reagent. Deprotonation of Alizarin Red S was obtained using fluoride ion from Brønsted-Lowry acid–base-type reaction. In the presence of water in aviation fuel, the deprotonated form of Alizarin Red S was reprotonated by water resulting in the change of color from purple to yellow. This color change can be easily observed by the naked eye. The influences of experimental variables on the sensitivity of the proposed sensor, such as the concentration of Alizarin Red S (deprotonated form, purple color), the ratio of concentration between fluoride ion and Alizarin Red S (protonated form, yellow color), the reaction time and interferences, were investigated. Under optimized conditions, the lowest water content in the real sample that can be detected is 1.2  $\mu\text{L}/40 \text{ mL}$  or 30 ppm. This colorimetric assay shows the advantages of rapid response and high stability. In addition, moisture in the air does not interfere color change. It demonstrates that the developed device can be used as an alternative tool for water detection in aviation fuel sample and can also be applied in fieldwork effectively.

Keywords: paper-based analytical device, colorimetric method, Alizarin Red S, water content in aviation fuel

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรรธรณ ชัยลภากุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัย ตลอดจนเครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ และสารเคมีต่าง ๆ รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจตลอดโครงการนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ สำหรับการให้คำปรึกษาเพิ่มเติม แนะนำทางในการทำวิจัย ตรวจสอบแบบเสนอและรายละเอียดโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ (สป. 1 และ สป. 2)

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นาตยา งามโรจนวณิชย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ม.ล.ศิริพัสตร์ ไชยันต์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการ และกรรมการประเมินโครงการนี้

ขอขอบคุณ ดร.สุดเขต ไชโย และพี่ ๆ สมาชิกทุกคนในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชิงเคมีไฟฟ้าและเชิงแสง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยในโครงการนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บริษัท บริการเชื่อมเพลิงการบินกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินเพื่อใช้วิจัยในโครงการนี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ณ
สารบัญตาราง	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ทฤษฎี	3
1.4.1 สีย้อมอินทรีย์ที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ในตัวทำละลายอินทรีย์	3
1.4.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	4
1.4.3 เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี	5
1.4.4 โปรแกรม imageJ	6
1.4.5 เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	6
1.4.6 เทคนิคดีฟิวส์รีเฟล็กแทนส์ ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	7
1.4.7 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน	7
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
<b>บทที่ 2 การทดลอง</b>	<b>10</b>
2.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์	10
2.2 รายการสารเคมี	11
2.3 การเตรียมสารละลาย	12
2.3.1 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร	12
2.3.2 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร	12
2.3.3 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของ เตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1	13
2.3.4 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของ เตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1 10:1 15:1 20:1 และ 25:1	13



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร	14
2.3.6 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	14
2.3.7 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	14
2.3.8 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) สำหรับการศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	14
2.4 การศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	15
2.5 การเตรียมและเก็บรักษาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	16
2.6 การตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยด้วยโปรแกรม imageJ	17
2.7 การยืนยันการมีอยู่ของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคดีฟิวส์รีเฟล็กแทนส์ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี	19
2.8 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ เพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน	19
2.8.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสม	19
2.8.2 การหาสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียม ฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ที่เหมาะสม	19
2.8.3 การหาเวลาที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เหมาะสม	20
2.9 การทดสอบผลของความชื้นในอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	20
2.10 การทดสอบผลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	20
2.11 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ เมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน	21
2.12 การทดสอบผลของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	21
2.13 การทดสอบหาสารรบกวนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	21



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	22
3.1 การศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	22
3.2 การยืนยันการมีอยู่ของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคดีฟิวส์รีเฟล็กแทนส์ ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	25
3.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ เพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน	26
3.3.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสม	26
3.3.2 การหาสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ที่เหมาะสม	27
3.3.3 การหาเวลาที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เหมาะสม	29
3.4 การทดสอบผลของความชื้นในอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	31
3.5 การทดสอบผลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	32
3.6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ เมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน	33
3.7 การทดสอบผลของปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	35
3.8 การทดสอบหาสารรบกวนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องบินด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	36
<b>บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง</b>	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	42
ประวัติผู้วิจัย	45

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำ (Water detector) ของบริษัท SHELL	2
รูปที่ 1.2 ปฏิกริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรีของสีย้อมอินทรีย์ ที่มีหมู่ฟีนอล (อะลิซาริน เรด เอส)	3
รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากปฏิกริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรี ของอะลิซาริน เรด เอส และฟลูออไรด์ไอออนในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ	4
รูปที่ 1.4 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมอย่างง่ายสำหรับการตรวจวัดความชื้น ในตัวทำละลายอินทรีย์	5
รูปที่ 1.5 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษสำหรับการตรวจวัดกรดแอสคอร์บิก	5
รูปที่ 1.6 โปรแกรม imageJ ในระบบปฏิบัติการ Mac OS X	6
รูปที่ 2.1 กล้องควบคุมแสง	10
รูปที่ 2.2 (ก) ภาพขณะบรรจุตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (ข) แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน	11
รูปที่ 2.3 การเตรียมและเก็บรักษาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	16
รูปที่ 3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ในตัวทำละลาย อะซีโตน	23
รูปที่ 3.2 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ที่ใช้ศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีในสภาวะต่าง ๆ	23
รูปที่ 3.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในตัวทำละลายอะซีโตนที่มีปริมาณน้ำในระบบร้อยละ 0 ถึง 5 โดยปริมาตร	24
รูปที่ 3.4 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่มีปริมาณน้ำในระบบ ร้อยละ 0 ถึง 5 โดยปริมาตร	24
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (1) กระดาษกรอง และ (2) อุปกรณ์วิเคราะห์ ฐานกระดาษ	25
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มข้นกับความเข้มข้น ของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form)	27
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มข้นกับสัดส่วนความเข้มข้น ของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form)	29
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มข้นกับระยะเวลาในการ เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	30

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลของความชื้นในอากาศที่มีต่ออุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	31
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังสัมผัสกับน้ำ	32
รูปที่ 3.11 กราฟแท่งแสดงผลต่างความชื้นสัมพัทธ์ของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ หลังทดสอบกับปริมาณน้ำ 1.2 ถึง 2.0 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับ เครื่องบินปริมาตร 2 มิลลิลิตร	34
รูปที่ 3.12 กราฟแท่งแสดงผลต่างความชื้นสัมพัทธ์ของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ หลังทดสอบกับปริมาณน้ำ 1.2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 5 10 20 และ 40 มิลลิลิตร	36



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	เกรดของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินตามข้อกำหนดของแต่ละประเทศ	7
ตารางที่ 2.1	ปริมาตรของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร	12
ตารางที่ 2.2	ปริมาตรของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1 10:1 15:1 20:1 และ 25:1	13
ตารางที่ 2.3	ปริมาตรของน้ำ (Milli-Q water) ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) สำหรับศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	15
ตารางที่ 3.1	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) แตกต่างกัน	26
ตารางที่ 3.2	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) แตกต่างกัน	28
ตารางที่ 3.3	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ใช้เวลาในการเตรียมแตกต่างกัน	30
ตารางที่ 3.4	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อตั้งทิ้งไว้นอกเคชิกเคเตอร์ ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน	31
ตารางที่ 3.5	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังสัมผัสกับน้ำในเวลาที่แตกต่างกัน	32
ตารางที่ 3.6	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำ ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน	33
ตารางที่ 3.7	การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องบินปริมาณแตกต่างกัน	35
ตารางที่ 3.8	ผลการทดสอบสารบวกรวณการวิเคราะห์	37
ตารางที่ 3.9	สภาพขั้วของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ	37
ตารางที่ 3.10	แสดง Paired t-test ของผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน	42
ตารางที่ 3.11	แสดง Paired t-test ของผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยในการทดสอบผลของปริมาณ น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ ฐานกระดาษ	43
ตารางที่ 3.12	ตารางแสดงค่า Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ	44

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่ใช้ในหลายภาคส่วนทั้งในอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง เกษตรกรรม รวมทั้งในครัวเรือนทั่วไป ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งช่วยส่งเสริมเศรษฐกิจและความก้าวหน้าของประเทศ โดยน้ำมันเชื้อเพลิงแบ่งได้หลายประเภทตามจุดประสงค์การใช้งาน<sup>1</sup> เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันเตา น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน และก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นต้น โดยคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเครื่องจักรหรือยานพาหนะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้งาน

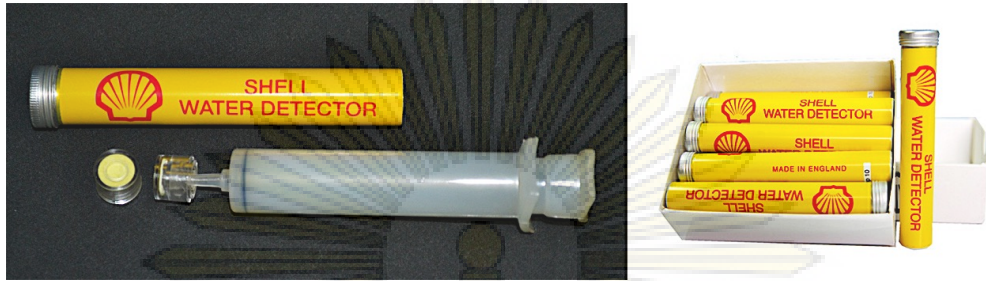
คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละประเภทถูกควบคุมด้วยมาตรฐานที่แตกต่างกันซึ่งสามารถตรวจสอบเบื้องต้น โดยพิจารณาจากสี ลักษณะที่ปรากฏ การระเหยในหน่วยวินาที ค่าความถ่วงจำเพาะเอพีโอ (API) การละลายหมึก ปริมาณน้ำ และปริมาณเอทานอลในหน่วยร้อยละโดยปริมาตร<sup>2</sup> โดยโครงการนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน หากมีปริมาณน้ำมากกว่า 30 มิลลิกรัม/ลิตร<sup>3</sup> น้ำมันเชื้อเพลิงนั้นจะไม่ถูกอนุญาตให้นำไปใช้งาน เนื่องจากมีโอกาสสูงที่จะทำให้เครื่องยนต์ของเครื่องบินเกิดความเสียหาย เพราะน้ำมันจะเกิดการแข็งตัวเป็นน้ำแข็งในขณะที่เครื่องบินเคลื่อนที่อยู่ภายในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังน้ำมัน ซึ่งเพิ่มโอกาสในการเน่าเสียของน้ำมันเชื้อเพลิง อีกทั้งยังสร้างปัญหาการกัดกร่อนจากกรดที่จุลินทรีย์สร้าง<sup>4</sup>อีกด้วย

น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินมีสมบัติทางกายภาพและเคมีส่วนใหญ่ที่เหมือนกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินจึงสามารถวิเคราะห์ได้ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาและพัฒนาวิธีการหาปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น การไทเทรตคาร์ลฟิสเชอร์ (Karl Fischer titration)<sup>5</sup> แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)<sup>6</sup> เซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้า (Capacitance sensor)<sup>7</sup> และฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)<sup>8</sup> เป็นต้น วิธีเหล่านี้มีข้อดีคือ มีความไว (Sensitivity) และความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ที่สูง แต่มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ที่สำคัญ เช่น สารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษ มีราคาแพง ใช้เวลาวิเคราะห์ค่อนข้างนาน การสังเคราะห์สารเคมีที่เกิดอันตรกริยากับน้ำแล้วให้ฟลูออเรสเซนซ์ทำได้ยาก ต้องแปลผลโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ผู้วิเคราะห์ต้องมีความรู้ความเชี่ยวชาญทางเทคนิคและเครื่องมือโดยเฉพาะ และนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนามได้ยาก เป็นต้น แต่ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่พัฒนาวิธีการหาปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method)<sup>9,10,11,12</sup> ซึ่งจัดเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ง่ายไม่จำเป็นต้องแปลผลโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ เนื่องจากสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้โดยตรงด้วยตาเปล่า วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ใช้สารเคมีที่มีราคาถูกซึ่งมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ มีความไวและความจำเพาะเจาะจงในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์ที่มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และนำไปใช้ในภาคสนามได้ง่าย

ปัจจุบันมีการมุ่งเน้นพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดเชิงสีบนอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ (Colorimetric paper-based analytical devices) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สร้างจากกระดาษเยื่อเซลลูโลส ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ พกพาสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ซับซ้อน สามารถใช้แล้วทิ้งได้ทันที และนำไปใช้ในภาคสนามได้ การตรวจวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงจะใช้โปรแกรม imageJ โดยตรวจวัดผ่านรูปถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลร่วมกับกล่องควบคุมแสง เพื่อป้องกันค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดเกิดความคลาดเคลื่อน



ในเชิงพาณิชย์มีอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินโดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี ดังรูปที่ 1.1 หากมีน้ำอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงเกิน 30 มิลลิกรัม/ลิตร กระดาษจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียว อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษดังกล่าวยังมีราคาที่สูง



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำ (Water detector) ของบริษัท SHELL

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินโดยใช้เทคนิคการตรวจวัดเชิงสีบนอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ ใช้ปริมาณของสารตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่น้อย ประหยัดเวลา ใช้งานง่าย และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่า อีกทั้งสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการใช้งานในภาคสนามได้

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษโดยใช้เทคนิคการตรวจวัดเชิงสีเพื่อตรวจวัดปริมาณน้ำที่ตกค้างในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ศึกษาหาสภาวะในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เหมาะสม ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้น ศึกษาผลของความชื้นในอากาศและสารรบกวนที่อาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์

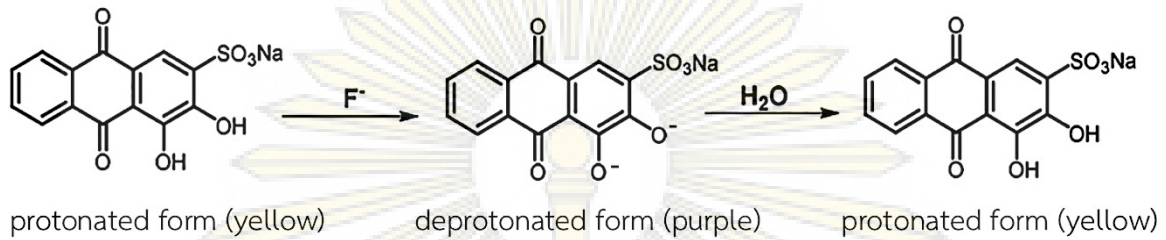
## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษต้นแบบที่สามารถใช้ตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินได้จริง ซึ่งมีราคาถูก พกพาสะดวก ใช้งานง่าย และวิเคราะห์ได้รวดเร็ว เหมาะแก่การใช้ในภาคสนาม

## 1.4 ทฤษฎี

### 1.4.1 สีย้อมอินทรีย์ที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์<sup>11,12</sup>

สีย้อมอินทรีย์ที่มีหมู่ฟีนอล (Phenolic organic dye) มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงสีที่นำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ได้จากการรับส่งโปรตอนผ่านปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรี (Brønsted-Lowry acid-base reaction) ดังแผนภาพต่อไปนี้

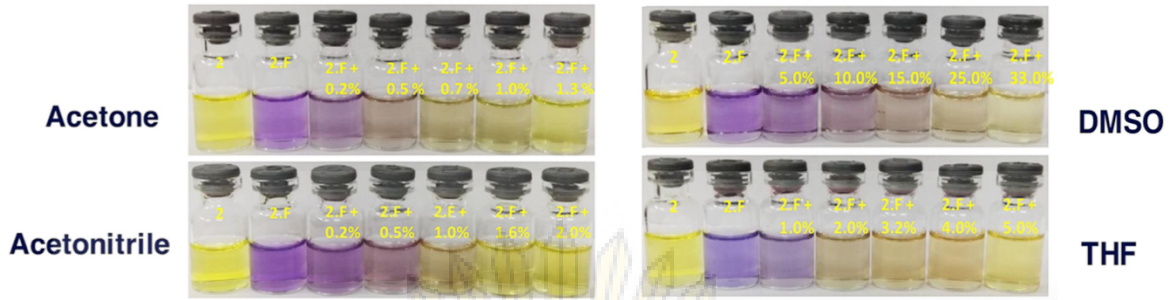


รูปที่ 1.2 ปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรีของสีย้อมอินทรีย์ที่มีหมู่ฟีนอล (อะลิซาริน เรด เอส)

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าอะลิซาริน เรด เอส (Alizarin Red S) ในรูปที่มีหมู่ฟีนอล (protonated form) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นรูปที่โปรตอนในหมู่ฟีนอลถูกดึงออกไป (deprotonated form) เมื่อเติมฟลูออไรด์ไอออนเข้าไปในสารละลายของอะลิซาริน เรด เอส เนื่องจากฟลูออไรด์ไอออนจะทำหน้าที่เป็นเบสของเบรินสเตด-ลาวรี คือรับโปรตอนในหมู่ฟีนอลของอะลิซาริน เรด เอส แล้วเกิดปฏิกิริยาต่อกับฟลูออไรด์ไอออนที่มีมากเกินพอในระบบกลายเป็นไบฟลูออไรด์แอนไอออน ( $HF_2^-$ ) ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียรสูง สนับสนุนให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น อะลิซาริน เรด เอส ในรูปที่โปรตอนในหมู่ฟีนอลถูกดึงออกไปจะมีระบบไพ-คอนจูเกต ( $\pi$ -conjugated system) ในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างไปจากเดิม ส่งผลทำให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลือง เมื่ออะลิซาริน เรด เอส อยู่ในรูปที่มีโปรตอนในหมู่ฟีนอล เป็นสารละลายสีม่วง เมื่ออะลิซาริน เรด เอส อยู่ในรูปที่โปรตอนในหมู่ฟีนอลถูกดึงออกไป หากเติมน้ำเข้าไปในระบบจะส่งผลทำให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนสีอีกครั้ง เนื่องจากโมเลกุลน้ำจะไปรบกวนสมดุล โดยการล้อมรอบฟลูออไรด์ไอออน (solvated) ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนนั้นไม่สามารถทำหน้าที่เป็นเบสของเบรินสเตด-ลาวรีได้อีกต่อไป คือโมเลกุลน้ำจะรบกวนสมดุลโดยการลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ไอออนซึ่งเป็นสารตั้งต้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดการย้อนกลับ อะลิซาริน เรด เอส ในรูปที่โปรตอนในหมู่ฟีนอลถูกดึงออกไปซึ่งทำให้สารละลายมีสีม่วงก็จะถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นรูปที่มีโปรตอนในหมู่ฟีนอลซึ่งทำให้สารละลายมีสีเหลืองอีกครั้ง โดยความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนแปลงจากสีม่วงเป็นสีเหลืองจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ในเทคนิคการตรวจวัดเชิงสีเพื่อตรวจวัดปริมาณน้ำได้

นอกจากอะลิซาริน เรด เอส แล้ว ยังมีสีย้อมอินทรีย์เชิงพาณิชย์อีกหลายชนิดที่มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีเช่นเดียวกัน แต่มีราคาที่สูงและปริมาณที่ได้จากการสังเคราะห์ค่อนข้างน้อยซึ่งนำไปปรับใช้ในการทดลองได้ยาก ได้แก่ ซูดาน-3 (Sudan-III) ดิสเพิร์ส เยลโลว์ 7 (Disperse Yellow 7) และ 4-(4-ไนโตรฟีนิลเอโซ)-1-แนพทอล (4-(4-Nitrophenylazo)-1-naphthol) เป็นต้น





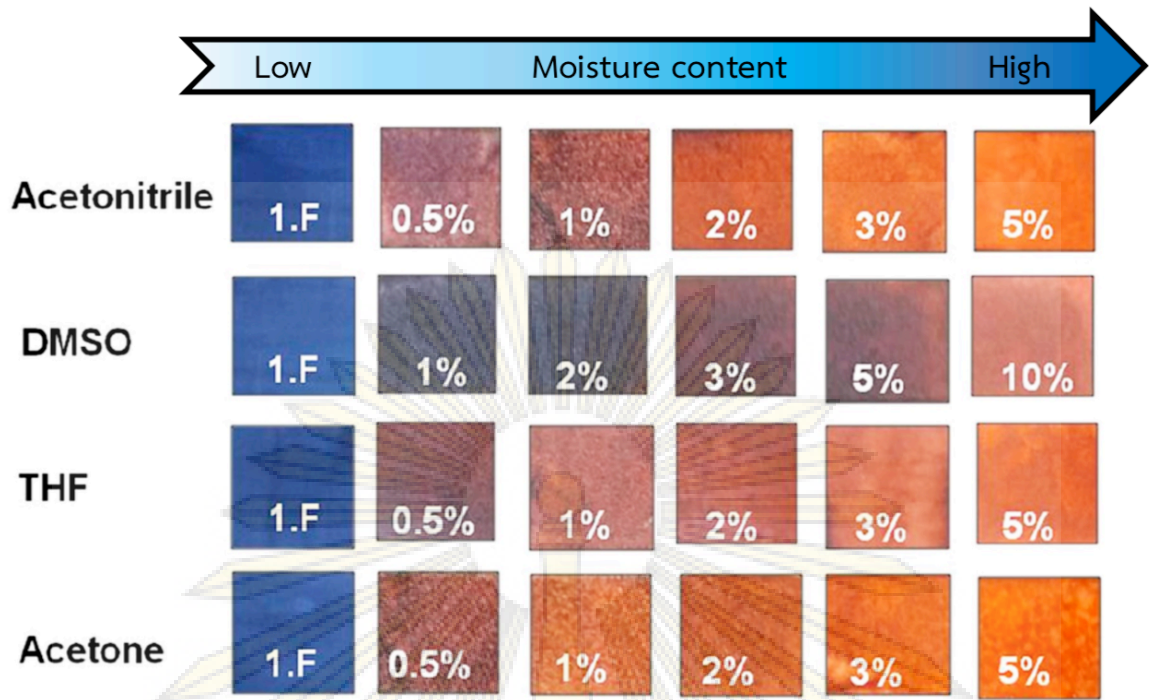
รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรีของอะลิซาริน เรด เอส และ ฟลูออโรไดโออน ในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

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

เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดใหญ่ ราคาแพง มีความยุ่งยากในการใช้งาน ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีความเชี่ยวชาญเฉพาะในทางเทคนิค และไม่สามารถพกพาไปใช้นอกห้องปฏิบัติการ ทำให้นักวิจัยได้คิดค้นวิธีวิเคราะห์ใหม่ ๆ ขึ้นมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ การใช้กระดาษซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาซื้อได้ทั่วไป ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ขนาดเล็ก พกพาได้สะดวก สามารถทิ้งได้ทันทีหลังการวิเคราะห์ และสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้หลากหลาย เช่น การตรวจวัดไอออนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ<sup>16</sup> การวินิจฉัยโรคทางการแพทย์<sup>17</sup> การตรวจวัดสารเคมีที่อยู่ฝุ่น<sup>18</sup> การตรวจวัดสารพิษในอาหาร<sup>19</sup> เป็นต้น

หลักการในการวิเคราะห์สารบนกระดาษอาศัยเทคนิคเกี่ยวกับของไหลจุลภาค (Microfluidics) คือ การสร้างช่องทางไหลขนาดไมครอนบนกระดาษ สำหรับบังคับให้ของไหลปริมาณน้อย (1-100 ไมโครลิตร) ไหลไปตามช่องทางที่กำหนดขึ้น ไม่ซึมไปทั่วกระดาษ ปลายทางของของไหลดังกล่าวเป็นบริเวณซึ่งถูกกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เทคนิคทางเคมีเรืองแสง หรือเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีเรืองแสง

ในปัจจุบันมีเทคนิคที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาคหลายเทคนิคโดยมีหลักการพื้นฐานที่เหมือนกันคือ การสร้างช่องทางไหลของสารที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น การพิมพ์ด้วยแสง (Photolithography) การสลักด้วยการฉีดหมึก (Ink jet etching) การปรับสภาพด้วยพลาสมา (Plasma treatment) การพิมพ์สกรีนด้วยขี้ผึ้ง (Wax printing) การพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Flexography printing) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเตรียมอย่างง่าย คือ การจุ่มหรือแช่กระดาษลงในสารละลายรีเอเจนต์ระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำกระดาษนั้นไปอบให้แห้ง แม้จะเป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาถูกที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถกำหนดทิศทางการไหลของสารได้ ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี โดยการหยด สเปรย์ หรือฉีดผ่านสารตัวอย่างปริมาณน้อย ๆ ไปยังกระดาษโดยตรง และสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีที่เกิดขึ้นบนบริเวณที่กระดาษสัมผัสกับสารตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 1.4



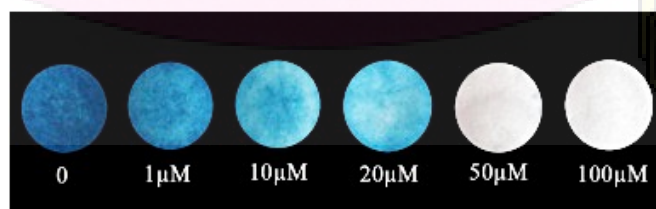
รูปที่ 1.4 อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมอย่างง่ายสำหรับการตรวจวัดความชื้นในตัวทำละลายอินทรีย์

#### 1.4.3 เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method)<sup>20</sup>

เทคนิคการตรวจวัดเชิงสีเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่แปรผลได้ง่ายจากการเทียบสีโดยตรงด้วยตาเปล่า หรือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างเช่น โปรแกรม imageJ โดยเปรียบเทียบความเข้มสีที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายหรือสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ การเปลี่ยนแปลงสีดังกล่าวโดยทั่วไปเกิดจากสารรีเอเจนต์ (Reagent) ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มสีแตกต่างจากสีเดิมของสารรีเอเจนต์ ซึ่งความเข้มสีที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่เราต้องการวิเคราะห์ จึงสามารถนำไปใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงปริมาณได้ โดยอาศัยการสร้างกราฟสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration curve) จากสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

นอกจากความง่ายในการวิเคราะห์แล้ว เทคนิคการตรวจวัดเชิงสียังมีข้อดี คือ วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ราคาถูก และนำไปปรับใช้ในการวิเคราะห์นอกห้องปฏิบัติการได้ง่าย เป็นต้น

ตัวอย่างการตรวจวัดด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี<sup>21</sup> เช่น การตรวจวัดเชิงปริมาณของกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) โดยใช้การเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของคาร์บอนดอทและสารเชิงซ้อนของไอออนเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) บนอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ ซึ่งกระดาษจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีขาว เมื่อความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในสารละลายที่ใช้ทดสอบมีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.5

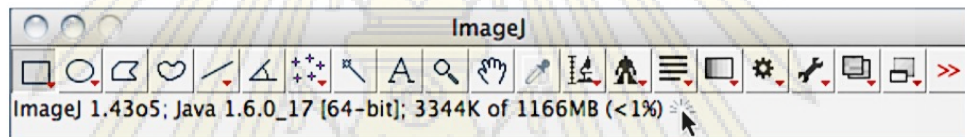


รูปที่ 1.5 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษสำหรับการตรวจวัดกรดแอสคอร์บิก

#### 1.4.4 โปรแกรม imageJ<sup>22</sup>

โปรแกรม imageJ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 เป็นโปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพถ่าย ถูกพัฒนาขึ้นโดย National Institutes of Mental Health (NIMH) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นโปรแกรมแจกฟรี (Freeware) ที่รองรับการทำงานของระบบปฏิบัติการหลายชนิด เช่น Windows Linux และ Mac OS X เป็นต้น อีกทั้งมีการอนุญาตให้ผู้ใช้แก้ไขโปรแกรมได้ เพื่อร่วมกันพัฒนาประสิทธิภาพของโปรแกรมให้ดียิ่งขึ้น มีประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลทั่วไป สามารถกำหนดสเกล (Scale) การหมุน (Rotate) การพลิกภาพ (Flip) และขยายภาพ (Zoom) ได้ สามารถเปิดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พร้อมกันได้หลายภาพในเวลาเดียวกัน สามารถคำนวณสัดส่วนพื้นที่ของวัตถุบนภาพได้ในหน่วยพิกเซล (Pixel) หรือหน่วยพื้นที่ตามมาตรฐาน (ตารางมิลลิเมตร) นอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะความยาวของวัตถุบนภาพ วัดความหนาแน่นของรูปภาพ แล้วแสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่งซึ่งจัดทำค่าต่าง ๆ ในรูปสถิติได้

ในเทคนิคเชิงสี โปรแกรม imageJ มีส่วนสำคัญที่ทำให้เทคนิคนี้เป็นเทคนิคทางเคมีวิเคราะห์ที่ง่าย รวดเร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนและยุ่งยาก เนื่องจากโปรแกรมนี้สามารถวัดค่าความเข้มสีเฉลี่ย (mean color intensity) ของวัตถุในภาพถ่ายได้โดยตรง ค่าความเข้มสีเฉลี่ยนี้จัดเป็นค่าพารามิเตอร์เชิงสีที่รายงานเป็นตัวเลขใช้สื่อแทนการเห็นสีด้วยตาเปล่า ประยุกต์ใช้วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ



รูปที่ 1.6 โปรแกรม imageJ ในระบบปฏิบัติการ Mac OS X

#### 1.4.5 เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible spectroscopy)<sup>23</sup>

เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของโมเลกุลที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี (Ultraviolet) และ/หรือช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) คือ ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 - 800 นาโนเมตร โดยทั่วไปสารตัวอย่างที่สามารถนำมาศึกษาด้วยเทคนิคนี้ได้มักอยู่ในรูปของสารละลาย โมเลกุลที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคนี้มีหลายประเภท เช่น สีอินทรีย์ (Organic dye) สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (Coordination compound) และสารชีวโมเลกุล (Biomolecule)

หลักการวิเคราะห์อาศัยการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Electronic transition) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากระดับพลังงานสูงสุดของออร์บิทัลโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Highest occupied molecular orbital, HOMO) ไปยังระดับพลังงานต่ำสุดของออร์บิทัลโมเลกุลที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนพลังงาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโมเลกุลที่เราสนใจในช่วงรังสียูวี และ/หรือช่วงที่ตามองเห็น โดยโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีสมบัติในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัว และค่าการดูดกลืนแสงของโมเลกุลยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลในสารละลายตัวอย่างตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังนั้นจึงสามารถนำมาปรับใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ



#### 1.4.6 เทคนิคดิฟฟิวส์รีเฟล็กแทนซ์ ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Diffuse Reflectance UV-Visible spectroscopy)<sup>24,25</sup>

เป็นเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีประเภทหนึ่งที่อยู่อาศัยสมบัติการสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse reflection) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 180-800 นาโนเมตร เมื่อตกกระทบกับสารตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง เช่น ผงอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุดูดซับ กระจาดาย ฟิล์มบาง เป็นต้น โดยเครื่องมือวิเคราะห์สามารถรายงานสัญญาณได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การดูดกลืน (Absorption) การสะท้อน (Reflection) และการส่องผ่าน (Transmission) ซึ่งสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณของสารตัวอย่างที่เทียบกับสัญญาณของสารมาตรฐานซึ่งมีสีขาวและถูกอัดแน่นจนมีพื้นผิวเรียบ นิยมใช้แบเรียมซัลเฟต ( $BaSO_4$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) เป็นสารมาตรฐาน

เนื่องจากสารตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้เป็นของแข็ง สัญญาณที่ได้จึงไม่ค่อยชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากเทคนิคนี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพิสูจน์เอกลักษณ์และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงแสงของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น ยืนยันการมีอยู่ของสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นซึ่งอยู่บนพื้นผิวของกระจาดายหรือฟิล์มบาง ยืนยันการโด๊ปของไอออนโลหะ (Dopping) การหาค่าแถบพลังงานและแบนด์แก๊ป (Band gap determination) นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ผ่านฟังก์ชันคูเบลคา-มังก์ (Kubelka-Munk function)

#### 1.4.7 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (Aviation fuel)<sup>26</sup>

น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (Aviation fuel) มีองค์ประกอบหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน (Paraffins) แนฟทีน (Naphthense) โอลิฟิน (Olefins) และอะโรมาติก (Aromatics) ที่มีอะตอมคาร์บอนจำนวน 9-14 อะตอม คิดเป็นร้อยละ 99% ถึง 99.5% โดยปริมาตร องค์ประกอบที่เหลือ (ร้อยละ 0.5 ถึง 1% โดยปริมาตร) คือส่วนที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน เช่น สารประกอบกำมะถัน โซเดียม ตะกั่ว และโบรมีน น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแบ่งได้เป็นหลายเกรดดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เกรดของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินตามข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

เกรด	ประเทศ/ภูมิภาค	ข้อกำหนด
Jet A	สหรัฐอเมริกา	ASTM D1655
Jet A-1	ทั่วโลก	ASTM D1655, DEF STAN 91-91
TS-1	รัสเซียและสหภาพโซเวียต	GOST 10227
Jet Fuel no.3	จีน	GB 6537
Jet A-1	แคนาดา	CAN/CGSB-3.23

นอกจากองค์ประกอบข้างต้นแล้ว ยังสามารถพบน้ำ (free water) ซึ่งไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยน้ำประเภทนี้จัดว่าเป็นสิ่งเจือปนที่ต้องควบคุมให้มีปริมาณต่ำกว่าค่าที่กำหนด (30 มิลลิกรัม/ลิตร) น้ำที่เจือปนนี้มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างมาก จึงมักปรากฏอยู่บริเวณชั้นล่างสุดของภาชนะบรรจุเมื่อตั้งน้ำมันทิ้งไว้นานระยะเวลาหนึ่ง โดยเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น น้ำที่เหลือจากการทำความสะอาดถังบรรจุน้ำมัน การควบแน่นของน้ำจากอากาศที่ขึ้นไปยังผนังของถังบรรจุน้ำมัน น้ำฝนที่อาจเล็ดลอดเข้าไปในถังบรรจุน้ำมัน เป็นต้น

## 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1988 Oguchi และคณะ<sup>6</sup> ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิดโดยการใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) ซึ่งใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อน (Thermal conductivity detector, TCD) สามารถตรวจวัดปริมาณน้ำได้ในระดับส่วนในล้านส่วน (parts per million, ppm)

หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2003 Gunnlaugsson และคณะ<sup>9</sup> ได้ใช้เซนเซอร์ชนิดแอนไอออนที่พัฒนามาจากแนพทาลิไมด์ (Naphthalimide based anion sensor) ศึกษากระบวนการดึงโปรตอน (Deprotonation) ด้วยฟลูออไรด์ไอออนและกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> fixation) จากการทดลองพบว่าในสภาวะที่สารละลายเซนเซอร์แอนไอออนแนพทาลิไมด์มีฟลูออไรด์ไอออนอยู่ด้วย สารละลายจะมีสีม่วง และเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลาหลายชั่วโมง สารละลายดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีเขียว เนื่องจากเกิดการดูดซับความชื้นในอากาศเข้าไปในโครงสร้าง ทำให้เห็นได้ว่าการเปลี่ยนสีสามารถใช้ในการตรวจวัดน้ำได้

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Kim และคณะ<sup>10</sup> ได้วิจัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสีย้อมอินทรีย์ที่มีหมู่ฟีนอลและหมู่อินโดล (Phenol indole dye) ในตัวทำละลายอินทรีย์ไดออกเซน อะซีโตไนไตรล์ อะซีโตน และเตตระไฮโดรพิวแรน พบว่าเมื่อมีสีย้อมอินทรีย์ที่มีหมู่ฟีนอลและหมู่อินโดลละลายอยู่ในตัวทำละลายเหล่านี้ สารละลายจะมีสีเหลือง เมื่อทดลองโดยเพิ่มปริมาณน้ำในสารละลายดังกล่าว พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีชมพู มีค่าขีดจำกัดการตรวจวัดน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ไดออกเซน อะซีโตน อะซีโตไนไตรล์ และเตตระไฮโดรพิวแรน เท่ากับ ร้อยละ 0.33 0.52 0.31 และ 0.41 โดยมวล ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2011 Moon และคณะ<sup>11</sup> ได้วิเคราะห์น้ำในอะซีโตไนไตรล์ โดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมอินทรีย์ที่มีหมู่ฟีนอล 2 ชนิด ในระบบที่มีฟลูออไรด์ไอออน ได้แก่ 4-(4-ไนโตรฟีนิลเอโซ)-1-แนพทอล (4-(4-Nitrophenylazo)-1-naphthol) และดิสเพริส เยลโลว์ 7 (Disperse Yellow 7) สภาวะที่สารละลาย 4-(4-ไนโตรฟีนิลเอโซ)-1-แนพทอล และดิสเพริส เยลโลว์ 7 มีฟลูออไรด์ไอออนอยู่ด้วย สารละลายจะมีสีน้ำเงิน เมื่อนำไปตรวจวัดปริมาณน้ำในสารตัวอย่าง หากสารตัวอย่างนั้นมีน้ำเจือปนพบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง และสีส้มเหลือง ตามลำดับ ขีดจำกัดการตรวจวัดน้ำในอะซีโตไนไตรล์โดยใช้ 4-(4-ไนโตรฟีนิลเอโซ)-1-แนพทอล และดิสเพริส เยลโลว์ 7 เป็นรีเอเจนต์มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.17 และ 0.16 โดยมวล ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2012 Ohira และคณะ<sup>7</sup> ได้พัฒนาเซนเซอร์ความจุไฟฟ้า (Capacitance sensor) โดยอาศัยหลักการของเทคนิคการวิเคราะห์แบบฟลิวอิงเจกชัน (Flow injection analysis, FIA) ในการวิเคราะห์ความชื้นในอากาศและในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด เป็นเทคนิคที่ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อยมากเพียง 30 ไมโครลิตร ขีดจำกัดการตรวจวัดปริมาณความชื้นในเมทานอล กรดอะซิติก อะซีโตน และโพรพานอล มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.17 0.066 0.094 และ 0.23 โดยมวล ตามลำดับ

หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2016 Kumar และคณะ<sup>8</sup> ร่วมกันพัฒนาเทคนิคฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence) สำหรับการตรวจวัดปริมาณความชื้นในตัวทำละลายอินทรีย์ และประยุกต์ใช้ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารจริง โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงซึ่งจะปลดปล่อยฟลูออเรสเซนส์ออกมาเมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำ พบว่าขีดจำกัดการตรวจวัดปริมาณความชื้นที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.003 โดยมวล ในเตตระไฮโดรพิวแรน

ล่าสุดในปี ค.ศ. 2017 Kumar และคณะ<sup>12</sup> ได้วิเคราะห์น้ำในตัวอย่างอินทรีย์ 4 ชนิด ได้แก่ อะซีโตน อะซีโตนไนไตรล์ ไดมethylซัลฟอกไซด์ และเตตระไฮโดรฟิวแรน โดยอาศัยกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของซูดาน-3 (Sudan-III) และอะลิซาริน เรด เอส (Alizarin Red S) ผ่านปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรีในสภาวะที่ สารละลายมีฟลูออไรด์ไอออนอยู่ด้วย จะพบว่าสารละลายซูดาน-3 มีสีน้ำเงิน และสารละลายอะลิซาริน เรด เอส มีสีม่วง หากนำไปทดสอบกับตัวอย่างอินทรีย์ทั้ง 4 ชนิดข้างต้นที่มีความเข้มข้นสูง สารละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีส้มแดงเมื่อใช้สารละลายซูดาน-3 เป็นรีเอเจนต์เชิงสี และเปลี่ยนแปลงสีจากสี ม่วงเป็นสีเหลืองเมื่อใช้สารละลายอะลิซาริน เรด เอส เป็นรีเอเจนต์เชิงสี ชัดจำกัดการตรวจวัดที่ดีที่สุดจาก งานวิจัยนี้คือ รั้อยละ 0.0042 และ 0.0221 โดยมวล สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นในอะซีโตนด้วย สารละลายซูดาน-3 และสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ตามลำดับ



## บทที่ 2 การทดลอง

### 2.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์

- กระดาษกรอง (Filter paper Whatman no.1)
- คีม (Forcep)
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Classic
- ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 2.5 10 20 100 200 1000 5000 และ 10,000 ไมโครลิตร
- ไมโครปิเปตทิป (Micropipette tip) ขนาด 10 20 100 200 1000 5000 และ 10,000 ไมโครลิตร
- หลอดเข็นตริฟิวจ์พลาสติก (Centrifuge tube) ขนาด 2, 15 และ 50 มิลลิลิตร
- ขวดกำหนดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10, 50 และ 100 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ซ้อนตักสาร
- กระจกนาฬิกา
- เครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น (Sonicator) รุ่น IL 60061
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer) รุ่น VTX-3000L
- เข็มฉีดยา (Syringe)
- เครื่องเจาะกระดาษเป็นรูวงกลม
- คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม imageJ
- กล้องดิจิทัล Canon EOS 700D
- กล้องควบคุมแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.1
- นาฬิกาจับเวลา
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Agilent HP8453
- ดีอาร์-ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (DR-UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Shimadzu UV-2550
- ควอตซ์คิวเวตต์ (Quartz cuvette)
- ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ (Thermostat oven)
- เดซิเคเตอร์ (Desiccator)

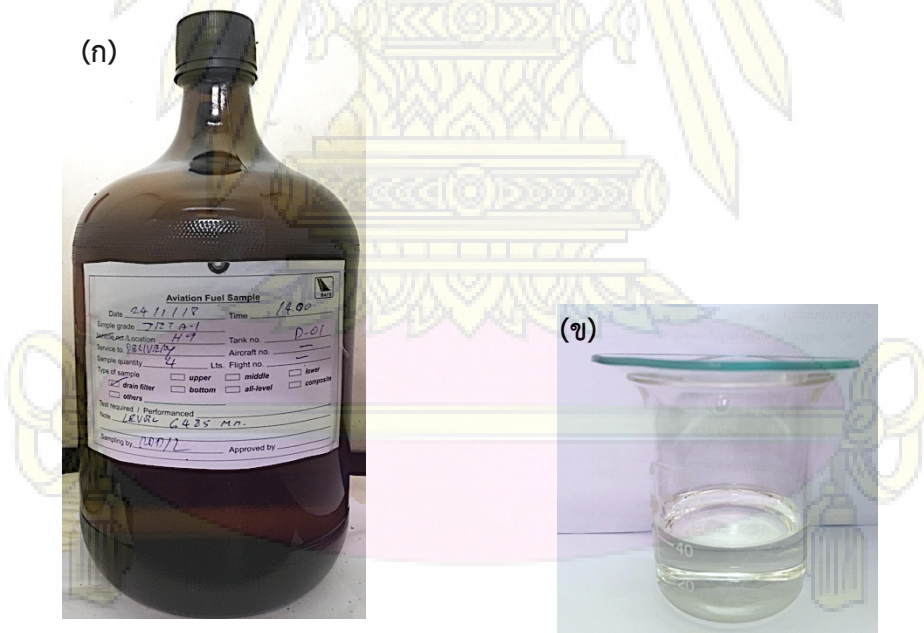


รูปที่ 2.1 กล้องควบคุมแสง



## 2.2 รายการสารเคมี

- อะลิซาริน เรด เอส (3,4-Dihydroxy-9,10-dioxo-9,10-dihydro-2-anthracenesulfonate,  $C_{14}H_7O_7SNa$ ), บริษัท Sigma ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- เตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Tetra-*n*-butylammonium fluoride,  $C_{16}H_{36}FN$ ), บริษัท Sigma ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- อะซีโตน (Acetone,  $C_3H_6O$ ), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- อะซีโตนไทรล์ (Acetonitrile,  $CH_3CN$ ), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide,  $HCON(CH_3)_2$ ), บริษัท ACI Labscan ประเทศไทย
- เมทานอล (Methanol,  $CH_3OH$ ), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- เอทานอล (Ethanol,  $C_2H_5OH$ ), บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- น้ำ (Milli-Q water)
- ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน, บริษัทบริการเชื้อเพลิงการบินกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)  
วันที่เก็บตัวอย่าง : 24 มกราคม พ.ศ. 2561 เวลา 14.00 นาฬิกา  
เกรดตัวอย่าง : Jet A-1  
หมายเลขแทงค์ : D-01 (H9)  
ปริมาตรของตัวอย่าง : 4 ลิตร  
ประเภทของตัวอย่าง : drain filter (ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างแล้ว)  
ภาชนะบรรจุ : ขวดแก้วสีชา ฝาปิดสนิท  
ลักษณะทางกายภาพ : ของเหลวใสไม่มีสี กลิ่นแรงเฉพาะตัว ความหนืดน้อยคล้ายน้ำ



รูปที่ 2.2 (ก) ภาชนะบรรจุตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

(ข) แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

## 2.3 การเตรียมสารละลาย

### 2.3.1 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

- 1) ชั่งอะลิซาริน เรด เอส 0.3423 กรัม ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2) ละลายด้วยตัวทำละลายอะซีโตน
- 3) เติมสารละลายเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
- 4) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

### 2.3.2 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

สำหรับการทดสอบหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) ปิเปตสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ (ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.1) ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 9 ขวด ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 2.1
- 2) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

**ตารางที่ 2.1** ปริมาตรของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เตรียมได้ (มิลลิโมลาร์)	ปริมาตรของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่เติมลงในขวดกำหนดปริมาตร (มิลลิลิตร)
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9

2.3.3 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1

- 1) ชั่งอะลิซาริน เรด เอส 0.0856 กรัม ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ละลายด้วยตัวทำละลายอะซีโตน
- 3) เติมสารละลายเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร
- 4) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

2.3.4 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1 10:1 15:1 20:1 และ 25:1

สำหรับการทดสอบหาสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) ปิเปตสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ (ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.3) ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ขวดละ 6 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปตสารละลายเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยไมโครปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 2.2
- 3) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

ตารางที่ 2.2 ปริมาตรของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1 10:1 15:1 20:1 และ 25:1

สัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form)	ปริมาตรของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่เติมลงในขวดกำหนดปริมาตร (ไมโครลิตร)
5 : 1	0
10 : 1	150
15 : 1	300
20 : 1	450
25 : 1	600

### 2.3.5 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

สำหรับการทดสอบหาเวลาที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เหมาะสม และการทดสอบผลของความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) ชั่งอะลิซาริน เรด เอส 0.1027 กรัม ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2) ละลายด้วยตัวทำละลายอะซีโตน
- 3) เติมสารละลายเตตระ-เฮ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 4.50 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร
- 4) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

### 2.3.6 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

สำหรับศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

- 1) ชั่งอะลิซาริน เรด เอส 0.0026 กรัม ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ละลาย และปรับปริมาตรจนถึงขีดกำหนดปริมาตรด้วยตัวทำละลายอะซีโตน

### 2.3.7 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

- 1) ชั่งอะลิซาริน เรด เอส 0.0068 กรัม ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ละลายด้วยตัวทำละลายอะซีโตน
- 3) เติมสารละลายเตตระ-เฮ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 300 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
- 4) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

### 2.3.8 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) สำหรับศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

- 1) ปิเปตสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ (ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.7) ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 10 ขวด ขวดละ 3.75 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปตน้ำ (Milli-Q water) ด้วยไมโครปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 2.3
- 3) ปรับปริมาตรด้วยอะซีโตน จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

ตารางที่ 2.3 ปริมาตรของน้ำ (Milli-Q water) ที่ใช้เตรียมสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) สำหรับศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

ปริมาณน้ำในระบบที่ศึกษา (ร้อยละโดยปริมาตร)	ปริมาตรของน้ำ (MilliQ water) ที่เติมลงในขวดกำหนดปริมาตร (ไมโครลิตร)
0	0
1.0	100
1.5	150
2.0	200
2.5	250
3.0	300
3.5	350
4.0	400
4.5	450
5.0	500

2.4 การศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

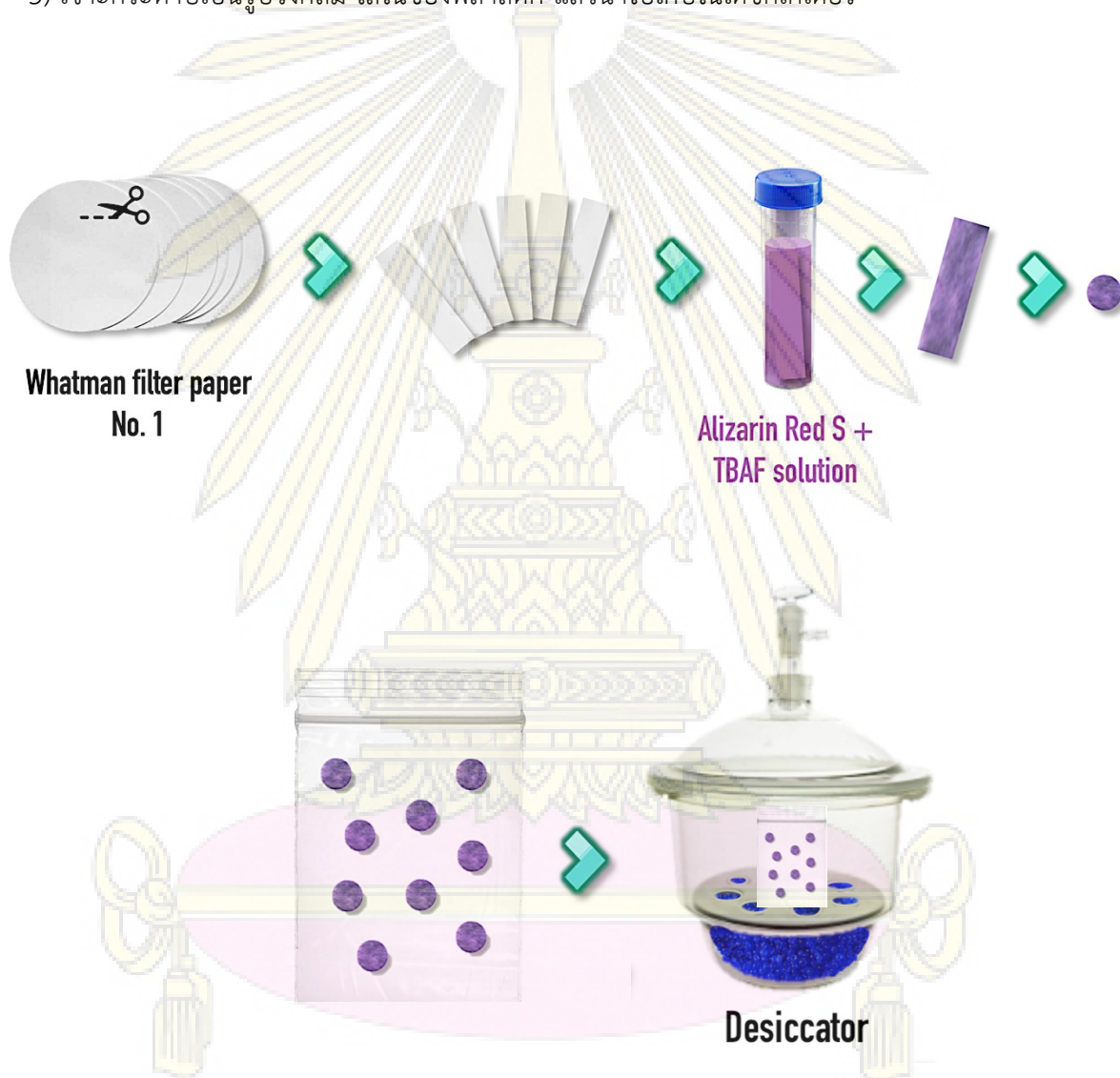
เครื่องมือ : ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Agilent HP8453 (Mode : Scan wavelength)  
อุปกรณ์ : ควอตซ์คิวเวตต์ (path length 1 cm)

- 1) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลงค์ (อะซีโตน) ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
- 2) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.6 ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีปริมาณน้ำในระบบแตกต่างกันตั้งแต่ ร้อยละ 0 ถึง 5.0 โดยปริมาตร ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.8 ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร



## 2.5 การเตรียมและเก็บรักษาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) ตัดกระดาษกรอง (Filter paper Whatman no.1) เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 1.8 เซนติเมตร ยาว 7 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์
- 2) ปิเปตสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ปริมาตร 10 mL ลงในหลอดเซ้นตริฟิวจ์พลาสติกขนาด 15 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตขนาด 10 mL
- 3) ใช้คีมคีบกระดาษกรองที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้ว ลงไปจุ่มแช่ในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form)
- 4) นำกระดาษที่ผ่านการแช่ในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ออกมาจากหลอดเซ้นตริฟิวจ์พลาสติก หลังจากนั้นนำไปอบไล่ตัวทำละลายอะซิโตนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที
- 5) เจาะกระดาษเป็นรูปร่างกลม ใส่ในซองพลาสติก แล้วนำไปเก็บในเดซิกเคเตอร์



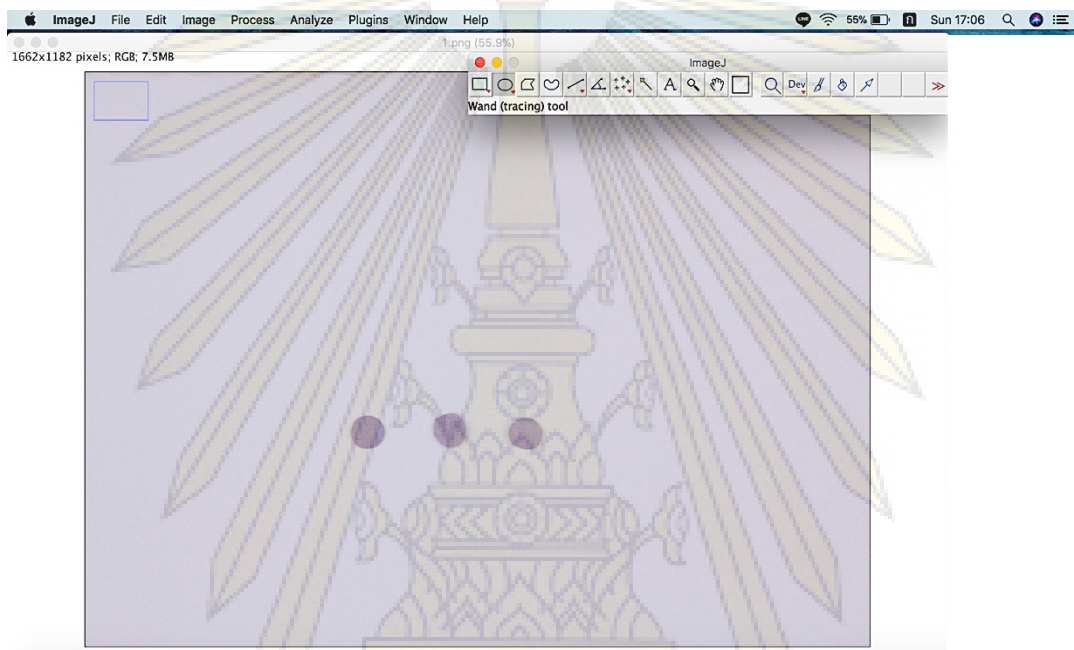
รูปที่ 2.3 การเตรียมและเก็บรักษาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

## 2.6 การตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยด้วยโปรแกรม imageJ

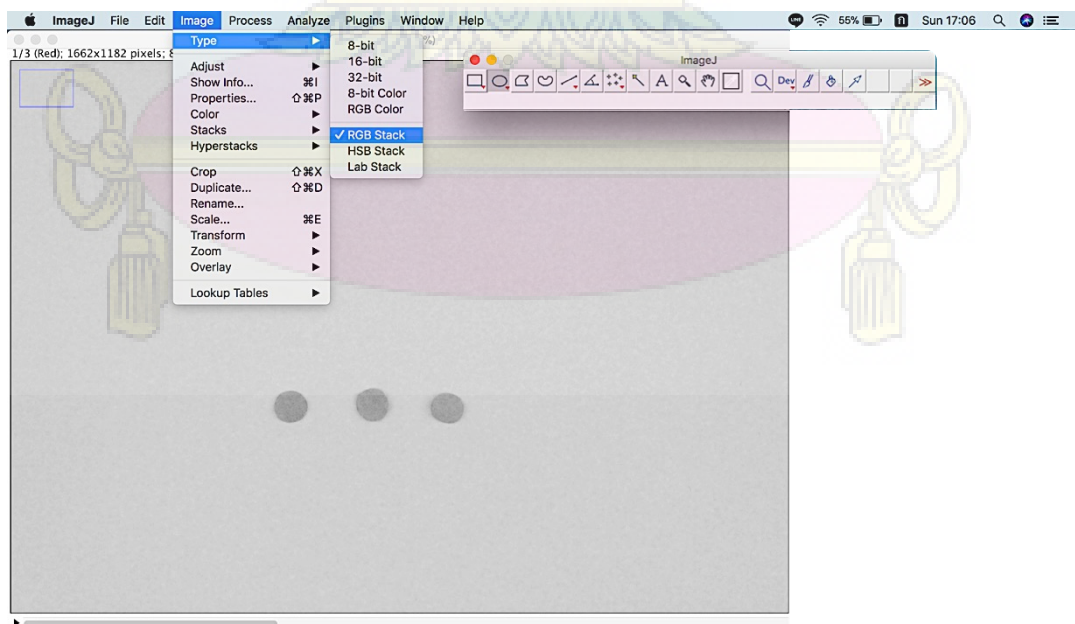
- 1) ถ่ายภาพอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษก่อนและหลังทดสอบกับสารตัวอย่าง ด้วยกล้องดิจิทัล Canon EOS 700D ในกล่องควบคุมแสง โดยใช้โปรแกรม EOS Utility ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

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

- 2) เปิดโปรแกรม imageJ เลือกคำสั่ง File คลิก Open เพื่อเลือกรูปถ่ายที่ต้องการวัดค่าเข้มสีเฉลี่ย

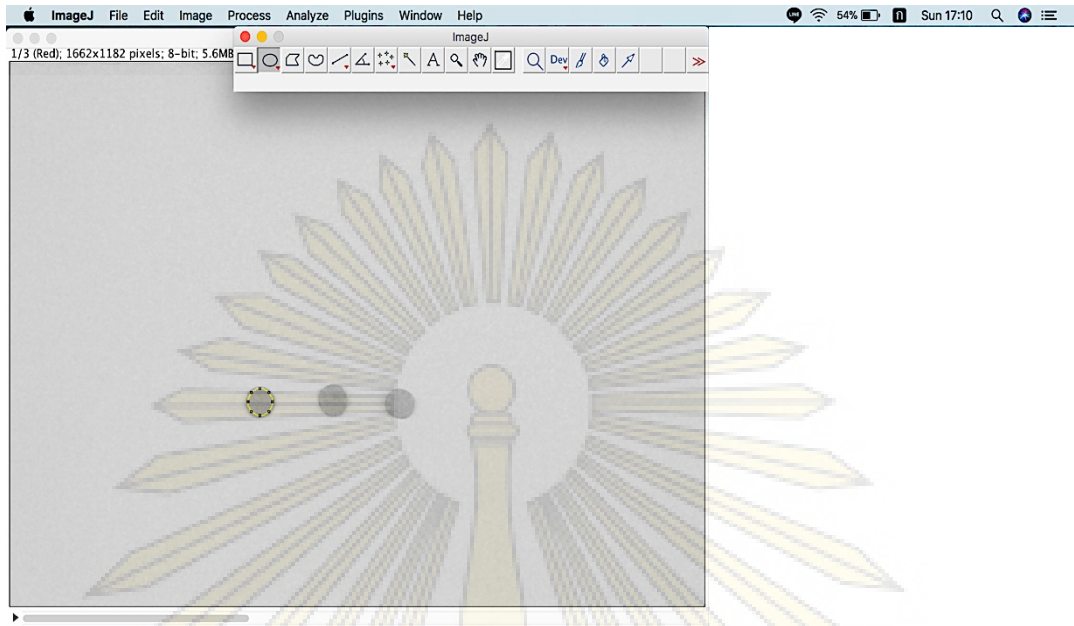


- 3) จากนั้นเลือกคำสั่ง Image > Type > RGB Stack

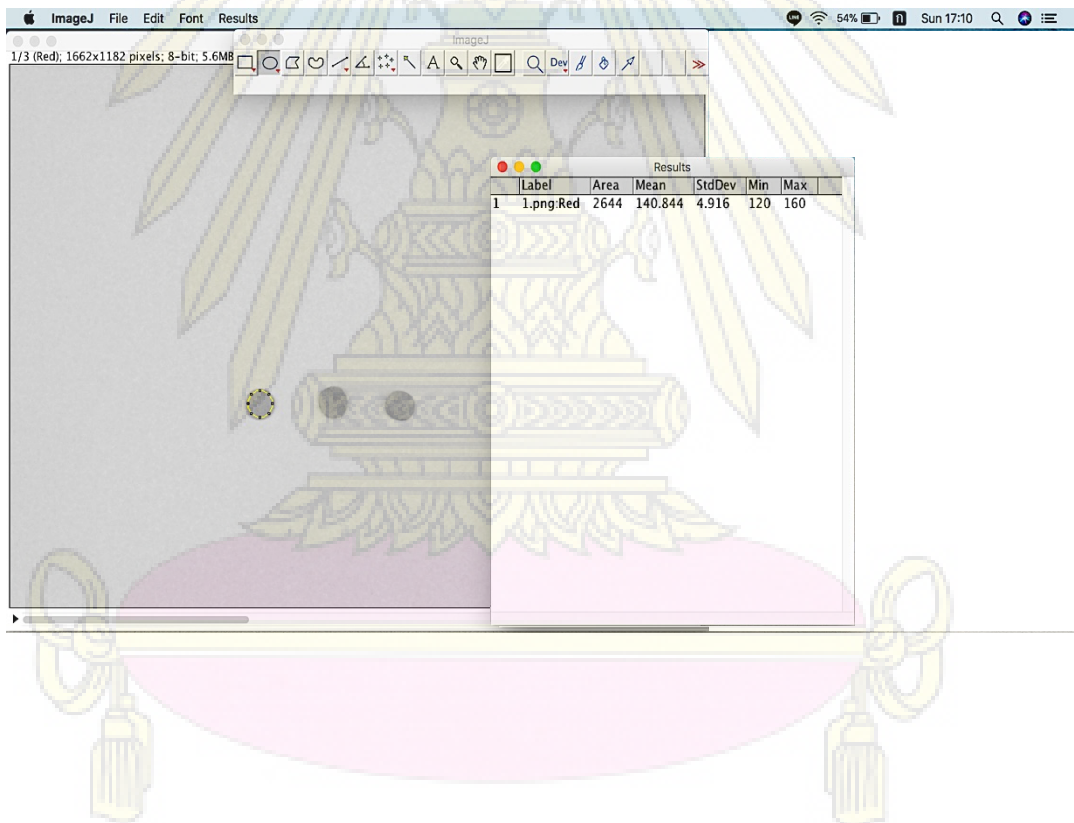




- 4) วัดค่าความเข้มสีช่วงสีแดง (Red) โดยคลิกรูปวงกลม หลังจากนั้นกดปุ่ม shift พร้อมลากเมาส์ เพื่อกำหนดพื้นที่วงกลมที่ต้องการวัดความเข้มสีเฉลี่ย (กำหนดให้  $w=170$   $h=170$ )



- 5) กดปุ่ม “M” เพื่อวัดความเข้มสีเฉลี่ย



## 2.7 การยืนยันการมีอยู่ของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ ด้วยเทคนิคฟิฟวส์รีเฟล็กแทนส์ ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เครื่องมือ : ดีอาร์-ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (DR-UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Shimadzu UV-2550 (Mode : Absorption)

- 1) วัดค่าการดูดกลืนแสงของแบลงค์ (แบรียมซัลเฟต) ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
- 2) วัดค่าการดูดกลืนแสงของกระดาษรองที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 1.8 เซนติเมตร ยาว 7 เซนติเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ผ่านการแช่ในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ นาน 60 นาที ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร

## 2.8 การหาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

### 2.8.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสม

- 1) เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เวลาในการแช่กระดาษ 60 นาที แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ก่อนนำไปทดสอบ
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 5 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 ไมโครลิตร
- 3) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มข้น (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.8.2 การหาสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ที่เหมาะสม

- 1) เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ และมีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 5:1 10:1 15:1 20:1 และ 25:1 ใช้เวลาแช่กระดาษ 60 นาที แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ก่อนนำไปทดสอบ
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 5 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 ไมโครลิตร
- 3) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มข้น (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.8.3 การหาเวลาที่ใช้เตรียมอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เหมาะสม

- 1) เตรียมอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ โดยใช้ระยะเวลาในการแช่กระดาษ 2 4 6 8 และ 10 นาที แล้วตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยของอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ก่อนนำไปทดสอบ
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 5 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 ไมโครลิตร
- 3) นำอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Mixer vortex) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ย (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.9 การทดสอบผลของความชื้นในอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) เตรียมอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ โดยใช้ระยะเวลาในการแช่กระดาษ 60 นาที แล้วตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยของอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ก่อนนำไปทดสอบ
- 2) ตั้งอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษทิ้งไว้ในนอกเคชिकเคเตอร์ จากนั้นตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยทุก ๆ 1 นาที จนครบ 10 นาที (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.10 การทดสอบผลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) เตรียมอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งมีความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ โดยใช้ระยะเวลาในการแช่กระดาษ 60 นาที แล้วตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยของอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ก่อนนำไปทดสอบ
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 5 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 ไมโครลิตร
- 3) นำอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Mixer vortex) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอนุภาควิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยทันที หลังจากนั้นตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ยทุก ๆ 1 นาที จนครบ 10 นาที (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.11 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน

- 1) เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 และ 2.0 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 2.5 ไมโครลิตร
- 3) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Mixer vortex) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ย (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.12 การทดสอบผลของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 5 10 20 และ 40 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาดที่เหมาะสม ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 1.2 ไมโครลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 10 ไมโครลิตร
- 3) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Mixer vortex) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ย (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)

### 2.13 การทดสอบหาสารรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

- 1) เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม
- 2) เตรียมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยปิเปตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์พลาสติกขนาด 2 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ (Milli-Q water) ลงไปปริมาตร 1.2 ไมโครลิตร ลงในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ ด้วยไมโครปิเปตขนาด 2.5 ไมโครลิตร
- 3) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้ใส่ลงไปในหลอดเซ็นทริฟิวจ์ในข้อ 2) ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Mixer vortex) เป็นเวลา 1 นาที
- 4) นำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกมาตรวจวัดความเข้มสีเฉลี่ย
- 5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2) ถึง 4) โดยเปลี่ยนจากน้ำ (Milli-Q water) เป็นเมทานอล เอทานอล อะซีโตน อะซีโตนไนไตรล์ และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (ทำซ้ำจำนวน 3 ชุด)



### บทที่ 3

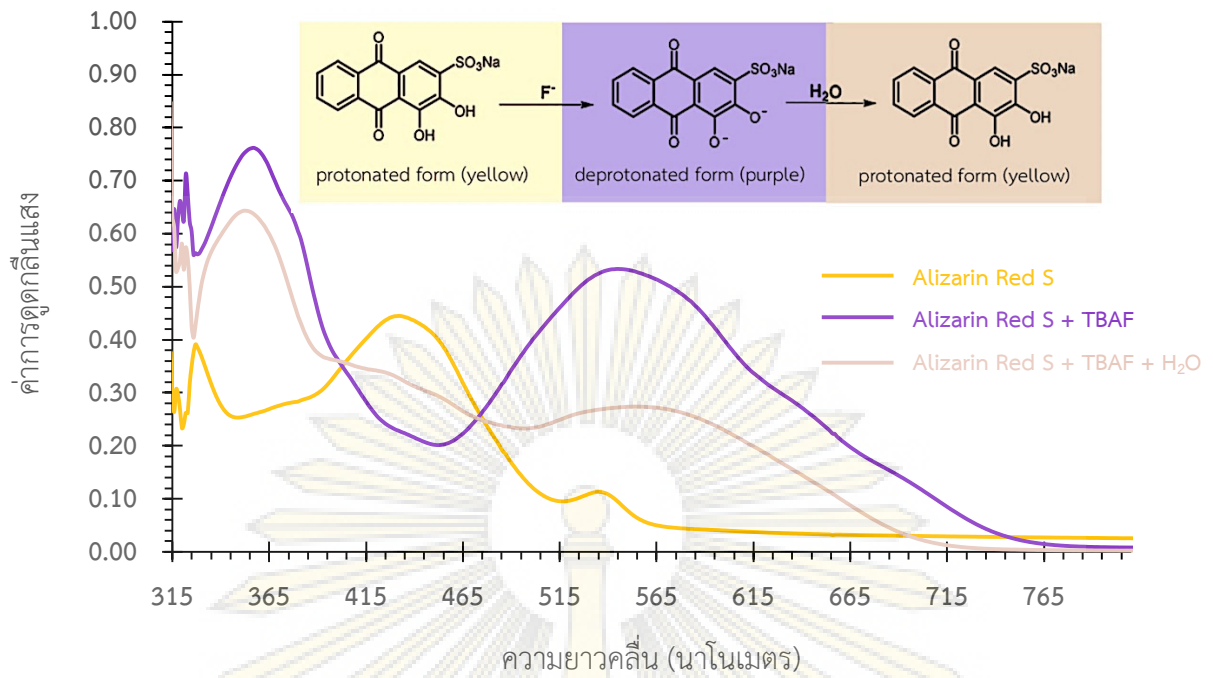
#### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 3.1 การศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เมื่อศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ซึ่งมีสีเหลืองจะให้แถบการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 326 และ 432 นาโนเมตร โดยเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานเวเลนซ์อิเล็กตรอน (electronic transition) จาก  $\pi \rightarrow \pi^*$  และ  $n \rightarrow \pi^*$  ในโครงสร้างของกรุปเบนโซควิโนน (benzoquinone group) ตามลำดับ เมื่อเติมสารละลายเตตระ-เฮ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ซึ่งเป็นแหล่งของฟลูออไรด์ไอออนลงไป จะทำให้สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีม่วง ฟลูออไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะไปดึงโปรตอนในหมู่ฟีนอลของโครงสร้างอะลิซาริน เรด เอส ทำให้เกิดประจุลบที่อะตอมออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดดีโลคัลไลซ์ (delocalize) ไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่มีสีม่วงนี้จึงมีระบบไพ-คอนจูเกต ( $\pi$ -conjugated system) ในโครงสร้างมากขึ้นกว่าเดิม ด้วยเหตุนี้จึงพบการเลื่อนของแถบการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่มากขึ้นกว่าเดิม หรือที่เรียกว่า “บาโทโครมิกชิฟต์ (Bathochromic shift)” โดยเลื่อนจาก ความยาวคลื่น 326 และ 432 นาโนเมตร ของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form, สีเหลือง) ไปยัง 357 และ 545 นาโนเมตร ของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form, สีม่วง) ตามลำดับ

เมื่อเติมน้ำเข้าไปในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) จะทำให้สารละลายเปลี่ยนสีจากสีม่วงมาเป็นสีเหลืองหม่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เนื่องจากน้ำจะเข้าไปล้อมรอบฟลูออไรด์ไอออน (solvated) ทำให้ฟลูออไรด์ไอออนไม่สามารถดึงโปรตอนออกจากหมู่ฟีนอลของอะลิซาริน เรด เอส ได้อีกต่อไป ถือเป็น การลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น ปฏิกิริยาจึงเกิดย้อนกลับ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ที่มีสีม่วง (deprotonated form) จึงเปลี่ยนกลับมาเป็นสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ที่มีสีเหลือง (protonated form) โดยสามารถยืนยันได้ด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมน้ำเข้าไปในระบบ โดยพบว่าที่ความยาวคลื่น 375 และ 545 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่พบแถบการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form, สีม่วง) มีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ในขณะที่ความยาวคลื่น 432 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่พบแถบการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (protonated form, สีเหลือง) มีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น ยิ่งมีน้ำปริมาณมากขึ้นการเพิ่มและลดของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากผลของพฤติกรรมดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3.4

จากพฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส เกิดจากการรับส่งโปรตอนผ่านปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรี (Bronsted-Lowry acid-base reaction) โดยอะลิซาริน เรด เอส (protonated form) ทำหน้าที่เป็นกรดของเบรินสเตด-ลาวรี และฟลูออไรด์ไอออนจากเตตระ-เฮ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ทำหน้าที่เป็นเบสของเบรินสเตด-ลาวรี โดยปฏิกิริยานี้จะถูกรบกวนและเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เมื่อเติมน้ำเข้าไปในระบบ



**รูปที่ 3.1** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ในตัวทำละลายอะซีโตน

Alizarin Red S คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์

Alizarin Red S + TBAF คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์

ผสมกับสารละลายเตตระ-เอีน-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 2.25 มิลลิโมลาร์

Alizarin Red S + TBAF + H<sub>2</sub>O คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์

ผสมกับสารละลายเตตระ-เอีน-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 2.25 มิลลิโมลาร์ โดยมีน้ำในระบบร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร

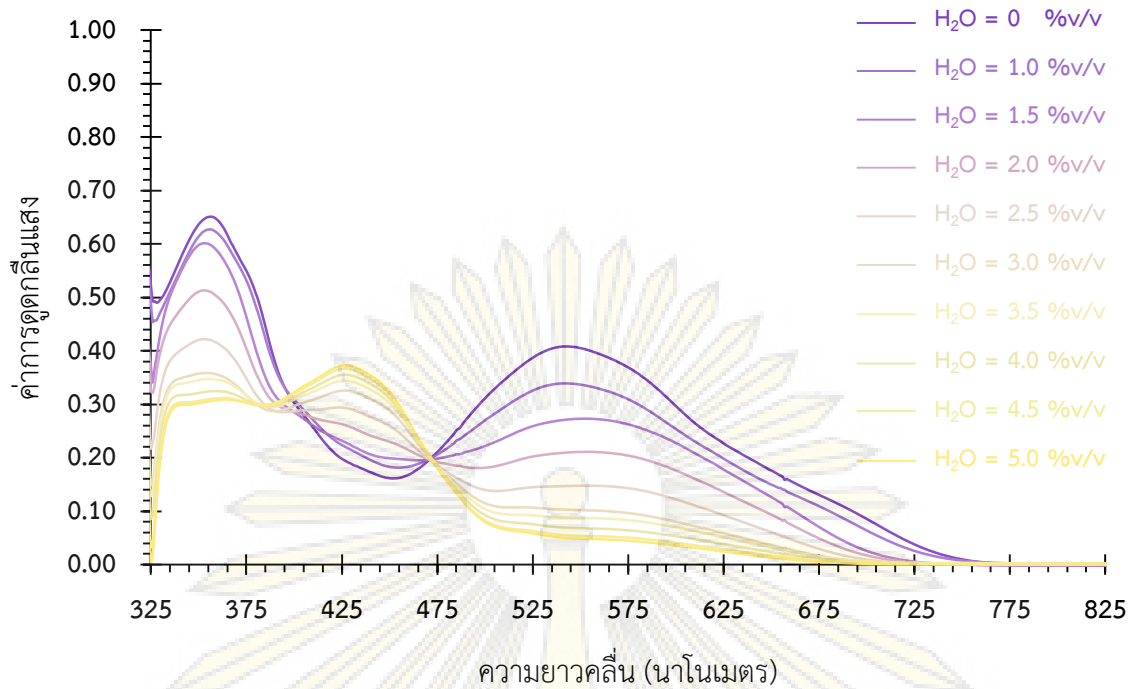


**รูปที่ 3.2** สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ที่ใช้ศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงสีในสถานะต่าง ๆ

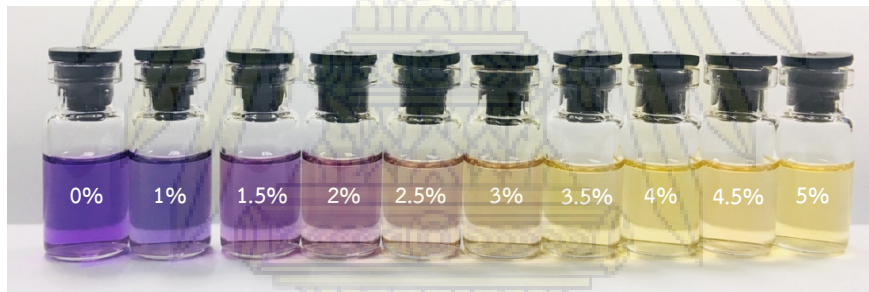
(1) คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์

(2) คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ผสมกับสารละลายเตตระ-เอีน-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 2.25 มิลลิโมลาร์

(3) คือ สารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ผสมกับสารละลายเตตระ-เอีน-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 2.25 มิลลิโมลาร์ โดยมีน้ำในระบบร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในตัวทำละลายอะซิโตนที่มีปริมาณน้ำในระบบร้อยละ 0 ถึง 5 โดยปริมาตร



รูปที่ 3.4 สารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่มีปริมาณน้ำในระบบร้อยละ 0 ถึง 5 โดยปริมาตร

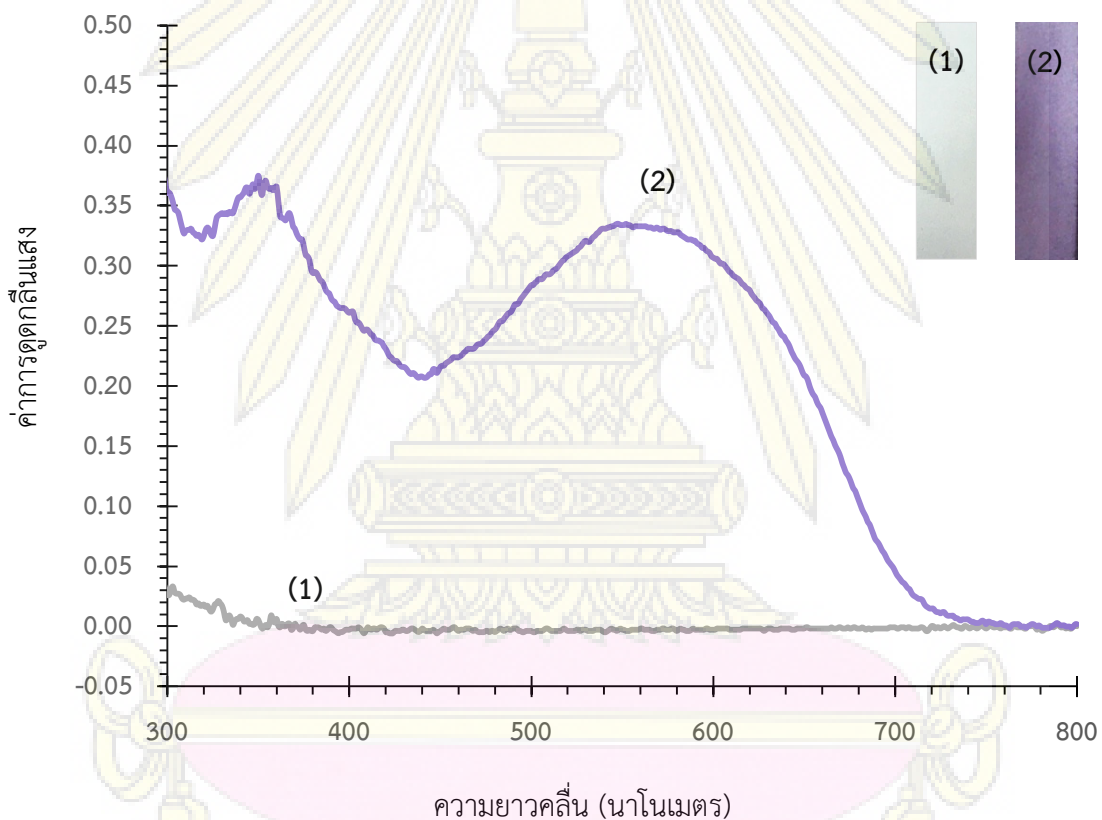


### 3.2 การยืนยันการมีอยู่ของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ ด้วยเทคนิคฟลูออโรสเปกโตรสโกปี ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ผ่านการแช่ในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 60 นาที จะมีลักษณะเป็นกระดาษสีม่วงเข้ม แตกต่างอย่างชัดเจนกับกระดาษกรองปกติที่มีสีขาว

เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออโรสเปกโตรสโกปี ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี จะได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษกับกระดาษกรองปกติแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษจะพบแถบการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 350 และ 552 นาโนเมตร สเปกตรัมที่ได้นี้มีรูปร่างและตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่ได้จากเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในขณะที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของกระดาษกรองปกติไม่พบแถบการดูดกลืนแสง

ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าสีม่วงของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษนั้นคือสีของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เข้ามาแทรกซึมอยู่ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ



รูปที่ 3.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (1) กระดาษกรอง และ (2) อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ








### 3.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน











#### 3.3.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสม

การหาความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้เกิดผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยที่ดีที่สุดของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษก่อนและหลังทดสอบหาปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่แตกต่างกันในช่วง 1 – 10 มิลลิโมลาร์ และทดสอบกับน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตร 2 มิลลิลิตร การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ แสดงดังตารางที่ 3.1

จากผลการทดสอบพบว่ายิ่งความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) เพิ่มมากขึ้น ผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 จะพบว่าตั้งแต่ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ เป็นต้นไป ผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยมีแนวโน้มที่คงที่ ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส 8 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

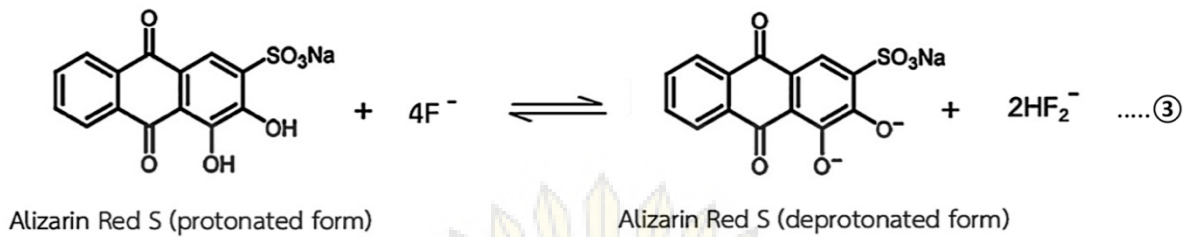
ตารางที่ 3.1 สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) แตกต่างกัน

ความเข้มข้นของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) (มิลลิโมลาร์)	1	2	3	4	5
ก่อนทดสอบ					
หลังทดสอบ					

ความเข้มข้นของอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) (มิลลิโมลาร์)	6	7	8	9	10
ก่อนทดสอบ					
หลังทดสอบ					



ปฏิกิริยารวม ① + ② ;

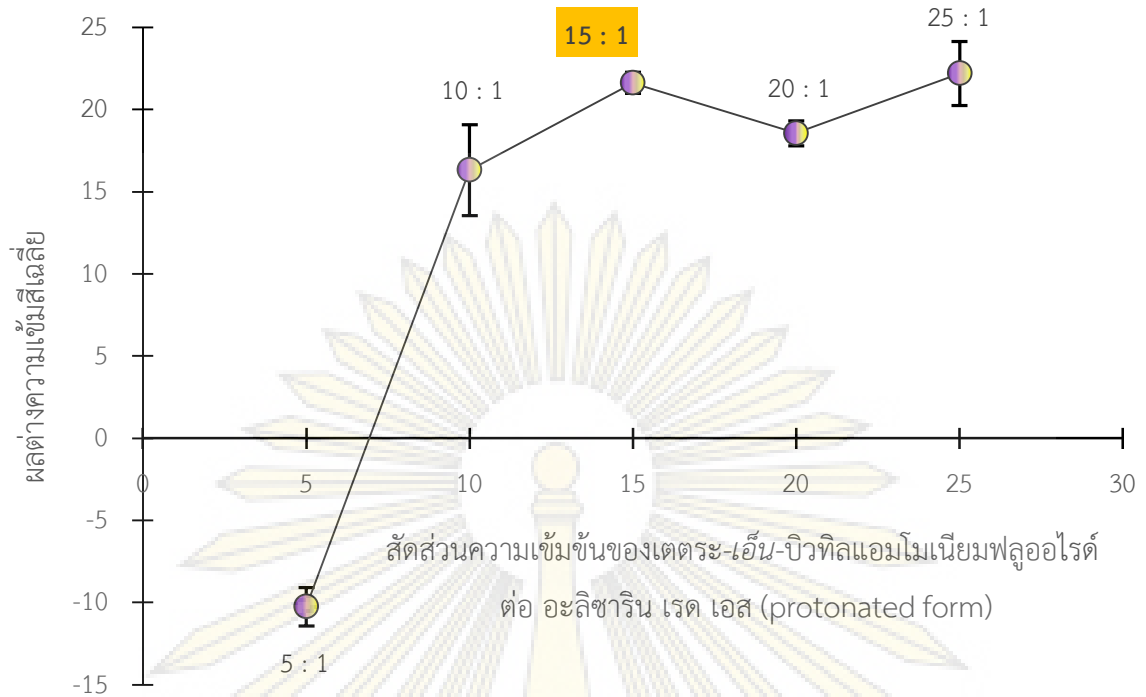


จะพบว่าในทางทฤษฎี อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) 1 โมล จะเกิดปฏิกิริยาพอดีกับ ฟลูออไรต์ไอออน 4 โมล แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้ฟลูออไรต์ไอออนจำนวนมากกว่า 4 โมล จากผลการทดสอบ พบว่ายิ่งสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เพิ่มมากขึ้น ผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เนื่องจากฟลูออไรต์ไอออนมีจำนวนมากขึ้น โอกาสในการเข้าถึงโปรตอนออกจากโมเลกุลอะลิซาริน เรด เอส ก็มีเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้โมเลกุลอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้สีม่วงมีปริมาณมากขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.7 จะพบว่าตั้งแต่สัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 15:1 เป็นต้นไป ผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยมีแนวโน้มที่คงที่ เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เกิดปฏิกิริยาได้สูงที่สุดแล้ว ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้จึงเลือกใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 15:1 ในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

**ตารางที่ 3.2** สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) แตกต่างกัน

สัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form)	5 : 1	10 : 1	15 : 1	20 : 1	25 : 1
ก่อนทดสอบ					
หลังทดสอบ					



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยกับสัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form)











### 3.3.3 การหาเวลาที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดที่เหมาะสม

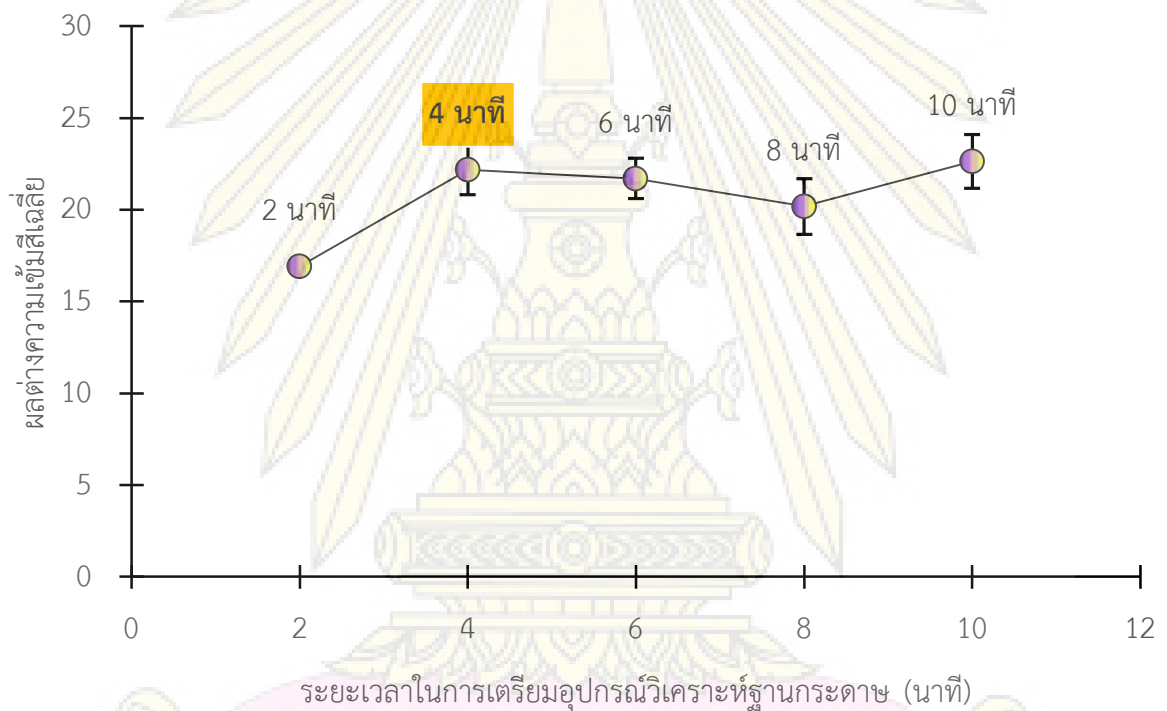
การหาเวลาที่ใช้เตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดที่เหมาะสมที่สุด คือ การหาเวลาที่ใช้ในการแช่กรดกรองในสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยที่ดีที่สุดของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดก่อนและหลังทดสอบหาปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ศึกษาโดยใช้เวลาแช่กรดกรองที่แตกต่างกันในช่วง 2 – 10 นาที และทดสอบกับน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตร 2 มิลลิลิตร การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดแสดงดังตารางที่ 3.3

จากผลการทดสอบพบว่าผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดเพิ่มขึ้นเมื่อแช่กรดกรองเป็นเวลานานมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจากสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) สามารถแทรกซึมเข้าไปในกรดกรองได้มากขึ้น ทั้งนี้จะเห็นว่าหลังจากเวลาผ่านไป 4 นาที ผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยเริ่มมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) แทรกซึมเข้าไปในกรดกรองได้เต็มที่แล้ว ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการแช่กรดกรอง เท่ากับ 4 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกรดเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน



ตารางที่ 3.3 สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ใช้เวลาในการเตรียมแตกต่างกัน

ระยะเวลาในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ (นาที)	2	4	6	8	10
ก่อนทดสอบ					
หลังทดสอบ					



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยกับระยะเวลาในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

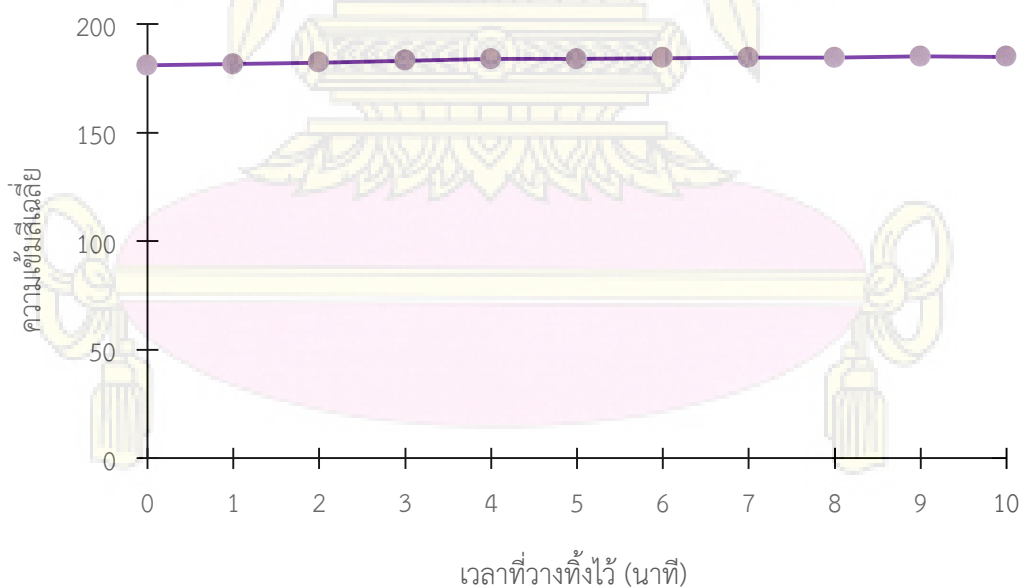
### 3.4 การทดสอบผลของความชื้นในอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

เนื่องจากอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้นนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อสัมผัสกับน้ำ และในอากาศเองก็มีความชื้น (น้ำ) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลของความชื้นในอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ โดยวัดค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ วางทิ้งไว้นอกเตชิกเคเตอร์ทุก ๆ 1 นาที จนครบ 10 นาที โดยกำหนดให้ช่วงระยะเวลา 10 นาที เป็นช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้ตัวอย่างจริงที่เหมาะสม สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.4

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.9 จะพบว่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษมีค่าเกือบคงที่ แสดงให้เห็นว่าความชื้นในอากาศแทบไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษภายในระยะเวลา 10 นาที หลังนำออกจากเตชิกเคเตอร์ ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าหากนำอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษออกจากเตชิกเคเตอร์ แล้วนำมาใช้ทดสอบน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยใช้เวลาทั้งหมดไม่เกิน 10 นาที การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นไม่ถูกรบกวนจากผลของความชื้นในอากาศ

ตารางที่ 3.4 สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อตั้งทิ้งไว้นอกเตชิกเคเตอร์ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

เวลาที่ตั้งทิ้งไว้ (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●














รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลของความชื้นในอากาศที่มีต่ออุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

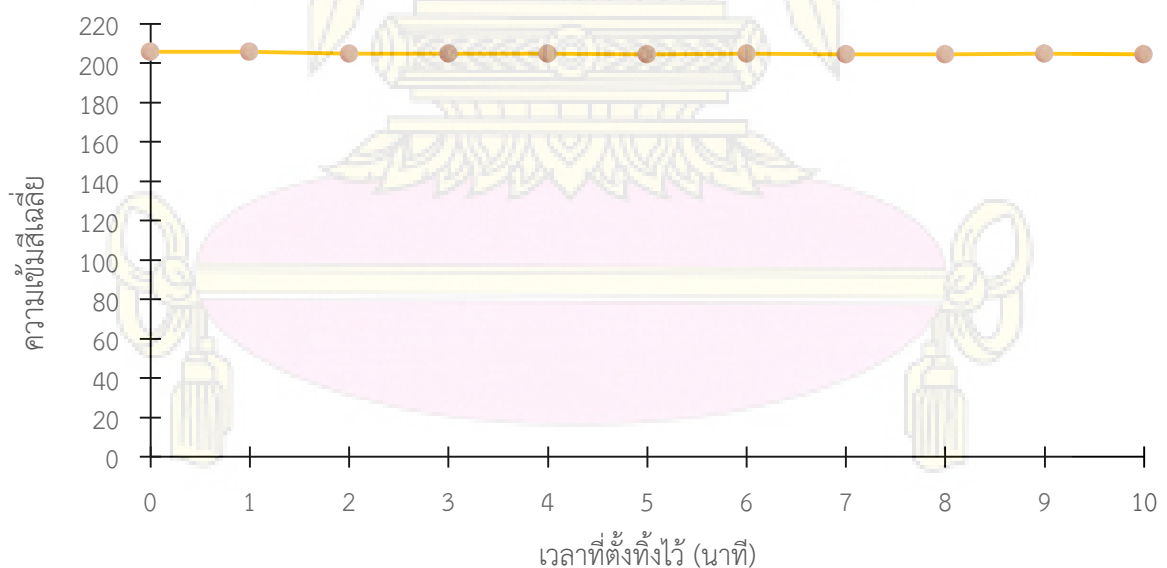
### 3.5 การทดสอบผลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

เพื่อศึกษาหาระยะเวลาที่อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสกับน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน จึงทดสอบโดยวัดค่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังจากสัมผัสกับน้ำทันที แล้ววัดความเข้มสีเฉลี่ยซ้ำทุก ๆ 1 นาที จนครบ 10 นาที สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่ทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.5

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.10 จะพบว่าความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่วัดได้มีค่าเกือบคงที่ตั้งแต่หลังสัมผัสกับน้ำทันที แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีหลังสัมผัสกับน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินได้อย่างรวดเร็วมาก หรือทันทีที่สัมผัสกับน้ำ และสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษมีความเสถียรที่สูง ภายในระยะเวลา 10 นาที หลังสัมผัสกับน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน

ตารางที่ 3.5 สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังสัมผัสกับน้ำในเวลาแตกต่างกัน

เวลาที่ตั้งทิ้งไว้ (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ											















รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังสัมผัสกับน้ำ

### 3.6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน











เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษแล้ว จึงสามารถทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกันได้ เนื่องจากน้ำที่ตรวจวัดคือ น้ำที่ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมัน (free water) ดังนั้นจึงไม่สามารถรายงานปริมาณน้ำที่ตรวจวัดในหน่วยของความเข้มข้นได้ ผลการทดสอบที่แสดงดังตารางที่ 3.6 จึงรายงานปริมาณน้ำที่ตรวจวัดได้ในหน่วยของปริมาตร คือ ไมโครลิตร

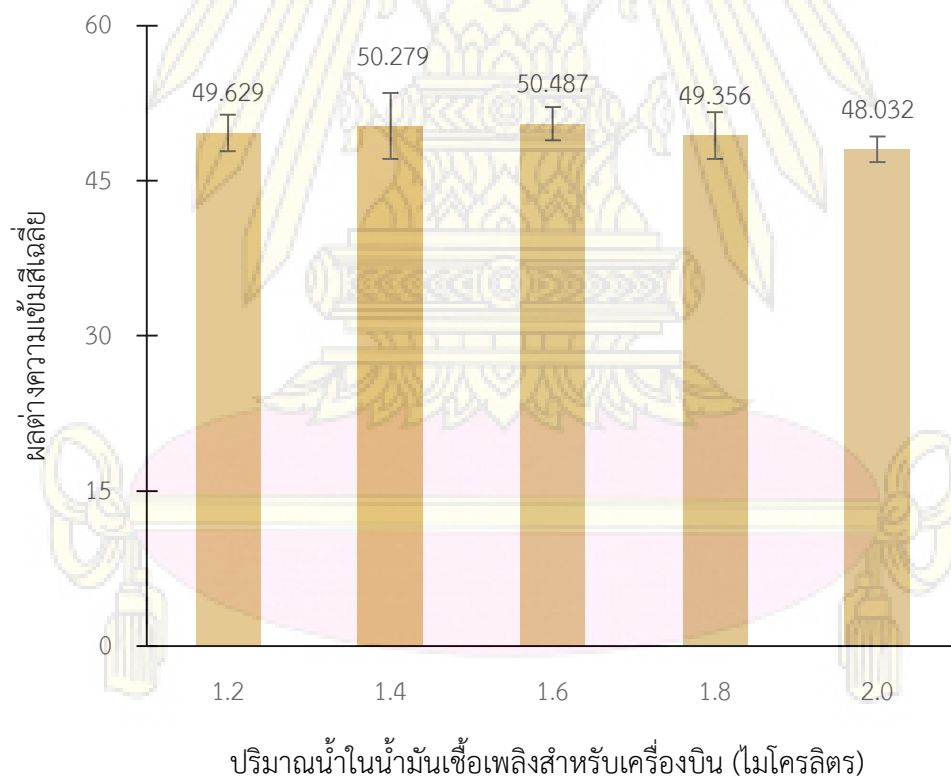
จากตารางที่ 3.6 พบว่าในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินที่มีปริมาณน้ำน้อย ๆ (0.2 ถึง 1.0 ไมโครลิตร) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเพียงบางส่วน เนื่องจากปริมาณน้ำที่สัมผัสกับอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษมีน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่มีอยู่ในกระดาษ ในขณะที่น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินที่มีปริมาณน้ำตั้งแต่ 1.2 ไมโครลิตรขึ้นไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษทั้งหมด และผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่สัมผัสกับปริมาณน้ำตั้งแต่ 1.2 ไมโครลิตรขึ้นไป มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (เทียบกับผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยในกรณีทดสอบปริมาณน้ำ 1.2 ไมโครลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำ 1.2 ไมโครลิตรในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร คือปริมาณน้ำที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) ที่มีอยู่ในอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

ตารางที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน

ปริมาตรของน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (ไมโครลิตร)	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
-		
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน

ปริมาณของน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (ไมโครลิตร)	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
1.2		
1.4		
1.6		
1.8		
2.0		



รูปที่ 3.11 กราฟแท่งแสดงผลต่างความเข้มสีเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังทดสอบกับปริมาณน้ำ 1.2 ถึง 2.0 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตร 2 มิลลิลิตร













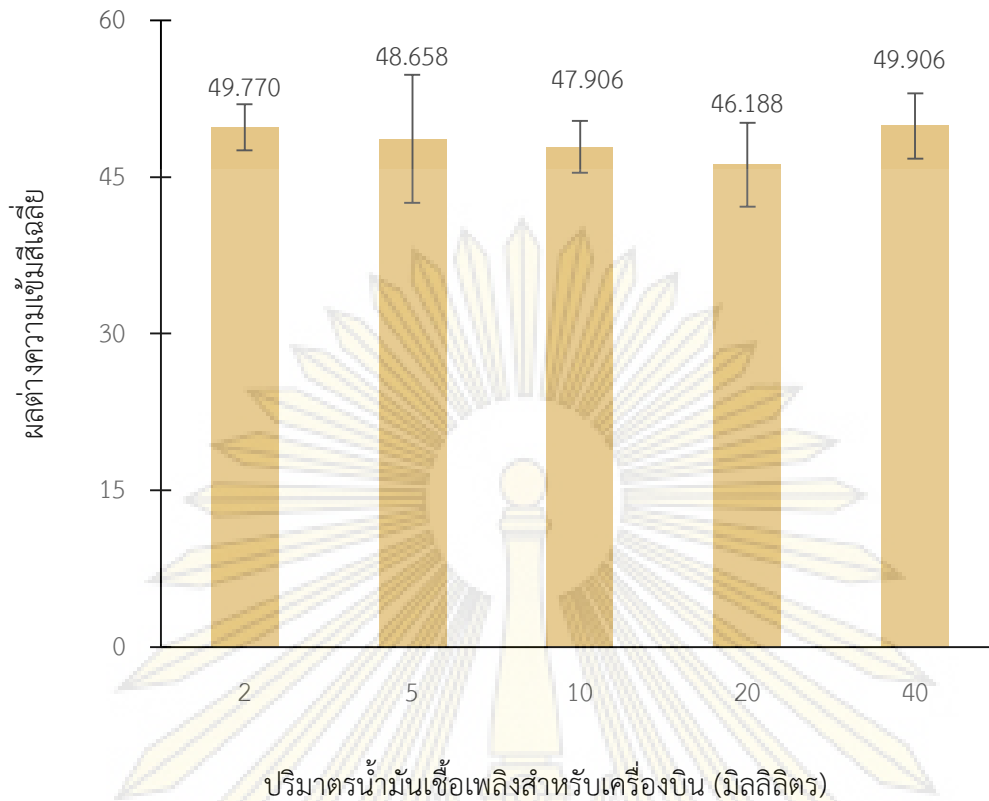
### 3.7 การทดสอบผลของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินที่ใช้ศึกษานั้นมีสภาพขุ่นที่ต่ำมาก เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงไม่ทำให้อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง แต่อาจทำให้สารอะลิซาริน เรด เอส หลุดออกจากอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษได้ด้วยผลของการเจือจางเมื่อมีปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินมากขึ้น ดังนั้นจึงทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ โดยเติมน้ำ 1.2 ไมโครลิตร ลงในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2 5 10 20 และ 40 มิลลิลิตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.7

เมื่อพิจารณาผลต่างความเข้มข้นสีเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.12 พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (เทียบกับผลต่างความเข้มข้นสีเฉลี่ยในกรณีทดสอบใช้น้ำมันปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

ตารางที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตรแตกต่างกัน

ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ใช้ทดสอบ (มิลลิลิตร)	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
2.0		
5.0		
10.0		
20.0		
40.0		















**รูปที่ 3.12** กราฟแท่งแสดงผลต่างความชื้นเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษหลังทดสอบกับปริมาณน้ำ 1.2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตร 2 5 10 20 และ 40 มิลลิลิตร

### 3.8 การทดสอบหาสารบวกรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

สารเคมีที่เลือกนำมาทดสอบ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน อะซีโตนไตรรล์ และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ โดยเติมสารเคมีเหล่านี้ปริมาตร 1.2 ไมโครลิตร ลงในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผลการทดสอบด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเทียบกับการทดสอบน้ำปริมาตร 1.2 ไมโครลิตร ในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตรเท่ากัน แสดงดังตารางที่ 3.8

จากผลการทดสอบ พบว่าเมทานอล และเอทานอล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษจากสีม่วงเป็นสีเหลือง โดยเกิดขึ้นเป็นเพียงบางส่วนของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ การเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นคาดว่าเป็นผลมาจากการบวกรับปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรีของอะลิซาริน เรด เอส ด้วยกลไกเช่นเดียวกันกับน้ำ เนื่องจากทั้งเมทานอล และเอทานอล มีสภาพขั้วที่สูงใกล้เคียงกับน้ำ ในขณะที่อะซีโตน อะซีโตนไตรรล์ และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ เนื่องจากสารเคมีเหล่านี้มีสภาพขั้วต่ำกว่าน้ำค่อนข้างมาก โดยสามารถเปรียบเทียบสภาพขั้วของสารเคมีได้จากตารางที่ 3.9 จากผลการทดสอบข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเมทานอล และเอทานอลเป็นสารบวกรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบสารรบกวนการวิเคราะห์

สารเคมีที่ใช้ทดสอบ	สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
น้ำ		
เมทานอล		
เอทานอล		
อะซีโตน		
อะซีโตนไนไตรล์		
ไดเมทิลฟอร์มาไมด์		

ตารางที่ 3.9 สภาพขั้วของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ <sup>27</sup>

ตัวทำละลาย	สภาพขั้วสัมพัทธ์ (relative polarity)
น้ำ	1.000
เมทานอล	0.762
เอทานอล	0.654
อะซีโตน	0.355
อะซีโตนไนไตรล์	0.460
ไดเมทิลฟอร์มาไมด์	0.386

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยเทคนิคเชิงสีเพื่อการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน โดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสีย้อมอินทรีย์อะลิซาริน เรด เอส ที่มีฟลูออโรไคโอออนในระบบ ผ่านปฏิกิริยากรด-เบสของเบรินสเตด-ลาวรี พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเป็นดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายอะลิซาริน เรด เอส (deprotonated form) 8 มิลลิโมลาร์ สัดส่วนความเข้มข้นของเตตระ-เอ็น-บิวทิลแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ต่อ อะลิซาริน เรด เอส (protonated form) เท่ากับ 15:1 และเวลาที่ใช้ในการเตรียมอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ 4 นาที

อุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสมข้างต้น สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงเป็นสีเหลืองอย่างสมบูรณ์เมื่อสัมผัสกับปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินตั้งแต่ 1.2 ไมโครลิตรขึ้นไป หรือสามารถตรวจวัดน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินในระดับต่ำที่สุดเท่ากับ 30 ส่วนในล้านส่วน (ใช้ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินปริมาตร 40 มิลลิลิตร) จากการทดสอบเปรียบเทียบผลต่างความเข้มข้นสีเฉลี่ยด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired t-Test) สรุปได้ว่าปริมาณน้ำที่มากกว่า 1.2 ไมโครลิตร และการเพิ่มของปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ไม่ทำให้ผลต่างความเข้มข้นเฉลี่ยของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือเกือบทันทีเมื่อสัมผัสกับน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน นอกจากนี้สีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษทั้งก่อนและหลังทดสอบยังมีความเสถียรที่สูงในช่วงระยะเวลา 10 นาที แม้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้นจะมีสูง แต่การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นสามารถถูกรบกวนได้จากสารเคมีบางชนิดที่มีสภาพขั้วสูงใกล้เคียงกับน้ำ ได้แก่ เมทานอล และเอทานอล

วิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษในงานวิจัยนี้ เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานในภาคสนาม เนื่องจากสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า พกพาสะดวก ใช้แล้วทิ้งได้ทันที ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว ใช้ปริมาณของสารตัวอย่างน้อย และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาสำคัญเกี่ยวกับความแม่นยำในการตรวจวัด เนื่องจากยังไม่มีวิธีทางกายภาพที่ทำให้น้ำกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน ซึ่งถือเป็นปัญหาที่ควรพัฒนาหาทางแก้ไขต่อไป



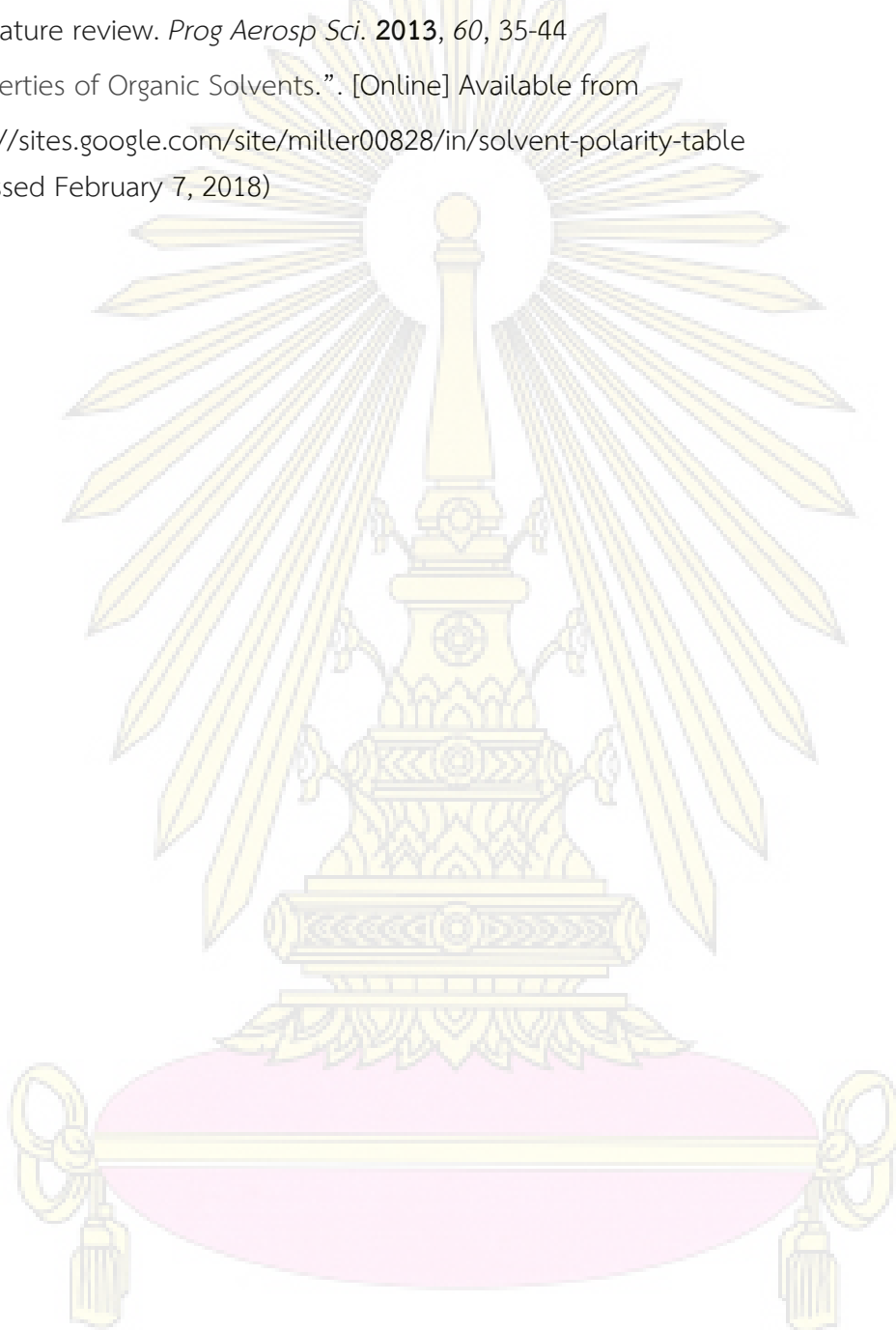
## เอกสารอ้างอิง

1. “การปฏิบัติตามพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2543 ของผู้ค้าน้ำมันในส่วนของ การอนุญาต และจดทะเบียนและการสำรองน้ำมันเชื้อเพลิง.”.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก [http://www.doeb.go.th/v5/show\\_km.php?tid=100](http://www.doeb.go.th/v5/show_km.php?tid=100) (accessed February 7, 2018)
2. “การตรวจสอบน้ำมันปลอมปนเบื้องต้น.”.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก [http://www.doeb.go.th/v5/show\\_km.php?tid=66](http://www.doeb.go.th/v5/show_km.php?tid=66) (accessed February 7, 2018)
3. “Water in aviation fuels.”. [Online] Available from [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC20-125.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC20-125.pdf). (accessed February 7,2018)
4. “SHELL WATER DETECTOR.”. [Online] Available from <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/shells-water-detector-tool.html> (accessed February 7, 2018)
5. “Karl Fischer Titration.”. [Online] Available from <https://www.mt.com/dam/LabDiv/Campaigns/TestingLabs2013/moisture/package/gtp-karl-fischer-EN.pdf> (accessed February 7, 2018)
6. Oguchi, R.; Yamaguchi, K.; Shibamoto, T. Determination of Water Content in Common Organic Solvents by a Gas Chromatograph Equipped with a Megabore Fused-Silica Column and a Thermal Conductivity Detector. *J. Chromatogr. Sci.* **1988**, *26*, 588–590.
7. Ohira, S.-I.; Goto, K.; Toda, K.; Dasgupta, P. K. A Capacitance Sensor for Water: Trace Moisture Measurement in Gases and Organic Solvents. *Anal. Chem.* **2012**, *84*, 8891–8897.
8. Kumar, P.; Kaushik, R.; Ghosh, A.; Jose, D. A. Detection of Moisture by Fluorescent OFF-ON Sensor in Organic Solvents and Raw Food Products. *Anal. Chem.* **2016**, *88*, 11314–11318.
9. Gunnlaugsson, T.; Kruger, P. E.; Jensen, P.; Pfeffer, F. M.; Hussey, G. M. Simple naphthalimide based anion sensors: deprotonation induced colour changes and CO<sub>2</sub> fixation. *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 8909–8913.
10. Kim, K. N.; Song, K. C.; Noh, J. H.; Chang, S. K. A Simple Phenol Indole Dye as a Chromogenic Probe for the Ratiometric Determination of Water Content in Organic Solvents. *Bull. Korean Chem.* **2009**, *30*, 197-200.
11. Moon, J. O.; Kim, Y. H.; Choi, M. G.; Chang, S. K. Colorimetric Signaling of Water Content in Acetonitrile by Phenolic Dye-Fluoride Complexes. *Bull. Korean Chem.* **2011**, *32*, 3517-3520.
12. Kumar, P.; Sakla, R.; Ghosh, A.; Jose, D. A. Reversible Colorimetric Sensor for Moisture Detection in Organic Solvents and Application in Inkless Writing. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **2017**, *9*, 25600-25605.



13. Martinez, W. A.; Phillips, S. T.; Butte, M. J.; Whitesides, M. G. Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 1318-1320.
14. Li, X.; Tian, J.; Nguyen, T.; Shen, W. Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment. *Anal. Chem.* **2008**, *80*, 9131-9134.
15. Martinez, W. A.; Phillips, S. T.; Butte, M. J.; Whitesides, M. G. Diagnostics for the Developing World Microfluidic Paper-Based Analytical Devices, Portable Bioassays. *Anal. Chem.* **2010**, *82*, 3-10.
16. Zhang, M.; Ge, L.; Ge, S.; Yan, M.; Yu, J.; Huang, J.; Liu, S. 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.
17. Sun, G.; Ding, Y.; Ma, C.; Zhang, Y.; Ge, S.; Yu, J.; Song, X.; Paper-based electrochemical immunosensor for carcinoembryonic antigen based on three dimensional flower-like gold electrode and gold-silver bimetallic nanoparticles. *Electrochimica. Acta.* **2014**, *147*, 650-656.
18. Alkasir, R. S. J.; Rossner, A.; Andreescu, S. Portable Colorimetric Paper-Based Biosensing Device for the Assessment of Bisphenol A in Indoor Dust. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 9889-9897
19. Zhang, Y.; Zuo, P.; Ye, B. C. 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*, 4-19.
20. Ratnarathorn, N.; Chailapakul, O.; Henry, C. S.; Dungchai, W. Simple Silver nanoparticle Colorimetric Sensing for Copper by Paper-Based Devices. *Talanta.* **2012**, *99*, 552-557.
21. Liu, Y.; Wei, Z.; Duan, W.; Ren, C.; Wu, J.; Liu, D.; Chen, H. A dual-mode sensor for colorimetric and "turn-on" fluorescent detection of ascorbic acid. *Dyes and Pigments.* **2018**, *149*, 491-497.
22. "ความพิเศษของโลกนาโน.". [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://comdigest.blogspot.com/2015/10/imagej.html> (accessed February 7, 2018)
23. Ojeda, C. B.; Rojas, F. S. Process Analytical Chemistry: Applications of Ultraviolet/Visible Spectrometry in Environmental Analysis. *Appl. Spectrosc. Rev.* **2009**, *44*, 245-265
24. "Diffuse Reflectance IR and UV-vis Spectroscopy.". [Online] Available from [http://www.fhberlin.mpg.de/acnew/departament/pages/teaching/pages/teaching\\_\\_wintersemester\\_\\_2007\\_2008/jentoft\\_diffusereflectance\\_250108.pdf](http://www.fhberlin.mpg.de/acnew/departament/pages/teaching/pages/teaching__wintersemester__2007_2008/jentoft_diffusereflectance_250108.pdf) (accessed February 7, 2018)

25. "Diffuse Reflectance Spectroscopy.". [Online] Available from <https://pdfs.semanticscholar.org/7aef/ca85839ef34e145a7a503b4113b55b00abe2.pdf> (accessed February 7, 2018)
26. Baena-Zambrana, S.; Repetto, S.L.; Lawson, C. P.; Lam J.K.-W. Behaviour of water in Jet fuel- A literature review. *Prog Aerosp Sci.* **2013**, *60*, 35-44
27. "Properties of Organic Solvents.". [Online] Available from <https://sites.google.com/site/miller00828/in/solvent-polarity-table> (accessed February 7, 2018)



## ภาคผนวก

ตารางที่ 3.10 แสดง Paired t-test ของผลต่างความเข้มข้นสีเฉลี่ยในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษเมื่อมีปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินแตกต่างกัน

ค่าทางสถิติ	ปริมาณน้ำในน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทดสอบ (ไมโครลิตร)				
	1.2 (อ้างอิง)	1.4	1.6	1.8	2.0
Mean	49.629	50.279	50.487	49.356	48.032
Variance	3.081	10.093	2.590	5.153	1.555
Observations	3				
<b><math>\alpha</math></b>	0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%)				
Pearson Correlation		0.922	0.182	0.992	0.849
Hypothesized Mean Difference	0				
df	2				
t Stat		0.232	0.689	0.118	2.887
P(T ≤ t) one-tail		0.419	0.281	0.458	0.051
t Critical one-tail		2.920	2.920	2.920	2.920
P(T ≤ t) two-tail		0.838	0.562	0.917	0.102
t Critical two-tail		4.303	4.303	4.303	4.303

ตารางที่ 3.11 แสดง Paired t-test ของผลต่างความเข้มข้นในการทดสอบผลของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องบินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอุปกรณ์วิเคราะห์ฐานกระดาษ

ค่าทางสถิติ	ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ (มิลลิลิตร)				
	2.0 (อ้างอิง)	5.0	10.0	20.0	40.0
Mean	49.770	48.658	47.906	46.188	49.906
Variance	3.081	37.404	6.074	5.153	9.824
Observations	3				
<b><math>\alpha</math></b>	0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%)				
Pearson Correlation		0.988	0.060	0.809	0.640
Hypothesized Mean Difference	0				
df	2				
t Stat		0.486	0.951	2.380	0.098
P(T ≤ t) one-tail		0.338	0.221	0.070	0.466
t Critical one-tail		2.920	2.920	2.920	2.920
P(T ≤ t) two-tail		0.675	0.442	0.140	0.931
t Critical two-tail		4.303	4.303	4.303	4.303

ตารางที่ 3.12 ตารางแสดงค่า Paired t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ

องศาความเป็นอิสระ (n-1)	ระดับความเชื่อมั่น (%)			
	90	95	99	99.9
1	6.31	12.71	63.66	636.62
2	2.92	4.30	9.93	31.60
3	2.35	3.18	5.84	12.92
4	2.13	2.78	4.60	8.61
5	2.02	2.57	4.03	6.87
6	1.94	2.45	3.71	5.96
7	1.89	2.37	3.50	5.41
8	1.86	2.31	3.36	5.04
9	1.83	2.26	3.25	4.78
10	1.81	2.23	3.17	4.59
11	1.80	2.20	3.11	4.44
12	1.78	2.18	3.06	4.32
13	1.77	2.16	3.01	4.22
14	1.76	2.14	2.98	4.14
15	1.75	2.13	2.95	4.07
16	1.75	2.12	2.92	4.02
17	1.74	2.11	2.90	3.97
18	1.73	2.10	2.88	3.92
19	1.73	2.09	2.86	3.88
20	1.72	2.09	2.85	3.85
∞	1.65	1.96	2.58	3.29

ที่มา : AOAC manual for Peer Verified Methods program, VA, NOV 1993



## ประวัติผู้วิจัย

นายนราธร นิทรทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2539 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนผดุงศิษย์พิทยา จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2556 เคยได้รับรางวัลผลการเรียนดีเด่น เมื่อ พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557 เคยได้รับทุนการศึกษาจากโครงการสนับสนุนการศึกษาและฝึกงาน บริษัท ออโตเทค (ประเทศไทย) จำกัด เมื่อ พ.ศ. 2560 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 363/59 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10800 อีเมล Narathorn\_ths@hotmail.com

