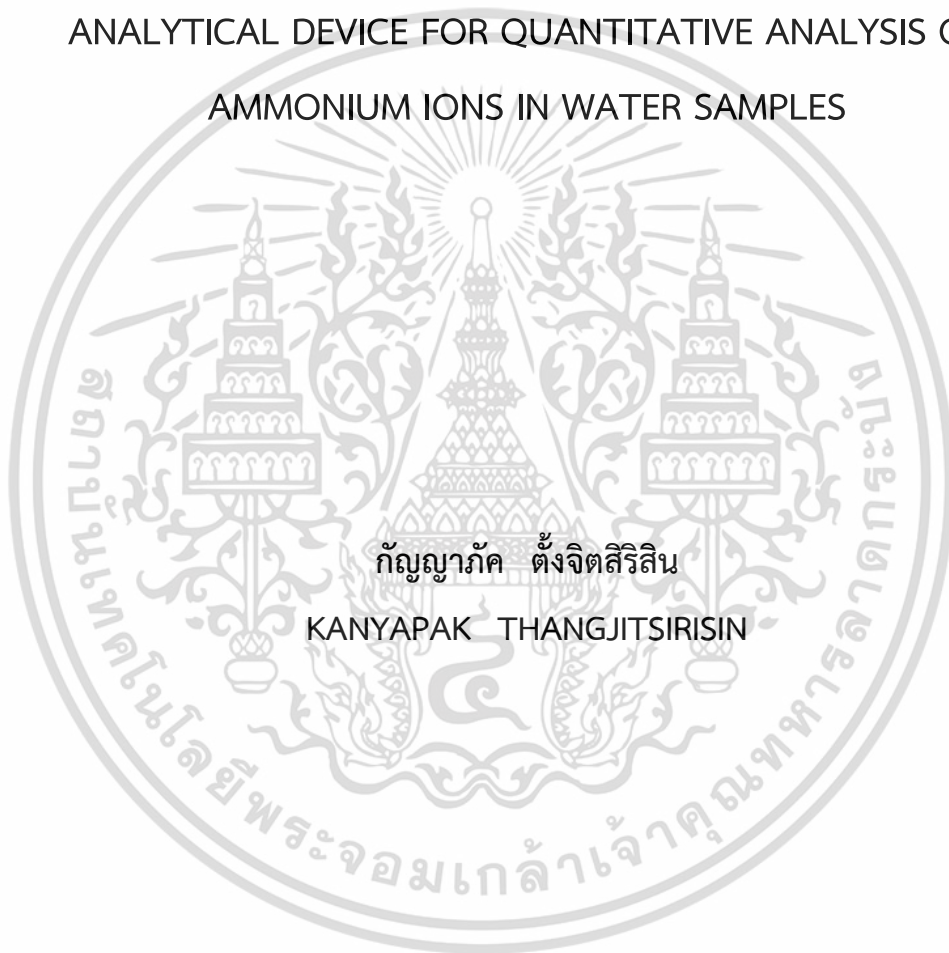


การประยุกต์ใช้เปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อเป็นวัสดุชนิดใหม่
สำหรับการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำ

USE OF MODIFIED-EGGSHELL AS A NOVEL MATERIAL FOR
PATTERNING OF HYDROPHOBICITY BARRIER ON PAPER-BASED
ANALYTICAL DEVICE FOR QUANTITATIVE ANALYSIS OF
AMMONIUM IONS IN WATER SAMPLES



กัญญาภักดิ์ ตั้งจิตสิริสิน

KANYAPAK THANGJITSIRISIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2024-SC-M-012-016
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

USE OF MODIFIED-EGGSHELL AS A NOVEL MATERIAL FOR
PATTERNING OF HYDROPHOBICITY BARRIER ON PAPER-BASED
ANALYTICAL DEVICE FOR QUANTITATIVE ANALYSIS OF
AMMONIUM IONS IN WATER SAMPLES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2024-SC-M-012-016



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อเป็นวัสดุชนิดใหม่ สำหรับการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาภัค ตั้งจิตสิริสิน
รหัสประจำตัว	63605041
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เจริญชัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รายงานการนำเปลือกไข่มาใช้เป็นวัสดุชนิดใหม่ สำหรับการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Paper-based Analytical Device: PAD) โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของผองเปลือกไข่ ให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยกรดสเตียริก และเกิดเป็นอนุภาคแคลเซียมสเตียเรต จากนั้น นำอนุภาคเปลือกไข่ไปแขวนลอยในตัวประสานพอลิสไตรีน เพื่อเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ สำหรับสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองเบอร์ 1 อาศัยเทคนิคการวาดด้วยพู่กันเบอร์ 1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยืนยันว่าผองอนุภาคเปลือกไข่สามารถเกาะติดบนเส้นใยเซลลูโลส และปกปิดช่องว่างที่เป็นรูพรุนของกระดาษกรองได้อย่างดี และเกิดคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดบนพื้นผิวที่เคลือบสารละลายเปลือกไข่ โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ $131.93^\circ (\pm 1.04^\circ)$ จากนั้นได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติ อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอทแบบตัดแปลง เพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยการใช้การถ่ายภาพ ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยสามารถตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนได้ในช่วงความเข้มข้น 5 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเป็นเส้นตรงที่ดี ($R^2 > 0.99$) และมีความแม่นยำสูง ($\text{RSD} = 0.85\%$) ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ 1.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับมีค่าอยู่ในช่วง 98.57 – 101.09 และเมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟีที่เป็นเทคนิคมาตรฐาน พบว่า ผลวิเคราะห์ไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($t_{\text{stat}} = -1.80$, $t_{\text{cri}} = 2.57$, $n = 6$) แสดงให้เห็นว่า PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

คำสำคัญ: ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ, เปลือกไข่, อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ, แอมโมเนียมไอออน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Use of Modified-eggshell as A Novel Material for Patterning of Hydrophobicity Barrier on Paper-based Analytical Device for Quantitative Analysis of Ammonium Ions in Water Samples
Student Name	Miss. Kanyapak Thangjitsirisin
Student ID	63605041
Degree	Master of Science (Applied Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2024
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nathawut Choengchan

Abstract

This dissertation reports using eggshells as a new hydrophobic material for fabricating a hydrophobic barrier of paper-based analytical device (PAD). The surface of eggshell particles was hydrophobilized with stearic acid and this led to calcium stearate. Then, the modified eggshell was suspended in a polystyrene binder. The as-prepared solution was employed for patterning of the hydrophobic barrier on laboratory filter paper (No. 1) by manual painting with a paintbrush (No. 1). Results by scanning electron microscopy technique confirmed that the modified eggshell adhered to cellulose fibers and concealed the porous amongst the fiber networks. The hydrophobic eggshell coated paper provided the water contact angle of $131.93^\circ (\pm 1.04^\circ)$. This indicated superhydrophobic feature. The developed PAD was then applied to measure the ammonium ions (NH_4^+) contents in natural water samples based on a modified Berthelot's reaction. Colorimetric detection was performed by image capturing with smart phone. Dynamic working range of $5 - 100 \text{ mg L}^{-1}$ was achieved with good linearity ($R^2 > 0.99$) and high precision ($\text{RSD} = 0.85 \%$). The limit of detection (LOD) is 1.35 mg L^{-1} . The analytical recovery was in the range of $98.57 - 101.09 \%$. The results were compared with the ones obtained by ion chromatography. There were no

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

significant differences at the 95 % confidence level ($t_{\text{stat}} = -1.80$, $t_{\text{cri}} = 2.57$, $n = 6$). This implies that the developed PAD is accurate and reliable.

Keywords: Natural water samples, Eggshell, Paper-based analytical device (PAD), Ammonium ions



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การประยุกต์ใช้เปลือกไข่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อเป็นวัสดุชนิดใหม่ สำหรับการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์) สามารถดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำต่าง ๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐภูมิ เชิงชั้น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือ อบรม สั่งสอน และให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา ตลอดจนช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เสาวภาคย์ ซีราทรง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปานไพลิน สีหาราช ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และสนับสนุนการทำวิจัยในส่วนของพัฒนาวัสดุเปลือกไข่

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) จากกองทุนวิจัย สจล. [KREF016307] ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษา และทุนการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยเคมีวิเคราะห์เชิงประยุกต์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ รวมไปถึงสารเคมีสำหรับทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสาคร สอนพงษ์ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดัน คอยอำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนทางการศึกษา จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณ เพื่อน พี่ น้อง ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และอยู่เคียงข้างเสมอมา ผู้วิจัยซาบซึ้งในความกรุณา และความปรารถนาดีของทุก ๆ ท่านเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ในทางการศึกษาค้นคว้าแก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ทางผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

กัญญาภัค ตั้งจิตสิริสิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Paper-based analytical device: PAD).....	4
2.2 วิธีการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ.....	5
2.2.1 วิธีลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photolithography).....	5
2.2.2 การพิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax printing).....	5
2.2.3 การวาด (Plotting หรือ Painting).....	5
2.2.4 การประทับตรา (Stamping).....	6
2.2.5 การพิมพ์สกรีน (Screen-printing).....	6
2.2.6 การฉีดสเปรย์ (Spraying).....	6
2.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic property).....	7
2.4 การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angles measurement).....	7
2.5 องค์ประกอบของเปลือกไข่.....	9
2.6 แอมโมเนียมไอออน.....	11
2.7 ปฏิกริยาการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออน.....	12
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.8.1 การปรับปรุงคุณสมบัติของผงเปลือกไข่ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ อย่างยิ่งยวด.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 วิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ และสารเคมีที่ใช้สร้าง ละลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ.....	14
2.8.3 การหาปริมาณแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบน กระดาษ.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	26
3.1.1 สารเคมี.....	26
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัด.....	27
3.2 การปรับปรุงผงเปลือกไข่ให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ และการเตรียมสาร ละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ.....	28
3.2.1 การเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่.....	28
3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่ให้ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก.....	30
3.2.3 การเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ.....	30
3.3 การสร้างละลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ อาศัยเทคนิค การวาด (Painting).....	31
3.4 การทดสอบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่บน กระดาษ.....	32
3.4.1 การทดสอบการกันน้ำ, การกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของสาร ละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่บนกระดาษ.....	32
3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิววัสดุด้วยการวัดค่ามุม สัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs).....	32
3.4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning electron microscope: SEM).....	33
3.4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-infrared spectro- meter: FT-IR).....	34
3.5 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) สำหรับการตรวจวัด ปริมาณแอมโมเนียมไอออน.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 การเตรียมสารละลาย.....	35
3.5.2 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบน กระดาษที่พัฒนาขึ้น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot’s reaction).....	36
3.6 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation).....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	38
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติ.....	38
4.1.1 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่ให้ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก.....	38
4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning electron microscope: SEM).....	39
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform-infrared spectro- meter: FT-IR).....	41
4.2 การศึกษาส่วนประกอบของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ที่เหมาะสม สำหรับ การนำมาสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ.....	42
4.2.1 การศึกษาตัวทำละลายกรดสเตียริก.....	42
4.2.2 การศึกษาปริมาณของเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) ที่เหมาะสม.....	43
4.3 การทดสอบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่บน กระดาษ.....	45
4.3.1 ทดสอบการกันน้ำ, การกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของชั้นเคลือบ เปลือกไข่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ.....	45
4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวกระดาษที่เคลือบ ด้วยเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ ด้วยการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs).....	45
4.4 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุง พื้นผิวที่เคลือบบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Chemical resistant).....	47
4.5 การทดสอบความทนต่อแรงทางกายภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Durability test).....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น.....	49
4.6.1 การออกแบบหลอดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา.....	49
4.6.2 การศึกษาขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัดที่เหมาะสม.....	50
4.6.3 การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสมในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่าง..	50
4.6.4 การศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม (Reaction time).....	52
4.6.5 การศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนต์เอและบี.....	53
4.6.6 การประเมินคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ (Analytical performances).....	56
4.6.7 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ที่อาจส่งผลต่อการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	57
4.6.8 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน ในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น.....	59
4.6.9 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น (Validation).....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามัมสัมผัสน้ำ และสมบัติของพื้นผิววัสดุ.....	7
2.2 แสดงการวัดภาวะการเปียกของวัสดุจากมัมสัมผัสน้ำ.....	8
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่.....	10
2.4 สรุปวิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างลวดลาย ส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ.....	20
2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย/แอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ.....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
4.1 คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของผงอนุภาคเปลือกไข่ ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดสเตียริกในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน.....	43
4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent A ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า ในช่วงระยะเวลาที่เก็บไว้ 28 วัน.....	53
4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent B ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า ในช่วงระยะเวลาที่เก็บไว้ 28 วัน.....	54
4.4 สรุปสถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น.....	55
4.5 แสดงค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ ของการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น.....	59
4.6 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (IC) และวิธีที่พัฒนาขึ้น (PAD).....	60

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(ก) กระจกทรง และ (ข) ภาพ SEM เส้นใยเซลลูโลสและรูปพรุนในกระจกทรง.	4
2.2	แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็งที่ค่ามุมสัมผัสต่าง ๆ.....	9
2.3	แสดงส่วนประกอบของไขทั้งฟอง.....	10
2.4	แสดงเปลือกไข และเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข.....	11
2.5	แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดั้งเดิม (Berthelot's reaction).....	12
2.6	แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction).....	13
3.1	เครื่อง Mechanical ball-milling.....	29
3.2	ผงอนุภาคเปลือกไขที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก (อนุภาคแคลเซียมสเตียเรต).....	30
3.3	สารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำ.....	31
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างลวดลายบนกระจก ด้วยเทคนิคการวาดประกอบด้วย (ก) ไม้บรรทัดพลาสติกกลลวดลาย และ (ข) พู่กันเบอร์ 1.....	31
3.5	(ก) แสดงการออกแบบลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระจก และ (ข) แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระจก (PAD) ที่พร้อมใช้งาน.....	32
3.6	เครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle meter).....	33
3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	33
3.8	เครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR).....	34
3.9	แสดงแผนภาพ ขั้นตอนการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction).....	36
3.10	เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (IC).....	37
4.1	กลไกการเกิดอนุภาคแคลเซียมสเตียเรต จากการปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไขด้วยกรดสเตียริก โดยที่ (ก) เปลือกไขไก่, (ข) อนุภาคเปลือกไข, และ (ค) อนุภาคแคลเซียมสเตียเรต.....	38
4.2	ภาพ SEM ของ (ก) ผงอนุภาคเปลือกไขก่อนปรับปรุงพื้นผิว และ (ข) ผงอนุภาคเปลือกไขหลังปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	ภาพ SEM ของ (ก) กระจาดทรงเปล้า และกระจาดทรงที่ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ (ข) 1 ด้าน และ (ค) 2 ด้าน (ภาพที่แทรกคือภาพ SEM ในแนวตัดขวาง).....	40
4.4	แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (A) ผงอนุภาคเปลือกไข่ (Eggshell), (B) กรดสเตียริก (Stearic acid), และ (C) ผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid modified eggshell).....	42
4.5	แสดงภาพถ่ายกระจาดทรงหลังจากสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระจาดด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ โดยใช้ปริมาตรของ THF (สำหรับทำละลาย PS) ที่ (ก) 10.00 มิลลิลิตร, (ข) 5.00 มิลลิลิตร, และ (ค) 2.50 มิลลิลิตร จากนั้นหยดน้ำสีน้ำเงิน ปริมาตร 10 ไมโครลิตร และถ่ายรูปหลังหยด 5 นาที.....	44
4.6	(ก) การทดสอบการกันน้ำ และ (ข) การทดสอบการกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของชั้นเคลือบเปลือกไข่บนกระจาด โดยการหยดน้ำสีน้ำเงิน.....	45
4.7	กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของกระจาดที่เคลือบด้วยสารละลายชั้นเคลือบตัวประสานอย่างเดียว (PS/THF), สารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และมีตัวประสาน (Eggshell), และสารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแล้ว และมีตัวประสาน (Modified eggshell).....	46
4.8	การทดสอบความทนต่อสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระจาด.....	47
4.9	แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระจาด (PAD) ที่ถูกทำการทดสอบความทนทางกายภาพ โดยที่ (ก) PAD ก่อนการขยำ, (ข) PAD ที่โดนขยำ, และ (ค) PAD หลังขยำ.....	48
4.10	การออกแบบลวดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา.....	49
4.11	การศึกษาขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัดที่เหมาะสม.....	50
4.12	การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสมในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่าง.....	51
4.13	การศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม.....	52
4.14	แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent A ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า ที่เก็บไว้ในช่วงระยะเวลา 28 วัน.....	54
4.15	แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent B ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า ที่เก็บไว้ในช่วงระยะเวลา 28 วัน.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	แสดงภาพถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD และกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนและความเข้มข้นของสีเขียว.....	57
4.17	แสดงผลการศึกษาความจำเพาะเจาะจง จากไอออนชนิดต่าง ๆ ที่อาจรบกวนการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนบน PAD อาศัยปฏิกิริยาเบรธลอทแบบดัดแปลงในการตรวจวัด โดยที่ (ก) ศึกษาไอออนตัวรบกวนอย่างเดียว และ (ข) ศึกษาไอออนตัวรบกวนเมื่อมีแอมโมเนียมรวมอยู่ด้วย.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PAD	อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ
PS	พอลิสไตรีน
THF	เตตระไฮโดรฟิวแรน
mg L ⁻¹	ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
% (v/v)	ความเข้มข้นในหน่วยปริมาตรต่อปริมาตร
M	ความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์
D	วันที่
n	จำนวนวิเคราะห์
SD	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
RSD	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
NH ₃	แอมโมเนีย
NH ₄ ⁺	แอมโมเนียมไอออน
LOD	ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Paper-based analytical device: PAD) ได้รับความนิยม นำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และใช้งานง่าย อีกทั้ง ตัวอุปกรณ์ยังมีขนาดเล็ก พกพาไปใช้งานภาคสนามได้ ในขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดอาศัยวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก โดยทำการกำหนดขอบเขตบริเวณตรวจวัดบนกระดาษ จากการสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic barrier) ให้เป็นลวดลายต่าง ๆ ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์นั้น ๆ ส่วนบริเวณอื่นที่ปรากฏอยู่ภายในส่วนที่ไม่ชอบน้ำนั้น จะเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic area) ซึ่งใช้เป็นพื้นที่สำหรับหยดสารตัวอย่างและสารเคมี เพื่อตรวจวัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนกระดาษต่อไป

เทคนิคในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธีลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photolithography) [1], การพิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax printing) [2], การวาดด้วยมือ (Manual plotting หรือ Painting) [3] และวาดแบบอัตโนมัติด้วยแขนกล (Automated robotic arm plotting) [4], การประทับตรา (Stamping) [5], การพิมพ์สกรีน (Screen-printing) [6] และการฉีดสเปรย์ (Spraying) [7] เป็นต้น มีรายงานการวิจัย นำเทคนิคเหล่านี้มาใช้ร่วมกับวัสดุที่ไม่ละลายน้ำประเภทต่าง ๆ เพื่อสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ขี้ผึ้ง [2], หมึกกันน้ำ [3], โพลีไธเมทิลไซลอกเซน [4], โพลีไวนิลคลอไรด์ [6], และน้ำยาทาเล็บ [7] วัสดุเหล่านี้มีข้อดีคือ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง เมื่อใช้ในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ จึงสามารถป้องกันไม่ให้น้ำหรือของเหลวใด ๆ ซึมผ่านลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำนั้นได้ อย่างไรก็ตาม วัสดุเหล่านี้ ล้วนเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างมีความเป็นพิษต่อทั้งผู้ใช้ PAD และสิ่งแวดล้อม ทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง ดังนั้น หากสามารถใช้สารเคมีอื่น ๆ ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือไม่มีความเป็นพิษเลย แต่ยังคงมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง จึงมีความน่าสนใจ นำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำ

เมื่อไม่นานมานี้ มีงานวิจัย [8] นำเสนอการเตรียมวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobicity) ได้แก่ ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดสเตียริก และใช้เป็นวัสดุในการสร้างชั้นเคลือบที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวกระจกและผ้า ซึ่งพบว่าวัสดุทั้งสองประเภทสามารถกันน้ำได้อย่างดี โดยเปลือกไข่ที่นำมาใช้นั้น เป็นวัสดุที่เหลือจากการปรุงอาหาร และไม่มีความเป็นพิษแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม การสืบค้นและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ยังไม่พบว่ามีการวิจัยใดนำเสนอการประยุกต์ใช้วัสดุเปลือกไข่ดังกล่าวนี้ มาใช้เป็นวัสดุในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในเชิงวิชาการไว้ก่อน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแต่อย่างใด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่จะนำผงเปลือกไข่มาใช้เป็นวัสดุในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรอง เพื่อเตรียมเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ เนื่องจากตั้งที่ได้กล่าวแล้วว่า เปลือกไข่เป็นวัสดุใช้แล้ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หากนำมาใช้จะช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยจะนำเปลือกไข่ไปทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยการบด แล้วจึงปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรดสเตียริก ด้วยขั้นตอนและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม เพื่อให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด แล้วจึงนำผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว ไปละลายในตัวทำละลาย ซึ่งจะเลือกใช้โดยพิจารณาจากเกณฑ์ คือ ทำให้ผงเปลือกไข่กระจายตัวแขวนลอยในสารละลายชนิดนั้นได้ จากนั้นจะนำสารแขวนลอยผงเปลือกไข่นี้ไปใช้สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองที่ใช้อยู่ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ อาศัยเทคนิคการวาด (Painting) ด้วยพู่กันเบอร์ 1 สาเหตุที่เลือกใช้เทคนิคการวาด เพราะ มีความสะดวก รวดเร็ว และสามารถปรับเปลี่ยนลวดลายได้หลากหลายตามความเหมาะสมในการวิเคราะห์ เมื่อทำการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำแล้วเสร็จ จะทำการทดสอบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของผงเปลือกไข่บนกระดาษ โดยพิจารณาจากค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle) บนพื้นผิวกระดาษ และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) เพื่อยืนยันการเกาะติดของผงเปลือกไข่ในรูพรุน และบนเส้นใยเซลลูโลสของกระดาษ จากนั้นจะออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ โดยใช้ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว เป็นวัสดุในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

จากนั้น นำอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่เตรียมได้ไปทดสอบความเหมาะสมและความเป็นไปได้ สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยในงานวิจัยนี้ จะนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในแหล่งน้ำธรรมชาติ อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction) ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดสีฟลิทเมตริกที่เกิดขึ้นบนกระดาษต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อเตรียมวัสดุผงเปลือกไข่ที่ดัดแปลงพื้นผิว โดยใช้กรดสเตียริกในการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ
- 2) เพื่อศึกษาการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ อาศัยเทคนิคการวาด ด้วยพู่กันเบอร์ 1 โดยใช้ผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเป็นวัสดุกันน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เพื่อศึกษาคุณลักษณะ และทดสอบความไม่ชอบน้ำของผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วบนกระดาษ
- 4) เพื่อสร้างอุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษ อาศัยผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเป็นวัสดุในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำ
- 5) เพื่อนำอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในแหล่งน้ำธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตการดำเนินงานโดยเริ่มจากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุผงเปลือกไข่ โดยปรับปรุงให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก แล้วทำการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ ด้วยเทคนิคการวาด โดยใช้ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเป็นวัสดุกันน้ำ ถัดมาคือการศึกษาคุณลักษณะ และทดสอบความไม่ชอบน้ำของผงเปลือกไข่บนกระดาษ เมื่อศึกษาสถานะต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว จะทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ท้ายที่สุด คือการจัดทำรายงานและเผยแพร่ผลงานวิจัยต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมผงเปลือกไข่ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำได้เป็นผลสำเร็จ
- 2) ลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษ โดยการนำเปลือกไข่ที่เป็นวัสดุใช้แล้วมาสร้างมูลค่าเพิ่มให้เกิดประโยชน์
- 3) สามารถนำผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว ไปใช้สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำอาศัยเทคนิคการวาด เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้
- 4) สามารถนำอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

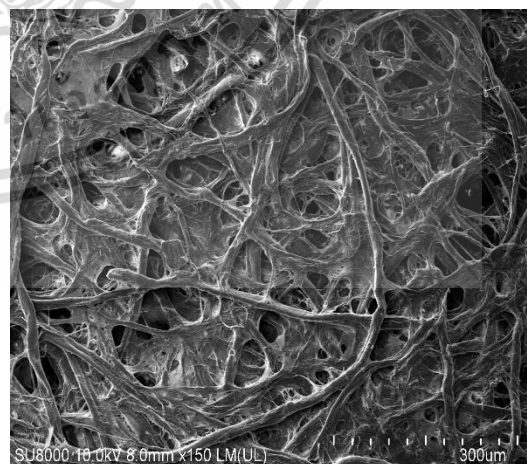
2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Paper-based analytical device: PAD) [9, 10]

อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ หรือ PAD เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กระดาษเป็นวัสดุหลักในการสร้างกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยาก ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็ก พกพาไปใช้งานนอกสถานที่ได้สะดวก ตรวจสอบวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ต้นทุนต่ำ เนื่องจากกระดาษเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย โดยกระดาษที่นิยมนำมาใช้ในการผลิต PAD คือ กระดาษกรอง (Filter paper) ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีส่วนประกอบหลักเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี คุณสมบัติที่สำคัญของกระดาษกรองคือ ความคงทนเมื่อเปียก, ขนาดของรูพรุน ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันหลากหลายขนาด การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานแต่ละชนิด, ความสามารถในการกรองอนุภาค และอัตราการไหลของสารที่ต้องการกรอง

ในขั้นตอนการสร้าง PAD สามารถกำหนดขอบเขตบริเวณตรวจวัดได้ โดยการสร้างส่วนกั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic barrier) ให้เป็นลวดลายต่าง ๆ ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์นั้น ๆ ซึ่งมียุทธศาสตร์วิธีการดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.2 บริเวณอื่นที่เหลืออยู่บนกระดาษจะเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic area) ซึ่งใช้เป็นพื้นที่สำหรับหยดสารตัวอย่างและสารเคมี เพื่อตรวจวัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนกระดาษต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) กระดาษกรอง และ (ข) ภาพ SEM เส้นใยเซลลูโลส และรูพรุนในกระดาษกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วิธีการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

2.2.1 วิธีลิโทกราฟีแบบใช้แสง (Photolithography) [1]

วิธีลิโทกราฟีแบบใช้แสงเป็นการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำโดยใช้สารไวแสง ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) กระบวนการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำมีขั้นตอนคร่าว ๆ ดังนี้ ขั้นตอนแรกจะทำความสะอาดพื้นผิวของวัสดุก่อน จากนั้นจะเคลือบผิวหน้าของวัสดุด้วยสารไวแสงในห้องปราศจากฝุ่นละอองและอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (Clean room) ที่มีแสงสีเหลือง ด้วยเครื่องหมุนเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater) ที่ความเร็วรอบและเวลาตามสภาวะต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการใช้งาน หลังจากเคลือบผิวหน้าวัสดุแล้ว ทำการอบสารไวแสงที่ผิวหน้าให้แห้งด้วยเตาให้ความร้อน (Hot plate) ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมหน้ากากกั้นแสง (Mask) ที่ทำการออกแบบเป็นลวดลายต่าง ๆ ทำการฉายแสง UV ผ่านหน้ากากกั้นแสง หลังจากการฉายแสง สามารถล้างสารไวแสงในสารเคมีได้เลย ยกเว้นสารไวแสงบางชนิด เช่น SU-8 ที่ต้องทำการอบหลังจากการฉายแสง ขั้นตอนสุดท้ายคือการล้างสารไวแสงด้วยสารเคมีที่เรียกว่า Developer และ โพรพานอล เพื่อให้เกิดลวดลายตามหน้ากากกั้นแสง เมื่อเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบแห้งแล้ว จะได้กระดาษที่มีส่วนไม่ชอบน้ำเป็นลวดลายต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ และพร้อมนำไปใช้งาน

2.2.2 การพิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax printing) [2]

ขี้ผึ้งเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำที่มีราคาถูก และหาซื้อได้ทั่วไป การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้งสามารถทำได้โดยการใช้ปากกา, เครื่องพิมพ์ขี้ผึ้ง หรือทำโดยการขีดขี้ผึ้งลงบนตะแกรงของสกรีน ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่วางอยู่บนกระดาษกรอง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเตาอบ หรือบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ขี้ผึ้งละลายแล้วแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยของกระดาษกรอง เพื่อสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

2.2.3 การวาด (Plotting หรือ Painting) [3, 4]

วิธีการวาดมีขั้นตอนในการสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพียงขั้นตอนเดียว โดยใช้ปากกาหมึกกันน้ำ และแม่แบบในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำ เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ ภายในเวลาเพียง 1 นาที แม้ว่าวิธีนี้จะมีความง่าย และรวดเร็ว แต่ควบคุมความละเอียด (Resolution) ของลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำให้มีความสม่ำเสมอได้ยาก การวาดสามารถทำได้สองวิธี ได้แก่ การวาดด้วยมือ (Manual plotting) และการวาดแบบอัตโนมัติด้วยแขนกล (Automated robotic arm plotting)

2.2.4 การประทับตรา (Stamping) [5]

ตรายาง เป็นวัสดุสำคัญในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยวิธีการประทับตรา ก่อนอื่นต้องทำการออกแบบลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนตรายางให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เมื่อได้ตรายางมาแล้ว ต่อไปจะทำการเติมหมึกกันน้ำลงไปเพื่อให้แผ่นตรายางดูดซับหมึกเอาไว้ จากนั้นจึงนำตรายางไปประทับตราลงบนกระดาษกรอง เพื่อสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำ วิธีนี้สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาน้อยกว่า 10 วินาที ในการประทับตราลงบนกระดาษเพียงหนึ่งครั้ง และไม่จำเป็นต้องใช้ Clean room หรือขั้นตอนการล้างใด ๆ

2.2.5 การพิมพ์สกรีน (Screen-printing) [6]

การพิมพ์สกรีน เป็นวิธีที่ใช้หลักการปาดหมึก อาศัยอุปกรณ์ปาดหมึก (Squeegee) ผ่านผ้าสกรีน (Screen mesh) ที่ขึงตึงบนกรอบที่ทำขึ้น เพื่อถ่ายโอนหมึกไปยังวัสดุพิมพ์ โดยทำการฉลุผ้าสกรีนให้มีลวดลายตามความต้องการ ซึ่งลวดลายดังกล่าวจะเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ วัสดุไม่ชอบน้ำ เช่น ซีพิง, โพลีสไตรีน และโพลีไวนิลคลอไรด์ มักจะถูกนำมาใช้เป็นหมึกในการสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ ขั้นตอนการพิมพ์สกรีนโดยสังเขป มีดังนี้ ขั้นแรกนำวัสดุพิมพ์มาตรึงไว้บนโต๊ะสำหรับการสกรีน จากนั้นเทหมึกลงบนปลายด้านหนึ่งของผ้าสกรีน โดยตั้งให้ผ้าสกรีนเอียงประมาณ 30-35 องศา แล้วลากไม้ปาดหมึกผ่านผ้าสกรีน เพื่อให้หมึกเติมเต็มลวดลายบนผ้าสกรีน ขั้นตอนต่อไปจะทำการกดผ้าสกรีนลงบนพื้นผิวของวัสดุ แล้วทำการลากไม้ปาดหมึกจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งซ้ำ 2-3 ครั้ง ขั้นตอนสุดท้าย ยกผ้าสกรีนขึ้น แล้วนำวัสดุที่พิมพ์แล้วออกมาแขวนไว้ให้แห้งในที่ที่อากาศถ่ายเทสะดวก โดยจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที วิธีนี้มีข้อดีคือ ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ วิธีการผลิตค่อนข้างง่าย และสามารถผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษได้จำนวนมากในการพิมพ์สกรีนหนึ่งครั้ง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีความละเอียดของลวดลายค่อนข้างต่ำ และเส้นขอบของลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำที่ได้มีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ

2.2.6 การฉีดสเปรย์ (Spraying) [7]

วิธีการฉีดสเปรย์ จำเป็นต้องมีหน้ากาก (Mask) ที่ทำการฉลุลวดลายต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และสิ่งที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างของเทคนิคนี้ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการฉีดสเปรย์วัสดุกันน้ำ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องพ่นสี (Air brush) หรือกระบอกฉีดน้ำ เป็นต้น วัสดุที่ไม่ชอบน้ำจะถูกฉีดสเปรย์ลงบนกระดาษที่ปกคลุมด้วยหน้ากากโดยตรงเพื่อสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และ ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ขนาดใหญ่ใด ๆ เพิ่มเติม อีกทั้ง ความละเอียดของลวดลายที่ได้จากเทคนิคนี้ค่อนข้างดี เส้นขอบของบริเวณที่กั้นระหว่างส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำมีความเรียบและคมชัด (Clear boundary)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic property) [11]

ความชอบน้ำ และความไม่ชอบน้ำของวัสดุ เป็นคุณสมบัติเฉพาะของพื้นผิวของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไป สามารถอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวของวัสดุ กับการทำมุมสัมผัสของหยดน้ำ โดยวิธีการอย่างง่ายที่ใช้ในการบอกลักษณะของพื้นผิววัสดุว่ามีความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ สังเกตได้จากรูปทรงของหยดน้ำ กล่าวคือ หากหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุมีลักษณะค่อนข้างแบน ไม่โค้งนูน แสดงว่าพื้นผิวของวัสดุนั้นมีความชอบน้ำ หรือเปียกน้ำ (Wettability) ในทางกลับกัน หากหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุมีลักษณะเป็นเม็ดกลมนูน แสดงว่าพื้นผิวของวัสดุนั้นมีความไม่ชอบน้ำ หรือเปียกน้ำได้ยาก โดยสามารถใช้ค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs) เป็นตัวบอกความสัมพันธ์ของพื้นผิววัสดุ และหยดน้ำได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของน้ำ และสมบัติของพื้นผิววัสดุ [11]

ค่ามุมสัมผัส (องศา)	สมบัติ	ลักษณะพื้นผิววัสดุ
$< 10^\circ$	ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophilicity)	ดูน้ำได้ดี เปียกอย่างสมบูรณ์
$< 30^\circ$	ชอบน้ำ (Hydrophilicity)	ดูน้ำ เปียกได้ดี
$90^\circ - 150^\circ$	ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity)	ไม่ดูน้ำ/ดูน้ำเล็กน้อย เปียกยาก
$> 150^\circ$	ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobicity)	ไม่ดูน้ำ ไม่มีความเปียก

2.4 การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angles measurement) [11, 12]

การเปียก (Wetting) คือ ลักษณะของของเหลวที่ซึมในพื้นที่ผิวของของแข็ง การที่ของเหลวจะเปียกบนของแข็งได้นั้น จะเกี่ยวข้องกับสองแรงหลัก ๆ ได้แก่

1. แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเป็นหยด
2. แรงยึดติด (Adhesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน หมายถึง แรงระหว่างโมเลกุลของของเหลว และพื้นผิวของของแข็ง เป็นแรงที่พยายามทำให้หยดของเหลวกระจายตัวออกจากกัน และกระจายแนบไปกับพื้นผิวของของแข็ง

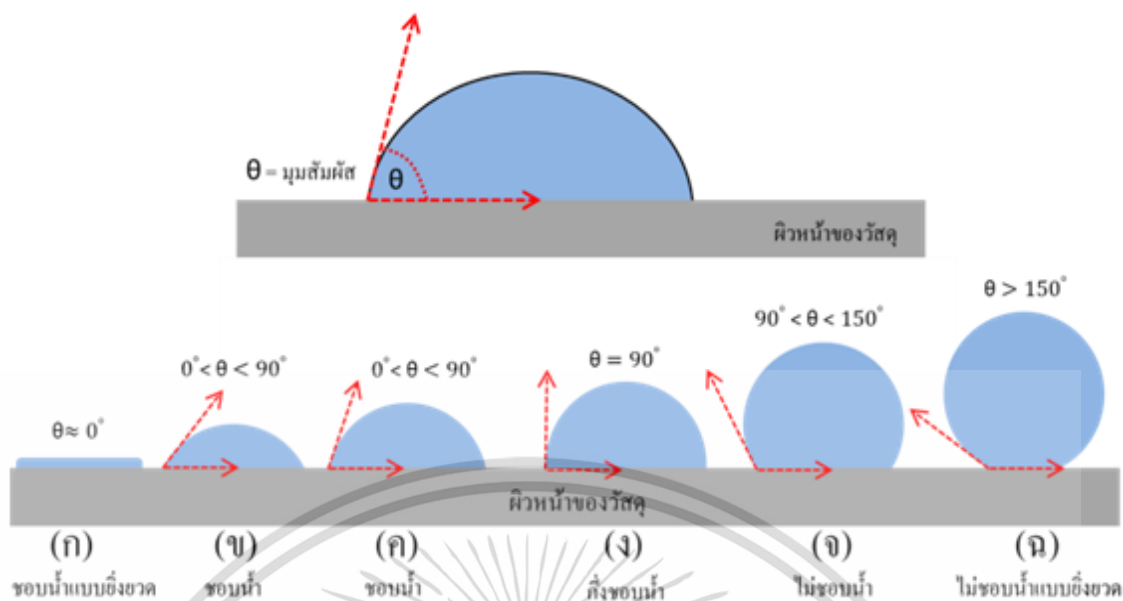
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่หยดน้ำเกาะอยู่บนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งได้ จะต้องเกิดสภาพสมดุลระหว่างแรงยึดติด และแรงเชื่อมแน่น ดังนั้น จึงสามารถใช้สภาพสมดุลของแรงทั้งสองนี้ในการวัดภาวะการเปียกบนพื้นผิววัสดุที่เรียกว่า มุมสัมผัส (Contact angle) โดยค่ามุมสัมผัสจะเป็นตัวบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวบนพื้นผิวของของแข็ง ค่ามุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และสามารถใช่มุมสัมผัสเป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งได้ โดยมีเกณฑ์โดยสรุปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการวัดภาวะการเปียกของวัสดุจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ [11]

ค่ามุมสัมผัส (องศา)	ภาวะการเปียก	สภาพสมดุลระหว่างแรงยึดติด และแรงเชื่อมแน่น	ลักษณะของหยดน้ำ
0	เปียกอย่างสมบูรณ์	แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ	แตกกระจาย และปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของของแข็งเป็นชั้นบาง ๆ
0 - 90	เปียกได้ดี	แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่น	เป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อย
> 90, < 180	เปียกที่พื้นผิวได้ยาก	แรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่น	หยดรูปทรงค่อนข้างกลม
180	ไม่เปียก	แรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ	หยดทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



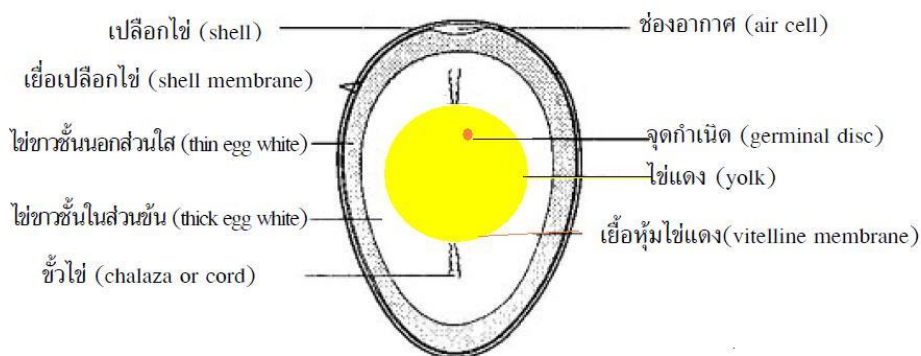
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งที่ค่ามุมสัมผัสต่าง ๆ
(ที่มา <https://www.blockdit.com/posts/5eff18f0d909610cb5db4cc7>)

2.5 องค์ประกอบของเปลือกไข่ [13-15]

ไข่เป็นวัตถุดิบที่สำคัญชนิดหนึ่งในการประกอบอาหารทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากไข่มีราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์ และอุดมไปด้วยสารอาหาร ได้แก่ โปรตีน, ไขมัน, แคลเซียม, วิตามินบี, รวมไปถึงวิตามินอี เอ และดี โดยในปีพ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีการผลิตไข่ไก่เพิ่มขึ้น 0.17 % คิดเป็น 15,148 ล้านฟอง เฉลี่ยวันละ 42.98 ล้านฟองต่อวัน จึงเป็นสาเหตุให้มีเปลือกไข่ถูกทิ้งเป็นจำนวนมาก และถูกกำจัดโดยการทิ้งให้เทศบาลนำไปฝังกลบ นอกจากนี้จะไม่ได้ใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่แล้ว ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการขนส่ง และอาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมาอีกด้วย การใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ในรูปเปลือกไข่ตากแห้งบดละเอียด เป็นวิธีหนึ่งที่ยั่งยืนต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น

ไข่ถูกห่อหุ้มด้วยเปลือกที่มีความหนาประมาณ 0.2-0.4 มิลลิเมตร สีของเปลือกไข่จะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด และสายพันธุ์ของสัตว์ปีก โดยทั่วไปไข่ไก่จะมีเปลือกสีเหลือง ไข่เป็ดจะมีเปลือกสีขาว และไข่นกส่วนใหญ่จะมีจุดอยู่บนเปลือกไข่ ภายในไข่จะมีเยื่อเปลือกไข่ที่หุ้มไข่แดง และไข่ขาวอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของไข่ทั้งฟอง

(ที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1146/egg-ไข่>)

เปลือกไข่โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ (รูปที่ 2.4) คือ

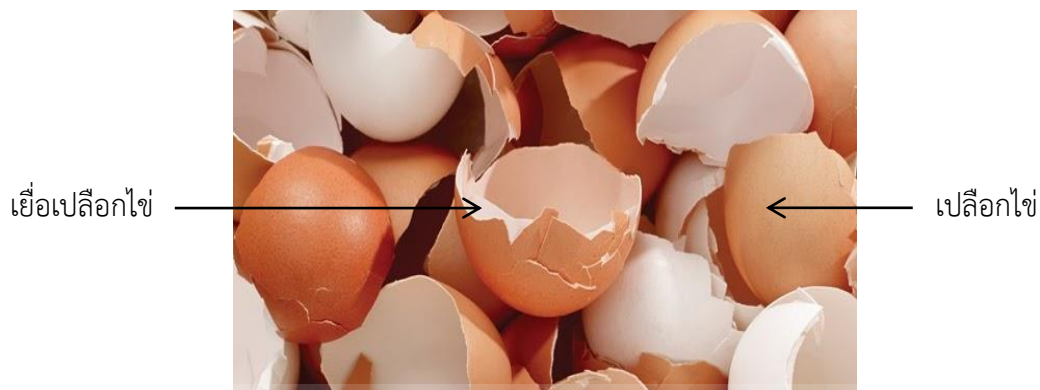
1. เปลือกไข่ (Shell) มีขนาดเล็ก ๆ ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่เป็นจำนวนมาก และมีสารเคลือบผิวที่ช่วยป้องกันเชื้อแบคทีเรียไม่ให้เข้าไปภายในไข่ โดยองค์ประกอบหลักของเปลือกไข่ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (98.2 % ของน้ำหนักเปลือกไข่), แมกนีเซียมคาร์บอเนต (0.9 %), แคลเซียมฟอสเฟต (0.9 %), ที่เหลือเป็นแร่ธาตุต่าง ๆ รวมทั้งโปรตีน และน้ำ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ อาจแตกต่างกันไปตามชนิดของสัตว์ปีก ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ [13]

แร่ธาตุ	% (โดยน้ำหนัก)		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
แคลเซียมคาร์บอเนต	99.0	96.5	97.3
ซิลเฟอร์	0.1	1.2	0.4
แมกนีเซียม	0.5	0.1	1.0
ฟอสฟอรัส	0.2	0.5	1.1
โพแทสเซียม	-	0.0839	-

2. เยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane) มีอยู่ด้วยกัน 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นนอกที่อยู่ติดกับเปลือกไข่มีชื่อเรียกว่า Shell membrane ส่วนชั้นในที่อยู่ติดกับไข่ขาวเรียกว่า Egg membrane เยื่อชั้นนอก และชั้นในจะชิดกันตลอด แต่จะแยกกันที่ด้านบนของไข่ซึ่งมีโพรงอากาศ (Air cell) อยู่ โดยองค์ประกอบของเยื่อเปลือกไข่ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประมาณ 69.2 %, ไขมัน 2.7 %, ส่วนที่เหลือ

ส่วนใหญ่เป็นไกลโคโปรตีน รวมทั้งยังมีวิตามินเอ บี ดี และอี อยู่ด้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงเปลือกไข่ และเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข่

(ที่มา [https://image.tnews.co.th/newscenter/images/userfiles/images/2-5\(224\).jpg](https://image.tnews.co.th/newscenter/images/userfiles/images/2-5(224).jpg))

2.6 แอมโมเนียมไอออน [16]

ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติหรือในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ แอมโมเนียจะอยู่ในภาวะสมดุลระหว่างแอมโมเนียไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระ (Unionized ammonia หรือ free ammonia: NH_3) กับแอมโมเนียมไอออน (Ionized ammonium หรือ ammonium ion: NH_4^+) ปฏิกิริยาสมดุลของสารละลายแอมโมเนียเขียนได้ดังสมการที่ 2.1



แอมโมเนีย เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีทั้งประโยชน์และโทษต่อแหล่งน้ำ และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แอมโมเนียที่พบในแหล่งน้ำ มีสาเหตุมาจากการใช้ปุ๋ยในอุตสาหกรรม, การขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการย่อยสลายของโปรตีนจากพืชและสัตว์ โดยทั่วไป แพลงก์ตอนพืชหรือผู้ผลิตอื่น ๆ จะใช้แอมโมเนียเพื่อการเจริญเติบโต อีกทั้ง แอมโมเนียมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในการเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่หากแหล่งน้ำบริเวณนั้น ๆ มีสภาพน้ำที่เป็นด่าง มีพิษสูง เป็นเหตุให้สัตว์น้ำสัมผัสกับแอมโมเนียที่ความเข้มข้นสูง หรือที่ความเข้มข้นต่ำเป็นเวลานาน อาจส่งผลอันตรายถึงชีวิตของสัตว์น้ำได้

ในประเทศไทย ได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในแหล่งน้ำไว้ดังนี้

1. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน โดยกำหนดมาตรฐานของแอมโมเนียในหน่วยไนโตรเจนให้มีค่าไม่เกินกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร [17]

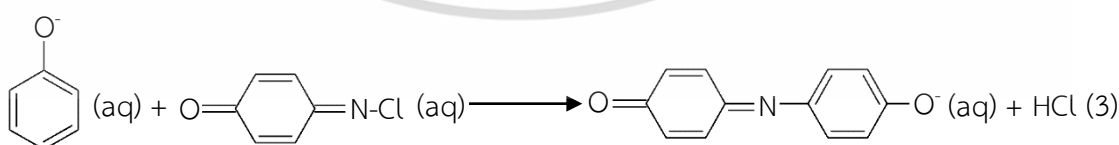
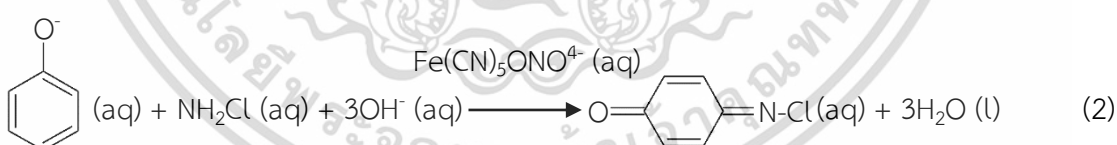
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2560) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน โดยกำหนดมาตรฐานของผลรวมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (Total kjedahl nitrogen: TKN) ให้มีค่าไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร [18]

3. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด โดยกำหนดมาตรฐานของ TKN ให้มีค่าไม่เกิน 35 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร [19]

2.7 ปฏิบัติการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออน [20, 21]

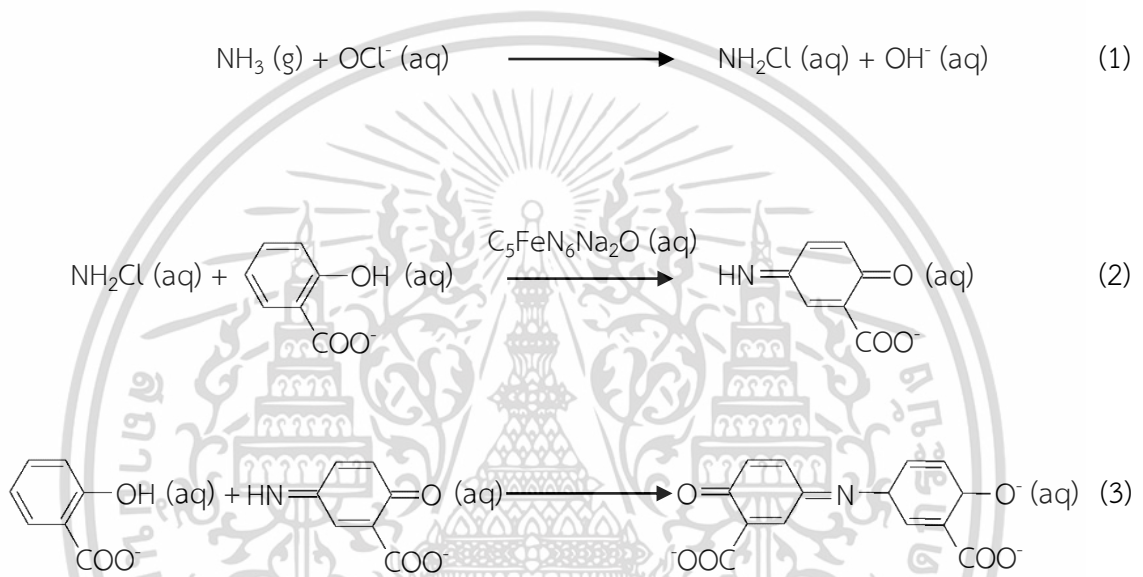
การตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การกลั่นและการไทเทรต (Alkaline distillation and acidimetric titration), การใช้แอมโมเนียอิเล็กโทรด (Ammonia gas sensing electrode), ไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography: IC) และการตรวจวัดความเข้มสี จากปฏิกิริยาการเกิดสี (Colorimetric detection) โดยในงานนี้ ได้เลือกใช้วิธีการตรวจวัดสีของแอมโมเนียมไอออน ด้วยปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction) เนื่องจากปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัด คือ มีการใช้สารฟีนอลที่มีความเป็นพิษสูง และสารไฮโปคลอไรท์ที่ไม่เสถียร มาทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นสารประกอบอินโดฟีนอลบลู ที่มีสีเขียวแกมน้ำเงิน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Berthelot's reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อลดข้อจำกัดของปฏิกิริยาเบอเธลทแบบดั้งเดิม จึงมีการดัดแปลงปฏิกิริยาเบอเธลท โดยเปลี่ยนจากการใช้สารฟีนอลเป็นโซเดียมซาลิไซเลต และเปลี่ยนจากสารไฮโปคลอไรท์เป็นไดคลอโรไฮโซไซยานูเรตแทน เพื่อลดความเป็นพิษและความไม่เสถียรของรีเอเจนต์ตั้งที่กล่าวไปข้างต้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลทแบบดัดแปลง ในขั้นแรกจะใช้ไดคลอโรไฮโซไซยานูเรตมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดเป็นไฮโปคลอไรท์ไอออนไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียแล้วเกิดเป็นคลอรามิน และทำปฏิกิริยาต่อกับซาลิไซเลตจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นสารประกอบ 2-2 ไดคาร์บอกซีอินโดฟีนอล (2-2 dicarboxy indophenol) ที่มีสีเขียว ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลทแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การปรับปรุงคุณสมบัติของผงเปลือกไข่ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

P. Seeharaj และคณะ [8] ได้รายงานวิธีอย่างง่ายในการผลิตชั้นเคลือบที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนจากเปลือกไข่ที่เป็นขยะชีวภาพ ส่วนประกอบหลักของเปลือกไข่ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีความไม่ชอบน้ำ สามารถเตรียมชั้นเคลือบได้ด้วยการนำเปลือกไข่ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball-milling) จนได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับไมโคร จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วยกรดสเตียริก ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO}$) $_2\text{Ca}$ โดยวิธีเอสเทอร์-ฟิเคชันของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ของกรดสเตียริก จากนั้นนำเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วไปกระจายตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) เพื่อนำไปเคลือบบนพื้นผิววัสดุ เมื่อใช้อัตราส่วนโดย น้ำหนัก 4:1 ของเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว:พอลิสไตรีน จะได้ชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุที่มีค่า มุมสัมผัสของน้ำอยู่ที่ $151^\circ \pm 1^\circ$ บนพื้นผิวกระจก และ $153^\circ \pm 1^\circ$ บนพื้นผิวผ้าฝ้าย อนุภาคเปลือกไข่ ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนชั้นเคลือบ นำไปสู่พื้นผิวที่มีความ หยาบระดับไมโคร-นาโนเมตร ซึ่งส่งผลให้เกิดคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ชั้นเคลือบเปลือก ไข่ที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดแสดงให้เห็นถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, มีคุณสมบัติในการทำความสะอาด สะอาดตัวเอง และสามารถแยกน้ำกับน้ำมันออกจากกันได้ ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า เปลือกไข่ที่เป็น ขยะทางชีวภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยสร้างเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดได้

2.8.2 วิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ และสารเคมีที่ใช้สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ ชอบน้ำบนกระดาษ

W. Dungchai และคณะ [2] ได้นำเสนอวิธีการพิมพ์สกรีนด้วยขี้ผึ้ง (Wax screen-printing) เป็นวิธีที่ต้นทุนต่ำ, ง่าย และรวดเร็ว สำหรับการผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PAD) โดยนำขี้ผึ้ง ที่เป็นของแข็งมาถูผ่านสกรีนลงบนกระดาษกรอง จากนั้นนำไปหลอมให้ซึมในกระดาษ เพื่อสร้าง ลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยใช้เพียงเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความกว้างของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และความกว้างของเส้นที่ออกแบบไว้ดั้งเดิม โดยปรับอุณหภูมิ และเวลาการให้ความร้อนให้มีความเหมาะสม เพื่อกำหนดความละเอียดของลวดลาย (Resolution) พบว่า ความกว้างขั้นต่ำของส่วนที่ ชอบน้ำ (Hydrophilic channel) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic barrier) คือ 650 และ 1300 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในอันดับถัดไป ผู้วิจัยได้ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสร้างลวดลายด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น กับวิธีที่อาศัยหลักการ Photolithography โดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างกรด Bicinchoninic (BAC) และ Cu^+ ในการศึกษา ประเด็นนี้ พบว่า ลวดลายที่สร้างโดยเทคนิค Photolithography ให้สัญญาณสูง ถึงแม้ใช้สารละลาย แบลงค์ในการทดสอบ ในขณะที่วิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอ ให้สัญญาณของสารละลายแบลงค์ต่ำ ในอันดับ สุดท้าย ผู้วิจัยนำ μ PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้มาใช้ในการตรวจวัดกลูโคส และธาตุเหล็กทั้งหมดพร้อมกัน ใน ตัวอย่างซีรัมของมนุษย์ เพื่อแสดงว่า μ PAD นี้ประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งการตรวจวัดจะใช้วิธีเคมีไฟฟ้า อาศัยการทำปฏิกิริยากับ Glucose oxidase และวิธีการตรวจวัดสี อาศัยการทำปฏิกิริยากับ 1, 10- phenanthroline สำหรับการหาปริมาณกลูโคส และธาตุเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การพิมพ์สกรีนด้วยขี้ผึ้งเป็นวิธีทางเลือกที่ใช้งานง่าย และราคาไม่แพงสำหรับการผลิต μ PAD ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Lert-itthiporn และคณะ [3] ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) รูปแบบใหม่ สำหรับการแยกแกลสแบบไม่ใช้เมมเบรน พร้อมกับการตรวจวัดไอโอเดต PAD รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยรูปแบบการพับ โดยมีช่องกักเก็บน้ำรูปวงกลมสองช่อง คือ ช่องตัวให้ (Donor reservoir) และช่องตัวรับ (Acceptor reservoir) ที่รวมอยู่บนกระดาษแผ่นเดียวเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของแต่ละช่องนั้นประดิษฐ์ขึ้นอย่างง่ายดาย โดยใช้เทคนิคการวาดด้วยปากกาหมึกกันน้ำ ได้มีการนำ PAD มาใช้สำหรับการวิเคราะห์หาไอโอเดตในเชิงปริมาณอาศัยหลักการดับแสง (Fluorescence quenching) ของโบทินซีรัมอัลบูมินกับทองคำนาโนคลัสเตอร์ (BSA-AuNCs) ซึ่งสามารถเตรียมได้อย่างรวดเร็วด้วยไมโครเวฟ สารละลายนาโนคลัสเตอร์ถูกหยดลงในช่องตัวรับ ในขณะที่สารตัวอย่าง, ไอโอเดต และกรดซัลฟิวริกจะถูกหยดลงในช่องตัวให้ตามลำดับ หลังจากพับ PAD ช่องตัวให้และช่องตัวรับจะถูกประกบเข้าด้วยกันโดยเทพกาวสองหน้า บริเวณว่างระหว่างช่องทั้งสองจะช่วยให้สามารถแยกแกลสไอโอดีนอิสระได้ โดยการแพร่จากช่องตัวรับไปสู่ช่องตัวให้ โดยไม่ต้องใช้เมมเบรน ผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีนและทองคำนาโนคลัสเตอร์ในช่องตัวรับทำให้เกิดการดับแสงสีแดง สามารถตรวจวัดได้สองวิธี ได้แก่ “การตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์” (λ_{ex} : 490 นาโนเมตร, λ_{em} : 630 นาโนเมตร) และ “การถ่ายภาพ” ของช่องตัวรับภายใต้แสงยูวีด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือ การเทียบมาตรฐานของทั้งสองแบบถูกสร้างขึ้นตามลำดับการตรวจวัด พบว่า มีความเป็นเส้นตรงที่ดี ($r^2 > 0.98$) โดยตรวจวัดไอโอเดตในช่วงความเข้มข้น 0.005 ถึง 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร มีความแม่นยำสูง (ค่าการวิเคราะห์คืนกลับเฉลี่ย: $95.1 (\pm 4.6) \%$) และมีความเที่ยงสูง (RSD $< 3 \%$) ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่ 0.005 มิลลิโมลต่อลิตร (โดยการตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์) และ 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร (โดยการถ่ายภาพ) วิธีนี้มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการตรวจวัดไอโอเดตในเกลือไอโอดีน และน้ำปลา โดยไม่จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างล่วงหน้า

D. A. Bruzewicz และคณะ [4] ได้อธิบายวิธีการใช้ X,Y-plotter ที่มีการดัดแปลง เพื่อสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยการพิมพ์สารละลายโพลีเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ คือ โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Poly (dimethylsiloxane); PDMS) ที่ละลายในเฮกเซนลงบนกระดาษกรอง PDMS จะแทรกซึมลงไปบนกระดาษ และเกิดส่วนที่ไม่ชอบน้ำขึ้น ความกว้างต่ำสุดของการพิมพ์อยู่ที่ประมาณ 1 มิลลิเมตร ความละเอียดของลวดลายนี้เพียงพอสำหรับการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วที่มีขนาดพกพา, อ่านค่าได้ด้วยสายตา และใช้ในการตรวจวินิจฉัยโรคโดยใช้กระดาษได้ พบว่า อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำด้วย PDMS แล้ว สามารถงอหรือพับเพื่อสร้างระบบช่อง 3 มิติได้ ในแง่ของการประยุกต์ใช้ ผู้วิจัยได้ทดสอบโดยนำอุปกรณ์การตรวจวัดบนกระดาษที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นไปใช้สำหรับการหาปริมาณกลูโคส และโปรตีน อาศัยการตรวจวัดสี งานวิจัยฉบับนี้ยังได้อธิบายการใช้อุปกรณ์การ

พิมพ์ที่สามารถบรรจุสารโดยใช้มัลติปิเปต และการพิมพ์ที่มีความยืดหยุ่น และพับได้ของช่องในกระดาษ บนพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ตารางเซนติเมตรอีกด้วย

J. Sitanurak และคณะ [6] ได้นำเสนอการใช้หมึกผ้าโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ที่ใช้กันทั่วไปในการสกรีนเสื้อยืด เป็นวัสดุใหม่ สำหรับการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบ 2 มิติ (2D- μ PAD) ผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์การสกรีนราคาถูก (เช่น ผ้าสกรีน, ไม้ปาดหมึกหุ้มยาง และโต๊ะพิมพ์) มาใช้ในการพิมพ์หมึก PVC ลงบนกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 เมื่อพิมพ์เสร็จแล้วไม่ต้องผ่านขั้นตอนใดอีก นำไปประเหยในตู้ดูดควันเป็นเวลา 3-5 นาที เพื่อกำจัดตัวทำละลายได้เลย พบว่า สามารถผลิต μ PAD ได้สูงถึง 77 ชิ้นต่อการสกรีน สามารถสร้างช่องการไหล (486 ± 14 ไมโครเมตร) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (642 ± 25 ไมโครเมตร) ได้สำเร็จ ความสามารถในการทำซ้ำของการผลิตช่องและโซนของไหลเป็นที่น่าพอใจ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) อยู่ที่ 2.9 % (สำหรับช่อง 486 ไมโครเมตร, $n=10$), 3.7 % (สำหรับช่อง 2 มิลลิเมตร, $n=50$) และ 1.5 % (สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม 6 มิลลิเมตร, $n=80$) การออกแบบ 2D- μ PAD ที่ผลิตโดยวิธีนี้ ถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดไทโอไซยาเนต และไนไตรต์ในน้ำลายภายในคราวเดียวกัน นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังประดิษฐ์ 3D- μ PADs สำหรับการแยกแก๊สออกจากของเหลว แล้วติดตามด้วยวิธีการตรวจวัดสี เพื่อนำไปใช้สำหรับการหาปริมาณเอทานอลโดยตรงในเครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ที่มีสี โดยลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำที่สร้างขึ้นด้วยวิธีพิมพ์สกรีนนี้ มีความทนทานต่อเอทานอลได้สูงถึง 8 % (v/v) โดยที่ของเหลวไม่เล็ดลอดออกมา

T. Satarpai และคณะ [7] ได้พัฒนาวิธีใหม่ในการสร้างลวดลาย สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) โดยใช้น้ำยาทาเล็บเป็นสารเคมีในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยผู้วิจัยศึกษาวิธีการสร้างลวดลายบน PAD ได้แก่ วิธีการวาด (Writing), การประทับตรา (Stamping) และการฉีดสเปรย์ (Spraying) แต่ละวิธีมีขั้นตอนโดยสรุปพอสังเขปดังนี้: (1) วิธีการวาด ทำได้โดยการวาดลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำที่ทำการออกแบบเอาไว้แล้วลงบนกระดาษกรองด้วยปากกา แล้วเติมด้วยน้ำยาทาเล็บ (2) วิธีการประทับตรา และ (3) วิธีการฉีดสเปรย์ ทั้ง (2) และ (3) มีการใช้อุปกรณ์คล้ายกัน กล่าวคือ ต้องใช้หน้ากากที่ออกแบบมาจากการตัดด้วยเลเซอร์ของแผ่นยางแม่เหล็ก การตัดด้วยเลเซอร์ จะมีการสร้างแบบพิมพ์สองประเภท คือ Positive และ Negative counterparts ส่วนที่เป็น Positive counterpart จะอยู่ด้านใน และส่วนที่เป็น Negative counterpart จะอยู่ด้านนอกของแผ่นแม่เหล็ก สำหรับวิธีการประทับตรานั้น ส่วน Negative counterpart ของหน้ากากยางแม่เหล็กจะติดอยู่กับตรายาง แล้วจึงประทับตราลงบนกระดาษกรอง หลังจากใส่น้ำยาทาเล็บลงไป แล้ว วิธีการฉีดสเปรย์ ส่วน Positive counterpart จะถูกนำมาใช้เพื่อปิดบริเวณส่วนที่ชอบน้ำบนกระดาษกรอง จากนั้นใช้น้ำยาทาเล็บคู่กับเครื่องพ่นสี (Air brush) ฉีดสเปรย์น้ำยาทาเล็บลงบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษที่ปิดด้วยหน้ากาวยางแม่เหล็ก พบว่า วิธีการฉีดสเปรย์มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตจำนวนมาก และให้ความละเอียดของลวดลาย (Resolution) ดีที่สุด นอกจากนี้ สามารถเตรียมได้โดยการแช่กระดาษกรองลงในน้ำยาทาเล็บได้อีกด้วย อีกทั้ง ผลจากการตรวจสอบความทนทานต่อตัวทำละลาย พบว่า น้ำยาทาเล็บที่เคลือบอยู่บนกระดาษทนต่อเอทานอลและไดคลอโรมีเทนได้สูงถึง 30 %

P. Sawetwong และคณะ [22] ได้ทำการพัฒนา μ PAD โดยใช้สีเคลือบ Penguard ในการสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ อีกทั้ง ได้ศึกษาการเพิ่มความจำเพาะเจาะจง และความไวในการวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโดยการตรวจวัดสีของ Glyphosate โดยใช้ Mn-ZnS quantum dot ที่ฝังตัวอยู่ในโพลิเมอร์ที่มีรอยพิมพ์ประทับโมเลกุล (Molecularly imprinted polymer: MIP) ร่วมกับการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบ 3 มิติ (3D- μ PAD) รูปแบบใหม่ การตรวจวัดขึ้นอยู่กับความไวในการเร่งปฏิกิริยาของ Mn-ZnS QD-MIP ในปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2O_2 และ ABTS ในส่วนการสังเคราะห์ Glyphosate imprinted polymer นั้น สามารถทำบนพื้นผิวของ Mn-ZnS QD โดยใช้ Poly (N-isopropylacrylamide) (NIPAM) และ N, N'-Methylenebisacrylamide (MBA) เป็น Functional monomers ความไวในการเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ การ Binding หรือ Non-binding ของโมเลกุล Glyphosate ในการสังเคราะห์ Mn-ZnS QD-MIP โดย Glyphosate จะถูกดักจับอยู่ในโพรงของโพลิเมอร์ แล้วยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของ ABTS ส่งผลให้สีของสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง จากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Glyphosate 3D- μ PAD แบบพับได้นั้น ประกอบด้วยสามชั้น ได้แก่ ชั้นบน (Detection zone), ชั้นกลาง (Immobilized Mn-ZnS QD-MIP disc) และชั้นล่าง (Sample loading) ควบคู่กับการใช้โปรแกรม ImageJ™ ในการประมวลผลค่าความเข้มสีของผลิตภัณฑ์บนกระดาษ ผลการทดลองพบว่า ตรวจวัดได้ในช่วง 0.005-50 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร และขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่ 0.002 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร มีค่าความแตกต่างสัมพัทธ์จาก CRM อยู่ที่ 0.4 % (วันเดียวกัน) และ 0.7 % (คนละวัน) มีความสามารถในการวิเคราะห์ดี (1.7 % RSD สำหรับ 10 อุปกรณ์) และนำไปใช้เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของ Glyphosate ในตัวอย่างธัญพืชไม่ขัดสี (Whole grain) ได้สำเร็จ ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ ความไวในการวิเคราะห์ และความเที่ยงสูง

A. Motalebizadeh และคณะ [23] ได้นำเสนอเทคนิคราคาถูกและรวดเร็วสำหรับการผลิต μ PAD เพื่อใช้วิเคราะห์ในรูปแบบการตรวจทางห้องปฏิบัติการ ณ จุดดูแลผู้ป่วย หรือ Point of care (POC) โดยใช้เทคนิคการฉีดสเปรย์ด้วยซีฟิ่งร้อนบริสุทธิ์เพื่อสร้างพื้นที่ส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic channel) บนกระดาษ เทคนิคนี้สามารถสร้างช่องทางการไหลของสาร (Hydrophilic micro-channel) บนกระดาษได้ที่ขนาด 300 ± 5 ไมโครเมตร โดยไม่ต้องใช้ Clean room, หลอด UV หรือ สารออกแกนิก และสามารถสร้างให้เสร็จได้ภายในขั้นตอนเดียวโดยไม่ต้องใช้ Hot plate กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ว่านี้ ทำได้โดยอาศัยเทคนิคการผลิตพ่นซี่ฝิ่งที่มีความร้อนเหมาะสม ลงในเนื้อกระดาษตามขวาง ภายใต้อุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสม วิธีการนี้มีประโยชน์ในด้านต้นทุน, ความง่ายในการผลิตที่ใช้เวลาดำเนินการน้อยกว่า 1 นาที, ผลิตจำนวนมากได้ และสามารถตรวจวัดได้หลาย Analytes ตามลวดลายของซี่ฝิ่งที่ออกแบบ จากนั้นนำ μ PAD มาทดสอบประสิทธิภาพด้วยการตรวจวัดกรดยูริกและไนไตรต์ โดยเทียบกับวิธีมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % อีกทั้ง ได้พัฒนาแอปพลิเคชันการประมวลผลค่าสี RGB แบบใหม่บนโทรศัพท์มือถือเพื่อใช้ในการอ่านค่าสี อุปกรณ์ตรวจวัดนี้แสดงให้เห็นถึงช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดี สามารถตรวจวัดกรดยูริกได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 800 ไมโครโมลาร์ และตรวจวัดไนไตรต์ได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 1,250 ไมโครโมลาร์ โดยขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่ 100 และ 156 ไมโครโมลาร์ สำหรับกรดยูริกและไนไตรต์ตามลำดับ

A.C.N. Pinheiro และคณะ [24] รายงานการใช้กระดาษเช็ดปาก (Napkin paper) เป็นวัสดุสำหรับการผลิต PAD เป็นครั้งแรก กระดาษเช็ดปากเป็นตัวเลือกที่เข้าถึงง่าย และราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกระดาษโครมาโตกราฟี และกระดาษกรอง ส่วนไม่ชอบน้ำบน PAD ในงานนี้สร้างมาจากพาราฟิน (Paraffin) ควบคู่กับเทคนิคการประทับตราอย่างง่ายที่สร้างขึ้นด้วยวิธี 3D printing จากนั้นนำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในเครื่องดื่ม ด้วยเทคนิคการตรวจวัดสี อาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างเอทานอล กับไดโครเมต ในตัวกลางที่เป็นกรด ผลการทดลองแสดงถึงช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 0-50 % (v/v) เอทานอล ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจวัดปริมาณเอทานอลในตัวอย่างเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ได้ และมีขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่ 1.5 % อีกทั้ง ได้มีการนำ PAD ที่พัฒนาขึ้นไปเทียบมาตรฐานกับเทคนิค UV-vis spectrophotometry โดยมีความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error) น้อยกว่า 5 % แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีของ PAD ที่พัฒนาขึ้น ในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การควบคุมคุณภาพอาหาร และงานทางด้านนิติเวช สุดท้าย การผลิต PAD โดยใช้กระดาษเช็ดปากนั้นเป็นทางเลือกที่ดี, มีความง่าย และราคาถูก ซึ่งมีความน่าสนใจเป็นพิเศษสำหรับสถานที่ที่มีทรัพยากรจำกัด

L.F. Castro และคณะ [25] ได้อธิบายถึงการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดไฟฟ้าบนกระดาษ (ePAD) ที่อาศัยส่วนประกอบหลักจากกลุ่มคาร์บอน โดยนำกาวซิลิโคนกับผงแกรไฟต์มาผสมกัน ePAD ถูกผลิตขึ้นด้วยเทคนิคการพิมพ์สกรีน โดยทำการสกรีนหมึกนำไฟฟ้าลงบนพื้นผิวกระดาษ นอกจากนี้ ได้ออกแบบและทำการพิมพ์ขั้วต่อไฟฟ้าในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้วิธีการตรวจวัดมีราคาถูก, พกพาสะดวก และใช้งานซ้ำได้ ต่อมาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา, โครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนำไฟฟ้าของ ePAD ที่พัฒนาขึ้น และทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดของ ePAD ผลที่ได้แสดงถึงการตรวจวัดเชิงเส้นตรงสำหรับสารละลายมาตรฐานของกรดแอสคอร์บิกในช่วงความเข้มข้น 0.1-2.0 มิลลิโมลต่อลิตร และมีขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.0 ไมโครโมลต่อลิตร อีกทั้ง ได้นำ ePAD มาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์กรดแอสคอร์บิกในตัวอย่างของเหลวชีวภาพสังเคราะห์ (พลาสติกในเลือด และปัสสาวะ), วิตามินซี และอาหาร (เจลาติน และน้ำส้ม) อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันหรือดีกว่า เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานในด้านการตรวจวัด

P. Jarujamrus และคณะ [26] นำเสนอการเตรียม PAD รูปแบบบาร์โค้ด ด้วยเทคนิคการพิมพ์สกรีนสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมไอออน โดยใช้กากของเสียจากน้ำยางเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำชนิดใหม่ น้ำยางธรรมชาติ เป็นหนึ่งในสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ในกระบวนการผลิตน้ำยางมักเกิดของเสียในรูปกากของแข็งที่มี Cis-1,4-polyisoprene เป็นองค์ประกอบ ผู้วิจัยและคณะ จึงนำ Cis-1,4-polyisoprene มาประยุกต์ใช้เป็นสารเคมีชนิดใหม่ในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบน PAD เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมไอออนเชิงกึ่งปริมาณต่อไป (Semi-quantitative analysis) อุปกรณ์ดังกล่าว ประดิษฐ์ขึ้นจากเทคนิคการพิมพ์สกรีน โดยออกแบบลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำให้มีลักษณะคล้ายส้อม ช่องสำหรับหยดสารตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ในขณะที่ช่องสำหรับตรวจวัดจะมีลักษณะเป็นแถบ 4 เส้นคล้ายกับบาร์โค้ด ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจวัดบนกระดาษ ได้แก่ ความหนืดของสารละลาย Cis-1,4-polyisoprene, ขนาดตะแกรงตาข่าย (Mesh screen), ขนาดรูพรุนของกระดาษ (ที่ทำจากวัสดุประเภทต่าง ๆ เช่น กระดาษเช็ดมือ, กระดาษกรอง) และขนาดช่องสำหรับหยดสารตัวอย่าง หลักการตรวจวัดอาศัยปฏิกิริยาการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซิติกแอซิด (EDTA) เป็นลิแกนด์ และเอริโอโครมแบล็กที (EBT) เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดจะตรึง EBT และสารละลาย EDTA ที่ความเข้มข้นต่างกันไว้ที่ช่องสำหรับตรวจวัดทั้ง 4 แถบ เมื่อแมกนีเซียมไอออนในตัวอย่าง ไหลมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ตรึงอยู่บนช่องสำหรับตรวจวัด สีน้ำเงินของ EDTA จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูตามความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มของสีชมพูที่เกิดขึ้น โดยใช้แอปพลิเคชัน “UBU Omg Sensor” และพิจารณาเทียบกับชุดรูปแบบแถบบาร์โค้ดมาตรฐานเพื่อประเมินความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน ผลการทดลองที่ได้พบว่า มีความถูกต้องสูง (ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ เท่ากับ ± 5.3 เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมไอออนความเข้มข้น 25-200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทั้งนี้ เมื่อนำไปวิเคราะห์กับตัวอย่างน้ำและน้ำยาง พบว่า มีค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ (Recovery) อยู่ในช่วง 100-125 ซึ่งสามารถประเมินได้ว่า ผลการวิเคราะห์จากวิธีดังกล่าว มีความแม่นยำ โดยที่ตัวรบกวนในตัวอย่างไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สรุปวิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

สารที่ใช้ในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ	เทคนิคการสร้าง	เวลาที่ใช้ในการทำส่วนที่ไม่ชอบน้ำแห้ง (นาที)	เอกสารอ้างอิง
ซีฟิ่ง	การพิมพ์สกรีน	1	[2]
	การฉีดสเปรย์	1	[23]
หมึกกันน้ำ	การวาด	1	[3]
	การประทับตรา	5	[5]
โพลีไดเมทิลซิลอกเซน	การวาด	60	[4]
โพลีไวนิลคลอไรด์	การพิมพ์สกรีน	3-5	[6]
น้ำยาทาเล็บ	การวาด, การประทับตรา, และการฉีดสเปรย์	-	[7]
เรซิน	การพิมพ์สกรีน	10	[21]
สีเคลือบเพนคาร์ด	การพิมพ์สกรีน	20	[22]
พาราฟิน	การประทับตรา	1	[24]
กาวซิลิโคน	การพิมพ์สกรีน	ทิ้งไว้ข้ามคืน	[25]
น้ำยาง	การพิมพ์สกรีน	-	[26]
เปลือกไข่	การวาด	1-3	งานนี้

2.8.3 การหาปริมาณแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ

T. Thongkam และคณะ [21] ได้รายงานวิธีการประดิษฐ์ PAD ที่สะดวกและมีราคาถูกสำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนในดิน ได้มีการพัฒนา PAD โดยใช้สารละลาย UV resin ที่มีราคาไม่แพงมาเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ อาศัยเทคนิคการพิมพ์สกรีนเพื่อสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ จากนั้น นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสีของแอมโมเนียมไอออน ควบคู่กับการใช้ปฏิกิริยาตัดแปลงของเบเธลท (Modified Berthelot's reaction) โดยใช้สารซาลิไซเลต (Salicylate) และไดคลอโรไอโซไซยานูเรต (Dichloroisocyanurate) มาทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเพื่อผลิตสารประกอบสีเขียวของ 2-2 ไดคาร์บอกซีอินโดฟินอล (2-2 dicarboxyindophenol) โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่มีอยู่จะแปรผันตรงกับความเข้มของสีเขียวที่ได้ และจะทำการวิเคราะห์สีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ ทั้งนี้ ได้ทำการทดสอบที่หลากหลายเพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มประสิทธิภาพ และประเมินแง่มุมต่าง ๆ ของการประดิษฐ์และการใช้ประโยชน์จาก PAD พบว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงที่ได้คือ 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ มีค่าอยู่ที่ 0.5 และ 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation: RSD) มีค่าเท่ากับ 3.0 % (ตรวจวัดภายในวันเดียวกัน) และ 3.2 % (ตรวจวัดคนละวัน) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำซ้ำที่ดี และได้ทำการวัดค่า Recovery โดยทำการเติมแอมโมเนียมไอออนลงในตัวอย่าง (Spiked sample) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 95.5-107.5 % นอกจากนี้ ได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างดินจริงตามแหล่งต่าง ๆ และนำผลลัพธ์ที่ได้มาเทียบมาตรฐานกับเทคนิค Spectrophotometry ร่วมกับการใช้วิธีทางสถิติ Paired *t*-test เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ อีกทั้ง ได้มีการสร้างแผ่นเปรียบเทียบสีขึ้นมา เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตีความผลลัพธ์ของสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ โดยไม่ต้องใช้เครื่องสแกนสี ถือเป็น การแสดงถึงความรวดเร็ว, การใช้งานที่สะดวกและง่าย, ราคาไม่แพง และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำ PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้มาใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างดิน

B.M. Jayawardane และคณะ [27] ได้พัฒนา μ PAD สำหรับการตรวจวัดแอมโมเนีย (แอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน) ในน้ำเสีย (Wastewater) อาศัยหลักการแยกแเก้สบนกระดาษเป็นครั้งแรก มีการใช้สารกำหนดขนาดกระดาษ (Paper sizing agent) ในการสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษด้วยเทคนิคการพิมพ์ โชนตัวอย่างบน μ PAD จะถูกซบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะช่วยให้การเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออนให้เป็นแอมโมเนีย แล้วเกิดการแพร่กระจายไปยังส่วนไม่ชอบน้ำที่เป็นเทฟลอนเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ไปยังโชนรีเอเจนต์ที่มี Acid-base indicator เป็น 3-ไนโตรฟีนอล (3-nitrophenol) หรือโบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) อยู่ จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเคเตอร์ แล้วจึงทำการวัดปริมาณแอมโมเนียด้วยเครื่องสแกนเนอร์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม μ PAD สามารถตรวจวัดแอมโมเนียในความเข้มข้นต่ำสุดได้ที่ 0.8 และ 1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการทำซ้ำ (RSD) อยู่ที่ 3.1 % และ 3.7 % ในกรณีของ 3-ไนโตรฟีนอล หรือโบรโมไทมอลบลู ตามลำดับ อีกทั้ง สามารถนำอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำเสีย (Sewage) และน้ำในดิน (Soil water) ได้เป็นผลสำเร็จ และด้วยเหตุผลที่ μ PAD มีขนาดเล็ก, ใช้สารเคมีน้อย, ต้นทุนต่ำ, ใช้งานง่าย, และมีความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องสแกนเนอร์แบบพกพา จึงทำให้อุปกรณ์นี้เป็นตัวตรวจวัดแอมโมเนียที่มีความน่าสนใจ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานภาคสนามตามสถานที่หรือสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อน และน้ำเสียจากครัวเรือน, เกษตรกรรม, และอุตสาหกรรม สุดท้าย หลักการแยกแเก้สบนกระดาษที่ประสบผลสำเร็จในงานนี้ อาจส่งผลให้เกิดการพัฒนา μ PAD รูปแบบอื่น ๆ สำหรับการวิเคราะห์สารที่สามารถระเหยได้ง่ายตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P. Phansi และคณะ [28] ได้นำเสนออุปกรณ์ตรวจวัดสารเคมีชนิดใหม่ที่เรียกว่า “อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษสำหรับการแยกแก๊สแบบไร้เมมเบรน (Membraneless gas-separation microfluidic paper-based analytical devices: MBL-GS μ PADs)” ซึ่งได้รับการออกแบบมาให้ง่ายต่อการประดิษฐ์และการใช้งานของผู้ใช้ เพื่อนำไปวิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยได้และระเหยไม่ได้ในเชิงปริมาณ อีกทั้ง อุปกรณ์นี้ไม่จำเป็นต้องใช้เมมเบรนไม่ชอบน้ำที่มีรูพรุน เนื่องจากไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้ในการแยกแก๊ส จึงทำให้การผลิตอุปกรณ์สามารถทำได้ง่าย, รวดเร็ว, และมีต้นทุนต่ำ MBL-GS μ PADs มีทั้งหมดสามชั้น ได้แก่ ชั้นตัวให้ (Donor layer), ชั้นที่เป็นพื้นที่ว่าง (Spacer layer), และชั้นตัวรับ (Acceptor layer) ชั้นตัวให้และชั้นตัวรับทำจากกระดาษกรองที่มีการพิมพ์ลาย จากนั้น นำมาประกบเข้าด้วยกันโดยมีชั้น Spacer ที่ปะกาวสองหน้า (ความหนา 0.8 มิลลิเมตร) คั่นอยู่ตรงกลางระหว่างทั้งสองชั้น โดยมีการตัดช่องว่างตรงกลางของชั้น Spacer เพื่อให้แก๊สจากบริเวณชั้นตัวให้แพร่กระจายผ่านช่องว่างของ Spacer ที่อยู่ตรงกลางไปยังบริเวณชั้นตัวรับ แล้วทำปฏิกิริยาเคมี ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีเกิดขึ้น จากนั้น ถ้าวัสดุผลิตภัณฑ์แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นด้วยโปรแกรม ImageJ™ เพื่อหาปริมาณสาร นอกจากนี้ ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ MBL-GS μ PADs โดยการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานของเอทานอล, ซัลไฟด์, และแอมโมเนียมไอออน โดยได้มีการปรับอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในน้ำเสียและปุ๋ย เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างจริงต่อไป

J.J. Peters และคณะ [29] ได้รายงานอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบ 3 มิติ (3D- μ PAD) ที่ง่ายต่อการใช้งานและสามารถพกพาได้ สำหรับการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (แอมโมเนีย + แอมโมเนียมไอออน) ในแหล่งน้ำจืด (Freshwaters) ตัวอุปกรณ์ประกอบด้วยกระดาษสองชั้น ชั้นหนึ่งเรียกว่าโซนตัวอย่าง (Sample zone) ที่ทำการชุบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอีกชั้นหนึ่งเรียกว่าโซนการตรวจวัด (Detection zone) ที่มี Acid-base indicator เป็นไนทราซีนเยลโลว์ (Nitrazine yellow: NY) หรือโบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue: BTB) และระหว่างกระดาษทั้งสองชั้น จะมีแผ่นพลาสติกกั้นที่ทำหน้าที่เป็นหอกลั่นขนาดเล็ก หรือเรียกว่า μ -distillation chamber ในส่วนของการตรวจวัด แอมโมเนียมไอออนที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สแอมโมเนียจากการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ใน Sample zone จากนั้น แก๊สแอมโมเนียจะแพร่ผ่านช่องว่างของ μ -distillation chamber และทำปฏิกิริยากับ Acid-base indicator ใน Detection zone สัญญาณของการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ μ -distillation chamber-based μ PAD มีค่าอยู่ที่ 7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าสองเท่าของสัญญาณที่วิเคราะห์ด้วยการใช้เมมเบรนแยกแก๊ส (Gas-permeable membrane) อีกทั้ง μ PAD ที่นำเสนอในงานนี้ได้แสดงประสิทธิภาพของการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด โดยมีขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดอยู่ที่ 0.32 หรือ 0.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิกรัมต่อลิตร และแสดงการตรวจวัดในช่วงความเข้มข้นที่ 0.5-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 2.0-10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้อินดิเคเตอร์เป็น NY หรือ BTB ตามลำดับ และได้ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของอุปกรณ์ โดยทดสอบจากคนละอุปกรณ์ (Inter-device) และอุปกรณ์เดียวกัน (Intra-device) สำหรับ NY-based μ PAD ผลการทดสอบที่ได้มีค่าอยู่ที่ 7.6 % และ 9.0 % ตามลำดับ สำหรับ BTB-based μ PAD ผลการทดสอบที่ได้มีค่าอยู่ที่ 13 % และ 2.5 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาจัดว่าเป็น μ PAD ชนิดแรกที่มีช่วงการตรวจวัดครอบคลุมช่วงค่าทริกเกอร์ (Trigger value) เกือบทั้งหมด คือ 0.32-2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับแอมโมเนียในโตรเจนในแหล่งน้ำจืด และสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจคัดกรองแอมโมเนียในน้ำจืดแบบภาคสนามได้

G. Musile และคณะ [30] ได้รายงานอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PAD) สำหรับตรวจวัดแอมโมเนียมไอออน ในน้ำหล่อเลี้ยงลูกตา (Vitreous humor: VH) สำหรับใช้ในที่เกิดเหตุเพื่ออนุมานเวลาการเสียชีวิต อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาของเนสเลอร์ (Nessler's reaction) ที่มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออน และติดตามผลโดยการสังเกตการเปลี่ยนสีของปฏิกิริยาและวัดเป็นค่าระยะ RGB (RGB distance) ด้วยแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ μ PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนอยู่ที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation: RSD) ที่แสดงถึงความแม่นยำจากการตรวจวัดระหว่างวันมีค่าน้อยกว่า 9.3 % และความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Accuracy) ที่ตรวจวัดระหว่างวันมีค่าอยู่ในช่วง 94.5-104.5 % การทดสอบความจำเพาะเจาะจงของปฏิกิริยาเนสเลอร์ ถูกทดสอบโดยสารประกอบหลักที่มีอยู่ในน้ำหล่อเลี้ยงลูกตา และจากผลการทดลองไม่พบการรบกวนอย่างมีนัยสำคัญ โดย μ PAD นี้ สามารถใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำหล่อเลี้ยงลูกตาจากการชันสูตรพลิกศพทางนิติเวชได้เป็นผลสำเร็จ โดยได้ทดสอบความถูกต้องจากข้อมูลของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแคปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส (Capillary electrophoresis) พบว่าข้อมูลทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้ง ได้ศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มสี ซึ่งแสดงเป็นระยะ RGB และช่วงเวลาหลังชันสูตร พบว่า ผลที่ได้มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($R^2 > 0.78$)

M.A. Vargas-Muñoz และคณะ [31] ได้รายงานวิธีการที่ง่าย และมีต้นทุนต่ำ สำหรับการพัฒนาเซ็นเซอร์กระดาษร่วมกับการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบพกพา เพื่อตรวจวัดแอมโมเนียและซัลไฟด์ในคราวเดียวกัน เนื่องจากแอมโมเนียและซัลไฟด์เป็นมลพิษที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นสารพิษสำคัญที่ยับยั้งการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบทั้งสองพารามิเตอร์ในระหว่างการบำบัดน้ำเสีย ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง จะใช้ภาชนะหลอดขนาดเล็กสำหรับใส่สารตัวอย่าง (Well microplate) และกระดาษแผ่นกลม (Paper discs) ที่ทำหน้าที่เป็น

เซ็นเซอร์ ซึ่งจะวางไว้ในไมโครเพลท และทำการตรวจวัดภายในระบบปิด โดยที่แก๊สแอมโมเนียและซัลไฟด์จะซึมและแพร่กระจายผ่านเทฟลอนเมมเบรนไปยังแผ่นกระดาษ ที่ชุบด้วยสารโบโรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) และเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียและซัลไฟด์ ตามลำดับ ในขั้นตอนการตรวจวัด จะใช้สตูดิโอสำหรับถ่ายภาพที่สร้างจากการพิมพ์ 3 มิติ ร่วมกับไฟ LED และโทรศัพท์มือถือ ในขั้นตอนการประมวลผล จะใช้โปรแกรม ImageJ™ ในการประมวลผลค่าสีจากภาพถ่ายดิจิทัล ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของแอมโมเนีย และซัลไฟด์ได้ที่ 1.3 และ 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ที่ 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 5-45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ตัวอย่างบ่อหมักไร้อากาศ (Anaerobic digester) และน้ำเสีย (Wastewater) พบว่า ความแม่นยำในการวิเคราะห์ (RSD < 10 %) และค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ (Recovery 91-105 %) อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย/แอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ

ตัวอย่าง	ปฏิกิริยาการตรวจวัด	การประเมินคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์			เอกสารอ้างอิง
		Working range (mg L ⁻¹)	LOD (mg L ⁻¹)	RSD (%)	
ดิน	Modified Berthelot	10-100	0.5	3.2	[21]
น้ำเสีย	Acid-base indicator				[27]
	- 3-nitrophenol	10-100	0.8	3.1	
	- Bromothymol blue	10-50	1.8	3.7	
น้ำเสีย	Acid-base indicator				[28]
	- 3-nitrophenol	10-100	8.99	8.99	
	Nessler	10-100	3.14	1.08	
น้ำจืด	Acid-base indicator				[29]
	- Nitrazine yellow	0.5-30	0.32	7.6	
	- Bromothymol blue	2-10	0.47	13	
น้ำหล่อเลี้ยงในลูกตา	Nessler	7-35	5.6	9.3	[30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปฏิกิริยาการตรวจวัด	การประเมินคุณลักษณะ ของวิธีวิเคราะห์			เอกสารอ้างอิง
		Working range (mg L ⁻¹)	LOD (mg L ⁻¹)	RSD (%)	
น้ำเสีย	Acid-base indicator - Bromothymol blue	5-50	1.3	< 10	[31]
น้ำธรรมชาติ และน้ำดื่ม	Modified Berthelot	5-100	1.05	0.85	งานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	บริษัทผู้ผลิต
กรดสเตียริก (Stearic acid)	$C_{18}H_{36}O_2$	≥ 95.0	QRëC, New Zealand
เอทานอล (Ethanol)	C_2H_6O	99.9	QRëC, New Zealand
พอลิสไตรีน (Polystyrene)	$(C_8H_8)_n$	-	Plasworld intertrade, Thailand
เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran)	C_4H_8O	≥ 99.0	QRëC, New Zealand
แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride)	NH_4Cl	≥ 99.0	Carlo Erba, France
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	NaOH	98.0	S D Fine-Chem Limited, Mumbai
โซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate)	$C_7H_5NaO_3$	≥ 99.5	Sigma-Aldrich, China
โซเดียมไนโตรพรัสไซด์ ไดไฮเดรต (Sodium nitroprusside dihydrate)	$C_5FeN_6Na_2O \cdot 2H_2O$	-	Analar Normapur, Belgium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	บริษัทผู้ผลิต
โซเดียมไดคลอโรไอโซไซยาเนต ยานูเรต (Sodium dichloroisocyanurate)	$C_3Cl_2N_3NaO_3$	≥ 98.0	Sigma-Aldrich, Japan
ไตรโซเดียมซิเตรต ไดไฮเดรต (Tri-sodium citrate dihydrate)	$Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$	99.0	Carlo Erba, France

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัด

1. บีกเกอร์ (Beaker)
2. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
3. กระบอกตวง (Measuring cylinder)
4. แท่งแก้วคนสาร (Glass rod)
5. ช้อนตักสารสแตนเลส (Stainless spatula)
6. หลอดหยดสาร (Dropper)
7. กระดาษกรอง (Filter papers) เบอร์ 1 – Whatman™
8. ฟู่กันเบอร์ 1 – Masterart™
9. ไม้บรรทัดพลาสติกฉลุละลาย
10. ครกหิน
11. โกร่ง (Mortar)
12. ขวดบดพลาสติก ขนาด 300 มิลลิลิตร
13. ลูกบด Zirconia ขนาด 12 มิลลิเมตร
14. เครื่อง Mechanical ball-milling
15. เครื่องชั่งตวง 4 ตำแหน่ง – PA214 Ohaus™
16. ตู้อบ (Oven) – FD115 Binder™
17. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
18. เครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic hotplate stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. สตูดิโอถ่ายภาพ (Light studio box)
20. โทรศัพท์มือถือ – iPhone 11
21. นาฬิกาจับเวลา
22. เครื่องวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs) – OCA20 Dataphysic™
23. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) – JSM-6610LV JEOL™
24. เครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-infrared: FT-IR) – 8900 Perkin Elmer™
25. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography: IC) – 732 IC Detector Metrohm™

3.2 การปรับปรุงผงเปลือกไข่ให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ และการเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยการนำอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่มาปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก เพื่อให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ จากนั้นนำผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วไปใส่ในสารละลายที่เป็นตัวประสาน เพื่อให้ผงเปลือกไข่กระจายตัวแขวนลอยอยู่ในสารละลายชนิดนั้น แล้วจึงนำสารแขวนลอยผงเปลือกไข่ไปใช้สร้างลวดลายส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรองที่ใช้อยู่ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ อาศัยเทคนิคการวาดด้วยมือ ร่วมกับการใช้ฟู่กันและไม่บรรทัดพลาสติกฉลุลวดลาย ในการสร้างพื้นที่ส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

3.2.1 การเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

3.2.1.1 การเตรียมผงเปลือกไข่

1. ล้างเปลือกไข่ด้วยน้ำสะอาด
2. ตากให้แห้งสนิท
3. นำมาบดด้วยครกหิน จนได้ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กและละเอียด

3.2.1.2 การเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ ด้วยวิธีการ

บดละเอียดด้วยลูกบดและแรงกล (Mechanical ball-milling)

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับบดด้วยเครื่อง Mechanical ball-milling โดยเริ่มจากการเขย่าล้างทำความสะอาดลูกบดและขวดบดด้วยน้ำปราศจากไอออนรอบละ 15 นาที ทั้งหมด 4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เขย่าล้างลูกบดรอบที่ 5 ด้วยเอทานอล เป็นเวลา 15 นาที หากหลังจากเขย่าล้าง เอทานอลยังมีความขุ่นอยู่ ให้เทเอทานอลเดิมออก แล้วเติมเอทานอลใหม่ลงไป แล้วเขย่าล้างซ้ำจนกว่าเอทานอลจะใส
3. เมื่อล้างลูกบดจนสะอาดดีแล้ว ให้เทผงเปลือกไข่ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.1.1 ลงไปในขวดบดจำนวน 50 กรัม จากนั้นเติมเอทานอลให้ท่วมลูกบดและผงเปลือกไข่ ใช้เทปพันเกลียวพันรอบปากขวดบด แล้วปิดฝาให้แน่น เพื่อป้องกันการรั่วซึม
4. เขย่าบดผงเปลือกไข่เป็นเวลา 30 นาที
5. แยกผงเปลือกไข่ออกจากลูกบด โดยเทผงเปลือกไข่พร้อมลูกบดที่อยู่ในขวดบดลงบนกระชอน โดยมีปีกเกอร์รองรับผงเปลือกไข่และเอทานอลอยู่ด้านล่าง
6. นำลูกบดที่อยู่บนกระชอนไปเขย่าล้างให้สะอาด แล้วเก็บไว้
7. นำผงเปลือกไข่ที่อยู่ในปีกเกอร์ไประเหยเอทานอลออก โดยใช้เครื่องปั่นกวน พร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนเอทานอลในปีกเกอร์เหลือน้อยมาก ๆ
8. นำผงเปลือกไข่ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ให้นำผงเปลือกไข่ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
9. สุดท้าย นำผงเปลือกไข่ที่ผ่านการ Ball-milling ไปบดด้วยโกร่งหยก จากนั้น นำไปร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ด้วยผ้าที่มีขนาด 150 Mesh และจะได้ผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ ที่พร้อมนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.1 เครื่อง Mechanical ball-milling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก

3.2.2.1 เตรียมสารละลายกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยชั่งน้ำหนักกรดสเตียริกมา 0.0853 กรัม แล้วนำมาละลายในเอทานอล 30 มิลลิลิตร คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.2.2 ใส่ผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.1.2 จำนวน 0.8104 กรัม ลงในสารละลายกรดสเตียริก แล้วนำไปปั่นกวนพร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายในตู้ดูดควัน

3.2.2.3 เมื่อบั่นกวนครบ 30 นาทีแล้ว นำผงอนุภาคเปลือกไข่ในสารละลายกรดสเตียริกเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที เพื่อให้เอทานอลระเหยออกไปจนหมด และให้ผงอนุภาคเปลือกไข่แห้งสนิท

3.2.2.4 นำผงอนุภาคเปลือกไข่ที่แห้งสนิทแล้วไปบดด้วยโกร่งเซรามิก เพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะตัวกันเป็นก้อน และมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น จากนั้น จะได้ผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำ (อนุภาคแคลเซียมสเตียเรต) สีขาวครีม ที่พร้อมนำไปใช้งานต่อไป ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก (อนุภาคแคลเซียมสเตียเรต)

3.2.3 การเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ

3.2.3.1 เตรียมสารแขวนลอย โดยใช้เม็ดพอลิสไตรีน (PS) 0.2000 กรัม ละลายในเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) 2.50 มิลลิลิตร คนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.3.2 จากนั้นใส่ผงอนุภาคแคลเซียมสเตียเรต 0.4000 กรัม ลงในขวดแก้วขนาดเล็ก ตามด้วยสารแขวนลอยที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.3.1 แล้วคนให้ผงอนุภาคกระจายตัว

3.2.3.3 ได้สารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำสีขาวครีมขุ่น ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



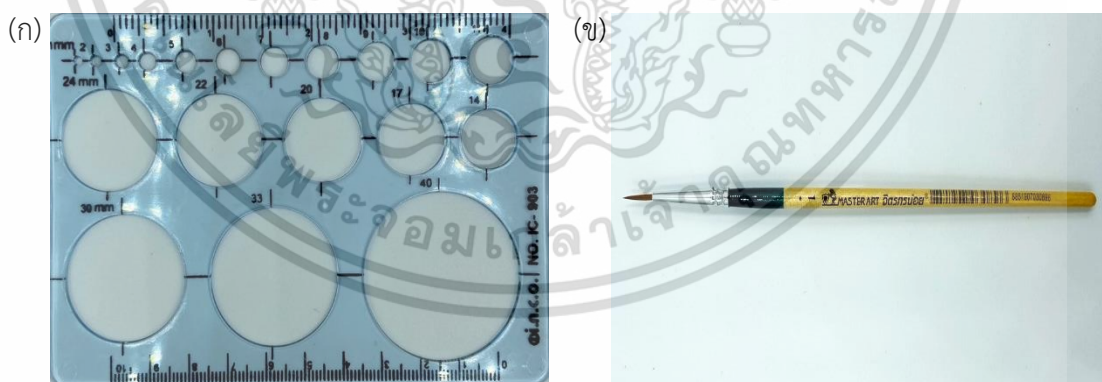
รูปที่ 3.3 สารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำ

3.3 การสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ อาศัยเทคนิคการวาด (Painting)

3.3.1 จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสร้างลวดลาย (Patterning) โดยนำไม้บรรทัดพลาสติก ฉลุลวดลายมาวางบนกระดาษกรอง แล้วใช้ดินสอวาดรูปวงกลม ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ตามลวดลายบนไม้บรรทัด เมื่อวาดเสร็จให้นำไม้บรรทัดออก

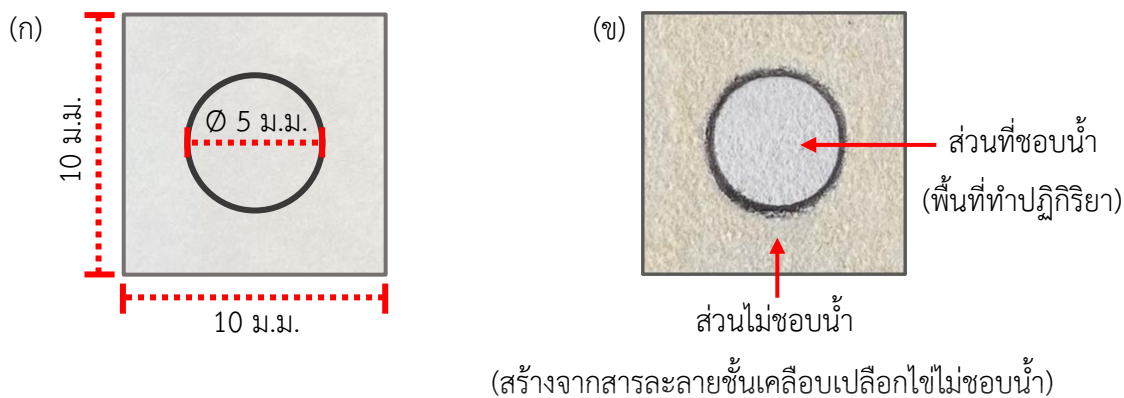
3.3.2 ใช้พู่กันเบอร์ 1 ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำลงบนกระดาษกรอง ด้านหน้า และด้านหลังรอบ ๆ ลวดลายที่วาดไว้

3.3.3 วางทิ้งไว้ประมาณ 1-3 นาที ในตู้ดูดควัน เพื่อให้ชั้นเคลือบและกระดาษกรองแห้งสนิท และจะได้อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่พร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 3.5 (ข)



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างลวดลายบนกระดาษ ด้วยเทคนิคการวาด ประกอบด้วย (ก) ไม้บรรทัดพลาสติกฉลุลวดลาย และ (ข) พู่กันเบอร์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 (ก) แสดงการออกแบบลวดลายส่วนไม่ซอบน้ำบนกระดาษ และ (ข) แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่พร้อมใช้งาน

3.4 การทดสอบคุณสมบัติความไม่ซอบน้ำของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษ

3.4.1 การทดสอบการกั้นน้ำ, การกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษ

ในการศึกษานี้ จะนำสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ซอบน้ำที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.3 มาทาบบนกระดาษกรองให้ทั่วทั้งกระดาษ สำหรับทดสอบการกั้นน้ำ และทำเป็นลวดลาย 2 แบบ กล่าวคือ แบบวงแหวน สำหรับทดสอบการกักเก็บน้ำ และแบบวงกลมสำหรับทดสอบการรั่วซึม หลังจากทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ซอบน้ำลงบนกระดาษ และรอให้แห้งเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบโดย การหยดน้ำสีลงไป 10.00 ไมโครลิตร แล้วประเมินผลทดสอบการกั้นน้ำ, การกักเก็บน้ำ และ การรั่วซึมของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษด้วยการถ่ายภาพ

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติความไม่ซอบน้ำของพื้นผิววัสดุด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs)

วิธีการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ สามารถทำได้โดย นำเข็มดูดน้ำปราศจากไอออน แล้วปล่อยหยดน้ำออก โดยให้หยดน้ำค้างอยู่ที่ปลายเข็มเพียงหยดเดียว จากนั้นนำหยดน้ำไปสัมผัสบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการวัด แล้วทำการวัดค่ามุมสัมผัสด้วยโปรแกรม SCA20 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีหน่วยเป็นองศา ซึ่งในการศึกษานี้ ได้ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้หยดน้ำขนาด 10.00 ไมโครลิตร อัตราเร็ว 1 ไมโครลิตรต่อวินาที ทำการวัดซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่ามุมสัมผัสที่ได้ทั้งด้านซ้าย และด้านขวาไปหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle meter)

3.4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ ซึ่งสามารถศึกษาได้ถึงระดับจุลภาค โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งพลังงาน ผลลัพธ์จะได้ภาพของวัสดุที่มีความละเอียดสูง ภาพที่ได้จะเป็นภาพสามมิติ ซึ่งจะใช้ในการศึกษารูปร่าง และสัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดต่าง ๆ ในการศึกษาได้ใช้เทคนิค SEM เพื่อยืนยันการเกาะติดของผงเปลือกไข่ในรูพรุน และบนเส้นใยเซลลูโลสของกระดาษ



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-infrared spectrometer: FT-IR) [8, 11]

FT-IR เป็นเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุล โดยอาศัยการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด หลักการทำงานของเครื่อง เริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด จากนั้นแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะสะท้อนผ่านไปยังส่วนบรรจุตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดเอาไว้บางส่วน ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนจะผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัด ผลที่ได้จะแสดงเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารตัวอย่างที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างโมเลกุลและกลุ่มฟังก์ชันของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-IR มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.4.1 บดตัวอย่างของแข็งให้มีความละเอียด โดยการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างของแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ ผงเปลือกไข่, กรดสเตียริก, และผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

3.3.4.2 ผสมตัวอย่างแต่ละชนิดเข้ากับโพแทสเซียมโบรมाइด์ (Potassium bromide: KBr) แล้วบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.4.3 ใส่ผงตัวอย่างที่ผสมกับ KBr แล้วลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกประมาณ 1-2 นาที

3.3.4.4 ถอดตัวอย่างอัดเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำเม็ดตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR เพื่อตรวจวัดด้วยโหมด Transmission ต่อไป



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR)

(ที่มา https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/images_for_resize/Image1.jpg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) สำหรับการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน

3.5.1 การเตรียมสารละลาย

3.5.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน ที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 40, 60, 70, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำได้โดย ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.3821 กรัม นำมาละลายในน้ำปราศจากไอออน คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 100.0 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปิเปตสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนนี้มา 0.125, 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 25.0 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 40, 60, 70, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5.1.2 การเตรียมสารละลายรีเอเจนต์เอ (Reagent A) ทำได้โดย ชั่งโซเดียมซาลิไซเลต 2.5000 กรัม และโซเดียมไนโตรปริสไซด์ไดไฮเดรต 0.1250 กรัม นำมาละลายในน้ำปราศจากไอออน คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 25.0 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร และจะได้สารละลาย Reagent A ที่พร้อมใช้งาน

3.5.1.3 การเตรียมสารละลายรีเอเจนต์บี (Reagent B) ทำได้โดย ชั่งโซเดียมไดคลอโรไอโซไซยานูเรต 0.2500 กรัม, ไตรโซเดียมซิติเรตไดไฮเดรต 5.0000 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5000 กรัม นำมาละลายในน้ำปราศจากไอออน คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 25.0 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร และจะได้สารละลาย Reagent B ที่พร้อมใช้งาน

3.5.1.4 การเตรียมตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ

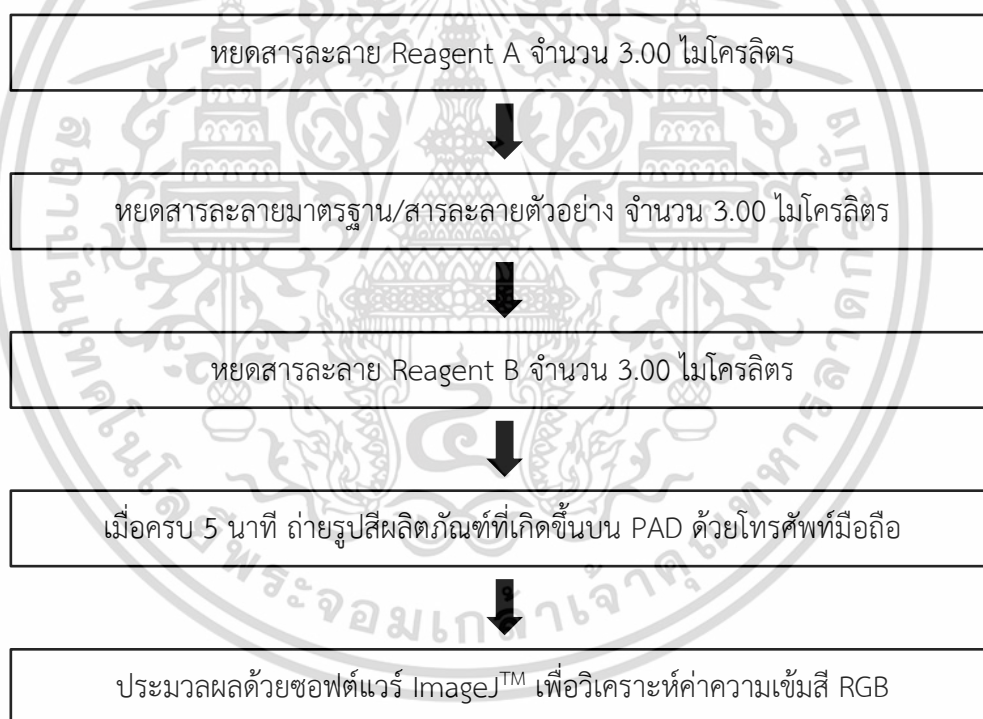
1. กรองตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ จนตัวอย่างน้ำใสสะอาด ไม่มีตะกอน
2. ปิเปตตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองแล้วมา 0.50 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายตัวอย่างน้ำเจือจาง 200 เท่า

3.5.2 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้นอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction)

3.5.2.1 หยดสารละลาย Reagent A ตามด้วยสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน/สารละลายตัวอย่าง และสารละลาย Reagent B ลงบนโซนตรวจวัดรูปวงกลม อย่างละ 3.00 ไมโครลิตร

3.5.2.2 ถ่ายรูปสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD ในสตูดิโอถ่ายภาพ ด้วยโทรศัพท์มือถือ หลังจากหยดสารเคมีเป็นเวลา 5 นาที

3.5.2.3 ประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ™ ในการอ่านค่าความเข้มสี RGB แล้วนำค่าความเข้มสีที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนต่อไป แผนภาพแสดงการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพ ขั้นตอนการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction)

3.6 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation)

ได้ทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์ด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น กับปริมาณที่วิเคราะห์ด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคมาตรฐานไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography: IC) เพื่อประเมินความแม่นยำของวิธี (Accuracy) โดยอาศัยวิธีการทางสถิติคือ Paired *t*-test ในการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography: IC) [32] เป็นเทคนิคการแยกสารผสมในสถานะการแตกตัวเป็นไอออน อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุภายในคอลัมน์ ในระบบการตรวจวัดประกอบด้วยตัวพา (Eluent) ซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่ที่จะช่วยพาสารตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าสู่คอลัมน์ (Column) ซึ่งเป็นเฟสคงที่ โดยไอออนที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่กับไอออนที่ต้องการแยกในสารตัวอย่าง จะมีประจุตรงกันข้ามกับไอออนที่อยู่บนผิวของเฟสคงที่ เมื่อเริ่มการตรวจวัด สารตัวอย่างจะถูก Eluent พาไปยังคอลัมน์ และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไอออน จากนั้นสารจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวตรวจวัด (Detector) แล้วรายงานผลออกมาในรูปโครมาโทแกรม (Chromatogram) ซึ่งไอออนแต่ละชนิดจะมีเวลาที่คงอยู่ในคอลัมน์เฉพาะตัว (Retention time: RT) ในการวิเคราะห์ผลให้นำพื้นที่ใต้พีคของแต่ละไอออนมาคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน และหาปริมาณของไอออนที่ต้องการตรวจวัดที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

สภาวะของเครื่อง IC ที่ใช้เป็นดังนี้

- คอลัมน์ (Column): Metrosep C4 (ขนาด 4.0 x 150 มิลลิเมตร, 7.0 ไมโครเมตร)
- อุณหภูมิ: 25 องศาเซลเซียส
- สารละลายตัวพา (Eluent): กรดไนตริก (Nitric acid) ความเข้มข้น 1.7 มิลลิโมลต่อลิตร และกรดไดพิโคลินิก (Dipicolinic acid) ความเข้มข้น 0.7 มิลลิโมลต่อลิตร
- อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่: 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปริมาตรการฉีดสารตัวอย่าง: 10 ไมโครลิตร
- เวลาที่ใช้ในการแยก (Chromatographic time): 10 นาที



รูปที่ 3.10 เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (IC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

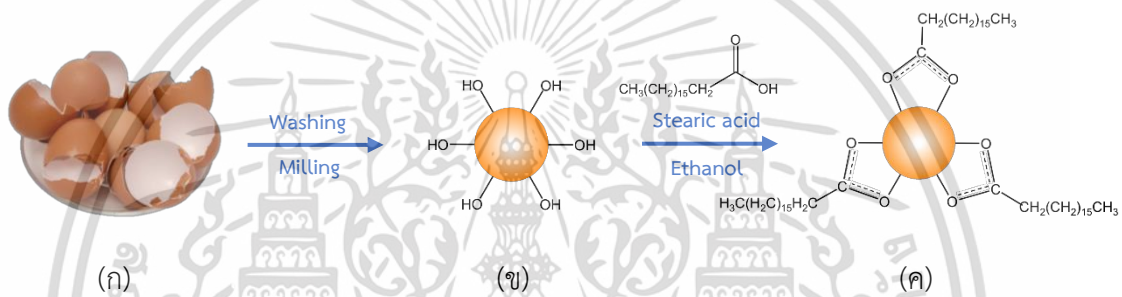
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติ

4.1.1 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากผงเปลือกไข่ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก [8]

กลไกการเกิดอนุภาคแคลเซียมสเตียเรตจากการปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไข่ด้วยกรดสเตียริก แสดงดังรูปที่ 4.1

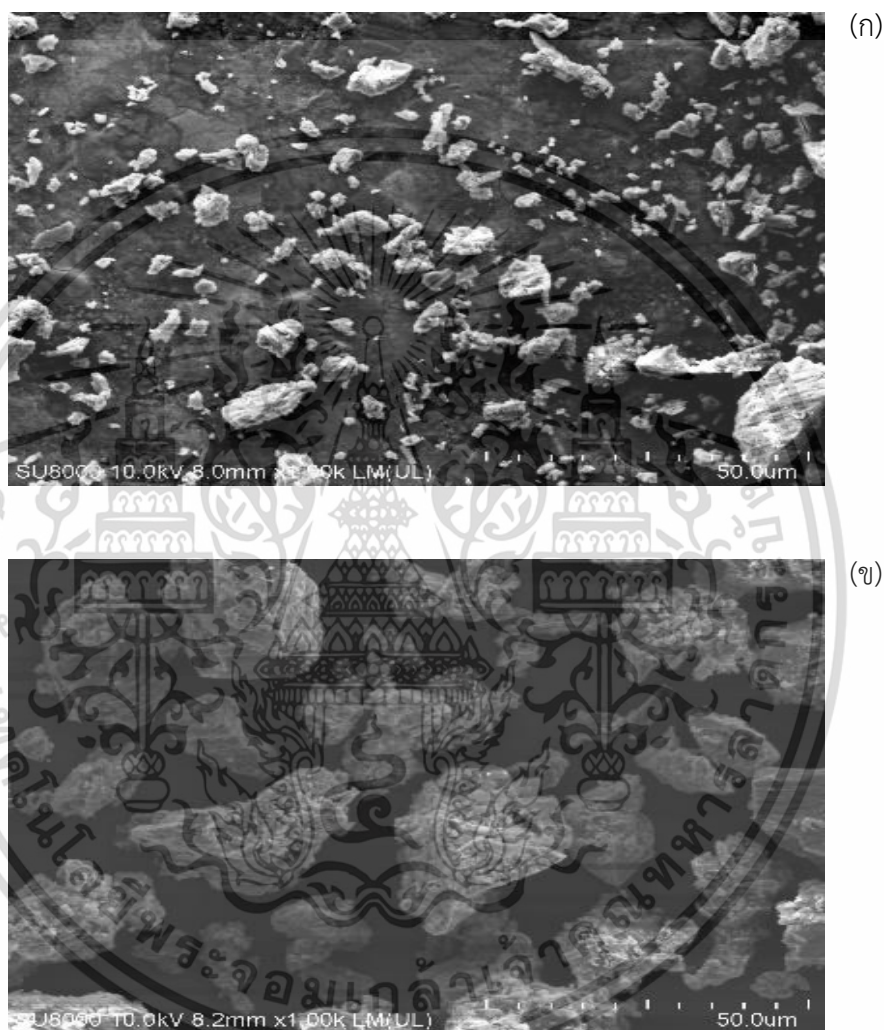


รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดอนุภาคแคลเซียมสเตียเรต จากการปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไข่ด้วยกรดสเตียริก โดยที่ (ก) เปลือกไข่ไก่, (ข) อนุภาคเปลือกไข่, และ (ค) อนุภาคแคลเซียมสเตียเรต

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ถึงองค์ประกอบของเปลือกไข่ เปลือกไข่ไก่ (รูปที่ 4.1 (ก)) มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) หลังจากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดเปลือกไข่ แล้วนำไปบดด้วยเครื่อง Mechanical ball-milling เพื่อให้มีขนาดเล็กลงแล้ว พบว่า ผงอนุภาคเปลือกไข่เหล่านี้ มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนพื้นผิว (รูปที่ 4.1 (ข)) เนื่องมาจากการดูดซับความชื้นระหว่างการเก็บรักษา เมื่อนำมาปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกในตัวทำละลายเอทานอล โครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวของกรดสเตียริกที่มีพลังงานต่ำ จะก่อตัวขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาคเปลือกไข่ จากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification reaction) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวอนุภาคเปลือกไข่ กับหมู่คาร์บอกซิลของกรดสเตียริก แล้วเกิดเป็นอนุภาคแคลเซียมสเตียเรต (รูปที่ 4.1 (ค)) ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

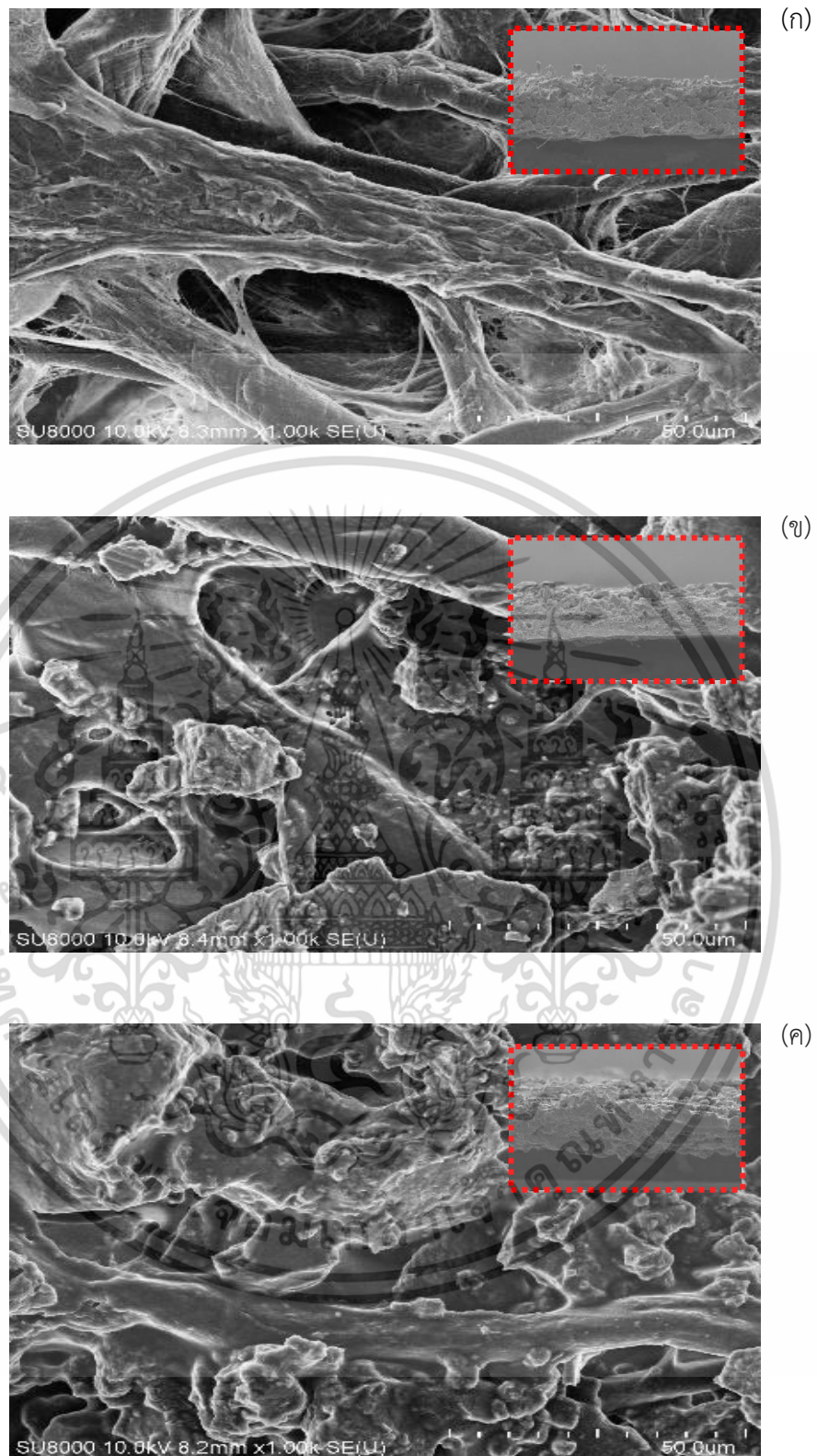
ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยจะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอนุภาคก่อนและหลัง การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ของ (ก) ผงอนุภาคเปลือกไข่ก่อนปรับปรุงพื้นผิว และ (ข) ผงอนุภาคเปลือกไข่หลังปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

ผลการศึกษา พบว่า ผงอนุภาคเปลือกไข่ก่อนปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (รูปที่ 4.2 (ก)) มีขนาดเล็กกว่าผงอนุภาคเปลือกไข่หลังปรับปรุงพื้นผิว (รูปที่ 4.2 (ข)) คาดว่าเป็นผลมาจากการก่อตัวของชั้นแคลเซียมสเตียเรตบนผิวอนุภาค ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของ (ก) กระดาษกรองเปล่า และกระดาษกรองที่ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำ (ข) 1 ด้าน และ (ค) 2 ด้าน (ภาพที่แทรกคือภาพ SEM ในแนวตัดขวาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก) ภาพ SEM ของกระดาศกรองเปล่าแสดงให้เห็นถึงเส้นใยเซลลูโลส และช่องว่างที่เป็นรูพรุนของกระดาศ เมื่อนำสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำมาทาลงบนกระดาศ (รูปที่ 4.3 (ข) และ (ค)) พบว่า ผงอนุภาคเปลือกไข่จะเกาะติดตามเส้นใยเซลลูโลส และปิดรูพรุนของกระดาศ น้ำจึงไม่สามารถไหลผ่านได้ ทำให้บริเวณที่ทาเกิดคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำขึ้น โดยการทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำทั้งสองด้านของกระดาศกรอง (รูปที่ 4.3 (ค)) จะทำให้ผงอนุภาคเปลือกไข่ไปเกาะติดตามเส้นใยเซลลูโลส และสามารถปิดรูพรุนของกระดาศกรองได้มากกว่า ทาบนกระดาศเพียงด้านเดียว (รูปที่ 4.3 (ข)) ส่งผลให้คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากยิ่งขึ้น

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR) [8]

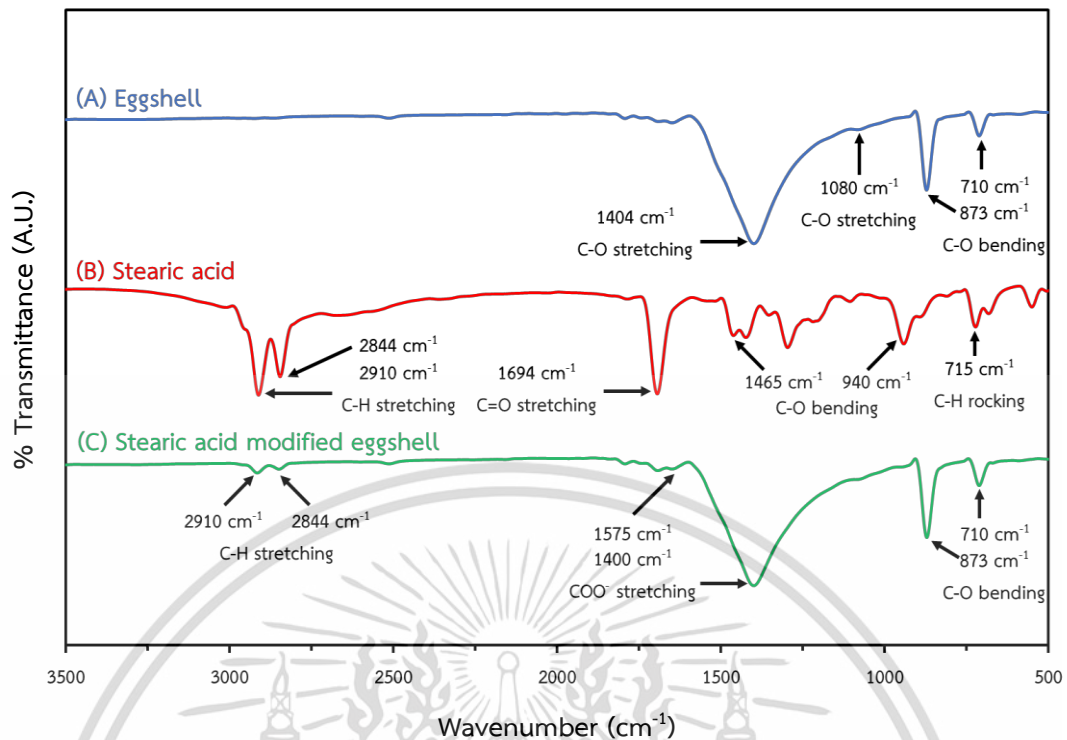
ได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FT-IR ของผงอนุภาคเปลือกไข่ (Eggshell), กรดสเตียริก (Stearic acid), และผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid modified eggshell) ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 และสามารถสรุปข้อมูลของ FT-IR สเปกตรัมได้ดังนี้

4.1.3.1 ผงอนุภาคเปลือกไข่ พบช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงเอกลักษณ์เฉพาะของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 710 และ 873 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ C-O แบบงอ (Bending) และพบการสั่นของพันธะ C-O แบบยืดหด (Stretching) ที่ความยาวคลื่น 1080 และ 1404 cm^{-1}

4.1.3.2 กรดสเตียริก พบช่วงการดูดกลืนแสงของหมู่อัลคิล ($-\text{CH}_3$ และ $-\text{CH}_2$) และคาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ที่ความยาวคลื่น 715 cm^{-1} ของพันธะ C-H แบบระนาบเดียวกัน (Rocking), 2844 และ 2910 cm^{-1} สำหรับ C-H stretching, 940 และ 1465 cm^{-1} สำหรับ C-O bending, และ 1694 cm^{-1} สำหรับ C=O stretching

4.1.3.3 ผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก พบการดูดกลืนแสงของหมู่อัลคิล ($-\text{COO}^-$) ที่ความยาวคลื่น 1400 และ 1575 cm^{-1} สำหรับ COO^- stretching ซึ่งบ่งบอกถึงการก่อตัวของแคลเซียมสเตียเรต ($(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Ca}$) ที่พื้นผิวอนุภาค

จากข้อมูลทั้งหมด จึงสรุปได้ว่า สามารถเตรียมผงเปลือกไข่ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกเป็นผลสำเร็จ





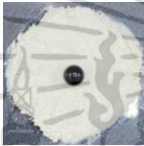







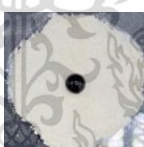

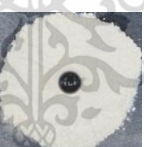

รูปที่ 4.4 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (A) ฟองนุภาคเปลือกไข่ (Eggshell), (B) กรดสเตียริก (Stearic acid), และ (C) ฟองนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid modified eggshell)

4.2 การศึกษาส่วนประกอบของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ที่เหมาะสม สำหรับการนำมาสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

4.2.1 การศึกษาตัวทำละลายกรดสเตียริก

ได้ทำการทดสอบความไม่ชอบน้ำของฟองนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารละลายกรดสเตียริก ที่ใช้ตัวทำละลายแตกต่างกันสองชนิด คือ เฮกเซน (98.5 % (v/v)) และ เอทานอล (99.9 % (v/v)) โดยหลังจากปรับปรุงคุณสมบัติเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบโดยการหยดน้ำสีลงบนฟองนุภาคเปลือกไข่โดยตรง โดยนำฟองเปลือกไข่มาจัดวางเป็นแผ่นวงกลม ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของผงอนุภาคเปลือกไข่ ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดสเตียริกในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน

สภาวะการทดลอง	ตัวทำละลายของกรดสเตียริก			
	เฮกเซน (98.5 % (v/v))		เอทานอล (99.9 % (v/v))	
	ภาพถ่ายผงอนุภาค		ภาพถ่ายผงอนุภาค	
	ด้านบน	ด้านข้าง	ด้านบน	ด้านข้าง
ผงอนุภาค ก่อนหยดน้ำสี		-		-
ผงอนุภาค หลังหยดน้ำสี 5 นาที				
ผงอนุภาค หลังหยดน้ำสี 10 นาที				
ผงอนุภาค หลังหยดน้ำสี 15 นาที				

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของผงอนุภาคเปลือกไข่ ในตัวทำละลายของกรดสเตียริกที่แตกต่างกันแล้ว พบว่า ผงอนุภาคมีคุณสมบัติการกันน้ำได้อย่างดีเยี่ยม หยดน้ำสีสามารถคงตัวเป็นหยดกลมมน ค้างอยู่บนผงอนุภาคได้เป็นเวลานานถึงอย่างน้อย 15 นาที ไม่ว่าจะใช้ตัวทำละลายของกรดสเตียริกเป็นเฮกเซน (98.5 % (v/v)) หรือเอทานอล (99.9 % (v/v)) ก็ตาม แต่อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้เอทานอล (99.9 % (v/v)) มาเป็นตัวทำละลายกรดสเตียริก เพราะต้องการลดความเป็นพิษจากการใช้เฮกเซน

4.2.2 การศึกษาปริมาตรของเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) ที่เหมาะสม

ในการทดลอง ได้มีการนำ THF มาเป็นตัวทำละลายเม็ดพอลิสไตรีน (PS) เพื่อเตรียมสารละลายตัวประสาน สำหรับแขวนลอยผงอนุภาคเปลือกไข่ที่จะนำไปใช้สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ ดังนั้น จึงต้องทำการศึกษาปริมาตรของ THF ที่มีความเหมาะสมในการทำละลาย PS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะจะส่งผลต่อความหนืดของสารละลายเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจากสารละลาย PS นี้ เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของสารละลายเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ โดยได้ทำการศึกษาปริมาตรของ THF ที่ 10.00, 5.00 และ 2.50 มิลลิลิตร และกำหนดให้น้ำหนักของเม็ดพอลิสไตรีน, น้ำหนักผงอนุภาคเปลือกไข่ และปริมาตรของน้ำสีเท่ากันในทุกการทดลอง ได้แก่ 0.2000 กรัม, 0.4000 กรัม, และ 10.00 ไมโครลิตร และทำการทดสอบบนกระดาษที่ออกแบบลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำเป็นรูปวงกลม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายกระดาษกรองหลังจากสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ โดยใช้ปริมาตรของ THF (สำหรับทำละลาย PS) ที่ (ก) 10.00 มิลลิลิตร, (ข) 5.00 มิลลิลิตร และ (ค) 2.50 มิลลิลิตร จากนั้นหยดน้ำสีน้ำเงินปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และถ่ายรูปหลังหยด 5 นาที

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ปริมาตรของ THF ที่เหมาะสมที่สุดคือ 2.50 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.5 (ค)) เนื่องจาก จะทำให้ได้สารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ที่มีความหนืดกำลังดี ไม่เหลวและไม่ข้นจนเกินไป ผงอนุภาคเปลือกไข่กระจายตัวแขวนลอยได้ดี และเมื่อทาลงบนกระดาษแล้ว สารละลายชั้นเคลือบไม่ไหลซึมเข้ามาในบริเวณการตรวจวัด (ส่วนชอบน้ำ ดังแสดงเป็นรูปวงกลม) สามารถสร้างลวดลายตามที่ต้องการได้ และน้ำสีไม่ไหลซึมออกนอกพื้นที่การตรวจวัด ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้ THF ปริมาตร 10.00 และ 5.00 มิลลิลิตรนั้น (รูปที่ 4.5 (ก) และ (ข)) สารละลายชั้นเคลือบมีความเหลวเกินไป ไม่สามารถนำมาสร้างลวดลายตามที่ต้องการบนกระดาษได้ และน้ำสีเกิดการรั่วซึมออกนอกพื้นที่การตรวจวัด อนึ่ง ไม่ได้ทำการศึกษาที่ปริมาตร THF น้อยกว่า 2.50 มิลลิลิตร เนื่องจากเป็นปริมาตรที่น้อยเกินไปซึ่งไม่เพียงพอต่อการทำละลายเม็ด PS

4.3 การทดสอบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษ

4.3.1 ทดสอบการกันน้ำ, การกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำบนกระดาษ

ในการทดสอบ ได้ทำการเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำให้มีส่วนประกอบดังนี้ คือ เม็ด PS 0.2000 กรัม, THF 2.50 มิลลิลิตร, และผงเปลือกไขที่ปรับสภาพด้วยกรดสแตียริกแล้ว 0.4000 กรัม

การทดสอบการกันน้ำ ได้ทำสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขให้ทั่วทั้งกระดาษกรอง ส่วนการทดสอบการกักเก็บน้ำและการรั่วซึม ทำสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขรอบ ๆ พื้นที่วงกลม โดยทาทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษกรองสำหรับการทดสอบทั้งสองประเด็น จากนั้น หยดน้ำสีน้ำเงินลงไป 10.00 ไมโครลิตร ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.6



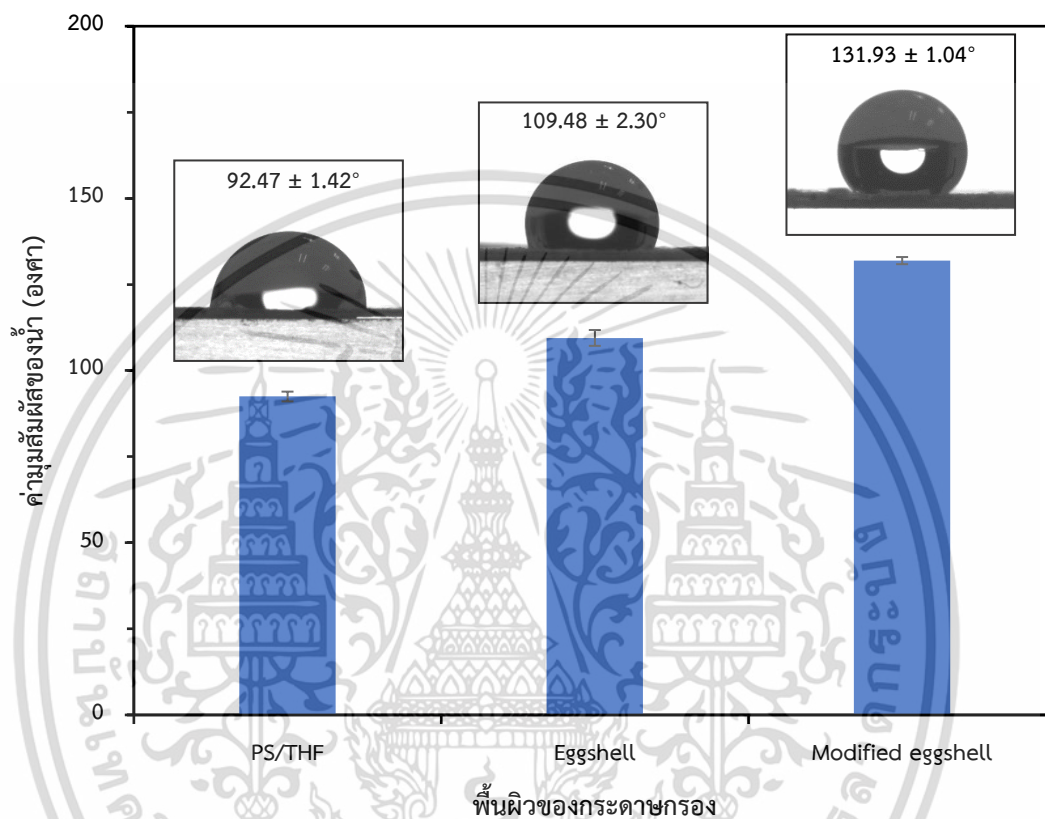
รูปที่ 4.6 (ก) การทดสอบการกันน้ำ และ (ข) การทดสอบการกักเก็บน้ำ และการรั่วซึมของชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษ โดยการหยดน้ำสีน้ำเงิน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.6 พบว่า ชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำบนกระดาษ มีประสิทธิภาพในการกันน้ำ, กักเก็บน้ำ และป้องกันการรั่วซึมได้ดี สังเกตได้จากหยดน้ำสีที่ค้างเป็นหยดกลมมนได้นานอย่างน้อย 15 นาที และน้ำสีน้ำเงินที่อยู่ภายในพื้นที่วงกลม ไม่รั่วซึมออกมาทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษ

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวกระดาษที่เคลือบด้วยเปลือกไขที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ ด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles: WCAs)

ในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระดาษกรองที่เคลือบด้วยสารละลายต่าง ๆ ได้แก่ 1) กระดาษกรองที่ทำสารละลายชั้นเคลือบตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสานอย่างเดี่ยว (PS/THF), 2) กระจกทรงที่ทาสารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และมีตัวประสาน (Eggshell), และ 3) กระจกทรงที่ทาสารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแล้ว และมีตัวประสาน (Modified eggshell) โดยได้ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง (n=3) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7

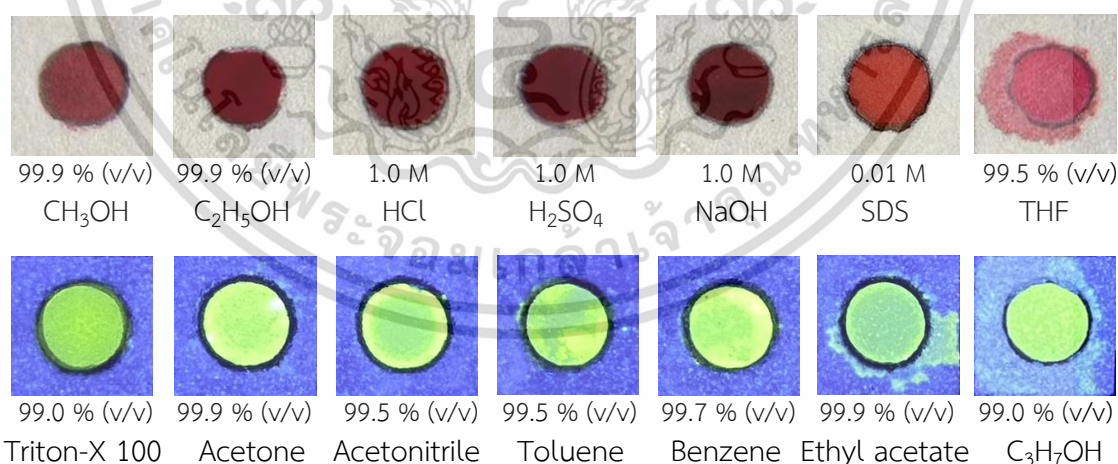


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของกระจกทรงที่เคลือบด้วยสารละลายตัวประสานอย่างเดี่ยว (PS/THF), สารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และมีตัวประสาน (Eggshell), และสารละลายชั้นเคลือบผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแล้ว และมีตัวประสาน (Modified eggshell)

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ผงเปลือกไข่ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรดสเตียริก มีส่วนช่วยทำให้ความไม่ชอบน้ำบนพื้นผิววัสดุเพิ่มมากยิ่งขึ้น พิจารณาได้จากค่ามุมสัมผัสของน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไข่ด้วยกรดสเตียริกก่อน แล้วจึงนำมาแขวนลอยในตัวประสาน เพื่อให้ได้สารละลายชั้นเคลือบ ผงเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำบนกระจกที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้สร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระจกได้ต่อไป

4.4 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของผองอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่เคลือบอนุกรมตรวจวัดบนกระดาษ (Chemical resistant)

ได้ทดสอบความทนต่อสารเคมีที่มีใช้ทั่วไปตามห้องปฏิบัติการ ของผองอนุภาคเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่เคลือบอนุกรมตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ซึ่งได้ออกแบบลวดลายส่วนที่ชอบน้ำเป็นรูปวงกลม และเคลือบผิวกระดาษด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ โดยการทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่รอบนอกวงกลมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษ จากนั้น ทำการหยดสารเคมีที่เป็นตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรก เป็นสารเคมีที่ใส่สีผสมอาหารสีแดงลงไป เพื่อให้มองเห็นการรั่วซึมได้อย่างชัดเจนภายใต้แสงไฟปกติ ได้แก่ 99.0 % (v/v) เตตระไฮโดรฟิวแรน (THF), 99.9 % (v/v) เอทานอล (CH_3OH), 99.9 % (v/v) เมทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), 1.0 M ไฮโดรคลอริก (HCl), 1.0 M ซัลฟิวริก (H_2SO_4), 1.0 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), และ 0.01 M โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) กลุ่มที่สอง เป็นสารเคมีที่ใส่สารเรืองแสงฟลูออเรสซินลงไป เพื่อให้มองเห็นการรั่วซึมภายใต้แสงยูวี ได้แก่ 99.0 % (v/v) Triton-X 100, 99.9 % (v/v) อะซิโตน (Acetone), 99.5 % อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile), 99.9 % เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate), 99.7 % (v/v) เบนซีน (Benzene), 99.5 % โทลูอีน (Toluene), และ 99.0 % (v/v) โพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) จากนั้น หยดตัวทำละลายดังกล่าวลงบน PAD ที่เตรียมไว้ โดยหยดลงบริเวณวงกลม ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร รอ 5 นาที แล้วถ่ายรูปผลที่เกิดขึ้น พบว่า ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของอนุกรมตรวจวัดบนกระดาษ

จากรูปที่ 4.8 พบว่า PAD ที่พัฒนาขึ้น สามารถทนต่อสารเคมีที่เป็นกรด, เบส, แอลกอฮอล์, และสารอินทรีย์บางชนิดได้ ยกเว้น THF ที่เป็นตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำ, โทลูอีน, และโพรพานอลที่เกิดการรั่วซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบความทนต่อแรงทางกายภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (Durability test)

ได้ทำการศึกษาความทนต่อแรงทางกายภาพของ PAD โดยการขยำด้วยมือ เพื่อดูว่าหลังจากที่ผ่านการขยำแล้ว PAD ที่เกิดรอยยับจะยังคงประสิทธิภาพการกั้นน้ำและการกักเก็บน้ำได้ดีอยู่หรือไม่ โดยทำการทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำลงบนกระดาษสองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแรก คือ ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขให้เต็มกรอบสี่เหลี่ยมที่วาดไว้บนกระดาษทั้งด้านหน้าและด้านหลัง อีกรูปแบบหนึ่ง คือ ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบริเวณรอบนอกวงกลมให้เต็มกรอบสี่เหลี่ยมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษ เมื่อสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขบนกระดาษแห้งดีแล้ว ให้ขยำ PAD ด้วยมือ ซึ่งการขยำนี้จะทำให้ PAD เกิดการพับ บิดงอ และเกิดรอยยับขึ้น หลังจากนั้นคลี่ PAD ออกมาแล้วทดสอบโดยการหยดน้ำสีแดงปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบน PAD ที่ผ่านการขยำแล้ว เพื่อศึกษาว่าผงอนุภาคเปลือกไขที่อยู่ในสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขมีความเสถียร และสามารถยึดติดบนผิวกระดาษได้อย่างดีหรือไม่ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่ถูกทำการทดสอบความทนทางกายภาพ โดยที่ (ก) PAD ก่อนการขยำ, (ข) PAD ที่โดนขยำ, และ (ค) PAD หลังการขยำ

จากการทดสอบความทนทางกายภาพของ PAD ดังรูปที่ 4.9 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า PAD มีความทนต่อแรงทางกายภาพได้ค่อนข้างดี หลังจากที่ผ่านมาการขยำด้วยมือจนเกิดการพับและบิดงอแล้ว (รูปที่ 4.9 (ข)) PAD ที่เคลือบด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขจะเกิดรอยยับ และมีผงอนุภาคเปลือกไขหลุดออกไปบางส่วนเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงอนุภาคเปลือกไขมีความเสถียร และสามารถยึดติดบนผิวกระดาษได้อย่างดีแม้ถูกทำให้เสียสภาพ อีกทั้งยังคงคุณสมบัติการกั้นน้ำ และการกักเก็บน้ำได้ดีอยู่ สังเกตได้จากหยดน้ำสีแดงที่ค้างเป็นหยดกลมบน และน้ำสีแดงที่ไม่ไหลรั่วซึมออกมาจากพื้นที่รูปวงกลม (รูปที่ 4.9 (ค))

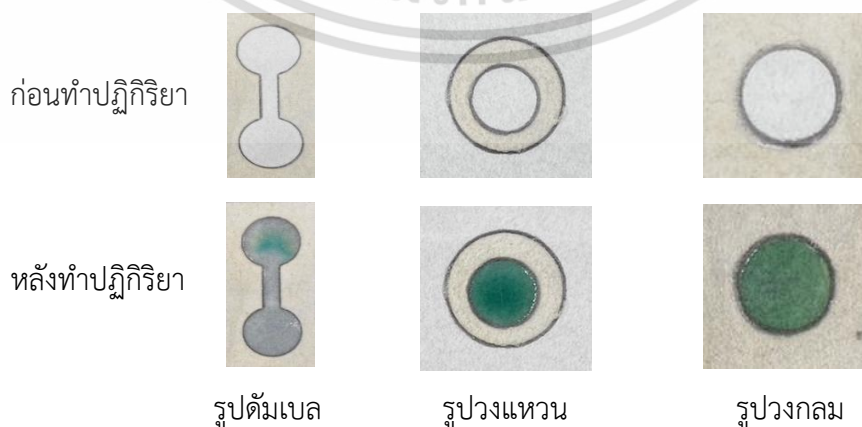
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น

หลังจากสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำ และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ รวมไปถึงการทดสอบประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป ได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ อาศัยปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง (Modified Berthelot's reaction) ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดสี (Colorimetric method) ซึ่งการเลือกใช้ปฏิกิริยาเบอเธลอตแบบดัดแปลง โดยการใช้สารโซเดียมซาลิไซเลต และไดคลอโรไอโซไซยานูเรต แทนการใช้สารฟีนอลและไฮโปคลอไรท์ มีข้อดีคือ มีความปลอดภัยต่อร่างกาย และสารมีความเสถียรมากกว่า ผลการทดลองที่ได้จะแสดงในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.6.1 การออกแบบลวดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ได้ออกแบบลวดลายสำหรับทำปฏิกิริยาทั้งหมด 3 ลวดลาย ได้แก่ รูปดัมเบล, รูปวงแหวน และรูปวงกลม โดยลวดลายทั้งหมดเกิดจากการวาดด้วยดินสอลงบนกระดาษกรอง เพื่อกำหนดลวดลายส่วนชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ แล้วจึงใช้พู่กันเบอร์ 1 ทาสารแขวนลอยผงอนุภาคเปลือกไขที่ผ่านการดัดแปลง ลงบริเวณส่วนไม่ชอบน้ำ จากนั้น หยดสารละลาย Reagent A (ประกอบด้วย โซเดียมซาลิไซเลตความเข้มข้น 0.624 โมลต่อลิตร และโซเดียมไนโตรปรัสไซด์ความเข้มข้น 0.016 โมลต่อลิตร), สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร, และ Reagent B (ประกอบด้วย โซเดียมไดคลอโรไอโซไซยานูเรตความเข้มข้น 0.056 โมลต่อลิตร, ไตร-โซเดียมซิติเรตความเข้มข้น 0.680 โมลต่อลิตรและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.500 โมลต่อลิตร) ลงไปในพื้นที่การตรวจวัดรูปต่าง ๆ แล้วสังเกตสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และบันทึกผลการทดลองโดยการถ่ายรูป ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การออกแบบลวดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ประสงค์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ลวดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ รูปวงแหวน และรูปวงกลม สังกะสีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนภายในพื้นที่การตรวจวัดในบริเวณส่วนที่ขอบน้ำ อย่างไรก็ตาม ได้เลือกลวดลายรูปวงกลม เนื่องจาก ง่ายต่อการทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไขไม่ชอบน้ำ และช่วยประหยัดเวลาในการผลิต PAD ในจำนวนมาก

4.6.2 การศึกษาขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัดที่เหมาะสม

เมื่อเลือกลวดลายที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและตรวจวัดเป็นรูปวงกลมแล้ว ต่อมา ได้ทำการศึกษาขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัด โดยได้ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 8, และ 5 มิลลิเมตร (ม.ม.) จากนั้นทดสอบด้วยปฏิกิริยาเบอแรลทแบบดัดแปลง โดยหยด Reagent A, สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร, และ Reagent B อย่างละ 2.50 ไมโครลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11



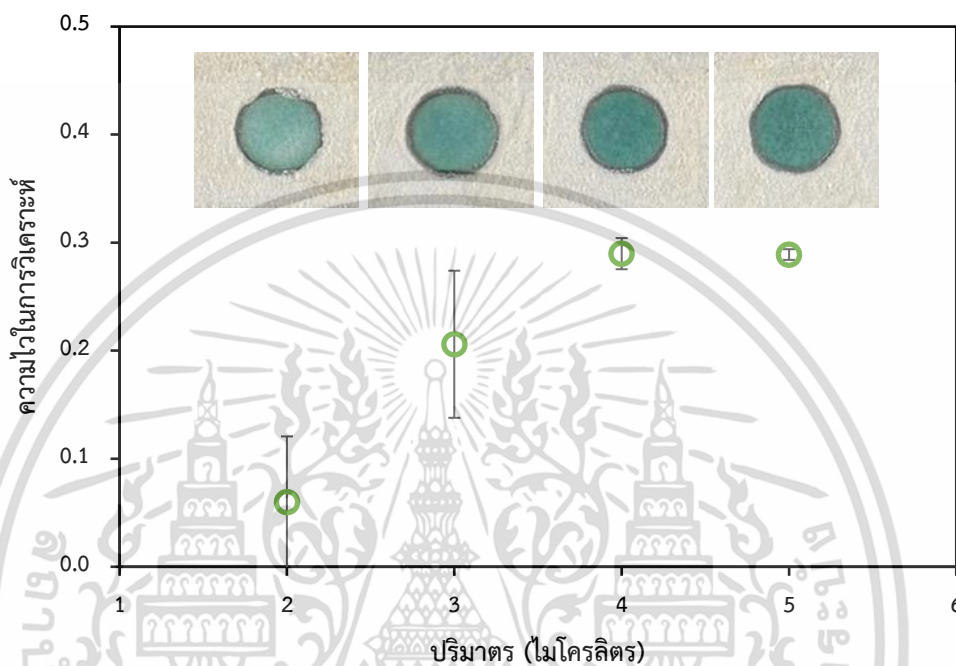
รูปที่ 4.11 การศึกษาขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัดที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.11 เมื่อดูจากสีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ทำปฏิกิริยาแล้ว พบว่า ที่วงกลมขนาด 5 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด สีเขียวของผลิตภัณฑ์เข้มชัดและแพร่กระจายได้เต็มวง ในทางตรงกันข้าม ที่ขนาด 8 และ 10 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองที่ไม่ดีเท่าที่ควร คาดว่าเป็นเพราะขนาดวงกลมใหญ่เกินไป เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดการแพร่กระจายมาก สีเขียวจึงจางลงอย่างมากด้วยอิทธิพลการเจือจางจากการแพร่กระจายนั่นเอง

4.6.3 การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสมในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่าง

การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสม เป็นการศึกษาปริมาตรของการหยดสารละลาย Reagent A, สารตัวอย่าง, และ Reagent B โดยได้ศึกษาในปริมาตรที่เท่ากันทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีหรือสารตัวอย่าง คือ 2, 3, 4, และ 5 ไมโครลิตร โดยการศึกษาอิทธิพลของปริมาตรสารตัวอย่างนั้น จะศึกษาด้วยสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน แล้วสร้างกราฟมาตรฐานของปริมาตรต่าง ๆ ที่ใช้โดยพล็อตระหว่างความเข้มสีเขียว (Green intensity) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (0, 10, 50, 100, 150, และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้นศึกษาความชัน (Slope) ของกราฟมาตรฐานที่ได้ ซึ่งบ่งบอกถึงความไวของวิธีวิเคราะห์ (Sensitivity) ผลการทดลองที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ จะแสดงในลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการวิเคราะห์กับปริมาตรสารที่ใช้ และจะแสดงรูปถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD เฉพาะจากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.12

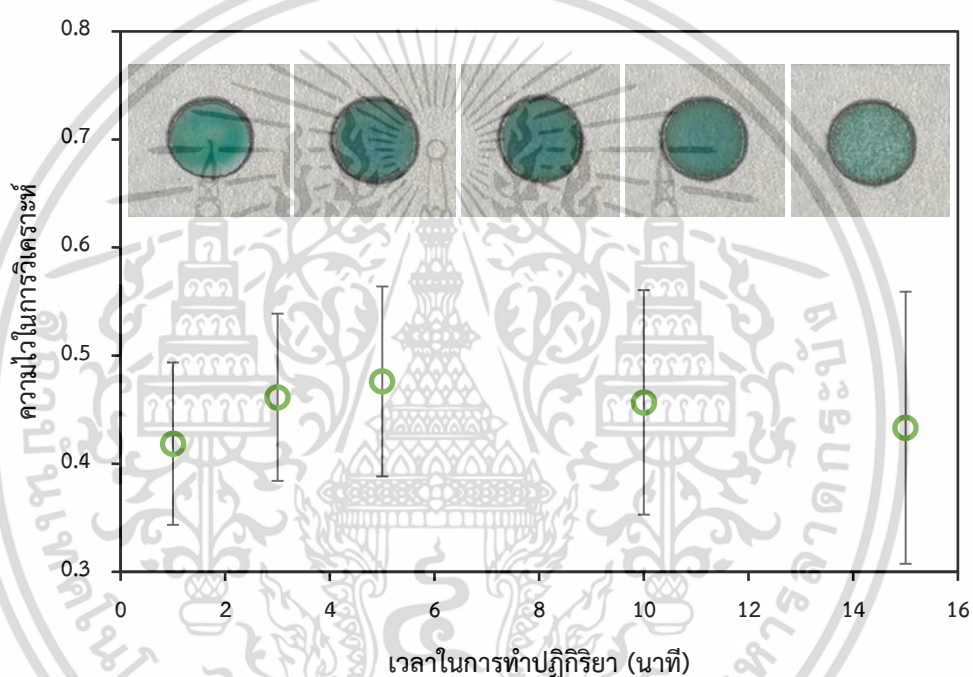


รูปที่ 4.12 การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสมในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาจากความไวในการวิเคราะห์ และสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD พบว่า ที่ปริมาตร 4 และ 5 ไมโครลิตร มีความไวในการวิเคราะห์ที่สูงที่สุด และสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มชัดเจน แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ปริมาตรที่ 4 และ 5 ไมโครลิตรนั้นเป็นปริมาตรที่มากเกินไป มีสารละลายบางส่วนล้นออกมาจากพื้นที่การตรวจวัด ส่วนปริมาตร 2 ไมโครลิตรนั้นไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ทำให้สีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างจาง ส่งผลให้มีความไวในการวิเคราะห์ต่ำ ดังนั้น ปริมาตรที่เหมาะสมในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่างคือ 3 ไมโครลิตร ซึ่งเป็นปริมาตรที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา มีความไวในการวิเคราะห์ค่อนข้างดี สารสามารถไหลแพร่กระจายได้เต็มพื้นที่การตรวจวัด และสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอชัดเจน

4.6.4 การศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม (Reaction time)

ได้ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1, 3, 5, 10, และ 15 นาที โดยถ่ายรูปสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD หลังจากสารทำปฏิกิริยากันครบตามเวลาต่าง ๆ โดยใช้ปริมาตรสารเคมีและสารมาตรฐานเท่ากับ 3 ไมโครลิตร จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเข้มสี และสร้างกราฟมาตรฐานโดยพล็อตระหว่างความเข้มสีกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (0, 10, 30, 50, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้น ศึกษาค่าความชันของกราฟมาตรฐานที่ได้ ผลการทดลองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.13 โดยเลือกรูปถ่ายของผลิตภัณฑ์บน PAD เมื่อศึกษาด้วยสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นอื่น ๆ



รูปที่ 4.13 การศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาจากความไวในการวิเคราะห์ และสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD พบว่า ที่เวลา 1 นาที สารยังทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์ สีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD จึงยังไม่สม่ำเสมอ และความไวในการวิเคราะห์ค่อนข้างต่ำ ที่เวลา 3 และ 5 นาที สารเกิดปฏิกิริยากันสมบูรณ์ สีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาจากความไวในการวิเคราะห์ พบว่า เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที ให้ความไวในการวิเคราะห์สูง ไม่แตกต่างกับเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10 และ 15 นาที จึงเลือกเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที เพื่อให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน อย่างไรก็ตาม ยังพบว่า ที่เวลา 10 และ 15 นาที PAD จะเริ่มแห้ง ทำให้เห็นจุดขาวบนกระดาษเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น เป็นเพราะสารเคมีค่อย ๆ ระเหยออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.5 การศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนต์เอและบี

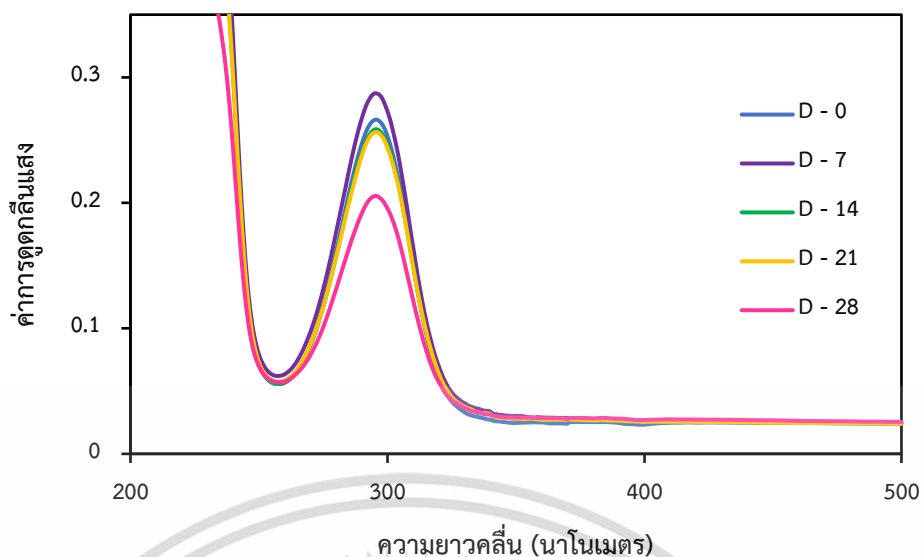
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกปฏิกิริยาเบอธเลอทแบบดัดแปลงมาใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน ซึ่งตัวปฏิกิริยาจำเป็นต้องแยกรีเอเจนต์ (Reagent) ออกเป็นสองชุด ในที่นี้คือ Reagent A ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างโซเดียมซาลิไซเลตกับโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ และ Reagent B ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไดคลอโรโรโอโซไซยานูเรต, ไตร-โซเดียมซิเตรต, และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยสาเหตุที่ต้องแยก Reagent ออกเป็นสองชุด ไม่สามารถนำมาผสมรวมกันทีเดียวได้ เป็นเพราะว่ามีขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยา โดยในการเตรียมสารละลาย Reagent B เมื่อผสมสารรวมกันแล้วจะเกิดไฮโปคลอไรท์ไอออนขึ้น ซึ่งเป็นสารสำคัญที่จะไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียแล้วเกิดเป็นคลอรามิน จากนั้น คลอรามินที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารที่อยู่ในสารละลาย Reagent A จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเขียวในท้ายที่สุด (สามารถดูกลไกการเกิดปฏิกิริยาเบอธเลอทแบบดัดแปลงได้จากรูปที่ 2.6)

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาความเสถียรของสารละลาย Reagent A และ Reagent B ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี อาศัยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารละลายในช่วงความยาวคลื่น 200-500 นาโนเมตร โดยติดตามเป็นระยะเวลา 28 วัน หลังจากเตรียมเสร็จและเก็บไว้สำหรับสารละลาย Reagent A ได้ทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 สำหรับสารละลาย Reagent B ได้ทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent A ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า ในช่วงระยะเวลาที่เก็บไว้ 28 วัน

ระยะเวลาที่เก็บไว้ (วัน)	ความยาวคลื่นสูงสุด (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	296	0.2662
7	295	0.2873
14	296	0.2585
21	296	0.2564
28	295	0.2054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



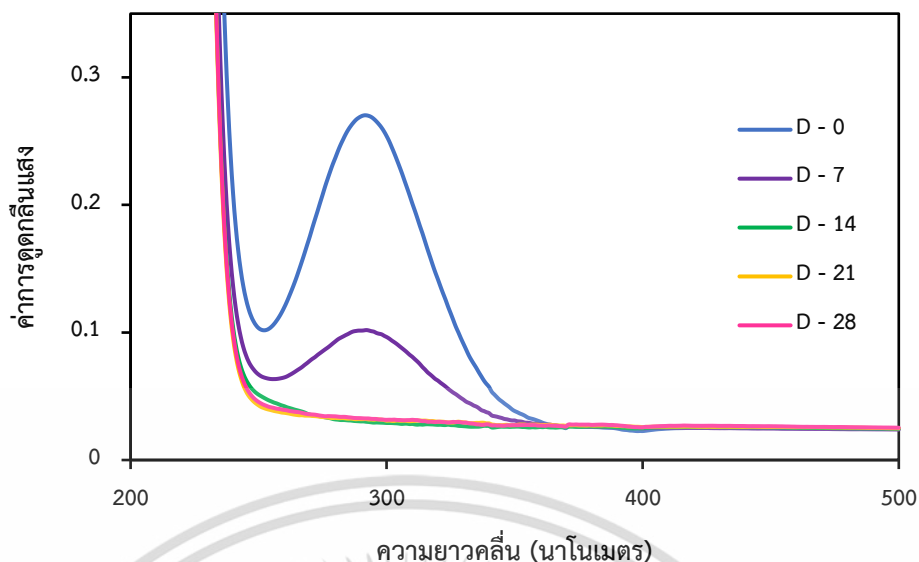
รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent A ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า ที่เก็บไว้ในช่วงระยะเวลา 28 วัน

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent A ในอัตราส่วนการเจือจาง 10,000 เท่า พบว่า Reagent A มีความเสถียร โดยสามารถเก็บไว้ใช้ได้ยาวนานถึง 21 วัน นับจากการเตรียมสารในวันแรก (D - 0) และหลังจากวันที่ 21 คาดว่า Reagent A น่าจะเริ่มเสื่อมสภาพ สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent B ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า ในช่วงระยะเวลาที่เก็บไว้ 28 วัน

ระยะเวลาที่เก็บไว้ (วัน)	ความยาวคลื่นสูงสุด (นาเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	292	0.2703
7	292	0.1019
14	ไม่เกิดพีค	-
21	ไม่เกิดพีค	-
28	ไม่เกิดพีค	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent B ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า ที่เก็บไว้ในช่วงระยะเวลา 28 วัน

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Reagent B ในอัตราส่วนการเจือจาง 100 เท่า พบว่า Reagent B ไม่เสถียร สังเกตได้จากสเปกตรัมที่ลดลงเรื่อย ๆ จนไม่เกิดพีค และไม่สามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงได้ ดังนั้น ในการทดลองควรจะต้องเตรียมสารละลาย Reagent B ใหม่ทุกครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง

สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปสถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น

ตัวแปร	ช่วงที่ศึกษา	สถานะที่เหมาะสม
การออกแบบหลอดลายสำหรับทำปฏิกิริยา	รูปดัมเบล, รูปวงแหวน, รูปวงกลม	รูปวงกลม
ขนาดวงกลมที่ใช้ทำปฏิกิริยาและตรวจวัด (มิลลิเมตร)	5-10	5
ปริมาตรในการหยดสารเคมีและสารตัวอย่าง (ไมโครลิตร)	2-5	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)	1-15	5
ความเสถียรของ Reagent A (วัน)	0-28	0-21
ความเสถียรของ Reagent B (วัน)	0-28	0

หมายเหตุ: วันที่ 0 หมายถึงวันที่เตรียมสารเสร็จในวันแรก ซึ่งแนะนำให้เตรียมสารละลาย Reagent A และ B แบบสดใหม่ทุกวันก่อนใช้ ไม่ควรเก็บไว้นานหลายวัน

4.6.6 การประเมินคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ (Analytical performances)

ได้ศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ของ PAD ที่พัฒนาขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนด้วยปฏิกิริยาเบอแรลทแบบดัดแปลง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมสรุปดังตารางที่ 4.4 และทำการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

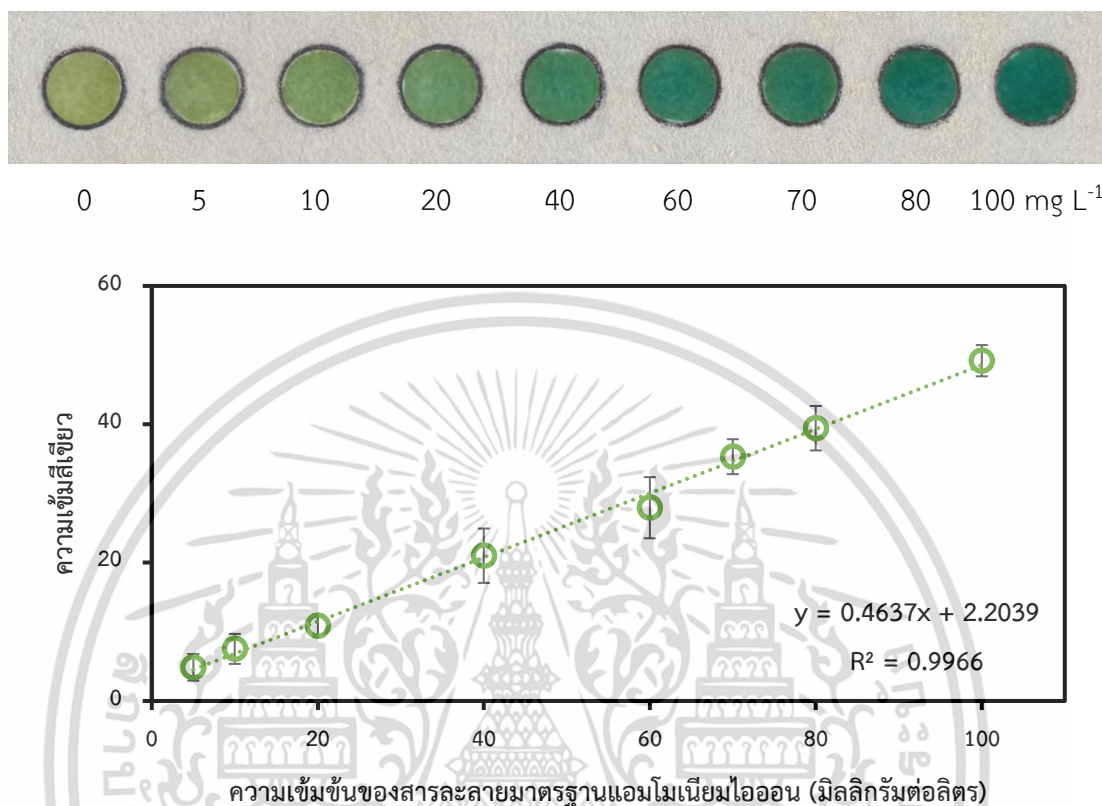
4.6.6.1 การศึกษาช่วงใช้งาน (Working range) และช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity range) พบว่า PAD ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนได้ในช่วงความเข้มข้น 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) เท่ากับ 0.9966 ($n=3$) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความเป็นเส้นตรงที่ดี โดยกราฟมาตรฐานและรูปถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD แสดงดังรูปที่ 4.16

4.6.6.2 การศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ (Precision) โดยรายงานจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation: RSD) ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง ($n=10$) ได้ค่า SD เท่ากับ 1.38 และค่า RSD เท่ากับ 0.85 % บ่งบอกว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงสูง

4.6.6.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection: LOD) การหาค่า LOD แบ่งออกเป็นสองกรณี คือ ในกรณีที่สารละลายแบลงค์มีสัญญาณ และกรณีที่สารละลายแบลงค์ไม่มีสัญญาณ สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าสารละลายแบลงค์มีสัญญาณ ดังนั้นจึงหาค่า LOD จากนิยาม $3 \text{ SD of blank/slope}$ โดยทำการวัดสัญญาณ (ค่าความเข้มสี) ของสารละลายแบลงค์ซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง ($n=10$) สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (0, 1, 5, 10, 20, 40, และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้นหาค่า SD ที่ได้จากการวัดสารละลายแบลงค์ และค่า Slope ที่ได้จากกราฟมาตรฐาน เพื่อไปแทนค่าลงในนิยาม และหาค่า LOD ออกมาได้เท่ากับ 1.35 หมายความว่า อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนได้ความเข้มข้นต่ำสุดอยู่ที่ 1.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำ



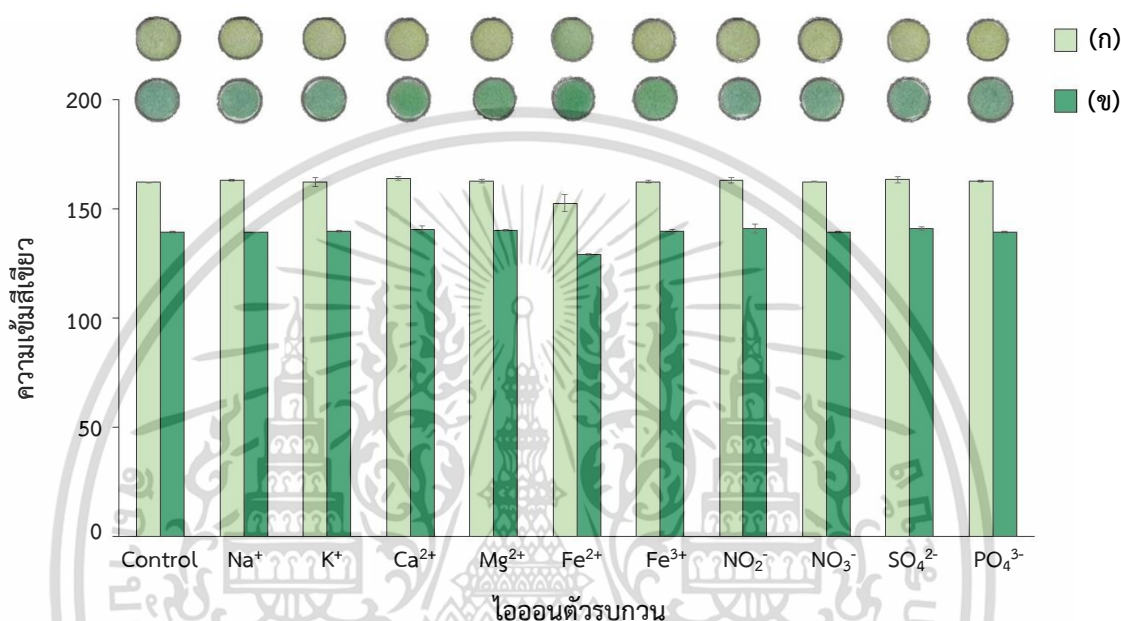
รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD และกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนและความเข้มของสีเขียว

จากรูปที่ 4.16 พบว่า สีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD จะเข้มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนเพิ่มขึ้น อีกทั้ง ช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนที่เลือกใช้ มีความเหมาะสมกับประสิทธิภาพของ PAD ที่พัฒนาขึ้น โดยมีช่วงการตรวจวัดที่ค่อนข้างกว้าง (5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดี

4.6.7 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ที่อาจส่งผลต่อการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในแหล่งน้ำธรรมชาติ

แหล่งน้ำตามธรรมชาติมักมีไอออนอื่น ๆ ปนอยู่มากมายหลายชนิด ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลจากไอออนรบกวนในการวิเคราะห์ เพื่อประเมินความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ของ PAD ที่พัฒนาขึ้นต่อไอออนชนิดต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์หาแอมโมเนียมไอออนด้วยปฏิกิริยาเบอเฮลทแบบดัดแปลง ได้ทำการทดลองโดยเลือกไอออนที่มักจะพบในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียม (Na^+), โพแทสเซียม (K^+), แคลเซียม (Ca^{2+}), แมงกานีส (Mg^{2+}), เหล็ก (Fe^{2+} และ Fe^{3+}), ไนไตรท์ (NO_2^-), ไนเตรต (NO_3^-), ซัลเฟต (SO_4^{2-}), และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) โดยเตรียมสารละลายของไอออนชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะการทดลองมีสองสภาวะ คือ (ก) ศึกษาไอออนตัวรบกวนอย่างเดี่ยว และ (ข) ศึกษาไอออนตัวรบกวนเมื่อมีแอมโมเนียมไอออน (ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร) รวมอยู่ด้วย ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงผลการศึกษาความจำเพาะเจาะจง จากไอออนชนิดต่าง ๆ ที่อาจรบกวนการตรวจวัดแอมโมเนียมไอออนบน PAD อาศัยปฏิกิริยาเบอเธลทแบบดัดแปลงในการตรวจวัด โดยที่ (ก) ศึกษาไอออนตัวรบกวนอย่างเดี่ยว และ (ข) ศึกษาไอออนตัวรบกวนเมื่อมีแอมโมเนียมไอออนรวมอยู่ด้วย

จากรูปที่ 4.17 พบว่า PAD ที่พัฒนาขึ้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อแอมโมเนียม ไอออน ตัวรบกวนชนิดต่าง ๆ ที่เลือกมาศึกษา ไม่รบกวนการวิเคราะห์ สังเกตได้จากสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD (เมื่อมองด้วยตาเปล่า) ที่เป็นสีเขียวเฉดเดียวกันกับสารละลายตัวควบคุม (Control) มีเพียง Fe^{2+} เท่านั้นที่รบกวนการวิเคราะห์ ซึ่งสาเหตุมาจาก สารประกอบตั้งต้นที่เลือกมาใช้ มีแอมโมเนียมเป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วย ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จึงทำให้สีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มกว่าเมื่อเทียบกับไอออนชนิดอื่น ๆ

4.6.8 การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น

ได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยได้มีการเก็บตัวอย่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งหมด 6 แห่งตามจังหวัดต่าง ๆ ภายในประเทศไทย ประกอบด้วย จังหวัดเชียงราย (บ่อน้ำพุร้อนบ้านผาเสด็จ และน้ำตกขุนกรณ์), จังหวัดราชบุรี (แม่น้ำแม่กลอง), จังหวัดนครนายก (บ่อปลา), และจังหวัดกรุงเทพมหานคร (คลองประเวศบุรีรมย์ และน้ำตม) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างบริเวณผิวน้ำ (ดูรูปเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.6) ได้ทำการทดลองโดยการหาค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ (Analytical recovery) ของตัวอย่างน้ำทั้ง 6 ชนิด และมีการเติมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไปในทุก ๆ ตัวอย่าง (Spiked sample) ผลการทดลองที่ได้ รายงานดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ ของการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ ด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Mean \pm SD, n=3)			ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ
	ดั้งเดิม	ที่เติมลงไป	ที่ตรวจพบ	
บ่อน้ำพุร้อน	N.D.	40	40.30 \pm 3.99	100.76
น้ำตก	N.D.	40	40.23 \pm 1.70	100.58
แม่น้ำ	N.D.	40	40.43 \pm 2.10	101.08
บ่อปลา	N.D.	40	40.44 \pm 1.29	101.09
คลอง	N.D.	40	39.92 \pm 0.70	99.79
น้ำตม	N.D.	40	39.43 \pm 2.29	98.57

หมายเหตุ: N.D. = Not detect (ตรวจไม่พบ)

จากตารางที่ 4.5 การหาปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติมีแอมโมเนียมไอออนปะปนอยู่น้อยมาก ซึ่งอาจจะมีอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจวัดของ PAD จึงต้องทำการเติมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ลงไป เพื่อให้สามารถตรวจวัดด้วย PAD ได้ และจากผลการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง ได้ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับอยู่ในช่วง 98.57-101.09 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียง 100 บ่งบอกว่าตัวรบกวน (Matrix) ที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำนั้น ไม่รบกวนการวิเคราะห์ด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้น

4.6.9 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาขึ้น (Validation)

ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ด้วย PAD ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดสีที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างน้ำกับปริมาณที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคมาตรฐาน (IC) เพื่อประเมินความแม่นยำ (Accuracy) ของวิธีที่พัฒนาขึ้น อาศัยวิธีการทางสถิติ คือ Paired *t*-test ในการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบที่ได้รายงานดังตาราง ที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (IC) และวิธีที่พัฒนาขึ้น (PAD)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Mean \pm SD, n=3)	
	เทคนิคมาตรฐาน (IC)	เทคนิคที่พัฒนาขึ้น (PAD)
ป้อน้ำพุร้อน	39.35 \pm 1.08	40.30 \pm 3.99
น้ำตก	40.02 \pm 1.35	40.23 \pm 1.70
แม่น้ำ	38.83 \pm 1.00	40.43 \pm 2.10
บ่อปลา	40.06 \pm 0.89	40.44 \pm 1.29
คลอง	39.91 \pm 0.68	39.92 \pm 0.70
น้ำดื่ม	39.63 \pm 0.75	39.43 \pm 2.29

จากตารางที่ 4.6 ได้นำค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนจากสองเทคนิคที่ตรวจวัดได้ มาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ Paired *t*-test ได้ค่า $t_{stat} = -1.80$ และค่า $t_{critical} = 2.57$ จะเห็นได้ว่าค่า $t_{stat} < t_{critical}$ นั่นคือ ผลวิเคราะห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P=0.05$) แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการตรวจวัดสีด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความถูกต้องเชื่อถือได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้เปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อเป็นวัสดุชนิดใหม่ สำหรับสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้เป็นผลสำเร็จ โดยได้นำผงเปลือกไข่ไปปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก จากนั้นนำผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (0.4000 กรัม) มาแขวนลอยในตัวประสาน (ประกอบด้วยเม็ด PS 0.2000 กรัม และ THF 2.50 มิลลิลิตร) เพื่อเตรียมสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ อาศัยเทคนิคการวาด (Painting) ด้วยพู่กันเบอร์ 1 และได้ทดสอบประสิทธิภาพของ PAD ในด้านต่าง ๆ พบว่า ชั้นเคลือบเปลือกไข่บนกระดาษมีคุณสมบัติการกันน้ำ, การกักเก็บน้ำ, และป้องกันการรั่วซึมของสารละลายได้อย่างดี โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ 131.93 ± 1.04 องศา และเมื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผงอนุภาคเปลือกไข่จะเกาะติดเส้นใยเซลลูโลส และปิดช่องว่างที่เป็นรูพรุนของกระดาษ ส่งผลให้บริเวณพื้นผิวที่ทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น อีกทั้ง PAD ที่พัฒนาขึ้นสามารถทนต่อสารเคมีที่เป็นกรด, เบส, แอลกอฮอล์, สารลดแรงตึงผิว, และสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการได้ และสามารถทนต่อแรงทางกายภาพจากการบีบขยำได้ดีเช่นกัน

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของ PAD ในด้านต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ต่อมา ได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออน อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเบอแรลทแบบดัดแปลง ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดสีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดย PAD ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนได้ในช่วงความเข้มข้น 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (5, 10, 20, 40, 60, 70, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งสีเขียวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนกระดาษจะเข้มข้นตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนที่เพิ่มขึ้น กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนและความเข้มสีเขียวแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9966 ($n=3$) อีกทั้ง ยังมีความเที่ยงและความแม่นยำสูงอีกด้วย ($SD = 1.38$, $RSD = 0.85 \%$, $n=10$) และขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) อยู่ที่ 1.35 มิลลิกรัมต่อลิตร

การตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ พบว่า ได้ค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับอยู่ในช่วง 98.57-101.09 ซึ่งบ่งบอกว่าตัวรบกวนต่าง ๆ (Matrix) ที่มีอยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแบบฉบับหรือชนิดใด ๆ ก็ตาม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างแหล่งน้ำไม่รบกวนการวิเคราะห์ และสุดท้าย ได้นำ PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้ ไปเทียบมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (IC) ผลการทดสอบทางสถิติแสดงให้เห็นว่า ผลวิเคราะห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($t_{\text{stat}} = -1.80$, $t_{\text{critical}} = 2.57$, $n=6$) ซึ่งยืนยันได้ว่า เทคนิคการตรวจวัดสีด้วย PAD ที่พัฒนาขึ้นนี้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษด้วยเทคนิคการวาด (Painting) ในงานวิจัยนี้ มีความง่าย สะดวก ขั้นตอนการทำไม่ซับซ้อน และค่อนข้างรวดเร็ว แต่หากปรับเปลี่ยนไปใช้เทคนิคอื่นได้ อาทิเช่น เทคนิคการฉีดพ่น (Spraying) หรือเทคนิคการพิมพ์สกรีน (Screen-printing) น่าจะช่วยให้การผลิต PAD แบบจำนวนมากได้

การนำ PAD ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนนอกสถานที่ ณ แหล่งน้ำต่าง ๆ ยังไม่สะดวกเท่าที่ควร เนื่องจากมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ต้องใช้เครื่องกรองสุญญากาศในการกรองตัวอย่างน้ำ เพื่อกำจัดสีและตะกอนต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งอาจรบกวนการตรวจวัดสีบน PAD ได้ แนวทางในการแก้ปัญหาคือ ลองปรับเปลี่ยนรูปแบบอุปกรณ์ตรวจวัดให้เป็นแบบ Double layer นั่นคือมีกระดาษสองชั้น ชั้นบนมีหน้าที่ในการกรองตัวอย่าง และชั้นล่างมีหน้าที่ในการตรวจวัด เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Synchrotron Thailand Central Lab. 2564. **UV lithography**. [Online]. Available : <https://www.sri.or.th/bl6a/photolithography.html>.
- [2] W. Dungchai, O. Chailapakul and C. S. Henry. 2011. “A low-cost, simple, and rapid fabrication method for paper-based microfluidics using wax screen-printing.” *Analyst*. 136 : 77-82.
- [3] A. Lert-itthiporn, P. Srikritsawong and N. Choengchan. 2021. “Foldable paper-based analytical device for membraneless gas-separation and determination of iodate based on fluorescence quenching of gold nanocluster.” *Talanta*. 221 : 121574.
- [4] D. A. Bruzewicz, M. Reches and G. M. Whitesides. 2008. “Low-cost printing of poly (dimethylsiloxane) barriers to define microchannels in paper.” *Analytical chemistry*. 80 : 3387-3392.
- [5] A. Mathaweesansurn, S. Thongrod, P. Khongkaew, C. M. Phechkrajang, P. Wilairat and N. Choengchan. 2020. “Simple and fast fabrication of microfluidic paper-based analytical device by contact stamping for multiple standard addition assay: Application to direct analysis of urinary creatinine.” *Talanta*. 210 : 120675.
- [6] J. Sitanurak, N. Fukana, T. Wongpakdee, Y. Thepchuay, N. Ratanawimarnwong, T. Amornsakchai and D. Nacapricha. 2019. “T-shirt ink for one-step screen-printing of hydrophobic barriers for 2D- and 3D-microfluidic paper-based analytical devices.” *Talanta*. 205 : 120113.
- [7] T. Satarpai and A. Siripinyanond. 2018. “Alternative patterning methods for paper-based analytical devices using nail polish as a hydrophobic reagent.” *Analytical sciences*. 34 : 605-611.
- [8] P. Seeharaj, K. Sripako, P. Promta, E. Detsri and N. Vittayakorn. 2019. “Facile and eco-friendly fabrication of hierarchical superhydrophobic coating from eggshell biowaste.” *International journal of applied ceramic technology*. 16 : 1895-1903.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] รุ่ง คำปู้. 2562. “การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาศสำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเขม่าดินปืน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] ธาวิต สุวรรณไตร. 2558. “อุปกรณ์แบบกระดาศอย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างชา โดยอาศัยการวัดระยะทาง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [11] กัญญาภัค ศรีปะโค และพงศกร พรหมทา. 2559. “การเตรียมชั้นเคลือบที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจากเปลือกไข่ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] Ruethairat. 2564. การทำความสะอาดตัวเองด้วยวิธีการไม่ชอบน้ำ. [Online]. Available : <http://ruethairat007.blogspot.com/>.
- [13] วิชัย ดำรงโกคภักดิ์. 2564. เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์. [Online]. Available : [http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/attachments/article/137/CF75\(C11\).pdf](http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/attachments/article/137/CF75(C11).pdf).
- [14] Food Network Solution. 2564. Egg ไข่. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1146/egg-ไข่>.
- [15] TNN Online. 2564. ตลาดไข่ไก่ไทยปี 64 ยังโต ผลิตวันละ 42.98 ล้านฟองต่อวัน. [Online]. Available : <https://www.facebook.com/TNN16LIVE/videos/ตลาดไข่ไก่ไทย-ปี-64-ยังโต-ผลิตไข่-เฉลี่ยวันละ-4298-ล้านฟองต่อวัน-เกษตรนิวเจน/399816161589533/>.
- [16] นิคม ละอองศิริวงศ์, คมน์ ศิลปาจารย์ และลักขณา ละอองศิริวงศ์. 2566. แอมโมเนียกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. [Online]. Available : https://www4.fisheries.go.th/local/pic_activities/202104010848551_pic.pdf.
- [17] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2537. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. ฉบับที่ 8. กรุงเทพมหานคร : ไม่ได้ระบุสำนักพิมพ์.
- [18] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2560. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. กรุงเทพมหานคร : ไม่ได้ระบุสำนักพิมพ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2548. **กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด.** กรุงเทพมหานคร : ไม้ได้ระบุสำนักพิมพ์.
- [20] A. Daridon, M. Sequeira, G. Pennarun-Thomas, H. Dirac, J.P. Krog, P. Gravesen, J. Lichtenberg, D. Diamond, E. Verpoorte and N.F. de Rooij. 2001. "Chemical sensing using an integrated microfluidic system based on Berthelot reaction." *Sensors and Actuators B.* 76 : 235-243.
- [21] T. Thongkam, R. Rungsirisakun and K. Hemavibool. 2020. "A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil." *Analytical Methods.* 12 : 4649-4656.
- [22] P. Sawetwong, S. Chairam, P. Jarujamrus and M. Amatongchai. 2021. "Enhanced selectivity and sensitivity for colorimetric determination of glyphosate using Mn-ZnS quantum dot embedded molecularly imprinted polymers combined with a 3D-microfluidic paper-based analytical device." *Talanta.* 225 : 1-10.
- [23] A. Motalebizadeh and S. Asiaei. 2020. "Micro-fabrication by wax spraying for rapid smartphone-based quantification of bio-markers." *Analytical Biochemistry.* 603 : 11377.
- [24] A.C.N. Pinheiro, V.S. Ferreira and B.G. Lucca. 2022. "Stamping method based on 3D printing and disposable napkin: Cheap production of paper analytical devices for alcohol determination in beverages aiming forensics and food control." *Microchemical Journal.* 180 : 107604.
- [25] L.F. Castro, H.A. Silva-Neto, L.R. Sousa, W.R. de Araujo and W.K.T. Coltro. 2023. "Silicone glue-based graphite ink incorporated on paper platform as an affordable approach to construct stable electrochemical sensors." *Talanta.* 251 : 123812.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] P. Jarujamrus, R. Meelapsom, P. Naksen, N. Ditcharoen, W. Anutrasakda, A. Siripinyanond, M. Amatatongchai and S. Supasorn. 2019. "Screen-printed microfluidic paper-based analytical device (μ PAD) as a barcode sensor for magnesium detection using rubber latex waste as a novel hydrophobic reagent." *Analytica Chimica Acta*. 1082 : 66-77.
- [27] B.M. Jayawardane, I.D. McKelvie and S.D. Kolev. 2015. "Development of a gas-diffusion microfluidic paper-based analytical device (μ PAD) for the determination of ammonia in wastewater samples." *Analytical Chemistry*. 87 (9) : 4621-4626.
- [28] P. Phansi, S. Sumantakul, T. Wongpakdee, N. Fukana, N. Ratanawimarnwong, J. Sitanurak and D. Nacapricha. 2016. "Membraneless gas-separation microfluidic paper-based analytical devices for direct quantitation of volatile and nonvolatile compounds." *Analytical Chemistry*. 88 (17) : 8749-8756.
- [29] J.J. Peters, M.I.G.S. Almeida, L.O. Šraj, I.D. McKelvie and S.D. Kolev. 2019. "Development of a micro-distillation microfluidic paper-based analytical device as a screening tool for total ammonia monitoring in freshwaters." *Analytica Chimica Acta*. 1079 : 120-128.
- [30] G. Musile, Y. Agard, E.F.D. Palo, K. Shestakova, F. Bortolotti and F. Tagliaro. 2019. "Thanatochemistry at the crime scene: a microfluidic paper-based device for ammonium analysis in the vitreous humor." *Analytica Chimica Acta*. 1083 : 150-156.
- [31] M.A. Vargas-Muñoz, J. Morales, V. Cerdà, L. Ferrer and E. Palacio. 2023. "Paper sensor-based method using a portable 3D-printed platform and smartphone-assisted colorimetric detection for ammonia and sulfide monitoring in anaerobic digesters and wastewater." *Microchemical Journal*. 188 : 108469.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] Scientific Instruments Centre KMITL. 2564. **Ion Chromatograph**. [Online]. Available : <https://sciins.science.kmitl.ac.th/instrumentDetail/55—ic-ion-chromatograph>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก






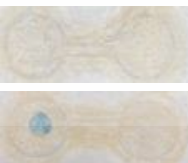
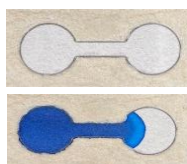
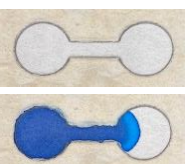
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษกรอง ด้วย การทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ ร่วมกับเทคนิคการวาด

สูตรของสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ที่ใช้ในการศึกษา มีส่วนประกอบดังนี้ ผงเปลือกไข่ที่ ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว 0.4000 กรัม, เม็ดพอลิสไตรีน (PS) 0.2000 กรัม, และเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) 2.50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างลวดลายส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ กรอง ด้วยการทาสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไข่ ร่วมกับเทคนิคการวาด

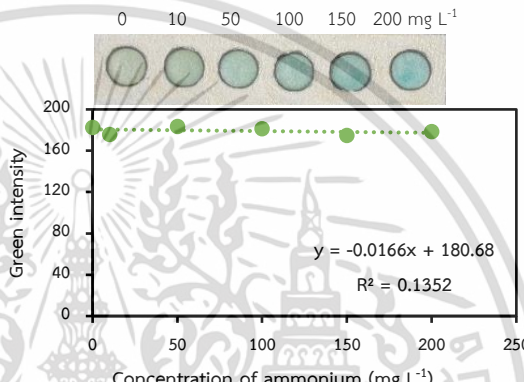
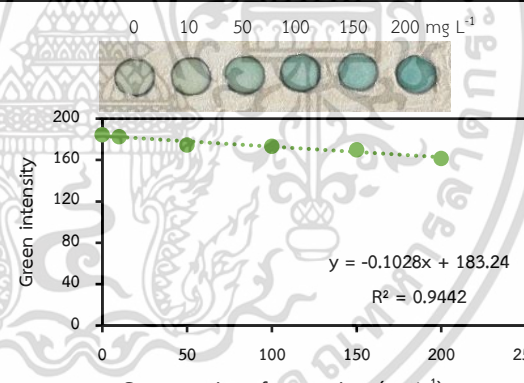
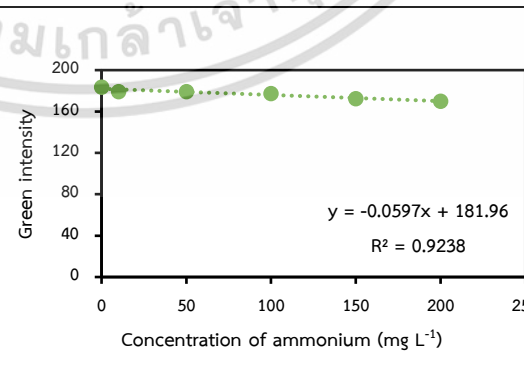
สภาวะการทดลอง	ด้านหน้ากระดาษกรอง	ด้านหลังกระดาษกรอง
1 ก่อนหยดน้ำสี หลังหยดน้ำสี	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ลวดลายดัมเบล 	กระดาษกรองเปล่า 
2 ก่อนหยดน้ำสี หลังหยดน้ำสี	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ลวดลายดัมเบล 	แปะสติ๊กเกอร์ PVC บนกระดาษกรองทั้งแผ่น 
3 ก่อนหยดน้ำสี หลังหยดน้ำสี	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ลวดลายดัมเบล 	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ทั่วทั้งกระดาษกรอง 
4 ก่อนหยดน้ำสี หลังหยดน้ำสี	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ลวดลายดัมเบล 	ทาสารละลายชั้นเคลือบ เปลือกไข่ลวดลายดัมเบล 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการหดยาสารเคมี

ก.2.1 หดยาสารเคมีปริมาณ 2 ไมโครลิตร

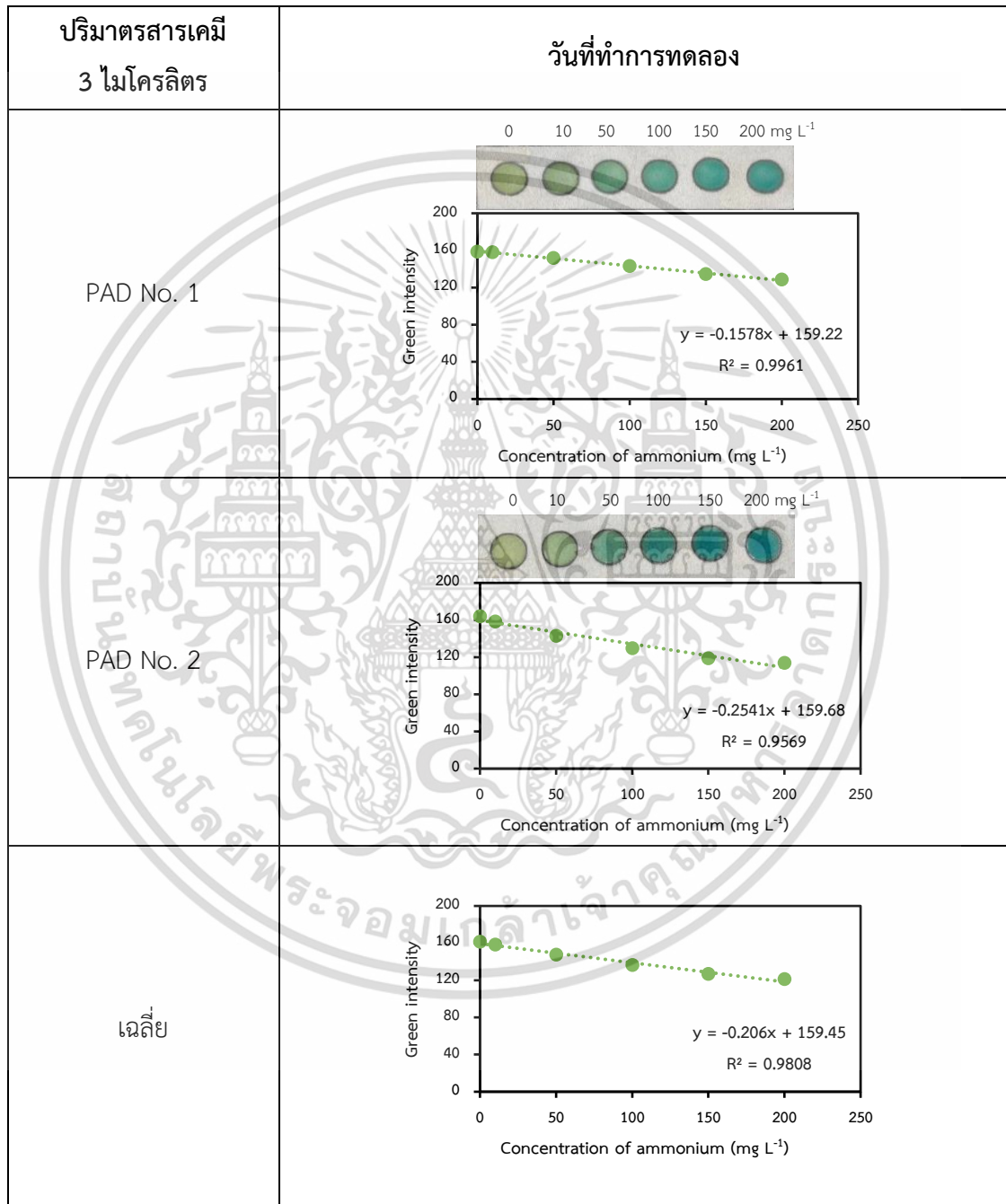
ตารางที่ ก.2 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และความเข้มของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากการทำปฏิกิริยากัน 5 นาที โดยทำการหดยาสารเคมีที่ปริมาณ 2 ไมโครลิตร

ปริมาณสารเคมี 2 ไมโครลิตร	วันที่ทำการทดลอง
PAD No. 1	 <p>0 10 50 100 150 200 mg L⁻¹</p> <p>Green intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.0166x + 180.68$ $R^2 = 0.1352$</p>
PAD No. 2	 <p>0 10 50 100 150 200 mg L⁻¹</p> <p>Green intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.1028x + 183.24$ $R^2 = 0.9442$</p>
เฉลี่ย	 <p>Green intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.0597x + 181.96$ $R^2 = 0.9238$</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.2 หยตสารเคมีปริมาตร 3 ไมโครลิตร

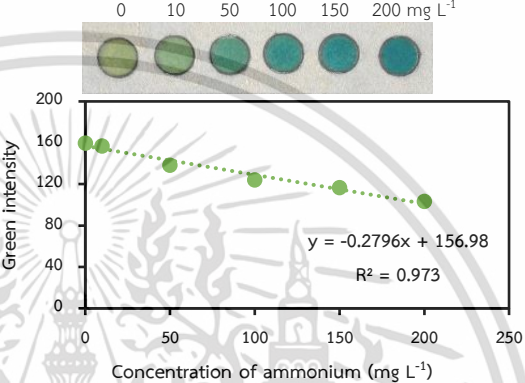
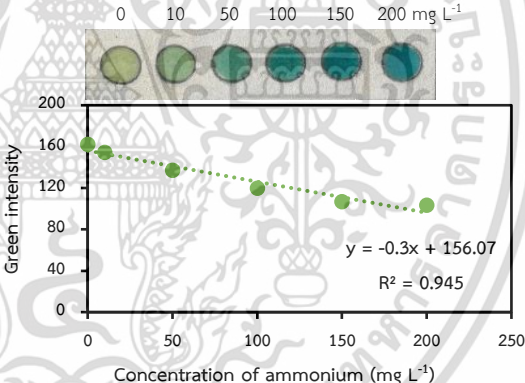
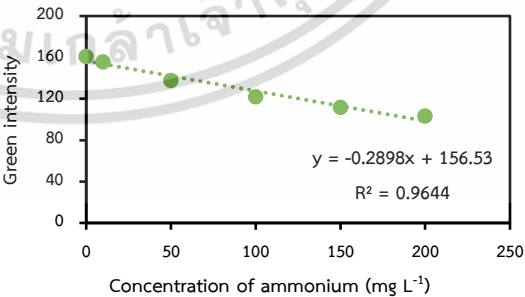
ตารางที่ ก.3 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และความเข้มของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากัน 5 นาที โดยทำการหยตสารเคมีที่ปริมาตร 3 ไมโครลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.3 หยตสารเคมีปริมาตร 4 ไมโครลิตร

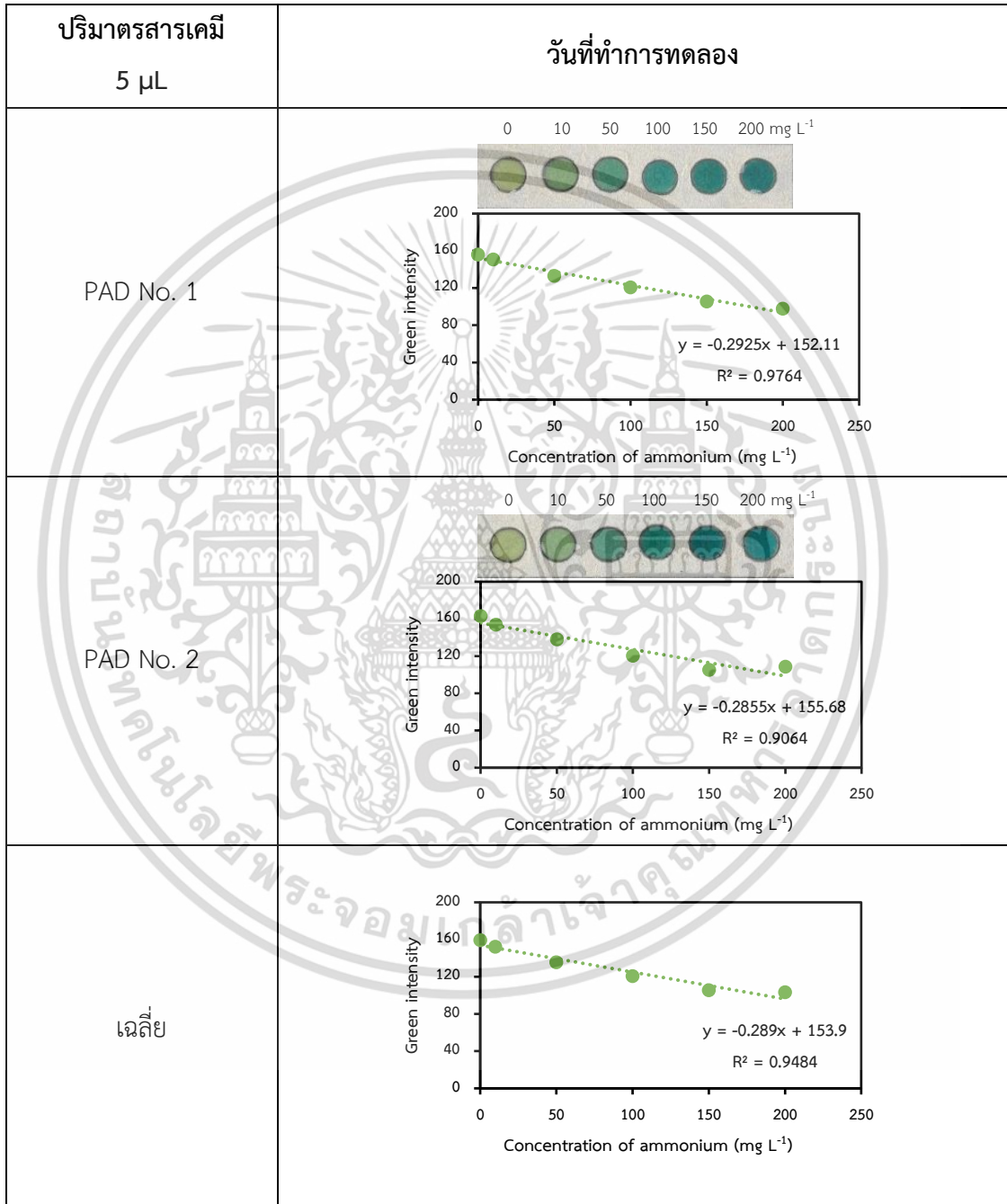
ตารางที่ ก.4 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และความเข้มของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากัน 5 นาที โดยทำการหยตสารเคมีที่ปริมาตร 4 ไมโครลิตร

ปริมาตรสารเคมี 4 ไมโครลิตร	วันที่ทำการทดลอง
PAD No. 1	 <p>0 10 50 100 150 200 mg L⁻¹</p> <p>Green Intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.2796x + 156.98$ $R^2 = 0.973$</p>
PAD No. 2	 <p>0 10 50 100 150 200 mg L⁻¹</p> <p>Green intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.3x + 156.07$ $R^2 = 0.945$</p>
เฉลี่ย	 <p>Green intensity</p> <p>Concentration of ammonium (mg L⁻¹)</p> <p>$y = -0.2898x + 156.53$ $R^2 = 0.9644$</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.4 หยอดสารเคมีปริมาตร 5 ไมโครลิตร

ตารางที่ ก.5 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และความเข้มของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากัน 5 นาที โดยทำการหยดสารเคมีที่ปริมาตร 5 ไมโครลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

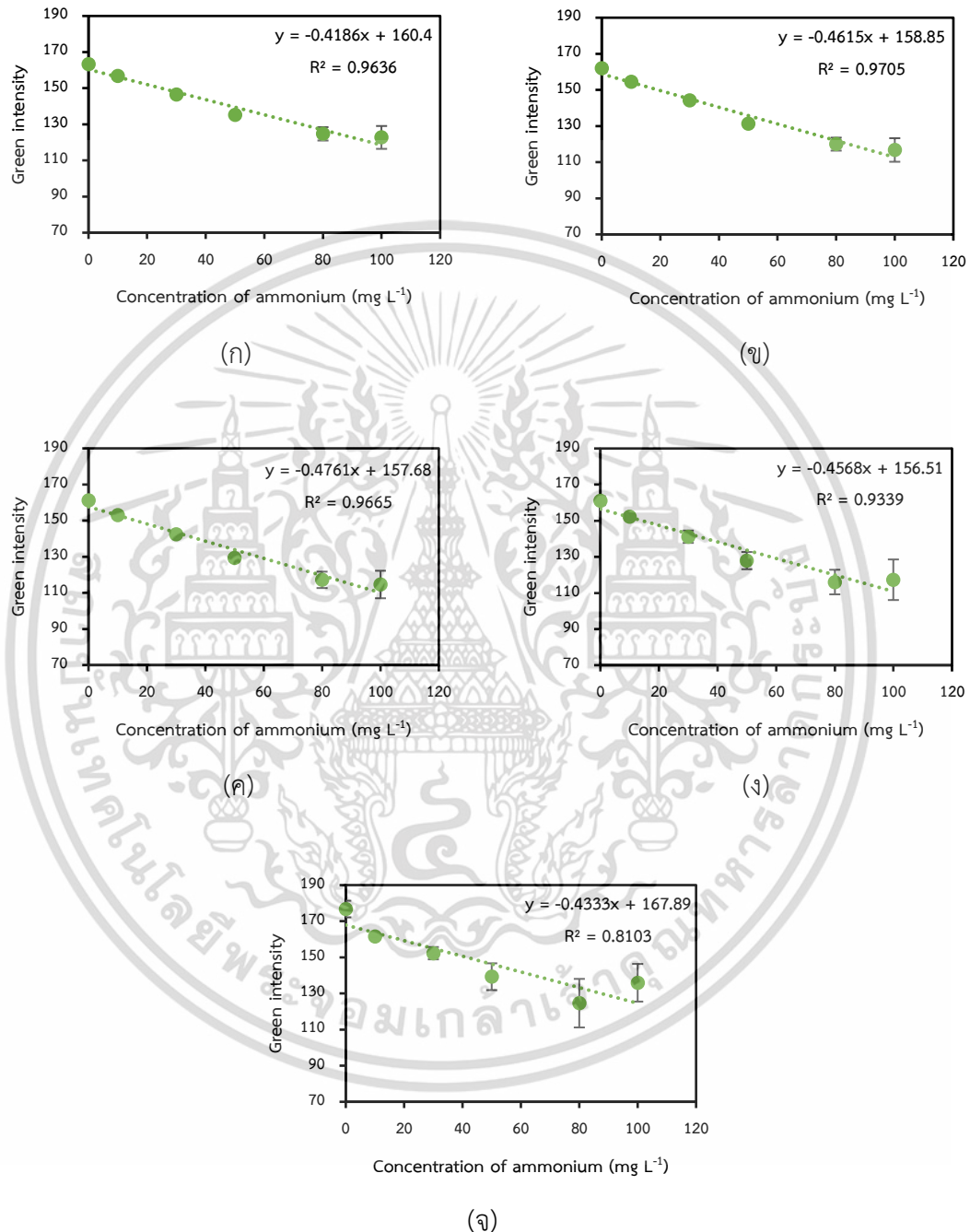
ก.3.1 ภาพถ่ายกระดาษกรอง

ตารางที่ ก.6 แสดงภาพถ่ายกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 1, 3, 5, 10 และ 15 นาที

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	PAD No. 1	PAD No. 2	PAD No. 3
1 นาที			
3 นาที			
5 นาที			
10 นาที			
15 นาที			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3.2 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และ ความเข้มสีเขียวของสีเขียว (Green intensity) เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน



รูปที่ ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม และ ความเข้มสีเขียว (n=3) ของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากัน เป็นเวลา (ก) 1 นาที, (ข) 3 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 10 นาที, และ (จ) 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 ค่าความเข้มสีที่วัดได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™

ก.4.1 กราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าความเข้มสีเชิงทวิเคราะห์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ ของกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเข้มสีเชิงทวิ (n=3)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) (%)
0	154.254	0.36	0.23
10	146.727	2.17	1.48
20	143.368	1.60	1.12
40	133.257	3.93	2.95
60	126.318	4.42	3.50
80	114.822	3.22	2.80
100	105.066	2.26	2.15

ก.4.2 การศึกษาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation: RSD)

ตารางที่ ก.8 แสดงค่าความเข้มสีเชิงทวิวิเคราะห์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ จากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง (n=10)

จำนวนครั้ง (n)	ค่าความเข้มสีเชิงทวิ
1	161.087
2	162.497
3	162.301
4	164.958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

จำนวนครั้ง (n)	ค่าความเข้มสีเขียว
5	160.900
6	162.468
7	162.412
8	161.793
9	164.343
10	164.198

ค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำทั้ง 10 ครั้ง = 162.696

SD = 1.38

RSD = (SD/ค่าเฉลี่ย) x 100 = 0.85

ก.4.3 การหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection: LOD) เมื่อ
แบบลงคมีสัญญาณ จากสูตร $LOD = 3SD \text{ of blank/Slope}$

ตารางที่ ก.9 แสดงค่าความเข้มสีเขียวที่วิเคราะห์ได้จากซอฟต์แวร์ ImageJ™ จากสารละลายแบบลงค
ซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง (n=10)

จำนวนครั้ง (n)	ค่าความเข้มสีเขียว
1	158.420
2	158.955
3	158.890
4	158.521
5	158.736
6	158.668
7	158.616

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 (ต่อ)

จำนวนครั้ง (n)	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย
8	158.302
9	158.550
10	158.668

ค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำทั้ง 10 ครั้ง = 158.663

SD = 0.199

LOD = 3 SD of blank/Slope

= $(3 \times 0.199)/0.4419 = 1.35$

ก.5 การศึกษาความจำเพาะเจาะจง

ก.5.1 ไอออนที่เลือกมาศึกษามีดังนี้

4.1.1) Na ⁺	จาก NaCl	(M.W. 58.44 g/mol)
4.1.2) K ⁺	จาก KCl	(M.W. 74.55 g/mol)
4.1.3) Ca ²⁺	จาก CaCO ₃	(M.W. 100.09 g/mol)
4.1.4) Mg ²⁺	จาก MgSO ₄ ·7H ₂ O	(M.W. 246.47 g/mol)
4.1.5) Fe ²⁺	จาก Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	(M.W. 392.14 g/mol)
4.1.6) Fe ³⁺	จาก FeCl ₃ ·6H ₂ O	(M.W. 270.30 g/mol)
4.1.7) NO ₂ ⁻	จาก NaNO ₂	(M.W. 69.00 g/mol)
4.1.8) NO ₃ ⁻	จาก KNO ₃	(M.W. 101.10 g/mol)
4.1.9) SO ₄ ²⁻	จาก K ₂ SO ₄	(M.W. 174.27 g/mol)
4.1.10) PO ₄ ³⁻	จาก KH ₂ PO ₄	(M.W. 136.09 g/mol)

ก.5.2 ความเข้มข้นของแต่ละไอออนคือ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ DI 25 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

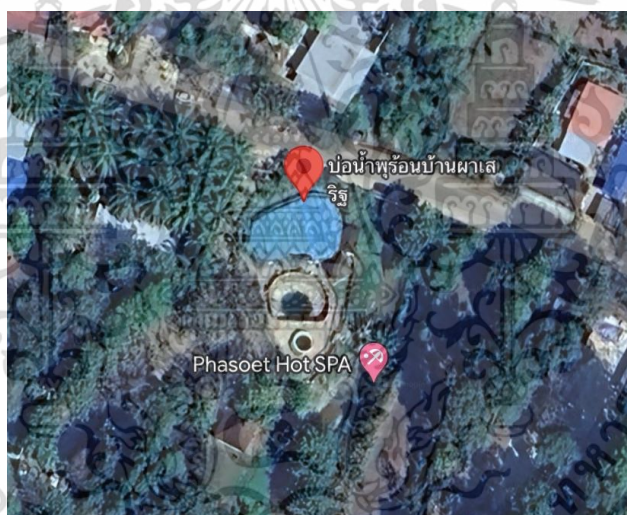
ก.5.3 สภาวะการทดลองมีสองสภาวะ ดังนี้

สภาวะ (ก) : ศึกษาไอออนรบกวน (Interference) เพียงอย่างเดียว
: ลำดับการทดสอบสารเคมีลงบน PAD คือ
Reagent A > Interference > Reagent B

สภาวะ (ข) : ศึกษา Interference เมื่อมีแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) (ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร) รวมอยู่ด้วย
: ลำดับการทดสอบสารเคมีลงบน PAD คือ
Reagent A > NH_4^+ > Interference > Reagent B

ก.6 สถานที่เก็บตัวอย่างน้ำ

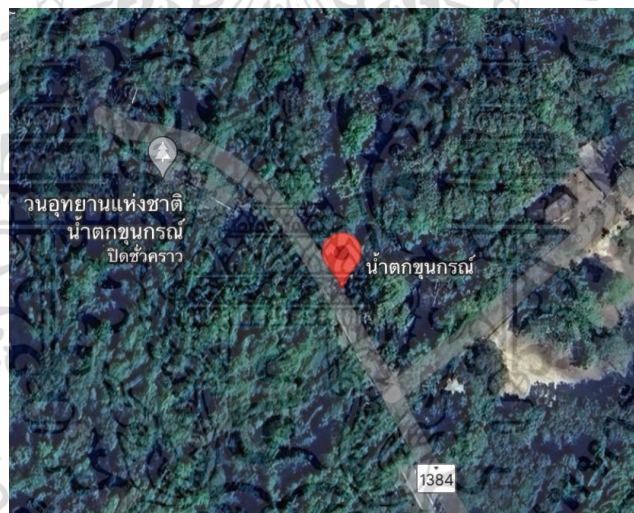
ก.6.1 บ่อน้ำพุร้อนบ้านผาเสด็จ ตำบลดอยฮาง อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.6.2 น้ำตกขุนกรณ์ ตำบลห้วยชมภู อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.6.3 ป่อเลี้ยงปลา ตำบลหนองแสง อำเภอปากพลี จังหวัดนครนายก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.6.4 คลองประเวศบุรีรมย์ แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร



ก.7 การหาค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ (Analytical recovery)

สูตรการคิดค่า Recovery (%) คือ

$$\text{Recovery} = \frac{[\text{Spiked sample}]^1 - [\text{Sample}]^2}{[\text{Standard}]^3} \times 100$$

หมายเหตุ: 1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง ที่เติมสารละลายมาตรฐานลงไป
2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างเท่านั้น
3 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเท่านั้น

ก.8 การเทียบมาตรฐานด้วยเทคนิค IC

ก.8.1 สภาวะเครื่อง IC

- คอลัมน์ Metrosep C4 ขนาด 4.0 x 150 มิลลิเมตร
- ขนาดอนุภาค 7.0 ไมโครเมตร
- อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ความดัน 7.5 เมกะปาสคาล
- สารชะ (Eluent) ประกอบด้วย กรดไนตริก (Nitric acid) ความเข้มข้น 1.7 มิลลิโมลต่อลิตร และกรดดีพิกอลินิก (Dipicolinic acid) ความเข้มข้น 0.7 มิลลิโมลต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการไหล (Flow rate) 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปริมาณการฉีด (Injection volume) 10 ไมโครลิตร
- เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Chromatographic time) 7 นาที

ก.8.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

t-Test: Paired Two Sample for Means

	Variable 1	Variable 2
Mean	39.63	40.13
Variance	0.23	0.15
Observations	6	6
Pearson Correlation	-0.19	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	-1.80	
P(T<=t) one-tail	0.07	
t Critical one-tail	2.02	
P(T<=t) two-tail	0.13	
t Critical two-tail	2.57	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

จากการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (PAD) ที่สร้างส่วนไม่ชอบน้ำด้วยสารละลายชั้นเคลือบเปลือกไซไม่ชอบน้ำได้เป็นผลสำเร็จ พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดซัลเฟต โดยออกแบบลดลายการตรวจวัดเป็นรูปดัมเบล และใช้สารละลายไซขาวในการตรึงรีเอเจนต์ที่เป็นของแข็งบริเวณแขนของดัมเบลที่มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ด้วยอุปกรณ์แม่พิมพ์ที่มีอยู่นั้นไม่สะดวกในการสร้างลดลายดังกล่าว จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษแบบสองชั้น (Double layer PAD) โดยนำกากก้นน้ำมาสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบนกระดาษ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดซัลเฟต อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) ที่เป็นของแข็ง กับสารละลายซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ทำให้เกิดตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) และแอสซีคลอไรด์ไอออน ($HClO_4$) ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีสีม่วง แล้วทำการตรวจวัดความเข้มสีที่เกิดขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ อีกทั้ง ได้มีการนำไซขาวมาใช้ในการตรึงผงแบเรียมคลอไรด์ ให้เกาะติดอยู่บนกระดาษ ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ดีมาก กล่าวคือ ไซขาวเปรียบเสมือนกาวธรรมชาติ และไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยาของแบเรียมคลอไรด์กับซัลเฟต โดยได้ทำการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ข.1 วิธีการทดลอง

ข.1.1 การเตรียมสารละลายกาว โดยใช้เอทานอลที่ความเข้มข้น 50 % (v/v) เป็นตัวทำละลาย

ข.1.1.1 ชั่งกาว 5.0000 กรัม ในขวดสีชา

ข.1.1.2 บีบอัดสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 50 % (v/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดสีชา จากนั้น ใช้แท่งแก้วคนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข.1.2 การเตรียม PAD

ข.1.2.1 การสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบน PAD ด้วยสารละลายกาว

1) ใช้โปรแกรม Microsoft word ในการออกแบบ PAD โดยกำหนดให้ขอบสี่เหลี่ยมด้านนอกมีขนาด 25 x 25 ตารางมิลลิเมตร และวงกลมตรงกลางด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร แล้วพิมพ์ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาด A4 ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทาสารละลายขาวที่เตรียมในข้อ ข.1.1. ลงบนกระดาษกรองที่พิมพ์ออกมา รอบ ๆ วงกลม โดยใช้ฟู่กันเบอร์ 0 หรือ 1

3) รอให้ขาวแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทับให้เรียบสนิท จะได้ PAD ที่พร้อมใช้งาน (ในงานนี้กำหนดให้เป็น Detection PAD: DP) ดังรูปที่ ข.1 (ก)

ข.1.2.2 การตรึงผงแบเรียมคลอไรด์ด้วยไขขาวลงบน PAD

1) เตรียมสารละลายไขขาว โดยนำไขขาว 3 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารละลายเบา ๆ จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) หยดสารละลายไขขาวลงบน PAD ปริมาตร 40 ไมโครลิตร

3) ใช้ไม้แคะหูตักผงแบเรียมคลอไรด์ใส่ลงไปที่สารละลายไขขาว จำนวน 2 ซ้อน (น้ำหนักประมาณ 0.0120 กรัม)

4) รอให้แห้งเป็นเวลา 5 นาที จะได้ Reagent PAD (RP) ที่พร้อมใช้งาน ดังรูปที่ ข.1 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ ข.1 แสดงภาพถ่าย (ก) Detection PAD (DP) ที่ทาสารละลายขาวเพื่อสร้างส่วนไม่ชอบน้ำบริเวณสี่ดำรอบพื้นที่วงกลม และ (ข) Reagent PAD (RP) ที่ตรึงผงแบเรียมคลอไรด์ด้วยสารละลายไขขาว ภายในพื้นที่วงกลมที่ทำปฏิกิริยา

ข.1.2.3 การประกบ PAD แบบ 2 ชั้น (Double layer)

นำ PAD ที่เตรียมได้จากข้อ ข.1.2.1 และ ข.1.2.2 มาประกบกัน โดยใช้เทปกาวสองหน้าแบบโฟม (ความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร) เป็นตัวยึดติดระหว่าง PAD สองแผ่น ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 จำลองภาพตัดขวางของ Double layer PAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1.3 การเตรียมสารละลาย KHP buffer pH 3

ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 1.0211 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรด้วยขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้น นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่า pH และปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จนได้สารละลาย KHP buffer pH 3

ข.1.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 3, และ 5 กรัมต่อลิตร

ข.1.4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลเฟตความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยชั่งโพแทสเซียมซัลเฟต 1.2500 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับปริมาตรด้วยขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร

ข.1.4.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.1, 0.5, 1, 2, และ 3 กรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลาย Stock มาจำนวน 0.5, 2.5, 5, 10 และ 15 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานซัลเฟตตามความเข้มข้นดังกล่าว

ข.1.5 การเตรียมสารละลายผสม (KHP buffer และสารละลายมาตรฐานซัลเฟต) เพื่อตรวจวัดบน Double layer PAD

ข.1.5.1 ผสมสารละลาย KHP buffer ที่เตรียมในข้อ 3. และสารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่เตรียมในข้อ 4. จำนวน 0.5 และ 4 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดพลาสติก จากนั้นเขย่าผสมให้เข้ากัน

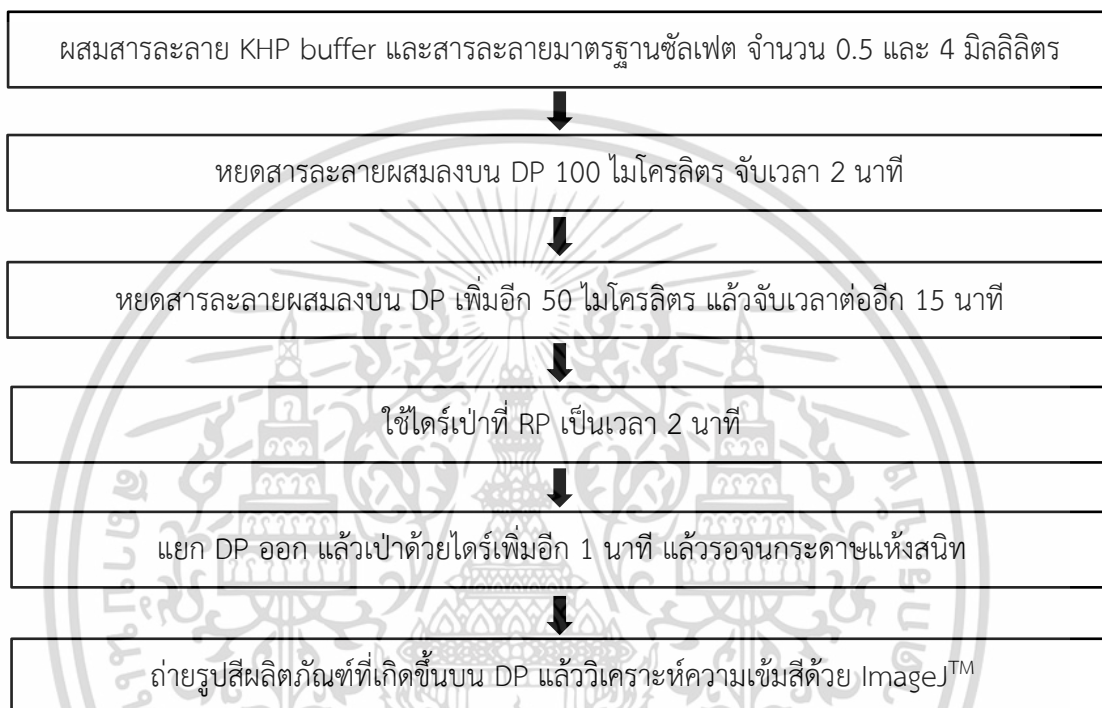
ข.1.5.2 ปิเปตสารละลายผสมมา 100 ไมโครลิตร แล้วหยดลงบน DP จับเวลา 2 นาที

ข.1.5.3 ปิเปตสารละลายผสมมาเพิ่มอีก 50 ไมโครลิตร หยดลงบน DP และจับเวลาต่ออีก 15 นาที

ข.1.5.4 เมื่อครบ 15 นาที นำไดร์เป่าผมมาเป่าที่ RP เป็นเวลา 2 นาที ด้วยความแรงระดับสอง

ข.1.5.5 แยก DP ออก แล้วเป่าด้วยไดร์เป่าผมความแรงระดับสองต่อ เป็นเวลา 1 นาที แล้วรอนกระดาษแห้งสนิท

ข.1.5.6 ถ่ายรูปสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน DP แล้วนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเข้มสี RGB ด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ ต่อไป แผนภาพกระบวนการตรวจวัดสีเฟดด้วย Double layer PAD แสดงดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 แสดงแผนภาพกระบวนการตรวจวัดสีเฟดด้วย Double layer PAD

ข.2 ผลการทดลอง

ข.2.1 ทดสอบปฏิกิริยาของแบเรียมคลอไรด์กับซัลเฟตในสารละลาย

สถานการณ์ทดลองเป็นดังนี้

(1) น้ำหนักผงแบเรียมคลอไรด์ = 0.0080 กรัม

(2) อัตราส่วนของสารละลายผสมระหว่าง KHP buffer กับสารละลายมาตรฐาน

ซัลเฟตความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร คือ 0.5:4 มิลลิลิตร

ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ ข.1


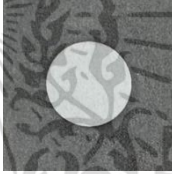
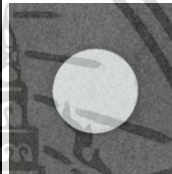
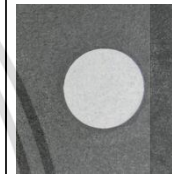


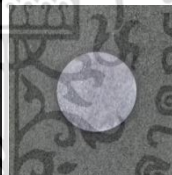
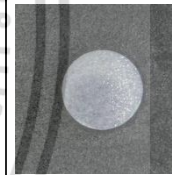

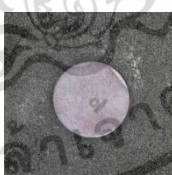
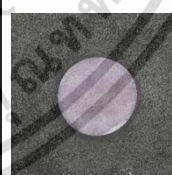
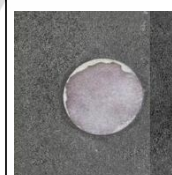

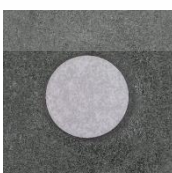
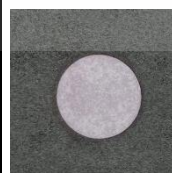
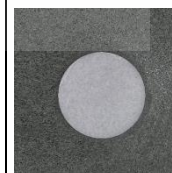
ตารางที่ ข.1 แสดงภาพถ่ายสีของสารละลายที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของแบเรียมคลอไรด์และสารละลายมาตรฐานซัลเฟตความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร

เวลาที่ทำปฏิกิริยา (นาที)	ภาพถ่ายสีของสารละลายที่เกิดขึ้น
5	
10	
15	

ข.2.2 การศึกษาน้ำหนักผงแบเรียมคลอไรด์ที่ตริงบนกระดาษ



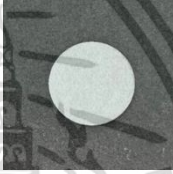
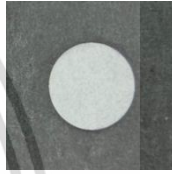

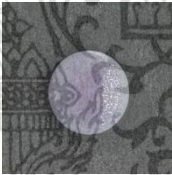
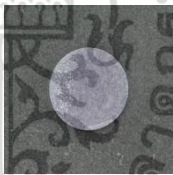

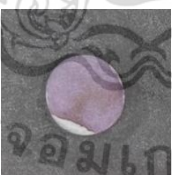

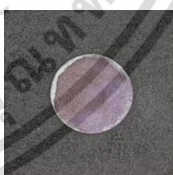





ได้ทำการศึกษาน้ำหนักผงแบเรียมคลอไรด์ที่ตริงบนกระดาษ ซึ่งน้ำหนักโดยประมาณคือ 0.0060, 0.0120, 0.0180 และ 0.0240 กรัม (ตักด้วยไม้เคาะจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ซ้อน ตามลำดับ) และศึกษาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนกระดาษ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2 และ 5 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ ข.2 และ ข.3

ตารางที่ ข.2 แสดงสภาวะการทดลอง และภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน Double layer PAD จากการทำปฏิกิริยาของแบเรียมคลอไรด์ที่น้ำหนักต่าง ๆ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร

สภาวะการทดลอง	ชนิดของ PAD	ภาพถ่าย PAD			
น้ำหนักแบเรียมคลอไรด์ ที่ตรึงบนกระดาษ	RP	0.0060 กรัม (1 ชั้น)	0.0120 กรัม (2 ชั้น)	0.0180 กรัม (3 ชั้น)	0.0240 กรัม (4 ชั้น)
ก่อนหยดสารละลายผสม	DP				
หลังทำปฏิกิริยาครบ 15 นาที (ก่อนเป่าไทร์)	DP				
หลังเป่าไทร์ 2 นาที	RP				
แยก DP ออกแล้วเป่าไทร์ 1 นาที	DP				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงสภาวะการทดลอง และภาพถ่ายสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน Double layer PAD จากการทำปฏิกิริยาของแบเรียมคลอไรด์ที่น้ำหนักต่าง ๆ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร

สภาวะการทดลอง	ชนิดของ PAD	ภาพถ่าย PAD			
น้ำหนักแบเรียมคลอไรด์ ที่ตรึงบนกระดาษ	RP	0.0060 กรัม (1 ชั้น)	0.0120 กรัม (2 ชั้น)	0.0180 กรัม (3 ชั้น)	0.0240 กรัม (4 ชั้น)
ก่อนหยดสารละลายผสม	DP				
หลังทำปฏิกิริยาครบ 15 นาที (ก่อนเป่าไทร์)	DP				
หลังเป่าไทร์ 2 นาที	RP				
แยก DP ออกแล้วเป่าไทร์ 1 นาที	DP				

จากตารางที่ ข.2 และ ข.3 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

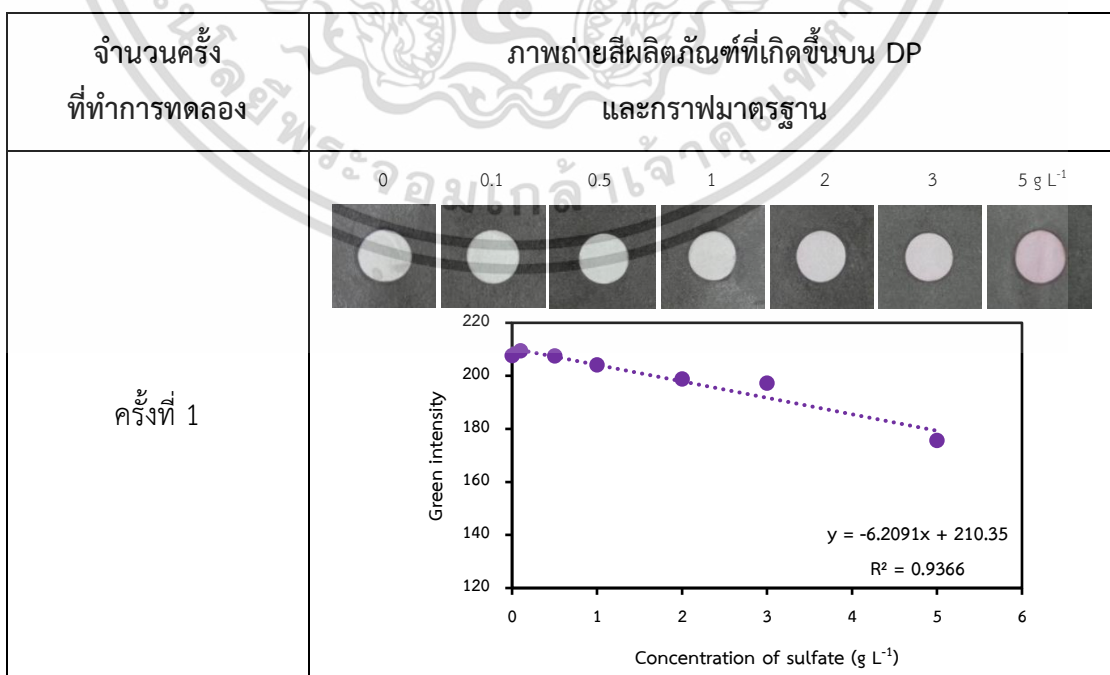
(1) การเพิ่มปริมาณผงแบเรียมคลอไรด์ที่ตรึงบนกระดาษ ไม่ได้ส่งผลต่อความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และจากผลการทดลองที่ได้ จะเลือกใช้น้ำหนักผงแบเรียมคลอไรด์ที่ 0.0120 กรัม (2 ซ้อน) เพื่อให้มีปริมาณ Reagent ที่มากเกินไปพอต่อการเกิดปฏิกิริยา

(2) สีม่วงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนกระดาษมีความสม่ำเสมอ โดยสีของผลิตภัณฑ์จะเข้มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟตเพิ่มขึ้น

ข.2.3 การศึกษากราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต และความเข้มสีเขียว

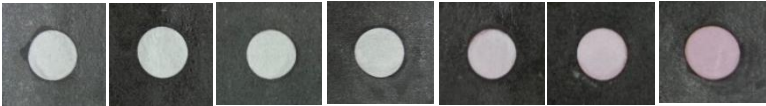
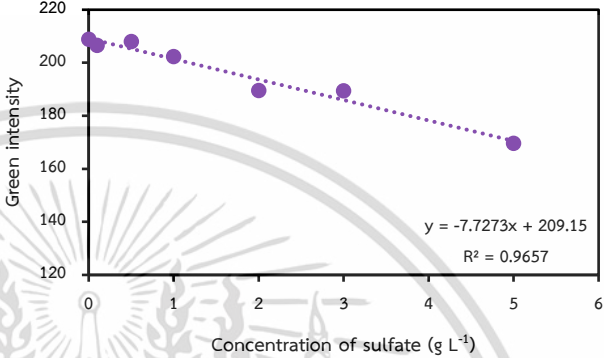
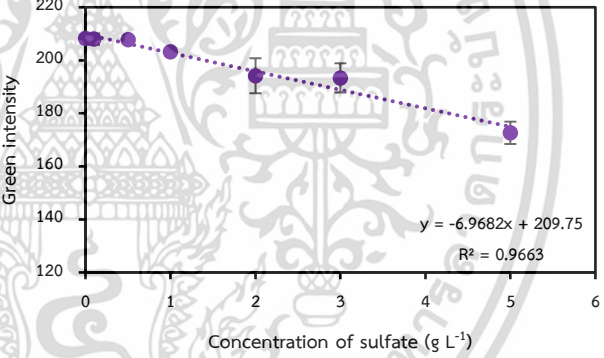
ได้ทำการศึกษาช่วงการตรวจวัด (Working range) ของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 3, และ 5 กรัมต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยทำการทดลองซ้ำสองครั้ง (n=2) ภายในวันเดียวกัน ทำการถ่ายรูป Double layer PAD ที่ด้าน DP หลังจากสารทำปฏิกิริยากันครบ 15 นาที เป่า PAD ด้วยไดร์ แล้วรอนกระดาษแห้งสนิท จากนั้นนำรูปถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ค่าความเข้มสีด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ™ แล้วนำค่าความเข้มสีเขียว (Green intensity) ที่ได้ มาสร้างกราฟมาตรฐาน ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 แสดงกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต และความเข้มของสีเขียว (Green intensity) ที่ถ่ายจากกระดาษกรองหลังจากสารทำปฏิกิริยากันครบ 15 นาที เป่าด้วยไดร์ แล้วรอนกระดาษแห้งสนิท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

จำนวนครั้ง ที่ทำการทดลอง	ภาพถ่ายสีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน DP และกราฟมาตรฐาน
ครั้งที่ 2	 
เฉลี่ย	

จากตารางที่ ข.4 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

(1) สามารถสังเกตเห็นสีม่วงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบน PAD ด้าน DP ได้ที่ความเข้มข้น 2, 3, และ 5 กรัมต่อลิตร สีที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียรและสม่ำเสมอ โดยสีจะเข้มข้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น

(2) กราฟมาตรฐานที่ได้มีค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) เท่ากับ 0.9663 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ภาคผนวก ค

แสดงบทความทางวิชาการที่ได้รับการตอบรับตีพิมพ์ลงวารสาร Microchemical Journal ชื่อบทความ “Superhydrophobic eggshell for fabrication of hydrophobic barrier of paper-based analytical device for colorimetric determination of ammonium ion in water” (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110464>)



Superhydrophobic eggshell for fabrication of hydrophobic barrier of paper-based analytical device for colorimetric determination of ammonium ion in water

Kanyapak Thangjitsirisin^{a,b}, Panpailin Seeharaj^c, Nathawut Choengchan^{a,b}

^a Flow Innovation-Research for Science and Technology Laboratories (FIRST Labs), Bangkok 10520 Thailand

^b Department of Chemistry and Applied Analytical Chemistry Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

^c Department of Chemistry and Advanced Materials Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Superhydrophobic eggshell
PAD
Quantitative analysis
Ammonium
Water

ABSTRACT

This work demonstrates the first application of the superhydrophobic eggshell as an environmental-friendly material for fabricating the hydrophobic barrier of a paper-based analytical device (PAD). The eggshell surface was modified by mixing the pulverized chicken eggshell biowaste with stearic acid and a polystyrene binder to accomplish superhydrophobicity. The PAD (10 × 10 mm²) is comprised of the circular-shaped hydrophilic reservoir (Ø 5 mm). The liquid barrier was fabricated by painting both the topside and the underside of the filter paper with the dispersed superhydrophobic eggshell solution. The SEM images revealed that the micro-sized superhydrophobic eggshell particles adsorbed onto the porous surface of the cellulose fibril. A coated surface with a water contact angle of 155.39° ± 1.02° (n = 10) on the paper substrate was achieved, and this indicated superhydrophobicity. The eggshell barrier enabled excellent water and chemical resistance. The fabricated PAD was applied for the colorimetric determination of ammonium cations (NH₄⁺), based on the modified Berthelot reaction. Samples and chromogenic solutions were aliquoted onto the hydrophilic reservoir, with subsequent capture of the optical image of the stable, green-colored product by a smart phone under a light-controlled studio. The green color intensities were evaluated by ImageJ™ and plotted against the standard NH₄⁺ concentrations. A wide linear calibration range 5.0 to 100 mg N/L was achieved with good linearity (r² > 0.99). The PAD confirmed satisfied analytical recovery (Mean ± SD: 100.6% ± 0.97, n = 11 samples) and high precision (RSD = 0.85%; 10-PAD replicate measurements of 1.0 mg N/L). The limit of detection (3 SD of blank/slope) of 1.05 mg N/L was found sensitive enough to monitor the NH₄⁺ contents in freshwater. The results, determined by the developed PAD and ion chromatography, showed no significant difference under the statistical paired t-test at 95% confidence (t_{stat} = -1.80, t_{crit} = 2.57, n = 6 samples).

1. Introduction

Paper-based analytical devices (PADs) have attracted significant consideration since Whitesides and his co-workers published the first PAD in 2007 [1]. Then, PADs have become more popular approaches for quantitative analyses on account of their advantages against conventional methods, such as cost-effectiveness, portability, simplicity, high speed, point-of-care detection, and minimal sample and reagent consumption [2]. Currently, there has been a continuous growth in the number of reports related to the applications of the PADs for clinical

diagnostics [3–8], food analysis [9–13], and environmental monitoring [14–19].

Fundamentally, the PAD is composed of two components, i.e., hydrophilic paper and a liquid barrier. The hydrophilic paper is exploited for aliquoting the sample and the reagent solutions. The liquid barrier is fabricated on the native paper, normally, the laboratory filter paper, using a hydrophobic material that is insoluble in water for defining the liquid flow path. A series of fabrication technologies have been developed, including, photolithography [1,20], wax-printing, painting, and dipping [21–24], inkjet printing [25], vapor phase deposition [26],

* Corresponding author at: Flow Innovation-Research for Science and Technology Laboratories (FIRST Labs), Bangkok 10520 Thailand.
E-mail address: nathawut.ch@kmitl.ac.th (N. Choengchan).

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110464>

Received 19 October 2023; Received in revised form 22 March 2024; Accepted 1 April 2024

Available online 2 April 2024

0026-265X/© 2024 Elsevier B.V. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

plasma treatment [27,28], laser cutting [29,30], laser toner printing [31,32], and manual plotting [33,34].

There are many hydrophobic materials which are utilized for establishing liquid barriers. Typically, all the materials offer excellent water resistance. Nonetheless, each material and the corresponding fabrication approach have their own benefits and drawbacks. The characteristics and performance tests of the interesting hydrophobic materials and their fabrication methods are summarized in Table S1. SU-8 photolithography [1,20] creates barriers which completely resist surfactants, aqueous, and organic solvents. However, the commercialized SU-8 photoresist is expensive. Although permanent pen ink is regarded as low-cost, it is not convenient for mass production of the PADs by manual plotting [34]. Even though the wax printing technique [21] is simple and viable for the series creation of paper devices, the wax barriers could be penetrated by low-surface tension surfactants and organic solvents. The hydrophobic sol-gel-derived methylsiloxane was applied as the liquid barrier by inkjet printing [35]. The barriers effectively repelled organic solvents and surfactants. Unfortunately, the fabrication process was cumbersome. The other user-friendly protocols, namely, spraying of the acrylic lacquer [36], nail polish [37], and scholar glue [38], as well as drawing of the acrylic resin [39], were demonstrated. Because the lacquer [36] lacked flexibility, the hydrophobic lines on the paper were easily destroyed. Major components of nail polish [37] are the detrimental volatile organic compounds. This disadvantage could limit the application of this kind of hydrophobic reagent. Scholar glue [38] necessitated a long time, ca. 120 min, for drying it on the paper platform after patterning. Unless the 3D pen had been mentioned as an instrument-free fabrication, the additional UV flashlight was still required for the curing of the painted acrylic resin [39].

There have been several publications explaining the use of organic solvent soluble polymers as hydrophobic materials. Polyvinyl alcohol fabric ink [40] had been applied for screen-printing the dumbbell-shaped hydrophobic pattern. As the solvent-based ink, it contained less viscosity. The ink then easily flowed throughout the paper thickness. Poly (dimethyl siloxane), or PDMS, was utilized to simply create the liquid barrier by a modified x,y-plotter device [41]. Nevertheless, it was predominantly important to dissolve PDMS in hexane. Recently, the polymeric binder glass varnish has exhibited high performance for developing hydrophobic barriers [42]. Besides the solvent-based polymers, a water-based polyurethane acrylate (PUA) [43] was also exploited for making the hydrophobic paper by soaking in the PUA solution with subsequent UV light curing. Apart from the mentioned chemicals, a biomaterial had been applied as a hydrophobic reagent. Jarujamras et al. [44] recently adapted rubber latex for assigning the barcode-shaped hydrophobic lines. Their work had motivated our attention to explicitly discover a novel biomaterial or biowaste for the low-cost and environmental-friendly fabrication of the hydrophobic barrier for the PAD.

Eggshell is a solid biowaste left from both household consumption and the food industry [45]. Normally, eggshell waste is dumped into landfills without any pretreatment, which can cause environmental troubles. It is necessary to recycle eggshells as value-added outcomes for economic and environmental benefits. Chicken eggshell, a major eggshell waste, is a porous bioceramic composed of 94% (w/w) CaCO_3 [46]. CaCO_3 from a calcified chicken eggshell can be treated as a precursor to produce bone substitutes, pollutant adsorbents, and coatings [47]. Nonetheless, the surface of CaCO_3 comprises a large amount of free energy, leading it to become more hydrophilic [48]. This hydrophilic nature of CaCO_3 can hinder its further development. The modification of CaCO_3 is therefore particularly crucial. Among the modifications, superhydrophobic surface coating is promising. A superhydrophobic surface is termed as a surface having a water contact angle of more than 150° and a sliding angle less than 10° [49]. There have been successful efforts to convert the eggshell surface to superhydrophobicity using stearic acid, a non-toxic C-18 hydrocarbon [47,50]. Various applications

of superhydrophobic eggshell have been described, e.g., self-cleaning, oil/water separation, and glass or textile coatings [47]. To our knowledge, none of the reports mentioned fabricating the superhydrophobicity on the paper substrate with the hydrophobized eggshell. Additionally, the application of the superhydrophobic eggshell coating to create the liquid barrier for the PAD for the quantitative analysis has not been presented so far.

Herein, this work aims to demonstrate the fabrication of the hydrophobic barrier of the PAD using the superhydrophobic eggshell coating. The surface of the eggshell biowaste was chemically modified by mixing it with steric acid [47]. The dispersed modified eggshell solution was further coated onto the filter paper by manually painting. Morphology and hydrophobicity tests of the superhydrophobic eggshell-coated paper substrate were carried out. The performances in terms of chemical resistance, physical durability, and flexible patterns were also evaluated.

To exhibit the proficiency of the fabricated PAD for quantitative analysis, it was applied for environmental monitoring of the ammonium cation (NH_4^+) contents in water samples. Ammonium cations are easily converted to molecular ammonia under alkaline condition. Exposure to even low concentration levels of ammonium/ammonia is toxic to many forms of aquatic environments [51]. Consequently, the ammonia nitrogen contents in freshwater must be below the regulation limit (2.3 mg N L^{-1}) [52]. The development of analytical methods for the measurement of ammonium cations is thus of great significance. Even though the instrumental methods namely, ion chromatography [53], electrochemistry [54], fluorometry [55], and colorimetry [56], afforded highly accurate results, their apparatuses were expensive and bulky. Therefore, many PADs have been developed for the sake of low-cost and on-site analysis [52,57–61]. Their liquid barriers were fabricated using various kinds of hydrophobic substances, including solid wax [18,52,57], paper sizing agent [58], fabric ink [59], and UV resin [60]. To the best of our literature review, this work is the first report on patterning the liquid barrier by the superhydrophobic eggshell. The modified Berthelot reaction [60,62,63], in which salicylate and dichloroisocyanurate were used instead of toxic phenol and unstable hypochlorite, for the specific and sensitive detection of NH_4^+ . Optimization for the detection conditions and verification of the NH_4^+ concentrations with the validating ion chromatographic method were also assessed.

2. Material and methods

2.1. Chemicals and reagents preparation

All chemicals used were of analytical reagent grade. Deionized-distilled water ($18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) was prepared by the Zener Up 900 water purification unit (Human Corporation, Seoul, Korea) and used throughout the experiments. The NH_4^+ stock standard solution (1000 mg N L^{-1}) was prepared by dissolving 0.3821 g of ammonium chloride (Carlo Erba, France) with 100.00 mL of water. Working standard NH_4^+ solutions were prepared daily by appropriate dilution of the stock standard solution with water. The chromogenic solutions were classified as "reagent A" and "reagent B" [60]. Reagent A composed of 0.624 mol/L salicylate and 0.016 mol/L nitroprusside. It was prepared by dissolving 2.5 g of sodium salicylate (Sigma-Aldrich, Germany) and 0.125 g of sodium nitroprusside dihydrate (Analar Normapur, Belgium) in 25.0 mL of water. Reagent B consisted of 0.056 mol/L dichloroisocyanurate and 0.68 mol/L tri-sodium citrate. It was freshly prepared by dissolving 0.25 g of sodium dichloroisocyanurate (Sigma-Aldrich, Germany) and 5.0 g of tri-sodium citrate dihydrate (Carlo Erba, France) in 25.0 mL of 0.5 mol/L sodium hydroxide.

2.2. Preparation of superhydrophobic eggshell

The superhydrophobic eggshell was prepared according to the previous work [47], with a slight modification to make it more

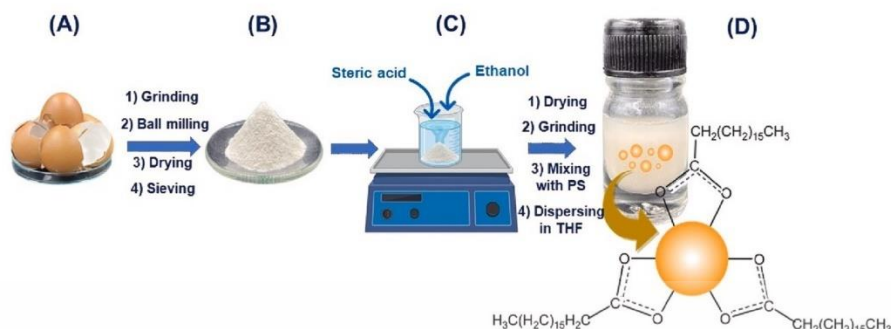


Fig. 1. Schematic illustration for the preparation of the superhydrophobic eggshell. (A): The “household” chicken eggshell biowaste after rinsing with water, (B): The eggshell powder after grinding, ball-milling (30 min), drying of ethanol (99.9 % (v/v)), and molecular sieving (150-mesh), (C): The eggshell powder during surface modification with 10 mmol/L steric acid in 99.9 % (v/v) ethanol, and (D): The suspended superhydrophobic eggshell with polystyrene (PS) binder in THF (99.5 % (v/v)).

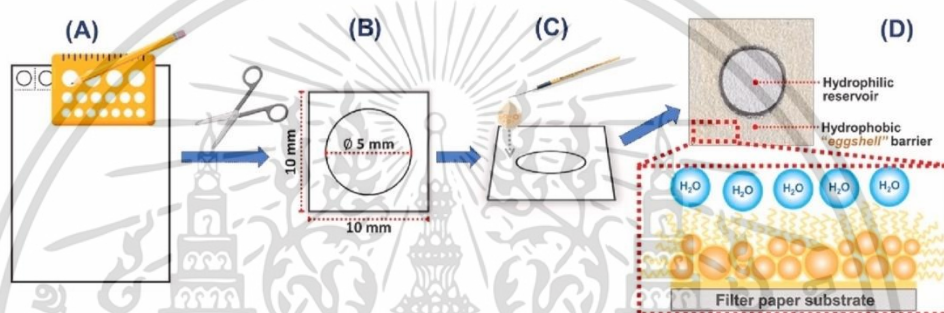


Fig. 2. Diagrammatic graphics representing the processes for fabrication of the superhydrophobic eggshell barrier of the PAD. (A): Drawing the circular-shaped patterns on a Whatman™ No. 1 filter paper by a standard 2B pencil and a plastic template, (B): Cutting to achieve the square-shaped PAD with the circular-shaped hydrophilic reservoir, (C): Manually painting the suspended superhydrophobic eggshell solution around the hydrophilic reservoir, using a paintbrush, and (D): The ready-to-use PAD with the superhydrophobic eggshell coating. Note: The illustration drawing in Fig. 2D represents the steric acid-modified eggshell, coated on the paper substrate.

environmental-friendly. A schematic illustration of the preparation workflow is presented in Fig. 1A to 1D. The steps from Fig. 1A to 1B summarize the physical processes for reducing eggshell sizes. First, the “household” chicken eggshell biowaste was rinsed with water and ground using a mortar. Later, the eggshell powder was mixed with ethanol (99.9 % (v/v)) by mechanical ball-milling for 30 min and dried in an oven at 70 °C for at least 30 min for complete drying of the powder. Followed by molecular sieving through a 150-mesh sieve. Next, the surface of the eggshell particle was hydrophobized by dispersing 0.81 g of the eggshell powders in 30 mL of 10 mmol/L steric acid (QRc, New Zealand) in 99.9 % (v/v) ethanol (QRc, New Zealand) with vigorous stirring at 50 °C for 30 min (Fig. 1C). Then the mixture solution was dried in an oven at 70 °C for 60 min and pulverized using a mortar to obtain the fine powder. After that, 0.4 g of the fine powder and 0.2 g of polystyrene or PS (Plasworld Intertrade, Thailand) binder were suspended in 2.5 mL of tetrahydrofuran or THF (QRc, New Zealand) to finally obtain the suspended superhydrophobic eggshell solution as shown in Fig. 1D.

2.3. Fabrication of the PAD with the superhydrophobic eggshell

Diagrammatic graphics representing the fabrication procedures for the PAD using the superhydrophobic eggshell are depicted in Fig. 2A to 2D. Started by drawing the circular-shaped pattern (Ø 5 mm) on a Whatman™ No. 1 quantitative filter paper (Cytiva, UK) with a standard 2B pencil and a plastic template (Fig. 2A). Each pattern was gradually created, circle by circle. Then, the paper was cut into a square-shaped PAD (10 × 10 mm²) (Fig. 2B). The circular configuration was assigned as the hydrophilic reservoir. The hydrophobic barrier was easily produced by painting the suspended superhydrophobic eggshell solution around the hydrophilic well using a Masterart™ paintbrush No. 1 on both the topside and underside of the bare paper (Fig. 2C). Before painting, the solution containing the suspended eggshell microparticles had been vigorously stirred to prevent the sedimentation of the particles. This is to ensure that the eggshell particles can be adsorbed thorough the bristles and, eventually, lead to the well-coated surface of the paper device. The fabricated PAD was left at ambient temperature (ca. 5 min) inside the fume hood for the removal of the solvents. Finally, the PAD with the superhydrophobic eggshell barrier was obtained (Fig. 2D).

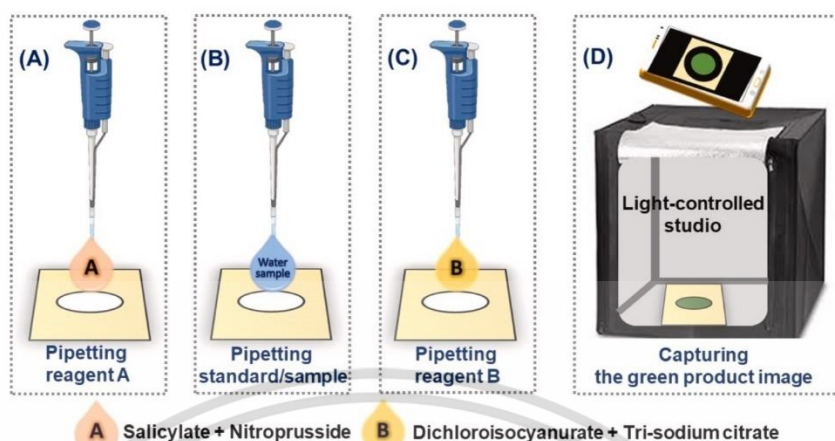


Fig. 3. The analytical steps for the simple colorimetric determination of NH_4^+ based on the modified Berthelot reaction using the proposed PAD. (A): Aliquoting 3.0 μL of reagent A (0.624 mol/L salicylate and 0.016 mol/L nitroprusside), (B): Pipetting 3.0 μL of standard NH_4^+ (5 to 100 mg N/L) / sample, (C): Transferring 3.0 μL of reagent B (0.056 mol/L dichloroisocyanurate and 0.68 mol/L tri-sodium citrate), and (D): Capturing the digital image of the PAD using an iPhone11™ smartphone in a constant light illumination studio.

2.4. Instruments for characterization

Morphology and structure elucidation of the as-prepared superhydrophobic eggshell powder were examined by a JSM-6610LV JEOL™ scanning electron microscope (SEM) and an 8900 Perkin Elmer™ Fourier transform-infrared (FT-IR) spectrometer, respectively. The hydrophobicity test was carried out by measuring the contact angle of the dropped water (5 μL) on the surface of the superhydrophobic eggshell coated paper substrate using an OCA20 Dataphysics™ optical water contact meter. The differences between the hydrophobic and hydrophilic surfaces of the patterned PAD were also examined via a MVX10 Olympus™ macro-zoom microscope.

2.5. Determination of NH_4^+ in water sample by the developed PAD

Fig. 3 shows the analytical steps for the simple colorimetric determination of NH_4^+ based on the modified Berthelot reaction [62,63] using the manufactured PAD. The concentrations of the chromogenic reagent solutions were adopted from T. Thongkam et al. [60]. The procedure is started by pipetting a 3.0 μL aliquot of reagent A (as mentioned in Section 2.1) onto the hydrophilic reservoir (Fig. 3A). Later, a 3.0 μL aliquot of water sample or a series of the standard NH_4^+ (5–100 mg N L^{-1}) solutions is transferred (Fig. 3B). Next, drop a 3.0 μL aliquot of reagent B, as prepared in Section 2.1 (Fig. 3C). The PAD is then placed in a constant-light illumination studio. Exactly 5 min later (defined as the reaction time), a digital image of the PAD is captured using an iPhone11™ smartphone (Fig. 3D). The digital images were downloaded to a laptop computer and processed using Image J™ software. A fixed area was assigned for evaluating the color intensity of the optical images in the hydrophilic reservoir. With ImageJ™, a uniform cropping of the constant area for all investigated images can be achieved (see Scheme S1). Later, the mean values of the red (R), green (G), and blue (B) intensities were recorded. The green intensities were plotted against the standard NH_4^+ concentrations for the construction of the calibration curve. The green color was selected as it offered better linearity and higher sensitivity than the other color channels.

2.6. Method validation

Ion chromatography (IC) was selected as the validating method. The parameters of the Metrohm™ IC system are summarized as the following conditions: Metrosep C4 column (4.0 \times 150 mm, 7.0 μm) at 25 °C, elution with 1.7 mmol/L nitric acid and 0.7 mmol/L dipicolinic acid as mobile phase at a flow rate of 0.9 mL min^{-1} , 10 μL injection volume, and conductometric detection. The chromatographic time was 10 min. Note that freshwater samples were filtered through a 0.20 μm nylon membrane before analysis.

3. Results and discussion

3.1. Characterization of the superhydrophobic eggshell microparticles

The morphology of the as-prepared superhydrophobic eggshell was characterized by SEM. Results (Fig. S1A and S1B) revealed that the ball-milled pristine eggshell and the superhydrophobic eggshell comprised diverse irregularly shaped microparticles. The particle size distributions, estimated from the SEM images in Fig. S2, presented wide particle size distributions (1 to 25 μm). It was also observed that the superhydrophobic eggshell had a smaller particle size than that of the pristine eggshell.

The FT-IR spectra of the pristine eggshell, stearic acid, and stearic acid modified eggshell powders are presented in Fig. S3A to S3C. The FT-IR spectrum of the pristine eggshell (Fig. S3A) displayed absorption bands related to carbonate (CO_3^{2-}) vibration of CaCO_3 at 710 cm^{-1} for C-O in-plan bending-v4, 873 cm^{-1} for out-of-plan bending-v2, 1080 cm^{-1} for C-O asymmetric stretching-v3, and 1404 cm^{-1} for C-O symmetric stretching-v1. These results indicated that the pristine eggshell consisted of CaCO_3 . The surface of CaCO_3 holds substantial free energy, making it more hydrophilic [48]. This suggests that the modification of the pristine eggshell to achieve hydrophobicity is very important. The spectrum of stearic acid ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$) as presented in Fig. S3B showed absorption bands attributed to vibration of alkyl ($-\text{CH}_3$ and $-\text{CH}_2$) and carboxyl ($-\text{COOH}$) groups at 715 cm^{-1} for C-H rocking, 2844 and 2910 cm^{-1} for

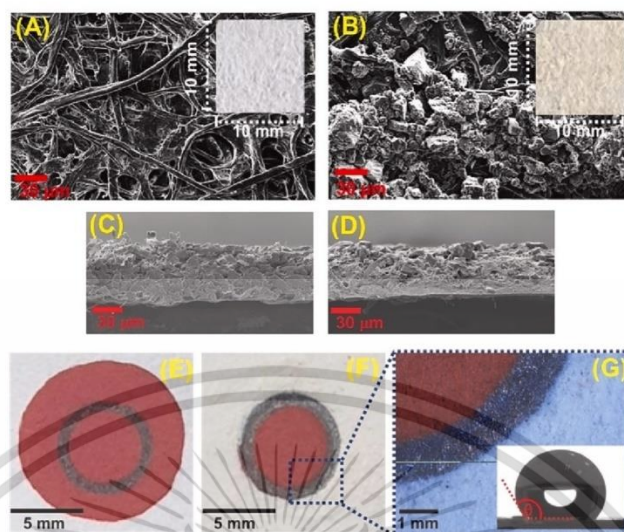


Fig. 4. Summary of the results, obtained by the characterization and the hydrophobicity tests. (A): and (B): The top-view SEM images of the native and the coated superhydrophobic eggshell Whatman™ No.1 filter papers, respectively (inset images are their corresponding photographs). (C): and (D): The cross-section-view SEM images of (A) and (B). (E): and (F): The optical images of the non-fabricated and the superhydrophobic eggshell-coated PADs after aliquoting red dye (10 μ L). (G): The macro-zoom microscopic image representing the boundary between the hydrophilic reservoir and the hydrophobic eggshell barrier with water contact angle measurement (inset figure).

C-H symmetric stretching, 940 and 1465 cm^{-1} for C-O bending, and 1694 cm^{-1} for C=O stretching. After modification of the eggshell surface by stearic acid, the absorption bands (Fig. S3C) allocated to the vibration of stearic acid functional groups appeared along with those of the CaCO_3 groups. Additionally, the absorption bands of carboxylate group (COO^-) at 1400 and 1575 cm^{-1} for asymmetric and symmetric stretching vibrations were also found. These identical peaks indicated the formation of calcium stearate ($(\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COO})_2\text{Ca}$) through the esterification between the carboxyl group of stearic acid and the hydroxyl group of absorbed water on the eggshell surface [47]. The results confirmed that the surface of the pristine eggshell was successfully modified with stearic acid. An illustration drawing of the structure of the stearic acid-modified eggshell is shown in Fig. 1D.

3.2. Characterization and performance tests of the coated superhydrophobic eggshell paper

3.2.1. Characterization

The native and coated superhydrophobic eggshell paper substrates. Results are summarized in Fig. 4(A) to 4(D). Results in Fig. 4(B) show that there have been several micro-sized modified eggshell particles absorbed in the cellulose fibril networks and their porous structures of the Whatman™ No. 1 laboratory filter paper. Results in Fig. 4(D) also clearly reveal that the modified particles penetrated through the pores of the filter papers. Therefore, these particles can block the capillary flows of liquid along the fluidic path of the paper substrate. The thickness of the filter paper after fabrication was also evaluated, and this could imply that the thickness of the eggshell coating on the paper substrate was less than 100 nm (see Fig. S4).

3.2.2. Hydrophobicity test

The hydrophobicity of the superhydrophobic eggshell barrier was tested by aliquoting 10 μ L of aqueous red dye solution onto the assigned hydrophilic reservoirs of the PADs. Results are illustrated in Fig. 4E and 4F. As expected, the dye solution spread across the hydrophilic region of the non-fabricated PAD, even the circular-shaped reservoir was patterned by the hydrophobic graphite 2B pencil (Fig. 4E). This result obviously signifies that the graphite 2B pencil is less hydrophobic. It is necessary to promote the hydrophobicity of the paper platform. In contrast, the superhydrophobic eggshell barrier completely prohibited leakage of the dye (Fig. 4F). The dye solution also flowed rapidly over the hydrophilic area of the fabricated PAD, demonstrating that there were no superhydrophobic eggshell residues in the liquid flow path. This result implies that simple manual painting is efficient for patterning the liquid barrier.

Later, the boundary between the hydrophilic reservoir and the superhydrophobic eggshell barrier was inspected using a macro-zoom optical microscope. Fig. 4G clearly demonstrates that the border between the superhydrophobic eggshell and the native paper was distinct.

The hydrophobicity of the coated superhydrophobic eggshell region was further examined by contact angle measurement. When the water contact angle is greater than 150°, the tested surface is considered to have superhydrophobicity [49]. In the inset image of Fig. 4G, the contact angle of a water drop on the superhydrophobic eggshell area is equivalent to $155.39^\circ \pm 1.02^\circ$ ($n = 10$) for the topside of the paper. This result suggests that the fabricated eggshell area contained superhydrophobic properties, which led to excellent water resistance. Based on the best of our literature reviews, we have observed that most of the contact angle values, measured on the surfaces of various modified substrates [47,50,64–70] as offering superhydrophobicity (Table S2) have ranged from 151° to 156°. These values were not different from the

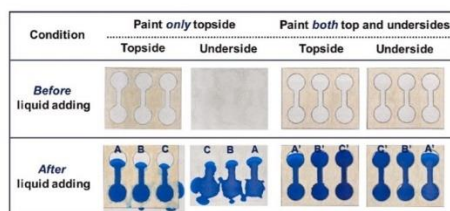


Fig. 5. The optical images of the dumbbell-designed PADs before and after liquid addition. Note that the hydrophobic barriers of the PADs are patterned by manual painting of the superhydrophobic eggshell, either “only” on the topside or “both” on the topside and the underside of the PADs.

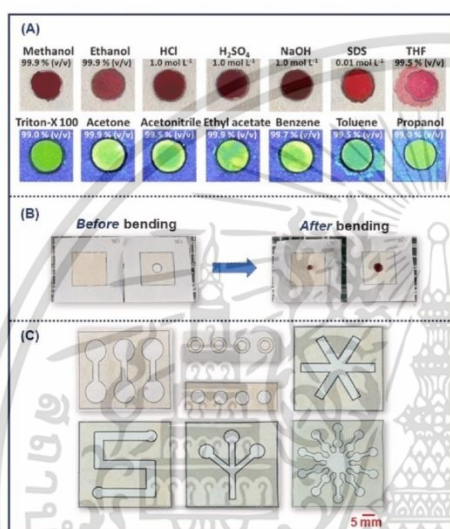


Fig. 6. Summary of the results of the performance tests of the fabricated PADs in terms of (A): Chemical resistance, (B): Physical durability, and (C): Flexibility designs.

contact angle derived from our work. Additionally, our contact angle was found to be greater than that of the other PADs, as summarized in Table S1. Note that it was necessary to paint the superhydrophobic eggshell solution on both the topside and the underside of the native paper to prevent leakage of liquid at the underside paper, as depicted in Fig. 5. However, it should be mentioned that painting on both sides did not delay the manufacturing process. Our fabricated PAD requires a very short time (1 min) for drying and removal of the solvent (see Table S1).

3.2.3. Chemical resistance and physical durability tests

One important aspect associated with the existing fabrication methods for the PADs is the chemical resistance of hydrophobic barriers. In this work, the withstands of the superhydrophobic eggshell barriers to chemicals were evaluated with various kinds of aqueous/organic solvents and surfactants, e.g., methanol (99.9% (v/v)), ethanol (99.9% (v/v)), HCl (1.0 mol/L), H₂SO₄ (1.0 mol/L), NaOH (1.0 mol/L), sodium

dodecyl sulfate (SDS, 0.01 mol/L), and THF (99.5% (v/v)). The red dye solution had been added to the above solutions prior to transferring them (10.0 μ L) into the hydrophilic reservoirs to visually investigate the barrier effectiveness. Additionally, the chemical resistances to triton X-100 (99.0% (v/v)), acetone (99.9% (v/v)), acetonitrile (99.5% (v/v)), ethyl acetate (99.9% (v/v)), benzene (99.7% (v/v)), toluene (99.5% (v/v)), and propanol (99.0% (v/v)) were also studied. As red dye was slightly dissolved in these solvents, fluorescein (0.01 mol/L) had been spiked instead. Then, aliquots of 10.0 μ L of the tested solutions were applied to the hydrophilic reservoirs, and the optical images of the PADs were captured under UV illumination.

The results in Fig. 6A evidently show great compatibility of the eggshell barriers with all tested solutions, excluding THF, toluene, and propanol. The damage to the barrier was likely the result of the dissociation of the modified eggshell. Nonetheless, it can be concluded that the superhydrophobic eggshell barrier provides excellent resistance to commonly used chemicals.

The physical durability of the superhydrophobic eggshell barrier was assessed, whereby the PAD was severely bent to simulate the damage induced on the device before being put into contact with water drops. Results in Fig. 6B show that the red dye droplet (10 μ L) neither collapsed (at least 20 min) nor leaked; coating of the superhydrophobic eggshell on the paper substrate showed high stability.

3.2.4. Flexible patterns of the PAD

The flexibility of the PAD pattern was also surveyed. Several alternative patterns were created, as illustrated in Fig. 6C. It is distinctly observed that the superhydrophobic eggshell is applicable for fabricating PAD with various patterns. The circular configuration was selected for inventing the PAD for the NH₄⁺ detection because of its easier fabrication.

3.3. Development of the fabricated PAD for the colorimetric detection of NH₄⁺

3.3.1. Optimization study

Physical parameters that affect the sensitivity of the developed PAD for the colorimetric measurement of NH₄⁺ were optimized. A summary of the optimization study is presented in Table S3. Note that the concentrations of the modified Berthelot reagents were adopted as reported by T. Thongkam et al. [60].

At first, the effects of the aliquoted volumes of the chromogenic reagents (i.e., reagent A and B solutions) and the standard or sample solutions were studied from 2.0 to 5.0 μ L. Both the reagent and the standard solutions were simultaneously investigated by aliquoting equal volumes. Results are presented in Fig. 7A. Sensitivities, in terms of the slopes of the standard calibration curves (10 to 200 mg N L⁻¹), dramatically increase as the aliquoted volumes increase. However, the greater volumes (4.0–5.0 μ L) occasionally overflowed out of the reservoir, while the lower volumes (2.0–3.0 μ L) completely spread over without evidence of flooding. As a compromise between the sensitivity and the well-being of the liquid flow, the aliquoted volume of 3.0 μ L was then considered appropriate.

Next, the effect of the diameter of the circular hydrophilic reservoir was investigated from 5.0 to 10.0 mm, while the aliquoted volumes of both the reagent and the standard solutions were fixed at 3.0 μ L. In this experiment, the standard solution of 20 mg N L⁻¹ was studied. The optical images in Fig. 7B represent that enlarging the diameter resulted in the fading of the developed, green-colored products, especially when the largest size was studied. Therefore, a diameter of 5.0 mm (the smallest reservoir) was chosen to eliminate the dilution effect.

Finally, the effect of the reaction time was examined. In this research, the reaction time is defined as the time when completing the transfer of all the solutions until capturing the optical image of the PAD in the detection studio. The concentrations of standard NH₄⁺ were studied from 10 to 100 mg N L⁻¹, and the volumes of the reagent and the standard

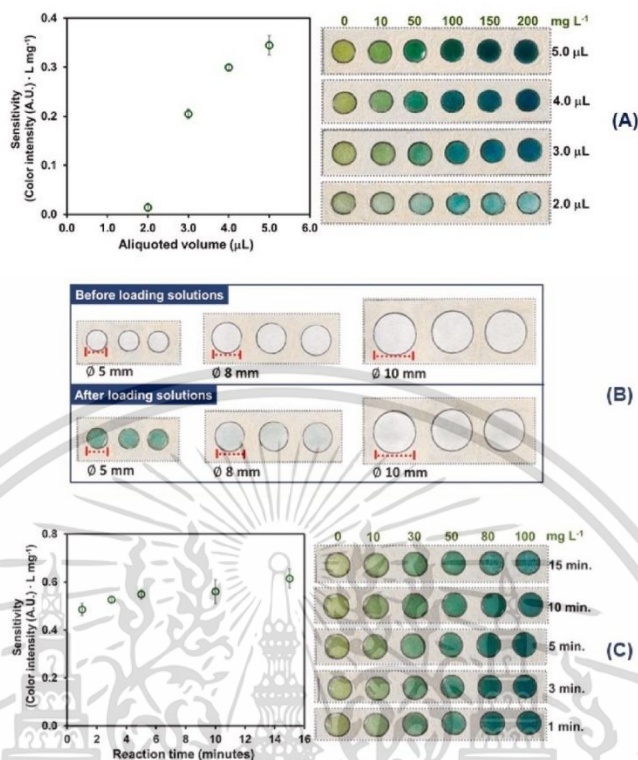


Fig. 7. Summary of the results of the optimization of the developed PAD for the colorimetric determination of NH_4^+ based on the modified Berthelot reaction. (A): Effect of aliquoted volumes of the reagent and the standard/sample solutions, (B): Effect of the diameter size of the hydrophilic reservoir, and (C): Effect of reaction time.

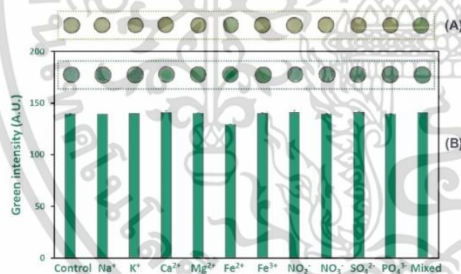


Fig. 8. (A): The optical images of the PADs for the selectivity study, obtained by spiking 40 mg L^{-1} of the individual or the mixed foreign ions onto the hydrophilic reservoirs and (B): Comparison of the corresponded green color intensities of the PADs, after spiking 40 mg N/L of standard NH_4^+ , and 40 mg L^{-1} of the individual or the mixed foreign ions (insets of Fig. 8B are the optical images of the corresponded PADs). Note: The mixed foreign ion solution contains 40 mg L^{-1} of each ion.

solutions were kept constant at 3.0 μL . Results in Fig. 7C indicate that when the reaction times are prolonged from 1 to 15 min, the sensitivities are gradually enhanced. The reaction time of 5.0 min was chosen by considering sensitivity and analysis time. By the selected time, the throughput of 12 samples h^{-1} was achieved. This is practical for real routine applications.

3.3.2. Selectivity study

To examine the selectivity of the developed method, the effect of the individual foreign ions commonly found in freshwater samples, i.e., Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , and PO_4^{3-} , as well as the effect of the mixed interferences on the colorimetric detection of NH_4^+ , were investigated. Results in Fig. 8(A) display the colors of the reagent solutions in the presence of the tested foreign ions after dropping a 3.0 μL aliquot of the individual foreign ions (40 mg L^{-1}) and the mixed foreign ions (containing 40 mg L^{-1} of each ion) onto the hydrophilic reservoirs. These observed colors were the same as the reagent blank color. These results mean that the chromogenic reagents could not react with the foreign ions. However, after transferring a 3.0 μL aliquot of the standard NH_4^+ (40 mg N L^{-1}) onto the same reservoirs, the colors of the products turn dark green (inset images of Fig. 8(B)). This was due to the colorimetric reaction between the target analyte and the reagents.

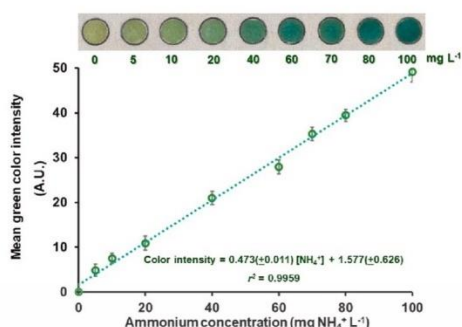


Fig. 9. An example of the calibration plot (5.0 to 100 mg N/L) obtained by the fabricated PAD for the colorimetric determination of NH_4^+ based on the modified Berthelot method. The optical images of the PADs are one representative from triplicate measurements ($n = 3$ PADs).

Furthermore, the developed colors on the PADs and their related color intensities (Fig. 8(B)), calculated by the ImageJ™ software, are not different. These results confirmed that the developed PAD is selective for the colorimetric measurement of NH_4^+ based on the modified Berthelot reagents.

3.3.3. Analytical performances

Fig. 9 illustrates an example of a calibration plot where a wide range of the standard NH_4^+ concentrations (5.0 to 100 mg N L⁻¹) is achieved with good linearity ($r^2 = 0.9959$). Reproducibility was verified by applying 1.0 mg N L⁻¹ to ten different PADs; a relative standard deviation (RSD) of 0.85 % was obtained, indicating high precision. The limit of detection (LOD), as 3 SD of blank/slope of the calibration equation, was observed at 1.05 mg N L⁻¹. This value was sensitive enough to monitor the NH_4^+ contents in freshwater [52].

Table 1

Comparison of the analytical performances and characteristics of the PADs for the colorimetric determination of ammonium/ammonia reported in this work and the other works in the literature.

Hydrophobic barrier/ Fabrication	Colorimetric reagent	Sample	Analytical performances			[Ref]
			Working range (mg N L ⁻¹)	LOD (mg N L ⁻¹)	RSD (%)	
Wax/Printing	Acid-base indicator (Bromothymol blue)	River/creek	6.5–100	6.5	0.8–6.8	[18]
Wax/Printing	Acid-base indicators (nitrazine yellow and bromothymol blue)	Freshwater	0.5–30 (nitrazine yellow) 2.0–10 (bromothymol blue)	0.32 (nitrazine yellow) 0.47 (bromothymol blue)	7.6 ^a and 9.0 ^b (nitrazine yellow) 13 ^a and 2.5 ^b (bromothymol blue)	[52]
Wax/Printing	Nessler	Vitreous humor	7.0–35	5.6	9.3	[57]
Paper sizing agent (4 % alkyl ketone dimer in n-heptane)/Printing	Acid-base indicators (3-nitrophenol and bromothymol blue)	Wastewater	10–100 (3-nitrophenol) 10–50 (bromothymol blue)	0.8 (3-nitrophenol) 1.8 (bromothymol blue)	3.1 (3-nitrophenol) 3.7 (bromothymol blue)	[58]
Fabric ink/Screen printing	3-nitrophenol and Nessler	Wastewater	10–100 ^c	8.99 (3-nitrophenol) 3.14 (Nessler)	8.99 (3-nitrophenol) 1.08 (Nessler)	[59]
UV resin/Screen printing Cutting ^d	Modified Berthelot Acid-base indicator (Bromothymol blue)	Soil Wastewater	10.0–100 5.0–50	0.5 1.3	3.2 ^c and 3.0 ^d < 10	[60] [61]
Superhydrophobic eggshell/ Painting	Modified Berthelot	Freshwater/ Drinking	5.00–100	1.05	0.85	This work

Note: ^a inter-day and ^b intra-day repeatability ^c Similar working ranges were obtained for both Nessler and 3-nitrophenol reagents, and ^d The PAD was cut and inserted into the microplate sealing system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2

Recovery of the developed PAD for the colorimetric determination of ammonium in real water samples with different matrices.

Sample Code	Sources of water	NH ₄ ⁺ concentration ^a (mg N L ⁻¹)		Recovery (%)
		Fortified	Found (Mean ± SD, n = 3)	
S1	Hot spring	40	40.30 ± 3.99	100.8
S2	Waterfall	40	40.23 ± 1.70	100.6
S3	River 1	40	40.66 ± 5.65	101.7
S4	River 2	40	40.43 ± 2.10	101.1
S5	Canal 1	40	40.10 ± 1.04	100.2
S6	Canal 2	40	39.92 ± 0.70	99.79
S7	Canal 3	40	40.29 ± 0.07	100.7
S8	Shrimp farm	40	40.80 ± 1.50	102.0
S9	Fish farm 1	40	40.44 ± 1.29	101.1
S10	Fish farm 2	40	39.91 ± 0.39	99.78
S11	Drinking	40	39.43 ± 2.29	98.57

Note: ^a The original concentrations of NH₄⁺ in all samples were non-detectable. All water samples were collected in Thailand at different sampling sites, as listed in the following information: (S1 to S3) from Chiang Rai Province, (S4 and S5) from Ratchaburi Province, (S6, S7, and S11) from Bangkok, (S8) from Samut Songkhram Province, (S9) from Nakhon Nayok Province, and (S10) from Chachoengsao Province.

Table 3

Comparison of the NH₄⁺ contents in the spiked-water samples, determined by the validating IC and the colorimetric PAD (this work) methods.

Sample code	NH ₄ ⁺ concentration ^a , mg N L ⁻¹ (mean ± SD, n = 3)	
	IC	This work
S1	39.35 ± 1.08	40.30 ± 3.99
S2	40.02 ± 1.35	40.23 ± 1.70
S4	38.83 ± 1.00	40.43 ± 2.10
S6	39.91 ± 0.68	39.92 ± 0.70
S9	40.06 ± 0.89	40.44 ± 1.29
S11	39.63 ± 0.75	39.43 ± 2.29

Note: ^a The final concentrations of NH₄⁺ for all investigated samples are 40 mg N/L.

noted that the original concentrations of the analyte in all water samples were non-detectable for both the IC method and the colorimetric PAD (this work).

4. Conclusions

This is the first report that the superhydrophobic eggshell is efficiently applied as a novel hydrophobic material for the cost-effective and environmental-friendly fabrication of the liquid barrier on the PAD. The superhydrophobic eggshell was prepared by chemical modification of the surface of the chicken eggshell biowaste with stearic acid, a non-toxic C18 hydrocarbon. The dispersed superhydrophobic eggshell solution was manually painted onto the bare filter paper to easily manufacture the liquid barrier. The coated superhydrophobic eggshell on the paper substrate enables it to effectively withstand water as well as commonly used aqueous and organic solvents. A successful demonstration of the fabricated PAD for the colorimetric measurement of the NH₄⁺ concentrations based on the modified Berthelot reaction in various kinds of water samples is achieved. The developed PAD offers a wide working range (5 to 100 mg N L⁻¹) with good linearity ($r^2 > 0.99$). High precision (RSD = 0.85 %) and satisfied analytical recovery (98.57 to 102.0 %) are also accomplished. The NH₄⁺ concentrations in water samples determined by this work and the validating IC method show no significant difference.

CRedit authorship contribution statement

Kanyapak Thangitsirisin: Conceptualization, Investigation,

Methodology, Validation, Writing – original draft. Panpailin Seeharaj: Supervision. Nathawut Choengchan: Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

The authors do not have permission to share data.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere thanks to Department of Chemistry and Applied Analytical Chemistry Research Unit and Advanced Material Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) for the contributions of the instruments and the experimental device facilities. Financial support from KMITL research fund (Grant No.: KREF016307) to KT is also acknowledged.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110464>.

References

- [1] A.W. Martinez, S.T. Phillips, M.J. Butte, G.M. Whitesides, Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays, *Angew. Chem. Int. Ed.* 46 (2007) 1318–1320, <https://doi.org/10.1002/anie.200603177>.
- [2] F. Ozer, C. McMahon, C.S. Henry, Advances in paper-based analytical devices, *Annu. Rev. Anal. Chem.* 13 (2020) 85–109, <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061318-114645>.
- [3] J. Hu, S. Wang, L. Wang, F. Li, B. Pingquan-Murphy, T.J. Lu, F. Xu, Advances in paper-based point-of-care diagnostics, *Biosens. Bioelectron.* 54 (2014) 585–597, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.075>.
- [4] B. Li, L. Yu, J. Qi, L. Fu, P. Zhang, L. Chen, Controlling capillary-driven fluid transport in paper-based microfluidic devices using a movable valve, *Anal. Chem.* 89 (2017) 5707–5712, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00726>.
- [5] R. Hiraoka, K. Kuwahara, Y. Wen, T. Yen, Y. Hiruta, C. Cheng, D. Citterio, Paper-based device for naked eye urinary albumin/creatinine ratio evaluation, *ACS Sens.* 5 (2020) 1110–1118, <https://doi.org/10.1021/acssens.4c00050>.
- [6] A. Mathaveesannam, S. Thongrod, P. Khongkaew, C.M. Pheechitkrang, P. Wilairat, N. Choengchan, Simple and fast fabrication of microfluidic paper-based analytical device by contact stamping for multiple-point standard addition assay: Application to direct analysis of urinary creatinine, *Talanta* 210 (2020) 120675, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120675>.
- [7] W. Alahmad, A. Cetinkaya, S.I. Kaya, P. Varanusapakul, S.A. Ozkan, Molecularly imprinted polymer paper-based analytical devices for biomarkers detection, *TRAC-Trend Anal. Chem.* 170 (2024) 117475, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117475>.
- [8] D. Kumar, R. Ram, A. Sarkar, A smartphone enabled low-cost portable centrifuge integrated with a simple paper-based device for the estimation of plasma-albumin concentration, *Microchem. J.* 197 (2024) 109822, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109822>.
- [9] C. Carrelli, A. Kava, M. Nguyen, R. Menger, Z. Munshi, Z. Call, M. Nussbaum, C. Henry, Beyond the lateral flow assay: A review of paper-based microfluidics, *Microelectron. Eng.* 206 (2019) 45–54, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.12.002>.
- [10] T. Akyazi, L. Basabe-Desmonts, F. Benito-Lopez, Review on microfluidic paper-based analytical devices towards commercialization, *Anal. Chim. Acta* 1001 (2018) 1–17, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.11.010>.
- [11] B. Li, Z. Zhang, J. Qi, N. Zhou, S. Qin, J. Choo, L. Chen, Quantum dot-based molecularly imprinted polymers on three-dimensional origami paper microfluidic chip for fluorescence detection of phycoerythrin, *ACS Sens.* 2 (2017) 243–250, <https://doi.org/10.1021/acssens.6b00664>.
- [12] 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.* 68 (2015) 14–19, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.12.047>.
- [13] Y. Thipwimonmas, S. Kongkaew, C.H. Phua, W. Limbut, A distance-based paper analytical device: Visual quantification of salt in foods with silver nanoparticles on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- paper, *Microchem. J.* 199 (2024) 109853, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109853>.
- [14] M.L.G.S. Almeida, B.M. Jayawardane, S.D. Kolev, I.D. McKelvie, Developments of microfluidic paper-based analytical devices (μPADs) for water analysis: A review, *Talanta* 177 (2018) 176–190, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.072>.
 - [15] J. Han, A. Qi, J. Zhou, G. Wang, B. Li, L. Chen, Simple way to fabricate novel paper-based valves using plastic comb binding spines, *ACS Sens.* 3 (2018) 1789–1794, <https://doi.org/10.1021/acssensors.8b00518>.
 - [16] J. Qi, B. Li, X. Wang, L. Fu, L. Luo, L. Chen, Rotational paper-based microfluidic-chip device for multiplexed and simultaneous fluorescence detection of phenolic pollutants based on a molecular-imprinting technique, *Anal. Chem.* 90 (2018) 11827–11834, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b01291>.
 - [17] L.J. Loh, G.C. Bandara, G.L. Weber, V.T. Remcho, Detection of water contamination from hydraulic fracturing wastewater: a μPAD for bromide analysis in natural waters, *Analyst* 140 (16) (2015) 5501–5507, <https://doi.org/10.1039/c5an00807g>.
 - [18] N. Ushikova, M.L.G.S. Almeida, I.D. McKelvie, S.D. Kolev, Microfluidic paper-based analytical device for the speciation of inorganic nitrogen species, *Talanta* 271 (2024) 125671, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125671>.
 - [19] J.L.S. Aguiar, S.O. Ribeiro, A. Leite, M. Rangel, A.O.S.S. Rangel, R.B.R. Mesquit, Use of a rhodamine-based chelator in a microfluidic paper-based analytical device for the in-situ copper quantification in natural waters, *Talanta* 271 (2024) 125683, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125683>.
 - [20] A.W. Martinez, S.T. Phillips, E. Carrilho, S.W. Thomas, H. Sindi, G.M. Whitesides, Simple telemedicine for developing regions: Camera phones and paper-based microfluidic devices for real-time, off-site diagnosis, *Anal. Chem.* 80 (2008) 3699–3707, <https://doi.org/10.1021/ac800112r>.
 - [21] W. Dunchai, O. Chailapakul, C.S. Henry, A low-cost, simple, and rapid fabrication method for paper-based microfluidics using wax screen-printing, *Analyst* 136 (2011) 77–82, <https://doi.org/10.1039/c0an00406e>.
 - [22] E. Carrilho, A.W. Martinez, G.M. Whitesides, Understanding wax printing: A simple microfluidic process for paper-based microfluidics, *Anal. Chem.* 81 (2009) 7091–7095, <https://doi.org/10.1021/ac910171p>.
 - [23] Y. Lu, W. Shi, L. Jiang, J. Qin, B. Lin, Rapid prototyping of paper-based microfluidics with wax for low-cost, portable bioassay, *Electrophoresis* 30 (2009) 1497–1500, <https://doi.org/10.1002/elps.200800563>.
 - [24] T. Songjareon, W. Dunchai, O. Chailapakul, W. Laiwatanapaisel, Novel, simple and low-cost alternative method for fabrication of paper-based microfluidics by wax dipping, *Talanta* 85 (5) (2011) 2587–2593, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.08.024>.
 - [25] K. Yamada, T.G. Henares, K. Suzuki, D. Citterio, Paper-based inkjet-printed microfluidic analytical devices, *Angew. Chem. Int. Ed.* 54 (2015) 2–19, <https://doi.org/10.1002/anie.201411508>.
 - [26] P.D. Haller, C.A. Flowers, M. Gupta, Three-dimensional patterning of porous materials using vapor phase polymerization, *Soft Matter* 7 (2011) 2428–2432, <https://doi.org/10.1039/c0sm01214a>.
 - [27] X. Li, J. Tian, T. Nguyen, W. Shen, Paper-based microfluidic devices by plasma treatment, *Anal. Chem.* 80 (2008) 9131–9134, <https://doi.org/10.1021/ac801729r>.
 - [28] X. Li, J. Tian, W. Shen, Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors, *Cellulose* 17 (2010) 649–659, <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9401-2>.
 - [29] Y.S. Kim, Y. Yang, C.S. Henry, Laminated and infused Parafilm®-paper for paper-based analytical devices, *Sens. Actuators, B* 255 (2018) 3654–3661, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.10.005>.
 - [30] P. Spicar-Mihalje, B. Toley, J. Houghtaling, T. Liang, P. Yager, E. Fu, CO₂ laser cutting and ablative etching for the fabrication of paper-based devices, *J. Microchem. Microeng.* 23 (2013) 067003, <https://doi.org/10.1088/0950-1317/23/6/067003>.
 - [31] C. Shi, X. Shan, Z. Pan, J. Xu, C. Lu, N. Bao, H. Gu, Quantum dot (QD)-modified carbon tape electrodes for reproducible electrochemiluminescence (ECL) emission on a paper-based platform, *Anal. Chem.* 84 (2012) 3033–3038, <https://doi.org/10.1021/ac203396a>.
 - [32] W. Wang, S. Ding, Z. Wang, Q. Lv, Q. Zhang, Electrochemical paper-based microfluidic device for on-line isolation of proteins and direct detection of lead in urine, *Biosens. Bioelectron.* 187 (2021) 113310, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113310>.
 - [33] J. Nie, Y. Zhang, L. Lin, C. Zhou, S. Li, L. Zhang, J. Li, Low-cost fabrication of paper-based microfluidic devices by one-step plotting, *Anal. Chem.* 84 (2012) 6331–6335, <https://doi.org/10.1021/ac203496c>.
 - [34] A. Lert-ithiporn, P. Srikrissadawong, N. Choengchan, Foldable paper-based analytical device for membraneless gas-separation and determination of iodate based on fluorescence quenching of gold nanoclusters, *Talanta* 221 (2021) 121574, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121574>.
 - [35] J. Wang, M.R.N. Monton, X. Zhang, C.D.M. Filipe, R. Pelton, J.D. Brennan, Hydrophobic sol-gel channel patterning strategies for paper-based microfluidics, *Lab Chip* 14 (2014) 691–695, <https://doi.org/10.1039/c3lc51313k>.
 - [36] T. Nurak, N. Prapthairaksit, O. Chailapakul, Fabrication of paper-based devices by lacquer spraying method for the determination of nickel (II) ion in wastewater, *Talanta* 114 (2013) 291–296, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.05.037>.
 - [37] T. Satarpai, A. Siripinyanon, Alternative patterning methods for paper-based analytical device using nail polish as a hydrophobic reagent, *Anal. Sci.* 34 (2018) 605–611, <https://doi.org/10.2116/analsci.17p620>.
 - [38] T.M.G. Cardoso, F. de Souza, P.T. Garcia, D. Rabelo, C.S. Henry, W.K.T. Coltro, Versatile fabrication of paper-based microfluidic devices with high chemical resistance using scholar glue and magnetic masks, *Anal. Chim. Acta* 974 (2017) 63–68, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.03.043>.
 - [39] L.R. Sousa, L.C. Duarte, W.K.T. Coltro, Instrument-free fabrication of microfluidic paper-based analytical devices through 3D pen drawing, *Sens. Actuators, B* 312 (2020) 128018, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128018>.
 - [40] J. Sitanurak, N. Fukana, T. Wongpakdee, Y. Thepchuay, N. Ratanawimarnwong, T. Amornsakchai, D. Nacapricha, T-shirt ink for one-step screen-printing of hydrophobic barriers for 2D- and 3D-microfluidic paper-based analytical devices, *Talanta* 205 (2019) 120113, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120113>.
 - [41] D.A. Bruzewicz, M. Rieches, G.M. Whitesides, Low-cost printing of poly(dimethylsiloxane) barriers to define microchannels in paper, *Anal. Chem.* 80 (2008) 3387–3392, <https://doi.org/10.1021/ac702605a>.
 - [42] H.A. Silva-Neto, J.C. Jaime, D.S. Rocha, L.F. Sgobbi, W.K.T. Coltro, Fabrication of paper-based analytical devices using stencil-printed glass varnish barriers for colorimetric detection of salivary α-amylase, *Anal. Chim. Acta* 1297 (2024) 342336, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342336>.
 - [43] D. Lin, B. Li, J. Qi, X. Ji, S. Yang, W. Wang, L. Chen, Low cost fabrication of microfluidic paper-based analytical devices with water-based polyurethane acrylate and their application for bacterial detection, *Sens. Actuators, B* 303 (2020) 127213, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127213>.
 - [44] P. Jarujamrus, R. Meelapsom, P. Naksen, N. Ditchareon, W. Anutrasakda, A. Siripinyanon, M. Amaratongchai, S. Supasorn, Screen-printed microfluidic analytical devices (μPAD) as a barcode sensor for magnesium detection using rubber latex waste as a novel hydrophobic reagent, *Anal. Chim. Acta* 1082 (2019) 66–77, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.06.058>.
 - [45] M. Seth, S. Jana, Development of superhydrophobic coating from bio-waste and natural wax, *Mater. Today* 52 (2022) 1422–1428, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.159>.
 - [46] D. Cree, A. Rutter, Sustainable bio-inspired limestone eggshell powder for potential industrialized applications, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 3 (2015) 941–949, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00035>.
 - [47] P. Seeharaj, K. Sripako, P. Promta, E. Deisri, N. Vittayakorn, Facile and eco-friendly fabrication of hierarchical superhydrophobic coating from eggshell bio-waste, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 16 (2019) 1895–1903, <https://doi.org/10.1111/ijct.13235>.
 - [48] L.H. Meng, J.G. Wang, Q.W. Liu, Z.Z. Fan, Hydrophobic calcium carbonate with hierarchical micro-/nanostructure for improving foaming capacity, *Mater. Res. Express* 6 (2019) 1250c8, [doi:10.1088/2053-1591/ab63fc](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab63fc).
 - [49] E. Celia, T. Darmanin, E.T. de Givency, S. Amigoni, F. Guittard, Recent advances in designing superhydrophobic surfaces, *J. Colloid Interface Sci.* 402 (2013) 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.03.041>.
 - [50] J. He, J. He, M. Yuan, M. Xue, X. Ma, L. Hou, T. Zhang, X. Liu, M. Qu, Facile fabrication of eco-friendly durable superhydrophobic material from eggshell with oil/water separation property, *Adv. Eng. Mater.* 20 (2018) 1701180, <https://doi.org/10.1002/adem.201701180>.
 - [51] U.S. Environmental Protection Agency, Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia-Freshwater, 2013, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/aquatic-life-ambient-water-quality-criteria-for-ammonia-freshwater-2013.pdf>, 2013 (Accessed 23.05.26).
 - [52] L.J. Peters, M.L.G.S. Almeida, L. O'Connor Spaj, I.D. McKelvie, S.D. Kolev, Development of a micro-distillation microfluidic paper-based analytical device as a screening tool for total ammonia monitoring in freshwaters, *Anal. Chim. Acta* 1079 (2019) 120–128, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.050>.
 - [53] H. Feng, X.N. Ye, Y.X. Liu, Z.K. Wang, T.X. Gao, A.Y. Cheng, X.F. Wang, J.M. Chen, Simultaneous determination of nine atmospheric amines and six inorganic ions by non-suppressed ion chromatography using acetonitrile and 18-crown-6 as eluent additive, *J. Chromatogr. A* 1624 (2020) 461234, <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461234>.
 - [54] J.Y. Wang, P. Diao, Simultaneous detection of ammonia and nitrate using a modified electrode with two regions, *Microchem. J.* 154 (2020) 104649, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104649>.
 - [55] T. Wang, Y.M. Huang, J. Xu, W.D. Guo, Y. Zhu, D.X. Yuan, A modified method of on-line solid phase extraction and fluorometric detection for underway monitoring and onboard analysis of trace ammonium in seawater, *Deep-Sea Res. T. Oceanogr. Res.* 173 (2021) 103547, <https://doi.org/10.1016/j.ocean.2021.103547>.
 - [56] B. Keskin, A. Uzer, R. Apak, Colorimetric sensing of ammonium perchlorate using methylene blue-modified gold nanoparticles, *Talanta* 206 (2020) 120240, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120240>.
 - [57] G. Musile, Y. Agard, E.F. De Palo, K. Shestakova, E. Bortolotti, F. Tagliaro, Thanatochemistry at the crime scene: a microfluidic paper-based device for ammonium analysis in the vitreous humor, *Anal. Chim. Acta* 1083 (2019) 150–156, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.07.033>.
 - [58] B.M. Jayawardane, I.D. McKelvie, S.D. Kolev, Development of a gas-diffusion microfluidic paper-based analytical device (μPAD) for the determination of ammonia in wastewater samples, *Anal. Chem.* 87 (9) (2015) 4621–4626, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b00125>.
 - [59] P. Phanusit, S. Sumantikul, T. Wongpakdee, N. Fukana, N. Ratanawimarnwong, J. Sitanurak, D. Nacapricha, Membraneless gas-separation microfluidic paper-based analytical devices for direct quantitation of volatile and non-volatile compounds, *Anal. Chem.* 88 (17) (2016) 8749–8756, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b02103>.
 - [60] T. Thongkam, R. Rungsirisakun, K. Hemavibool, A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil, *Anal. Methods* 12 (2020) 4649–4656, <https://doi.org/10.1039/d0ay01180k>.
 - [61] M. A. Vargas-Munoz, J. Morales, Victor Cerdà, L. Ferrer, E. Palacio, Paper sensor-based method using a portable 3D-printed platform and smartphone-assisted

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- colorimetric detection for ammonia and sulfide monitoring in anaerobic digesters and wastewater, *Microchem. J.* 188 (2023) 108469, doi: 10.1016/j.microc.2023.108469.
- [62] K.T. Lau, S. Edwards, D. Diamond, Solid-state ammonia sensor based on Berthelot's reaction, *Sens. Actuators B* 98 (2004) 12–17, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.08.004>.
- [63] Y.B. Cho, S.H. Jeong, H.P. Chun, Y.S. Kim, Selective colorimetric detection of dissolved ammonia in water via modified Berthelot's reaction on porous paper, *Sens. Actuators B* 256 (2018) 167–175, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.10.069>.
- [64] P. Secharaj, P. Pasupong, E. Detsri, P. Damrongsak, Superhydrophobization of SiO₂ surface with two alkylsilanes for an application in oil/water separation, *J. Mater. Sci.* 53 (2018) 4828–4839, <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1925-5>.
- [65] Z. Hu, Y. Deng, Superhydrophobic surface fabricated from fatty acid-modified precipitated calcium carbonate, *Ind. Eng. Chem. Res.* 14 (2010) 5625–5630, <https://doi.org/10.1021/ie901944n>.
- [66] H. Zhang, X. Zeng, Y. Gao, F. Shi, P. Zhang, J.F. Chen, A facile method to prepare superhydrophobic coatings by calcium carbonate, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 3089–3094, <https://doi.org/10.1021/ie102149y>.
- [67] S. Minko, M. Muller, M. Motornov, M. Nitschke, K. Grundke, M. Stamm, Two-level structured self-adaptive surfaces with reversibly tunable properties, *J. Am. Chem. Soc.* 125 (2003) 3896–3900, <https://doi.org/10.1021/ja0279693>.
- [68] H.S. Lim, D.H. Kwak, D.Y. Lee, S.G. Lee, K.W. Cho, UV-Driven reversible switching of a roselike vanadium oxide film between superhydrophobicity and superhydrophilicity, *J. Am. Chem. Soc.* 129 (2007) 4128–4129, <https://doi.org/10.1021/ja0692579>.
- [69] S.T. Wang, X.J. Feng, J.N. Yao, L. Jiang, Controlling wettability and photochromism in a dual-responsive tungsten oxide film, *Angew. Chem.* 118 (2006) 1286–1289, <https://doi.org/10.1002/ange.200502061>.
- [70] F. Xia, H. Ge, Y. Hou, T. Sun, L. Chen, G. Zhang, L. Jiang, Multiresponsive surfaces change between superhydrophilicity and superhydrophobicity, *Adv. Mater.* 19 (2007) 2520–2524, <https://doi.org/10.1002/adma.200602334>.
- [71] J.N. Miller, J.C. Miller, *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, 4th ed., Pearson Education, 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวกัญญาภัค ตั้งจิตสิริสิน
วัน เดือน ปีเกิด	19 กันยายน พ.ศ. 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	64/235 หมู่บ้านเอกกวิน 5 ถนนสังข์สันติสุข แขวงกระทู้มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
ประวัติการศึกษา	(2563) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 2.97 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) (2567) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 4.00 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) จากกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [KREF016307]
ผลงานทางวิชาการ	1. โครงการพิเศษ ชื่อเรื่อง “ซัลเฟตสมาร์ทเทสต์: ชุดทดสอบภาคสนาม สำหรับตรวจวัดซัลเฟตในดินสำหรับผลิตอิฐ (Sulfate Smart Test: A Test Kit for Measurement of Sulfate in Soil for Brick Manufacturer)” 2. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ที่งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ PACCON 2020 (Pure and Applied Chemistry International Conference 2020) ชื่อเรื่อง “Development of Test Kit for Naked Eye Detection of Sulfate in Soil for Brick Manufacture” หน้า AC151-AC156 3. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ชื่อเรื่อง “Superhydrophobic eggshell for fabrication of hydrophobic barrier of paper-based analytical device for colorimetric deter- mination of ammonium ion in water” วารสาร Microchemical Journal, เล่มที่ 200, ปี 2024, หน้า 110464, ค่า Impact Factor = 4.8 (Q1), และปรากฏในฐานข้อมูล SJR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้