การพัฒนาวิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษโดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย สำหรับการตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่าง

Method Development of Fabricating Paper-based Analytical Device Using Easy-to-Find Materials for pH Determination

วิทวัส จำปาทอง (Vitavas Jumpathong)* ดร.นวลละออ รัตนวิมานวงศ์ (Dr.Nuanlaor Ratanawimarnwong)**
ดร.ปิยรัตน์ ดรบัณฑิต (Dr.Piyarat Dornbundit)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยวัสดุหาง่ายที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด ได้แก่ ขี้ผึ้งพาราฟิน หมึกกันน้ำ และสารละลายผสมระหว่างชันสนกับสารส้ม โดยใช้วิธีการประทับพิมพ์ เพื่อสร้างเป็นขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษในรูปแบบวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า สารละลายผสมระหว่างชันสนกับสารส้มที่อัตราส่วน 4 : 1 เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ เนื่องจาก สามารถสร้างเส้นวงกลมของส่วนที่ไม่ชอบน้ำได้ชัดเจนและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในวงสม่ำเสมอเท่ากันทุกครั้ง เมื่อนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการใช้ตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่าง โดยการเทียบสีของสารละลายตัวอย่างที่ผสมอินดิเคเตอร์ธรรมชาติกับแถบสีของอินดิเคเตอร์ที่มีค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 1 - 12 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดด่างของตัวอย่างที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่อ่านได้จากการใช้กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ ได้ผลการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกันดี

ABSTRACT

The research developed a method of fabricating paper-based analytical devices using easy-to-find materials including paraffin wax, waterproof ink, and mixture solution of rosin and alum. The fabrication was based on a stamping method to create hydrophobic barriers of circular patterned paper-based analytical devices having inner diameter of 125 mm. Based on our results, the mixture of Gum rosin and Alum solution of 4 : 1 was found to be suitable for fabricating paper-based analytical devices since it provided sharp hydrophobic barrier line and repeatable inner diameter length of circular pattern. The developed device was employed for determination of the pH of aqueous samples by matching color of the sample mixed natural indicators with the standard color chart obtained from the natural indicator at different pH from 1 - 12. By comparing the results obtained from the developed paper-based analytical device with those obtained from using pH-universal paper indicator, it was found that both results were agreed well with each other.

คำสำคัญ: อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ อินดิเคเตอร์ธรรมชาติ ค่าความเป็นกรดด่าง

Keywords: Paper-based analytical devices, Natural indicators, pH Value

---

*นิสิต หลักสูตรการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บทนำ

อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ (Paper-based Analytical Device) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าห้องปฏิบัติการบนกระดาษ (Lab on paper) เป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ที่สามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว และใช้สารปริมาณน้อยกว่าวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิม เนื่องจากเป็นการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยอาศัยการไหลของสารปริมาณน้อย ในระดับไมโครลิตรในขอบเขตที่กำหนดขึ้นบนกระดาษด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary action) โดยไม่ต้องอาศัยแรงดึงจากภายนอก อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยกลุ่มวิจัยของจอร์จ เอ็ม ไวท์ไซด์ (Whitesides et al., 2007) เพื่อใช้ในการตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensor) โดยอุปกรณ์ที่กลุ่มผู้วิจัยพัฒนาขึ้นนี้ มีข้อดีคือต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก ใช้สารปริมาณน้อยในการตรวจวัด ใช้งานง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมในการตรวจวัด ด้วยคุณสมบัติของกระดาษที่สามารถกรองและตรึงสารไว้ทำปฏิกิริยาภายหลังได้ จึงมีความสะดวกในการตรวจวิเคราะห์ ทำให้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษได้รับความสนใจและเป็นที่นิยมสำหรับผู้วิจัยเป็นจำนวนมาก และได้มีการนำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษนี้ไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการตรวจวัดที่หลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาและสารที่ต้องทำการตรวจวัด เช่น การตรวจวัดโดยใช้การวิเคราะห์สี (Colorimetric detection), การตรวจวัดการเรืองแสงของสารเคมี (Chemiluminescence) และการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) (กนกวรรณ, ยุภาพร, 2557; จุฬาลักษณ์, 2555)

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าวิธีการขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษบางวิธีมีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง เช่น วิธีการพิมพ์ด้วยแสง (Photolithography) (Whitesides et al., 2007), วิธีการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (Wax printing) (Nilghaz et al., 2019), วิธีการพิมพ์ลาย (Plotting) โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ เช่น สาร Polydimethylsiloxane (PDMS) ที่มีราคาสูง (Dereket al., 2008) ส่วนวิธีการจุ่มกระดาษลงในสารละลายขี้ผึ้ง (Wax dipping) (วนิดา และคณะ, 2555; จุฬาลักษณ์, 2555) และวิธีการสกรีนด้วยขี้ผึ้ง (Wax screen printing) (Ali et al., 2013; กนกวรรณ, ยุภาพร, 2557) จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความสม่ำเสมอของคุณภาพอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ผลิตได้ นอกจากวิธีการสกรีนที่กล่าวถึงนี้จะใช้ได้กับขี้ผึ้งแล้ว ยังสามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) แต่อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำแม่แบบ และใช้ระยะเวลานานในการรอสารแห้ง งานวิจัยต่อมาจึงได้ใช้วิธีการพิมพ์สกรีนด้วยขี้ผึ้งแข็ง (Pithakpong et al., 2018) ก่อนที่จะใช้เครื่องเป่าผมให้ความร้อน เพื่อให้ขี้ผึ้งหลอมเหลวซึ่งต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าอีกด้วย และวิธีการขึ้นรูปสุดท้ายที่ได้ศึกษามา คือ วิธีการประทับแม่พิมพ์ที่มีขี้ผึ้งหลอมเหลวบนกระดาษ (Movable-type printing) (Zhang et al., 2014) ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่น่าสนใจและเหมาะสำหรับการนำมาพัฒนาต่อยอด โดยเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ แต่การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้งหลอมเหลวนี้ ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการให้ความร้อนซึ่งจำเป็นจะต้องควบคุมอุณหภูมิในการหลอมเหลวและแม่พิมพ์มักจะเป็นโลหะ ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้จำเป็นจะต้องปรับปรุงและทำให้วิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษง่ายขึ้น โดยผู้วิจัยสนใจการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จากการใช้โลหะมาเป็นยางพาราซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติและเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่าย ได้แก่ ขี้ผึ้งพาราฟิน หมึกกันน้ำ และสารละลายผสมระหว่างชันสนกับสารส้ม มาเป็นวัสดุทางเลือกในการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ เพื่อศึกษาและตัดสินใจเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีความสะดวก และใช้งานได้จริงอย่างมีคุณภาพ

สำหรับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายต่าง ๆ โดยอาศัยการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ ซึ่งอินดิเคเตอร์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อน อาทิ เมทิลออเรนจ์, เมทิลเรด, ไทมอลบลู ซึ่งเป็นสารที่สามารถเปลี่ยนสีได้ เมื่อค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายเปลี่ยนไป ตามทฤษฎีของ Ostwald กล่าวว่า อินดิเคเตอร์เมื่ออยู่ในรูปโมเลกุลและเมื่ออยู่ในรูป

ไอออนจะมีสีต่างกัน (โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มูลนิธิ สอวน., 2556) นอกจากนี้ในดอกไม้ ผลไม้ ผัก หรือรากไม้บางชนิด เช่น ดอกอัญชัน และกะหล่ำปลีม่วง ก็มีองค์ประกอบสำคัญที่มีสมบัติเป็นอินดิเคเตอร์ได้ คือ สารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งเป็นอนุพันธุ์ของไกลโคซิเลทพอลิไฮดรอกไซด์ (Glycosylated polyhydroxide) และพอลิเมทอกซีของฟลาวิเลียมแคทไอออน (Flavylium carbocation) ที่สามารถให้สีได้หลากหลาย ตามค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ สีชมพู-แดง-ม่วง จนถึงน้ำเงิน (จิราพร, 2559; Khan, Farooqui, 2011; นพมาศ, 2544; สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553) จากข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะนำอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ มาประยุกต์ใช้เป็นตัวบ่งชี้ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่สร้างขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษโดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย
2. เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ สำหรับวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างด้วยอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ

วิธีการวิจัย

การเตรียมอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

1. การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบบริเวณที่ให้สารละลายทำปฏิกิริยากันเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร เส้นขอบหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 วง วางเรียงต่อกันดังภาพที่ 1(A) โดยการวาดแบบด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop เพื่อนำไปทำแม่พิมพ์ โดยเลือกใช้ยางพาราเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหนียว สามารถทนต่อแรงเสียดสีได้ดี มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อสร้างแม่พิมพ์เสร็จสิ้นได้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะ ดังภาพที่ 1(B)

ภาพที่ 1 (A) แผนภาพด้านล่างของแม่พิมพ์ 2 มิติ แสดงลักษณะและขนาดของวงกลม (B) แผนภาพแม่พิมพ์ 3 มิติ

2. การสร้างขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

การสร้างขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ ในการทดลองเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่าย 3 ชนิด ได้แก่ ขี้ผึ้งพาราฟิน หมึกกันน้ำ และสารละลายผสมระหว่างชันสนและสารส้ม โดยมีขั้นตอนในการทำที่แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ดังนี้

2.1 ขี้ผึ้งพาราฟิน

นำขี้ผึ้งพาราฟินไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพื่อให้หลอมเหลวก่อนนำแม่พิมพ์ที่ทำจากยางพาราในข้อ 1 มาจุ่มลงในขี้ผึ้งพาราฟินหลอมเหลว แล้วนำไปประทับพิมพ์ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 4 ทันที จากนั้นรอให้ขี้ผึ้งพาราฟินแห้งเป็นเวลา 1 นาที แล้วติดสติ๊กเกอร์ใสบริเวณด้านหลังของกระดาษกรอง

2.2 หมึกกันน้ำ

กดแม่พิมพ์ที่ทำจากยางพาราในข้อ 1 ลงบนแท่นประทับพิมพ์ที่บรรจุหมึกกันน้ำไว้แล้ว จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปประทับพิมพ์ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 4 ทันที รอให้หมึกกันน้ำแห้งเป็นเวลา 3 นาที แล้วติดสติ๊กเกอร์ใสบริเวณด้านหลังของกระดาษกรอง

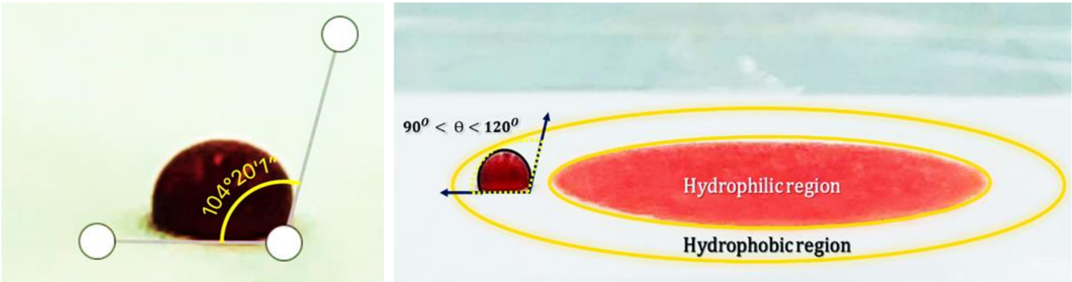
2.3 สารละลายผสมระหว่างชันสนและสารส้ม

เตรียมสารละลายชันสนเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร โดยชั่งชันสน 15 กรัม แล้วนำมาละลายด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ จนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมสารละลายสารส้มเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร โดยชั่งสารส้ม 15 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

นำสารละลายชันสนและสารละลายสารส้มเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตรที่เตรียมได้ ไปศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ โดยเตรียมในอัตราส่วนสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้มโดยปริมาตร เท่ากับ 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 และ 5 : 1 ของตามลำดับ เมื่อผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันแล้ว ต้องประทับพิมพ์สารละลายผสมลงบนกระดาษกรองเบอร์ 4 ภายในเวลา 5 นาที เพื่อป้องกันการจับตัวกันของตะกอน จนทำให้ขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ และหลังจากการประทับพิมพ์ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 4 รอให้แห้งโดยใช้เวลาไม่เกิน 5 นาที จากนั้นติดสติ๊กเกอร์ใสบริเวณด้านหลังของกระดาษกรอง

การทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

ทำการทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุดังกล่าวในข้างต้น โดยการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปวงกลมบนกระดาษกรอง ทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุ (Hydrophobicity) โดยพิจารณาจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ (สารละลายสีผสมอาหาร) บนพื้นผิว ดังภาพที่ 2 ซึ่งวัดด้วยแอปพลิเคชัน Angle Meter ในโทรศัพท์มือถือ ตรวจสอบความสามารถในการสร้างขอบกั้นน้ำและความสม่ำเสมอของการขึ้นรูปวงกลม รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการรอแห้ง เพื่อคัดเลือกวิธีการขึ้นรูปและอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีคุณภาพสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างในลำดับต่อไป



ภาพที่ 2 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวด้วยแอปพลิเคชัน Angle Meter

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่สร้างขึ้นในการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างด้วยอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ

การเตรียมอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ

อินดิเคเตอร์ธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษามาจากพืช 4 ชนิด ได้แก่ กระเจี๊ยบแดง กะหล่ำปลีม่วง ดอกชบาแดง และดอกอัญชัน นำมาสกัดด้วยน้ำในอัตราส่วนตัวทำละลาย 15 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักพืช 1 กรัม (จิราพร (2559)) ยกเว้นกระเจี๊ยบแดงที่ใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอลในอัตราส่วน 1 : 1 ในการสกัด

การสร้างแถบสีมาตรฐานของอินดิเคเตอร์แต่ละชนิด

ปิเปตต์สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 1 - 12 อย่างละ 5 ไมโครลิตร ลงในวงกลมบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่สร้างขึ้น ตามลำดับ จากนั้นปิเปตต์อินดิเคเตอร์ธรรมชาติปริมาตร 5 ไมโครลิตรลงไปในวงกลมแต่ละวง แล้วนำไปถ่ายภาพ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีที่ได้ด้วยโปรแกรม imageJ เพื่อใช้ในการสร้างแถบสีมาตรฐานด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop สำหรับนำไปตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่าง

การวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษโดยใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติ

การวัดค่าความเป็นกรดด่าง ของสารละลายด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษโดยใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติมีขั้นตอนดังนี้ ปิเปตต์สารละลายตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl), สารละลายโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) และสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี ปริมาตร 5 ไมโครลิตรลงในวงกลมบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่สร้างขึ้น ตัวอย่างละ 4 วง สำหรับทดสอบกับอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ 4 ชนิด ที่เตรียมได้ จากนั้นปิเปตต์อินดิเคเตอร์ธรรมชาติโดยเรียงลำดับจาก กระเจี๊ยบแดง กะหล่ำปลีม่วง ดอกชบาแดงและดอกอัญชัน ชนิดละ 5 ไมโครลิตรลงไป แล้วทำการเปรียบเทียบสีของสารละลายที่ได้กับแถบสีมาตรฐานของอินดิเคเตอร์แต่ละชนิดที่สร้างขึ้น เพื่อวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่าง

ผลการวิจัย

การขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยวัสดุที่หาได้ง่ายชนิดต่าง ๆ

สำหรับกระดาษที่นำมาขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้กระดาษกรองเบอร์ 4 เนื่องจาก กระดาษกรองเบอร์ 4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกระดาษกรองขนาดอื่น ๆ เช่น กระดาษกรองเบอร์ 1 หรือเบอร์ 6 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยในช่วง 20-25 ไมโครเมตร ส่งผลให้สารละลายที่ถูกบรรจุลงไปบนกระดาษ สามารถซึมผ่านรูพรุนของกระดาษได้ง่าย ทำให้สารละลายที่หยดลงไป สามารถแพร่กระจายทั่วขอบเขตที่กำหนดได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ จึงเหมาะสำหรับนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Nuanlaor Ratanawimarnwong et al., (2019) ที่ได้ออกแบบวิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีนด้วยน้ำหมึกสำหรับสกรีนเสื้อ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้กระดาษกรองเบอร์ 4 เป็นวัสดุในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษเช่นกัน

ผลทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุหาง่ายชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1วัสดุแรกที่เลือกใช้ในการขึ้นรูป คือ ขี้ผึ้งพาราฟิน ซึ่งต้องให้ความร้อนจนหลอมเหลวเสียก่อน โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (Rathod, Banerge, 2005) และในระหว่างการประทับพิมพ์ พบว่า ขี้ผึ้งพาราฟินที่หลอมเหลวแพร่กระจายตัวบนกระดาษกรองอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดของวงกลมที่สร้างขึ้นได้ จึงไม่

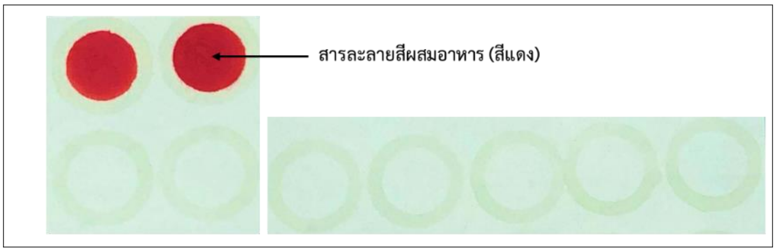
เหมาะที่จะนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ ส่วนการขึ้นรูปด้วยหมึกกันน้ำ (Waterproof ink) หลังจากที่ทำการประทับพิมพ์หมึกกันน้ำลงบนกระดาษกรอง แล้วรอให้หมึกซึมและแห้ง เป็นเวลา 3 นาที พบว่า สามารถสร้างขอบเขตเป็นรูปแบบวงกลมได้ และมีความสม่ำเสมอของขนาดวงกลมที่สร้างขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมใกล้เคียงกับขนาดของแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น คือ 125 มิลลิเมตร แต่จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการกันน้ำ พบว่า เมื่อหยดสารละลายสีผสมอาหารลงไป ยังมีการรั่วไหลออกนอกวงกลมไปยังขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำในบางครั้ง ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่า หมึกกันน้ำไม่ใช่วัสดุที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษด้วยวิธีการประทับพิมพ์

ในส่วนของการขึ้นรูปวงกลมด้วยสารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้มในอัตราส่วนโดยปริมาตรต่าง ๆ พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนเป็น 1 : 1 และ 2 : 1 มีตะกอนอะลูมินัมโรซิเนต (Aluminum-rosinate) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และขณะนำไปประทับพิมพ์ สังเกตเห็นว่า สารละลายผสมดังกล่าวติดแม่พิมพ์น้อย ส่งผลให้การสร้างวงกลมไม่สมบูรณ์และมีสารละลายสีผสมอาหารรั่วไหลออกนอกวงกลมทันทีที่หยดลงไป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 3 : 1 ขึ้นไป พบว่า สามารถขึ้นรูปวงกลมบนกระดาษกรองได้สม่ำเสมอมากขึ้น ดังภาพที่ 3 ส่วนผลจากการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวที่บริเวณเส้นวงกลมที่สร้างขึ้น พบว่า มีค่ามากกว่า 90 องศา ซึ่งแสดงถึงความเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการรอแห้ง พบว่า เมื่อผสมสารละลายชันสนในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการรอแห้งน้อยลง โดยที่อัตราส่วนการผสมสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้มเป็น 5 : 1 จะใช้ระยะเวลาในรอแห้งเพียง 1 นาที เท่านั้น

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณภาพของของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

วัสดุที่ใช้	ผลการทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ (ทำซ้ำ 10 ครั้ง)			
	ความสามารถในการขึ้นรูปวงกลมบนกระดาษกรอง	สมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว(องศา)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูปแบบวงกลมที่สร้างได้ (มิลลิเมตร) (% RSD, n = 10)	ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป (นาที)
(1) ขี้ผึ้งพาราฟิน	ไม่ได้	-	-	-
(2) หมึกกันน้ำ	ได้	90.50	$\bar{x}$ = 124.8 (% RSD = 1.2413)	3
(3) สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม (1 : 1)	ได้	0.00	$\bar{x}$ = 124.3 (% RSD = 2.7622)	5

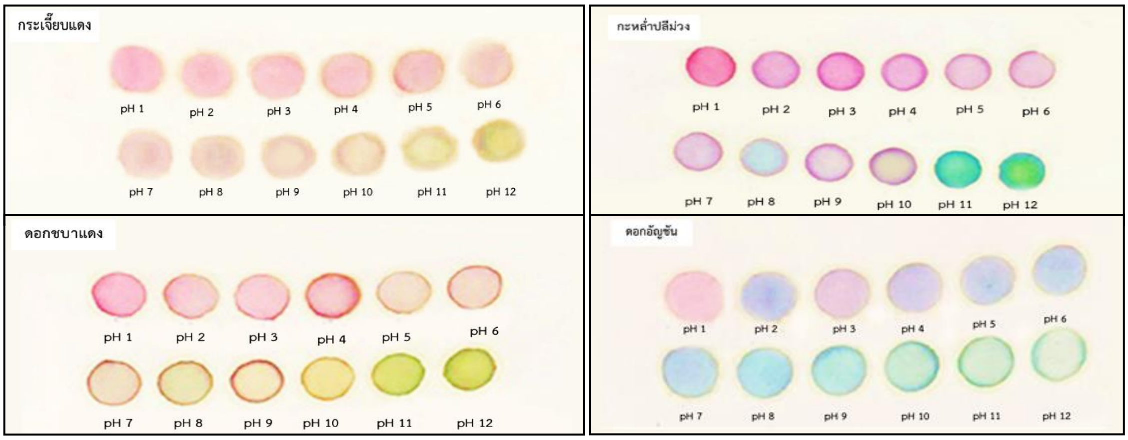
วัสดุที่ใช้	ผลการทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ (ทำซ้ำ 10 ครั้ง)			
	ความสามารถในการขึ้นรูปวงกลมบนกระดาษกรอง	สมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว(องศา)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูปแบบวงกลมที่สร้างได้ (มิลลิเมตร) (% RSD, n = 10)	ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป (นาที)
(4) สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม (2 : 1)	ได้	56.56	$\bar{x}$ = 125.5 (% RSD = 1.8112)	3
(5) สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม (3 : 1)	ได้	98.58	$\bar{x}$ = 125.7 (%RSD = 1.6793)	2
(6) สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม (4 : 1)	ได้	104.20	$\bar{x}$ = 124.9 (%RSD = 0.4545)	2
(7) สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม (5 : 1)	ได้	105.28	$\bar{x}$ = 124.9 (%RSD = 1.0667)	1



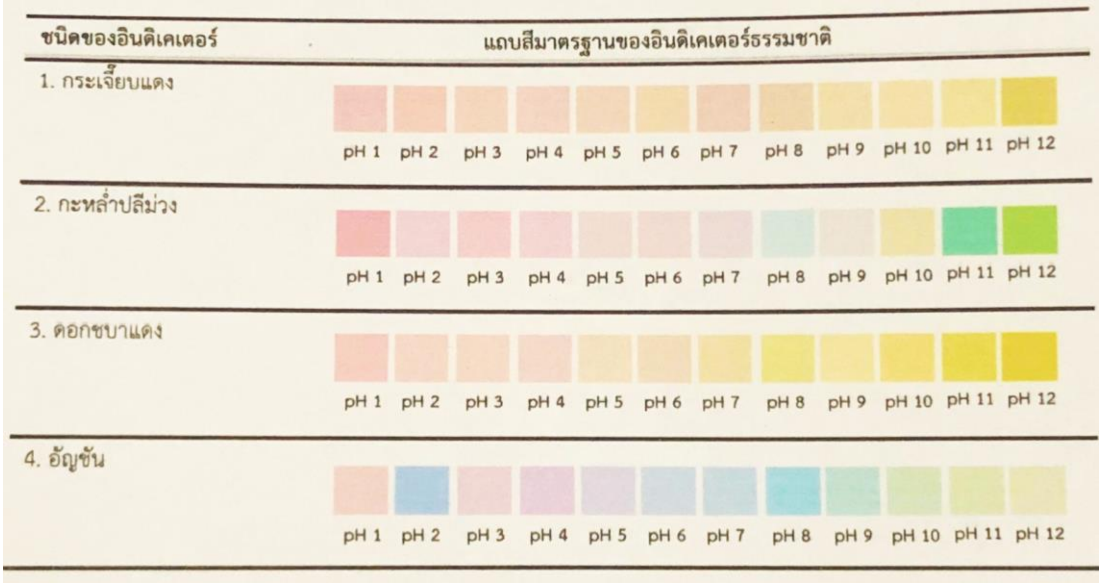
ภาพที่ 3 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้ม อัตราส่วน 4 : 1

การวิเคราะห์สีของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ที่ค่า pH 1-12 และสร้างแถบสีมาตรฐาน

จากการนำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ผ่านการทดสอบคุณภาพแล้ว มาประยุกต์ใช้สร้างแถบสีมาตรฐานของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กระเจี๊ยบแดง กะหล่ำปลีม่วง ดอกชบาแดง และดอกอัญชัน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5



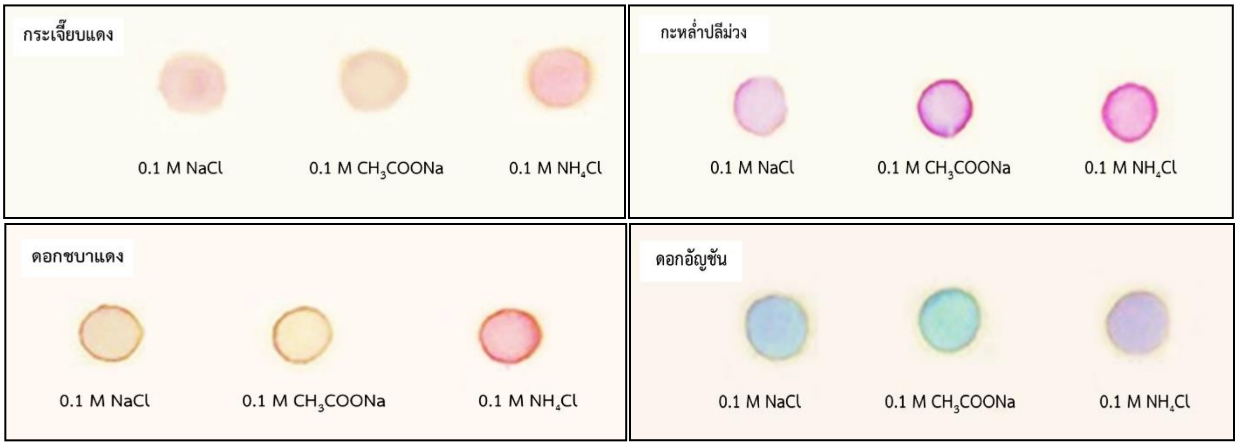
ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์สีของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ที่ค่า pH 1-12



ภาพที่ 5 ผลการสร้างแถบสีมาตรฐานของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

การวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ โดยใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติ

เมื่อนำแถบสีของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติที่สร้างขึ้น มาใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ ซึ่งประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) และสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 6 และเมื่อเปรียบเทียบสีของสารละลายตัวอย่างที่ได้กับแถบสีมาตรฐาน สามารถสรุปค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างได้ ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 6 ผลการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่าง โดยใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายโดยใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติในการเทียบสีบนอุปกรณ์-ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ โดยเทียบเคียงกับค่าความเป็นกรดด่างที่วัดด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์

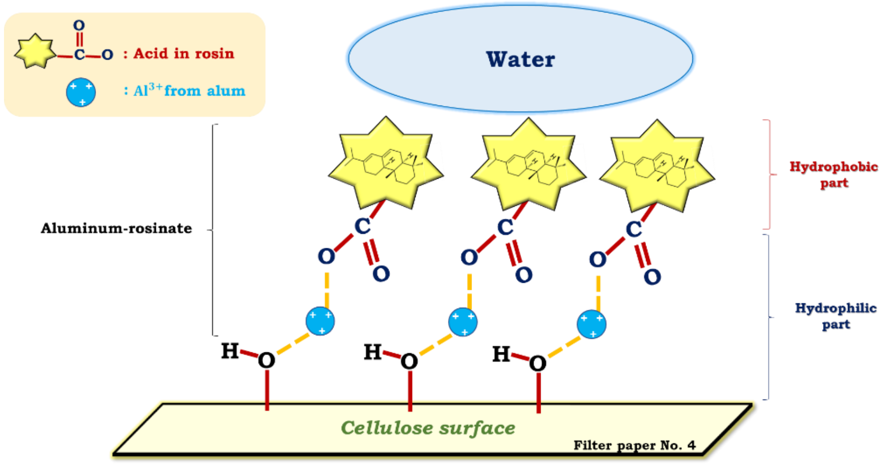
ชนิดของสารละลายตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างเฉลี่ย (จากการวัดซ้ำ 10 ครั้ง)				
	กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์	กระเจี๊ยบแดง	กะหล่ำปลีม่วง	ดอกชบาแดง	ดอกอัญชัน
0.1 M NaCl	7.00	6.90	7.00	7.00	7.00
0.1 M CH_3COONa	9.00	9.00	9.00	8.90	9.10
0.1 M NH_4Cl	4.00	4.10	4.10	4.10	4.00

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการเลือกวัสดุขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่นำมาขึ้นรูป พบว่าเมื่อใช้สารละลายผสมระหว่างชันสนและสารส้ม ในอัตราส่วนโดยปริมาตร เท่ากับ 4 : 1 ขอบเขตของวงกลมที่สร้างขึ้นจะมีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงกว่าหมึกกันน้ำและสารละลายผสมระหว่างชันสนและสารส้ม ในอัตราส่วน 1 : 1, 2 : 1 และ 3 : 1 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีมุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ

104.20 องศา จากการทำซ้ำ 10 ครั้ง และยังมีค่าใกล้เคียงกับมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว เมื่อใช้อัตราส่วนผสม 5 : 1 อีกด้วย ประกอบกับเมื่อทดสอบการรั่วไหล โดยการหยดสารละลายสีผสมอาหารลงไป พบว่า ไม่มีการรั่วไหลออกจากวงกลมที่สร้างขึ้น จากนั้นเมื่อพิจารณาความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) พบว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่สร้างขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้มเป็น 4 : 1 จากการทำซ้ำ 10 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 124.9 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม เท่ากับ 125 มิลลิเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ร้อยละ 0.4545 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าทุกสภาวะ รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ตั้งแต่ประทับพิมพ์จนรอแห้งสนิทในแต่ละครั้ง ใช้เวลาเพียง 2 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุและอัตราส่วนที่เหมาะสม สำหรับการนำมาขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษ คือ สารละลายผสมระหว่างสารละลายชันสนต่อสารละลายสารส้มที่มีอัตราส่วนผสมโดยปริมาตรเป็น 4 : 1

เมื่อพิจารณาผลการขึ้นรูปขอบเขตที่ไม่ชอบน้ำของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษในข้างต้น พบว่า การที่ผสมสารละลายสารส้มลงไปในสารละลายชันสนนี้ จะช่วยให้สารละลายผสมมีคุณสมบัติการกันน้ำหรือไม่ชอบน้ำสูงกว่าการใช้สารละลายชันสนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว สามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นได้ว่า อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากสารส้ม สามารถเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) กับไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate group) ของกรดในชันสน ซึ่งเราจะเรียกรวมทั้งสองส่วนนี้ว่า Aluminum-rosinate จากนั้นอะลูมิเนียมไอออนจะเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้าอีกต่อหนึ่งกับออกซิเจนซึ่งเป็นเสมือนขั้วลบของหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส (กระดาษกรอง) และจากอันตรกิริยาดังกล่าวนี้เอง จะช่วยลดความมีขั้วและความสามารถในการชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดที่มีอยู่ชันสนได้ และยังทำให้เกิดส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) ที่มีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเคลือบติดกระดาษกรองไว้อย่างสม่ำเสมอ (Manar, 2018) ปรากฏดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 อันตรกิริยาระหว่างชันสนและสารส้มกับเซลลูโลส (กระดาษกรอง)

สำหรับสารส้มที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ เป็นเกลืออะลูมินัม (Aluminum salt) ชนิดหนึ่ง ที่สามารถละลายน้ำและปลดปล่อยอะลูมิเนียมไอออนออกมาได้ เช่นเดียวกับสารพอลิอะลูมินัมคลอไรด์ (Poly-aluminum Chloride) ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ เพื่อให้กระดาษมีคุณสมบัติต้านทานการซึมของน้ำได้ดีขึ้น (Chen et al., 2001) แต่เนื่องจาก สารส้มเป็นสารเคมีสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาที่ถูกกว่า จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์และศึกษาวิจัยมากกว่า (โสรญา, 2557)

จากการนำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่ผ่านการทดสอบคุณภาพแล้ว มาประยุกต์ใช้สร้างแถบสีมาตรฐานของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กระเจี๊ยบแดง กะหล่ำปลีม่วง ดอกชบาแดง และดอกอัญชัน ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่า การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ธรรมชาติที่เลือกมาจากพืชและดอกไม้ทั้ง 4 ชนิด ให้การเปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจนดี ในช่วงค่าความเป็นกรดด่าง ตั้งแต่ 1 - 12 และเมื่อนำค่าสีที่ได้จากถ่ายภาพ ดังภาพที่ 4 ไปสร้างเป็นแถบสีมาตรฐานซึ่งปรากฏผลดังภาพที่ 5 จะสังเกตเห็นว่า แถบสีมาตรฐานที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับสีของสารละลายที่ได้จากภาพถ่าย ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการวิเคราะห์ค่าสี เมื่อใช้โปรแกรม Adobe Photoshop ส่งผลให้การตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษมีความถูกต้อง แม่นยำขึ้น

เมื่อนำแถบสีมาตรฐานดังกล่าว มาใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ ซึ่งประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) และสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี แล้วนำผลเปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรดด่างที่วัดด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ จำนวน 10 ครั้ง ซึ่งได้ค่าความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 7.00 9.00 และ 4.00 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการตรวจวัด พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างที่วัดได้จากการใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันมากและใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการใช้กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ โดยสามารถวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่างได้ตรงกับกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ จำนวน 9 ใน 10 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 90 ของจำนวนครั้งที่ตรวจวัด ซึ่งผลดังกล่าว แสดงให้เห็นถึง ความถูกต้องที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่พัฒนาขึ้น

ในส่วนของความชัดเจนในการเทียบสีด้วยแถบสีอินดิเคเตอร์มาตรฐาน พบว่า กระเจี๊ยบแดง กะหล่ำปลีม่วงและดอกชบาแดง ที่ค่าความเป็นกรดด่าง ในช่วง 1 - 7 มีโทนสีใกล้เคียงกันมาก จึงอาจต้องใช้ความละเอียดในการสังเกตสี ซึ่งขึ้นกับความสามารถในการจำแนกสีของแต่ละบุคคลด้วย นอกจากนี้ยังต้องใช้ความระมัดระวังในการตรวจวัด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากผู้ทำการทดลองด้วย ส่วนแถบสีของดอกอัญชัน พบว่า มีสีค่อนข้างแตกต่างกัน ตลอดช่วงค่าความเป็นกรดด่าง ตั้งแต่ 1 - 12 จึงสามารถใช้วัดค่าความเป็นกรดด่างได้ชัดเจนที่สุด

สำหรับเหตุผลที่ผู้วิจัยไม่ใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และจำแนกสีขณะตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายตัวอย่าง เนื่องจาก ผู้วิจัยต้องการให้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถแสดงผลการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถรู้ผลได้ทันทีที่ตรวจวัดและไม่ต้องการเพิ่มขั้นตอนในการตรวจวัดให้ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้อุปกรณ์นี้สามารถใช้งานได้สะดวก และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษอย่างง่ายและแนวทางประยุกต์ใช้ในรูปแบบหนึ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสะดวกในการขึ้นรูปของเขตที่ไม่ชอบน้ำ เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษที่มีคุณภาพ รวมทั้งแสดงตัวอย่างของการนำอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษไปใช้ประโยชน์ คือ การตรวจวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายอย่างง่าย ใช้สารในปริมาณน้อยในระดับไมโครลิตร มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก สามารถใช้ได้นอกห้องปฏิบัติการ และเมื่อใช้เสร็จแล้ว สามารถทิ้งให้ย่อยสลายตามธรรมชาติได้โดยไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก ใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลัก สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ฐานกระดาษโดยการขึ้นรูปจากวัสดุธรรมชาตินี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับการต่อยอดในด้านวิทยาศาสตร์และการประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนรู้ได้ทั้งระดับมัธยมศึกษาและระดับอุดมศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาภายใต้โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ระยะที่ 3 ระหว่างปีการศึกษา 2561-2562

เอกสารอ้างอิง

กนกวรรณ ฟีสันเทียะ, ยุภาพร สมีน้อย. อุปกรณ์แบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์แอลกอฮอล์โดยอาศัยการตรวจวัดทางเอนไซม์. ใน: วิภูษิต มัณฑะจิตร, บรรณาธิการ. SCIENCE RESEARCH CONFERENCE 6th. การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6; 20-21 มีนาคม 2557; ชลบุรี. ชลบุรี: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา; 2557. หน้า 160-166.

โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มูลนิธิ สอวน. เคมี (มัธยมศึกษาตอนต้น). พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: บริษัทด่านสุทธาการพิมพ์; 2556.

จิราพร กำลังดี. การไทเทรตกรด - เบส โดยใช้สารสกัดจากพืชป็นอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2559.

จุฬาลักษณ์ น้อยพ่วง. การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษสำหรับตรวจวัดระดับกลูโคสจากเลือดครบส่วน ด้วยหลักการเคมีไฟฟ้า. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีวเคมีคลินิกและอณูทางการแพทย์]. กรุงเทพฯ: คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555.

ธีระ ตั้งวิชาชาญ. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพิมพ์. นนทบุรี :โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช; 2539.

นพมาศ สุนทรเจริญนนท์. เภสัชวินิจฉัย ยาและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดแสงเทียนการพิมพ์; 2544.

วนิดา หลายวัฒนไพศาล, อรวรรณ ชัยลภากุล, ชาร์ลส์ เฮนรี, วิจิตรา เดือนฉาย, เต็มศิริ ทรงเจริญ. การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษ สำหรับตรวจวัดตัวบ่งชี้ทางชีวภาพจากเลือดครบส่วน. รายงานการวิจัยกรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555.

สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้: แอนโทไซยานิน (Anthocyanin). กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2553.

โสรญา ส้มเขียวหวาน. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระดาษอย่างง่ายจากเปลือกกล้วยสดและจากผลผลิตเหลือทิ้งหลังการหมักเอทานอล. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี]. สงขลา: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2557.

Ali Kemal Yetisen, Muhammad Safwan Akram, Christopher R. Lowe. Paper-based microfluidic point-of-care diagnostic devices. Lab Chip. 2013; 13: 2210-2251.

Chen, Y., Long, Z., Xie, L., and Fang, B. The factors affecting rosin neutral sizing. CHN PULP PAP. 2001; 2: 20-24.

Derek A. Bruzewicz, Meital Reches, George M Whitesides. Low-Cost Printing of Poly(dimethylsiloxane) Barriers to Define Microchannels in Paper. Anal Chem. 2008; 80(9): 3387-3392.

Khan P.M.A., Farooqui M., Analytical Applications of Plant Extract as Natural pH Indicator: A review. J. Adv. Sci. Res. 2011; 2: 20-27.

Manar El-Sayed Abdel-Raouf, e. a. Rosin: Chemistry, Derivatives, and Applications: a review. BAOJ Chem. 2018; 4(1): 9.

Nuanlaor Ratanawimarnwong, Jirayu Sitanurak, Nutnaree Fukana, Thinnapong Wongpakdee, Yanisa Thepchuay, Taweechai Amornsakchai, Duangjai Nacapricha. T-shirt ink for one-step screen-printing of hydrophobic barriers for 2D- and 3D-microfluidic paper-based analytical devices. Talanta. 2019; 205(2019): 1-10.

Nilghaz A., Liu X., Ma L. Development of fabric-based microfluidic devices by wax printing. Cellulose. 2019: 1-11.

Pithakpong Namwong, Purim Jarujamrus, Maliwan Amatatongchai, Sanoe Chairam. Fabricating Simple Wax Screen-Printing Paper-Based Analytical Devices to Demonstrate the Concept of Limiting Reagent in Acid–Base Reactions. J. Chem. Educ. 2018; 95: 305–309.

Rathod M. K., Banerge Experimental Investigation on latent heat storage unit using paraffin wax as phase change material, Int J Green Energy. 2005; 2(1): 40-55.

Whitesides G.M., Martinez A.W., Phillips S.T., Butte M.J. Patterned paper as a platform for inexpensive, low volume, portable bioassays. Angew. Chem., Int. Ed. 2007; 46(8): 1318-1320.

Zhang Yun, Zhou Caibin, Nie Jinfang, Le Shangwang, Qin Qun, Liu Fang, Jianping., L. Equipment-Free Quantitative Measurement for Microfluidic Paper-Based Analytical Devices Fabricated Using the Principles of Movable-Type Printing. Anal Chem. 2014; 86(4): 2005-2012.