บทความวิชาการ

การทบทวนการพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายอย่างง่ายสำหรับห้องเรียนเคมี

เพชรวิไล ขัตติยวงศ์[1] ศักดิ์ศรี สุภาษร[2,] และเสนอ ชัยรัมย์[2*]

[1]หลักสูตรวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

[2]ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

**Email: sanoe.c@ubu.ac.th*

รับบทความ: 25 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ: 22 กุมภาพันธ์ 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 1 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษและเส้นด้ายอย่างง่ายสำหรับห้องเรียนเคมีที่ทำให้ผู้เรียนเห็นภาพและเรียนรู้ได้ง่าย งานวิจัยที่ใช้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษและเส้นด้ายเน้นการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์เพื่อเป็นทางเลือกเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์ในระบบของเหลวที่ใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ปัจจุบันนักวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายอย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เช่น การวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี การทดสอบด้วยการวัดค่าทางสี การวินิจฉัยสุขภาพ การตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อมและการทดสอบคุณภาพอาหาร เหตุผลที่กระดาษและเส้นด้ายเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการผลิตระบบไมโครฟลูอิดิกส์หรือของไหลจุลภาค ได้แก่ (1) เป็นวัสดุเซลลูโลสที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย (2) เข้ากันได้กับสารเคมีทางชีวเคมีและการแพทย์ และ (3) สามารถขนส่งของเหลวด้วยแรงแคปิลลารีโดยไม่ต้องอาศัยแรงภายนอก โดยการสร้างช่องไมโครฟลูอิดิกส์บนกระดาษด้วยรูปแบบต่างๆ จะทำให้การไหลของของเหลวบนกระดาษถูกจำกัดอยู่ภายในช่องที่กำหนด ดังนั้น การไหลของของเหลวจึงสามารถถูกนำทางในลักษณะที่ควบคุมได้ การวิจัยเกี่ยวกับไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษกำลังเป็นที่นิยม ผลงานที่เผยแพร่ส่วนใหญ่ได้เน้นไปที่ (1) การประดิษฐ์อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่ใช้กระดาษต้นทุนต่ำและใช้เทคนิคที่เรียบง่าย และ (2) การใช้งานอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษโดยผสมผสานวิธีการตรวจจับแบบใหม่ๆ เช่น การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องสามาร์ทโฟนด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์สีที่มีประสิทธิภาพและรู้ผลได้ไว โดยบทความนี้ได้ทบทวนทั้งเทคนิคการประดิษฐ์และการประยุกต์ใช้ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษและเส้นด้ายด้วยการทดลองที่หลากหลาย แต่คำนึงถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนรู้ โดยได้รวบรวมทั้งด้านจุดเด่นและจุดควรปรับปรุงของงานวิจัยที่เผยแพร่ตั้งแต่ปี พ .ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน

คำสำคัญ: การทดลองในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์แบบกระดาษ อุปกรณ์แบบเส้นด้าย การเรียนรู้แบบลงมือปฏิบัติ ห้องเรียนเคมี

Online-First Version

Academic Article

Review on the development of simple paper-based and thread-based devices for chemistry classrooms

Phetvilay Khattiyavong[1], Saksri Supasorn[2], and Sanoe Chairam[2*]

[1]*Science Education Program, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand*

[2]*Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand*

**Email: sanoe.c@ubu.ac.th*

Received <25 January 2022>; Revised <22 February 2022>; Accepted <1 March 2022>

Abstract

This article gathered research articles involving development of simple paper- and thread-based analytical devices for chemistry classrooms allowing students to visualize and learn easily. This type of analytical devices has been developed as an alternative analytical method to high cost of conventional liquid-based instrumental analysis. Currently, researchers have been developing simple paper- and thread-based devices for variety of analyses, for examples, determination of chemical reaction rate, colorimetric analysis, health diagnostics, environmental Chemical Analysis, and food quality analysis. Paper- and thread-based devices are gaining their popularity in microfluidic or flow system since (1) these low cost and available cellulose-based materials, (2) compatible with biochemical and medical chemicals, and (3) liquid transportable via capillary force with no external force required. In paper-based device, microfluidic channels are created with different patterns so liquid can flow only in the given channel. In other word, the flow of liquid in microfluidic devices can be controlled. Research concerning paper-based microfluidic device is gaining its' popularity. The most of published research focuses on (1) fabrication of low-cost paper-based microfluidic device with simple technique, and (2) applications of paper-based microfluidic device coupled with new detection methods such as analysis of images captured by smartphones using efficient and rapid color processing software. In this article, both fabrication techniques and various experiments of paper- and thread-based microfluidic devices concerning their detection efficiency and applications in classrooms published in periodic journals since 2007 are reviewed. In addition, strengths and weaknesses of the reviewed articles are discussed.

Keywords: Laboratory experiments, paper-based devices, thread-based devices, hands-on learning, chemistry classroom

Online-First Version

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

บทนำ

การเรียนรู้วิชาเคมีจำเป็นต้องมีการจัดการสอนแบบบรรยายควบคู่ไปกับการลงมือทำปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม การทดลองในห้องปฏิบัติการยังเป็นการใช้อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่มีขนาดใหญ่และใช้ปริมาณสารเคมีจำนวนมาก ดังนั้น แนวคิดในการสร้างอุปกรณ์ขึ้นเองโดยผลการทดลองยังคงเดิมจึงน่าจะช่วยลดปัญหาการจัดการเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการได้ ในปัจจุบัน ปฏิบัติการทดลองแบบกระดาษและเส้นด้ายกำลังได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากกระดาษและเส้นด้ายเป็นวัสดุที่มีราคาถูก น้ำหนักเบาและสามารถออกแบบหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบได้ง่ายตามที่ต้องการ นอกจากนี้ ยังสามารถนำมารีไซเคิลและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติที่พบในกระดาษและเส้นด้ายส่วนใหญ่ประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และเพคติน (pectin) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามชนิดของพืช เซลลูโลสจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งในกลุ่มของสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) เซลลูโลสประกอบด้วยไมโครไฟบริล (microfibrils) จำนวนมากซึ่งประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคส (glucose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ในตำแหน่ง β-1,4 เป็นสายยาว (Mahadeva et al., 2015)

กระดาษและเส้นด้ายได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในศาสตร์ของไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล (แก๊สหรือของเหลว) ในระบบจุลภาค ไมโครฟลูอิดิกส์เป็นวิทยาการที่อาศัยองค์ความรู้ที่จากศาสตร์ฟิสิกส์บางประการ อาทิ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือการไหลโดยอาศัยแรงแคปิลลารี (capillary forces) การไหลของของไหลที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ตามสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) เป็นต้น จุดประสงค์หลักของการพัฒนาไมโครฟลูอิดิกส์คือความต้องการที่จะย่อส่วนการทดลองต่างๆ ในห้องปฏิบัติการทั่วไปลงบนอุปกรณ์ขนาดเล็กมากที่เรียกว่า “lab-on-a-chip (LOC)” นอกจากนี้ การทดลองบนพื้นฐานไมโครฟลูอิดิกส์ยังง่ายต่อการพกพาออกไปนอกห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้สามารถวินิจฉัยโรคในสถานที่ที่คนไข้อยู่ได้ (point-of-care diagnostics) โดยไม่จำเป็นต้องนำไปตรวจที่โรงพยาบาลหรือสถานบริการทางการแพทย์ ไมโครฟลูอิดิกส์เกี่ยวข้องกับการสร้างระบบที่ใช้การลำเลียงสารผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กในช่อง 10-100 ไมโครเมตร เพื่อใช้ตรวจวัดในระบบที่มีปริมาตรของสารในช่วง 10^{-9} – 10^{-6} ลิตร หรือในช่วงนาโนลิตรถึงไมโครลิตร โดยมีเป้าหมายให้ทุกขั้นตอนเป็นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาที่ทำอยู่ในชุดการทดลองที่มีขนาดใหญ่หรือในเครื่องแก้ว อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษเริ่มต้นโดยกลุ่มงานวิจัย Martinez et al. (2007) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษและเส้นด้ายในการทดลองด้วยวิธีการต่างๆ มากมาย อาทิ การพิมพ์ขี้ผึ้งด้วยเทคโนโลยีอิงค์เจ็ทเพื่อสร้างสิ่งกีดขวางทางกายภาพที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษ (Nilghaz et al., 2019) เป็นต้น

การพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์

กระดาษเป็นวัสดุบางซึ่งทำมาจากเส้นใยธรรมชาติ ราคาถูกและสามารถหาได้ทั่วไป ดังนั้น อุปกรณ์แบบกระดาษจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก พกพาได้ ง่ายต่อการใช้งาน อีกทั้งยังใช้ปริมาณสารเคมีน้อย และปริมาณตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ก็น้อยด้วยเช่นกัน อุปกรณ์แบบกระดาษถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดแบบเทียบสี เช่น การมองด้วยตาเปล่า การใช้กล้องถ่ายรูป หรือการใช้เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น จากนั้นก็นำมาวิเคราะห์ความเข้มของสีด้วยโปรแกรม ImageJ (ImageJ software, 2021) อุปกรณ์แบบกระดาษมักนิยมนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์จุลภาคแบบกระดาษ (microfluidic paper-based analytical device ; μPAD) ซึ่งมีหลักการที่สำคัญ คือ การสร้างลวดลายบนกระดาษ ทำให้กระดาษ ที่สร้างได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic region) ซึ่งเป็นบริเวณที่เคลือบด้วยสารที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ และส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic region) ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาซึ่งเกิดจากขอบเขตที่กำหนดขึ้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำนั้นจะช่วยในการควบคุมทิศทางการแพร่ของสารละลายโดยใช้หลักการแพร่ของสารในท่อขนาดเล็กที่เรียกว่า “การซึมตามรูเล็ก (capillary action)” ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้แรงจากภายนอก (Martinez et al., 2007) ทั้งนี้ อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งอาศัยเทคนิคในการ

Online-First Version

ตรวจวัดต่างๆ มาประยุกต์ร่วมกัน เช่น การตรวจวัดทางสี (colorimetric detection) และการวัดทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical detection) เป็นต้น

ปัจจุบัน นักวิจัยสนใจที่พัฒนาวิธีการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ กระบวนการขึ้นรูปขอบเขตหรือจำกัดพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำมีวิธีการที่หลากหลายและแตกต่างกันออกไป วิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษที่ควรรู้จักสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ

วิธีการประดิษฐ์	วัสดุ/อุปกรณ์ที่ใช้	การขึ้นรูป	ค่าใช้จ่าย	ที่มาของงานวิจัย
1. การพิมพ์ด้วยแสง (photolithography)	wax	รังสียูวี รังสีเอกซ์ เลเซอร์	สูง	Martinez et al. (2007);
2. การวาดลายโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ (plotting)	polydimethylsiloxane (PDMS)	ให้ความร้อนโดยใช้เตาอบ	ค่อนข้างสูง	Bruzewicz et al. (2008)
3. การวาดลายโดยใช้ปากกาขี้ผึ้ง	wax	ให้ความร้อนโดยใช้ hot plate	ต่ำ	Xu et al. (2015); Chatmontree et al. (2015)
4. การสกรีนด้วยขี้ผึ้ง	wax	ให้ความร้อนโดยใช้เตาอบและเครื่องเป่าผม	ต่ำ	Sameenoi et al. (2014); Namwong et al. (2018); Naksen et al. (2021)
5. การประทับแม่พิมพ์ที่มีขี้ผึ้งหลอมเหลวบนกระดาษ	wax	ให้ความร้อนโดยใช้ hot plate	ค่อนข้างสูง	Zhang et al. 2014)
6. การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง	wax	ให้ความร้อนโดยใช้ hot plate	ค่อนข้างสูง	Nilghaz et al. (2019)
7. การสกรีนด้วยน้ำยาง	rubber latex	การสกรีน	ต่ำ	Kajornklin et al. (2020)

การเลือกใช้วิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบใดนั้นก็ขึ้นกับความสะดวกและบริบทของงานวิจัย ทั้งนี้ การสร้างอุปกรณ์ต้องมีขั้นตอนในการขึ้นรูปที่ง่ายและไม่ซับซ้อนเกินไป อุปกรณ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วต้องมีความคงทนต่อการใช้งานและสามารถประดิษฐ์ได้จำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปบนกระดาษก็ต้องสามารถหาซื้อได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์ขนาดใหญ่ในการขึ้นรูป การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกฉีด (inject printing) และการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax screen printing) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสูง อาทิ กลุ่มงานวิจัย Sameenoi et al. (2014) ได้พัฒนาเทคนิคการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ราคาถูก ง่ายต่อการขึ้นรูปและใช้เวลาสั้น การขึ้นรูปอุปกรณ์แบบกระดาษประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรก คือ ออกแบบรูปแบบช่องการไหลที่ต้องการและทำการพิมพ์ขี้ผึ้งลงบนกระดาษส่วนที่ต้องการให้เป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ โดยจะออกแบบให้เคลือบหรือพิมพ์ด้วยขี้ผึ้งแข็ง (wax printer) ซึ่งมีขายกันทั่วไป ขั้นตอนที่สอง คือ นำกระดาษที่เคลือบขี้ผึ้งแล้วนั้นวางลงบนแท่นให้ความร้อนเพื่อให้ขี้ผึ้งหลอมเหลวและซึมลงไปในเนื้อกระดาษ ซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณที่ชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำตามที่ผู้วิจัยออกแบบไว้

เส้นด้ายเป็นอีกวัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ในการสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ในการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวางเช่นกัน เส้นด้ายเป็นวัสดุที่ไม่ต้องเสียเวลาขึ้นรูปหรือสร้างลวดลายเพื่อใช้ในการควบคุมการไหลของของไหล ดังนั้น อุปกรณ์วิเคราะห์แบบเส้นด้ายจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีราคาถูก พกพาสะดวก ใช้งานได้

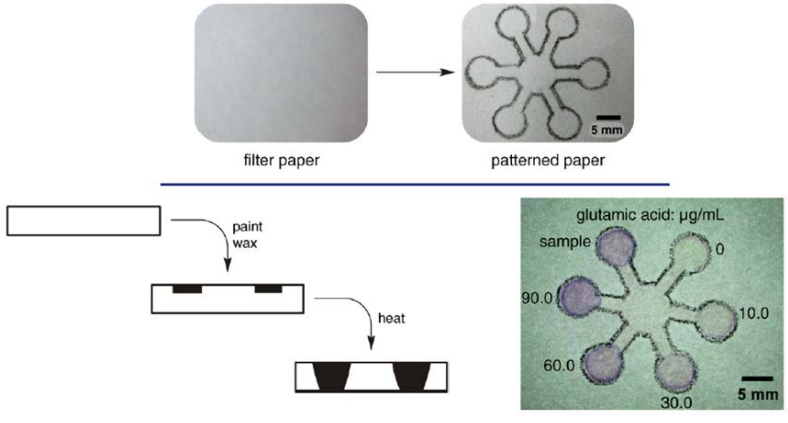
Online-First Version

ง่าย และสามารถนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดอื่น ๆ เช่นเดียวกับอุปกรณ์แบบกระดาษ ตัวอย่างเช่น Reches et al. (2010) พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์จุลภาคแบบเส้นด้าย (microfluidic thread-based analytical device; μPAD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สารกลุ่มโปรตีน ไนไตรต์ และคีโตน ทั้งนี้ สารที่ใช้ในการวิเคราะห์จะถูกเคลือบไว้ที่ปลายของเส้นด้าย สารตัวอย่างสามารถไหลไปตามเส้นด้ายด้วยแรงแคปิลลารี โดยไม่ต้องอาศัยปั๊มภายนอกช่วยในการไหล อุปกรณ์วิเคราะห์จากเส้นด้ายนี้สามารถประยุกต์การตรวจวัดทางสีได้เป็นอย่างดี ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แม่นยำ และมีประสิทธิภาพเทียบเท่าอุปกรณ์วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยไม่ต้องนำตัวอย่างไปตรวจที่โรงพยาบาลหรือสถานบริการทางการแพทย์

การประยุกต์อุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายในด้านการศึกษา

ในปัจจุบัน อุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายเริ่มถูกนำมาใช้ในการจัดการเรียนรู้ในห้องเรียนวิทยาศาสตร์ทั้งโรงเรียนและมหาวิทยาลัยในประเทศที่กำลังพัฒนา ทั้งนี้ สาเหตุเกิดมาจากอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ทันสมัย สารเคมี และห้องเรียนที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้นักวิจัยทางการศึกษาบางส่วนได้พัฒนาปฏิบัติการอย่างง่ายเพื่อให้การจัดกิจกรรมการเรียนรู้ในชั้นเรียนเป็นไปอย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เทคนิคในการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษและเส้นด้ายก็ต้องพิจารณาจากหลายปัจจัย อาทิ ความพร้อมของอุปกรณ์ ราคาของวัสดุ ขั้นตอนการผลิต และการใช้ประโยชน์ได้จริงในห้องเรียน เป็นต้น

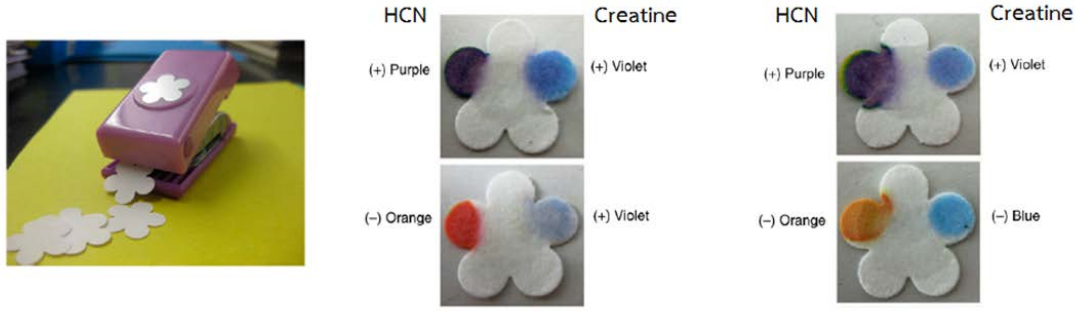
การใช้อุปกรณ์แบบกระดาษในห้องเรียนมีการเผยแพร่ในวารสาร Journal of Chemical Education ครั้งแรกโดยกลุ่มงานวิจัย Cai et al. (2012) ซึ่งได้สร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษอย่างง่ายโดยใช้ปากกาขี้ผึ้งวาดวงกลมบนกระดาษกรองออกเป็น 6 แฉก แต่ละวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm และมีช่องทางการไหลที่เชื่อมต่อกันที่วงกลมศูนย์กลาง จากนั้นจึงนำอุปกรณ์ที่สร้างไปอบที่ 135 °C เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจะทำให้ขี้ผึ้งละลายและซึมเข้าสู่กระดาษเพื่อสร้างผนังช่องทางการไหล ดังแสดงในภาพที่ 1 อุปกรณ์นี้ถูกนำไปตรวจหากรดอะมิโนในสารสกัดจากชาด้วยสารละลายนินไฮดริน (ninhydrin) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนต่ำ ผลิตขึ้นได้ง่ายและสามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนรู้ให้ห้องเรียนได้ การสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษอย่างง่ายนี้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณกรดอะมิโนได้อย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสอนไมโครฟลูอิดิกในห้องเรียนหรือในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือจำกัด นักเรียนสามารถสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ที่เทียบเท่ากับเครื่องมือที่ราคาแพงได้ ผลจากการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษในการวิเคราะห์กรดอะมิโนนี้แสดงให้เห็นว่า นักเรียนมีความกระตือรือร้นในการทดลองและนำผลที่ได้มาแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับเพื่อนในห้องเรียน จึงทำให้บรรยากาศการเรียนมีความสนุกสนาน ซึ่งช่วยให้นักเรียนมีความสนใจที่จะเรียนรู้วิชาการทำความเข้าใจบทเรียน และกล้าแสดงความคิดเห็นมากขึ้น



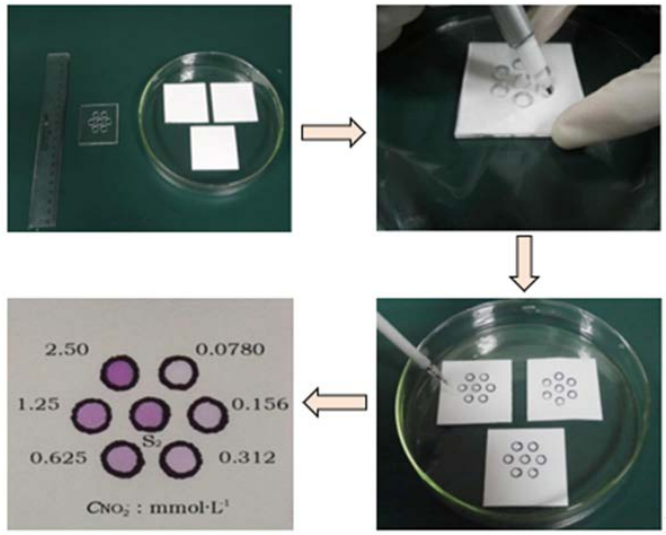
ภาพที่ 1 (บน) โซนวงกลมออกเป็น 6 แฉกบนกระดาษกรอง; **(ล่าง)** ขี้ผึ้งละลายและซึมเข้าสู่กระดาษเพื่อตรวจหาปริมาณกรดอะมิโนในสารสกัดจากชาด้วยสารละลายนินไฮดริน (Cai et al., 2012)

Online-First Version

Ravgiala et al. (2014) ได้ออกแบบอุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษซึ่งสร้างขึ้นได้ง่ายโดยใช้เครื่องเจาะแถบกระดาษให้เป็นรู (scrapbook punch) ที่เป็นรูปแบบพิเศษคล้ายใบไม้ 5 แฉก อุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษอย่างง่ายนี้ถูกนำใช้ในการเรียนรู้สำหรับนักเรียนมัธยมศึกษาเพื่อเป็นต้นแบบของการตรวจพิสูจน์หลักฐานทางนิติเวชวิทยาควบคู่กับการวิเคราะห์ทางสี ดังแสดงในภาพที่ 2 สารต้นแบบของการสืบสวนทางนิติเวชวิทยาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide; HCN) และ ครีเอทีน (creatine) ทั้งนี้ ไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นสารพิษที่พบได้ทั่วไปทั้งในพืชและอุตสาหกรรมหลายชนิด ส่วนครีเอทีนเป็นหนึ่งในอาหารเสริมที่กลุ่มผู้รักสุขภาพและผู้ที่ต้องการสร้างกล้ามเนื้อ การวิเคราะห์ทางสีทำได้โดยหยดยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (universal indicator) กับสารไบยูเรต (biuret reagent) ที่ปลายแฉกของกระดาษแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง เมื่อนำสารตัวอย่างมาหยดแล้วทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที ก็จะปรากฏสีซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จากการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ นักเรียนรู้สึกสนุกกับอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษนี้อย่างมากและได้เรียนรู้การสืบสวนทางนิติเวชวิทยาเบื้องต้นในห้องเรียน



ภาพที่ 2 (ซ้าย) เครื่องเจาะแถบกระดาษให้เป็นรู (scrapbook punch) ที่เป็นรูแบบพิเศษคล้ายใบไม้รูป 5 แฉก; **(ขวา)** การวิเคราะห์ทางสีเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการสืบสวนทางนิติเวชวิทยา (Ravgiala et al., 2014)



ภาพที่ 3 สร้างชุดการทดลองไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษด้วยปากกามาร์คเกอร์เคมีชนิดถาวรเพื่อใช้หาปริมาณไนเตรต์ไอออน (NO_2^-) (Wang et al., 2015)

Wang et al. (2015) ได้สร้างชุดการทดลองไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษด้วยปากกามาร์คเกอร์เคมีชนิดถาวร (permanent marker pen) เพื่อใช้หาปริมาณไนเตรต์ไอออน (NO_2^-) โดยวิธีการตรวจวัดทางสี ชุดการทดลองแบบกระดาษมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรก ตัดกระดาษกรองขนาด 5 cm × 5 cm จากนั้น วาดรูปวงกลมจำนวน 7 วง ด้วยปากกามาร์คเกอร์เคมีชนิดถาวร ขั้นตอนต่อมา หยดอินดิเคเตอร์ซึ่งประกอบด้วย *p*-amino benzenesulfonamide และ *N*-(1-naphthyl)ethylenediamine ลงในช่องวงกลม แล้วทิ้งไว้แห้งในที่มืดเป็นเวลา

Online

ประมาณ 20 นาที ขั้นตอนสุดท้าย หยดสารละลายโซเดียมไนไตรต์มาตรฐานความเข้มข้น 0.0780, 0.156, 0.312, 0.625, 1.25 และ 2.50 mmol·L^{-1} แล้วทิ้งไว้ในที่มืดประมาณ 2 นาที ก็จะปรากฏสีซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า แต่ละวงกลมจะความเข้มของสีที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของไนไตรต์ ทั้งนี้ นักเรียนสามารถใช้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งโปรแกรมที่ใช้ในการอ่านความเข้มสีเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต์ไอออนในสารละลายตัวอย่างทันทีโดยไม่ต้องพึ่งพาอุปกรณ์ขนาดใหญ่ ขั้นตอนในการสร้างชุดการทดลองไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษด้วยปากกามาร์คเกอร์เคมีชนิดถาวรเพื่อใช้หาปริมาณไนเตรต์ไอออนและปฏิกิริยาที่ใช้ในการตรวจวัดไนเตรต์ไอออนแสดงในภาพที่ 3 อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนต่ำ ผลิตขึ้นได้ง่าย สามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนรู้ให้ห้องเรียนและสามารถนำไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต์ไอออนในอาหารได้

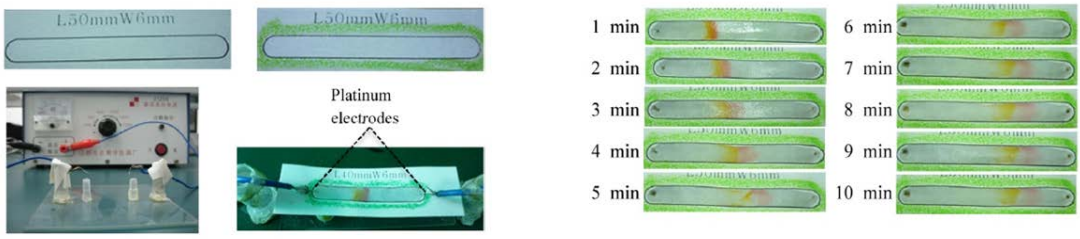
Chatmontree et al. (2015) ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์สาธิตการทดลองเซลล์กัลวานิกแบบกระดาษอย่างง่าย เพื่อศึกษาปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า อุปกรณ์แบบกระดาษถูกออกแบบเป็นโซนรูปวงกลม 6 แฉก จากนั้น สร้างระบบช่องทางการไหลโซนวงกลมทั้ง 6 แฉก แต่ละวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm และมีช่องทางการไหลที่เชื่อมต่อกันที่วงกลมศูนย์กลาง จากนั้น สร้างผนังในระบบช่องทางการไหลด้วยวิธีการอย่างง่ายโดยการเขียนขี้ผึ้งจากเทียนไขและนำอุปกรณ์ที่สร้างไปอังบนเตาให้ความร้อน เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจะทำให้ขี้ผึ้งละลายและซึมเข้าสู่กระดาษเพื่อสร้างผนังช่องทางการไหล แต่ละช่องทางการไหลจะถูกฝังด้วยแผ่นโลหะที่แตกต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) เงิน (Ag) และดีบุก (Sn) ตามลำดับ พร้อมหยดสารละลายไอออนตัวเดียวกันกับชนิดแผ่นโลหะที่ช่องโซนวงกลม อาทิ ในช่องโลหะทองแดง (Cu) ก็จะหยดด้วยสารละลายคอปเปอร์(II) ซัลเฟต ($CuSO_4$) เป็นต้น ส่วนวงกลมศูนย์กลางให้หยดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสะพานเกลือ (salt bridge) ที่เชื่อมแต่ละครึ่งเซลล์เข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 4 จากนั้นทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคู่เซลล์ที่ต้องการศึกษาโดยใช้มัลติมิเตอร์ (multimeter) นอกจากนี้ การใช้ภาพแทน (sub-microscopic representation) ยังเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ อุปกรณ์สาธิตการทดลองเซลล์กัลวานิกแบบกระดาษอย่างง่ายนี้ถูกนำไปใช้ในการจัดการเรียนรู้ เรื่อง เซลล์กัลวานิกในเคมีไฟฟ้าตั้งแต่ระดับมัธยมศึกษาจนถึงระดับมหาวิทยาลัยได้

ภาพที่ 4 (ซ้าย) อุปกรณ์สาธิตการทดลองเซลล์กัลวานิกแบบกระดาษอย่างง่าย; **(ขวา)** การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคู่เซลล์และการใช้ภาพแทน sub-microscopic representation อธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Chatmontree et al., 2015)

Xu et al. (2016) ได้พัฒนาอุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสแบบกระดาษอย่างง่ายเพื่อใช้แยกสารสีสังเคราะห์ที่มีมวลโมเลกุลสูง อุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสแบบกระดาษถูกออกแบบให้เป็นทางตรงและมีขนาดเล็ก โดยมีความกว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร จากนั้น สร้างระบบช่องทางการไหลด้วยการเขียนด้วยขี้ผึ้ง ต่อมาก็นำไปเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์แบบกระดาษที่มีแผ่นโลหะแพลตินัม (platinum) เป็นขั้วไฟฟ้า

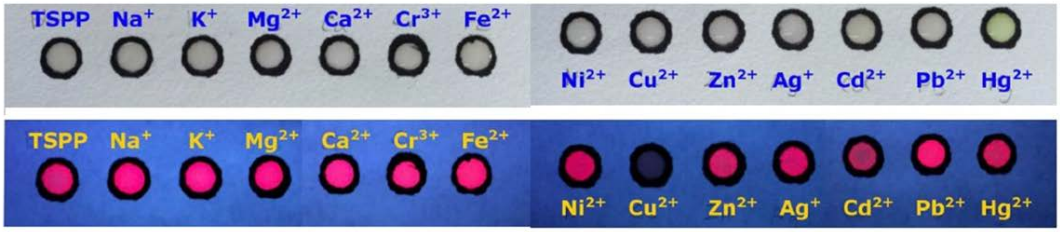
Original Version

สุดท้ายหยดสารละลายผสมที่ประกอบไปด้วย carmine และ sunset yellow แล้วใช้ความต่างศักย์ 250 โวลต์ เพื่อแยกสารสีสังเคราะห์ออกจากกัน อุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสแบบกระดาษอย่างง่ายนี้สามารถแยก carmine และ sunset yellow ออกจากกันโดยใช้เวลาที่ประมาณ 6-10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 (ซ้าย) อุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสแบบกระดาษอย่างง่าย; และ **(ขวา)** การแยก carmine และ sunset yellow ออกจากกันในช่วงเวลา 1-10 นาที (Xu et al., 2016)

Prabpal et al. (2017) ได้พัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษอย่างง่ายเพื่อใช้วิเคราะห์โลหะหนักด้วย tetrakis(4-sulfonatophenyl)porphyrin (TSPP) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบพอไฟริน เมื่อผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ ผลผลิตของ TSPP ที่ได้มีค่าเท่ากับ 45% ซึ่งเพียงพอเพียงสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นรีเอเจนต์บนอุปกรณ์แบบกระดาษอย่างง่ายเพื่อใช้วิเคราะห์โลหะควบคู่กับการตรวจวัดทางสี เบื้องต้นนำหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cr^{3+}, Fe^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Ag^+, Cd^{2+}, Pb^{2+} และ Hg^{2+} เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงทั้งการสังเกตสีด้วยตาเปล่าและการวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนชนิดอื่น ๆ ไอออน Hg^{2+} และ Cd^{2+} ให้ผลการเปลี่ยนแปลงทั้งทางสีที่สังเกตด้วยตาเปล่าและทางฟลูออเรสเซนซ์ที่ในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ไอออน Cu^{2+} ให้ผลการเปลี่ยนแปลงทางฟลูออเรสเซนซ์ที่ชัดเจนที่สุด ผลการทดสอบในหลอดทดลองสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทั้งทางสีด้วยตาเปล่าและทางฟลูออเรสเซนซ์หลังจากที่หยดสารละลาย TSPP ในช่องวงกลมสำหรับทดสอบ (test zone) บนอุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 6 ดังนั้น งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการและยังสามารถนำอุปกรณ์แบบกระดาษอย่างง่ายนี้ไปปรับใช้ในการเรียนการสอนหัวข้ออื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้ อาทิ การทดลองที่เกี่ยวข้องกับการตรวจหาโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำที่ใช้ในชีวิตประจำวันและสิ่งแวดล้อมรอบตัว เช่น น้ำดื่มที่จำหน่ายตามท้องตลาด น้ำจากน้ำบาดาล หรือน้ำจากแม่น้ำ ลำคลอง เป็นต้น

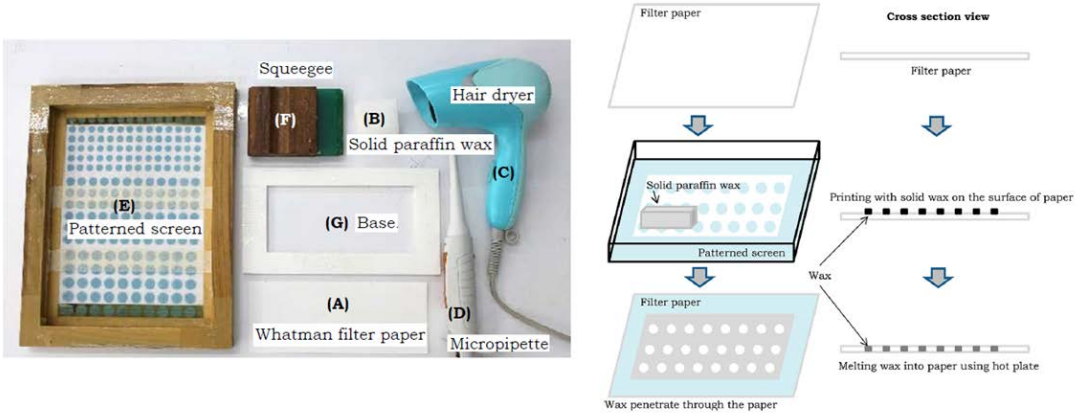


ภาพที่ 6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางสีที่สังเกตด้วยตาเปล่าและทางฟลูออเรสเซนซ์แบบกระดาษอย่างง่าย (Prabpal et al., 2017)

Namwong et al. (2018) ได้สร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษด้วยเทคนิคการพิมพ์สกรีนเพื่อจัดการเรียนรู้ทางเคมี เรื่อง สารกำหนดปริมาณ (limiting reagent) โดยใช้ปฏิกิริยากรด-เบส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ในงานวิจัยนี้ นักเรียนได้ลงมือประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์กระดาษด้วยตนเอง อุปกรณ์สาธิตและขั้นตอนในการสร้างการทดลองแบบกระดาษอย่างง่ายแสดงดังภาพที่ 7 ปฏิกิริยากรด-เบส ที่ใช้ในการศึกษาสารกำหนดปริมาณประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาระหว่าง Na_2CO_3 กับ CH_3COOH, $NaHCO_3$

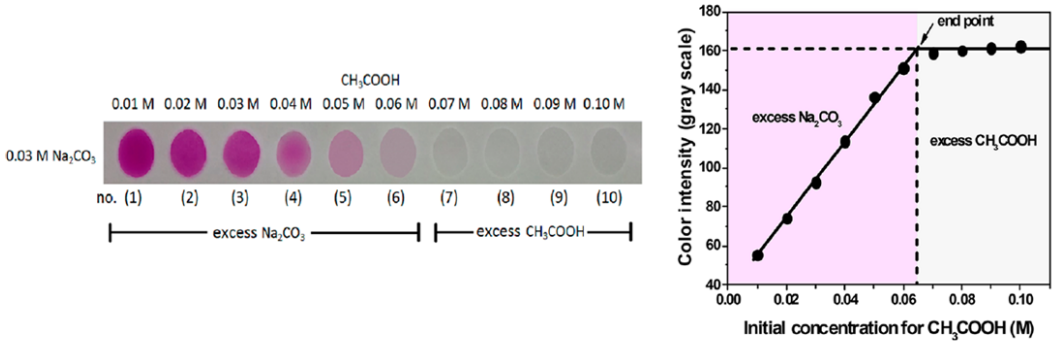
Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

กับ CH_3COOH และ NaOH กับ CH_3COOH ตามลำดับ ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้ใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ในการสังเกตการเปลี่ยนสี



ภาพที่ 7 (ซ้าย) อุปกรณ์สาธิตที่จำเป็นสำหรับการสร้างการทดลองแบบกระดาษอย่างง่าย และ **(ขวา)** ขั้นตอนในการสร้างการทดลองแบบกระดาษอย่างง่าย (Namwong et al., 2018)

เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลาย 0.03 M Na_2CO_3 ในช่องวงกลมสำหรับทดสอบ (test zone) ในแต่ละช่องคงที่ จากนั้น หยดสารละลาย CH_3COOH ลงแต่ละในช่องวงกลมโดยเปลี่ยนความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.10 M ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า นักศึกษาสามารถทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษเพื่อระบุสารกำหนดปริมาณ (limiting reagent) และสารมากเกินพอ (excess reagent) ได้อย่างถูกต้องโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางสีด้วยตาเปล่า ผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการวิเคราะห์ความเข้มของสี (สีเทา) ด้วยโปรแกรม ImageJ (ImageJ software, 2021) ดังแสดงในภาพที่ 8 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้ เรื่อง สารกำหนดปริมาณโดยใช้อุปกรณ์สาธิตการทดลองแบบกระดาษอย่างง่ายนี้มีส่วนช่วยส่งเสริมให้นักเรียนมีความเข้าใจในแนวคิดสารกำหนดปริมาณจากปฏิกิริยากรด-เบส ได้ นักเรียนมีคะแนนหลังสอบเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

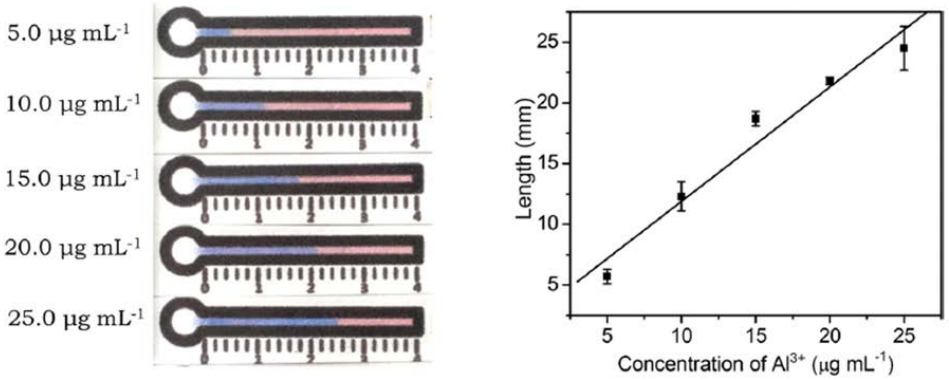


ภาพที่ 8 (ซ้าย) อุปกรณ์แบบกระดาษเพื่อศึกษาสารกำหนดปริมาณจากปฏิกิริยาระหว่าง Na_2CO_3 กับ CH_3COOH; **(ขวา)** การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการวิเคราะห์ความเข้มของสี (สีเทา) ด้วยโปรแกรม ImageJ (Namwong et al., 2018)

Lai et al. (2020) ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาษด้วยการวัดระยะทางซึ่งสามารถสังเกตเห็นสีได้ด้วยตาเปล่าเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในยาลดกรด การขึ้นรูปอุปกรณ์อาศัยการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์แว็กซ์ (wax printer) อุปกรณ์กระดาษนี้มีลักษณะคล้ายปรอทโดยมีช่องวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นช่องสำหรับหยดสารละลายตัวอย่าง (sample zone) และสร้างช่องทางการไหลขนาด 2 x 40

First Version

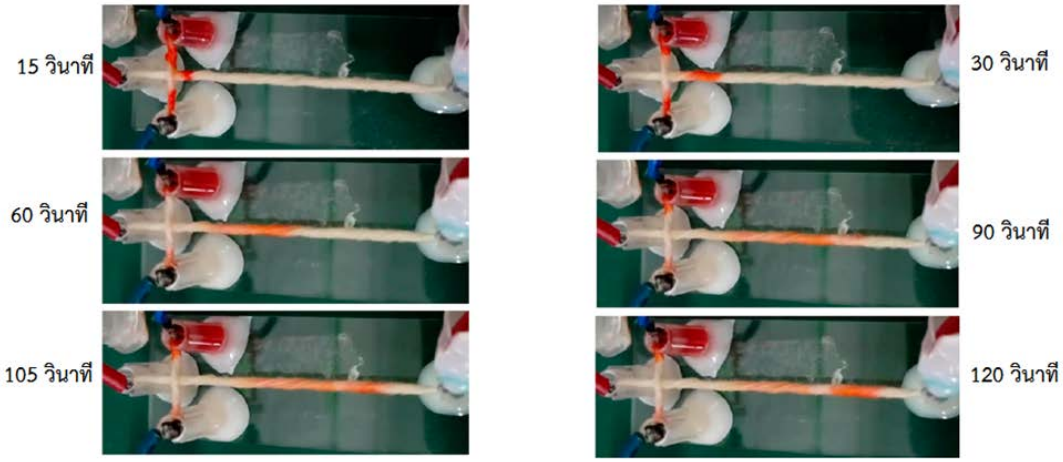
มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำอุปกรณ์ที่สร้างไปอบที่ 120 °C เป็นเวลา 90 วินาที ซึ่งจะทำให้ขี้ผึ้งละลายและซึมเข้าสู่กระดาษเพื่อสร้างผนังช่องทางการไหล การตรวจวัดจะอาศัยการสร้างสารเชิงซ้อนที่มีจากปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมไอออน กับสารให้สีซึ่งเป็นของผสมระหว่าง chrome azurol S (CAS) และ cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) สร้างกราฟมาตรฐานโดย นำสารละลายอลูมิเนียมไอออน ความเข้มข้น 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 $\mu g\ mL^{-1}$ หยดลงในช่องวงกลมสำหรับทดสอบ จากนั้น อลูมิเนียมไอออนที่ไหลไปตามช่องทางการไหลจะทำปฏิกิริยากับสารให้สี และให้สีน้ำเงินซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการกราฟสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของอลูมิเนียมไอออน กับระยะทางของสีน้ำเงินที่วัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 9 นักเรียนมีความพอใจต่ออุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษด้วยการวัดระยะทางเป็นอย่างยิ่งเพราะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในยาลดกรดได้



ภาพที่ 9 (ซ้าย) อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบกระดาษด้วยการวัดระยะทาง; **(ขวา)** กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) กับระยะทางของสีน้ำเงิน (Lai et al., 2020)

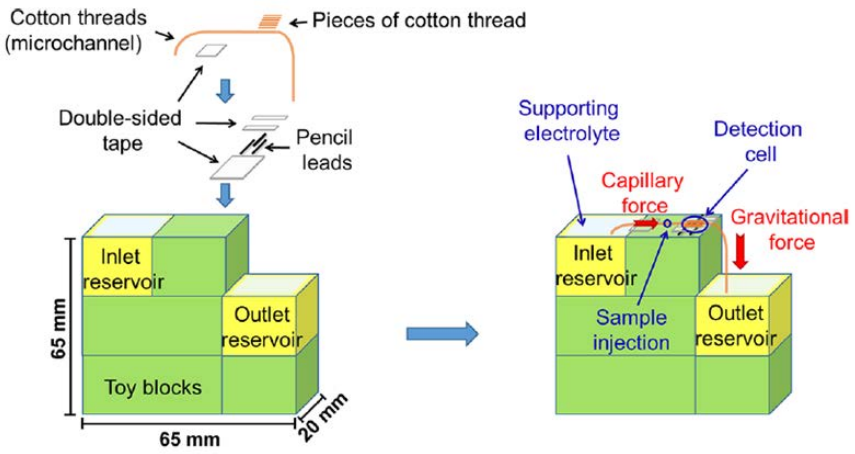
นอกจากอุปกรณ์แบบกระดาษแล้ว อุปกรณ์แบบเส้นด้ายก็สามารถในไปประยุกต์ในด้านการเรียนการสอนด้วยเช่นกัน ในปี 2018 กลุ่มงานวิจัย Xu et al. (2018) ตีพิมพ์ผลงานลงวารสาร Journal of Chemical Education ครั้งแรก โดยการนำเส้นด้ายมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสเพื่อใช้แยกสารสีสังเคราะห์ที่มีมวลโมเลกุลสูงในสีผสมอาหาร วัสดุที่จำเป็นสำหรับการสร้างอุปกรณ์แบบเส้นด้ายและตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสแสดงในภาพที่ 10 เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) และให้ความต่างศักย์ที่เหมาะสมแก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ อุปกรณ์แบบเส้นด้ายนี้สามารถแยกสารสีสังเคราะห์ที่มีมวลโมเลกุลสูง ได้แก่ carmine และ sunset yellow ออกจากกันได้ภายในเวลา 2 นาที เนื่องด้วยอุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสอย่างง่ายนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการขึ้นรูป และง่ายต่อการใช้งาน อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบเส้นด้ายนี้จึงถูกนำใช้ในการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษาระดับมหาวิทยาลัย จากการสังเกตในห้องปฏิบัติการ นักศึกษาสามารถสร้างอุปกรณ์การทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสด้วยตนเอง ดังนั้น อุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสนี้ทำให้นักศึกษามีความรู้สึกสนุกสนานในการเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการเพราะผลการทดลสองสามารถสังเกตได้ง่ายบนเส้นด้าย ซึ่งมีส่วนช่วยกระตุ้นความความสนใจในการเรียนรู้วิชาในกลุ่มสาขาเคมีวิเคราะห์ในหัวข้อเคมีไฟฟ้าจากการแยกสารด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส

Online-First



ภาพที่ 10 อุปกรณ์สาธิตการทดลองอิเล็กโทรโฟรีซิสเพื่อใช้แยกสารสีสังเคราะห์ที่มีมวลโมเลกุลสูงในสีผสมอาหารที่มีมวลโมเลกุลสูงในสีผสมอาหารในช่วงเวลา 120 วินาที (Xu et al., 2018)

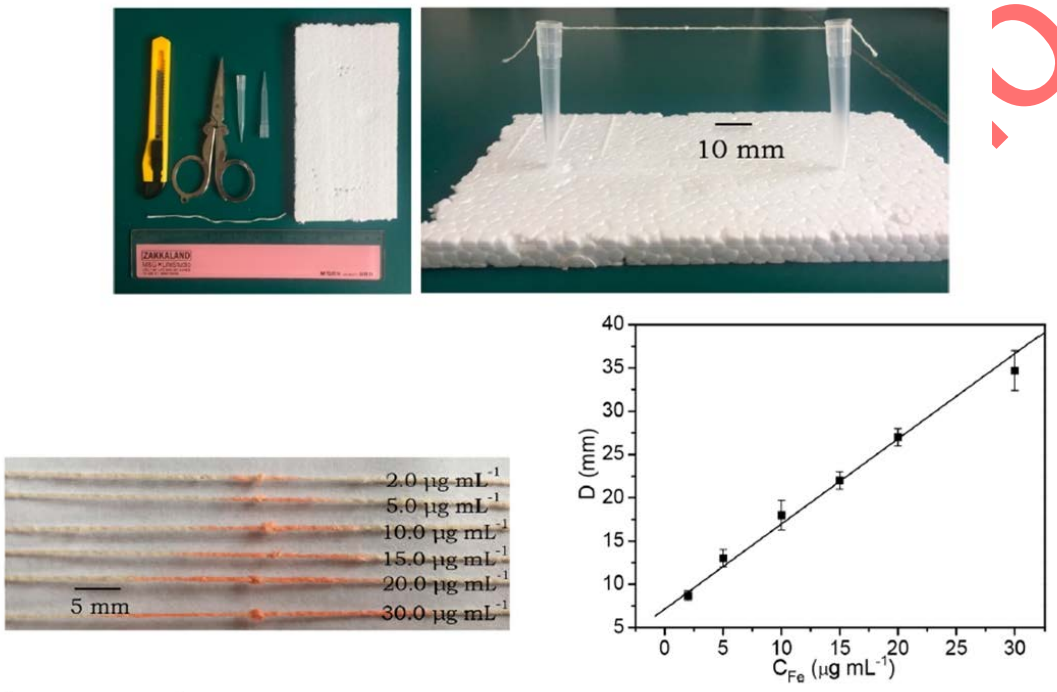
Agustini et al. (2018) ได้นำเอาเส้นด้ายมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า อย่างง่ายที่มีต้นทุนต่ำ วัสดุที่นำมาสร้างอุปกรณ์ประกอบด้วยบล็อกของเล่น เทปสองหน้า ไส้ดินสอ และเส้นด้ายจากฝ้าย การไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อาศัยแรงแคปิลลารี ควบคู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังแสดงในภาพที่ 11 อุปกรณ์นี้มีราคาประมาณ 33 บาท/ชุด ให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ที่ดีเทียบเท่ากับเครื่องมือทางเคมีไฟฟ้าขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ นักศึกษาสามารถวิเคราะห์หาปริมาณตัวอย่างที่สนใจ อาทิ กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid)ได้ด้วยอุปกรณ์นี้ งานวิจัยนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการเรียนสอนในห้องปฏิบัติเคมีวิเคราะห์ด้วยเคมีไฟฟ้าในระดับปริญญาตรีได้



ภาพที่ 11 (ซ้าย) วัสดุที่นำมาสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าไมโครฟลูอิดิกส์ และ **(ขวา)** หลักการทำงานอาศัยอาศัยแรงแคปิลลารีควบคู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก (Xu et al., 2018)

Cai et al. (2019) ได้นำเอาเส้นด้ายจากฝ้ายมาพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์ด้วยการวัดระยะทางซึ่งสามารถสังเกตเห็นสีได้ด้วยตาเปล่าเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณเหล็กไอออน (Fe^{2+}) วัสดุที่จำเป็นสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์เส้นด้ายด้วยการวัดระยะทางและตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์สาธิตการทดลองแสดงในภาพที่ 12 ขั้นตอนการจัดวางอุปกรณ์ทำได้โดยการนำเส้นด้ายมาขึงไว้บนไมโครปิเปต (micropipette) ที่ปักหมุดไว้บนฐานโฟม เส้นฝ้ายดังกล่าวจะถูกมัดเป็นปม (knot) ไว้ตรงกลาง จากนั้นทำการหยด

สารละลาย 1,10-phenanthroline ลงบนเส้นด้ายแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นหยดสารละลาย Fe^{2+} ความเข้มข้น 2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 30.0 μg mL^{-1} ลงบนปมไว้ตรงกลางของเส้นด้าย สารละลาย Fe^{2+} ที่ไหลไปตามเส้นด้ายจะทำปฏิกิริยากับ 1,10-phenanthroline ที่เคลือบอยู่บนเส้นด้าย เกิดสีแดงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าก็ทำการวัดความยาวของแถบสีด้วยไม้บรรทัดเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน ชุดการทดลองนี้มีข้อดีคือใช้งานง่าย มีต้นทุนต่ำ ขึ้นรูปง่าย และลดการใช้สารเคมีในห้องปฏิบัติการ การทดลองนี้สามารถจัดเป็นปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{2+} ชั่วโมงปฏิบัติการ 3 ชั่วโมง ผู้วิจัยนำการทดลองนี้ไปใช้ในการเรียนรู้ระดับปริญญาตรี 7 ภาคเรียน พบว่านักศึกษามีความสนุกกับการประดิษฐ์อุปกรณ์วิเคราะห์แบบเส้นด้ายและมีความพอใจต่ออุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์แบบเส้นด้ายนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{2+} ในตัวอย่างได้จริง



ภาพที่ 12 (บน) วัสดุที่จำเป็นสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์เส้นด้ายด้วยการวัดระยะทางและตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์สาธิตการทดลอง; **(ล่าง)** แถบสีบนเส้นด้ายและกราฟมาตรฐานที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นของ Fe^{2+} กับระยะที่วัดได้ (Cai et al., 2019)

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายสำหรับห้องเรียนเคมี อุปกรณ์อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้ทั้งการสาธิตทดลองในห้องบรรยายและการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับเรียนรู้เนื้อหาเคมีอย่างมากมาย อาทิ สารกำหนดปริมาณ กรด-เบส และเคมีไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้ อุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายยังสามารถนำไปประยุกต์ควบคู่กับการตรวจวัดด้วยวิธีการอื่น เช่น การตรวจวัดทางสี การตรวจวัดด้วยกระแสไฟฟ้า การตรวจวัดทางฟลูออเรสเซนซ์ และการตรวจวัดด้วยระยะทาง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารทางนิติเวชวิทยาที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันได้ เช่น การตรวจวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน การตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต์ไอออน และการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก เป็นต้น เนื่องด้วยข้อดีหลายประการ เช่น ต้นทุนที่ต่ำ อุปกรณ์มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้สารเคมี สามารถตรวจวิเคราะห์สารได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญการทดสอบและไม่ต้องพึ่งเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่ตอบโจทย์งานวิจัยในอนาคตได้เป็นอย่างดี

Online-

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

ในปัจจุบัน การพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายสำหรับการนำใช้ในการจัดการเรียนรู้ในห้องเรียนยังมีน้อยและยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ดังนั้น การทบทวนการพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายอย่างง่ายในบทความนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยสร้างแรงบันดาลใจสำหรับ นิสิต/นักศึกษาวิชาชีพ ครูประจำการและนักวิจัยวิทยาศาสตร์ศึกษาที่จะศึกษา ค้นคว้า รวบรวมและต่อยอดการพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษและเส้นด้ายอย่างง่ายเพื่อเป็นสื่อการสอนสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในห้องบรรยายและในห้องปฏิบัติการเคมีในโรงเรียนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ และแสดงความรู้บุณคุณเป็นอย่างสูงต่อผู้วิจัย และกลุ่มทีมงานวิจัยทั้งภายในและต่างประเทศที่พวกท่านได้ทุ่มเทแรงกายแรงใจในการทำงาน ในการคิดค้น และต่อยอดงานวิจัยที่ดีออกมา งานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมีคุณค่าอย่างมากต่อครู ต่อผู้เรียนนักศึกษาหรือนักวิจัยรุ่นใหม่ เพราะงานวิจัยเล่านี้ได้เป็นแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาให้ผู้เรียน หรือครูได้มีวิธีการสอนได้มีชุดการสอนที่สะดวก ที่ง่ายดายที่แม้กระทั่งที่ครูที่สอนอยู่เขตห่างไกลยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในท้องถิ่นของตนเอง

ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อวิทยาลัย ครูสะหวันนะเขต ประเทศลาว และแผนงานการปรับปรุงคุณภาพและขยายโอกาสเข้าเรียนสำหรับการศึกษาขั้นพื้นฐานใน สปป.ลาว (Basic Education Quality and Access in Lao PDR , Australian aid) ที่ให้โอกาสและให้ทุนสนับสนุน

เอกสารอ้างอิง

Agustini, D., Bergamini, M. F., and Marcolino-Junior, L. H. (2018). Simple and inexpensive microfluidic thread based device for teaching microflow injection analysis and electrochemistry. **Journal of Chemical Education**, 95(8), 1411-1414.

Bruzewicz, D. A., Reches, M., & Whitesides, G. M. (2008). Low-cost printing of poly (dimethylsiloxane) barriers to define microchannels in paper. **Analytical chemistry**, 80(9), 3387-3392.

Cai, L., Wu, Y., Xu, C., and Chen, Z. (2012). A simple paper-based microfluidic device for the determination of the total amino acid content in a tea leaf extract. **Journal of Chemical Education**, 90(2), 232-234.

Cai, L., Zhang, X., Luo, L., Lin, H., Chen, J., Xu, C., Zhong, M., and Liao, X. (2019). Visual quantification of Fe on cotton thread using a ruler. **Journal of Chemical Education**, 96(7), 1532-1535.

Chatmontree, A., Chairam, S., Supasorn, S., Amatatongchai, M., Jarujamrus, P., Tamuang, S., and Somsook, E. (2015). Student fabrication and use of simple, low-cost, paper-based galvanic cells to investigate electrochemistry. **Journal of Chemical Education**, 92(6), 1044-1048.

ImageJ software. (2021) https://imagej.nih.gov/ij/ (accessed Nov. 2021).

Kajornklin, P., Jarujamrus, P. , Phanphon, P., Ngernpradab, P., Supasorn, S., Chairam, S., Amatatongchai, M. (2020). Fabricating a low-cost, simple, screen-printed paper towel-based experimental device to demonstrate the factors affecting chemical equilibrium and chemical equilibrium constant, K_c. **Journal of Chemical Education**, 97(7), 1984–1991.

Lai, H., Li, Z., Zhu, S., Cai, L., Xu, C., and Zhou, Q. (2020). Naked-Eye detection of aluminum in gastric drugs on a paper-based analytical device. **Journal of Chemical Education**, 97(1), 295–299.

Online-First Version

Mahadeva, S. K., Walus, K., and Stoeber, B. (2015). Paper as a platform for sensing applications and other devices: a review. **ACS Applied Materials and Interfaces** , 7(16), 8345-8362.

Martinez, A. W., Phillips, S. T., Butte, M. J., and Whitesides, G. M. (2007). Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays. **Angewandte Chemie International Edition**, 46(8), 1318-20.

Namwong, P., Jarujamrus, P., Amatatongchai, M., and Chairam, S. (2018). Fabricating simple wax screen-printing paper-based analytical devices to demonstrate the concept of limiting reagent in acid–base reactions. **Journal of Chemical Education**, 95(2), 305-309.

Naksen, P, Saisui, P., Chomphu, T., Chaksuma, W., Anutrasakda, W. and Jarujamrus, P. (2021). Barcode-like paper sensor for water hardness detection. **Journal of Science and Science Education**, 4(1), 51-61.

Nilghaz, A., Liu, X., Ma, L., Huang, Q., and Lu, X. (2019). Development of fabric-based microfluidic devices by wax printing. **Cellulose**, 26(5), 3589-3599.

Prabpal, J., Vilaivan, T., and Praneenararat, T. (2017) Paper-based heavy metal sensors from the concise synthesis of an anionic porphyrin: a practical application of organic synthesis to environmental chemistry. **Journal of Chemical Education**, 94(8), 1137–1142.

Ravgiala, R. R., Weisburd, S., Sleeper, R., Martinez, A., Rozkiewicz, D., Whitesides, G. M., Hollar, K. A. (2014). Using Paper-based diagnostics with high school students to model forensic investigation and colorimetric analysis. **Journal of Chemical Education**, 91(1), 107-111.

Reches, M., Mirica, K. A., Dasgupta, R., Dickey. M. D., Butte, M. J. and Whitesides, G. M. (2010). Thread as a matrix for biomedical assays. **ACS Applied Materials & Interfaces,** 2, (6) 1722-1728.

Sameenoi, Y., Nongkai, P. N., Nouanthavong, S., Henry, C. S., and Nacapricha, D. (2014). One-step polymer screen-printing for microfluidic paper-based analytical device (μPAD) fabrication. **Analyst**, 139(24), 6580-6588.

Xu, C., Cai, L., Zhong, M., and Zheng, S. (2015). Low-cost and rapid prototyping of microfluidic paper-based analytical devices by inkjet printing of permanent marker ink. **RSC Advances**, 5(7), 4770-4773.

Xu, C., Lin, W., Cai, L. (2016). Demonstrating electrophoretic separation in a straight paper channel delimited by a hydrophobic wax barrier. **Journal of Chemical Education**, 93(5), 903-905.

Xu, C., Jiang, D., Lin, J., and Cai, L. (2018). Cross channel thread-based microfluidic device for separation of food dyes. **Journal of Chemical Education**, 95(6), 1000-1003.

Zhang, Y., Zhou, C., Nie, J., Le, S., Qin, Q., Liu, F., Li, Y., and Li, J. (2014). Equipment-free quantitative measurement for microfluidic paper-based analytical devices fabricated using the principles of movable-type printing. **Analytical chemistry**, 86(4), 2005-2012.

Wang, B., Lin, Z., and Wang, M. (2015). Fabrication of a paper-based microfluidic device to readily determine nitrite ion concentration by simple colorimetric assay. **Journal of Chemical Education**, 92(4), 733-736.

Online-First Version

Copyright by Faculty of Science, Ubon Ratchathani University