การสาธิตชุดการทดลองในวิชาเคมีที่อาศัยระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์จากกระดาษ (μPAD) ที่สร้างโดยใช้ไขเทียนเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ

ภัทราวรรณ ศุภเลิศ[1] รัฐพล มีลาภสม[2] ศักดิ์ศรี สุภาษร[1,3] และปุริม จารุจำรัส[3*]

[1]หลักสูตรวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
[2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ กาฬสินธุ์ 46000
[3]ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
[*]E-mail: purim.j@ubu.ac.th

รับบทความ: 4 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขบทความ: 21 พฤษภาคม 2563 ยอมรับตีพิมพ์: 24 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

การเรียนวิทยาศาสตร์ให้เข้าใจโดยไม่ทำปฏิบัติการโดยเฉพาะวิชาเคมีเป็นปัญหาใหญ่เรื่องหนึ่งของการศึกษาไทย ซึ่งส่วนหนึ่งมีผลมาจากจากอุปกรณ์และสารเคมีส่วนใหญ่มีราคาสูง ดังนั้นครูผู้สอนหรือนักวิจัยหลายท่านจึงพยายามพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดลองให้สอดคล้องกับบริบททางการศึกษาของหลายโรงเรียนที่อยู่ในเขตชนบทของประเทศไทย บทความวิจัยนี้ขอยกตัวอย่างบทปฏิบัติการ เรื่อง การไทเทรตกรด–เบส โดยทั่วไปการทำปฏิบัติการทดลองในชั้นเรียนใช้วิธีมาตรฐานที่ต้องใช้ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วที่มีขนาดใหญ่จำนวนมากและใช้สารเคมีปริมาณมาก จึงทำให้วิธีมาตรฐานนี้มีค่าใช้จ่ายสูง นักวิจัยจึงพัฒนาการทดลองแบบวิธีย่อส่วนเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเริ่มจากการสร้างชุดทดลองการไทเทรตอย่างง่ายแบบย่อส่วนและต้นทุนต่ำ จากนั้นพัฒนาเป็นระบบที่มีขนาดเล็กลงถึงระดับไมครอนโดยอาศัยระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์จากกระดาษ (μPAD) ซึ่งสามารถอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้เช่นเดียวกับวิธีมาตรฐาน แต่ยังมีการนำ μPAD มาประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาค่อนข้างน้อย ดังนั้นการนำชุดทดลองสาธิตที่อาศัย μPAD มาช่วยในการจัดการเรียนรู้จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น หาง่าย ราคาถูก ใช้สารเคมีน้อยในระดับไมโครลิตร ใช้งานง่ายโดยไม่ต้องใช้ผู้ชำนาญในการใช้เครื่องมือ พกพาสะดวก นำไปสู่แนวคิดการเป็น “เคมีสีเขียว” บทความวิจัยนี้เน้นการนำเสนอและอภิปรายการสร้างชุดการทดลองสาธิตในวิชาเคมีที่อาศัย μPAD ที่สร้างโดยใช้ไขเทียนซึ่งเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ โดยจะนำเสนอวิธีการสร้าง 4 วิธีที่แตกต่างกันคือ การวาดด้วยไขเทียน การพิมพ์สกรีนด้วยไขเทียน การพิมพ์ด้วยไขเทียน และการจุ่มไขเทียน

คำสำคัญ: ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์จากกระดาษ ไขเทียน วัสดุไม่ชอบน้ำ ชุดการทดลองในวิชาเคมี

Demonstration of Experimental Kit Based on Microfluidic Paper–Based Analytical Device (μPAD) Fabricated by Using Wax as Hydrophobic Material

Phattaravan Supalert[1], Rattapol Meelapsom[2], Saksri Supasorn[1,3] and Purim Jarujamrus[3*]

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

[2]Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand

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

[*]E-mail: purim.j@ubu.ac.th

Received: 4 February 2020 Revised: 21 May 2020 Accepted: 24 May 2020

Abstract

Learning science for understanding without laboratory work, especially chemistry, is one of the major educational problems encountered in Thailand. Lack of equipment and chemical substance are the major problems for the establishment of a laboratory course. Therefore, many teachers or researchers have been trying to develop simple tools that are suitable for the educational context where sophisticated instruments in many schools located in urban areas of Thailand are limited to access. In this article, how to miniaturize acid–base titration in the laboratory will be demonstrated and discussed. In general classrooms, conventional titration is used. This method requires a lot of glassware, high chemical volume, leading to a high cost of operation. To overcome these problems, small scale titration has been proposed which can provide simple, low–cost setup. Moreover, microfluidic paper–based analytical device (μPAD) has been further developed as a miniaturized system for acid–base titration. Besides, the use of μPAD is still challenging in an educational application, especially being an experimental kit in chemistry. Hence, demonstration of experimental kit based on μPAD can provide many advantages such as simple, low–cost, low chemical volume (microliter), easy to use, and portable which meets the concept of “Green chemistry”. Demonstration of experimental kit based on

μPAD fabricated by using wax as hydrophobic material with various methods including wax drawing, wax screen printing, wax printing, and wax dipping will be proposed and discussed.

Keywords: Microfluidic paper–based analytical device (μPAD), Wax, Hydrophobic material, Experimental kit in chemistry

บทนำ

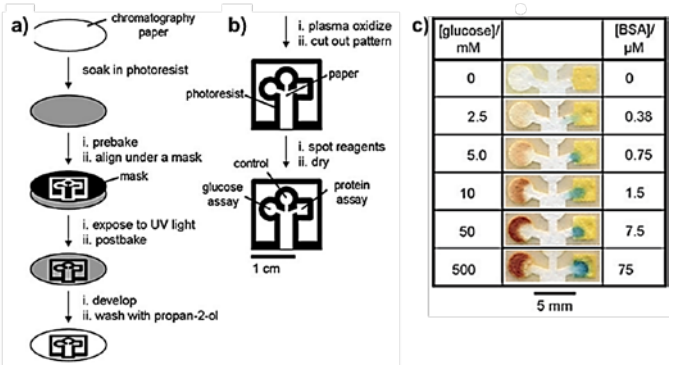
ในปัจจุบันการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการตรวจวัดให้เป็นระบบที่มีขนาดเล็กลง (miniaturization) ถูกนำไปประยุกต์ใช้กันในหลากหลายสายงานอาทิ เช่น วิศวกรรมศาสตร์ การแพทย์ ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ คอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะเคมีที่มีงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่เป็นจำนวนมากในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา (Pena–Pereira, 2014) รวมถึงความเป็นระบบอัตโนมัติและมีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ยังมีส่วนช่วยทำให้ลดปริมาณการใช้สารตัวอย่าง รีเอเจนต์ และตัวทำละลายได้ นอกจากนี้ยังลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย เมื่อผนวกรวมกับการพยายามแทนที่รีเอเจนต์และตัวทำละลายที่เป็นพิษโดยเปลี่ยนไปใช้สารที่ไม่เป็นอันตรายและพัฒนาระบบออนไลน์ต่อเนื่องเพื่อบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ “เคมีสีเขียว (green chemistry)” ที่ให้ความสำคัญกับการป้องกันที่ต้นเหตุมากกว่าการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ (Pimdee, 2020) โดยวิธีที่พัฒนาขึ้นนั้นจะต้องให้ผลการวิเคราะห์ไม่แตกต่างกับวิธีมาตรฐานที่ใช้อยู่

ระบบของไหลจุลภาค (microfluidics) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ทำให้ขนาดการวิเคราะห์มีขนาดเล็กลงและมีความเป็นอัตโนมัติ ซึ่งนิยามโดยทั่วไปคือการสร้างระบบที่ใช้การลำเลียงสารผ่านช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กในช่วง 10–100 ไมโครเมตร เพื่อใช้ตรวจวัดในระบบที่มีปริมาตรของสารในช่วง 10^{-9}–10^{-6} ลิตร หรือในช่วงนาโนลิตรถึงไมโครลิตร โดยมีเป้าหมายให้ทุกขั้นตอน (การส่งผ่านหรือการเคลื่อนที่ของสาร การแยกให้ได้สารเป้าหมายที่สนใจ การเกิดปฏิกิริยา และการตรวจวัด) สามารถเกิดขึ้นภายในระบบของไหลจุลภาคภายในชิ้นงานเดียว (all in one) ซึ่งทำให้มีการใช้สารเคมี และการเกิดของเสียมีปริมาณลดลง เทคนิคนี้เริ่มพัฒนาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1990 จนถึงปัจจุบัน ในช่วงแรกของการพัฒนาโดยการสร้างระบบของไหลจุลภาคบนวัสดุซิลิกอนและแก้ว ตลอดจนใช้เป็นต้นแบบของการนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้งานทดแทน ซึ่งมีวิธีการสร้างง่ายกว่าและราคาถูกกว่า โดยพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ เช่น พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane: PDMS) พอลิเมทิลเมทาครีเลต (polymethylmethacrylate: PMMA) และพอลิสไตรีน (polystyrene) และแม้จะมีการพัฒนาจนสมบูรณ์แล้ว นักวิจัยก็ยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสร้างระบบของไหลจุลภาคโดยการนำ “กระดาษ” มาใช้เป็นวัสดุรองรับ (Martinez *et al*., 2007)

กระดาษเป็นวัสดุสีขาว ราคาถูก และหาได้ทั่วไป สามารถปรับขนาดรูพรุน (pore size) ให้มีขนาดเล็กลงได้ สามารถกำจัดได้ง่าย มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งมีสูตรเคมีอย่างง่ายคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ หากพิจารณาจากสูตร

โครงสร้างทางเคมีพบว่าบนพื้นผิวของกระดาษมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; –OH) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้กระดาษมีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูงหรือสามารถเกิดอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจน (H–bond) กับน้ำได้ดี จึงทำให้การใช้กระดาษในการสร้างระบบของไหลจุลภาคเหมาะกับตัวอย่างที่เป็นระบบสารละลาย โดยสารละลายสามารถเคลื่อนที่บนกระดาษได้เองด้วยแรงคะพิลลารี (capillary force) ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสของกระดาษพันและซ้อนทับกันทำให้มีลักษณะคล้ายท่อทรงกระบอกขนาดเล็ก (capillary tube) ที่ไขว้ไปมาทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งไม่ต้องอาศัยแรงภายนอกเข้ามา โดยสามารถปรับอัตราการไหลได้โดยใช้ขนาดรูพรุนของกระดาษที่แตกต่างกันเป็นตัวกำหนดโดยหากมีขนาดใหญ่ก็จะมีอัตราการไหลของสารละลายที่เร็วกว่าที่มีขนาดเล็ก และยังสามารถปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของกระดาษเพื่อเพิ่มความจำเพาะเจาะจงให้กับสารได้ง่ายขึ้น (Li *et al*., 2010) ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมา อุปกรณ์ตรวจวัดโดยอาศัยระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ (microfluidic paper–based analytical device; μPAD) จึงถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรก (Martinez *et al*., 2007) ภายใต้กลุ่มวิจัยของ Prof. Whitesides ได้ตีพิมพ์งานวิจัยที่แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้าง μPAD โดยทำให้กระดาษมีช่องทางการไหลสำหรับของเหลวที่สนใจด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) หลักการคือ SU–8 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนทานต่อแสง (photoresist) และเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) นำมาใช้เป็นตัวกำหนดช่องทางการไหลของสารบนกระดาษ โดยมีขั้นตอนดังในภาพที่ 1a โดยนำกระดาษกรองจุ่มในสารละลาย SU–8 ที่ละลายในไซโคลเพนทาโนน (cyclopentanone) นาน 20 วินาที แล้วนำไปวางบนแท่นหมุนที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที จากนั้นอบเพื่อให้ไซโคลเพนทาโนนระเหยออกไปที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำแม่แบบ (mask) ที่ออกแบบไว้วางทับลงไปบนชิ้นงานก่อนฉายแสงยูวี (UV–light) ที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร นาน 10 วินาที จากนั้นอบซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เพื่อให้ SU–8 เกิดการเชื่อมข้ามกับเส้นใยเซลลูโลสของกระดาษเกิดเป็นช่องทางการไหลตามแบบ นำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลายโพรพิลีนไกลคอลโมโนเมเทิลอีเทอร์แอซีเทต (propylene glycol monomethyl ether: PGMEA) แล้วล้างชิ้นงานด้วย 2–โพรพานอล (propan–2–ol) เพื่อเอา SU–8 ที่ไม่ติดกับชิ้นงานออก จะได้ชิ้นงานของ μPAD ที่พร้อมใช้งาน ดังในภาพที่ 1b นำ μPAD ที่ได้มาประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบทางสีเพื่อหาปริมาณกลูโคสและโปรตีน BSA แบบพร้อมกันโดยการหยดตัวอย่างปัสสาวะสังเคราะห์ที่มีปริมาณกลูโคสในช่วง 0–500 มิลลิโมลต่อลิตร และปริมาณโปรตีน BSA ในช่วง 0–75 ไมโครโมลต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 1c หลังจากนั้นงานวิจัยตีพิมพ์ที่เกี่ยวกับ μPAD ก็เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งหลักการในการสร้าง μPAD คือการทำให้เกิดช่องทางการไหลบนกระดาษสามารถแบ่งเป็น 2 เทคนิคใหญ่ คือ 1) การกำหนดโซนชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในกระดาษ (hydrophilic–hydrophobic patterning) โดยการนำสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic reagent) เช่น พอลิเมอร์ (polymer) ไขเทียน (wax) แพร่หรือเคลือบลงไปบนกระดาษอย่างสม่ำเสมอและเป็นระบบ เพื่อทำให้เกิดช่องทางการไหลของของเหลวที่สนใจ และ 2) การสร้างขอบเขตการไหล

ทางกายภาพ (creating physical boundaries) โดยใช้การตัดกระดาษให้เป็นช่องทางการไหล จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2007–2016 สามารถสรุปวิธีการสร้างระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ (fabrication of μPAD) ดังในตาราง 1



ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการสร้าง μPAD ด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (a) บริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน μPAD ที่สร้างขึ้น (b) และผลการทดลองเพื่อหาปริมาณกลูโคสและปริมาณโปรตีน BSA ในตัวอย่างปัสสาวะสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (c)

ที่มา: Martinez *et al*., 2007

ตาราง 1 สรุปการสร้างระบบของไหลจุลภาคประดิษฐ์มาจากกระดาษ (fabrication of μPAD) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2007–2016

เทคนิคการสร้าง	ตัวอย่าง		อ้างอิง
1. การกำหนดโซนชอบน้ำ–ไม่ชอบน้ำตามรูปแบบที่ต้องการ	การพิมพ์ (printing)	Plotter printing	Bruzewicz *et al*. (2008)
		Inkjet etching	Abe *et al*. (2008)
		Wax printing	Carrilho *et al*. (2009)
		Inkjet alkyl ketene dimer (AKD) printing	Li *et al*. (2010)
		Flexographic printing	Olkkonen *et al*. (2010)
	การสร้างการบดบัง (mask–guided patterning)	Photolithography	Martinez *et al*. (2007)
		Plasma treatment	Li *et al*. (2008)
		One–step plotting	Nie *et al*. (2012)
		Lacquer spraying	Nurak *et al*. (2013)
		Screen printing	Sameenoi *et al*. (2014)
		Wax dipping	Songjaroen *et al*. (2011)
		Etching	He *et al*. (2013)
		Vapor–phase deposition	Chen *et al*. (2013)
	การประทับ (Stamping)		Dornelas *et al*. (2015)
	การทำให้ผิวนูน (Embossing)		Cai *et al*. (2014)
2. ตัดกระดาษในรูปแบบขอบเขตทางกายภาพ	การตัดโดยใช้กรรไกรหรือเลเซอร์หรืออุปกรณ์การตัดชนิดอื่น ๆ		Fenton *et al*. (2009)

โดยทั่วไปวิธีที่ใช้วิเคราะห์เป็นประจำ (routine analysis) คือ การใช้วิธีมาตรฐาน (standard method) รวมไปถึงวิธีวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือ (instrument method) โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญสูง ใช้เวลานานในการวิเคราะห์ ซึ่งมุ่งเน้นไปทางการวิเคราะห์หาในเชิงปริมาณ (quantitative analysis) อย่างไรก็ตาม ตัวบ่งชี้บางตัวทั้งด้านการแพทย์ สิ่งแวดล้อม ยา และอาหารไม่จำเป็นต้องอาศัยผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ แค่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) หรือเชิงกึ่งปริมาณ (semi–quantitative analysis) ก็เพียงพอต่อการตรวจวัด ดังนั้น μPAD จึงเหมาะกับการวิเคราะห์ซึ่งหาง่าย (simple) ราคาถูก (low–cost) เนื่องจากประดิษฐ์มาจากกระดาษ ใช้สารเคมีน้อย (low chemical volume) ในระดับไมโครลิตร (microliter) ใช้ง่ายไม่ต้องใช้ผู้ชำนาญในการใช้เครื่องมือ (easy to use) พกพาสะดวก (portable) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนาม (on–site analysis) และสามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างหลายชนิดในชิ้นงานเดียวได้ (lab–on–a–chip: LOC) μPAD นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ด้านชีวภาพทางการแพทย์ในการวินิจฉัยโรคต่าง ๆ การหาสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม ยา และอาหาร โดยการตรวจวัดส่วนใหญ่ร้อยละ 90 เป็นการตรวจวัดทางสี (colorimetric method) เพราะเป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า (naked eyes) หรืออาจใช้เครื่องมือช่วยบันทึกเป็นรูปภาพ เช่น กล้องถ่ายรูปแบบดิจิตอล (digital camera) สแกนเนอร์ (scanner) และสมาร์ทโฟน (smartphone) ร่วมกับโปรแกรมประมวลผลภาพ (image processing software) ในการตรวจวัด โดยมีหลักการคือติดตามค่าความเข้มสีของสารที่เปลี่ยนแปลงไปหลังทำปฏิกิริยาซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่สนใจวิเคราะห์ ประกอบกับพื้นหลัง μPAD มีสีขาวเพราะประดิษฐ์มาจากกระดาษ จึงสามารถสังเกตสีที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน (Birch and Stickle, 2003)

ในบทความนี้ผู้จัยได้รวบรวมแนวทางการนำ μPAD มาประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาเพื่อใช้เป็นชุดสาธิตการทดลองทดแทนการใช้อุปกรณ์และสารเคมีมีที่อยู่อย่างจำกัด ไม่เพียงพอต่อจำนวนนักเรียน โรงเรียนมีงบประมาณไม่เพียงพอในการจัดหาซื้ออุปกรณ์และสารเคมีทางวิทยาศาสตร์ ทำให้นักเรียนในหลายโรงเรียนขาดโอกาสในการทำการทดลอง ส่งผลให้นักเรียนขาดทักษะกระบวนการทดลอง และทำให้นักเรียนมองว่าวิทยาศาตร์เป็นวิชาที่มีเนื้อหาซับซ้อน เกี่ยวข้องกับเรื่องนามธรรมที่มองไม่เห็นและสัมผัสไม่ได้ ยากต่อการทำความเข้าใจในเนื้อหา (Din–a *et al*., 2016) และยังส่งผลให้เจตคติของนักเรียนต่อสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์อยู่ในระดับปานกลางจนถึงระดับต่ำ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเรียนในระดับที่สูงขึ้น (Barmby *et al*., 2008; George, 2000; Pruekpramool *et al*., 2011) โดยในบทความนี้ได้ให้ความสนใจในการนำไขเทียน (wax) มาใช้เป็นวัสดุไม่ชอบน้ำสำหรับการสร้าง μPAD ที่สามารถสร้างได้ง่าย สะดวก วัสดุอุปกรณ์หาได้ง่าย ทำการทดลองได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการทดลองน้อย และประหยัดสารเคมี ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 เทคนิค ได้แก่ การวาดด้วยไขเทียน การพิมพ์สกรีนด้วยไขเทียน การพิมพ์ด้วยไขเทียน และการจุ่มไขเทียน

การประยุกต์ใช้ μPAD ในด้านการศึกษา

มีรายงานการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ศึกษาได้ระบุว่า เจตคติของนักเรียนต่อสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์อยู่ในระดับปานกลางจนถึงระดับต่ำ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเรียนในระดับที่สูงขึ้น (Barmby *et al*., 2008; George, 2000; Pruekpramool *et al*., 2011) ปัญหานี้เกิดจากหลายปัจจัยแต่ปัจจัย หนึ่งที่น่าสนใจคือการเรียนวิทยาศาสตร์แต่ขาดการทำปฏิบัติการหรือการทำการทดลอง รวมไปถึงการขาดสื่อการสอนที่ช่วยอธิบายให้เข้าใจได้มากขึ้นอันเนื่องมาจากสารเคมี อุปกรณ์มีราคาสูง ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า μPAD มีข้อดีหลายประการและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์หลาย ๆ ด้านแต่กลับยังไม่ค่อยพบถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษา ดังนั้นการนำ μPAD มาประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในบทปฏิบัติการของวิชาเคมีในระดับมัธยมศึกษาเป็นเรื่องน่าสนใจแต่จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพบว่ามีงานวิจัยตีพิมพ์น้อยมาก ดังในตาราง 2

ตาราง 2 งานวิจัยตีพิมพ์ที่ใช้ μPAD ทางด้านการศึกษา

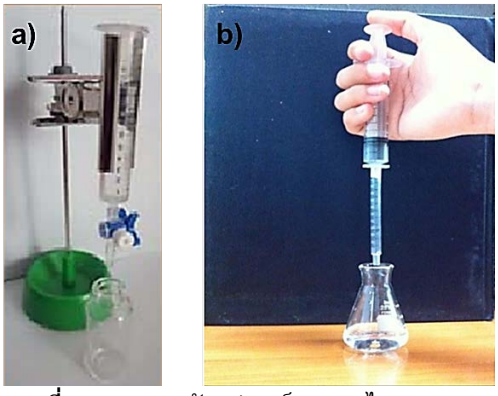
วิธีการสร้าง μPAD	วัสดุไม่ชอบน้ำ	การทดลองเรื่อง	อ้างอิง
การวาด (drawing)	หมึกจากปากกา (permanent marker)	ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณไนไตรท์	Wang *et al*. (2015)
		ชุดทดลองการประยุกต์ใช้พอไฟรินเป็นเซนเซอร์วิเคราะห์หาปรอทแคดเมียม และทองแดง	Prabpal *et al*. (2017)
	ไขเทียน (wax)	ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณกรดอะมิโนรวมในสารสกัดจากใบชา	Cai *et al*. (2013)
		ชุดสาธิตการทดลองเคมีไฟฟ้า: เรื่องเซลล์กัลวานิก	Chatmontree *et al*. (2015)
		ชุดสาธิตการทดลองเทคนิคการแยก: เรื่องเทคนิคอิเล็กโทรโฟเรซิส	Xu *et al*. (2016)
การพิมพ์สกรีน (screen printing)	ไขเทียน	ชุดสาธิตการทดลองกรด–เบส: เรื่องสารกำหนดปฏิกิริยา	Namwong *et al*. (2018)
การพิมพ์ (printing)	ไขเทียน	ชุดทดลองเรื่องการไทเทรตกรด–เบส	Karita and Kaneta, (2014) Nogueira (2017)
		ชุดทดลองการศึกษาผลของพีเอชต่อสีของน้ำกะหล่ำปลีสีม่วง	Smith *et al*. (2015)
		ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณอะซีตามิโนเฟนและฟีนาเซติน	Mako and Levine (2019)
		ชุดทดลองการวิเคราะห์หาปริมาณอะลูมิเนียมในยาเคลือบกระเพาะอาหาร	Lai *et al*. (2020)

ตาราง 2 งานวิจัยตีพิมพ์ที่ใช้ μPAD ทางด้านการศึกษา (ต่อ)

วิธีการสร้าง μPAD	วัสดุไม่ชอบน้ำ	การทดลองเรื่อง	อ้างอิง
การจุ่ม (dipping)	ไขเทียน (wax)	ชุดสาธิตการทดลองกรด–เบส: เรื่องค่าคงที่การแตกตัวของกรด	Taghizadeh–Behbahani *et al*. (2018)
การตัด (Cutting)	–	ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีสำหรับพิสูจน์หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์	Ravgiala and Andrescu (2014)
		ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณสารแอนตี้ออกซิแดนซ์	Sharpe *et al*. (2015)
		ชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณทองแดงและเหล็ก	Koesdojo *et al*. (2015)

เพื่อให้เห็นข้อดีของ μPAD ในด้านการศึกษามากยิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างบทปฏิบัติการเรื่อง การไทเทรตกรด–เบส (acid–base titration) ซึ่งเป็นการหาจุดสมมูลของกรดและเบสโดยมีหลักการคือเมื่อกรด–เบสทำปฏิกิริยากันทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนไปตามปริมาณของสารที่ทำปฏิกิริยากัน อินดิเคเตอร์ซึ่งตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนไปจะเกิดการเปลี่ยนสีทำให้ทราบจุดยุติ โดยสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนอยู่ในบิวเรตต์ เรียกว่า ไทแทรนต์ (titrant) และสารที่ต้องการทราบความเข้มข้นจะอยู่ในขวดรูปชมพู่ เรียกว่า ไทแทรนด์ (titrand) นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารที่เราต้องการศึกษาได้โดยตรง วิธีการดังกล่าวให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามความยุ่งยากในการจัดอุปกรณ์ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ และต้องปฏิบัติโดยผู้ชำนาญการในห้องปฏิบัติการ ทำให้เป็นจุดที่น่าสนใจในการนำไปพัฒนาให้มีขนาดการวิเคราะห์ที่เล็กลง เช่น ทำเป็นชุดทดสอบแบบย่อส่วน (down scale) โดย Din–a *et al*. (2016) พัฒนาชุดการทดลองไทเทรตกรด–เบสให้มีขนาดเล็กลงดังในภาพที่ 2a โดยการใช้กระบอกฉีดยาต่อกับข้อต่อสามทางแทนบิวเรตต์ บรรจุสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน และใช้ขวดแก้วขนาดเล็กแทนขวดรูปชมพู่บรรจุสารที่ต้องการทราบความเข้มข้นและอินดิเคเตอร์ โดยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ปริมาณสารลดลง และมีราคาต้นทุนเพียง 104 บาท นอกจากนี้ Lertsuwunpaisal *et al*. (2016) เสนอการพัฒนาชุดการไทเทรตโดยใช้หลักการไมโครสเกล โดยนำกระบอกฉีดยาขนาด 5 มิลลิลิตรมาต่อกับกระบอกฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตรเพื่อใช้เป็นไมโครบิวเรตต์ที่สามารถควบคุมการหยดของสารละลายมาตรฐานได้ ส่วนสารที่ต้องการทราบความเข้มข้นและอินดิเคเตอร์จะบรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 25 มิลลิลิตร ดังในภาพที่ 2b และตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับการไทเทรตแบบดั้งเดิมและการใช้เครื่องออโตโพเทนชิโอไทเทรชัน ซึ่งพบว่าให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกัน โดยใช้สารเคมีเพียง 0.05–5 มิลลิลิตร ซึ่งทั้งสองวิธีที่กล่าวมานี้เหมาะต่อการนำไปใช้สำหรับการเรียนการสอนในโรงเรียนที่ขาดแคลน หรือหากนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจริง ก็สามารถทำได้ง่าย ใช้สารเคมีและอุป-

กรณ์น้อย อย่างไรก็ตามแม้ปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะลด ลงมาก แต่ยังคงมีการใช้อุปกรณ์อยู่บ้าง ทำให้ไม่สะดวกกับการใช้งาน

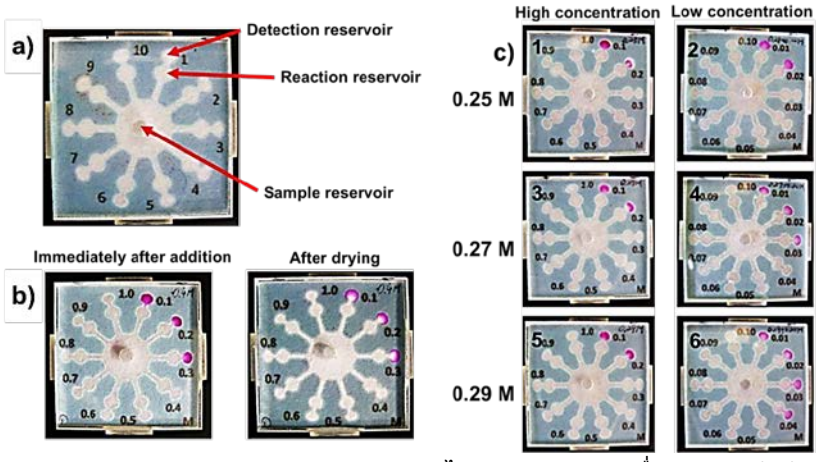


ภาพที่ 2 แสดงการจัดอุปกรณ์ ชุดการไทเทรตอย่างง่ายแบบย่อส่วนและต้นทุนต่ำ (a) และชุดการไทเทรตโดยใช้หลักการไมโครสเกล (b)

ที่มา: Din–a *et al*., 2016; Lertsuwunpaisal *et al*., 2016

Karita and Kaneta (2014) เสนอการไทเทรตกรด–เบสบนระบบ μPAD ที่สร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยไขเทียน โดยออกแบบเป็นรูป 10 แฉก แต่ละแฉกมีบริเวณทำปฏิกิริยา (reaction reservoir) ซึ่งจะขังสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาไว้ที่บริเวณนี้ และที่ปลายแฉกเป็นบริเวณตรวจวัด (detection reservoir) ซึ่งจะขังอินดิเคเตอร์ไว้ และมีตรงกลางเป็นบริเวณรองรับตัวอย่าง (sample reservoir) ดังในภาพที่ 3a หากต้องการหาความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1–1.0 โมลต่อลิตร ที่บริเวณทำปฏิกิริยาจะขังโพแทส-เซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) ที่มีความเข้มข้นพอดีกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1–1 โมลต่อลิตร ตามลำดับ และขังอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาลีน ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ที่บริเวณตรวจวัด จากนั้นเติมตัวอย่าง NaOH ปริมาตร 30 ไมโครลิตรลงที่บริเวณรับตัวอย่าง สารตัวอย่างจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณทำปฏิกิริยา หากความเข้มข้นของ NaOH มีมากกว่า KHP จะเกิดสีชมพูที่บริเวณตรวจวัดเนื่องจากมี NaOH มากเกินพอ จะอ่านค่าความเข้มข้นเท่ากับแฉกถัดไปที่ไม่มีสีเกิดขึ้น (ภาพที่ 3b) แปลความหมายได้ว่าตัวอย่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร แต่ความจริงรู้เพียงว่าอยู่ในช่วงความเข้ม-ข้น 0.31–0.4 โมลต่อลิตร เพื่อให้อ่านค่าได้ละเอียดมากขึ้น จึงใช้ μPAD สองชุด โดยชุดที่หนึ่งเป็นการตรวจวัดช่วงความเข้มข้นสูง (0.1–1.0 โมลต่อลิตร) และชุดที่สองเป็นการตรวจวัดช่วงความเข้มข้นต่ำ (0.01–0.10 โมลต่อลิตร) โดยตัว-อย่างสำหรับชุดที่สองต้องเจือจางให้มีความเข้ม-ข้นลดลงสองเท่าก่อนใช้งาน เช่น มีตัวอย่าง โซ-เดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 0.27 และ 0.29 โมลต่อลิตร (ภาพที่ 3c) ในชุดความเข้มข้นสูงจะพบว่าอ่านผลได้เหมือน กันคือ 0.3 โมลต่อลิตร ดังในภาพที่ 3c1 3c3 และ 3c5 แต่จะเห็นผลที่แตกต่างกันที่ชุดความเข้มข้นต่ำ ดังในภาพที่ 3c2 3c4 และ 3c6 ซึ่งให้ผลการอ่านค่าที่ใกล้เคียงความเข้มข้นจริง

ต่อมา Nogueira *et al*. (2017) ได้เสนอวิธีการไทเทรตกรด–เบสบน μPAD โดยใช้อินดิเคเตอร์ ธรรมชาติที่ได้จากสารสกัดจากเปลือกองุ่นชนิดหนึ่งที่มีการให้สีแตกต่างกัน 12 เฉดสีตามค่าพีเอช 1–12 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช 1–12 ซึ่งเตรียมดังในตาราง 3 เป็นตัวทำปฏิกิริยากับกรดหรือเบสที่ต้องการหาจุดสมมูล โดยทำการออกแบบ μPAD เป็นวงกลมเรียกว่าไมโคร-โซน (microzone) จำนวน 12 วง แล้วใช้สมาร์ท-โฟนที่ติดตั้งแอพลิเคชันที่อ่านความเข้มสีในการแปลผล (ภาพที่ 4a) โดยแต่ละวงนั้นจะมีการขัง



ภาพที่ 3 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ บน μPAD (a) ผลการไทเทรตบน μPAD เพื่อหาความเข้มข้นของ NaOH เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร (b) และการใช้ μPAD 2 ชุดเพื่อระบุความเข้มข้นได้ละเอียดมากขึ้น (c)

ที่มา: Karita and Kaneta, 2014

ตาราง 3 องค์ประกอบในการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชในช่วง 1–12

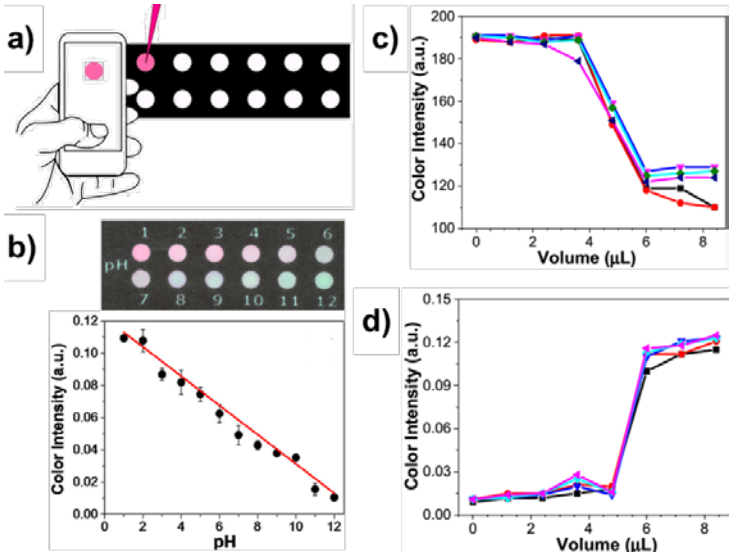
	สารละลาย A			สารละลาย B		
ค่าพีเอช	ชื่อสารเคมี	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ชื่อสารเคมี	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
1	KCl	0.2	25	HCl	0.2	67
2	KCl	0.2	24	HCl	0.2	6.5
3	$KC_8H_5O_4$	0.1	50	HCl	0.1	22.3
4	$KC_8H_5O_4$	0.1	50	HCl	0.1	0.1
5	$KC_8H_5O_4$	0.1	50	NaOH	0.1	22.6
6	KH_2PO_4	0.1	50	NaOH	0.1	5.6
7	KH_2PO_4	0.1	50	NaOH	0.1	29.1
8	KH_2PO_4	0.1	50	NaOH	0.1	46.1
9	$Na_2B_4O_7$	0.025	50	HCl	0.1	4.6
10	$Na_2B_4O_7$	0.025	50	NaOH	0.1	18.3
11	$NaHCO_3$	0.05	50	NaOH	0.1	22.7
12	K_2HPO_4	0.05	50	NaOH	0.1	26.9

หมายเหตุ ผสมสารละลาย A และสารละลาย B ตามตาราง ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

ที่มา: Nogueira *et al*., 2017

อินดิเคเตอร์ปริมาตร 5 ไมโครลิตร และบัฟเฟอร์ที่ค่าพีเอช 1–12 ตามลำดับ โดยสีของอินดิเคเตอร์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (ภาพที่ 4b) แล้วเอาค่าสีที่อ่านได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน (ภาพที่ 4c) สารมาตร-

ฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นสมมูลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ที่ใช้ทำปฏิกิริยาและสัมพันธ์กับค่าพีเอชที่เปลี่ยน ไปตั้งแต่ 1–12 ตามลำดับไว้ร่วมกัน จากนั้นนำสารตัวอย่าง (กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์) ใส่ลงไปที่วงไมโครโซน ปริมาตรวงละ 1.2 ไมโครลิตร แล้วใช้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอพลิเคชันถ่ายรูปและประมวลผลค่าความเข้มสีในแต่ละวงนำมาสร้างกราฟ (ภาพที่ 4d และ 4e) ซึ่งมีลักษณะกราฟไม่ต่างจากกราฟการไทเทรตด้วยวิธีมาตรฐาน อย่างไรก็ตามพอจะสรุปให้เห็นข้อดีข้อด้อยในการเลือกใช้ µPAD ในการไทเทรตกรด–เบสได้ดังในตาราง 4 นอกจากนี้ยังมีการนำเรื่องการไทเทรตกรด–เบสบน µPAD มาใช้อธิบายเรื่องสารกำหนดปริมาณ (Namwong *et al.* , 2018) และค่าคงที่การแตกตัวของกรด (Taghizadeh–Behbahani *et al*, 2018) ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4 แสดงวิธีการไทเทรตกรด–เบสด้วยไมโครโซนร่วมกับสมาร์ทโฟน (a) สีของอินดิเคเตอร์ที่ค่าพีเอช 1–12 และกราฟความสัมพันธ์ความเข้มสีที่อ่านจากแอพลิเคชันกับค่าพีเอช (b) กราฟการไทเทรตหาจุดสมมูลของ 0.1 โมลต่อลิตร NaOH (c) และกราฟการไทเทรตหาจุดสมมูลของ 0.1 โมลต่อลิตร HCl (d)
ที่มา: Nogueira *et al*., 2017

การใช้ไขเทียนเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำสำหรับการสร้าง µPAD

ไขเทียน (wax) เป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ (hydrophobic material) ที่น่าสนใจเนื่องจากมีราคาถูกหาง่าย และนำมาใช้งานง่ายโดยใช้เพียงความร้อนเป็นตัวช่วยให้เกิดการหลอมเป็นของเหลวแพร่ไปในเส้นใยกระดาษในบริเวณที่ต้องการให้เกิดเป็นขอบของช่องทางการไหลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic barrier) จากตาราง 2 พบว่า สามารถนำมาใช้สร้าง µPAD ได้ในหลากหลายเทคนิค ทั้งการวาด การพิมพ์สกรีน การพิมพ์ และการจุ่ม ดังนั้นบทความนี้จะเป็นการรวบรวมงานวิจัยที่มีการนำไขเทียนมาใช้เป็นวัสดุไม่ชอบน้ำในการสร้าง µPAD ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นชุดการทดลองสาธิตในวิชาเคมี

1) การวาดด้วยไขเทียน (wax drawing)

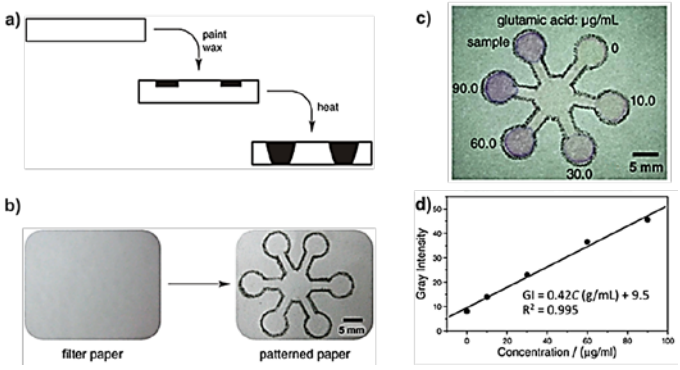
ตาราง 4 การเปรียบเทียบการไทเทรตกรด–เบสด้วยวิธีแตกต่างกัน 3 วิธี

ข้อเปรียบเทียบ	การไทเทรตกรด-เบส		
	วิธีมาตรฐาน (conventional method)	วิธีย่อส่วน (Din–a *et al.*, 2016; Lertsuwanpaisal *et al.*, 2016)	µPAD (Karita and Kaneta, 2014[1]; Noguira *et al.* 2017[2])
ผู้ทำปฏิบัติการ	เป็นผู้มีทักษะ	ไม่จำเป็นต้องมีทักษะ	ไม่จำเป็นต้องมีทักษะ
ปริมาณสารเคมี	มาก	น้อย	น้อยมาก
ปริมาณเครื่องแก้ว	มาก	น้อย	น้อยมาก
วิธีการคำนวณความเข้มข้น	คำนวณจากปริมาณสารที่ใช้ให้ถึงจุดสมมูลได้โดยตรง	คำนวณจากปริมาณสารที่ใช้ให้ถึงจุดสมมูลได้โดยตรง	อ่านผลจาก µPAD[1] คำนวณเทียบจากกราฟมาตรฐาน[2]
ผลการวิเคราะห์	แม่นยำ ถูกต้องสูง	แม่นยำ ถูกต้องในเกณฑ์ยอมรับได้	แม่นยำ ถูกต้องในเกณฑ์ยอมรับได้
ช่วงความเข้มข้นของการวิเคราะห์	1×10^{-3} –1 โมลต่อลิตร	–	1×10^{-2}–1×10^{-1} โมลต่อลิตร[1]
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด	1×10^{-3} โมลต่อลิตร	–	5×10^{-3} โมลต่อลิตร[1]
วิธีการตรวจวัด	ตาเปล่า	ตาเปล่า	ตาเปล่า[1] โปรแกรมประมวลผลภาพบนสมาร์ทโฟน[2]

หมายเหตุ: [1] หมายถึง อ้างอิงจาก Karita and Kaneta, 2014 และ [2] หมายถึง อ้างอิงจาก Noguira *et al.*, 2017

โดยใช้ไขเทียนวาดตามแบบเพื่อสร้างเป็นช่องทางทางการไหลบนกระดาษกรองจากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยวางบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ไขเทียนแพร่ทะลุถึงอีกด้านของกระดาษ (ภาพที่ 5a) Cai *et al.* (2013) ใช้วิธีนี้ในการสร้างชุดทดลองการวิเคราะห์ทางสีเพื่อหาปริมาณกรดอะมิโน (amino acid) ในสารสกัดจากใบชา โดยได้ออกแบบเป็นดาวกระจาย 6 แฉกกระจายออกจากวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตรใช้เป็นบริเวณรับตัวอย่าง (sample zone) และที่ปลายแฉกแต่ละอันมีวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเป็นบริเวณตรวจวัด (detection zone) (ภาพที่ 5b) เมื่อได้ µPAD แล้ว จากนั้นหยด 15 ไมโครลิตรของสารละลายนินไฮดริน (ninhydrin) ความเข้มข้นร้อยละ 2 ลงที่บริเวณรับตัวอย่าง ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายนินไฮดรินไหลไปถึงบริเวณตรวจวัดทั้ง 6 วง (ประมาณ 100 วินาที) แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง (ประมาณ 9 นาที) และหยด 1 ไมโครลิตรของสารละลายกรดกลูทามิก (glutamic acid) ที่ความเข้มข้น 0 10 30 60 และ 90 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และสารสกัดจากใบชา (สารตัวอย่าง) ลงไปที่บริเวณตรวจวัดแต่ละอัน ตามลำดับ นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนาน 15 นาที จะปรากฏสีม่วงที่บริเวณตรวจวัด (ภาพที่ 5c) ซึ่งสารสกัดจากใบชาเตรียมโดยการชั่งน้ำหนักใบชามา 1.0000 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตรนำไปต้มให้เดือดนาน 40 นาที นำมาทำให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องโดยการผ่านน้ำเย็น จากนั้นกรองเอาเฉพาะน้ำใส่ลงในขวดปรับปริมาตรแล้วปรับปริมาตรจนครบ 500 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน นำชิ้นงานไปถ่ายรูปในสภาวะที่มีการควบคุมแสงแล้วนำมาวิเคราะห์ทางสีในระบบแดงเขียวน้ำเงิน (RGB system) โดยอ่านค่าความเข้มสีที่บริเวณตรวจวัดด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ImageJ ในโหมดสีเทาแล้วนำมาสร้างกราฟมาตรฐานที่พล็อตระหว่างค่าความเข้มสีในโหมดสีเทากับ

ความเข้มข้นของกรดกลูทามิก (ภาพที่ 5d) จากนั้นนำค่าความเข้มสีในโหมดสีเทาของตัวอย่างที่อ่านได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าความเข้มข้นของกรดกลูทามิก จากภาพที่ 5d พบว่าเมื่อนำค่าความเข้มสีในโหมดเทาของสารตัวอย่างมาแทนค่าในสมการเส้นตรงจะได้ค่าความเข้มข้นของกรดกลูทามิกเท่ากับ 57.1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณกรดอะมิโนทั้งหมดได้เท่ากับ 2.9×10^4 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยแทนค่าในสมการที่ 1 เมื่อกำหนดให้ *w* ปริมาณกรดอะมิโนที่สกัดได้จากใบชา (ไมโครกรัมต่อกรัม) *C* คือความเข้มข้นของ



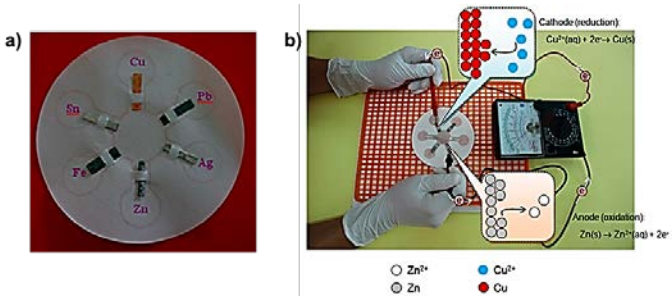
ภาพที่ 5 แสดงขั้นตอนการสร้าง μPAD ด้วยเทคนิคการวาดด้วยไขเทียน (a) รูปแบบของ μPAD ที่ออกแบบไว้ (b) μPAD เมื่อนำไปใช้งานจริงโดยการหยดสารละลายกรดกลูตามิคความเข้มข้น 0 10 30 60 และ 90 ไมโครกรัมต่อลิตร และสารตัวอย่าง (c) และกราฟมาตรฐานที่พล็อตระหว่างค่าความเข้มสีเทาที่อ่านได้กับความเข้มข้นของกรดกลูทามิก (d)

ที่มา: Cai *et al*., 2013

กรดอะมิโนที่สกัดได้จากใบชา (ไมโครกรัมต่อกรัม) *V* คือปริมาตรของสารสกัดจากใบชา (มิลลิลิตร) และ *m* คือน้ำหนักของใบชา (กรัม) โดยค่าที่ได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ผลไม่แตกต่างกับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน (3.0×10^4 ไมโครกรัมต่อกรัม)

$$w = CV/m \qquad \text{- - - (1)}$$

ต่อมา Chatmontree *et al*. (2015) นำวิธีการวาดด้วยไขเทียนมาใช้สร้างขอบเขตการไหลของชุดสาธิตการทดลองเคมีไฟฟ้า: เรื่องเซลล์กัลวานิก โดยออกแบบเป็นดาวกระจาย 6 แฉก (ภาพที่ 6a) โดยแต่ละแฉกจะติดโลหะที่แตกต่างกัน 6 ชนิด คือ ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) เงิน (Ag) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) และดีบุก (Sn) ติดอยู่ตามลำดับ เมื่อเริ่มการทดลองจะเคลือบด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโลหะต่าง ๆ ที่ตรงกับชนิดโลหะที่นำมาติดไว้ เช่น ในช่องโลหะทองแดง (Cu) ก็จะเคลือบด้วยสารละลายคอปเปอร์(II) ซัลเฟต ($CuSO_4$) และวงกลมตรงกลางของดาว 6 แฉก เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เพื่อใช้ทำหน้าที่แทนสะพานเกลือ จากนั้นใช้มัลติมิเตอร์ (multimeter) แตะหรือคีบที่คู่โลหะที่ต้องการศึกษาดังในภาพที่ 6b ซึ่งแสดงการต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างสังกะสี (Zn) กับทองแดง (Cu) โดยชุดสาธิตการทดลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนรู้ตั้งแต่ระดับมัธยมศึกษาจนถึงระดับมหาวิทยาลัย

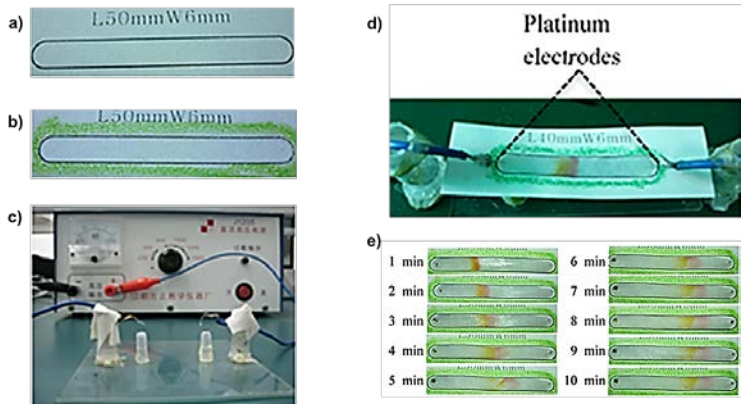


ภาพที่ 6 แสดงการสร้าง μPAD สำหรับสาธิตการทดลองเคมีไฟฟ้า: เซลล์กัลวานิก (a) และสาธิตการทดลองต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างสังกะสี (Zn) กับทองแดง (Cu) (b)

ที่มา: Chatmontree *et al*., 2015

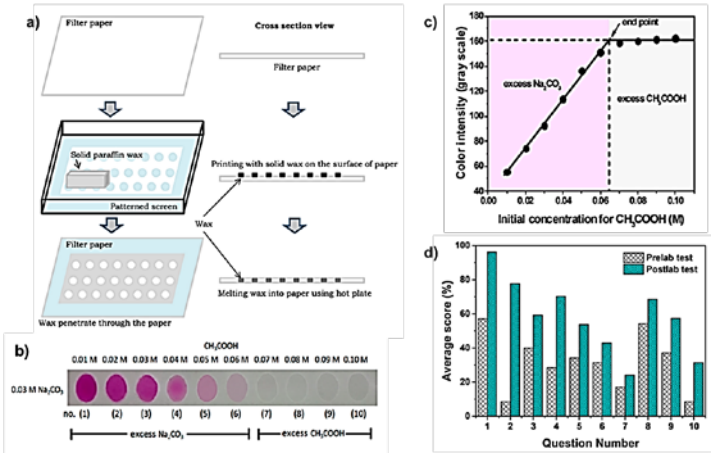
นอกจากนี้ Xu (2016) นำวิธีการวาดด้วยไขเทียนมาใช้สร้างขอบเขตการไหลของชุดสาธิตการแยกคาร์มีน (carmine) กับเยลโลว์ ซันเซต (yellow sunset) โดยอาศัยความแตกต่างของแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟรีซิส โดยการออกแบบดังในภาพที่ 7a แล้วนำไขเทียนมาเขียนตามแบบ (ภาพที่ 7b) จากนั้นเตรียมอุปกรณ์ตามภาพที่ 7c แล้วแยกด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟรีซิสด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นโดยสามารถสังเกตเห็นแถบสีเคลื่อนที่แยกจากกันได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 7d) และจากการทดลองพบว่าที่ความต่างศักย์ 250 โวลต์ สารทั้งสองชนิดสามารถแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้เวลาในการแยกตั้งแต่ 6 นาทีขึ้นไป (ภาพที่ 7e) โดยชุดสาธิตนี้ช่วยให้นักเรียนได้เข้าใจหลักการแยกด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟรีซิสด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นอย่างง่าย และมีราคาถูก

2) การพิมพ์สกรีนด้วยไขเทียน (wax screen printing) เป็นวิธีที่รายงานครั้งแรกโดย Dungchai *et al*. (2011) โดยนำบล็อกสกรีนที่ขึงด้วยผ้าสกรีนที่มีการออกแบบไว้มาวางทับบนกระดาษ จากนั้นนำไขเทียนมาถูผ่านแบบที่ออกแบบไว้บนผ้าสกรีนทำให้ไขเทียนทะลุผ่านผ้าสกรีนไปติดอยู่ที่ผิวหน้าของกระดาษ และเพื่อให้เกิดช่องทางการไหล นำกระดาษไปให้ความร้อนด้วยแผ่นให้ความร้อนหรือไดร์เป่าผม ไขเทียนจะละลายแพร่ซึมเข้าไปในเส้นใยกระดาษทำให้เกิดเป็นช่องทางการไหล (ภาพที่ 8a) และด้วยวิธีการนี้ Namwong *et al*. (2018) ได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ชุดสาธิตการทดลองกรด–เบส: เรื่องสารกำหนดปฏิกิริยา โดยออกแบบเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรเรียงต่อกัน 10 วง เพื่อใช้เป็นบริเวณทำปฏิกิริยา ในแต่ละวงจะหยดฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ความเข้มข้น 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 และ 0.10 โมลต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 0.03 โมลต่อลิตรลงไปในแต่ละวง สังเกตสีชมพูที่ซึดจางลงจนกระทั่งมองไม่เห็นสีของฟีนอล์ฟทาลีน (ภาพที่ 8b) นำ μPAD ที่ทำการทดลองแล้วไปถ่ายรูปในกล่องควบคุมแสง แล้วใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ ImageJ อ่านค่าความเข้มสีเทา จากนั้นนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อแสดงให้เห็นจุดยุติของปฏิกิริยา ใช้ประกอบการอธิบายเรื่องสารกำหนดปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 8c ซึ่ง



ภาพที่ 7 รูปแบบของ μPAD ก่อน (a) และหลังการวาดด้วยไขเทียน (b) การจัดชุดอุปกรณ์การทดลอง (c) การแยกด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟเรซิสบน μPAD (d) และผลการทดลองที่เวลา 1 – 10 นาที (e)

ที่มา: Xu *et al*., 2016



ภาพที่ 8 วิธีการสร้าง μPAD ด้วยเทคนิคการพิมพ์สกรีนด้วยไขเทียน (a) μPAD ที่ใช้สาธิตการทดลองกรด–เบส เรื่องสารกำหนดปฏิกิริยาโดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0.01–0.1 โมลต่อลิตรกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.03 โมลต่อลิตร โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีเทาที่เปลี่ยนไปจากเมื่อความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น (c) และผลการเรียนรู้ก่อนและหลังการใช้ชุดสาธิตการทดลอง (d)

ที่มา: Namwong et al., 2018

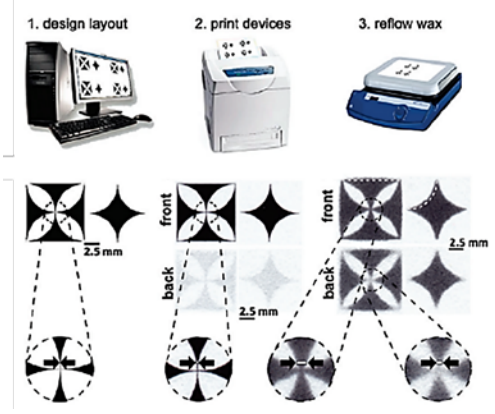
จากการศึกษาพบว่าชุดสาธิตที่พัฒนาขึ้นนี้มีส่วนช่วยให้ผู้เรียนมีความเข้าใจในเรื่องสารกำหนดปฏิกิริยามากยิ่งขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 8d

3) การพิมพ์ด้วยไขเทียน (wax printing) รายงานครั้งแรกโดย Carillho (2009) โดยการประยุกต์ใช้เครื่องปริ้นเตอร์ที่มีขายในท้องตลาดแต่มีความพิเศษที่หมึกทำจากไขเทียนมาใช้สร้าง

μPAD อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ปริ้นท์ออกมาต้องมีการนำไปให้ความร้อนโดยนำไปวางบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วินาที เพื่อให้ไขเทียนเกิดการแพร่จนเกิดเป็นช่องทางการไหล (ภาพที่ 9) โดยเทคนิคนี้นำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทั้งในงานทางด้านการแพทย์ สิ่งแวดล้อม อาหาร นิติวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

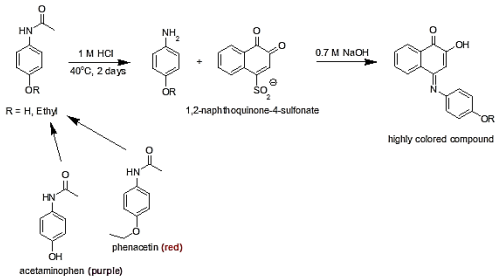
ในด้านการศึกษา นอกจากการไทเทรตกรด–เบสบน μPAD (Karita and Kaneta, 2014; Noguira *et al*., 2017) ที่ได้กล่าวมานั้น Mako *et al*. (2019) ได้นำการพิมพ์ด้วยไขเทียนมาใช้สร้าง μPAD เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางสีเพื่อหาปริมาณอะเซตามีโนเฟน (acetaminophen) และฟีนาเซติน (phenacetin) ในยาแก้ปวดโดยใช้สาร 1,2–แนพโทควิโนน–4–ซัลโฟเนต (1,2–naphthoquinone–4–sulfonate) เพื่อทำให้เกิดสี (ภาพที่ 10) ถ้าสารตัวอย่างเป็นฟีนาเซติน เมื่อนำมาบ่มในภาวะกรดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน และนำไปทำปฏิกิริยากับสาร 1,2–แนพโทควิโนน–4–ซัลโฟเนต ในภาวะเบสจะได้สารสีแดง แต่หากเป็นอะเซตามิโนเฟนจะได้สารสีม่วง โดยความเข้มสีจะแปรผันตามความเข้มข้น ซึ่งชุดตรวจวัดที่สร้างขึ้นนี้ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator เป็นวงกลมจำนวน 9 วง (3×3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงละ 6 มิลลิเมตร โดยแถวในแนวนอนคือการทำซ้ำ (3 ครั้ง) ดังในภาพที่ 11 สารตัวอย่าง หรือสารละลายมาตรฐานของเฟนาเซติน และอะเซตามิโนเฟนจะถูกบ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วันก่อนใช้งาน ในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด แต่ละวงของ μPAD จะหยดสารละลาย 1,2–แนพโทควิโนน–4–ซัลโฟเนต ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 6 ไมโครลิตร และหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 27.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 6 ไมโครลิตร แล้วรอให้หมาด จากนั้นหยดสารตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐานที่บ่มในสารละลาย 1 โมลต่อลิตร กรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 4 ไมโคร ลิตร ลงในวงที่กำหนด แล้วทิ้งไว้ให้หมาดสีของปฏิกิริยาจะปรากฏ จากนั้นหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltrimetylammonium bromide) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเพื่อให้สีคงตัว จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ นำไฟล์ภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม ImageJ โดยการอ่านค่าสีเทาโดยจากการใช้ μPAD นี้เป็นอุปกรณ์ช่วยสอนทำให้ผู้เรียนในการเรียนในบทปฏิบัติการนี้มีทัศนคติที่ดีขึ้น

ต่อมา Lai *et al*. (2020) นำเสนอชุดทดลองการวิเคราะห์หาปริมาณอะลูมิเนียมในยาเคลือบกระเพาะอาหารโดยดูความยาวของแถบสีน้ำเงินที่เปลี่ยนไปบนแถบสีชมพูโดยที่ความยาวสีชมพู



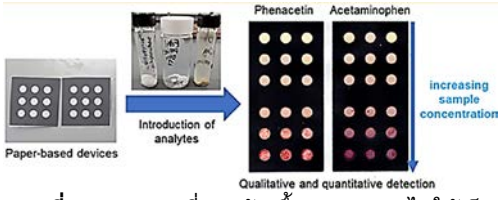
ภาพที่ 9 ขั้นตอนการสร้าง μPAD ด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยไขเทียน

ที่มา: Carillho *et al*., 2009



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้ในการทดลองหาวิเคราะห์หาอะเซตามิโนเฟนและเฟนาเซตินเมื่อทำปฏิกิริยากับ 1,2–แนพโทควิโนน–4–ซัลโฟเนต

ที่มา: Marko and Levine, 2019

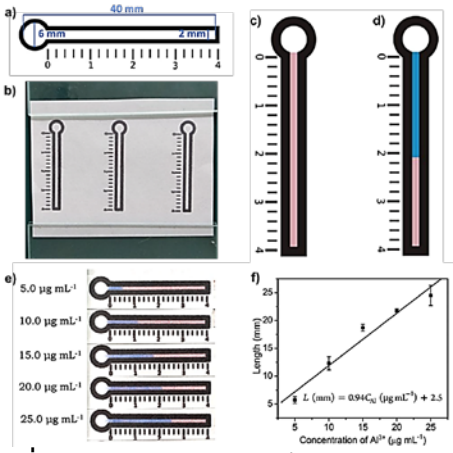


ภาพที่ 11 µPAD ที่ถูกสร้างขึ้นและการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยสอน

ที่มา: Marko and Levine, 2019

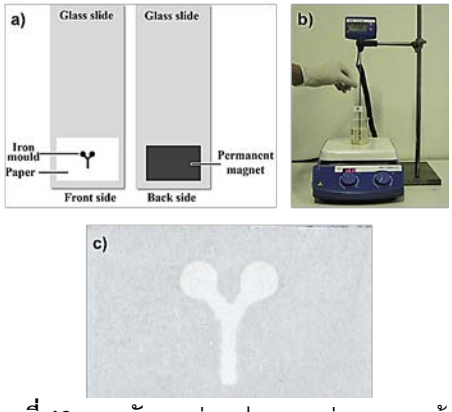
เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอะลูมิเนียม µPADs ออกแบบด้วยโปรแกรม CorelDRAW X3 ดังในภาพที่ 12a และสร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ด้วยไขเทียน จากนั้นนำ µPAD ที่พร้อมใช้งานมาวางบนกระจกสไลด์ในลักษณะถูกหนีบไว้ดังในภาพที่ 12b สารละลายผสมโครมอาซุรอลเอส (chrome azurol S: CAS) 0.7 กรัมต่อลิตร และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltriammonium bromide: CTAB) 0.1 กรัมต่อลิตร ละลายในเอทานอลผสมน้ำอัตราส่วน 1:1 ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร นำสารละลายผสมที่เตรียมแล้ว 9 ไมโครลิตรมาเคลือบบนบริเวณตรวจวัดของ µPAD แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10 นาทีจะได้แถบสีชมพูเคลือบติดอยู่ที่บริเวณตรวจวัด (detection zone) ของ µPAD ดังแสดงในภาพที่ 12c จากนั้นหยดสารตัวอย่าง 20 ไมโครลิตรลงที่บริเวณรับตัวอย่าง (sample zone) สารตัวอย่างจะเคลื่อนที่มาที่บริเวณตรวจวัดเกิดเป็นแถบสีน้ำเงินอยู่บนแถบสีชมพู (ภาพที่ 12d) โดยความยาวของแถบสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณอะลูมิเนียมที่มีในตัวอย่าง โดยสามารถนำมาสร้างกราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 5–25 ไมโครกรัมต่อลิตรดังในภาพที่ 12e–12f และได้ลองทดสอบหาปริมาณอะลูมิเนียมในยาลดกรดในกระเพาะอาหารซึ่งให้ผลการทดลองไม่ต่างจากวิธีมาตรฐาน จากการนำไปใช้ในการเรียนการสอนพบว่านักเรียนให้ความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในเรื่องที่กำลังศึกษาเช่นการวัดระยะทางสัมพันธ์กับปริมาณได้อย่างไร ไปจนถึงเรื่องวิธีของการสร้าง µPAD มีวิธีอื่น ๆ อีกหรือไม่ ไม่ใช้ไขเทียนมีอะไรทดแทนได้ รวมทั้งคิดถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์หากรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid, $C_6H_8O_6$) ในพืชผัก

4) การจุ่มไขเทียน (wax dipping) รายงานครั้งแรกโดย Songjaroen *et al*. (2011) โดยการออกแบบแม่แบบที่เป็นเหล็กนำไปวางทับกระดาษกรองที่เตรียมไว้วางไว้บนกระจกสไลด์ (glass slide) โดยที่ด้านหลังของกระจกสไลด์ประกบด้วยแม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดสูง (ภาพที่ 13a) จากนั้นนำไปจุ่มในไขเทียนที่ถูกหลอมจนเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 120–130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วินาที แล้วยกขึ้น (ภาพที่ 13b) ไขเทียนที่เป็นของเหลวจะแพร่ไปทั่วแผ่นกระดาษยกเว้นบริเวณที่เป็นแม่แบบเนื่องจากแม่แบบถูกดูดไว้ด้วยแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงส่งผลให้ไขเทียนแพร่เข้าไปในบริเวณนี้ไม่ได้ เกิดเป็นช่องทางการไหลตามแม่แบบดังในภาพที่ 13c



ภาพที่ 12 รูปแบบและรายละเอียดของ μPAD ที่สร้าง (a) การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนใช้งาน (b) μPAD ที่ทำการเคลือบด้วยสารละลายผสม CAS/CTAB ในเอทานอลเจือจางด้วยน้ำอัตราส่วน 1:1 ก่อน (c) และหลังหยดสารตัวอย่างที่มีอะลูมิเนียม(III) ไอออนผสมอยู่ (d) μPAD หลังหยดสารละลายมาตรฐานอะลูมิเนียม(II) ไอออน ความเข้มข้น 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ (e) และกราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 5–25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (f)

ที่มา: Lai *et al*., 2020



ภาพที่ 13 การจัดวางส่วนประกอบต่าง ๆ บนด้านหน้าและด้านหลังของกระจกสไลด์ (a) การทำ μPAD ด้วยวิธีการจุ่มไขเทียน (b) และ μPAD ที่ได้จากเทคนิคการจุ่มไขเทียน (c)

ที่มา: Songjaroen *et al*., 2011

จากเทคนิคนี้ Taghizadeh–Behbahani *et al*. (2018) นำมาใช้สร้าง μPAD เป็นรูปดาว 9 แฉก (ภาพที่ 14a) สำหรับอธิบายเรื่องค่าคงที่การแตกตัวของกรด (pKa) โดยใช้อินดิเคเตอร์ 4 ชนิดเป็นตัวอย่างในการศึกษานี้ คือ โบรโมครีซอลกรีน (bromocresol green: BG) โบรโมครีซอลเพอร์เพิล (bromocresol purple: BP) โบรโมไทมอลบลู (bromothymol blue: BB) และฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein: PP) ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกัน pKa สามารถคำนวณด้วยสมการของ Henderson–Hasselbalch ดังในสมการที่ 2 เมื่อ HIn และ In^- คือรูปฟอร์มกรด และเบสของอินดิเคเตอร์ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ใช้สมการที่ 3 สำหรับหา pKa บน μPAD เมื่อ A คือความเข้มสีของอินดิเคเตอร์แต่ละค่าพีเอช และ A_{HIn} และ A_{In^-} คือความเข้มสีในรูปฟอร์มกรด และเบสของอินดิเคเตอร์ ตามลำดับ เพื่อให้เข้าใจวิธีการหา pKa บน μPAD จะขอยกตัวอย่างเฉพาะBP

$$pH = pKa + \log \frac{In^-}{HIn} \quad \text{- - - (2)}$$

$$pH = pKa + \log\left(\frac{A-A_{In^-}}{A_{HIn}-A}\right) \quad \text{- - - (3)}$$

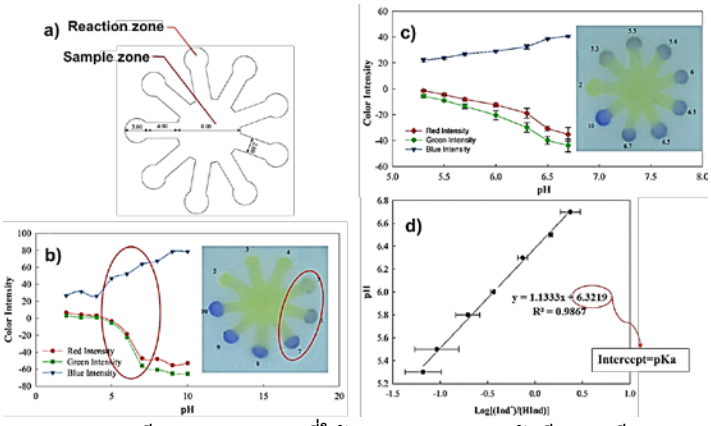
เริ่มโดยการหยดบัฟเฟอร์พีเอชต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 0.3 ไมโครลิตร ตรงบริเวณทำปฏิกิริยา (reaction zone) จากนั้นหยด BP ปริมาตร 30 ไมโครลิตร ตรงบริเวณรองรับตัวอย่าง (sample zone) BP จะเคลื่อนที่ไปที่บริเวณทำปฏิกิริยาและมีสีเกิดขึ้นตามช่วงพีเอชที่เปลี่ยนสีของ BP (ภาพที่ 14b) ถ่ายภาพแล้วนำภาพที่ได้ไปอ่านค่าสีตรงบริเวณทำปฏิกิริยาของทุกค่าพีเอช จากนั้นนำค่าความเข้มสีแดง (Red: R) เขียว (Green: G) และน้ำเงิน (Blue: B) มาสร้างกราฟแล้วเลือกช่วงที่เห็นความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 14b) มาศึกษาต่อโดย

การใช้บัฟเฟอร์ที่มีช่วงพีเอชละเอียดขึ้นเพื่อศึกษาเฉพาะช่วงที่สนใจ (ภาพที่ 14c) จากนั้นนำค่าความเข้มสีเฉลี่ย ((R + G + B)/3) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังในภาพที่ 14d โดยค่าที่เป็นจุดตัด (intercept) คือค่า pKa อินดิเคเตอร์ โดยของ BP มีค่าเท่ากับ 6.3219 ซึ่งสอดคล้องกับที่คำนวณได้จากสมการที่ 3 และผลการหา pKa ของอินดิเคเตอร์ทั้ง 4 ชนิดด้วย μPAD แสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ผลการหาค่าคงที่การแตกตัวของพีเอชแต่ละชนิดด้วย μPAD เทียบกับค่าจริง

อินดิเคเตอร์	ความชัน	จุดตัด	R^2	pKa ที่ได้จากการคำนวณ	%RSD (n=3)	pKa จากงานวิจัยก่อนหน้า (Dean, 1999; Patanik, 2004)
BG	1.4294	4.7636	0.9888	4.76	2.18	4.7
BP	1.1333	6.3219	0.9867	6.32	0.55	6.3
BB	1.0905	7.4170	0.9927	7.42	1.25	7.1
PP	0.6392	9.8518	0.9390	9.85	0.73	9.4

ที่มา: Taghizadeh–Behbahan *et al*., 2018



ภาพที่ 14 รูปแบบและรายละเอียดของ μPAD ที่ใช้ (a) กราฟความเข้มสีแดง เขียว และน้ำเงินที่ค่าพีเอชช่วงกว้าง (2–10) (b) ช่วงละเอียด (5–7) ของการศึกษาค่าคงที่การแตกตัวของ BP (c) และกราฟที่สร้างจากสมการ Henderson-Hasselbalch แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่า Log (Ind^-/HInd) ของ BP (d)

ที่มา: Taghizadeh–Behbahani *et al*., 2018

บทสรุป

การนำ μPAD มาประยุกต์ใช้ทางการศึกษาโดยการนำมาใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน รวมทั้งยังสามารถนำมาใช้ทดแทนบทปฏิบัติการมาตรฐาน เช่น การไทเทรตกรด–เบส ที่ต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมีจำนวนมาก เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับพื้นที่ที่ขาดโอกาสทางการศึกษาทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในบทเรียนและเนื้อหามากยิ่งขึ้น และเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาความไม่เท่าเทียมทางการศึกษา โดย μPAD มีวิธีการสร้างได้หลากลายวิธีดังในตาราง 1 แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อด้อยของตัวเอง ขึ้นอยู่กับความพร้อมและความเหมาะสมกับงานที่จะไปประยุกต์ใช้ การสร้างช่องทางการไหลของ

μPAD โดยการนำวัสดุที่ไม่ชอบน้ำมาสร้างเป็นขอบของช่องทางการไหล (hydrophobic barrier) โดยวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจคือ ไขเทียน ซึ่งหาง่ายราคาถูก มาใช้เป็นวัสดุไม่ชอบน้ำสำหรับการสร้าง μPAD ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธี จึงขอสรุปจุดเด่นจุดด้อยของแต่ละวิธีดังในตาราง 5

ดังนั้นการนำ μPAD มาประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนรู้ จึงต้องเลือกใช้วิธีการสร้างให้

ตาราง 5 ตารางสรุปวิธีการใช้ไขเทียนเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำสำหรับสร้าง μPAD

การวาดด้วยไขเทียน	การพิมพ์สกรีนด้วยไขเทียน	การพิมพ์ด้วยไขเทียน	การจุ่มไขเทียน
เป็นวิธีการสร้างที่ง่ายและราคาถูกที่สุด แต่ไม่เหมาะกับการสร้าง μPAD ที่ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูง	เป็นวิธีการสร้างง่าย และราคาถูก สามารถใช้เป็นทางเลือกที่ดีหากต้องการ μPAD ที่มีความละเอียดมากในระดับหนึ่ง ไม่ถึงกับซับซ้อน เนื่องจากมีขีดจำกัดเรื่องการออกแบบเพื่อนำไปสร้างบล๊อกสกรีน อย่างไรก็ตามบล๊อกสกรีนแบบเดียวสามารถสร้างชิ้นงานได้เป็นจำนวนมากโดยบล๊อกไม่มีการสึกหรอจากการใช้งาน	เป็นวิธีการสร้างที่ดีที่สุดใน 4 วิธีที่เปรียบเทียบสามารถสร้าง μPAD ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง รวมทั้งสามารถสร้างได้ครั้งละหลายๆ ชิ้นงาน สามารถออกแบบที่มีความซับซ้อนได้ แต่ก็มีราคาแพงที่สุดเนื่องจากต้องใช้เครื่องปริ้นเตอร์ที่ทำงานเฉพาะทาง	เป็นวิธีการสร้างที่สร้างง่าย และราคาไม่สูง แต่มีปัญหาเรื่องของการสร้างแม่แบบ (mask) ที่ต้องมีความปราณีตในการสร้าง

เหมาะสมกับบทเรียนหรือการทำปฏิบัติการทดลองนั้น ๆ ตลอดจนต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอุปกรณ์และงบประมาณที่ใช้อีกด้วย นอกจากนี้บทความนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจสร้างและผลิตชุดการทดลองที่ต้องการลดการใช้อุปกรณ์และสารเคมี โดยเฉพาะในรายวิชาเคมีที่ต้องทำปฏิบัติการทดลองเป็นหลัก ซึ่งนอกจากบทปฏิบัติการทดลอง เรื่อง การไทเทรตกรด–เบส ที่ยกตัวอย่างไปข้างต้นแล้ว μPAD ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดการทดลองสาธิตในวิชาเคมีในหัวข้อหรือเนื้อหาอื่น ๆ ที่เน้นการตรวจวัดทางสี (colorimetric method) ได้อีกด้วย เช่น การหาปริมาณเหล็กหรือโลหะหนักชนิดต่าง ๆ การทดสอบโปรตีนด้วยปฏิกิริยาไบยูเรต (biuret test) การทดสอบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางชนิด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ที่ให้ทุนสนับสนุน และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH–CIC) กระทรวงอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

Abe, K., Suzuki, K., and Citterio, D. (2008). Ink jet–printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper. **Analytical Chemistry** 80(18): 6928–6934.

Barmby, P., Kind, P. M., and Jones, K. (2008). Examining changing attitudes in secondary school science. **International Journal of Science Education** 30(8): 1075–1093.

Birch, N. C., and Stickle, D. F. (2003). Example of use of a desktop scanner for data acquisition in a colorimetric assay. **Clinica Chimica Acta** 333(1): 95–96.

Bruzewicz, D. A., Reches, M., and Whitesides, G. M. (2008). Low–cost printing of poly(di methylsiloxane) barriers to define microchannels in paper. **Analytical Chemistry** 80(9): 3387–3392.

Cai, L., Wu, Y., Xu, C., and Chen, Z. (2013). 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., Wang, Y., Wu, Y., Xu, C., Zhong, M., Laia, H., and Huang, J. (2014). Fabrication of a microfluidic paper– based analytical device by silanization of filter cellulose using a paper mask for glucose assay. **Analyst** 139: 4593–4598.

Carrilho, E., Martinez, A. W., and Whitesides, G. M. (2009). Understanding wax printing: A simple micropatterning process for paper–based microfluidics. **Analytical Chemistry** 81(16): 7091–7095.

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.

Chen, B., Kwong, P., and Gupta, M. (2013). Patterned fluoropolymer barriers for containment of organic solvents within paper–based microfluidic devices. **ACS Applied Materials & Interfaces** 5(23): 12701–12707.

Dean, J. A. (1999). **Lange's Handbook of Chemistry**. 15th ed. Chicago, Illinois: R. R. Donnelley & Sons.

Din–a, A., Tamuang, S., Amatatongchai, M., Jarujamrus, P., and Chairam, S. (2016). Simple, low–cost and small scale titration set for microscale laboratory in classroom. **Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning** 7(2): 424–436.

Dornelas, K. L., Dossi, N., and Piccin, E. (2015). A simple method for patterning poly(dime thylsiloxane) barriers in paper using contact– printing with low– cost rubber stamps. **Analytica Chimica Acta** 858(1): 82–90.

Dungchai, W., Chailapakul, O., and Henry, C. S. (2011). A low–cost, simple, and rapid fabrication method for paper– based micro fluidics using wax screen–printing. **Analyst** 136(1): 77–82.

Fenton, E. M., Mascarenas, M. R., López, G. P., and Sibbett, S. S. (2009). Multiplex lateral– flow test strips fabricated by two–

dimensional shaping. **ACS Applied Materials & Interfaces** 1(1): 124–129.

George, R. (2000). Measuring Change in Students' attitudes toward science over time: An application of latent variable growth modeling. **Journal of Science Education and Technology** 9(3): 213–225.

He, Q., Ma, C., Hu, X., and Chen, H. (2013). Method for fabrication of paper–based microfluidic devices by alkylsilane self–assembling and UV/O_3–patterning. **Analytical Chemistry** 85(3): 1327–1331.

Karita, S., and Kaneta, T. (2014). Acid–base titrations using microfluidic paper–based analytical device**. Analytical Chemistry** 86(24): 12108–12114.

Koesdjojo, M. T., Pengpumkiat, S., Wu, Y., Boonloed, A., Huynh, D., Remcho, T. P., and Remcho, V. T. (2015). Cost effective paper–based colorimetric microfluidic devices and mobile phone camera readers for the classroom. **Journal of Chemical Education** 92(4): 737–741.

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.

Lertsuwunpaisal, P., Yoome, P., and Srisopa, A. (2016). Titration technique development based on microscale and the implement in science classes. **Humanities and Social Sciences Journal of Graduate School, Pibulsongkram Rajabhat University** 10(2): 18–36.

Li, X., Tian, J., Nguyen, T., and Shen, W. (2008). Paper–based microfluidic devices by plasma treatment. **Analytical Chemistry** 80(23): 9131–9134.

Li, X., Tian, J., Garnier, G., and Shen, W. (2010). Fabrication of paper–based microfluidic sensors by printing. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** 76: 564–570.

Mako, T. L., and Levine, M. (2019). Design, implementation, and evaluation of paper-based devices for the detection of acetaminophen and phenacetin in an advanced undergraduate laboratory. **Journal of Chemical Education** 96(8): 1719–1726.

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): 1318–1320.

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.

Nie, J., Zhang, Y., Lin, L., Zhou, C., Li, S., Zhang, L., and Li, J. (2012). Low–cost fabrication of paper–based microfluidic devices by

one–step plotting. **Analytical Chemistry** 84(15): 6331–6335.

Nogueira, S. A., Sousa, L. R., Silva, N. K. L., Rodrigues, P. H. F., and Coltro, W. K. T. (2017). Monitoring acid–base titrations on wax printed paper microzones using a smartphone. **Micromachines** 8(5): 139.

Nurak, T., Praphairaksita, N., and Chailapakul, O. (2013). Fabrication of paper–based devices by lacquer spraying method for the determination of nickel (II) ion in waste water. **Talanta** 114: 291–296.

Olkkonen, J., Lehtinen, K., and Erho, T. (2010). Flexographically printed fluidic structures in paper. **Analytical Chemistry** 82(24): 10246–10250.

Patnaik, P. (2004). **Dean's Analytical Chemistry Handbook**. 2nd ed. New York: McGraw–Hill.

Pena–Pereira, F. J. (2014). **Miniaturization in Sample Preparation**. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.

Pimdee, N. (2020) **Green Chemistry**. Retreived from https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7167-green-chemistry, January 14, 2020. (in Thai)

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.

Pruekpramool, C., Phonphok, N., White, O. L., and Musikul, K. (2011). Student attitudes toward science: The case of Thai upper secondary school non–science students. **The International Journal of Learning** 18(1): 289–301.

Ravgiala, R. R., Weisburd, S., Sleeper, R., Martinez, A., Rozkiewicz, D., Whitesides, G. M., and 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.

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: 6580–6588.

Sharpe, E., and Andreescu, S. (2015). Integration of nanoparticle–based paper sensors into the classroom: An example of application for rapid colorimetric analysis of antioxidants. **Journal of Chemical Education** 92(5): 886–891.

Smith, S., Moodley, K., Govender, U., Chen, H., Fourie, L., Ngwenya, S., Kumar, S., Mjwana, P., Cele, H., Mbanjwa, M. B., Potgieter, S., Joubert, T. H., Land, K. (2015). Paper–based smart microfluidics for education and low–cost diagnostics. **South African Journal of Science** 111: 1–10.

Songjaroen, T., Dungchai, W., Chailapakul, O., and Laiwattanapaisal, W. (2011). Novel, simple and low–cost alternative method for fabrication of paper–based microfluidics by wax dipping. **Talanta** 85(5): 2587–2593.

Taghizadeh– Behbahani, M., Hemmateenejad, B., and Shamsipur, M. (2018). Colorimetric determination of acidity constant using a paper–based microfuidic analytical device. **Chemical Papers** 72(5): 1239–1247.

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.

Xu, C., Lin, W., and 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.