

## อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ

## Paper-based Analytical Device

ปวีณา เคือนฉาย<sup>1\*</sup> และ วิจิตรา เคือนฉาย<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน  
833 ถ.พระราม 1 เขตปทุมวัน แขวงวังใหม่ กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2104-9099  
<sup>2</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทรศัพท์: 0-2470-9553

Paweenar Duenchay<sup>1\*</sup> and Wijitar Dungchai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology  
833 Rama I Rd., Pathumwan, Bangkok 10330, THAILAND. Tel: 66(0)-2104-9099

E-mail: paweenar13@yahoo.com

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi  
126 Pracha Uthit Rd., Banmod, Thung Khru, Bangkok 10140, THAILAND. Tel: 66(0)-2470-9553

E-mail: wijitar.dun@kmutt.ac.th

## บทคัดย่อ

อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ (Paper-based Analytical Device) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในภาคสนามรูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความนิยม โดยทำการสร้างช่องไหลของสารลงบนกระดาษ กระดาษเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เมื่อหยดน้ำลงบนกระดาษหรือจุ่มกระดาษลงในน้ำ น้ำจะซึมไปตามช่องขนส่งที่ได้สร้างไว้ ซึ่งควบคุมทิศทางการซึมของน้ำหรือของไหลได้ บทความนี้รวบรวมบทความที่เกี่ยวกับอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยภาษาไทยที่เข้าใจง่าย โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้ การสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ ข้อดีและข้อเสียของวิธีการสร้างต่างๆ เทคนิคในการตรวจวัดบนอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ ตัวอย่างสารที่ถูกวิเคราะห์ อุปกรณ์การพัฒนารูปแบบ รวมไปถึงความสำคัญของอุปกรณ์ในภาคธุรกิจ

คำสำคัญ: กระดาษ, ชุดตรวจวัด, อุปกรณ์การวิเคราะห์

## Abstract

Paper-based analytical device consisting of hydrophobic and hydrophilic channel is a popular alternative test kits. Water can penetrate into hydrophilic channel of paper-based analytical device so this

device can control the direct of water and fluidic. This review describes the paper-based analytical device in the Thai language easy to understand. Topic of this review includes the fabrication method of paper-based analytical device, the advantage and disadvantage of each fabrication method, the detection method, the application, the obstacles of device development, and the important of this device on the economic system.

**Keywords:** Paper, Test kit, Analytical device

## 1. บทนำ

อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ (Paper-based Analytical Device) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความนิยม โดยทำการสร้างช่องไหลของสารลงบนกระดาษ กระดาษเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เมื่อหยดน้ำลงบนกระดาษหรือจุ่มกระดาษลงในน้ำ น้ำจะซึมไปตามช่องขนสงที่ได้สร้างไว้ ซึ่งควบคุมทิศทางการซึมของน้ำหรือของไหลได้ สารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถไหลไปยังบริเวณทดสอบบนกระดาษได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ การควบคุมคุณภาพอาหาร และการตรวจวัดทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ถือว่าเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือสามารถผลิตได้ง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำ เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาซื้อได้ง่าย พบได้ในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษยังพกพาได้สะดวก และสามารถทิ้งได้หลังจากการทำวิเคราะห์ โดยคุณสมบัติของกระดาษคือประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส สามารถดูดซับน้ำ (Hydrophilic) ได้ดี อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนพื้นผิวของกระดาษได้ตามความต้องการในการใช้งานอีกด้วย ซึ่งกระดาษที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก็มีความหลากหลาย เช่น กระดาษเซลลูโลสยี่ห้อ Whatman กระดาษกรองเบอร์หนึ่งยี่ห้อ Whatman และกระดาษกรองเบอร์สี่ยี่ห้อ Whatman เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันมีงานวิจัยล่าสุดสามารถใช้กระดาษ 80 แกรม ประยุกต์เป็นอุปกรณ์ได้ [1]

## 2. อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ

ในปี พ.ศ. 2492 Muller และคณะ [2] ได้ศึกษาความจำเพาะในการผสมกันของเม็ดสีภายในช่องบนกระดาษ โดยทำการสร้างลายบนกระดาษด้วยพาราฟินเพื่อเพิ่มความเร็วในการแพร่ของสาร และการสร้างอุปกรณ์บนกระดาษมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในปีพ.ศ. 2550 Martinez และคณะ [3] พัฒนาอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาค (Paper-based microfluidic device,  $\mu$ PAD) ซึ่งระบบนี้จะใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย โดยมีการสร้างช่องไหลขนาดจุลภาคบนกระดาษ สารละลายจะไหลด้วยแรงคาปิลารี โดย  $\mu$ PAD สามารถสร้างได้ทั้งแบบสองมิติ (2D) และสามมิติ (3D) [4-6] ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์สารได้หลากหลายมากขึ้น [7-9]

## 2.1 การสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ

ปัจจุบันเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาค มีด้วยกัน 10 เทคนิค [4, 6, 10] อันได้แก่ การพิมพ์ด้วยแสง (photolithography) การพิมพ์ด้วยเครื่องพล็อตเตอร์ (plotter) การสลักด้วยการฉีดหมึก (ink jet etching) การปรับสภาพด้วยพลาสมา (plasma treatment) การตัดกระดาษ (paper cutting) การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax printing) การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกฉีด (ink jet printing) การพิมพ์แบบยืดหยุ่น (flexography printing) การพิมพ์สกรีน (screen printing) และการปรับสภาพด้วยเลเซอร์ (laser treatment) ซึ่งหลักการพื้นฐานของการสร้างช่องไหลจุลภาคบนกระดาษประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยจะสร้างขนาดช่องในระดับไมครอนบนกระดาษ ซึ่งตารางที่ 2.1 [4] จะแสดงความแตกต่างของเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการสร้างช่องไหลจุลภาค ยกเว้นเทคนิคการตัดกระดาษ (paper cutting) เพราะไม่สามารถเชื่อถือได้ในการแบ่งส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการสร้างช่องไหลจุลภาค [4]

เทคนิค	สารที่ใช้เคลือบ	หลักการออกแบบ	วิธีการ
การพิมพ์ด้วยแสง (photolithography)	สารไวแสง	การปิดกั้นรูบนกระดาษ	เลือกส่วนที่ไม่ชอบน้ำ
การพิมพ์ด้วยเครื่องพล็อตเตอร์ (plotter)	PDMS*	การปิดกั้นรูบนกระดาษ	เลือกส่วนที่ชอบน้ำ
การสลักด้วยการฉีดหมึก (ink jet etching)	โพลีสไตรีน	การเคลือบของสารบนพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ไม่ชอบน้ำ
การปรับสภาพด้วยพลาสมา (plasma treatment)	AKD**	การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ไม่ชอบน้ำ
การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax printing)	ขี้ผึ้ง	การเคลือบของสารบนพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ชอบน้ำ
การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกฉีด (ink jet printing)	AKD**	การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ชอบน้ำ
การพิมพ์แบบยืดหยุ่น (flexography printing)	โพลีสไตรีน	การเคลือบของสารบนพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ชอบน้ำ
การพิมพ์สกรีน (screen printing)	ขี้ผึ้ง	การเคลือบของสารบนพื้นผิวเส้นใย	เลือกส่วนที่ชอบน้ำ
การปรับสภาพด้วยเลเซอร์ (laser treatment)	ขึ้นกับชนิดกระดาษ เช่น ซิลิกอน: ใช้กับกระดาษหนัง, ขี้ผึ้ง: ใช้กับกระดาษขี้ผึ้ง	การปิดกั้นรูบนกระดาษ	เลือกส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

\*PDMS คือ Polydimethylsiloxane

\*\*AKD คือ Alkylketene Dimer

โดยการเลือกใช้เทคนิคในการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษต้องพิจารณาจากหลายๆ ปัจจัย เช่น ความพร้อมของอุปกรณ์ ราคาของวัสดุ กระบวนการผลิต และการประยุกต์ของอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ ในระบบของไหลจุลภาค โดยตารางที่ 2.2 [4] จะแสดงข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิค ซึ่งพบว่าการสร้างอุปกรณ์กระดาษด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยน้ำหมึกชนิด (ink jet printing) และการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax printing) เป็นเทคนิคที่ราคา ถูก ง่าย และใช้เวลาในการผลิตน้อย จึงเป็นวิธีที่ค่อนข้างได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน [6] ดังนั้นในการทบทวน บทความวิชาการนี้ขออธิบายขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax printing) ประกอบด้วยวิธีการสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก ออกแบบและทำการพิมพ์ขี้ผึ้งแข็งลงบนกระดาษ ส่วนที่ต้องการให้เป็นบริเวณ ไม่ชอบน้ำจะออกแบบให้เคลือบหรือพิมพ์ด้วยขี้ผึ้งแข็ง โดยเครื่องพิมพ์ขี้ผึ้งที่ขาย ตามท้องตลาดทั่วไป (wax printer) ขั้นตอนที่สองนำกระดาษที่เคลือบขี้ผึ้งแข็งแล้วนั้นวางลงบนแผ่นความร้อน เพื่อให้ขี้ผึ้งหลอมและซึมลงไปบนเนื้อกระดาษ จะทำให้เกิดบริเวณชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำตามที่ออกแบบไว้ ตอนต้น ต้นทุนในการผลิตจะต่ำกว่า 5 บาทต่อการพิมพ์หนึ่งแผ่นกระดาษขนาด A4 แสดงขั้นตอนในการสร้าง ช่องไหลดังรูปที่ 2.1

## 2.2 เทคนิคการตรวจวัดที่ประยุกต์กับอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ

สำหรับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารสามารถใช้เทคนิคต่างๆ เข้าร่วมในการวิเคราะห์ผลได้ [11] เช่น

1. การตรวจหาโดยการเทียบสี (Colorimetric Detection) วิธีนี้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เพราะเป็นวิธีนี้ เป็นวิธีที่ง่าย และสามารถมองเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า เช่น การวิเคราะห์หากลูโคสและ โปรตีน [12] ซึ่งทำการวัดการเปรียบเทียบสีด้วยตาเปล่า หรือโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายรูป หรือเครื่องสแกนเนอร์ จากนั้นรูปจะถูกส่งไปยัง คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสี โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ซึ่งง่ายในการแปลผลข้อมูลจากการ ทดลอง แสดงตัวอย่างในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2.2 (a)

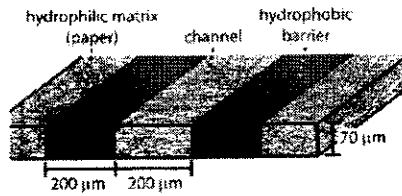
2. การตรวจหาด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Detection) วิธีนี้เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลง ทางไฟฟ้า โดยเทคนิคนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 3 ชนิดในระบบได้แก่ ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้า อ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ซึ่งจะทำการสร้างกระดาษโดยนำขั้วทั้ง 3 ชนิดเคลือบหรือติดไว้บนกระดาษ [1] แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 (b)

3. การตรวจหาด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เป็นวิธีที่วัดการเปลี่ยนแปลงค่าการ นำไฟฟ้าของสารเคมี แต่การใช้เทคนิคนี้ในอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษยังมีข้อจำกัดในการประยุกต์การ ตรวจวัดสารในสถานะก๊าซ [13]

4. การตรวจหาโดยวิธีการทางเคมีเรืองแสง (Chemiluminescent) [14] และวิธีการทางไฟฟ้าเคมีเรืองแสง (Electrochemiluminescent Detection) [15] แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2 (c) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ประสบความสำเร็จ

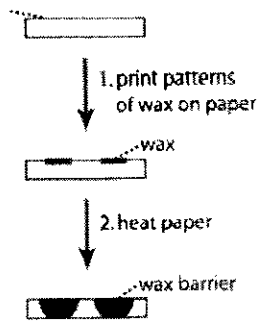
ในการนำมาทำอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ โดยได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถผลิตได้ง่าย ราคาถูก และมีความไวในการตรวจวัดสูง (Sensitivity)

ตัวอย่างของสารที่ถูกวิเคราะห์ เช่น กลูโคส [16-22] โปรตีน [16-22] pH [16-17] กรดยูริก [23] คอเลสเตอรอล [19] ชาติเหล็ก [24, 22] เป็นต้น ตัวอย่างสารที่ถูกวิเคราะห์ ปฏิกริยา เทคนิคในการวิเคราะห์ดัง แสดงในตารางที่ 2.3

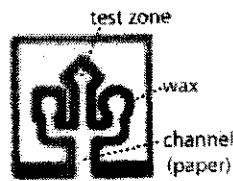


(a)

cross-section



(b)



(c)

รูปที่ 2.1 การสร้างช่องไหล (a) ภาพโครงสร้างของกระดาษหลังเคลือบด้วยขี้ผึ้ง (b) ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ด้วยการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (c) อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษที่ถูกสร้างด้วยการพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิคในการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ  
ในระบบของไหลจุลภาค (paper-based microfluidic devices)

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
การพิมพ์ด้วยแสง (photolithography)	ความละเอียดของช่องไหลจุลภาคสูง	อุปกรณ์ราคาแพง
การพิมพ์ด้วยเครื่อง พล็อตเตอร์ (plotter)	PDMS ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต มีราคาถูก	ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตระดับสูงได้
การสลักด้วยการฉีดหมึก (ink jet etching)	ต้องใช้เครื่องพิมพ์ในการสร้างช่องไหลจุลภาค โดยฉีดและพิมพ์สารเคมีหรือสารชีวเคมี	ในการสร้างไหลต้องพิมพ์ 10 ครั้ง, อุปกรณ์ที่พิมพ์ต้องกำหนดเอง และไม่เหมาะกับการพิมพ์รูปแบบขนาดใหญ่
การปรับสภาพด้วย พลาสมา (plasma treatment)	AKD ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต มีราคาถูก	ความต่างของ ต้นแบบทำให้เกิดความต่างของช่องไหลบนกระดาษ
การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง (wax printing)	อุปกรณ์ในการผลิตมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและรวดเร็ว	ขี้ผึ้งที่ใช้ในการพิมพ์มีราคาแพง และยังมีขั้นตอนสำหรับให้ความร้อน หลังจากพิมพ์ขี้ผึ้งแล้ว
การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกฉีด (ink jet printing)	AKD ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต มีราคาถูก มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและรวดเร็ว	ต้องให้ความร้อนหลังจากพิมพ์ AKD และต้องมีการปรับเปลี่ยนเครื่องพิมพ์
การพิมพ์แบบยืดหยุ่น (flexography printing)	สามารถใช้เครื่องพิมพ์ที่อยู่ที่บ้านผลิตได้	คุณภาพของการพิมพ์ขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิวกระดาษ
การพิมพ์สกรีน (screen printing)	อุปกรณ์สามารถผลิตได้ง่าย	ช่องไหลมีความละเอียดต่ำ
การปรับสภาพด้วย เลเซอร์ (laser treatment)	ช่องไหลมีความละเอียดสูง	ของเหลวไม่สามารถไหลออกไปนอกช่องไหลได้

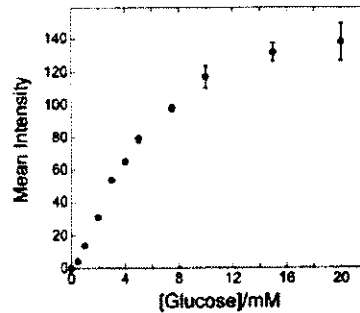
### 2.3 ความสำคัญเชิงธุรกิจ

ห้องปฏิบัติการบนกระดาษมีศักยภาพที่จะถูกนำไปใช้ วิเคราะห์สารในหลายๆ ด้าน รวมถึงนำไปใช้ในการวินิจฉัย ณ จุดบริการ (point-of-care diagnostics) ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 มีมูลค่าตลาดถึง 422 พันล้านบาท (\$ 13.4

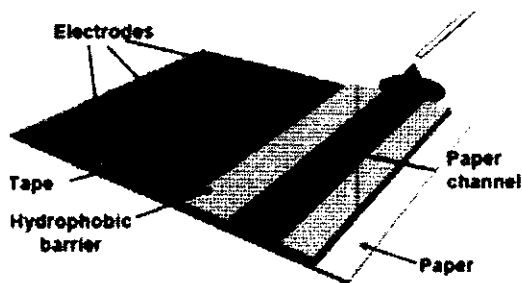
billion) [1] ในเชิงธุรกิจห้องปฏิบัติการบนกระดาษจะอาศัยเงินลงทุนที่น้อยมาก จึงเปิดโอกาสให้ภาควิชาการและภาคอุตสาหกรรมร่วมมือกันต่อยอดความรู้และสร้างเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับห้องปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อเป็นการเพิ่มตลาดและมูลค่าเชิงเศรษฐกิจของกลุ่มอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ รวมถึงการพัฒนาคุณภาพชีวิตของ คนในสังคมต่อไป

[Glucose] /mM		[BSA] / $\mu$ M
0		0
2.5		0.38
5.0		0.75
10		1.5
50		7.5
500		75

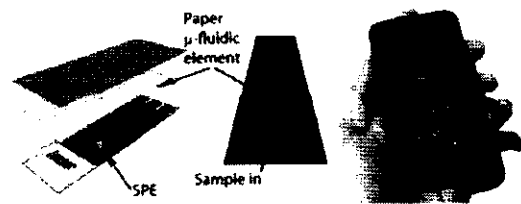
0.5 cm



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.2 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลบนอุปกรณ์กระดาษ (a) การเทียบสี (colorimetric detection) เช่น การหาปริมาณกลูโคสและโปรตีนที่มีอยู่ในตัวอย่างปัสสาวะ (b) เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical detection) ซึ่งใช้ระบบขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้ว Ag/AgCl และ คาร์บอน 2 ขั้ว เชื่อมต่อกับกระดาษ (c) วิธีการทางไฟฟ้าเคมีเรืองแสง (electrochemiluminescent detection) เช่น การหา 2-(dibutylamino)-ethanol (DBAE)) ในสารตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์จะใช้สารละลาย  $Ru(bpy)_3^{2+}$  ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ หยดลงบนกระดาษแล้วรอให้แห้งจึงนำไปวางบนขั้วไฟฟ้าชนิด screen-printed electrode (SPE) จากนั้นหยดสารตัวอย่างลงไปเล็กน้อย เมื่อบริเวณตัวตรวจวัดชุ่มไปด้วยสารตัวอย่าง จึงให้ศักย์ไฟฟ้า 1.25 โวลต์ แก่ขั้วไฟฟ้า แล้วทำการวิเคราะห์ค่าการเรืองแสงที่เกิดขึ้น [15]

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสารที่ถูกวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ

เทคนิคในการตรวจวัด	เทคนิคในการสร้างอุปกรณ์	สารที่วิเคราะห์	ปฏิกิริยาหรือสารเคมีที่ใช้	ผลการทดลอง	สารตัวอย่าง	เอกสารอ้างอิง
การตรวจหาโดยการเทียบสี	การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกถีด	กลูโคส	เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสทำปฏิกิริยากับกลูโคสได้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งไปทำปฏิกิริยากับไอโอดีนตามสมการด้านล่าง ส่วนกรดยูริกก็เช่นเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนเอนไซม์จากเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเป็น	วัดได้ระดับมิลลิโมลใช้เวลา 10 นาที	ปัสสาวะ, ชีรุม	[16]
	การพิมพ์ด้วยแสง	กรดยูริก	เอนไซม์ยูริเอส $2I^- + H_2O_2 + 2H^+ \xrightarrow{\text{Peroxidase}} I_2 + 2H_2O$ Yellow-brown color form			[22]
การตรวจหาด้วยวิธีการทางไฟฟ้า	การพิมพ์สกรีน	กลูโคสและเหล็ก	วัดสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเกิดจากกลูโคสทำปฏิกิริยากับเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสด้วยขั้วคาร์บอนเหล็ก Fe(II) สามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับ 1,10-Phenanthroline ให้สารประกอบสีแดงที่สามารถวิเคราะห์เทียบสีพร้อมทั้งวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในคราวเดียวกัน	วัดได้ระดับมิลลิโมลใช้เวลา 15 นาที	ชีรุม	[22], [24]
	การพิมพ์ด้วยขี้ผึ้ง	โลหะหนัก	เทคนิคโวลแทมเมทรี (Voltammetry) ด้วยการใช้อั้วไฟฟ้าสามชนิด ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยเป็นหมึกเงิน (Silver, Ag)	ระดับมิลลิโมล	น้ำดื่ม	[1]

#### 2.4 ข้อจำกัดในการพัฒนา

อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของกระดาษ วิธีที่ใช้การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด หรือ วิธีตรวจวัดที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์บนกระดาษ รวมทั้งข้อจำกัดต่อไปนี้ [4]

1. การรักษาสภาพตัวอย่างภายในช่องไหล เนื่องจากระหว่างที่สารตัวอย่างกำลังไหลภายในช่องไหล สารตัวอย่างมีโอกาสที่จะระเหยได้ ทำให้ปริมาณของสารตัวอย่างที่ไหลถึงบริเวณตรวจวัดมีค่าน้อยกว่าปริมาณตอนที่



หยดตอนเริ่มต้นซึ่งอาจจะมีค่าน้อยกว่า 50% ของปริมาตรเริ่มต้น จึงทำให้อุปกรณ์บนกระดาษไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยหรือสารที่มีราคาค่อนข้างแพง

2. สารที่นำมาใช้เป็นกัมแพงไฮโดรโฟบิก เนื่องจากกัมแพงของช่องไหลที่นิยมใช้บนอุปกรณ์บนกระดาษที่ทำหน้าเป็นไฮโดรฟิลิก คือ ซึ่ผึ้งและ AKD โดยปกติกัมแพงเหล่านี้จะไม่ยอมให้สารซึมผ่านหรือรั่วออกจากช่องไหลได้ แต่กรณีที่สารตัวอย่างมีความตึงผิวที่ต่ำ จะทำให้กัมแพงที่สร้างจากซึ่ผึ้งและ AKD ไม่สามารถต้านได้จึงทำให้สารเกิดการรั่วออกจากช่องไหลไม่ไหลไปตามช่องไหลที่ได้ออกแบบไว้

3. ซีดก่าจัดในการตรวจวัด (LOD) ค่อนข้างสูง สำหรับการเทียบสีด้วยตาเปล่า จึงทำให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำๆ เช่น การหาสารที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม หรือ ในอาหาร ปกติแล้วค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานที่สารสามารถปนเปื้อนจะอยู่ในหน่วยไมโครกรัม ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำและยากที่จะวิเคราะห์โดยอาศัยการดูสีหรือการเปลี่ยนแปลงสีด้วยอุปกรณ์บนกระดาษ

ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์บนกระดาษจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นค่อนข้างสูง เพราะถ้าหากขจัดปัญหาเหล่านี้ได้ จะทำให้อุปกรณ์บนกระดาษเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะจะ ช่วยลดต้นทุน เวลา ในการวิเคราะห์ ให้ต่ำลง และสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทุกสถานที่ตามที่ต้องการ

### 3. สรุป

อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ (Paper-based Analytical Device) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ สารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถไหลไปยังบริเวณทดสอบบนกระดาษได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้หลากหลายทั้งทางการแพทย์ การควบคุมคุณภาพอาหาร และการตรวจวัดทางด้านสิ่งแวดล้อม ถือว่าเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือสามารถผลิตได้ง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำ พกพาได้สะดวก และสามารถทิ้งได้หลังจากทำการวิเคราะห์ แต่การพัฒนาอุปกรณ์บนกระดาษยังเป็นสิ่งที่จำเป็นค่อนข้างสูง เพราะถ้าหากขจัดข้อจำกัดในการผลิตได้ จะทำให้อุปกรณ์บนกระดาษเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะช่วยลดต้นทุน เวลา ในการวิเคราะห์ ให้ต่ำลง และสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลากหลายการใช้งาน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Araujo W. R. and Paixão T., "Fabrication of disposable electrochemical devices using silver ink and office paper", *Analyst*, 2014, No. 139, pp. 2742-2750.
- [2] Nobelprize.org, The Nobel Prize in Chemistry 1952. Internet: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1952/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1952/press.html). [July 4, 2012].
- [3] Whitesides Research Group, Internet: <http://gmwgroup.harvard.edu/index.php>. [July 4, 2012].
- [4] Li X., Ballerini, D.R., and Shen, W., "A Perspective on Paper-Based MicroFluidics: Current Status and Future Trends", *Biomicrofluidics*, 2012, Vol. 6, No.1, pp.11301-113013.



- [19] Carrilho E., Martinez A.W., and Whitesides G.M., "Understanding Wax Printing – A Simple Micropatterning Process for Paper-Based Microfluidics", *Anal. Chem.*, 2009, No. 81, pp. 7091-7095.
- [20] Olkkonen J., Lehtinen K., and Erho T., "Flexographically Printed Fluidic Structures in Paper", *Anal. Chem.*, 2010, No. 82, pp. 10246-10250.
- [21] Fenton E. M., Mascarenas M. R., López G. P. and Sibbett S. S., "Multiplex Lateral-Flow Test Strips Fabricated by Two-Dimensional Shaping", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2009, No. 1, pp. 124-129.
- [22] Duenchai W., Chailapakul O., and Henry C. S., "A Low Cost, Simple, and Rapid Fabrication Method for Paper-Based Microfluidics using Wax Screen-Printing", *Analyst*, 2011, No. 136, pp. 77-82.
- [23] Li X., Tian J. and Shen W., "Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors", *Cellulose*, 2010, No. 17, pp. 649-659.
- [24] Chitnis G., Ding Z., Chang C. L. , Savran C. A. and Ziaie B., "Laser-Treated Hydrophobic Paper: An Inexpensive Microfluidic Platform", *Lab Chip*, 2011, No. 11, pp. 1161-1165.

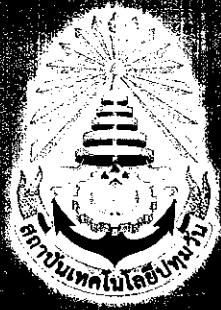
#### ประวัติผู้เขียนบทความ

อาจารย์ปวีณา เคื่อนฉาย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ.2546 ระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สังกัดคณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ: ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี, การวิเคราะห์สารเคมี

อาจารย์ ดร.วิจิตรา เคื่อนฉาย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี (เกียรตินิยม อันดับ 2) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2547 ระดับปริญญาโท-เอก วิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต สาขาเคมี ทุนคปก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2552 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

งานวิจัยที่สนใจ: พัฒนาเทคนิคในการตรวจวัดสาร, เคมีไฟฟ้า



# วารสาร วิชาการปทุมวัน

Pathumwan Academic Journal

Volume 10 Number 1 January 2018

1 การศึกษาระบบระบายอากาศสำหรับ โรงเรือนจำลองแบบปิดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์  
The Study of Ventilation System for Closed Housing Model by Solar Energy

11 การพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า  
Development of Electrical-Solar Hot Shower

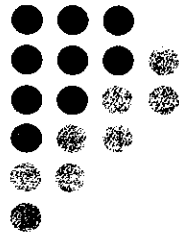
27 เทคโนโลยีของการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ  
Cloud Computing Technology

37 อุปกรณ์การวิเคราะห์หีบกระดาษ  
Paper-based Analytical Device

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาถ้อยแถลงขอรับทุนการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโท ฉบับที่ 9 - 10

ศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย	ไวยาพัฒนกร
รองศาสตราจารย์ ดร.จูลณี	เทียนไทย
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวงส์	พงษ์เจริญพานิช
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ	หวังนิพนพานโต
รองศาสตราจารย์ ดร.อุษา	ฮัมฟรี
รองศาสตราจารย์กฤษฎา	ประศาสน์วุฒิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณาวดี	ศรีศิริวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูลศักดิ์	โกษิยาภรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย	วรรรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์	ศิริไชย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลิสรา	ทรงศรีวิทยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริศนา	เพชรบูรณิน
ดร.ฐนกร	เจนวิทยา
ดร.ณัฐพล	วงศ์เยาว์
ดร.อาคม	ลักษณะสกุล

# สารบัญ



## Contents

วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 4 ฉบับที่ 10 พฤษภาคม - สิงหาคม 2557  
Pathumwan Academic Journal Vol. 4, No. 10, May - August 2014

หน้า

### บทความวิจัย

#### Research Papers

- การศึกษาระบบระบายอากาศสำหรับโรงเรียนจำลองแบบปิดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์  
The Study of Ventilation System for Closed Housing Model by Solar Energy  
เพ็ญลภัส ยิ้มเสมอจิต และ พงษ์พันธุ์ ฤกษ์นุเมทรัพย์  
Penlapas Yimsamerjit and Pongpun Rerkkumsup ..... 1
- การพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า  
Development of Electrical-Solar Hot Shower  
จีระพงศ์ ศรีวิชัย และ คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ  
Geerapong Srivichai and Khomkrit Srisuwan ..... 11

### บทความวิชาการ

#### Tutorial Papers

- เทคโนโลยีของการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ  
Cloud Computing Technology  
ชุตินันท์ พึ่งเกตุ และ พีรียา จารุเศรษฐการ  
Chutinun Phungket and Peeriya Jarusettakarn ..... 27
- อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ  
Paper-based Analytical Device  
ปวีณา เคื่อนฉาย และ วิจิตรา เคื่อนฉาย  
Paweenar Duenchay and Wijitar Dungchai ..... 37