รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋ว ชนิดโฟลอินเจคชันเคมิลูมิเนสเซนต์ เพื่อการวิเคราะห์สารปนเปื้อน ในอาหารบางชนิด

Ultrasound-enhanced flow injection chemiluminescence for determination of selected food contaminants in a miniaturized analytical system

โดย

ศักดิ์ชัย เสถียรพีระกุล และคณะ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557

รหัสโครงการวิจัย มจ.1-56-051

รายงานผลการวิจัย

เรื่อง เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋วชนิดโฟลอินเจคชันเคมิลูมิเนสเซนต์ เพื่อการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในอาหารบางชนิด

Ultrasound-enhanced flow injection chemiluminescence for determination of selected food contaminants in a miniaturized analytical system

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2556

จำนวน 295,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นายศักดิ์ชัย เสถียรพีระกุล

ผู้ร่วมโครงการ นางพิมพ์พร จันทร์ผง แซนเดอร์ส

นายมาโนชย์ ถนอมวัฒน์

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

30 ธันวาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋วชนิดโฟลอินเจคชันเคมิลูมิเนสเซนต์ เพื่อการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในอาหารบางชนิด (Ultrasound-enhanced flow injection chemiluminescence for determination of selected food contaminants in a miniaturized analytical system) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2556

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่การสนับสนุนอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ อุปกรณ์และสถานที่ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บุคลากร สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านอุปกรณ์และสารเคมี รวมทั้งช่วยประสานงานในด้านเอกสารงานราชการ ในการติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	15
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
การตรวจเอกสาร	16
อุปกรณ์และวิธีการ	17
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	25
สรุปผลการวิจัย	39
เอกสารอ้างอิง	41

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
ตารางที่ 2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ 3	สรุปสภาวะที่เหมาะสมของเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชัน	35
ตารางที่ 4	ผลเปรียบเทียบค่าความชัน และค่าจุดตัดแกน y ของ วิธี μPFI กับ วิธี μPFI-Ultra sonication	38

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	ปฏิกิริยาการเกิดแสงเคมิลูมิเนสเซนต์ของลูมินอล	8
ภาพที่ 2	การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่	11
ภาพที่ 3	หน่วยเพอร์วาพอเรชัน	12
ภาพที่ 4	เครื่องอัลตร้าโซนิค	13
ภาพที่ 5	การระเหยของผิวหน้าโมเลกุลขึ้นไปยังช่องว่างเหนือของเหลว (a) ไม่ใช่เครื่องอัลตร้าโซนิค และ (b) ใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค	14
ภาพที่ 6	ลักษณะโฟลเซลล์ที่ออกแบบและการประกอบโฟลเซลล์สำหรับการวิเคราะห์	19
ภาพที่ 7	ระบบการตรวจวิเคราะห์ฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์	20
ภาพที่ 8	ผังการจัดวางเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชัน	21
ภาพที่ 9	การวางไมโครฟลูอิดิกส์ในกล่องมืดหน้าหลอดตรวจวัดแสงโฟโตมัลติพลายเออร์	22
ภาพที่ 10	ผังการจัดวางเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน	23
ภาพที่ 11	ผลการศึกษาหาศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายแก่หลอดตรวจวัดแสง PMT	26
ภาพที่ 12	ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ ในกระแสออกซิไดซ์	27
ภาพที่ 13	ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสออกซิไดซ์	28
ภาพที่ 14	ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายลูมินอลในกระแสรีเอเจนต์	28
ภาพที่ 15	ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสรีเอเจนต์	29
ภาพที่ 16	ผลการศึกษาอัตราการไหลของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์	30
ภาพที่ 17	หน่วยเพอร์วาพอเรชันที่ใช้ในการทดลอง	31
ภาพที่ 18	ระบบเพอร์วาพอเรชันไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์	31
ภาพที่ 19	ผลการศึกษาเวลาการหยุดไหลชั่วคราวของกระแสตัวรับในหน่วยเพอวาพอเรชัน	32
ภาพที่ 20	ผลการศึกษาอัตราการไหลของกระแสตัวพากรดซัลฟิวริก	33
ภาพที่ 21	ผลการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริกในกระแสตัวพา	33
ภาพที่ 22	ผลการศึกษาหาปริมาตรสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่ฉีดเข้าไปในระบบ	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 23 μPFI gram ของสารละลายฟีนอล
(a) ไม่ใช่เครื่องอัลตร้าโซนิค และ (b) ใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค 36
ภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ด้วยไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับ
เทคนิคเพอร์วาพอเรชัน 37
ภาพที่ 25 ผลการวิเคราะห์ด้วยไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับ
เทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันชัน 37

เทคนิคคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋วชนิดโฟลอินเจคชันเคมิลูมิเนสเซนต์ เพื่อการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในอาหารบางชนิด

Ultrasound-enhanced flow injection chemiluminescence for determination of selected food contaminants in a miniaturized analytical system

ศักดิ์ชัย เสถียรพีระกุล พิมพ์พร จันทร์ผง แซนเดอร์ส และ มาโนชย์ ถนอมวัฒน์

Sakchai Satienperakul, Pimporn Janphong Sanders and Manoch Thanomwat

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ด้วยระบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอล ภายหลังการแยกสารแบบออนไลน์ชนิดเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน (พีเอฟไอ) ร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวิเคราะห์สารประกอบฟีนอล ภายในระบบปฏิบัติการไมโครฟลูอิดิกส์ที่สร้างขึ้นจากแผ่นชิพที่ประกอบด้วยแผ่นพอลิเมธิลเมทาครีเลตและพอลิไดเมธิลไซลอกเซน ประกบกันแบบแซนวิช ซึ่งเป็นส่วนตรวจวัดปฏิกิริยาการเรืองแสงเคมิลูมิเนสเซนต์ จากปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระของฟีนอลลิกกับสารประกอบลูมินอลในตัวกลางที่เป็นเบส แสงที่คายออกมามีสีฟ้า ซึ่งสามารถตรวจวัดด้วยหลอดวัดแสงโฟโตมัลติพลายเออร์ที่จ่ายค่าความต่างศักย์ที่ 700 โวลต์ โดยใช้คลื่นเสียงอัลตร้าโซนิกช่วยเร่งการระเหยกลายเป็นไอของฟีนอล ที่จะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านพีทีเอฟอีเข้าไปยังกระแสรีเอเจนต์ หลังจากที่ได้ศึกษาผลจากตัวแปรทางกายภาพ และทางเคมีแล้วเพื่อหาสภาวะการวิเคราะห์ที่เหมาะสม พบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ได้ เมื่อนำวิธีเพอร์วาพอเรชันร่วมกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ที่สำคัญบางชนิด ทำให้สามารถวิเคราะห์ฟีนอลได้ที่ความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงในช่วง 5.0×10^{-5} – 2.0×10^{-4} โมลาร์และมีขีดจำกัดในการตรวจวัดอยู่ในช่วง 5.0×10^{-5} โมลาร์ (3σ)

คำสำคัญ : ฟีนอล ไมโครฟลูอิดิกส์ เคมิลูมิเนสเซนต์

Abstract

The determination of phenols was developed utilizing microfluidic chemiluminescence system, coupling with an ultrasonic assisting pervaporation flow injection (PFI). In this research, a 'sandwich type' microfluidic device was made from small pieces of polymethylmethacrylate (PMMA) and polydimethylsiloxane (PDMS). The blue chemiluminescence light generated by oxidation reaction between luminol and H_2O_2 in the present of degraded free radical phenolic was detected by a photomultiplier tube (PMT) at the wavelength of 425 nm. An ultrasonic bath was employed to accelerate the volatility of phenol in an acidic donor stream solution in a pervaporation module furnished with a hydrophobic PTFE membrane, where the volatile phenol diffuses across the semi permeable membrane into the reagent solution. Some physical and chemical flow parameters were thoroughly studied. The experimental conditions show that microfluidics system coupled with pervaporation signal could be enhanced by an ultra sonication. At the optimum condition, linear calibration range of oxalic acid can be determined in the concentration range of $5.0 \times 10^{-5} – 2.0 \times 10^{-4}$ M, with the detection limit (3σ) of 5.0×10^{-5} M.

Key words: Phenols, Microfluidic, Chemiuminescence.

คำนำ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์มีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้มีการศึกษาหรือทำการวิจัยในแต่ละสาขาวิชาต่างๆรวมถึงพัฒนาการวิเคราะห์ทางด้านเคมีที่ให้ความสำคัญทางด้านการเกษตร อาหาร ยารักษาโรค เป็นต้น เนื่องจากเทคนิควิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในปัจจุบันบางเทคนิคต้องใช้เวลานาน ใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปทำการวิเคราะห์มาก อีกทั้งเครื่องมือที่ทำการวิเคราะห์มีราคาสูง ทำให้ไม่คุ้มกับการทดลองในแต่ละครั้ง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีที่สะอาด (green analytical chemistry) หรือพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีราคาถูก มีการลดใช้สารตัวอย่างและสารเคมีปริมาณน้อย เทคนิคที่นักเคมีวิเคราะห์มีความสนใจและแข่งขันพัฒนามากที่สุดในปัจจุบันคือเทคนิคการวิเคราะห์แบบไหลฉีด หรือโฟลอินเจคชันอะนาลิซิส (flow injection analysis) หรือนิยมเรียกย่อๆ ว่า FIA

ประวัติความเป็นมาของเทคนิคการวิเคราะห์แบบไหลฉีดหรือโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสนั้น ได้มีผู้พิมพ์แสดงผลงานแสดงความคิดเห็นตามแนวคิดของตนเอง เกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบอัตโนมัติด้วยการไหลของสารละลายในระบบท่อ มาก่อนการพัฒนาเทคนิคเอฟไอเอ ซึ่งแตกต่างกันออกไปในแต่ละบุคคล Steward ผู้นำกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ซึ่งได้ตีพิมพ์ผลงานขึ้นครั้งแรกเกี่ยวกับเทคนิค FIA ในปี 1974 และ 1976 ได้เขียนบทความเกี่ยวกับประวัติความเป็นมาของเทคนิค FIA ว่า การพัฒนาเทคนิคนี้มาจากการฉีดสารตัวอย่างเข้าไปในกระแสที่ไหลในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งพัฒนาโดย James และ Martin ในปี 1957 และ Steward เชื่อว่าผลงานตีพิมพ์ของ Skeggs ในปี 1957 เป็นจุดเริ่มของการวิเคราะห์แบบการไหลโดยมีฟองอากาศคั่น (segmented flow analysis) นอกจากนี้เขายังได้กล่าวถึงผลงานการค้นคว้าต่างๆ ที่เชื่อว่าเป็นผลงานที่แสดงถึงการพัฒนาการสู่เทคนิคการวิเคราะห์แบบไหลฉีด หรือ โฟลอินเจคชันอะนาลิซิส Steward ได้สรุปในตอนท้ายของบทความของเขาว่า FIA เป็นเทคนิคที่แฝงอยู่ในเทคนิคโครมาโทกราฟี แต่จนกระทั่งปี 1974-1975 เทคนิคนี้จึงเริ่มได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับกัน

Ruzicka and Hansen (1975) เป็นผู้นำกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ซึ่งเป็นผู้ที่ให้ชื่อเทคนิคนี้ว่าโฟลอินเจคชันอะนาลิซิส ได้เขียนบทความแสดงความคิดเห็นว่าเทคนิค FIA มีลักษณะที่โดดเด่น 3 ประการคือ

1. เทคนิคการฉีดสารตัวอย่าง
2. การแพร่กระจายที่ถูกควบคุม
3. ความแม่นยำในระยะเวลา

และมีความคิดเห็นว่าเทคนิค FIA นั้นมีความคล้ายคลึงกับเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวมากกว่าก๊าซโครมาโทกราฟี จากการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค FIA พบว่า การพัฒนาเทคนิค FIA จนถึงปัจจุบันอาจแบ่งได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

ช่วงแรก (ระหว่างปี ค.ศ. 1975-1981) เป็นช่วงที่เกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิค FIA เพื่อใช้เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์โดยอัตโนมัติของเทคนิคต่าง ๆ ที่มีความคล้ายคลึงกับที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ช่วงที่สอง (ระหว่างปี ค.ศ. 1981-ปัจจุบัน) เป็นช่วงที่เทคนิค FIA ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางเพื่อเป็นแนวทางการวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องในระบบของกระแสที่ไหล โดยใช้วิธีการวิเคราะห์โดยอุปกรณ์ชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุและศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารทางชีวภาพที่มีความซับซ้อน และการสร้างแนวคิดพื้นฐานใหม่สำหรับการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ของของเหลวโดยวิธีการอัตโนมัติ

ช่วงที่สาม นับตั้งแต่ปัจจุบันเป็นต้นไป เป็นช่วงที่ FIA ได้รับการพัฒนาให้เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สำคัญและมีประสิทธิภาพสำหรับสารเคมีที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคและทำให้เกิดความเป็นไปได้ สำหรับการออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการควบคุมในการวิเคราะห์และควบคุมกระบวนการในทางอุตสาหกรรม และเพื่อศึกษาจลนศาสตร์และกลไกของปฏิกิริยาเคมี ตลอดจนถึงกระบวนการต่างๆ ทางกายภาพและทางเคมีในสารละลายรวมทั้งในตัวอย่างที่เป็นก๊าซ และของแข็ง

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเทคนิค FIA มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีและเคมีประยุกต์ด้านต่างๆ อย่างกว้างขวางเช่น ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี เคมีคลินิก เภสัชกรรม อุตสาหกรรม การเกษตร สิ่งแวดล้อม ฯลฯ และมีการพัฒนาเทคนิค FIA ขึ้น

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์แบบอัตโนมัติอีกทั้งการประดิษฐ์เครื่องมือทำเอง/ซอร์ฟแวร์ที่มีการลดขนาดเพื่อให้ได้วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตอนแรกได้พัฒนาวิธีโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสแบบธรรมดา (nFIA) โดยใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องตรวจวัดสำหรับหาปริมาณโลหะหนักและแอนไอออนบางชนิด อีกทั้งการวิเคราะห์ทางเภสัชภัณฑ์ได้ทำการพัฒนาวิธีโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสแบบรีเวอร์ส (rFIA) เพื่อการประหยัดรีเอเจนต์ที่มีราคาแพงและใช้ในการติดตามคุณภาพน้ำ ได้ทำการพัฒนาวิธีที่มีการไหลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น แลปออนวาล์ว-ซีเควนเชียลอินเจคชันอะนาลิซิส (LOV-SIA) และแลปออนปาล์ม (LOP) โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดต่างๆ กัน สำหรับวิเคราะห์สารตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและทางเภสัชภัณฑ์ รวมทั้งการพัฒนาเครื่องมือทำเองขนาดจิ๋วและใช้เป็นหลักการในการพัฒนาวิธีไมโครโททัลอะนาลิซีส (μTAS) สำหรับวิเคราะห์สารตัวอย่างต่าง ๆ (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2553)

ไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics)

วิทยาการใหม่ที่เกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบการจัดการของไหล (fluid) เช่น ของเหลว หรือ ก๊าซ ที่มีปริมาณน้อยมาก (ต่ำกว่า 0.01 ไมโครลิตร) ที่ไหลผ่านร่องหรือท่อที่มีความกว้าง 0.1-100 ไมโครเมตร ท่อที่เล็กมากซึ่งเป็นโครงข่ายลำเลียงการไหลของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidic device) หรือเรียกอีกชื่อว่า Lab-on-a-chip (LOC) จะถูกสร้างขึ้นด้วย micro-fabrication techniques ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ ในยุคเริ่มต้นถูกสร้างขึ้นจากวัสดุฐานรองเช่นซิลิกอนและแก้วด้วยวิธีการสร้างลายวงจรด้วยแสง (photolithography) และแกะสลัก (etching) ซึ่งดัดแปลงมาจากอุตสาหกรรมการออกแบบและพัฒนาวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก microelectronic industry แต่กระบวนการผลิตจากวัสดุดังกล่าวมีราคาสูงและไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นแรงผลักดันให้ปัจจุบันนักวิจัยส่วนใหญ่หันมาสนใจสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ขึ้นจากพอลิเมอร์แทน เนื่องจากใช้เวลาในการผลิตน้อย มีคุณสมบัติ biocompatibility อีกทั้งยังมีราคาถูกจึงสามารถใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี soft lithography ที่อยู่บนรากฐานของการพิมพ์แบบ (printing) และหล่อแบบ (moulding) จากแม่แบบต่างๆ โดยที่แม่แบบสามารถสร้างได้จากเทคนิคต่างๆ นอกเหนือจากเทคนิค photolithography เช่น electron beam lithography, X-ray lithography หรือ ion beam lithography เป็นต้น (Li *et al.*: 2006)

วิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์เริ่มรุ่งเรืองขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ.2530 ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากมหาวิทยาลัยชั้นนำของโลกหลายแห่งมีศูนย์วิจัยด้านไมโครฟลูอิดิกส์ที่กำลังก้าวรุดหน้าอย่างรวดเร็วเช่น Folch Lab ของ University of Washington และ The Whitesides Research Group ของ Harvard University ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ Microfluidics Research Group ของ Max Plank Institute-DS ประเทศเยอรมนี เป็นต้น ที่อยู่ใกล้ประเทศไทยของเราก็คือศูนย์วิจัย Centre for Ion Beam Applications (CIBA) ของ National University of Singapore (NUS) ประเทศสิงคโปร์ซึ่งได้กลายเป็นศูนย์วิจัยชั้นนำแห่งหนึ่งของโลกวิทยาการด้านนี้ที่ใช้เทคนิค ion beam lithography ไม่ได้เป็นเรื่องไกลตัวในสมัยนี้เครื่องพิมพ์แบบ ink-jet เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนเพราะที่ใช้วิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ในการสร้างหยดหมึกขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100ไมครอน ประโยชน์ของไมโครฟลูอิดิกส์ที่มีต่อวงการทางวิทยาศาสตร์ เช่น เคมี ชีววิทยา แพทย์ศาสตร์ เภสัชศาสตร์ สารธารณสุขศาสตร์ เกษตรศาสตร์และด้านความมั่นคงแห่งชาติเพราะมีข้อดีหลายประการคือ

1. สอดคล้องกับพัฒนาการของโลกที่มุ่งสู่อุปกรณ์ต่างๆที่มีขนาดเล็กลงๆ (miniaturization)

2. เป็นอุปกรณ์วิเคราะห์แบบพกพาที่มีราคาไม่แพง สามารถใช้แล้วทิ้งได้ไม่ต้องสิ้นเปลืองเรื่องการทำความสะอาดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

3. ใช้ปริมาณสารที่เกี่ยวข้องในระดับต่ำมากจึงไม่สิ้นเปลืองในกรณีที่ต้องใช้สารเคมีราคาแพง และเมื่อใช้สารเคมีน้อยจึงควบคุมปริมาณได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาสั้นด้วยเนื่องจากกระบวนการจะเกิดขึ้นเร็วกว่า

4. ขนาดที่เล็กมากของระบบไมโครฟลูอิดิกส์จึงไม่สิ้นเปลืองพลังงาน

5. มีโอกาสที่จะนำไปทำเป็นระบบอัตโนมัติได้สูงสามารถลดขั้นตอนที่ต้องเกี่ยวข้องกับมนุษย์ มีศักยภาพที่จะเป็น real-time analysis ที่สามารถควบคุมได้จากระยะไกล (remote sensing)

6. มีความหลากหลาย แต่สะดวกสอดคล้องกับความก้าวหน้าของวงการวิชาการที่มีแนวโน้มจะเพิ่มเทคนิควิธีการทดสอบมากขึ้นกล่าวคือ สามารถทำให้มีลักษณะการใช้งานคล้ายเครื่องเล่นวีดีโอเกมส์ของ Sega หรือ Nintendo นั่นคือ เปลี่ยนเล่นเกมส์ใหม่โดยเพียงแต่เปลี่ยนตลับ cartridge แต่ยังคงใช้ตัวเครื่องหลักเดิมการวิเคราะห์ทางเคมีหรือชีววิทยาในอนาคตก็จะมีลักษณะคล้ายกันคือเมื่อต้องการเปลี่ยนการวิเคราะห์ก็เพียงแต่ถอดเปลี่ยน Lab Chip อันเล็กๆ เท่านั้น

7. สามารถควบคุมเรื่องความร้อนได้ดีเพราะมีค่า surface-to-volume ratio สูงจึงมีความปลอดภัยกว่าในกรณีของ exothermic reactions

ในด้านของวิชาการนั้นวิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์ก็เป็นศาสตร์ใหม่ที่ต้องศึกษาไม่น้อย เพราะเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องหรือท่อจิ๋ว มีขนาดไล่เลี่ยกับค่า mean-free-path ของโมเลกุลของของไหลหรือมวลหลักของของไหลก็อยู่ประชิดติดกับผนังท่อทั้งสิ้นพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของไหลในท่อจิ๋ว จึงแตกต่างจากการไหลของของไหลขนาดปกติเช่น ความตึงผิว (surface tension) และความหนืด(viscosity) จะมีผลรุนแรงขึ้นมาก แต่ในขณะที่ความเฉื่อย (inertia) จะมีผลน้อยลง หรือ สามารถที่จะควบคุมทิศทางการไหลได้โดยการใช้สนามไฟฟ้า (electrokinetic effects) อย่างที่ไม่สามารถทำได้ในการไหลในระบบปกติที่เราๆคุ้นเคยอีกประการหนึ่งนั้นการวิจัยศึกษาเรื่องนี้ ก็จะต้องบูรณาการเข้ากับศาสตร์หลายสาขา คือ มีความเป็น interdisciplinary nature สูงซึ่งทั้งสองประการเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่น่าสนใจสำรวจเป็นอย่างยิ่ง

การใช้อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ในห้องปฏิบัติการวิจัยต่างๆเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่เห็นชัดว่ามีการนำมาใช้กันแบบทั่วๆไปเพราะยังคงมีปัญหาสำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เช่น พอลิเมอร์ PDMS ที่นิยมใช้เป็นวัสดุหลักในปัจจุบันก็ใช้ได้กับของเหลวเพียงบางชนิดแต่ซิลิกอนหรือแก้วที่มีความทนทานต่อสารละลายมากชนิดกว่าก็เป็นวัสดุที่มีขั้นตอนการทำออกมาเป็นระบบไมโครฟลูอิดิกส์ที่ยุ่งยากและมีต้นทุนสูงกว่าการค้นคว้าวิจัยจึงยังต้องดำเนินการควบคู่กันไป แต่เพราะมี

การคาดการณ์ไว้ว่าmicrofluidic technology จะมีตลาดในกลุ่มอุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์ชีวภาพที่มีอนาคตที่น่าสนใจผลิตภัณฑ์ที่อาศัยประโยชน์จากวิทยาการไมโครฟลูอิดิกส์จึงได้เริ่มทยอยออกสู่ตลาดบ้างแล้ว เช่นเครื่องมือตรวจสอบการแสดงออกของยีนส์ (DNA Microarrays) ที่มีชื่อทางการค้าว่า Gene Chip ผลิตโดยบริษัท Affymetrix ที่เมือง Santa Clara มลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา เป็นต้น

เคมิลูมิเนสเซนต์

เคมิลูมิเนสเซนต์ (Chemiluminescence / CL) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นแสงที่มีความถี่ในช่วงคลื่นแสงวิซิเบิล (visible) หรืออินฟราเรด (infrared) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี พบว่าจะมีการเปล่งคลื่นแสงเมื่อปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวมีการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสารผลิตภัณฑ์ไปอยู่ในสภาวะเร้า (excited state) ซึ่งเมื่อกลับคืนมาสู่สภาวะพื้น (ground state) ก็จะมีการเปล่งคลื่นแสงออกมาเรียกคลื่นแสงนี้ว่า *เคมิลูมิเนสเซนต์* กระบวนการการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดฟลูออริเมตรี (fluorimetry) แต่จะแตกต่างที่หลักการพื้นฐานในกรณีของเคมิลูมิเนสเซนต์จะมีกระบวนการที่ไปกระตุ้นสารผลิตภัณฑ์ให้ไปอยู่ในสภาวะเร้า โดยมีการใช้แหล่งกำเนิดของคลื่นแสงแต่จะใช้ปฏิกิริยาเคมีแทนแต่การเกิดกระบวนการเกิดฟลูออริเมตรี นั้นกระบวนการกระตุ้นสารผลิตภัณฑ์ให้ไปอยู่ในสภาวะเร้า จะเป็นการรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง เช่นการใช้หลอดพลังงานแบบปรอทหรือ Mercury arc lamp เป็นต้น (วิรัช เรืองศรีตระกูล, 2548)

กระบวนการพื้นฐานของการเกิดเคมิลูมิเนสเซนต์สามารถอธิบายได้โดยสมการ (1) สารตั้งต้น A และ B จะเกิดปฏิกิริยาซึ่งกันและกันให้สารผลิตภัณฑ์ C^* ที่สภาวะเร้า และให้สารผลิตภัณฑ์ D ที่สภาวะพื้น

$$A + B \longrightarrow C^* + D \qquad (1)$$

สารผลิตภัณฑ์ C^* ที่สภาวะเร้าจะเปล่งพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสงซึ่ง ($h\nu$) สามารถที่จะวัดความเข้มของคลื่นแสงที่เปล่งออกมานี้ด้วยตัวตรวจวัดที่เหมาะสมเช่นหลอดขยายสัญญาณแสง

$$C^* \longrightarrow C + h\nu \qquad (2)$$

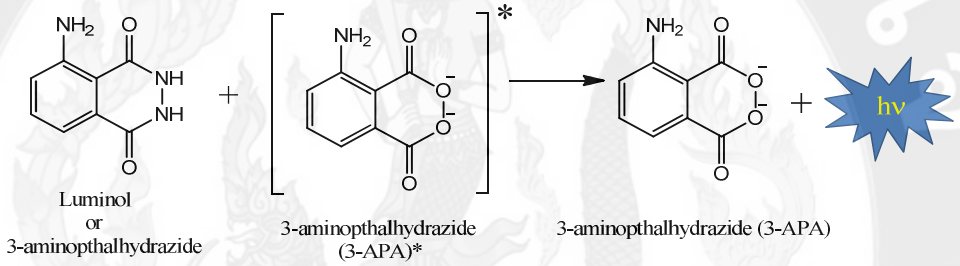
การเกิดเคมิลูมิเนสเซนต์นี้เกิดได้ด้วยปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจง เนื่องด้วยพบว่าพลังงานที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลนั้นเมื่อกลับลงมาสู่สถานะพื้นมักมีการเปล่งพลังงานคลื่นแสงออกมา สำหรับการเกิดเคมิลูมิเนสเซนต์นั้นพบว่า ส่วนใหญ่จะมีปัจจัยที่จำเป็นสามประการดังต่อไปนี้คือ

1) ปฏิกิริยามีความเหมาะสมที่จะรับพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดกระบวนการกระตุ้นภายในตัวอย่างดังกล่าว

2) กระบวนการกระตุ้นดังกล่าวสามารถให้สารผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะเร้าได้

3) มีการถ่ายเทพลังงานจากสภาวะเร้าไปยังโมเลกุลอื่นที่เรียกว่า โมเลกุลเคมิลูมิเนสเซนต์ซึ่งพร้อมที่จะคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสง เมื่อกลับลงสู่สภาวะพื้น

ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาเคมิลูมิเนสเซนต์ชนิดหนึ่งคือปฏิกิริยาของลูมินอลดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาการเกิดแสงเคมิลูมิเนสเซนต์ของลูมินอล

ในปฏิกิริยาของลูมินอลในสารละลายด่างกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เมื่อมีตัวเร่งที่เหมาะสม (เหล็กหรือคอปเปอร์ หรือสารออกซิแดนท์) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เคมิลูมิเนสเซนต์ พลังงานที่เข้าไปในปฏิกิริยาเพียงพอที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3-aminophthalhydrazine (3-APA*) ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นได้ จากนั้นเมื่อโมเลกุล de-excites ไปเป็น 3-APA แล้วปล่อยโฟตอนออกมา

เคมิลูมิเนสเซนต์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์ก๊าซ และของเหลว ยกตัวอย่างเช่นในการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน ไนตริกออกไซด์ สารประกอบซัลเฟอร์ หรือสารที่ไม่บริสุทธิ์ที่มีปริมาณน้อยๆ หรือสารพิษในอากาศ ในการทดสอบคุณภาพของอากาศในสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์สามารถตรวจวัดได้ในระดับต่ำถึง 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยการใช้เทคนิคเคมิลูมิเนสเซนต์ การประยุกต์ใช้เคมิลูมิเนสเซนต์ด้านอื่นๆ รวมถึงการวิเคราะห์สารอนินทรีย์ในของเหลว การวิเคราะห์สารอินทรีย์ ลำดับดีเอ็นเอโดยใช้ pyrosequencing เป็นต้น เคมิลูมิเนสเซนต์เป็นเทคนิคทั่วไปในทางชีววิทยา สามารถตรวจวัดสารชีวโมเลกุลที่มีปริมาณน้อยๆ ได้

การตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์อาศัยหลักการเปล่งแสงของสปีชีย์ที่สามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี ยกตัวอย่างเช่น สปีชีย์ที่ถูกกระตุ้นเมื่อลูมินอล (3-aminophthalhydrazine) เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยสารประกอบเช่น ไอออนโลหะหรือเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส การตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์คล้ายกับการตรวจวัดแบบฟลูออเรสเซนต์ เพียงแต่ไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยแสง การตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์ถูกใช้ในงานวิเคราะห์ทางเคมีหลายอย่าง

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้การประยุกต์ใช้ระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋ว ได้รับความนิยมอย่างสูงในวงการนักวิทยาศาสตร์ที่มีแนวทางการวิจัยพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดกระทัดรัด และมีราคาไม่สูงมากนัก โดยในช่วงระยะเวลา 4-5 ปีที่ผ่านมา มีรายงานวิจัยหลายฉบับที่ใช้ระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋ว ในการวิเคราะห์ตรวจสอบสารปนเปื้อนและสารมลพิษต่างๆ ทั้งในทางสิ่งแวดล้อม อาหารและยา รวมถึงตัวอย่างทางชีวภาพและเภสัชกรรม ซึ่งพบว่าได้เป็นผลสำเร็จที่น่าพอใจ โดยมีการใช้เครื่องมือตรวจวัดหากหลายชนิด ทั้งวิธีสเปกโทรสโคปี อิเลคโทรเคมีที่ทำงานร่วมกับเทคนิคโครมาโทรกราฟีแบบต่างๆ จึงทำให้ระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋ว มีศักยภาพสูง และสามารถพัฒนาต่อยอดให้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับงานภาคสนามที่มีขนาดกะทัดรัดและมีวิธีการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน โดยคงมีประสิทธิภาพสูง สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำและต่อเนื่อง ซึ่งนอกจากจะใช้ปริมาณสารตัวอย่างและ รีเอเจนต์ในปริมาณน้อยแล้วยังเป็นระบบปิด จึงเป็นวิธีวิเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่อตัวอย่างเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างในปริมาณมากๆ ได้ (Anderssona and van den Berge: 2003

นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ระบบไมโครฟลูอิดิกส์กับการตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์ยังทำได้ง่าย ซึ่งปัจจัยสำหรับการวัดด้วยเคมิลูมิเนสเซนต์ เช่น การผสมของสารละลายรีเอเจนต์และเซลล์การตรวจวัด การออกแบบโฟลเซลล์สำหรับการตรวจวัดเคมิลูมิเนสเซนต์ เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบโดยจะต้องมีอย่างน้อยสองช่องทางที่สารเคมีไหลผ่าน คือ ช่องตัวอย่างและกระแสรีเอเจนต์ ซึ่งสารละลายรีเอเจนต์ต้องมีการผสมกันอย่างดีเพื่อให้มีการเปล่งแสงได้มากที่สุดสำหรับการวัดแสงด้วยหลอดวัดแสง (PMT) โดยสารละลายรีเอเจนต์จะผสมกันบริเวณเซลล์ตรวจวัด (T-piece) ซึ่งจะถูกทำซ้ำๆ แต่ว่าไม่เร็วมาก เซลล์ตรวจวัดควบคุมแสงจะส่งแสงมายังตัวตรวจวัดได้จากระยะเวลาและขนาดของร่องโฟลที่สารเคมีไหลผ่าน ในเซลล์ที่มีขนาดเล็กจำนวนการเปล่งแสงก็จะน้อยแต่ว่าในเซลล์ที่มีขนาดใหญ่จะลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้ ในระบบโฟลอินเจคชันเคมิลูมิเนสเซนต์จำนวนมากจะใช้เซลล์การตรวจวัดแบบก้นหอย ซึ่งให้ผลที่น่าพอใจ โดย

ของเหลวจะไหลผ่านช่องที่เจาะไว้ไปตามผิวหน้าที่เรียบราบอย่างเหมาะสม สารผสมจะไหลผ่านตัวตรวจวัดในลักษณะเป็นวงกลม โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้แผ่นอะคริลิกมาแกะสลัก เพื่อเป็นช่องทางไหลของสารเคมีในการตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์ เพื่อลดการใช้สารเคมีและคงประสิทธิภาพของการวิเคราะห์

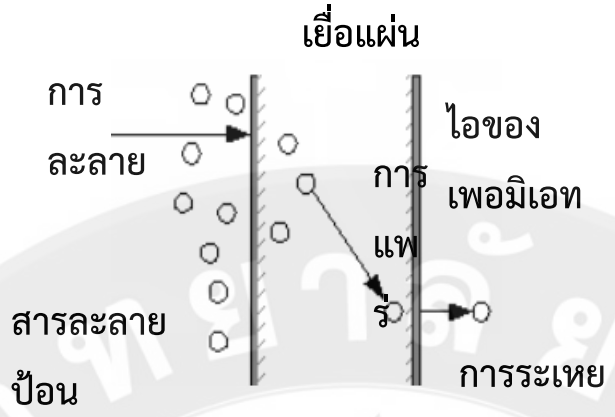
เพอร์วาพอเรชัน (Pervaporation)

การทำให้สารบริสุทธิ์ก่อนการวิเคราะห์สำหรับวิธีวิธีวิเคราะห์แบบอาสัยการไหล มีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารเคมีนั้นๆ รวมถึงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แต่ละวิธีที่เลือกนั้นยังต้องพิจารณาถึงงบประมาณที่มีอยู่ พลังงานที่ใช้ และวัสดุที่เหมาะสม เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการการใช้งานเบื้องต้นของวิธีเพอร์วาพอเรชันซึ่งผู้ค้นพบวิธีนี้คือ Kober (Kober, 1995) และได้มีการศึกษาต่อเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน คำว่า pervaporation นั้นมาจากคำว่า permeation และ evaporation (การซึมผ่านและการระเหยเป็นไอ) วิธีเพอร์วาพอเรชันนี้ เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเลือกจำเพาะในการแยกสาร เช่นเดียวกับ ultra, micro, และ nano-filtration แต่ใช้เยื่อเลือกจำเพาะต่างชนิดกัน ซึ่งวิธีทั้ง 3 ข้างต้น จะใช้ porous membrane ส่วนเพอร์วาพอเรชันจะใช้ non porous membrane

โดยสารที่ผ่านเยื่อเลือกจำเพาะออกมาจะอยู่ในสภาพไอ เนื่องจากความดันขาออกมีค่าต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวขาเข้า การทำให้ความดันต่ำลงนั้น จะเกิดขึ้นโดยอาศัย vacuum pump หรือการใช้แก๊สตัวพา (carrier gas) สิ่งสำคัญในวิธีนี้คือเยื่อเลือกจำเพาะต้องเลือกเยื่อเลือกจำเพาะที่เหมาะสม โดยชนิดของเยื่อเลือกจำเพาะแบ่งเป็น hydrophilic membrane ซึ่งใช้แยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ และ hydrophobic membrane ซึ่งใช้แยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ

กลไกการถ่ายเทมวลผ่านระบบแยกสารเพอร์วาพอเรชัน จะอาศัย กลไกการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion mechanism) ประกอบด้วย

1. การละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น
2. การแพร่ของสาร (ของเหลว) ผ่านเยื่อแผ่น
3. การคายออก (desorption) หรือการระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอมิเอท



ภาพที่ 2 การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่

การละลายหรือการดูดซับขึ้นกับชนิดของเยื่อแผ่นและสารที่ต้องการแยก เยื่อเลือกผ่านมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ดูดซับสารด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว (dispersion หรือ non-polar forces เช่น แรงแวนเดอวาลส์) กรณีที่เยื่อแผ่นชอบน้ำ การดูดซับอาจเกิดเนื่องจากแรงกระทำระหว่างขั้ว (dipole-dipole interaction) หรือเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเยื่อแผ่นและโมเลกุลของของเหลว ซึ่งสารที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเยื่อแผ่นได้จะดูดซับบนเยื่อแผ่นชอบน้ำได้มากกว่าสารที่มีไดโพลโมเมนต์สูงกว่าและ/หรือมีจำนวนไฮโดรเจนที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนได้สูงกว่าจะดูดซับบนเยื่อแผ่นได้ดีกว่า

ส่วนการแพร่ของสารจะขึ้นกับขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสารที่แพร่ โดยส่วนใหญ่สารที่มีขนาดเล็กกว่าจะแพร่ได้เร็วกว่า

การนำวิธีเพอร์วาพอเรชันไปใช้งานในด้านต่างๆ

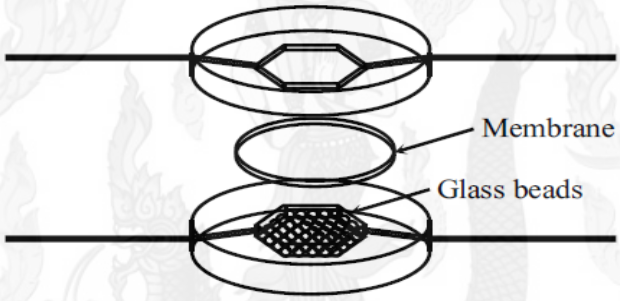
1. การแยกน้ำ (dehydration) เป็นการแยกน้ำจากของเหลวอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ (เอทานอล, ไอโซโพรพานอล)

2. การแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายของสารอินทรีย์-น้ำ เช่น การแยกฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง การแยกสารให้กลิ่นรส

3. การแยกสารอินทรีย์จากสารผสมอินทรีย์ เช่น o-xylene, p-xylene เป็นต้น

จากการใช้งานดังที่กล่าวมานั้น ส่วนใหญ่ในทางการค้า จะเป็นการใช้งานในการกำจัดน้ำออกจากสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการซึมผ่านจะไม่ขึ้นอยู่กับสมดุลของเทอร์โม-ไดนามิกส์ (vapor/liquid equilibrium) แต่จะอาศัยองค์ประกอบที่ต่างชนิดกันในสารละลายที่มีความสามารถใน

การละลายและการแพร่ ผ่านเยื่อเลือกผ่านที่ไม่เท่ากัน หรือกล่าวว่ามีผลต่างของศักยภาพเคมีเป็นแรงขับ (driving force) ทำให้ในการใช้งานเพอร์วาพอเรชัน จะใช้ได้ดีในกรณีที่การแยกสารโดยวิธีการกลั่นนั้นทำได้ยากและมีราคาสูง เช่น การกลั่นแยกน้ำออกจากเอทานอลซึ่งเมื่อถึงความเข้มข้นของสารละลายที่ 95% โดยน้ำหนัก จะเกิดรูป azeotrope ของสารละลาย ซึ่งการกลั่นแยกน้ำออกธรรมดาไม่สามารถแยกเอทานอล ให้บริสุทธิ์ได้ นอกจากจะมีการเติมสารเคมีตัวที่สามเข้าไป เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติ แต่กระบวนการเพอร์วาพอเรชันจะไม่มีปัญหาในกรณีนี้ (ลดการเติมสารอื่น การกำจัดและลดพลังงานมากกว่าการกลั่นมาก) นอกจากนี้ยังได้มีการนำวิธีเพอร์วาพอเรชันไปใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ โดยมีหน่วยงานที่ทำการศึกษาคือ United State Environmental Protection Agency (EPA) ซึ่งมีอยู่หลายโครงการด้วยกันเช่น การแยก volatile organic compound (VOC) ในน้ำ



ภาพที่ 3 หน่วยเพอร์วาพอเรชัน (Sheikheldin *et al.* 2001)

จะเห็นได้ว่ากระบวนการเพอร์วาพอเรชันเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน เช่น ในยุโรป การแยกน้ำออกจากเอทานอล โดยวิธีเพอร์วาพอเรชันมากที่สุด ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ สะดวก ใช้พลังงานน้อย และได้สารที่บริสุทธิ์เช่นเดียวกับวิธีอื่น แต่มีส่วนช่วยทางด้านการประหยัดพลังงานและสิ่งแวดล้อมด้วย

ระบบอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic)

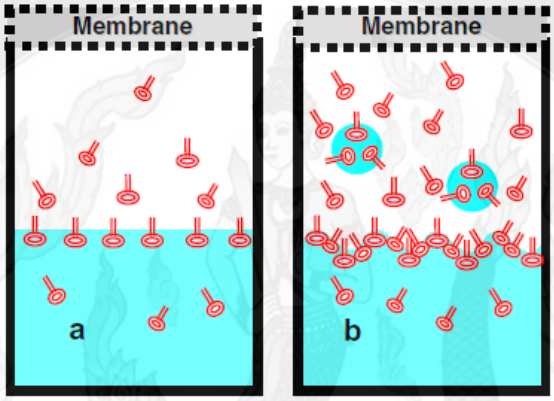
ระบบอัลตร้าโซนิค หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น แต่พวกที่อายุยังน้อยๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่า อัลตร้าโซนิค จึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป จะสูงขึ้นจนถึงเท่าใดไม่ได้ระบุจำกัดเอาไว้ สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตร้าโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นทีมีทิศทางทำให้สามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เครื่องอัลตร้าโซนิคมีลักษณะดังภาพ 4

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตร้าโซนิคทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยสังเกตระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น คลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 KHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นกว่านี้อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้นๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (109 Hz) ก็มีใช้กันในหลายๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ

ภาพที่ 4 เครื่องอัลตร้าโซนิค

ในด้านเคมี อัลตร้าโซนิคได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการกำจัดสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนทางชีวภาพของของเหลว โดยคลื่นเสียงความถี่สูงได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมี ทางด้านทันตกรรม ไฟฟ้า ด้านการทำอาหาร ทำความสะอาด และ การขึ้นรูปพลาสติก และนอกจากนี้อัลตร้าโซนิคยังทำให้ของเหลวสามารถเกิดฟองอากาศขนาดเล็กภายในโครงสร้างของของเหลวได้ เรียกว่า กระบวนการ cavitation เมื่อการสั่นสะเทือนความถี่สูงถ่ายทอดผ่านถังทรงสูงไปยังของเหลว จะทำให้ของเหลวมีลักษณะคล้ายกับน้ำเดือด บริเวณผิวหน้าของของเหลวจะเกิดเป็นระลอกคลื่น ภายในโมเลกุลของของเหลวจะชนซึ่งกันและกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากตรงบริเวณช่องว่างอากาศ George

et al. (2008) ได้ศึกษาสภาพไวของเยื่อเลือกผ่านในการแยกสารโดยใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคเพื่อช่วยเร่งการระเหยกลางเป็นไอของสารที่ต้องการแยกผ่านรูพรุนของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารคือ เทคนิค ก๊าซดิฟฟิวชัน และเทคนิคเพอร์วาพอเรชัน ผลการทดลองพบว่า เครื่องอัลตร้าโซนิคจะทำให้ผิวหน้าของสารละลายเกิดเป็นคลื่น การเกิดเป็นคลื่นนี้จะช่วยให้ของเหลวที่ต้องการแยกสามารถเกิดเป็นฟองอากาศได้เป็นจำนวนมากตรงบริเวณช่องว่างเหนือของเหลวดังภาพ 5 ทำให้สัญญาณการวิเคราะห์สูงขึ้น 62%



ภาพที่ 5 การระเหยของผิวหน้าโมเลกุลขึ้นไปยังช่องว่างเหนือของเหลว (a) ไม่ใช่เครื่องอัลตร้าโซนิคและ (b) ใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค (George *et al.* : 2008)

โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำการพัฒนาและสร้างระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋วที่มีราคาถูก จากวัสดุพอลิเมอร์ขึ้น เพื่อตรวจวัดสารตกค้างทางการเกษตรด้วยวิธีเคมิลูมิเนสเซนต์ โดยใช้ระบบเพอร์วาพอเรชันร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ที่มีรายงานหลายฉบับว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวิเคราะห์และปฏิกิริยาเปลี่ยนสถานะ หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารกลุ่มที่ระเหยได้บางส่วน (semi-volatile) เช่น ฟีนอลและอนุพันธ์ ฯลฯ ที่เป็นสารปนเปื้อนออกจากตัวอย่างอาหารที่มีเมทริกซ์สูง หรือสารเคมีบางชนิดที่ถูกเติมลงไปเพื่อรักษาผลิตผลทางการเกษตรกลุ่มสารที่ใช้ในการถนอมอาหารเช่นซัลไฟต์ กรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดให้สามารถตรวจวัดได้แม้มีการปนเปื้อนอยู่ในระดับต่ำๆ ที่เกินค่ามาตรฐานของสำนักงานอาหารและยา ซึ่งจะช่วยเกษตรกรผู้ผลิต หรือหน่วยงานรับวิเคราะห์ทดสอบ ใช้ในการตรวจยืนยันถึงการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อนำไปใช้เป็นเครื่องมือติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนของตัวยาบางชนิดเหล่านี้ในอาหารหรือผลผลิตแปรรูปทางการเกษตรที่มีจำหน่ายในท้องตลาด อย่างมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาประหยัด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้าง เครื่องมือ ด้วยเทคนิคระบบปฏิบัติการขนาดจิ๋ว (microfluidics) แบบใหม่ที่มีส่วนตรวจวัดที่มีสภาพไวสูงชนิดเคมิลูมิเนสเซนต์มิลูมิเนสเซนต์ (μFI-chemiluminescence) ที่มีการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเหนี่ยวนำหรือเร่งให้เกิดปฏิกิริยาให้สามารถตรวจวิเคราะห์สารปนเปื้อน ในกลุ่มฟีนอล และอนุพันธ์ชนิดต่างๆ

2. เพื่อประยุกต์นำเอาเครื่องมือและเทคนิคที่พัฒนาขึ้น มาใช้กับการทดสอบวิเคราะห์สารปนเปื้อนบางชนิดที่มีฤทธิ์ยับยั้งทำลายจุลินทรีย์ และมีการปนเปื้อนในอาหาร ผลิตผลทางการเกษตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานในสาขาเคมีวิเคราะห์ด้านอาหารและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเน้นด้านการวิเคราะห์สารปนเปื้อนทางอาหาร ที่อาจปนเปื้อนขึ้นในกระบวนการผลิต สินค้าและการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ดังนั้นการเผยแพร่ผลการศึกษาและความรู้จากการวิจัยด้านนี้แก่ผู้สนใจ จะช่วยสร้างความตื่นตัวและความเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภค และสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความปลอดภัย ที่มีต่อการปนเปื้อนของสารพิษทางอาหาร

นอกจากนี้ยังเป็นการเสริมสร้างประโยชน์จากการวิจัย ของหน่วยงานด้านการวิเคราะห์ตัวอย่างทางอาหารและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะหน่วยงานที่ทำงานด้านเกี่ยวข้องกับการติดตามตรวจสอบทางด้านมลพิษทางอาหารสิ่งแวดล้อม การควบคุมมลพิษทางการเกษตร หรือแม้แต่โรงงานผู้ผลิตเองที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพของสินค้าก่อนส่งจำหน่าย ซึ่งจะเป็นการขยายขอบเขตการใช้ประโยชน์ทางวิชาการ โดยใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพึ่งตนเอง กระตุ้นและส่งเสริมให้หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ที่มีห้องปฏิบัติการทางเคมีวิเคราะห์ได้ตื่นตัวและหันมาพัฒนาประดิษฐ์เครื่องมือราคาถูก จากวัสดุ อุปกรณ์ที่มีอยู่ เป็นการทดแทนการนำเข้า เครื่องมือราคาสูงจากต่างประเทศ และพัฒนาศักยภาพของคนไทย โดยใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์และองค์ความรู้ที่มีอยู่ ในการพัฒนาประเทศแบบยั่งยืน

โดยข้อมูลของงานวิจัยนี้ สามารถเสนอผลงานและเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการทั้งภายในและต่างประเทศ อีกทั้งยังสามารถเผยแพร่ข้อมูลและสร้างฐานเรียนรู้ดังกล่าวแก่

ภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เพื่อเป็นต้นแบบ (prototype) สำหรับวิธีการตรวจสอบสารปนเปื้อน เพื่อคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น

การตรวจเอกสาร

ในการวิจัยที่จะได้ศึกษาต่อไปในครั้งนี้ จะอาศัยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมาช่วยในการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยา หรือเร่งให้เกิดปรากฏการณ์เคมิลูมิเนสเซนต์ให้เกิดได้ดีขึ้น ในระบบการวิเคราะห์ชนิดไมโครโฟลอินเจคชันที่ใช้ปริมาณสารเคมีที่เป็นรีเอเจนต์และปริมาณสารตัวอย่างที่น้อยลง โดยอาจเร่งให้เกิดปฏิกิริยาให้เกิดได้ดีขึ้นดังตัวอย่างของงานวิจัยของ Marle and Greenway (2005) ที่อาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงขนาด 120 วัตต์ เร่งปฏิกิริยาของระบบ luminol–H_2O_2–cobalt(II) ในคอยล์ผสมเป็นเวลา 4 วินาที และพบว่าสามารถวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ถึงระดับ 1×10^{-9} โมลาร์

งานวิจัยของ George *et al.* (2008) ที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมาช่วยในระบบการแยกสารแบบออน์ไลน์ ชนิดก๊าซดิฟฟิวชันและเพอร์วาพอเรชัน โดยช่วยเร่งในการระเหยและแพร่ผ่านของสารในกลุ่มเอมีน (propylamine, tri-ethylamine and di-*n*-butylamine) ในการวิเคราะห์ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการแยกชนิดเพอร์วาพอเรชันได้ถึง 62 % เมื่อใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จะเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากความถี่สูงทำให้บริเวณผิวหน้าของสารละลายเกิดเป็นระลอกคลื่นสามารถช่วยเพิ่มการระเหยของสารละลายได้มากขึ้น ส่วนวิธีก๊าซดิฟฟิวชันโฟลอินเจคชัน พบว่าการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค ไม่ได้มีบทบาทในการทำให้สัญญาณเพิ่มขึ้น

Bonggotgetsakul *et al.* (2010) ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงใช้ช่วยในการสกัด Au (III) ด้วย polymer inclusion membrane (PIM) พบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ถึง 200 - 300% ซึ่งจากความสามารถของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ถูกนำไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด ในการแยกสารแบบออน์ไลน์ จะช่วยเพิ่มปริมาณสารที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบเคมิลูมิเนสเซนต์ของระบบการตรวจวัดชนิดไมโครโฟลอิเจคชันได้มากยิ่งขึ้น

จากงานวิจัยของ Guo *et al.* (2013) ในการวิจัยนี้ได้ศึกษา ควอนตัมดอท ZnSe (QDs) ที่สังเคราะห์ขึ้นมาซึ่งละลายน้ำได้และเคลือบด้วยกลูตาไธโอน (GSH) พบว่า ควอนตัมดอท ZnSe (QDs) สามารถเพิ่มการเปล่งแสงเคมีลูมิเนสเซนต์ จาก luminol-$K_3Fe(CN)_6$ ในสารละลายด่าง และได้กล่าวถึงกลไกลการเพิ่มประสิทธิภาพของควอนตัมดอท ZnSe (QDs) ในปฏิกิริยาของฟีนอลกับลูมินอลเคมิลูมิเนสเซนต์

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ในการศึกษาการวิเคราะห์ฟีนอลแบบออนไลน์โดยเทคนิคเพอวาพอเรชันโฟลอินเจคชันเคมิ ลูมิเนสเซนต์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณของฟีนอล ซึ่งจะมีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ดังนี้ โดยสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ที่ใช้เป็นระดับคุณภาพห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ (analytical grade) แสดงดังในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิตและรุ่น	ประเทศ
1. Analytical balance	Mettler Toledo	Switzerland
2. Auto pipette	Nichipet EX	Japan
3. Digital multimeter	Uni-Trend รุ่น UT60D	Hong Kong
4. Four-channel Peristaltic pump	Gilson	France
5. Pervaporation unit	Custom build	-
6. PTFE membrane	Pro-tech group	Australia
7. Photo multiplier tube Electron tube	9828 SB	UK
8. Power supply	Sens tech PM20	UK
9. pH meter	Metrohm / 827 pH lab	Switzerland
10. Six-port injection valve	Upchurch Scientific	USA
11. Ultrapure water purification system	ElGa	UK
12. Ultrasonic bath	BST 200	China

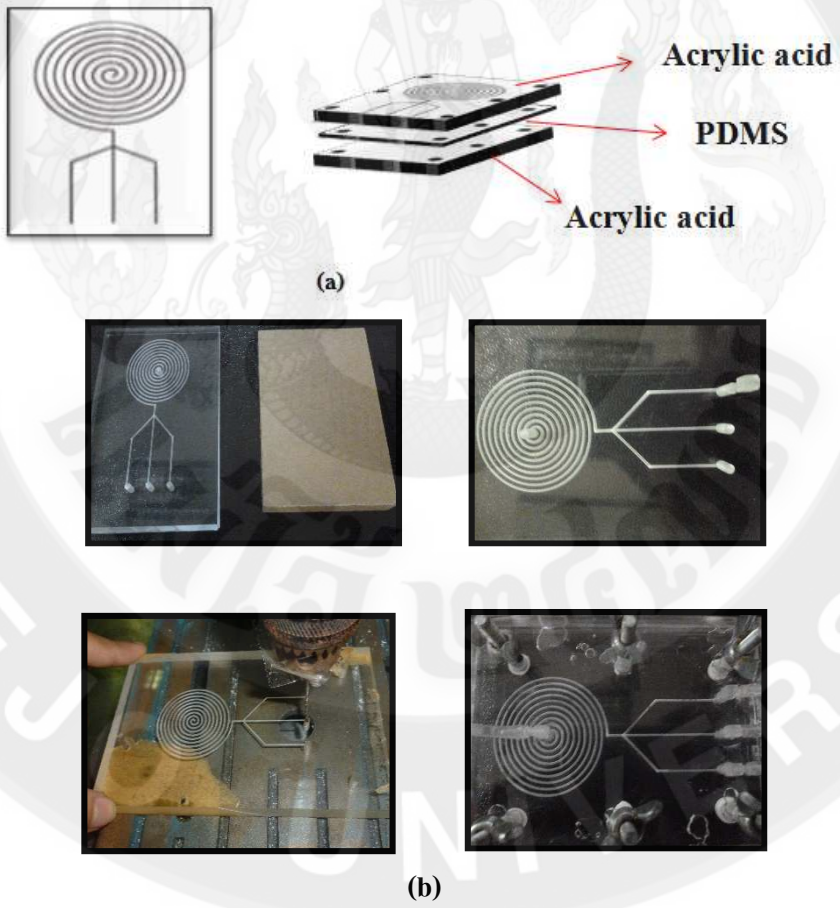
ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	**บริษัทผู้ผลิต**	**ประเทศ**
1. Luminol	Sigma-Aldrich	USA
2. Phenol (C_6H_5OH)	Ajax	Australia
3. Potassium ferricyanide ($K_3Fe(CN)_6$)	Ajax	Australia
4. Sodium chloride (NaCl)	RCI Labscan	Ireland
5. Sodium hydroxide (NaOH)	Merck	Germany
6. Sulfuric acid (H_2SO_4)	Merck	Germany
7. Methanol (CH_3OH)	Fluka	Switzerland
8. Potassium chloride (KCl)	Merck	Germany
9. Potassium nitrate (KNO_3)	Merck	Germany

วิธีการวิจัย

การประดิษฐ์อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์

ได้ทำการออกแบบโฟลเซลล์ (flow cell) แบบก้นหอยซึ่งมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ดีกว่าแบบซิกแซกโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโฟลเซลล์แบบก้นหอยและซิกแซกในระบบการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยวิธี μFL-CL จากงานวิจัยของ Zhou *et al.* (1999) และงานวิจัยของ วิศรุต ต๋ำคำธรรม (2554) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW Graphics Suite X5 ช่วยในการออกแบบ จากนั้นแกะลายด้วยแสงเลเซอร์ลงบนแผ่นอะคลิลิก แล้วประกอบโฟลเซลล์ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะโฟลเซลล์ที่ออกแบบและการประกอบโฟลเซลล์สำหรับการวิเคราะห์

(a) แบบก้นหอย ซึ่งมีร่องกว้าง × ลึก (0.10 × 0.25 ตารางเซนติเมตร) รัศมี 1.75 เซนติเมตร ความยาวของคอยล์ 85.09 เซนติเมตร

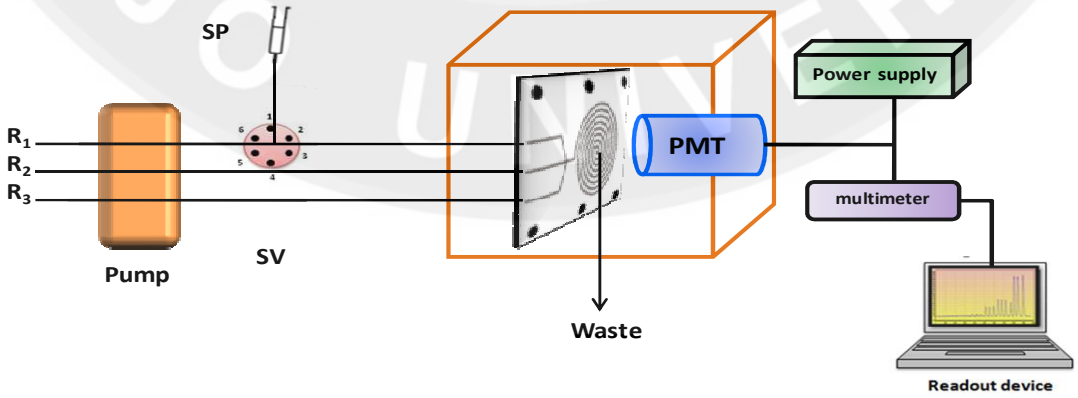
(b) การประกอบไมโครฟลูอิดิกส์โฟลเซลล์

การประกอบไมโครฟลูอิดิกส์ชิพ ทำขึ้นโดยการนำแผ่นอะคลิลิก 2 แผ่น ขนาด 5x8.5 เซนติเมตร ทำการแกะลายด้วยแสงเลเซอร์เป็นลวดลายแบบก้นหอยดังภาพ 6 (a) และขนาดความยาวของเส้นรอบวงดังภาพ 6 (b) ที่สั่งการโดยใช้โปรแกรม Corel DRAW Graphics Suite X5 ลงบนแผ่นใดแผ่นหนึ่ง จากนั้นนำแผ่นอะ คลิลิกทั้งสองแผ่นมาเจาะรูด้วยสว่าน เพื่อทำการเชื่อมเข้ากับท่อเชื่อมต่อ แล้วนำแผ่นอะคลิกมาประกบกันแบบแซนวิช โดยมีแผ่น PDMS คั่นกลางระหว่างแผ่นทั้งสอง ทำการขันให้พอดีด้วยสกรู

โดยการเตรียมแผ่น PDMS เตรียมโดยชั่ง Sylgard 184 silicone elastomer base มา 10.00 กรัม และ ชั่ง Sylgard 184 silicone elastomer curing agent มา 1.00 กรัม (อัตราส่วน 10:1) นำสารละลายเทลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแม่พิมพ์ออกมาตั้งทิ้งไว้ ก่อนที่จะแกะแผ่น PDMS ออก ควรแช่แม่พิมพ์ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อได้แผ่น PDMS ก็ทำการตัดให้มีขนาด 5 x 8.5 เซนติเมตร นำมาใช้สำหรับคั่นระหว่างแผ่นอะคริลิกทั้งสองแผ่น

การศึกษาสภาวะเบื้องต้นของการตรวจวิเคราะห์ฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์

การศึกษาการตรวจวัดแบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ ในการหาปริมาณฟีนอล โดยการนำสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 2.5×10^{-3} โมลาร์ มาฉีดสารละลายมาตรฐานเข้าสู่ระบบผ่านวาล์ว (SV) โดยสารละลายมาตรฐานจะผสมเข้ากับกระแสตัวพา (R_1) ที่มีอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง และจะเข้าไปผสมกับสารละลายรีเอเจนต์ (R_2,R_3) ในส่วนผสมสารทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดแสงเกิดขึ้น สามารถตรวจวัดแสงด้วยหลอดตรวจวัดแสง พีคสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานและประมวลผลออกมาด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ต่ออยู่กับดิจิตัลมัลติมิเตอร์ โดยมีผังระบบการทดลองดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ระบบการตรวจวิเคราะห์ฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์

R_1 คือ กระแสสารละลายโปแทสเซียมเฮกซะไซนาโนเฟอร์เรตในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

R_2 คือ กระแสสารละลายลูมินอลละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

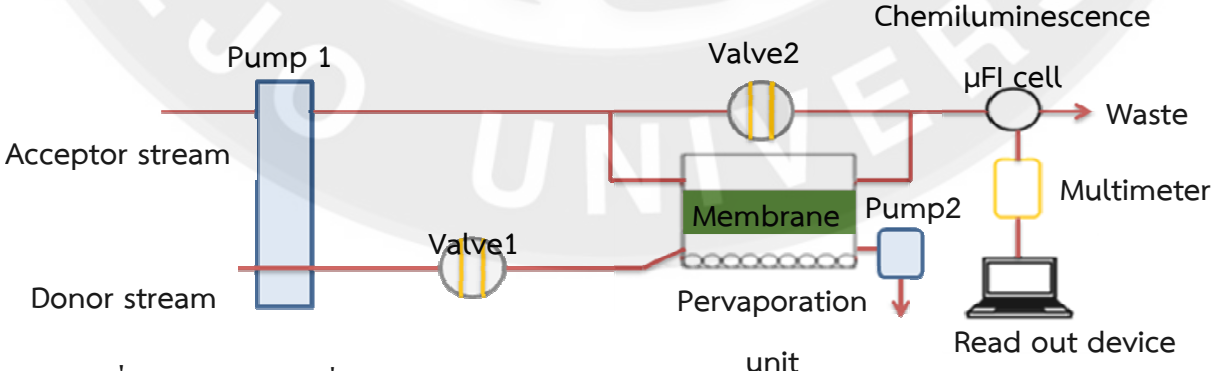
R_3 คือ กระแสสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

PMT คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

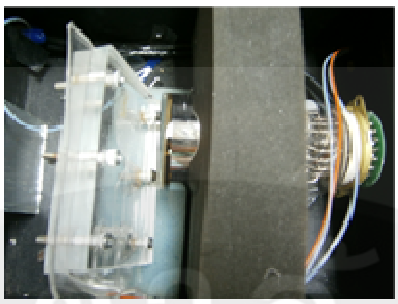
SV คือ injection valve SP คือ หลอดฉีดยา

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชัน

ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยใช้เทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธ เพอร์วาพอเร (μPFI) นั้นมีการฉีดสารตัวอย่างนั้นลงไปในกระแสของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นกระแสตัวพา (donor stream) โดยใช้วาล์วตัวที่ 1 ซึ่งสารตัวพาจะพาตัวอย่าง ส่งผ่านไปยังหน่วยเพอร์วาพอเรชัน ซึ่งภายในจะประกอบด้วยเม็ด glass beads เรียงกันอย่างเป็นระเบียบในแนวระนาบ ฟีนอลที่อยู่ในสถานะก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายกระแสตัวให้จะแพร่ผ่านเข้าสู่เยื่อเลือกผ่านโดยทิ้งสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายค้างอยู่ในกระแสตัวพา และจะไม่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ เนื่องจากสารละลายตัวพา (ตัวอย่าง) ถูกกั้นไว้ด้วยช่องอากาศ จึงทำให้ตัวอย่างไม่สัมผัสกับเยื่อเลือกผ่านโดยตรงจึงทำให้มีเฉพาะฟีนอลที่อยู่ในสถานะก๊าซเท่านั้นที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน เมื่อสับวาล์วตัวที่ 2 ไปยังตำแหน่ง “Inject” เพื่อไล่สารตัวรับ (กระแสออกซิไดซ์) ที่ถูกกักอยู่ใน acceptor chamber ให้ไหลผ่านไปผสมกับกระแสรีเอเจนต์ผ่านไปยัง chemiluminescence μFI cell เพื่อสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ การรักษาระดับผิวหน้าของของเหลวที่อยู่ในหน่วยเพอร์วาพอเรชัน ทำได้โดยการใช้ปั๊มป์ตัวที่ 2 ช่วย โดยให้ระดับของของเหลวมีระดับผิวหน้าเท่ากับผิวหน้าของ glass beads ในระดับที่ท่วมผิวหน้าพอดี การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ แสดงดังภาพ 8



ภาพที่ 8 ผังการจัดวางเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชัน

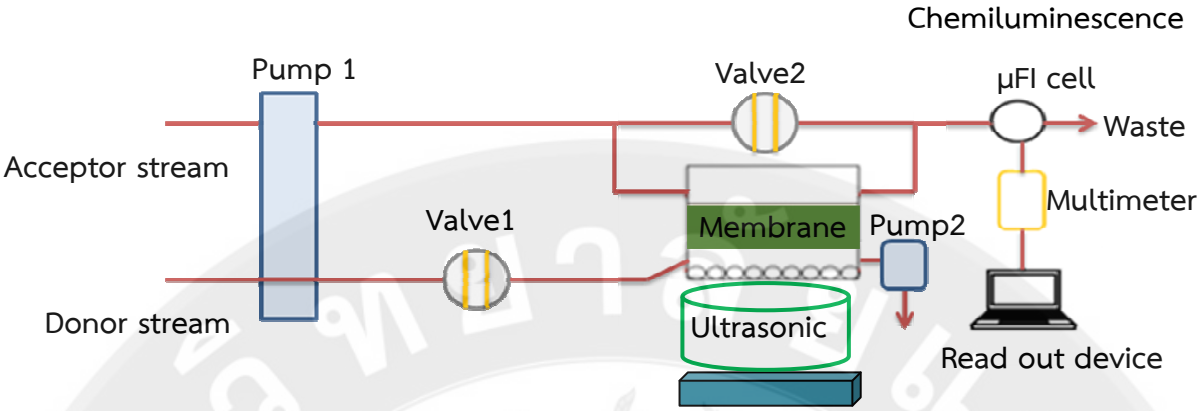


ภาพที่ 9 การวางไมโครฟลูอิดิกส์ในกล่องมืดหน้าหลอดตรวจวัดแสงโฟโตมัลติพลายเออร์

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน

ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยใช้เทคนิคเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน (PFI) ร่วมกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน โดยนำหน่วยเพอร์วาพอเรชันมาวางบนเครื่องอัลตร้าโซนิค ดังภาพที่ 10 เช่นเดียวกันกับหัวข้อ ที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นมีการฉีดสารตัวอย่างนั้นลงไปในกระแสของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นกระแสตัวให้ (donor stream) จะถูกส่งผ่านไปยัง pervaporation unit ฟีนอลที่อยู่ในสถานะก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายกระแสตัวให้จะแพร่ผ่านเข้าสู่เยื่อเลือกผ่าน แล้วเครื่องอัลตร้าโซนิคจะทำงานเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการระเหยกลายเป็นไอแก่ฟีนอล โดยเครื่องอัลตร้าโซนิคจะทำให้หน่วยเพอร์วาพอเรชันเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากความถี่สูง ทำให้ส่งผลกระทบต่อผิวหน้าของสารละลายที่อยู่ในหน่วยเพอร์วาพอเรชัน โดยจะทำให้ผิวหน้าของสารละลายที่อยู่ในระดับผิวหน้าของ glass beads เกิดเป็นคลื่น โมเลกุลของสารละลายเกิดการชนกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดฟองก๊าซเป็นจำนวนมาก สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่เยื่อเลือกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกระแสออกซิไดซ์ที่อยู่ในช่อง acceptor chamber เมื่อหมุนวาล์ว 2 ไปยังตำแหน่ง “Inject” สารตัวรับที่ถูกกักอยู่ใน acceptor chamber ให้ไหลผ่านไปผสมกับกระแสรีเอเจนต์ยัง chemiluminescence μFI cell และถูกตรวจวัดต่อไป

โดยในการทดลองขั้นต่อไปจะได้หาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรชนิดต่างๆ ทั้งตัวแปรทางกายภาพและทางเคมีของระบบ ไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างจริงเพื่อให้ค่าถูกต้อง แม่นยำ และเชื่อถือได้



ภาพที่ 10 ผังการจัดวางเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชัน

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 4.0 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นถ่ายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

2. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์เข้มข้น 1×10^{-3} โมลาร์ (stock solution)

ชั่งโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์มา 0.0329 กรัม น้ำมาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเล็กน้อยจากนั้นถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

3. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์เข้มข้น 2×10^{-4} โมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3 โมลาร์

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์เข้มข้น 1×10^{-3} โมลาร์ (stock solution) มา 100 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ มา 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

4. การเตรียมสารละลายลูมินอลเข้มข้น 1 x 10^{-3} โมลาร์ (stock solution)

ชั่งลูมินอลมา 0.0178 กรัม น้ามาละลายด้วยน้ำปราศไอออนเล็กน้อยจากนั้นถ่ายลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

5. การเตรียมสารละลายลูมินอลเข้มข้น 2 x 10^{-5} โมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 โมลาร์

ปิเปตสารละลายลูมินอลเข้มข้น 1 x 10^{-3} โมลาร์ (stock solution) 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ มา 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

6. การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (stock solution)

ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมา 1.08 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

7. การเตรียมสารละลาย 20% โซเดียมคลอไรด์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.04 โมลาร์

ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (stock solution) มา 20 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้น ชั่งโซเดียมคลอไรด์ 20 กรัม ถ่ายลงในขวดปรับปริมาตรที่บรรจุกรดซัลฟิวริก แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

8. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (stock solution)

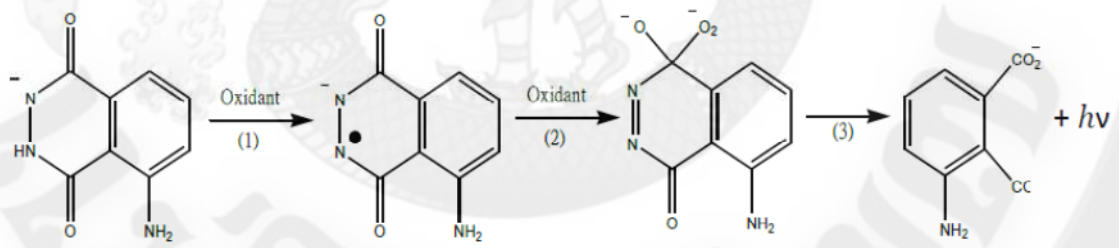
ชั่งฟีนอล 0.0103 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเล็กน้อย จากนั้นถ่ายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการแยกสารด้วยระบบออนไลน์ ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เพอร์วาพอเรชัน (μPFI) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลในตัวอย่าง โดยนำเครื่องมือที่มีในห้องปฏิบัติการมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์แบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ เนื่องจากเทคนิคนี้มีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความรวดเร็ว ใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อยมาก ทำให้เกิดของเสียที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย นอกจากนี้ระบบที่ใช้วิเคราะห์เป็นระบบปิด ซึ่งเป็นผลดีแก่ผู้ปฏิบัติการทดลองไม่ต้องสัมผัสกับสารเคมีโดยตรง และการแยกสารแบบออนไลน์ ยังช่วยลดขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างน้อยลง ทำให้การวิเคราะห์ทำได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ในการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ทำการทดสอบเทคนิคเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เพอร์วาพอเรชัน เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ระบบจากตัวแปรชนิดต่างๆ ทั้งตัวแปรทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเป็นแนวทางในการใช้เป็นเครื่องมือและวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอล ในตัวอย่างทางเกษตรกรรมหรือผลิตอาหารต่อไป ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับวิธีเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน

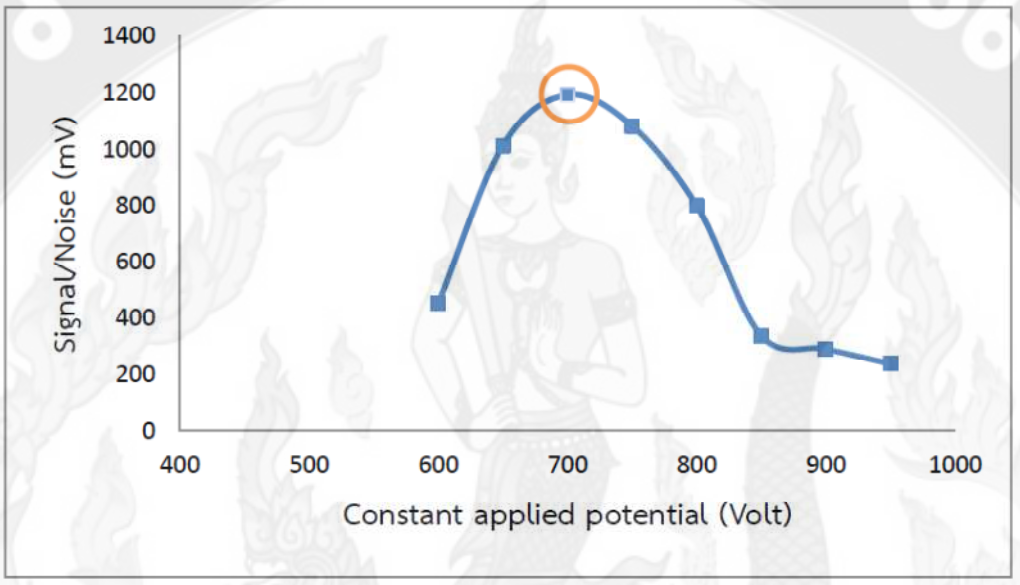
จากงานวิจัยของ Guo et al. (2013) ซึ่งในรายงานนี้ได้ศึกษาการเปล่งแสงเคมิลูมิเนสเซนต์ จากปฏิกิริยาของระบบ luminol-$K_3Fe(CN)_6$ ในสารละลายด่าง โดยกล่าวถึงกลไกลการเพิ่มประสิทธิภาพของควอนตัมดอท ZnSe (QDs) ในลูมินอลเคมิลูมิเนสเซนต์ ดังสมการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้สนใจที่จะพัฒนาการตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์นี้ขึ้น เพื่อใช้ในการตรวจวัดหาฟีนอลเพื่อให้มีขีดกาจัดการตรวจวัดที่ต่ำและมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างขึ้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟีนอลได้ที่ความเข้มข้นต่ำๆ เพื่อพัฒนาขึ้นเพื่อหาฟีนอล และอนุพันธ์บางชนิด



1. การศึกษาหาศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายแก่หลอด PMT

ได้ทำการศึกษาหาศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จ่ายให้แก่หลอด PMT ได้ท้าการศึกษาในช่วงศักย์ไฟฟ้า ศึกษาในช่วง 600-950 มิลลิโวลต์ ในการทดลองเริ่มต้นการปรับกระแสไฟฟ้าที่ค่าเริ่มต้น 600 มิลลิโวลต์ โดยมีการเตรียมสารละลายเหล็ก(III)ไซยาไนด์เข้มข้น 2.0×10^{-4} โมลาร์ ที่ละลายอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.30 โมลาร์ เป็นกระแสออกซิไดซ์ และเตรียมสารละลายลูมินอลเข้มข้น 2.0×10^{-4} โมลาร์ ที่ละลายอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.20 โมลาร์ เป็นกระแสรีเอเจนต์ จากนั้นทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอล เข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เข้าไปในระบบโดยที่มีการปรับศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 มิลลิโวลต์ จากนั้นน้าค่าสัญญาณที่วัดได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง ค่าความสูงของพีคกับศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายแก่หลอดไฟฟ้า

พบว่าสัญญาณ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่า ดังภาพ 11 จะเห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่ 700 มิลลิโวล์ต ให้ค่ากระแสที่สูงที่สุด เนื่องจากศักย์ไฟฟ้านี้จะทาให้หลอดตรวจวัดแสงสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมิลูมิเนสเซนต์ของสารฟีนอล ได้สมบูรณ์ที่สุด



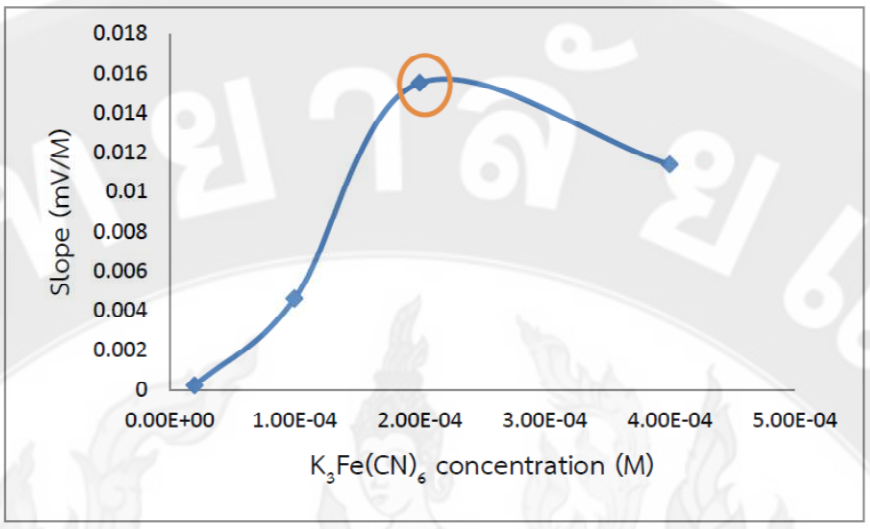
ภาพที่ 11 ผลการศึกษาหาศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายแก่หลอดตรวจวัดแสง PMT

2. การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ในกระแสออกซิไดซ์

ปรับสภาวะศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอด PMT ตามสภาวะที่เหมาะสมตามข้อ 1 ทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ที่อยู่ในกระแสออกซิไดซ์ โดยศึกษาในช่วงความเข้มข้น $2.0 \times 10^{-5} - 4.0 \times 10^{-4}$ โมลาร์ โดยการกำหนดค่าของตัวแปรที่เหลือให้คงที่ แล้วทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 300 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง แล้วนำค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ไป

พล็อตกราฟระหว่างพีคสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(III)ไซยาไนด์ ที่อยู่ในกระแสออกซิไดซ์เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟมาตรฐานของสภาวะความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์

พบว่ากราฟมาตรฐานที่มีสัญญาณที่ให้ค่าความชันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2×10^{-4} โมลาร์ แสดงดังภาพที่ 12 ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไปจึงจะกำหนดให้สารละลายเฟอริกไซยาไนด์เท่ากับ 2×10^{-4} โมลาร์

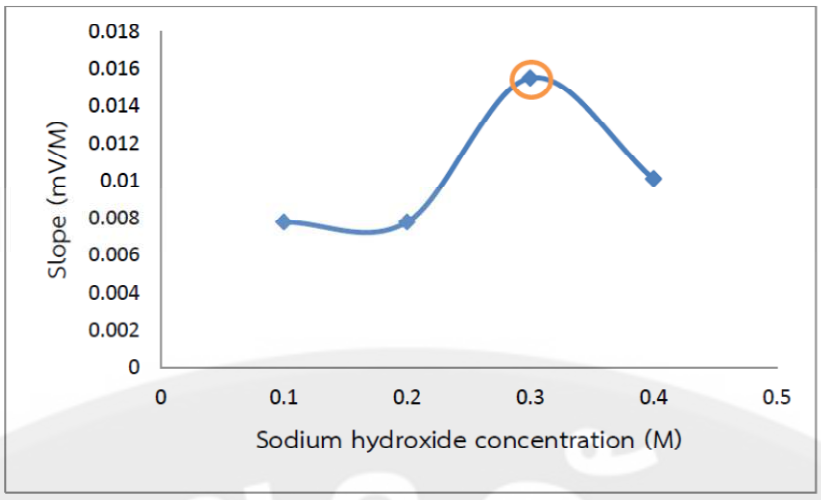


ภาพที่ 12 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ในกระแสออกซิไดซ์

3. การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสออกซิไดซ์

ปรับสภาวะที่เหมาะสมตามข้อ 1-2 ทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายตัวรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสออกซิไดซ์ โดยทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.01-0.30 โมลาร์ โดยการกำหนดค่าของตัวแปรที่เหลือให้คงที่ แล้วทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 300 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง แล้วนำค่ากระแสที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างพีคสัญญาณไฟฟ้ากับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายกระแสรีเอเจนต์ เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟมาตรฐานของสภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป

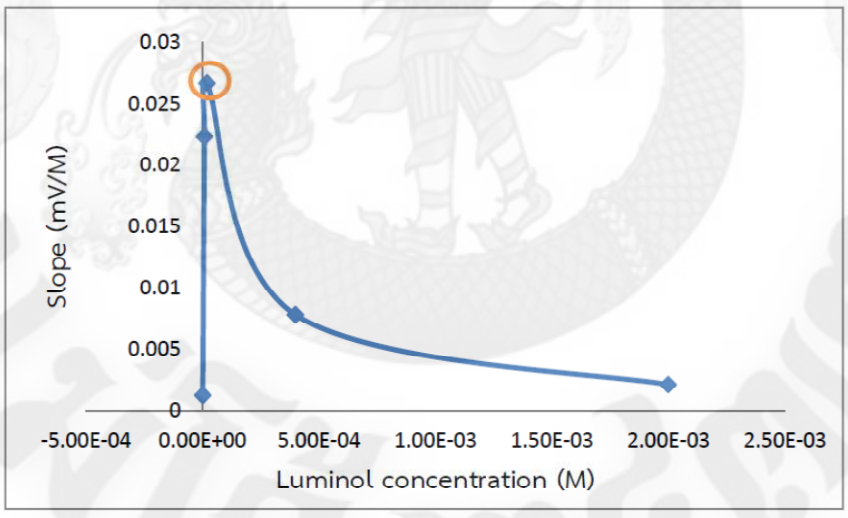
พบว่าให้ผลแสดงดังภาพที่ 13 พบว่าสัญญาณได้จากความชันของกราฟมาตรฐานที่ให้ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.3 โมลาร์ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป จึงกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ที่ 0.3 โมลาร์



ภาพที่ 13 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสออกซิไดซ์

4. การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายลูมินอล

ปรับสภาวะที่เหมาะสมตามข้อ 1-3 ทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของลูมินอลในสารละลายรีเอเจนต์ช่วงความเข้มข้น 1×10^{-3}- 2×10^{-6} โมลาร์ ทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 300 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เข้าไปในระบบ แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างพีคสัญญาณไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายลูมินอล เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายลูมินอลที่เหมาะสมสำหรับกระแสรีเอเจนต์ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟมาตรฐานของสภาวะความเข้มข้นของลูมินอลที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าให้ผลแสดงดังภาพที่ 14 ความเข้มข้นที่ให้ที่ทำให้ความชันของกราฟมาตรฐานของระบบสัญญาณที่สูงสุดมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 2×10^{-5} โมลาร์ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป จึงกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายลูมินอลในกระแสรีเอเจนต์เท่ากับ 2×10^{-5} โมลาร์

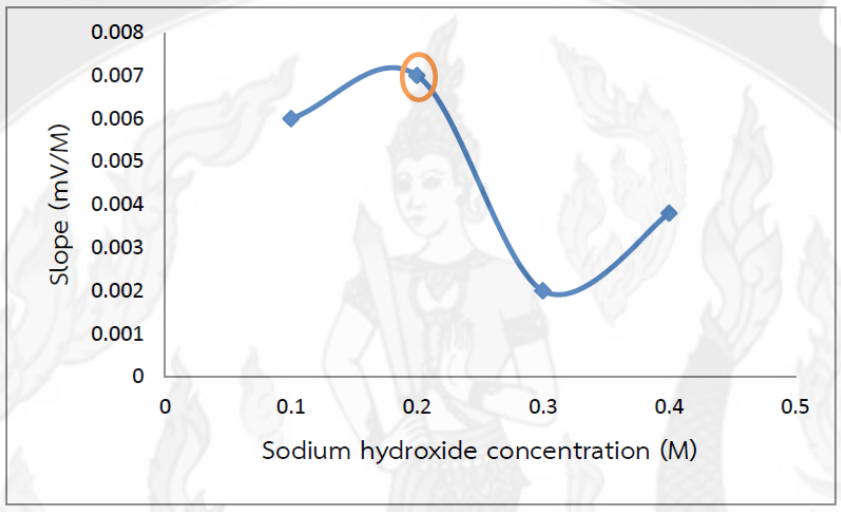


ภาพที่ 14 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายลูมินอลในกระแสรีเอเจนต์

5. การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสรีเอเจนต์

เมื่อปรับสภาวะที่เหมาะสมให้ได้ตามสภาวะในข้อ 1-4 ได้ทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายตัวรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในกระแสรีเอเจนต์ โดยทำการศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.01-0.40 โมลาร์ โดยการกำหนดค่าของตัวแปรที่เหลือให้คงที่ โดยฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้นต่างๆ คือ 50 100 200 300 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างพีคสัญญาณไฟฟ้ากับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟมาตรฐานตามสภาวะที่เปลี่ยนแปลงไป

พบว่าให้ผลแสดงดังภาพที่ 15 โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.2 โมลาร์ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป จึงกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายอยู่ในกระแสรีเอเจนต์ไว้ที่ 0.2 โมลาร์

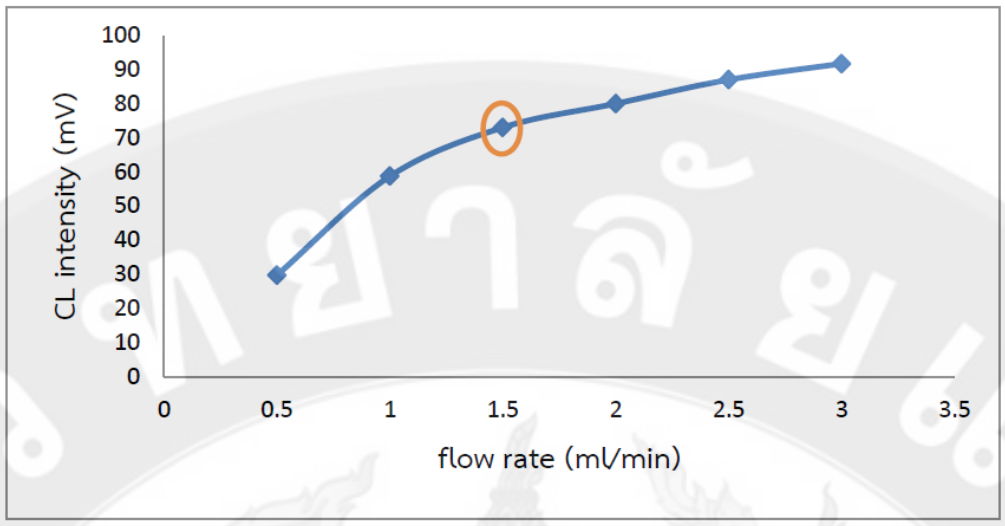


ภาพที่ 15 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสรีเอเจนต์

6. การศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสม

เมื่อปรับสภาวะที่เหมาะสมให้ได้ตามสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 1-5 ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลของกระแสของสารละลายลูมินอลและสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ ซึ่งเป็นกระแสรีเอเจนต์และกระแสออกซิไดซ์ โดยทำการปรับอัตราการไหลทั้งสองสายให้มีค่าเท่ากันทั้งสองสาย โดยศึกษาในช่วง 0.5-3.0 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจะปรับอัตราการไหลเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วนำค่าสัญญาณที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างพีคสัญญาณไฟฟ้ากับอัตราการไหล เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟมาตรฐานของอัตราการไหลของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป

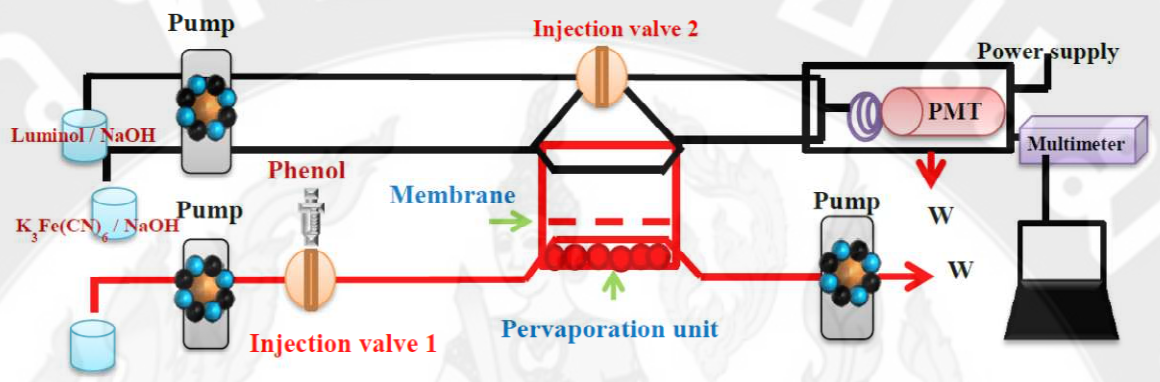
พบว่าได้ผลดังแสดงในภาพที่ 16 โดยอัตราการไหลรวมที่เหมาะสมของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์คือ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลที่มากกว่า 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที จะทาให้เกิดแรงดันในระบบมากเกินไป ทาให้เกิดการรั่วและความไม่เสถียรของพื้นหลังในการวัดสัญญาณ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไป จึงกำหนดให้อัตราการไหลของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์เท่ากับ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 16 ผลการศึกษาอัตราการไหลของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์

จากงานวิจัยของ George *et al.* (2008) ที่ได้ทำการทดลองใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคร่วมกับวิธีเพอวาพอเรชันโฟลอินเจคชันในการตรวจวัด สภาพไวของสารละลายแอมโมเนียและอะลิฟาติกเอมีนอีก 3 ชนิดจากการตรวจวัดกระแสโดยใช้แอมแปร์โรมิเตอร์ พบว่ามีค่าของสัญญาณเพิ่มขึ้นถึง 62% เมื่อใช้เครื่องอัลตร้าโซนิคช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จะเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากความถี่สูงทำให้บริเวณผิวหน้าของ glass beads เหนือสารละลายเกิดเป็นระลอกคลื่น สามารถช่วยเพิ่มการระเหยของสารละลายได้มากขึ้น ช่วยเร่งการระเหยกลายเป็นไอให้แก่สารละลายที่ต้องการแยกด้วยเทคนิคเพอร์วาพอเรชันซึ่งเป็นเทคนิคการแยกสารที่อยู่ในรูปของไอออนจากเมทริกซ์อื่นๆ จากนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณช่องอากาศ (air gap) และเข้าสู่รูพรุนของเยื่อเลือกผ่านเพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายกระแสตัวรับ และถูกตรวจวัด พบว่าคลื่นอัลตร้าโซนิคสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิ์ภาพในการแยกแบบออนไลน์นี้ขึ้น

ภาพที่ 17 หน่วยเพอร์วาพอเรชันที่ใช้ในการทดลอง



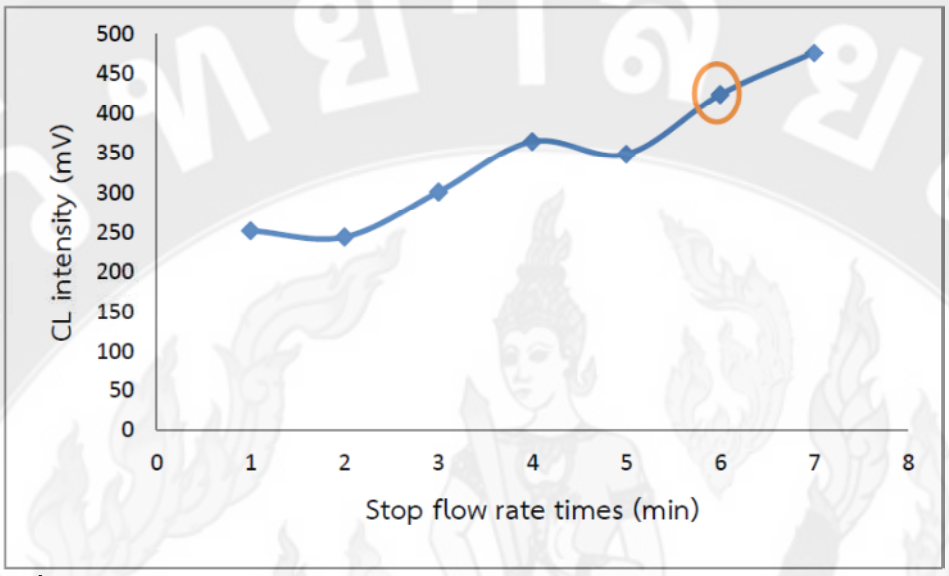
ภาพที่ 18 ระบบเพอร์วาพอเรชันไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์

7. การศึกษาเวลาการหยุดไหลของกระแสตัวรับในหน่วยเพอร์วาพอเรชันที่เหมาะสม

การศึกษาเวลาการหยุดไหลของกระแสตัวรับในหน่วยเพอร์วาพอเรชันในช่วง 2-8 นาที ใช้สภาวะต่างๆ ที่หาได้จากข้อ 1-6 จากนั้นทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เข้าไปในกระแสของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะถูกส่งผ่านไปยัง pervaporation unit ซึ่งฟีนอลที่อยู่ในสถานะก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายกระแสตัวให้จะแพร่ผ่านเข้าสู่เยื่อเลือกผ่าน และเข้าไปสะสมอยู่ในกระแสตัวรับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไนเตรท โดยเก็บกักฟีนอลในสถานะก๊าซในระยะเวลาที่เหมาะสม ทำได้โดยหยุดสารละลายใน acceptor chamber เป็นการชั่วคราวในระยะเวลาต่างๆ ตั้งแต่ 2-14 นาที โดยอาศัยวาล์วตัวที่สองมาต่อเข้ากับ acceptor chamber โดยในขณะวาล์วตัวที่สองอยู่ในตำแหน่ง “Load” กระแสตัวรับบางส่วนจะถูกกักอยู่ใน acceptor chamber โดยที่กระแสตัวรับที่ถูกปั๊มป์จากวาล์วตัวที่หนึ่งจะผ่านวาล์วสองโดยไม่ผ่านเข้าไปใน acceptor chamber แต่เมื่อครบเวลาที่ต้องการให้หยุดไหลชั่วคราว จะหมุนวาล์วไปตำแหน่ง “Inject” เพื่อไล่สารตัวรับที่ถูกกักอยู่ใน acceptor chamber ให้ไหลผ่านไปยังเคมิลูมิเนส

เซนต์โฟลธรูเซลล์ เพื่อศึกษาปริมาณสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้เวลาในการหยุดไหลของกระแสตัวรับโดยมีระยะเวลาต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟระหว่างความสูงของพีคสัญญาณกับเวลาการหยุดไหลชั่วคราวของกระแสตัวรับในหน่วยเพอร์วาพอเรชัน เพื่อหาเวลาการหยุดไหลชั่วคราวของกระแสตัวรับในหน่วยเพอร์วาพอเรชันที่เหมาะสม

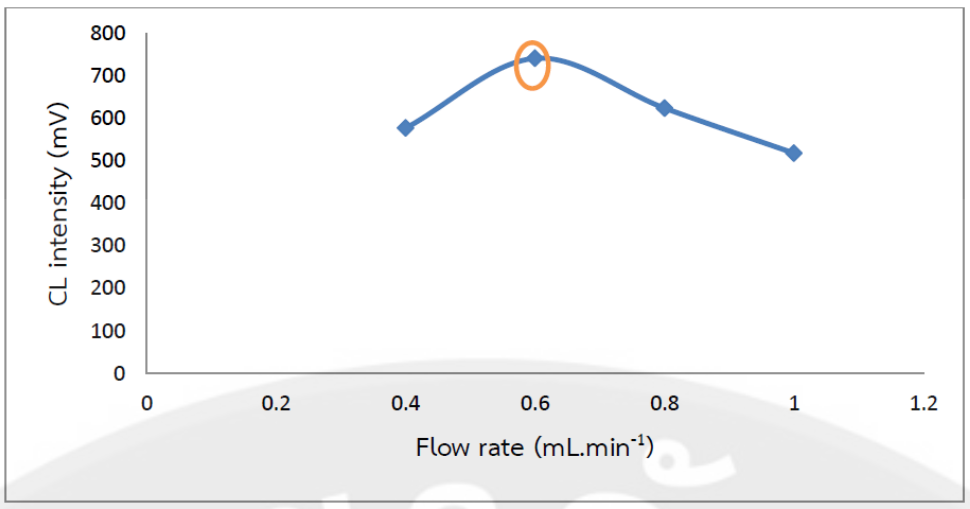
ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 19 โดยในการทดลองนี้ได้เลือกเวลาการหยุดไหลชั่วคราวที่เวลา 6 นาที เนื่องจากเวลาที่ 6 นาทีเป็นเวลาที่ทาให้สารของพีคเกิดปฏิกิริยาได้เหมาะสมสูงสุด ซึ่งถ้าให้เวลาสูงกว่า 6 นาที จะทาให้สารมาตรฐานฟีนอลที่ถูกกักเก็บไว้ใน acceptor chamber เสียสภาพ ทาให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพลดน้อยลงและทาให้การวิเคราะห์คลาดเคลื่อน



ภาพที่ 19 ผลการศึกษาเวลาการหยุดไหลชั่วคราวของกระแสตัวรับในหน่วยแยกสารเพอวาพอเรชัน

8. การศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมของกระแสตัวพา

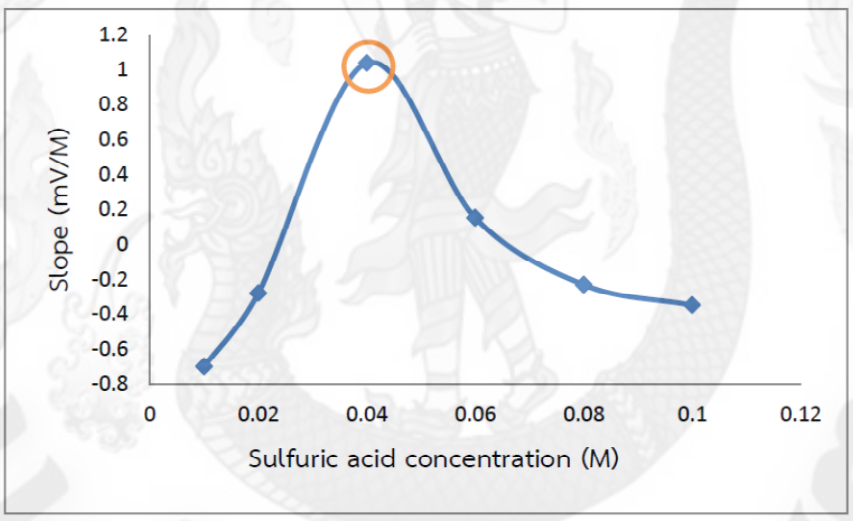
เมื่อทำการปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ตามการทดลองข้างต้น เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์หาอัตราการไหลของกระแสตัวพา (donor stream) ซึ่งเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ที่ไหลเข้าสู่หน่วยแยกสารเพอวาพอเรชัน โดยได้ทำการศึกษาอัตราการไหลในช่วง 0.4-1.0 มิลลิลิตรต่อนาที โดยควบคุมให้อัตราการไหลของกระแสตัวรับให้มีอัตราการไหลที่คงที่ก่อน จากนั้นทาการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 100 ไมโครกรัม/ลิตร เข้าไปในกระแส ซึ่งพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมของกระแสตัวพาเท่ากับ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที เพราะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 20 ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไปต้องกำหนดอัตราการไหลของกระแสตัวพาให้อยู่ที่ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 20 ผลการศึกษาอัตราการไหลของกระแสตัวพากรดซัลฟิวริก

9. การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดซัลฟิวริกในกระแสตัวพา

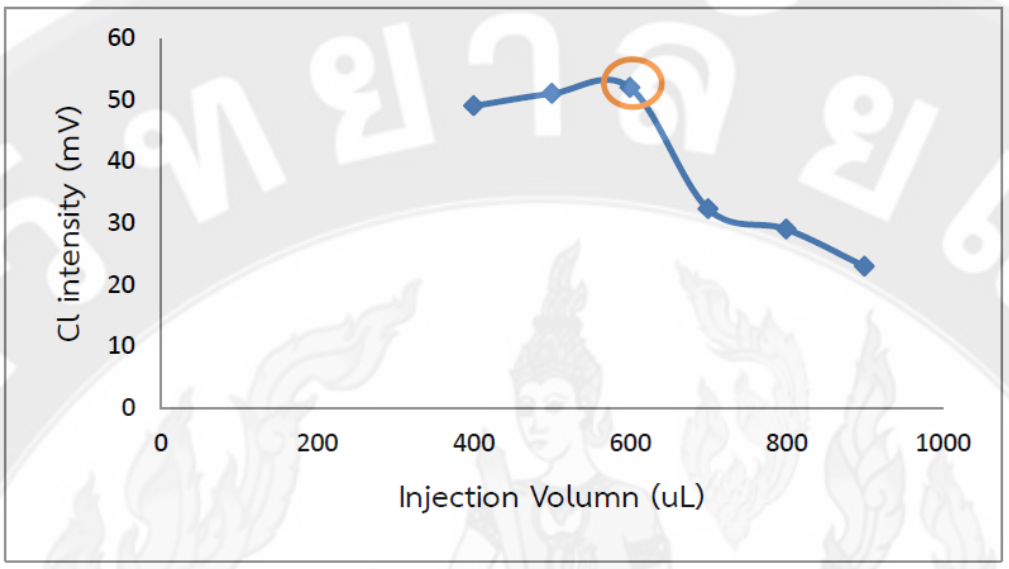
จากที่ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ทดลองผ่านมา ได้ทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริกในกระแสตัวพา โดยศึกษาในช่วงความเข้มข้น 0.02-0.1 โมลาร์ โดยทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้นต่างๆ คือ 50, 100, 200, 300 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นละ 3 ครั้งเข้าไปในระบบให้ผลแสดงดังภาพที่ 21 ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริกที่ต้องใช้เท่ากับ 0.04 โมลาร์ โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกช่วยให้การเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซของฟีนอลได้ดี ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไป จึงจะกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.04 โมลาร์



ภาพที่ 21 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริกในกระแสตัวพา

10. การศึกษาหาปริมาตรสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่ฉีดเข้าไปในระบบ

การศึกษาหาปริมาตรสารตัวอย่างสาหรับฉีดสารตัวอย่างสาหรับฉีดลงไปในกระแสตัวพา ทาการปรับสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา โดยได้ทำการทดลองศึกษาในช่วงปริมาตร 400-900 ไมโครลิตร โดยทำการฉีดสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เข้าไปในกระแส ซึ่งพบว่าผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 22 โดยปริมาตรสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่ฉีดเข้าไปในระบบเท่ากับ 600 ไมโครลิตร ซึ่งถ้าใช้ปริมาณที่มากกว่าอาจจะทำให้ลักษณะพีคสัญญาณที่ได้ไม่เป็นไปตามต้องการ หรือผิดปกติ ทั้งนี้ยังพบว่าถ้าปริมาตรสารที่ใช้เพิ่มมากขึ้นเท่าไหร่ก็จะทำให้ความกว้างของสัญญาณเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราเร็วในการวิเคราะห์ตัวอย่างลดลงด้วย



ภาพที่ 22 ผลการศึกษาหาปริมาตรสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่ฉีดเข้าไปในระบบ

จากการทดลองการสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันที่พัฒนาขึ้น ผลที่ได้แสดงในตาราง 3

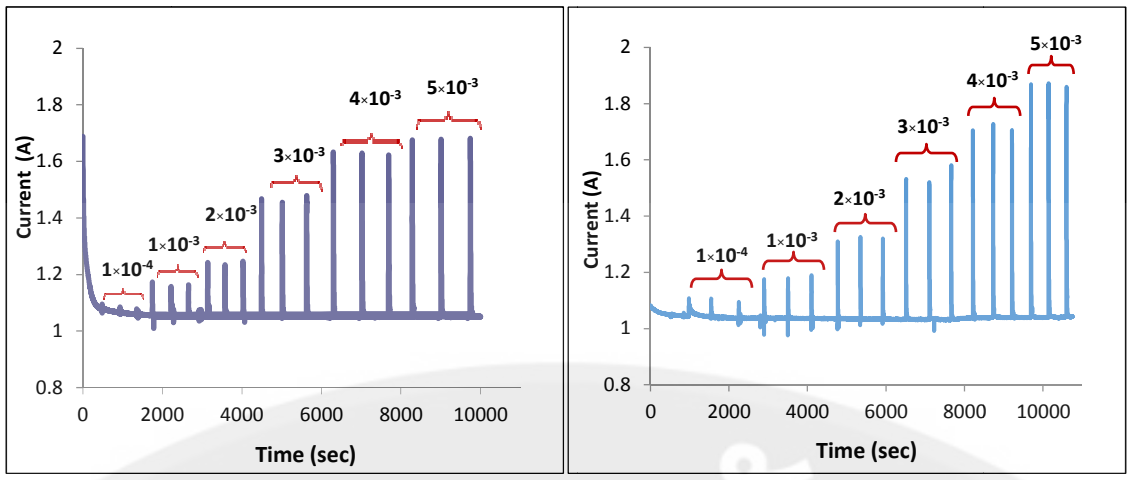
ตารางที่ 3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชัน

พารามิเตอร์ที่ศึกษา	ช่วงที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาสม
1. ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายหลอดตรวจวัดแสง PMT (mV)	600-950	700
2.ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลาร์)	0.01-0.1	0.04
3.ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ (โมลาร์)	$1x10^{-4}$- $2x10^{-5}$	$2x10^{-4}$
4. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสออกซิไดซ์ (โมลาร์)	0.1-0.3	0.3
5. ความเข้มข้นของลูมินอลในกระแสรีเอเจนต์ (โมลาร์)	$1x10^{-3}$-$2x10^{-6}$	$2x10^{-5}$
6. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกระแสรีเอเจนต์ (โมลาร์)	0.1-1.4	0.2
7. อัตราการไหลของกระแสออกซิไดซ์และกระแสรีเอเจนต์ (มิลลิลิตรต่อนาที)	0.5-3.0	1.5
8. อัตราการไหลของกระแสตัวพากรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตรต่อนาที)	0.4-1.0	0.6
9. ปริมาตรสารตัวอย่าง (ไมโครลิตร)	400-900	600
10. เวลาการหยุดไหลชั่วคราว (นาที)	1-7	6

11. การเปรียบเทียบเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันและไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน

เนื่องจากเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน สามารถช่วยเร่งการระเหยกลายเป็นไอของสารให้แก่หน่วยเพอร์วาพอเรชัน (pervaporation unit) โดยอาศัยการระเหยของฟีนอลที่อยู่ในสถานะก๊าซบริเวณด้านบนของกระแสตัวพาเหนือ glass beads ของหน่วยแยกสารเพอร์วาพอเรชัน จากนั้นจึงทำการจับเวลา 6 นาที ไอของฟีนอลจะแพร่ผ่านบริเวณช่องอากาศเหนือ glass beads และแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีในกระแสตัวรับ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) เกิดเป็นฟีนอเลท แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ ไมโครฟลูอิดิกส์ flow cell เกิดปฏิกิริยาเคมิลูมิเนสเซนต์ ทำให้มีกระแสไหลผ่านหลอดวัดแสง PMT ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกผลและได้ภาพพีคสัญญาณต่อไป

พบว่าคลื่นอัลตร้าโซนิคสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ได้ โดยพีคสัญญาณที่วัดได้มีความสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม ดังภาพที่ 23



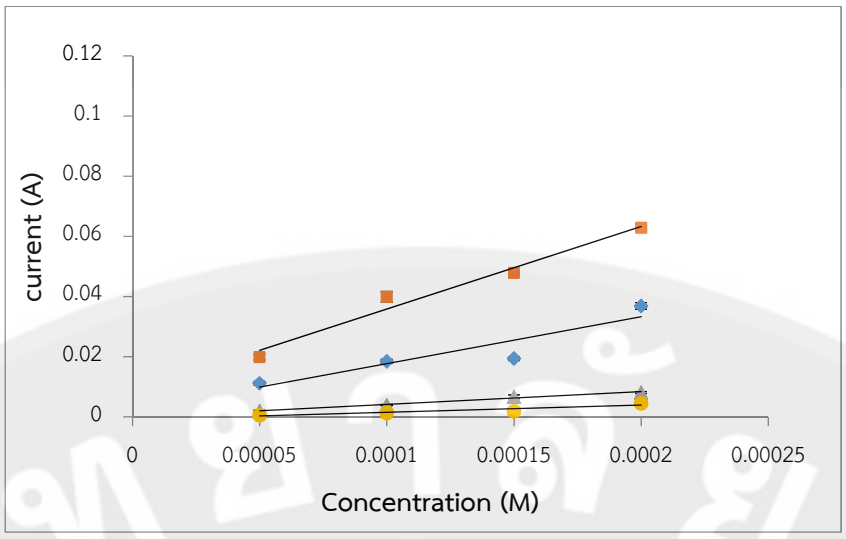
ภาพที่ 23 μPFI gram ของสารละลายฟีนอล (a) ไม่ใช่เครื่องอัลตร้าโซนิค และ (b) ใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค

12. การศึกษาหาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงและกราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ฟีนอล

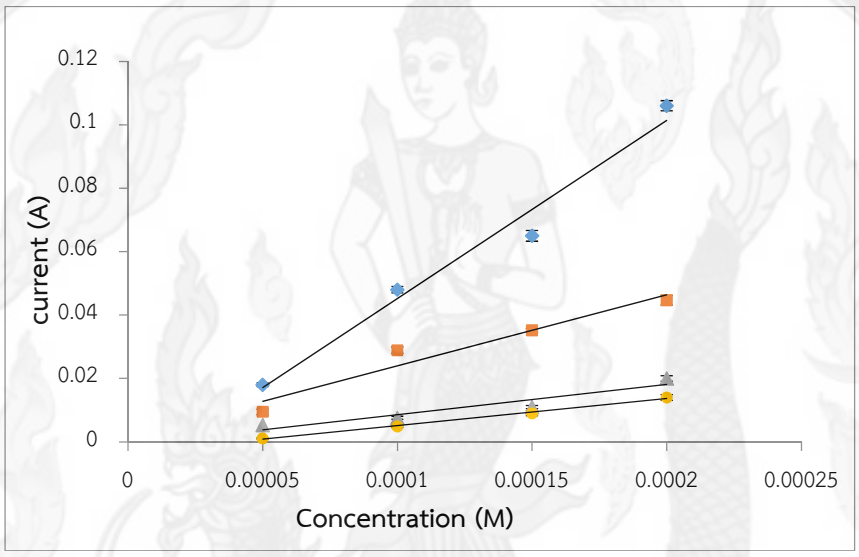
ทำได้โดยการนำสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 1.0×10^{-6}–1.0×10^{-5} โมลาร์ สารละลายมาตรฐาน 2-คลอโรฟีนอล ที่มีความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 5.0×10^{-7}–5.0×10^{-5} โมลาร์ สารละลายมาตรฐาน 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ที่มีความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 1.0×10^{-6}–7.5×10^{-3} โมลาร์ และสารละลายมาตรฐาน 4-คลอโร-3-เมธิลฟีนอล ที่มีความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 1.0×10^{-5}–1.0×10^{-3} มาฉีดเข้าระบบเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชันร่วมกับเครื่องเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน ที่สภาวะที่เหมาะสมสูงสุดจากการศึกษาข้างต้น โดยการวัดสัญญาณไฟฟ้าเพื่อหาความสูงของพีคสำหรับใช้เปรียบเทียบความเข้มข้นของฟีนอลแต่ละความเข้มข้นเพื่อนำมาสร้างกราฟมาตรฐาน และหาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์

เมื่อทำการศึกษาการวิเคราะห์สารละลายฟีนอลด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันและเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน แล้วจึงทำการทดสอบระบบด้วยอนุพันธ์บางชนิดของฟีนอลเพื่อตรวจสอบดูว่าไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน สามารถนำไปใช้ได้จริง จึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณของ 2-คลอโรฟีนอล 2,4-ไดคลอโรฟีนอล และ 4-คลอโร-3-เมธิลฟีนอล โดยนำสารละลายเหล่านี้มาฉีดเข้าไปในระบบเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชันและระบบเพอร์วาพอเรชันร่วมกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชัน แล้วเขียนกราฟระหว่างค่ากระแสกับความเข้มข้น เมื่อนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกัน พบว่าเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันให้

ค่ากระแสที่สูงกว่าระบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันแบบธรรมดา



ภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ด้วยไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชัน (2-CP 2,4-DC Pheno 4-C -MP)



ภาพที่ 25 ผลการวิเคราะห์ด้วยไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันชัน (2-CP 2,4-DCP Phen 4- -3-MP)

จากตาราง 4 เห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ด้วยระบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชันกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันให้ค่ากระแสที่สูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยระบบไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์เพอร์วาพอเรชันแบบธรรมดา เป็นผลมาจากการใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค ในการกระตุ้นการถ่ายโอนมวลของสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเยื่อเลือกผ่านและนอกจากนี้ยังสามารถลดขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ได้

ตารางที่ 4 ผลเปรียบเทียบค่าความชัน และค่าจุดตัดแกน y ของ วิธี μPFI กับ วิธี μPFI-Ultra sonication

สารละลาย	วิธี μPFI		วิธี μPFI-Ultra sonication	
	Slope	**Intercept**	**Slope**	**Intercept**
Phenol	42.8	0.985	95.0	0.902
2-CP	274.0	0.974	562.0	0.975
2,4-DCP	156.0	0.852	223.8	0.943
4-C-3-MP	24.6	0.865	85.6	0.995

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการแยกสารแบบออนไลน์ (on-line) ชนิดเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน (PFI) ที่มีระบบการตรวจวัดด้วยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ ซึ่งจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถพัฒนาเทคนิคโฟลอินเจคชันให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น มีความแม่นยำสูง สามารถปรับปรุงและพัฒนาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในระดับความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเทคนิคโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสจะต้องมีการควบคุมการแพร่ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ที่สำคัญบางชนิดในสารตัวอย่าง โดยต้องการให้ได้การตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบไมโครฟลูอิดิกส์โฟลอินเจคชันอะนาลิซีสนั้น จะทำให้ความสูงของพีคเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปถึงจุดๆ หนึ่ง จะได้ค่าการตอบสนองที่สูงที่สุดของปฏิกิริยานั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีนำเอาระบบการแยกสารแบบออนไลน์มาใช้ร่วมกันเนื่องจากมีผลของการถ่ายมวลมาเกี่ยวข้องอีกขั้นตอนหนึ่งของการตรวจวิเคราะห์ และนอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาคลื่นเสียงความถี่สูงมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของสารอีกด้วย

ในการวิเคราะห์ระบบไมโครฟลูอิดิกส์โฟลอินเจคชันร่วมกับเทคนิคเพอร์วาพอเรชัน และเทคนิคการตรวจวัดชนิดเคมิลูมิเนสเซนต์นั้น ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการแพร่ของสารตัวอย่าง เช่น อัตราการไหลของกระแสตัวพา และอัตราการไหลของกระแสตัวรับ จะต้องได้รับการศึกษาเพื่อให้ได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ถ้ากระแสตัวรับมีอัตราการไหลที่สูงเกินไปอาจจะก่อให้เกิดแรงดันจากอัตราการไหล ซึ่งเมื่อได้รับแรงดันมากเกินไป อาจจะทำให้เยื่อเลือกผ่านเกิดการโป่งพองขึ้น และทำให้ปริมาตรของสารตัวรับที่อยู่ในช่องรับสารในหน่วยเพอร์วาพอเรชันหรือหน่วยก๊าซดิฟฟิวชัน มีปริมาตรที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ส่วนอัตราการไหลในกระแสตัวพานั้น เนื่องจากการแยกสารแบบออนไลน์ชนิดเพอร์วาพอเรชันต้องอาศัยหลักการแพร่ผ่านและการถ่ายโอนมวลของสาร ถ้าหากมีอัตราการไหลที่สูงเกินไปอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดได้น้อยลง

ในการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยระบบออนไลน์ ด้วยวิธีเพอร์วาพอเรชัน ร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการเร่งการระเหยกลายเป็นไอของสารตัวอย่าง โดยคลื่นเสียงความถี่สูงจะทำให้โมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับการสั่นสะเทือนแล้วเกิดเป็นฟองอากาศเป็นจำนวนมาก จากการศึกษาพบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงไม่เหมาะสมกับการแยกสารแบบออนไลน์ชนิดก๊าซดิฟฟิวชัน เนื่องจากวิธีก๊าซดิฟฟิวชันนั้นสารตัวอย่างจะสัมผัสกับเยื่อเลือกผ่านโดยตรงกับเยื่อเลือกผ่าน จึงไม่สามารถช่วยเร่งการระเหยกลายเป็นไอแก่สารตัวอย่างได้ แต่ในขณะเดียวกันคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถช่วยเร่งการระเหยกลายเป็นไอแก่วิธีเพอร์วาพอเรชันได้ เนื่องจากหน่วยเพอร์วาพอเรชันถูกออกแบบมาให้มีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างสารตัวอย่างกับเยื่อเลือกผ่าน เมื่อสารตัวอย่างที่อยู่ในหน่วยเพอร์วาพอเรชันได้รับการสั่นสะเทือน จะทำให้ผิวหน้าของสาร

ตัวอย่างที่อยู่ในระดับเดียวกับ glass beads เกิดเป็นคลื่น และเกิดการระเหยผ่านบริเวณช่องอากาศขึ้นไปยังเยื่อเลือกผ่าน จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายกระแสตัวรับได้ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือเยื่อเลือกผ่านจะเกิดการอุดตันได้ยาก ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ส่วนวิธีก๊าซดิฟฟิวชันมีข้อเสียเนื่องจากตัวอย่างสัมผัสกับเยื่อเลือกผ่านโดยตรงทำให้ระยะเวลาการใช้งานของเยื่อเลือกผ่านใช้ได้เป็นเวลาน้อย ทำให้ต้องเปลี่ยนเยื่อเลือกผ่านบ่อยครั้ง ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกวิธีเพอร์วาพอเรชันร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง มาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ที่สำคัญบางชนิด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมได้แสดงไว้ดังตาราง 3 ภายใต้สภาวะดังกล่าว ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในขั้นต่อการวิจัยเฟสต่อไป

จากการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์บางชนิด โดยระบบเพอร์วาพอเรชัน ร่วมกับเทคนิคอัลตร้าโซนิเคชันผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมามีความว่องไว และมีความถูกต้องแม่นยำสูง การวิเคราะห์สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว อุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาถูก เนื่องจากใช้ในปริมาณน้อย และสามารถทำการศึกษาและวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์บางชนิดในตัวอย่างแต่ละชนิดได้ และนอกจากนี้ระบบการแยกสารแบบออนไลน์ยังสารมารถประหยัดการใช้สารรีเอเจนต์ที่มีราคาแพงได้อีกด้วย โดยระบบการแยกสารแบบออนไลน์ยังสามารถดัดแปลงใหม่เพื่อวิเคราะห์สารเคมีอื่นๆ ได้ตามความเหมาะสมของปฏิกิริยาเคมีของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ฟีนอลแบบออนไลน์โดยเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์เคมิลูมิเนสเซนต์ร่วมกับเทคนิคเพอวาพอเรชันกับอัลตร้าโซนิค ซึ่งจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนาไปพัฒนาปรับปรุงเทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์โฟลอินเจคชันให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ให้สูงมากยิ่งขึ้นมีความแม่นยำสูง สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาเพื่อใช้ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในระดับความเข้มข้นต่างๆ ในระดับน้อยๆได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการนำเอาเทคนิคต่างๆ มาต่อร่วมกัน เพื่อให้ได้วิธีการวิเคราะห์ใหม่ๆ ขึ้นใช้งานในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

แม้น อมรสิทธ์ และ อมร เพชรสม. 2552. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. ชวนพิมพ์: กรุงเทพมหานคร, 623 น.

วิรัช เรืองศรีตระกูล. 2548. โฟลอินเจคชันที่ใช้การตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนซ์สำหรับการวิเคราะห์เภสัชภัณฑ์. ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น: ขอนแก่น:, 122น.

วิศรุต ต๋ำคำธรรม. 2554. การประยุกต์ใช้เทคนิคไมโครฟลูอิดิกส์ร่วมกับวิธีเคมิลูมิเนสเซนต์ในการวิเคราะห์กลูโคส. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้: 89น.

Anderssona, H. and A. van den Berg. 2003. Microfluidic devices for cellomics: a review. **Sens. Actua. B: Chem.** 92: 315-325**.**

Bonggotgetsakul,Y. Y. N., M. Ashokkumar, R. W. Cattrall and S. D. Kolev. 2010. The use of sonication to increase extraction rate in polymer inclusion membranes. An application to the extraction of gold(III). **J. Mem. Sci.** 365: 242-247.

Garcia-Campana, A. M. and W. R. G. Baeyens, 2001. **Chemiluminescence in Analytical Chemistry**, Marcel Dekker: New York. 640p.

George, B. J. N., Pereira, M. A. Massum, S. D. Kolev and M. Ashokkumar. 2008. Sensitivity enhancement in membrane separation flow injection analysis by ultrasound. **Ultrasonics Sonochem.** 15: 151-156.

Guo, C., H. Zeng, X. Ding, D. He, J. Li, R. Yang, L. Qu. 2013. Enhanced chemiluminescence of the luminol-$K_3Fe(CN)_6$ system by ZnSe quantum dots and its application. **J. Luminescence**. 134: 888-892.

Greenway, G. M., T. Leelasattarathkul, S. Liawruangrath, A R. Wheatley and N. Youngvises, 2006. Ultrasound-enhanced flow injection chemiluminescence for determination of hydrogen peroxide. **Analyst,** 131: 501-509.

Kober, P. A. 1995. Pervaporation, perstillation and percrystallization. **J. Mem. Sci.** 100: 61–64.

Li, P.C.H. 2006. **Microfluidic Lab-on-a-Chip for Chemical and Biological Analysis and Discovery**, Taylor & Francis: London. 528p.

Marle, L. and G. M. Greenway. 2005**.** Microfluidic devices for environmental monitoring. **TrAC Trends Anal. Chem.** 24: 795-802.

Ruzicka, J. and E. H. Hansen. 1975. Flow injection analyses: Part I. A new concept of fast continuous flow analysis. **Anal. Chim. Acta.** 78: 145-157.

Sheikheldin, S. Y., T. J. Cardwell, R. W. Cattrall, M. D. Luque de Castro and S. D. Kolev. 2000. Determination of phenol in water by pervaporation–flow injection analysis. **Anal. Chim. Acta.** 419: 9-16.

Zhang, W. and N. D. Danielson. 2003. Characterization of a microspiral flow cell for chemiluminescence detection. **J. Microchem.** 75: 255-264.

Zhou, Y., T. Nagaoka, F. Li, G. Zhu. 1999. Evaluation of luminol–H_2O_2–KIO_4 chemiluminescence system and its application to hydrogen peroxide, glucose and ascorbic acid assays. **Talanta**. 48(2): 461-467.