

---

เทคนิคการแยกสารในสถานะแก๊สที่ประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบไหล  
Applications of Gas Phase Separation Techniques for Flow Injection Analysis

ศศิธร มั่นเจริญ<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup>ห้องปฏิบัติการนวัตกรรม-วิจัยการไหลเพื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Sasithorn Muncharoen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, BuraphaUniversity.

<sup>2</sup>Flow Innovation-Research for Science and Technology Laboratories (*First Labs*)

---

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการแยกสารในสถานะต่างๆ มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลอย่างมากมาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบวิเคราะห์ให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะขอลำถึงเฉพาะเทคนิคการแยกสารในสถานะแก๊สที่ถูกนำมาใช้ควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหล ซึ่งเทคนิคการแยกนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือการแยกที่อาศัยและไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่าน นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงข้อดีและข้อเสียรวมทั้งการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างชนิดต่างๆ อีกด้วย

**คำสำคัญ :** เทคนิคการแยก การวิเคราะห์แบบไหลสถานะแก๊ส

### Abstract

Recently, various separation techniques are applied for flow-based system owing to improve efficiency of the analysis. For this review, the separation techniques involving only gas phase coupled to flow injection analysis were reconsidered. These separation techniques were divided into 2 types: separations with and without selective membrane. In addition, advantages and disadvantages including their applications were also mentioned in this review.

**Keywords :** separation technique, flow-based analysis, gas-phase

---

\*E-mail: muncharoen@buu.ac.th

## บทนำ

การวิเคราะห์แบบไหลหรือ 'Flow injection analysis' เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารที่ต้องการวิเคราะห์ (analyte) ในตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่เหมาะสม โดยสารตัวอย่างจำนวนหนึ่งจะถูกนำเข้าสู่กระแสของรีเอเจนต์หรือตัวพาที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง (continuous carrier stream) จากนั้นลำของสารตัวอย่างจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบการตรวจวัดต่างๆ เช่น การดูดกลืนแสงการร้าวแสงและการเรืองแสง กระแสไฟฟ้าศักย์ไฟฟ้าและปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เป็นต้นด้วยลักษณะเด่นของเทคนิควิเคราะห์แบบไหลที่สามารถนำมาประยุกต์ให้เป็นระบบอัตโนมัติได้จึงทำให้การวิเคราะห์แบบไหลนี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แบบไหลมีข้อจำกัดในการเลือกรีเอเจนต์ที่เกิดปฏิกิริยาจำเพาะกับสารที่ต้องการวิเคราะห์เท่านั้นได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้มีการพัฒนาเทคนิคการแยกต่างๆ (separation techniques) เข้ามาร่วมประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์แบบไหล (Fang, 1993) โดยทั่วไปเทคนิคการแยกที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบไหลส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ คือเพื่อต้องการแยกสารเจือปนอื่นออกจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสารเจือปนเหล่านี้อาจมีผลรบกวนต่อระบบการตรวจวัดและ/หรือรบกวนต่อปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์และเพื่อต้องการเจือจาง (dilution) หรือเพิ่มความเข้มข้น (pre-concentration) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยควบคุมความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของสารนั้นๆ (Miró & Frenzel, 2004) ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคนิคการแยกสำหรับการวิเคราะห์แบบไหลสามารถจำแนกโดยแบ่งตามเฟสของสารได้ดังนี้ (Fang, 1993; Luque de Castro & Papaefstathiou, 1998)

(ก) การแยกระหว่างเฟสของเหลวและของเหลว เช่น การสกัดด้วยของเหลว (solvent extraction) อาศัยหลักการละลายของสารซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายได้ในตัวทำละลายที่แตกต่างกันและเมื่อนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลพบว่าจะต้องมีการออกแบบอุปกรณ์การแยกเฟสสำหรับเหลวทั้งสองให้มีความเหมาะสมซึ่งอาจทำให้ระบบวิเคราะห์มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น (Alonso *et al.*, 2006)

(ข) การแยกระหว่างเฟสของเหลวและของแข็ง เช่น การสกัดด้วยเฟสของแข็ง (solid phase extraction) ซึ่งการสกัดชนิดนี้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์แบบไหล ทั้งนี้เนื่องจากการสกัดชนิดนี้นอกจากจะแยกสิ่งเจือปนออกจากสารที่ต้องการวิเคราะห์แล้วยังเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่

ต้องการวิเคราะห์ในเวลาเดียวกันอีกด้วยจึงทำให้การวิเคราะห์มีความจำเพาะและสภาพไวในการวิเคราะห์ที่สูงขึ้น (Zhou *et al.*, 2006; Miró & Frenzel, 2004) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) เป็นอีกหนึ่งเทคนิคการแยกที่นิยมใช้กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลโดยเทคนิคนี้อาศัยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของสารที่ต้องการวิเคราะห์กับไอออนของสารที่ใช้แยกซึ่งส่วนมากจะเป็นเฟสของแข็งและเฟสของแข็งที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประเภทเรซินหรือพอลิเมอร์ (Sánchez-Pedreno *et al.*, 2001; Couto *et al.*, 1998; Purohit & Devi, 1997)

(ค) การแยกระหว่างเฟสของเหลวและแก๊ส เช่น แก๊สดีฟฟิวชัน (gas diffusion), ไฮไดรด์เจเนอเรชัน (hydride generation) และเมมเบรนเลส-แก๊สดีฟฟิวชัน (membraneless gas diffusion) เป็นต้น (Choengchan *et al.*, 2006; Muncharoen *et al.*, 2009)

(ง) การแยกระหว่างเฟสของแข็งและแก๊ส เช่น เพอร์แวพอเรชัน (pervaporation) และเมมเบรนเลส-เพอร์แวพอเรชัน (membraneless-pervaporation) เป็นต้น (Sereenonchai *et al.*, 2007; Teerasong *et al.*, 2010)

โดยทั่วไปสำหรับการเลือกเทคนิคการแยกต่างๆ มาประยุกต์ใช้นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความเหมาะสมในแต่ละระบบของการวิเคราะห์ดังนั้นในบทความนี้จะขอกล่าวถึงเทคนิคการแยกที่เกี่ยวข้องเฉพาะสารในสถานะแก๊สที่นิยมนำมาใช้กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลโดยจะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นและการแบ่งชนิดของเทคนิคการแยกการออกแบบอุปกรณ์การแยกข้อดีและข้อเสียของการแยกแต่ละชนิดรวมทั้งการประยุกต์ใช้เทคนิคการแยกควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหล

## หลักการและชนิดของการแยกที่เกี่ยวข้องกับสารในสถานะแก๊ส

การแยกสารที่ต้องการวิเคราะห์ในสถานะแก๊สที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบการวิเคราะห์แบบไหลนั้น ในบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เทคนิคการแยกที่อาศัยเยื่อเลือกผ่านและเทคนิคการแยกที่ไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่าน (Muncharoen, 2009)

### ชนิดที่ 1 : เทคนิคการแยกที่อาศัยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane-based separation)

หลักการของการแยกด้วยเทคนิคนี้จะอาศัยความจำเพาะเจาะจงของสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้เท่านั้นทั่วไปเยื่อเลือกผ่านที่นำมาใช้สำหรับการแยกนี้สามารถ

ใช้ได้ทั้งเยื่อเลือกผ่านชนิดมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุน (porous or non-porous membranes) ซึ่งการเลือกใช้เยื่อเลือกผ่านชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในแต่ละงานวิจัย (Miró & Frenzel, 2004) โดยปกติเยื่อเลือกผ่านที่นำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคการแยกชนิดนี้ควรมีคุณสมบัติดังนี้ (Fang, 1993)

(ก) มีความจำเพาะเจาะจงสูง กล่าวคือเยื่อเลือกผ่านจะยอมให้เฉพาะสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านได้เท่านั้นซึ่งในกรณีนี้สารที่ต้องการวิเคราะห์จะต้องอยู่ในสถานะแก๊สเท่านั้นและยังพบว่าเยื่อเลือกผ่านที่ใช้สำหรับเทคนิคการแยกนี้นิยมใช้เป็นชนิดที่ไม่ชอบน้ำหรือที่เรียกว่า hydrophobic membrane ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการแพร่ผ่าน (diffusion) ของสารปนเปื้อนอื่นๆ จากสารตัวอย่างผ่านเยื่อเลือกผ่านนี้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ได้นอกจากนี้ยังใช้เพื่อคั่นระหว่างกระแสของตัวให้ (donor stream) และกระแสของตัวรับ (accepter stream) ได้อีกด้วย (ดังภาพที่ 1(ก))

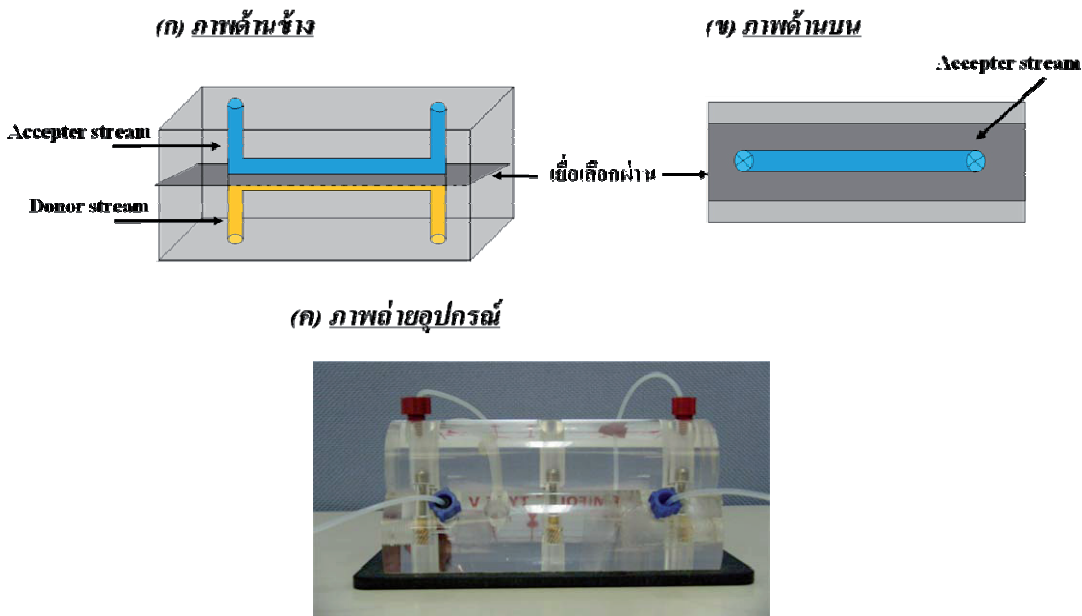
(ข) มีอัตราการแพร่ผ่านของสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเยื่อเลือกผ่านอย่างรวดเร็ว

(ค) มีความเสถียรหรือความต้านทานเพียงพอต่อสารเคมีที่ใช้ในระบบการวิเคราะห์นั้นๆ (chemically resistance) รวมทั้งสภาวะต่างๆ ในการทดลองอีกด้วย

สำหรับเทคนิคการแยกสารที่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่านนี้สามารถแบ่งออกเป็น

### 1.1 เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชัน (gas diffusion technique: GD)

เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันเป็นวิธีการแยกสารที่นิยมใช้วิธีหนึ่งในการวิเคราะห์แบบไหลโดยอาศัยลักษณะเด่นของสารหรือผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีที่อยู่ในสถานะแก๊สออกจากแมทริกซ์ (matrices) ของสารตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของเหลวและจากภาพที่ 1 ได้แสดงภาพจำลองและภาพถ่ายของอุปกรณ์การแยกสำหรับเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันซึ่งอุปกรณ์การแยกนี้ส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นพลาสติกหรืออะคริลิก (Plexiglas หรือ acrylic plastic) จะเห็นว่าสารตัวอย่างถูกนำเข้าสู่อุปกรณ์ผ่านทางกระแสของตัวให้จากนั้นมีเพียงสารหรือผลิตภัณฑ์ของสารที่ต้องการวิเคราะห์เท่านั้นที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเพื่อเข้าสู่กระแสของตัวรับโดยทั่วไปกระแสของตัวให้จะทำหน้าที่เพียงการพาสารตัวอย่างหรืออาจทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านเพื่อผ่านเข้าสู่ลำกระแสของตัวรับทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับกระแสของตัวรับซึ่งกระแสของตัวรับอาจทำหน้าที่เพียงการพาหรืออาจทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของตัวตรวจวัดเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งมีงานวิจัยได้รายงานวาทะเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันเป็นเทคนิคที่เพิ่มความจำเพาะเจาะจงและสภาพไวในการวิเคราะห์ แต่พบว่ามีข้อจำกัดหลายประการ เช่น กรณีที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันควบคู่กับการวิเคราะห์



ภาพที่ 1 (ต่อ) อุปกรณ์การแยกสำหรับเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชัน (gas diffusion unit); (ก) ภาพจำลองด้านข้างของอุปกรณ์, (ข) ภาพจำลองด้านบนของอุปกรณ์และ (ค) ภาพถ่ายอุปกรณ์ (ที่มา: ดัดแปลงจาก Muncharoen, 2009)

แบบไหลต่อเนื่องนั้น หากสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ที่มีเมทริกซ์ที่แตกต่างกันจะทำให้ผลการวิเคราะห์ซ้ำได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร (Mattos *et al.*, 1995) และในบางกรณีพบว่ามีปัญหาที่เกิดจากการอุดตันของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งมีสาเหตุมาจากอนุภาคขนาดเล็กในสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันสามารถทำการวิเคราะห์ได้เฉพาะสารตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของเหลวเท่านั้นอีกด้วย

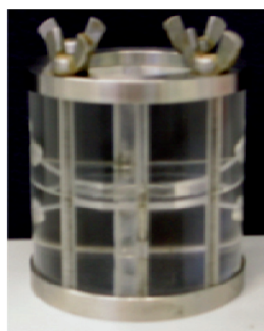
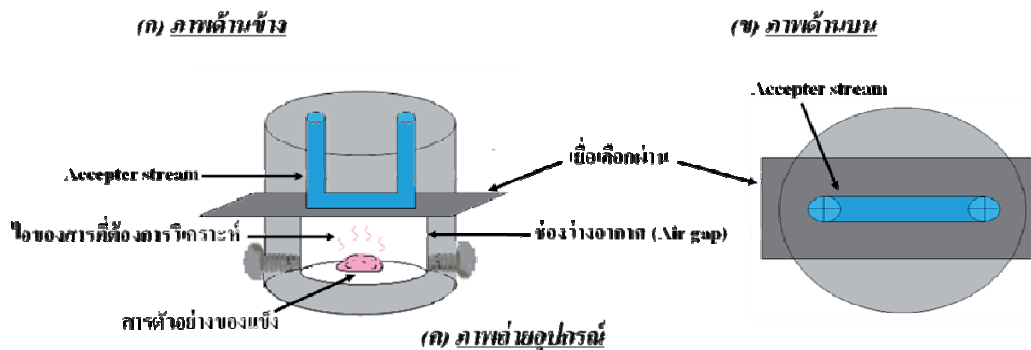
### 1.2 เทคนิคเพอร์แวกพอเรชัน (pervaporation technique: PV)

เทคนิคเพอร์แวกพอเรชันจัดเป็นเทคนิคการแยกที่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่านอีกเทคนิคหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเทคนิคแก๊สดีฟฟิวชัน ซึ่งปัญหาเหล่านี้มีสาเหตุจากการอุดตันของเยื่อเลือกผ่านและสถานะของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวเท่านั้น ดังนั้นอุปกรณ์การแยกสำหรับเทคนิคเพอร์แวกพอเรชันนี้ได้ถูกออกแบบให้มีช่องว่าง (air gap) ระหว่างสารตัวอย่างและกระแสน้ำของตัวรับ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเทคนิคเพอร์แวกพอเรชันสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีสถานะได้ทั้งของแข็งของเหลวหรือของเหลวหนืด (slurry) อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาการอุดตันของเยื่อเลือกผ่านบ้าง นอกจากนี้ยังพบปัญหาสภาพไวในการวิเคราะห์ไม่สูงเพียงพอ ซึ่ง

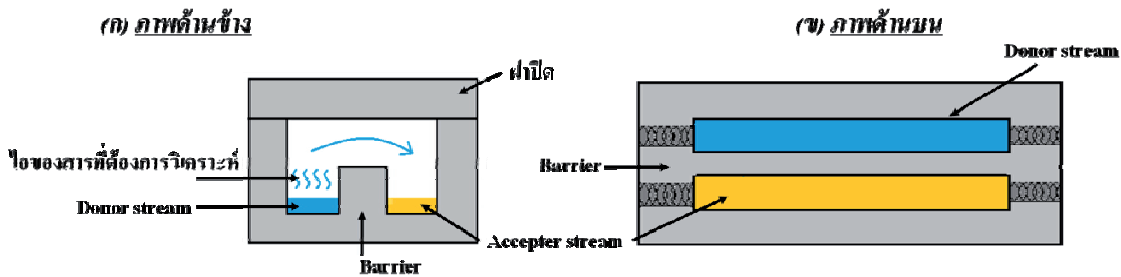
กลายเป็นปัญหาที่สำคัญอันเนื่องมาจากลักษณะรูปแบบของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใหม่นี้เอง (Luque de Castro, & Papaefstathiou, 1998)

### ชนิดที่ 2 : เทคนิคการแยกที่ไม่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่าน (Membraneless separation)

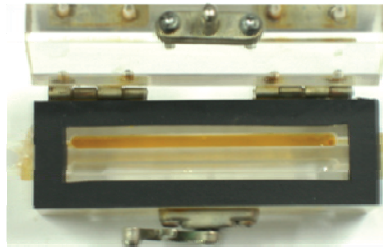
เทคนิคการแยกที่ไม่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่านมีหลักการคือสารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถระเหยได้ง่าย โดยส่วนที่เป็นไอของสารที่ต้องการวิเคราะห์นี้จะระเหยจากสารตัวอย่างแล้วสะสมอยู่บริเวณช่องว่างด้านบน จากนั้นไอของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับกระแสของตัวรับผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัดเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป ข้อดีสำหรับเทคนิคการแยกนี้คือไม่ต้องใช้เยื่อเลือกผ่านจึงทำให้ไม่มีปัญหาด้านการอุดตันและยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ อีกทั้งยังมีรายงานวิจัยพบว่าเทคนิคการแยกที่ไม่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่านนี้ยังมีระบบการถ่ายเทมวล (mass transfer) ที่ดีกว่าเทคนิคการแยกที่อาศัยเยื่อเลือกผ่านอีกด้วย (เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชัน) (Choengchan *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งสถานะของแข็งของเหลวหรือของเหลวหนืด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรออกแบบลักษณะของอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสม (Choengchan *et al.*, 2006; Sereenonchai *et al.*, 2007)



ภาพที่ 2 อุปกรณ์การแยกสำหรับเทคนิคเพอร์แวกพอเรชัน (pervaporation unit); (ก) ภาพจำลองด้านข้างของอุปกรณ์, (ข) ภาพจำลองด้านบนของอุปกรณ์ และ (ค) ภาพถ่ายอุปกรณ์ (ที่มา: ดัดแปลงจาก Muncharoen, 2009)



(ค) ภาพถ่ายอุปกรณ์



ภาพที่ 3 อุปกรณ์การแยกสำหรับเทคนิคการแยกที่ไม่ต้องอาศัยเยื่อเลือกผ่าน (membraneless gas diffusion unit); (ก) ภาพจำลองด้านข้างของอุปกรณ์, (ข) ภาพจำลองด้านบนของอุปกรณ์ และ (ค) ภาพถ่ายอุปกรณ์ (ที่มา: ดัดแปลงจาก Muncharoen, 2009)

### การประยุกต์ใช้

การแยกสารในสถานะแก๊สด้วยเทคนิคการแยกที่อาศัยและไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่านสำหรับการวิเคราะห์แบบไหลนั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ในตัวอย่างได้หลากหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารและยา รวมทั้งตัวอย่างทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางชีวภาพ เป็นต้น

#### การวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหารและยา

เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหลนั้นได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ อย่างมากมาย เช่น การวิเคราะห์หาซัลไฟต์ (sulphite) ในผลิตภัณฑ์ไวน์ชนิดต่างๆ (Decnop-Weever & Kraak, 1997; Melo *et al.*, 2003) การวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (Pinyou *et al.*, 2011) การวิเคราะห์หาไนโตรเจนในนม, เนื้อไก่หรืออาหารทะเล (Junsomboon & Jakmune, 2008; Dhaouadi *et al.*, 2007) โดยงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นตัวตรวจวัด สำหรับเทคนิคเพอร์เวพรชันซึ่งเป็นเทคนิคการแยกที่อาศัยเยื่อเลือกผ่านอีกชนิดหนึ่งก็นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์อาหารด้วยเช่นกัน เช่น การวิเคราะห์หาซัลไฟต์ในผลิตภัณฑ์อาหารถนอมต่างๆ

โดยใช้เทคนิคเคมีลูมิเนสเซนซ์ (Satieperakul *et al.*, 2010) และเทคนิคแอมเพอร์โรเมทรี (Alamo *et al.*, 2010) รวมทั้งเทคนิคแคปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิสในการตรวจวิเคราะห์ (Ruiz-Jiménez & Luque de Castro, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่ามี การนำเทคนิคเพอร์เวพรชันมาประยุกต์ในการวิเคราะห์ไอโอไดต์ในวิตามินรวมอีกด้วย (Nacapricha *et al.*, 2007)

สำหรับเทคนิคการแยกที่ไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่านก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารได้มากมายเช่นเดียวกัน เช่น การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์พื้นบ้าน (Choengchan *et al.*, 2006) และพบว่าได้มีงานวิจัยที่มีการพัฒนาเทคนิคการแยกที่ไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่านนี้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำอัดลมโดยไม่ใช้สารรีเอเจนต์ใดๆ ซึ่งจัดเป็นระบบการวิเคราะห์แบบสะอาดอีกด้วย (Teerasong *et al.*, 2010)

#### การวิเคราะห์ในตัวอย่างทางด้านสิ่งแวดล้อมและชีวภาพ

การวิเคราะห์ในด้านสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคนิคการแยกทั้งอาศัยและไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่านที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ควบคู่กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลนั้น สามารถทำการวิเคราะห์ในตัวอย่างได้หลากหลาย เช่น ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติต่างๆ น้ำเสียจาก



บ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ (sulphide) ในตัวอย่างน้ำชะน้ำทิ้ง และน้ำประปาโดยใช้เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหลชนิด multi-syringe FIA ที่มีการตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีลูมิเนสเซนซ์ซึ่งจัดเป็นเทคนิคที่มีสภาพไวในการวิเคราะห์สูง นำเสนอโดย Maya *et al.*, 2007 นอกจากนี้ Amini & Kolev, 2007 ได้รายงานการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (II) ในตัวอย่างน้ำทะเลและน้ำจากแม่น้ำสายสำคัญในประเทศออสเตรเลีย โดยรายงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันควบคู่กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลที่อาศัยปฏิกิริยาระหว่าง luminol-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในการตรวจวัด และงานวิจัยนี้ได้พบว่าโลหะอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่ศึกษานั้นไม่ส่งผลกระทบต่อระบบที่พัฒนาขึ้นแต่อย่างใดและสำหรับการประยุกต์ใช้กับตัวอย่างทางชีวภาพโดย Su *et al.*, 1998 ได้เสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคแก๊สดีฟฟิวชันในการวิเคราะห์แอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหลที่มี acoustic wave impedance sensor เป็นตัวตรวจวัดและ Fredj *et al.*, 2012 ได้เสนอการประยุกต์ใช้สำหรับการหา thermersal ในตัวอย่างวัคซีนและเซรัมโดยการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 528 นาโนเมตร สำหรับเทคนิคเพอร์แควอเรชันได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนิกในตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคแอมเพโรเมทรีในการตรวจวัด ซึ่งงานวิจัยนี้เสนอโดย Rupasinghe *et al.*, 2009 และสำหรับการวิเคราะห์ฟลูออไรด์ในตัวอย่างที่สกรกเช่น น้ำหมัก น้ำบ่อและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้มีการนำเทคนิคเพอร์แควอเรชันมาประยุกต์ใช้ด้วยเช่นกันโดยทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมทรี ดังในงานวิจัยของ Papaefstathiou *et al.*, 1995

สำหรับเทคนิคการแยกที่ไม่อาศัยเยื่อเลือกผ่านพบว่าได้มีการรายงานการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำเสียต่างๆ ควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหลชนิด multi-syringe FIA (Almeida *et al.*, 2011) และได้พบว่ามีรายงานการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างซีเมนต์ดังในงานวิจัยของ Sereenonchai *et al.*, 2010

## บทสรุป

จากที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยทั่วไปการประยุกต์ใช้เทคนิคการแยกสารมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความจำเพาะเจาะจงและสภาพไวในการวิเคราะห์ และเมื่อนำมาใช้ควบคู่กับระบบการวิเคราะห์แบบไหลซึ่งจัดเป็นเทคนิคที่อัตโนมัติและสามารถ

นำมาใช้กับตัวตรวจวัดได้หลากหลายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือปฏิกิริยาที่ใช้ และด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ระบบที่มีการใช้เทคนิคการแยกสารในสถานะแก๊สควบคู่กับการวิเคราะห์แบบไหลจึงถูกจัดเป็นระบบการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้องและรวดเร็วซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบการวิเคราะห์ที่มีการใช้เทคนิคการแยกสารในสถานะแก๊สกับระบบการวิเคราะห์แบบไหลจึงจัดเป็นการจับคู่ของสองเทคนิคที่ทำให้ระบบการวิเคราะห์มีความเหมาะสมอย่างยิ่ง

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ดวงใจ นาคะปรีชา อาจารย์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้รู้จักและเรียนรู้เกี่ยวกับโลกของการวิเคราะห์แบบไหลและขอขอบคุณมหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนจนกระทั่งผู้เขียนสำเร็จการศึกษาและได้นำความรู้กลับมาใช้เพื่อการพัฒนาประเทศต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- Alamo, L.S.T., Tangkuaram, T. & Satienperkul, S. (2010). Determination of sulfite by pervaporation-flow injection with amperometric detection using copper hexa-cyano ferrate-carbon nanotube modified carbon paste electrode. *Talanta*, 81, 1793-1799.
- Almeida, M.G.S., Estela, J.M., Segundo, M.A. & Cerdà, V. (2011). A membraneless gas-diffusion unit-multisyringe flow injection spectrophotometric method for ammonium determination in untreated environmental samples. *Talanta*, 84, 1244-1252.
- Alonso, A., Almendral, M.J., Porras, M.J. & Curto, Y. (2006). Flow-injection solvent extraction without phase separation fluorimetric determination of thiamine by the thiochrome method. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 42, 171-177.
- Amini, N. & Kolev, S.D. (2007). Gas-diffusion flow injection determination of Hg(II) with chemiluminescence detection. *Analytica Chimica Acta*, 582, 103-108.

- Choengchan, N., Mantim, T., Wilairat, P., Dasgupta, P.K., Motomizu, S. & Nacapricha, D. (2006). A membraneless gas diffusion unit: design and its application to determination of ethanol in liquors by spectrophotometric flow injection. *Analytica Chimica Acta*, 579, 33-37.
- Couto, C.M.C.M., Lima, J.L.F.C., Montenegro, M.C.B.S.M., Reis, B.F. & Zagatto, E.A.G. (1998). Potentiometric flow injection determination of cadmium in waste waters including in-line ion-exchange separation/concentration. *Analytica Chimica Acta*, 366, 155-161.
- Decnop-Weever, L.G. & Kraak, J.C. (1997). Determination of sulphite in wines by gas-diffusion flow injection analysis utilizing spectrophotometric pH-detection. *Analytica Chimica Acta*, 337, 125-137.
- Fang, Z. (1993). *Flow injection separation and preconcentration*. New York: VCH Publishers, Inc.
- Fredj, A., Okbi, H., Adhoum, N. & Monser, L. (2012). Gas diffusion flow injection determination of thiomersal in vaccines. *Talanta*, 91, 47-51.
- George, B.J., Pereira, N., Massum, M.A., Kolev, S.D. & Ashokkumar, M. (2008). Sensitivity enhancement in membrane separation flow injection analysis by ultrasound. *Ultrasound Sonochemistry*, 15, 151-156.
- Junsoomboon, J. & Jakmunee, J. (2008). Flow injection conductometric system with gas diffusion separation for the determination of Kjeldahl nitrogen in milk and chicken meat. *Analytica Chimica Acta*, 627, 232-238.
- Luque de Castro, M.D. & Papaefstathiou, I. (1998). Analytical pervaporation: a new separation technique. *Trends in Analytical Chemistry*, 17, 41-49.
- Mattos, I.L., Luque de Castro, M.D. & Valcárcel, M. (1995). Pervaporation: An integrated evaporation gas-diffusion approach to analytical continuous separation techniques. *Talanta*, 42, 755-763.
- Maya, F., Estela, J.M. & Cerdà, V. (2007). Improving the chemiluminescence-based determination of sulphide in complex environmental sample by using a new, automated multi-syringe flow injection analysis system coupled to a gas diffusion unit. *Analytica Chimica Acta*, 601, 87-94.
- Melo, D., Zagatto, E.A.G., Mattos, I.L. & Maniasso, N. (2003). Spectrophotometric flow-injection determination of sulphite in white wines involving gas diffusion through a concentric tubular membrane. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14, 375-379.
- Miró, M. & Frenzel, W. (2004). Automated membrane-based sampling and sample preparation exploiting flow-injection analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 23, 624-636.
- Miró, M. & Frenzel, W. (2004). A critical examination of sorbent extraction pre-concentration with spectrophotometric sensing in flowing systems. *Talanta*, 64, 290-301.
- Muncharoen, S. (2009). Development of 'laboratory flow-based method' and 'portable kit' for analysis of ethanol in gasohol fuel and development of a flow voltammetric stripping measurement of metals using bismuth film electrode. The degree of doctor of philosophy thesis, Department of Chemistry, Graduate School, Mahidol University.
- Muncharoen, S., Sitanurak, J., Tiyapongpattana, W., Choengchan, N., Ratanawimarn-wong, N., Motomizu, S., Wilairat, P. & Nacapricha, D. (2009). Quality control of gasohol using a micro unit for membraneless gas diffusion. *Microchimica Acta*, 164, 203-210.
- Nacapricha, D., Sangkarn, P., Karuwan, C., Mantim, T., Waiyawat, W., Wilairat, P., Cardwell, T., McKelvie, I.D., Ratanawimarnwong, N. (2007). Pervaporation-flow injection with chemiluminescence detection for determination of iodide in multivitamin tablets. *Talanta*, 72, 626-633.

- Papafstathiou, I., Tena, M.T. & Luque de Castro, M.D. (1995). On-line pervaporation separation process for the potentiometric determination of fluoride in "dirty" samples. *Analytica Chimica Acta*, *308*, 246-252.
- Pinyou, P., Youngvises, N., & Jakmunee, J. (2011). Flow injection colorimetric method using acidic ceric nitrate as reagent for determination of ethanol. *Talanta*, *84*, 745-751.
- Purohit, R. & Devi, S. (1997). Determination of nanogram levels of zirconium by chelating ion exchange and on-line preconcentration in flow injection UV-visible spectrophotometry. *Talanta*, *44*, 319-326.
- Ruiz-Jiménez, J. & Luque de Castro, M.D. (2006). On-line pervaporation-capillary electrophoresis for the determination of volatile analytes in food samples. *Journal of chromatography A*, *1128*, 251-258.
- Rupasinghe, T.W.T., Cardwell, T.J., Cattrall, R.W. & Kolev, S.D. (2009). Determination of arsenic in industrial samples by pervaporative flow injection with amperometric detection. *Analytica Chimica Acta*, *652*, 266-271.
- Satienperkul, S., Phongdong, P. & Liawruangrath, S. (2010). Pervaporation flow injection analysis for the determination of sulphite in food samples utilizing potassium permanganate-rhodamine B chemiluminescence detection. *Food Chemistry*, *121*, 893-898.
- Sánchez-Pedreno, C., Ortuno, J.A. & Hernández, J. (2001). Flow injection potentiometry of primary and interfering ion with a gold complex ion-exchange membrane. *Talanta*, *55*, 201-207.
- Sereenonchai, K., Saetear, P., Amornthammarong, N., Uraisin, K., Wilairat, P., Motomizu, S., & Nachapricha, D. (2007). Membraneless vaporization unit for direct analysis of solid sample. *Analytica Chimica Acta*, *597*, 157-162.
- Sereenonchai, K., Teerasong, S., Chan-Eam, S., Saetear, P., Choengchan, N., Uraisin, K., Amornthammarong, N., Motomizu, S. & Nacapricha, D. (2010). A low-cost method for determination of calcium carbonate in cement by membraneless vaporization with capacitively coupled contactless conductivity detection. *Talanta*, *81*, 1040-1044.
- Su, X-L., Yu, B-S., Tan, H-W., Yang, X-R., Nie, L-H. & Yao, S-Z. (1998). Flow-injection determination of total ammonium and total carbon dioxide in blood on gas-diffusion separation and with a bulk acoustic wave impedance sensor. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *16*, 759-769.
- Tao, G. & Fang, Z. (1995). On-line flow injection solvent extraction for electrothermal atomic absorption spectrometry: determination of nickel in biological samples. *Spectrochimica Acta part B*, *50*, 1747-1755.
- Teerasong, S., Chan-Eam, S., Sereenonchai, K., Amornthammarong, N., Ratanawimarn-wong, N. & Nacapricha, D. (2010). A reagent-free SIA module for monitoring of sugar, color and dissolved CO<sub>2</sub> content in soft drinks. *Analytica Chimica Acta*, *668*, 47-53.
- Zhou, Y-Y., Yan, X-P., Kim, K-N., Wang, S-W. & Liu, M-G. (2006). Exploration of coordination polymer as sorbent for flow injection solid-phase extraction on-line coupled with high-performance liquid chromatography for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental materials. *Journal of Chromatography A*, *1116*, 172-178.