บทที่ 4
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้เสนอผลการศึกษาการพัฒนาวิธีการแยกแบบออนไลน์ (on-line) ชนิดเพอวาพอเรชันโฟลอินเจคชัน (PFI) ที่มีระบบการตรวจวัดด้วยเคมิลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะสามารถพัฒนาเทคนิคโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ในระดับความเข้มข้นต่ำๆ ซึ่งการศึกษาทางโฟลอินเจคชันอะนาลิซิสจะต้องมีการควบคุมการแพร่ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยต้องการให้ได้การตรวจวัดเกิดขึ้นในสภาวะที่ควบคุมได้และในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นในระหว่างการผสมโดยการแพร่นั้นจะทำให้ความสูงของพีคสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อปฏิกิริยาได้ดำเนินจนถึงจุด ๆ หนึ่ง จะได้ค่าการตอบสนองที่สูงที่สุดของปฏิกิริยานั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการนำเอาระบบการแยกสารแบบออนไลน์มาใช้ร่วมกัน เนื่องจากมีผลของการถ่ายมวลมาเกี่ยวข้องอีกขั้นตอนหนึ่งของการตรวจวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ระบบโฟลอินเจคชันนั้นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการแพร่ของสารตัวอย่างทางกายภาพ เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ใช้ในการฉีด เป็นต้น ตัวอย่างเช่นปริมาตรของสารตัวอย่างที่ใช้ในการฉีด ถ้าเพิ่มปริมาตรของสารตัวอย่าง ในการวิเคราะห์โดยวิธีโฟลอินเจคชันอะนาลิซิส พบว่าไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งที่พบสัญญาณในการวิเคราะห์แต่เวลาที่ทำการวิเคราะห์ในแต่ละตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงไป หากปริมาตรสารตัวอย่างเพิ่มขึ้นก็จะพบว่าความกว้างของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าในการศึกษา นั้น ๆ มีการใช้ปริมาตรสารตัวอย่างในปริมาตรที่สูงมากจะพบว่าสัญญาณของโฟลอินเจคชันจะไม่มีลักษณะเป็นพื้นราบแทน ซึ่งผลจากการเพิ่มปริมาตรของสารตัวอย่างนี้ยังพบว่าค่าการกระจายตัวของสารละลายจะมีค่าลดลงแต่ความกว้างของสัญญาณจะเพิ่มขึ้น ซึ่งภายหลังจากการทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยระบบออนไลน์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปริมาณซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารประเภทหมักดอง เพื่อศึกษาศักยภาพของระบบออนไลน์ได้

ภายหลังการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบการแยกแบบออนไลน์ของระบบและภายใต้สภาวะดังกล่าว สามารถทำการศึกษาปริมาณซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารประเภทหมักดองชนิดต่างๆ เช่น หน่อไม้ดอง หัวผักกาดดอง และขิงหั่นฝอยได้

การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยระบบออนไลน์ พบว่าวิธี PFI-CL ซึ่งจะอาศัยการแยกก๊าซตัวอย่างให้แพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโดยไม่สัมผัสกับเยื่อโดยตรงทำให้ระยะเวลาอายุการใช้งานของเยื่อเลือกผ่านใช้ได้นานกว่า ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนเยื่อเลือกผ่านบ่อย และสามารถหาคุณลักษณะเฉพาะของวิธีการวิเคราะห์ได้ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 คุณลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน

คุณลักษณะเฉพาะ	**ผลที่ได้จากวิธี PFI-CL**
ช่วงความเป็นเส้นตรง ความ	0.5-6 มิลลิกรัมต่อลิตร
แม่นยำในการวิเคราะห์	%RSD เท่ากับ2.76
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์	0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเร็วในการวิเคราะห์	30 ตัวอย่างต่อชั่วโมง
ความคงทนของเยื่อเลือกผ่าน	ประมาณ 14 วัน
ร้อยละการกลับคืนของซัลไฟต์	ร้อยละ 91-104

ส่วนในการศึกษาผลจากไอออนรบกวนที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟต์ ได้แก่ Cl^-, glucose, sucrose, ethanol, ascorbic acid ไอออนเหล่านี้จะไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ ส่วนไอออน I^-, S^{2-}, Mn^{2+}, Fe^{3+} ในอัตราส่วน 1:1 จะมีผลต่อการวิเคราะห์แม้ว่ามีการเจือปนในระดับความเข้มข้นที่ต่ำ (Negative error) ซึ่งเกิดจากไอออนเหล่านี้เป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรีดิวซ์ที่แรง จึงมีสมบัติในการเข้าแย่งทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง และเปอร์แมงกาเนตได้ทำให้รบกวนผลการวิเคราะห์

จากการทดลองปริมาณซัลไฟต์โดยวิธีการเติมสารมาตรฐาน (standard addition) ได้ปริมาณของซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารหมักดอง เช่น หน่อไม้ดอง ผักกาดดอง และขิงหั่นฝอย เท่ากับ 1,300.0±0.1 406.0±0.4 และ 20.7±0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าวิธีเติมสารมาตรฐานและวิธีกราฟมาตรฐานให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันมาก แต่การวิจัยโดยการเติมสารมาตรฐานจะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า เพราะเป็นค่าที่ได้จากสารละลายที่มีเมทริกซ์คล้ายกัน ส่วนวิธีกราฟมาตรฐานอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยเนื่องจากได้จากการเปรียบเทียบ แต่มีผลดีสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณมาก ๆ

จากการทดลองหาปริมาณซัลไฟต์โดยวิธีกราฟมาตรฐานด้วยวิธีเพอร์วาพอเรชัน ได้ปริมาณของซัลไฟต์ในตัวอย่างน้ำหน่อไม้ดอง เท่ากับ 1,317.6±5.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้

ปริมาณของซัลไฟต์ในตัวอย่างน้ำผักกาดดอง เท่ากับ 466.5±1.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และขิงหั่นฝอย เท่ากับ22.7±0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการหาปริมาณซัลไฟต์ด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียล พัลส์โพลาโรกราฟี จากการศึกษาหาความแตกต่างของข้อมูลที่ศึกษาได้ทั้ง 2 วิธี ด้วยค่าที (t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่ระดับความเสรีเท่ากับ 4 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า t ในตารางแจกแจงแบบที โดยค่า t จากตารางแจกแจงแบบทีเท่ากับ 2.776 จากการคำนวณค่า t ของทั้งสามตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างน้ำหน่อไม้ดอง น้ำผักกาดดอง และขิงหั่นฝอย มีค่า t เท่ากับ 0.5726, 0.3640 และ 1.9216 ตามลำดับ ซึ่งค่า t ที่คำนวณได้มีค่าไม่มากกว่าค่า t จากตาราง ดังนั้นค่าความเข้มข้นของซัลไฟต์ที่ตรวจพบไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเทคนิค PFI-CL ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ปริมาณที่อนุญาตใช้ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 84 อนุญาตให้ใช้สารซัลไฟต์ โดยใช้ได้สูงสุดไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และอาหารที่ไม่ให้ใช้สารซัลไฟต์ คือ หน่อไม้ดอง และขิงหั่นฝอย จากการวิเคราะห์ตัวอย่างอาหารทั้งสาม พบว่าค่าที่ได้มีปริมาณสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ อันเป็นผลเนื่องมาจากทางผู้ผลิต ได้มีการใช้สารซัลไฟต์ในปริมาณที่มากในการผลิต เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะดีเชิญชวนให้น่าบริโภคและเก็บรักษาไว้ได้นาน อย่างไรก็ตามหากใช้สารกลุ่มนี้ในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้บริโภคได้ ดังนั้นในฐานะผู้บริโภค ควรพิจารณาเลือกซื้ออาหารจากแหล่งที่ปลอดภัยและมีสภาพภายนอกที่ไม่มีสีสันจัดจ้านหรือขาวมากเกินไป หรือเมื่อซื้อมาบริโภคควรทำการล้างและแช่อาหารไว้เป็นเวลานาน ๆ เพื่อลดปริมาณซัลไฟต์ลง

จากการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟต์ด้วยวิธีการแยกแบบออนไลน์ ชนิดเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน ร่วมกับการตรวจวัดด้วยเคมิลูมิเนสเซนซ์ พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้มีความไว ความถูกต้องและแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก และที่สำคัญคือ สามารถวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟต์ได้ตามที่ตั้งจุดมุ่งหมายไว้ก่อนทำการทดลอง นอกจากนี้ระบบแยกแบบออนไลน์ ยังสามารถประหยัดการใช้รีเอเจนต์ที่มีราคาแพงได้อีกด้วย โดยระบบการแยกแบบออนไลน์ที่พัฒนาขึ้นยังสามารถดัดแปลงใหม่เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สารที่สนใจตัวอื่น ๆ ได้ตามความเหมาะสมของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

ในระบบการแยกแบบออนไลน์ชนิดเพอร์วาพอเรชันโฟลอินเจคชัน (PFI) ร่วมด้วยการตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์ สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟต์นั้นเป็นระบบที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว มีสภาพไวสูง และมีคุณลักษณะในการวิเคราะห์พื้นฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ในการวิเคราะห์ยังมีของเสียจากการทดลองมากอยู่ ซึ่งนอกจากระบบตรวจวัดแบบเคมิลูมิเนสเซนต์แล้วอาจเลือกใช้เครื่องมือครวจวัดทางไฟฟ้าเช่นเทคนิคแอมแปร์โรเมตรี มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อให้ลดความซับซ้อนในระบบการตรวจวัดลง หรืออาจใช้ระบบไมโครโฟลอะนาลิซีส (μTAS) หรือ แล็ปออนชิพ (lab-on-chip) เพื่อลดการใช้งานสารเคมีให้น้อยลง ซึ่งย่อมจะช่วยทำให้มีของเสียจากการทดลอบน้อยลง และขนาดของเครื่องมือหรือชิ้นส่วนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมียังสามารถลดขนาดลงเหลือเพียงไม่กี่ตารางเซนติเมตร

จึงไม่แปลกที่พบว่าบทความวิจัยและความสนใจในการวิเคราะห์แบบโฟลอินเจคชันอะนาลิซีสในปัจจุบัน จึงมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเป็นที่แพร่หลายในวงการวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ดังนั้นจึงอาจคาดหมายได้ว่าการวิเคราะห์แบบโฟลอินเจคชันอะนาลิซีสจะมีบทบาทสำคัญต่อการวิเคราะห์สารตัวอย่างประเภทต่าง ๆ ต่อไป ในสภาพปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้