

การวิเคราะห์โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในอาหารโดยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี

ไสว ศิลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

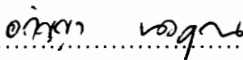
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มกราคม 2561

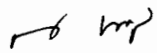
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

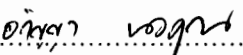
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ไสว ศิลา ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

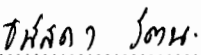
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร. อภิญา นวคุณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกฎ นวคุณ)

..... กรรมการ
(ดร. อภิญา นวคุณ)

..... กรรมการ
(ดร. ศิริรัตน์ ชาญไววิทย์)

..... กรรมการ
(ดร. ชนัสตา รัตนะ)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษาของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 16 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

การวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษา
โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์
จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. อภิญา นวคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ช่วยเหลือในทุกปัญหาการวิจัยพร้อมทั้งให้กำลังใจตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และทุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่าน ที่ช่วยสอนวิชาเคมีในส่วนของเนื้อหา และปฏิบัติการเคมีอย่างเข้มข้น เพื่อปลูกฝังให้ข้าพเจ้าเป็นนักวิทยาศาสตร์ และเป็นครูวิทยาศาสตร์ที่มีความรู้ในภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติวิชาเคมีเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมทุกท่าน ที่ช่วยปลูกฝังในเรื่องของความรู้วิชาเคมี และคุณลักษณะของการเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณอนุรักษ จันท์แก้ว ที่ช่วยให้ความรู้ แนะนำและอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการวิจัยทดลองจนแล้วเสร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่เจลา บุญธรรม ผู้อำนวยการทินพันธ์ บุญธรรม ซึ่งเป็นสมาชิกในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพภริ บพพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบนานเท่านานนี้

ไสว สีลา

57920073:สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

ไสว สีลา: การวิเคราะห์โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในอาหารโดยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (DETERMINATION OF SODIUM HYDROSULFITE IN FOOD BY SPECTROPHOTOMETRIC TECHNIQUE) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อภิญญา นวคุณ, Ph.D. 67 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของคอปเปอร์ซัลเฟตหลังทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ สภาวะที่เหมาะสมคือโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ซัลเฟต เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที โดยใช้อุลตราโซนิกช่วย ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 815 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้กราฟมาตรฐานในช่วง 0.2-1.0 กรัม/ลิตร (R^2 0.9949) ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและขีดจำกัดการหาปริมาณเท่ากับ 0.05 และ 0.16 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ อยู่ในช่วง 6.18- 9.01 % มีค่าเฉลี่ยร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 97.53 ± 5.10 และสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์นี้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารได้จริง

57920073: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORDS: SODIUM HYDROSULFITE

SAWAI SILA: DETERMINATION OF SODIUM HYDROSULFITE IN FOOD BY SPECTROPHOTOMETRIC TECHNIQUE. ADVISORY COMMITTEE: APINYA NAVAKHUN, Ph.D. 67 P. 2018.

In this research, the samples preparation method for sodium hydrosulfite analysis by spectrophotometric technique based on the decreasing of absorbance signal of copper sulfate was studied. The optimum conditions were 1.0 M of copper sulfate, 0.15 M Sulfuric acid as catalyst, temperature of 70°C, reaction time of 45 minute and utilized with ultrasonic. The absorbance was observed at 815 nm. Under optimum conditions, calibration graph was in range of 0.2-1.0 g/L (R^2 0.9949). The limit of detection and limit of quantification were 0.05 and 0.16 g/L, respectively. The relative standard deviations were 6.18 - 9.01%. The mean of percent recoveries were 97.53±5.10. This samples preparation method can be applied to use for the determination of sodium hydrosulfite in food samples.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารฟอกขาว	4
2.2 โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์	6
2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี	8
2.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	21
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	22
3.3 การเตรียมสารเคมี	24
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย	26
4 ผลการทดลอง และอภิปราย	32
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์	32
4.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์	37
4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในตัวอย่างอาหาร	41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
บรรณานุกรม	44
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	62
ประวัติย่อของผู้วิจัย	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นระหว่างแสงสีที่มองเห็นกับแสงสีที่ถูกดูดกลืน	9
4-1 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Repeatability	39
4-2 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Reproducibility	40
4-3 ค่าร้อยละการได้กลับคืนการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ในอาหาร	41
4-4 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ในตัวอย่างอาหาร	41
ก-1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่าง อุตุรน้ำโซนิคที่มีผลต่อค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง	49
ก-2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่า ผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง	50
ก-3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี กับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง	50
ก-4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่าง ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง	51
ก-5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่า การดูดกลืนแสงที่ลดลง	51
ก-6 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์(II) ซัลเฟตที่ความ เข้มข้นต่างๆหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง	52
ก-7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ไฟต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	52
ก-8 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ใน ตัวอย่างอาหาร	53
ก-9 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Repeatability	54
ก-10 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Reproducibility	55
ก-11 สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ และผลการ ทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-12 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ใช้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ใน ตัวอย่างอาหาร	57
ก-13 ผลการวิเคราะห์ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ใช้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่างอาหาร	57
ก-14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่างอาหาร	57
ก-15 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่างอาหาร	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 6
2-2	กราฟมาตรฐานสารละลาย A..... 11
2-3	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยว 12
2-4	เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงคู่..... 13
2-5	ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์..... 13
2-6	แสดงเซลล์ในสารตัวอย่างของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ 16
3-1	แผนการดำเนินการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์.. 22
3-2	การศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Method Validation) 23
3-3	การวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่เจือปนเจือปนในอาหาร 24
3-4	สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเคลือบบนกระดาษกรอง..... 26
3-5	กระดาษกรองที่เคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ใส่ลงในฝาจของขวดแก้วขนาด 30 มิลลิลิตร . 27
3-6	การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในขวดโดยปิดฝามีกระดาษกรองเคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต 27
4-1	กราฟการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยอ่างดูดรีฟราซินิกและอ่างน้ำร้อน..... 33
4-2	กราฟการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่มีกรดชนิดต่างๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 34
4-3	กราฟการศึกษาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 35
4-4	กราฟการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ 35
4-5	กราฟการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ 36
4-6	กราฟการหาเข้มข้นของคอปเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 37
4-7	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 38
ก-1	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 49
ข-1	ขั้นตอนการเตรียมกระดาษทดสอบโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 60
ข-2	ขั้นตอนการดำเนินการทดลองสร้างกราฟมาตรฐานหาโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์..... 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ค-1 สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร	63
ค-2 กระดาษทดสอบหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร	63
ค-3 สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์....	64
ค-4 ตัวอย่างอาหารบดละเอียดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์.....	64
ค-5 ตัวอย่างอาหารบดละเอียดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์หลังเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	65
ค-6 ลักษณะของกระดาษทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์หลังเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	65
ค-7 สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (Sodium hydrosulfite : $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) หรือ โซเดียมไดไทโอไนต์ หรือสารซักล้าง มีสมบัติเป็นสารฟอกสีที่มีฤทธิ์ฟอกขาว นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการฟอกสี เช่น กระดาษ เส้นใยไหม แห อวน และเครื่องหนัง (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2555) โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เป็นสารเคมีที่เป็นพิษ แต่มีผู้ผลิตและผู้จำหน่ายสินค้าบางรายนำมาผสมในผลิตภัณฑ์ประเภทถั่วงอก น้ำตาลปึก จิงหั่นฝอย หน่อไม้ดอง เพื่อหวังผลในการจูงใจลูกค้าซึ่งทำให้ผู้บริโภคได้รับอันตรายจากการบริโภคได้โดยผู้ประกอบการบางรายมักนำสารฟอกขาวมาผสมน้ำแช่ถั่วงอกเพื่อให้ถั่วงอกมีสีขาว น่ารัก ประทานและเก็บไว้จำหน่ายได้นาน สารฟอกขาวดังกล่าวมีทั้งประเภทที่อนุญาตให้นำมาใช้ในอาหารได้ เช่น แคลเซียมซัลไฟต์ โซเดียมซัลไฟต์ โพแทสเซียมซัลไฟต์ สารประกอบ ไบซัลไฟต์ โพแทสเซียมไบซัลไฟต์ เป็นต้น ซึ่งมีฤทธิ์ในการฟอกดำ ผู้จำหน่ายจึงนิยมใช้สารฟอกขาวประเภทที่กระทรวงสาธารณสุขไม่อนุญาตให้ใช้ในอาหาร คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มาผสม (กองอาหาร, มปป.) ซึ่งสารนี้มีฤทธิ์ฟอกขาวได้สูงกว่าประเภทแรก 2-3 เท่า สามารถฆ่าเชื้อ จุลินทรีย์ได้ แต่เป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย

การบริโภคอาหารปนเปื้อนโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ทำให้เกิดการอักเสบในอวัยวะที่สัมผัสอาหาร เช่น ปาก ลำคอและกระเพาะอาหาร หากกินเข้าไปมากเกินไป 30 กรัม จะทำให้เกิดอาการปวดท้อง เวียนศีรษะ อาเจียน อุจจาระร่วง ความดันโลหิตลดต่ำลง แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก หลอดลมหดตัว ทำให้หอบหืด ในผู้ที่เป็็นโรคนี้อยู่แล้วอาจช็อก หหมดสติและเสียชีวิตได้ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555) ซึ่งตามกำหนดเกณฑ์มาตรฐานกระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดให้มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ปนเปื้อนอาหาร ได้ไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2549) และองค์การมาตรฐานด้านอาหารของออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ (Food Standards Australia New Zealand, 2014) หรือ FSANZ ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในอาหาร (Maximum Permitted Level : MPL) ไว้ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยจากรายงานของกรมวิทยาศาสตร์ การแพทย์ ที่ได้ทำการสุ่มตรวจสารฟอกขาว กับอาหารจำพวก ถั่วงอก หน่อไม้ดอง จิงหั่นฝอย ผลไม้สด น้ำตาลปึก และทุเรียนกวน จำนวน 2,438 ตัวอย่าง พบสารปนเปื้อนโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 392 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 16 ซึ่ง

ถือเป็นสถานการณ์การเจ็บของสารเคมีในอาหารที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคอย่างมาก (จินตนา กิจเจริญวงศ์ และยุพรศ เอื้อตรงจิตต์, 2558)

ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคในการทดสอบโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ในอาหาร โดยการนำมาทดสอบกับสารคอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เป็นการทดสอบในเชิงคุณภาพ ไม่สามารถวัดเชิงปริมาณได้ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555) การวิเคราะห์เชิงปริมาณ เช่น เทคนิคการไทเทรตด้วยโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(III) โดยมีเมทิลีนบลู เป็นอินดิเคเตอร์ (De Groot, 1997) วิธีการไทเทรตแบบไอโอโดเมตริก (Danehy & Zubritsky, 1974) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้จำกัดการตรวจวัดในระดับเปอร์เซ็นต์จึงไม่เหมาะสำหรับนำมาวิเคราะห์การปนเปื้อนในตัวอย่างอาหาร เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (James, Apblett, & Materer, 2012) เป็นเทคนิคต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและผู้ทำการวิเคราะห์ต้องมีความชำนาญ เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (Carvalho & Schwedt, 2002) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายแต่ไม่เหมาะสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างอาหารเนื่องจากต้องเพิ่มขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและกำจัดสิ่งรบกวนการวิเคราะห์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิควิธีใหม่ในการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหารโดยใช้เทคนิคการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์กับคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่บนกระดาษทดสอบ และใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี ในการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งรบกวนการวิเคราะห์ ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยและมีราคาถูก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีใหม่สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร
2. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี
3. นำวิธีการวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ในตัวอย่างอาหาร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยการระเหยร่วมกับเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ การให้ความร้อน

ตัวอย่างนำร้อนกับการให้ความร้อนด้วยอ่างอุลตราโซนิก ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของคอปเปอร์ซัลเฟต

2. ศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Method Validation) ได้แก่ ความเป็นเส้นตรง (Linearity) ขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection: LOD) ขีดจำกัดในการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit of quantification: LOQ) การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) การศึกษาความเที่ยงในการวิเคราะห์ (Precision) และการศึกษาความแม่นยำในการวิเคราะห์ (Accuracy)

3. หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ในตัวอย่างอาหาร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้วิธีใหม่สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร
2. นำวิธีการวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในการทดสอบตัวอย่างอาหารที่มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ปนเปื้อนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารฟอกขาว

สารฟอกขาวเป็นสารเคมีประเภทหนึ่งที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตอาหารหลายประเภท ทั้งในอาหารที่อนุญาตและไม่อนุญาตให้ใส่สารฟอกขาว ได้แก่ สารประกอบซัลไฟด์ เช่น แคลเซียมซัลไฟด์ โซเดียมซัลไฟด์ โพแทสเซียมซัลไฟด์ สารประกอบไบซัลไฟด์ เช่น โพแทสเซียมไบซัลไฟด์ และสารประกอบเมตาไบซัลไฟด์ เช่น โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ สารฟอกขาวเหล่านี้ เป็นสารเคมีที่อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหารได้ แต่ต้องใช้ในปริมาณที่กำหนดตามชนิดของอาหาร (พระราชบัญญัติอาหาร, 2522) โดยพบการตกค้างปริมาณสูงในอาหารหลายชนิดทั้งที่จำหน่ายในประเทศและอาหารส่งออก จึงถูกจัดเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ต้องมีการเฝ้าระวังในการใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างใกล้ชิด สารฟอกขาวที่นิยมใช้ในอาหาร ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มของสารประกอบซัลไฟด์ ซึ่งเป็นชื่อรวมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเกลืออนินทรีย์ของกรดซัลฟูรัส ซึ่งแตกตัวให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารฟอกขาวบางตัวไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้ในอาหาร เนื่องจากเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายอย่างมากต่อสุขภาพ ได้แก่ สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ หรือที่ชาวบ้านเรียกว่า สารซักมุ้ง ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้ในการฟอกข้อมผ้า มุ้ง แห อวน แต่พบว่าผู้ผลิตหลายรายนำมาใช้ในการผลิตอาหารเพื่อฟอกสีอาหารให้ดูน่ากิน (จินตนา กิจเจริญวงศ์ และยุทธพร เอื้อธรรมจักร, 2558)

สารซัลไฟด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารหลายประเภท โดยใช้เป็นสารกันเสียเพื่อป้องกันและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ใช้เป็นสารกันหืนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในอาหารที่จะทำให้เกิดการเหม็นหืนในผลิตภัณฑ์นั้น และที่สำคัญยังสามารถใช้เป็นสารฟอกขาวอีกด้วย เนื่องจากมีคุณสมบัติยับยั้งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลซึ่งเกิดขึ้นในอาหารหลายประเภท เช่น ผัก ผลไม้ น้ำผลไม้ น้ำหวานจากพืช และอาหารทะเล พวกกุ้ง ปู ปลา ปลาหมึก เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้เองทำให้มีการนำสารนี้มาใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตอาหารต่าง ๆ เช่น การผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง การผลิตน้ำตาล ทั้งน้ำตาลทราย น้ำตาลปี๊บและน้ำตาลปึก การฟอกสีผลิตภัณฑ์จากแป้ง เช่น แป้งสาลี วัณเส้น เส้นก๋วยเตี๋ยว ขนมัน เป็นต้น พืชผักผลไม้ที่ปอกเปลือกและต้องการเก็บไว้นานๆ โดยไม่เกิดสีน้ำตาลเข้มขึ้น เช่น การผลิตมันฝรั่งอบแห้ง กล้วยอบแห้ง บางครั้งมีการนำไปแช่ถ่วงอก หน่อไม้ หรือใส่ในการผลิต

ผลไม้แห้ง ผลไม้ดองและแช่อิ่ม การผลิตน้ำผลไม้ และใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในการผลิตไวน์ (ประกาศ
กองบัญชา, 2546)

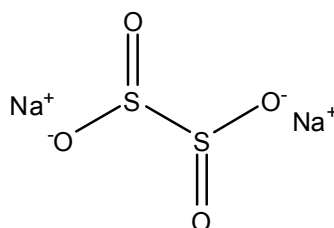
2.1.1 อันตรายจากการรับสารฟอกขาว

โดยปกติถ้าได้รับในปริมาณไม่มากร่างกายคนจะมีเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนสาร
ซัลไฟด์เป็นสารซัลเฟตซึ่งไม่มีพิษต่อร่างกายและถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ อย่างไรก็ตาม
การได้รับสารกลุ่มนี้ในปริมาณมากก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคได้ อาการความเป็นพิษที่เกิดขึ้น
จะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล กลุ่มคนที่มีความเสี่ยงสูงต่อการได้รับสารกลุ่มนี้ คือ กลุ่ม
ผู้ที่เป็โรคหอบหืด อาการที่พบ คือ หายใจขัด เจ็บหน้าอก ปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน อุจจาระร่วง
เวียนศีรษะ ปวดศีรษะ ความดันเลือดต่ำ เป็นลมพิษ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ที่เป็โรคหอบหืด อาจเกิด
อาการช็อก หมดสติและเสียชีวิตได้ ระดับความรุนแรงของอาการขึ้นกับปริมาณการได้รับว่ามาก
น้อยแค่ไหน นอกจากนี้ สารนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับวิตามินบางชนิด เช่น ไทอามีน ทำให้เสี่ยง
ต่อ การเกิดโรควิตามินตัวนี้ ถ้าได้รับต่อเนื่องเป็นเวลานานจะเกิดพิษสะสมขึ้นโดยไปรบกวน
การทำงานของเอนไซม์ก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบเมตาบอลิซึมในร่างกายได้ (ประกาศ กองบัญชา,
2546) องค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่าความปลอดภัยต่อการบริโภคในชีวิตประจำวันของสาร
กลุ่มนี้ไว้ว่าไม่ควรบริโภคเกิน 0.7 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ต่อ 1 วัน (JECFA, 1999)
และหากมีการใช้ต้องระบุในฉลาก สารซัลไฟด์จัดเป็นสารฟอกขาวที่ประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ใน
อุตสาหกรรมอาหารหลายประเภท ได้แก่ การผลิตน้ำตาล วนเส้น เส้นหมี่ กว๊วยเตี๋ย ลูกกาด และ
อาหารทะเลเยือกแข็ง เป็นต้น โดยมีการกำหนดกลุ่มที่อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารตาม
ประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมโพแทสเซียมซัลไฟด์
โซเดียมโพแทสเซียมไบซัลไฟด์ และ โซเดียมโพแทสเซียมเมทาไบซัลไฟด์ เท่านั้น และมีการระบุ
ชนิดของอาหารที่อนุญาตให้ใช้โดยมีการกำหนดปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีการตกค้างในอาหารแต่
ละประเภทแตกต่างกันไปขึ้นกับปริมาณและลักษณะการบริโภคอาหารนั้น ๆ แต่ก็เป็นกำหน
ตามมาตรฐานสากลซึ่งเป็นการศึกษาข้อมูลตามลักษณะการบริโภคอาหารของชาวตะวันตก มีการ
สำรวจพบการตกค้างของสารฟอกขาวในกลุ่มของสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ซึ่งไม่อนุญาตให้ใช้ใน
อาหาร สารกลุ่มนี้เป็นสารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารฟอกขาวในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ฟอกย้อม
สิ่งทอ และกระดาษ เป็นต้น สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษรุนแรงกว่าสารซัลไฟด์ตัวอื่นมาก ถ้ากินเข้า
ไปจะทำให้เกิดการอักเสบที่ลำคอและระบบทางเดินอาหาร มีอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน
การไหล เวียนเลือดลมเหลว ระบบหายใจล้มเหลว หมดสติ และอาจเสียชีวิตได้ เนื่องจากสาร

ซัลไฟต์มีคุณสมบัติในการฟอกขาวที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกจึงมีผู้ผลิตหลายรายนิยมนำไปใช้ในการฟอกขาวอาหารหลายประเภท ทั้งในชนิดที่อนุญาตและไม่อนุญาตให้ใส่สารฟอกขาว ดังมีการสำรวจพบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณสูงในอาหารที่จำหน่ายตามท้องตลาด (จินตนา กิจเจริญวงศ์ และยุพเรศ เอื้อตรงจิตต์, 2558)

2.2 โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

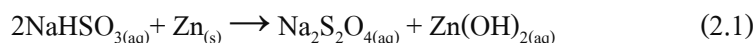
โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (Sodium hydrosulfite) มีชื่อตาม IUPAC คือ โซเดียม ไดไธโอไนต์ (Sodium dithionite) หรือ ที่ชาวบ้านเรียกว่า สารซักมุ้ง (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2555) ชื่ออื่นๆ ได้แก่ Dithionous acid Disodium salt Sodium dithionite hydrate Sodium sulfoxylate Reductone Sulfoxylate เป็นต้น มีสูตรโมเลกุล คือ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังภาพที่ 2-1 มีมวลโมเลกุล เท่ากับ 174.107 กรัม/โมล มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 52 องศาเซลเซียส (Science Lab, 2559) สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เป็นสารฟอกขาวชนิดหนึ่งซึ่งเป็นสารเคมีที่เป็นพิษ ลักษณะเป็นผงผลึก สีขาว มีกลิ่นฉุนกำมะถันอ่อน ๆ ละลายได้ในน้ำ ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ เสถียรเมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะถูกออกซิไดซ์สลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสความชื้นและไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เมื่ออยู่ในสถานะสารละลาย สลายตัวให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟต์ ไฮโดรเจนซัลเฟต ไฮโดรเจนซัลไฟต์ ในสภาวะที่เป็นกรดและอุณหภูมิสูง (Pratt, 1924)



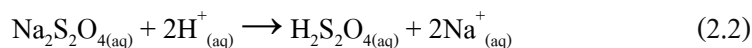
ภาพที่ 2-1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

2.2.1 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (IPCS inchem, 2006)

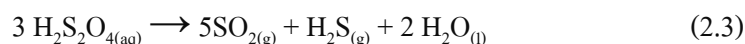
2.2.1.1 ปฏิกิริยาการเตรียมโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เตรียมได้จากปฏิกิริยาของโซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) และโลหะสังกะสี (Zn) ดังสมการ



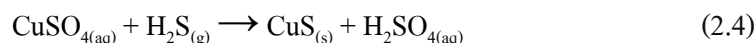
2.2.1.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะกรดเป็นกรดไดโทไอออนส์ (Hofmann & Rudorff, 1969)



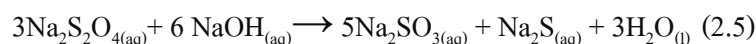
จากนั้น กรดไดโทไอออนส์จะทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งช่วยเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในสภาวะกรด



ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อเกิดปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตจะเกิดตะกอนของคอปเปอร์(II)ซัลไฟด์ (Ter Maat, Hogendoorn, & Versteeg, 2005)



ในสภาวะที่เป็นเบส (pH 9 -11) จะมีความเสถียรค่อนข้างมาก โดยจะเกิดการสลายตัวเพียง 1% ต่อชั่วโมง



ในการวิจัยนี้อาศัยหลักการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในสภาวะที่เป็นกรดได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเกิดตะกอนของคอปเปอร์(II)ซัลไฟด์แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี

2.2.2 ประโยชน์ของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการฟอกสี โดยเปลี่ยนสีที่ไม่ละลายน้ำให้ เป็นรูปของเกลือโลหะอัลคาไลที่ละลายน้ำได้ จึงสามารถกำจัดสีที่ไม่ต้องการได้ ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการฟอกสี เช่น กระดาษ เส้นใยไหม ฟอกสีผ้า แห อวน เครื่องหนัง สบู่ และอุตสาหกรรมซักรีดต่าง ๆ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยยับยั้งการเปลี่ยนสีของอาหารไม่ให้เป็นสีน้ำตาลเมื่ออาหารถูกความร้อนจากกระบวนการผลิตได้ (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2555)

2.2.3 ความเป็นพิษของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์มีฤทธิ์ลดประสิทธิภาพการใช้โปรตีนและไขมันในร่างกาย และมีฤทธิ์ทำลายวิตามินบี 1 หากสัมผัสผิวหนังจะทำให้ ผิวหนังอักเสบ เป็นผื่นแดงสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง ถ้าหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ

ส่วนบน ก่อให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ ความดันโลหิตจะลดลงอย่างรวดเร็ว (IPCS inchem, 2006) ถ้าบริโภคเข้าไปจะทำให้เกิดการอักเสบในอวัยวะที่สัมผัสอาหาร เช่น ปาก ลำคอ และกระเพาะอาหาร เกิดอาการปวดหลัง ปวดศีรษะ อาเจียน แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก หลอดลมหดตัว ทำให้ หอบหืด ในส่วนของผู้ที่เป็นโรคนี้อยู่แล้วอาจช็อก หมดสติ และเสียชีวิตได้ หากบริโภคเกิน 30 กรัม อาจทำให้เสียชีวิตได้ การได้รับสารติดต่อกันเป็นเวลานาน ทำให้ เป็นโรคภูมิแพ้ สารนี้ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2555)

2.2.4 เกณฑ์มาตรฐานความเป็นพิษของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ มีค่าความเป็นพิษ ที่ทำให้สัตว์ทดลองตายเป็นจำนวน 50% (Lethal dose : LD 50) ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีค่าปริมาณ ของสารเคมีมากที่สุด ซึ่งได้รับทุกวันแล้วไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษหรือผลเสีย ใดๆ ต่อร่างกาย (No observed adverse effect level : NOAEL) ไม่เกิน 850 มิลลิกรัม/กิโลกรัม/วัน (IPCS inchem, 2006)

องค์กกรมมาตรฐานด้านอาหารของออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ Food Standards Australia New Zealand (2014) หรือ FSANZ ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ในอาหาร (Maximum Permitted Level : MPL) ไว้ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

กระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร ไว้ไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (พระราชบัญญัติอาหาร, 2549)

2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี

สเปกโทรโฟโตเมทรีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิง ปริมาณ โดยอาศัยสมบัติการดูดกลืนแสงของสาร เทคนิคนี้จัดเป็นเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญที่มีการใช้อย่างมากใน งานทางเคมี เนื่องจากให้ความรวดเร็วในการวิเคราะห์ มีความแม่นยำสูง วิเคราะห์ปริมาณสารได้น้อยถึงในระดับไมโครกรัม โดยสารที่ต้องการวิเคราะห์นั้นจะต้องอยู่ในสถานะสารละลาย (รัชนี ตันตะพานิชกุล, 2548)

แสง สีและการดูดกลืนแสงของสารใน ช่วงคลื่นแสงที่มีประโยชน์สำหรับงานทางเคมี ได้แก่ช่วงคลื่นอุลตราไวโอเล็ต (180 - 350 นาโนเมตร) และช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (350 -780 นาโนเมตร) แสงในช่วงคลื่นทั้งสองนี้ มีระดับพลังงานที่เพียงพอต่อการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดของโมเลกุลสารในสภาวะพื้น (ground state) เปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะเร้า (excited state) ซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมักเป็นอิเล็กตรอนของพันธะคู่ (double bond) และพันธะสาม (triple

bond) หรือโมเลกุลที่มีไอออนของธาตุแทรนซิชันรวมอยู่ด้วย โดยสมบัติการดูดกลืนแสงของสาร ถูกกำหนดจากลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลหรือไอออนของสารนั้น ๆ ซึ่งกลไกการมองเห็นของตาเรามองจะเห็นแสงสีที่ไม่ถูกดูดกลืนและจะมองไม่เห็นแถบแสงสีที่สารดูดกลืนไว้ (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2549) โดยแสดงสีและสีตรงกันข้ามของสเปกตรัมช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นระหว่างแสงสีที่มองเห็นกับแสงสีที่ถูกดูดกลืน (ชัยวัฒน์ วามวรรธน์, 2556)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	สีที่ถูกดูดกลืน	สีตรงกันข้าม(complementary color) หรือสีของสารที่ตาเรามองเห็น
350-430	ม่วง	เหลือง
430-475	น้ำเงิน	ส้ม
475-495	เขียวแกมน้ำเงิน	ส้มแกมแดง
495-505	เขียวแกมน้ำเงิน	แดงแกมส้ม
505-555	เขียว	แดง
555-575	เขียวแกมเหลือง	ม่วงแดง
575-600	เหลือง	ม่วง
600-650	ส้ม	น้ำเงิน
670-700	แดง	เขียว

สารแต่ละชนิดดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น จะได้เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่เรียกว่า สเปกตรัม ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่สารดูดแสงสูงสุดเรียกว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) โดยสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเฉพาะตัว ดังนั้นการทราบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารจะมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารนั้นได้ โดยทั่วไปมักวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สารนั้นดูดกลืนแสงสูงสุดซึ่งทำให้วิธีวิเคราะห์มีความไวสูงสุด

2.3.1 กฎการดูดกลืนแสง

กฎการดูดกลืนแสงที่สำคัญคือ กฎของเบียร์ (Beer's law) และกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)

กฎของเบียร์มีใจความว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารละลายเนื้อเดียว ที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (pathlength) เท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย”

กฎของแลมเบิร์ตมีใจความว่า “เมื่อมีลำแสงเดียวซึ่งเป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง

เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน เรียกเป็นกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต และเขียนเป็นรูปสมการได้ ดังนี้ (นงนิตย์ มรรครต, 2551)

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad (2.7)$$

เมื่อ	I_0	คือ ความเข้มของแสงที่กระทบสารละลาย
	I	คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลายออกมา
	ϵ	คือ ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (molar absorptivity)
	b	คือ ความหนาของสารละลาย มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
	c	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร
	A	คือ การดูดกลืนแสง (Absorbance)

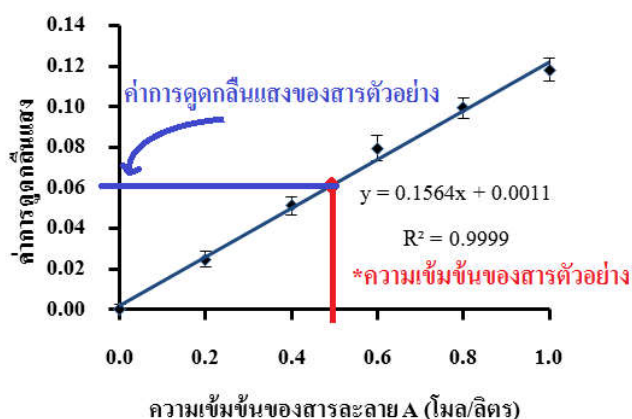
2.3.2 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไร้สารตัวอย่าง (Blank solution)

การดูดกลืนแสงของสารละลายจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่มีสีในสารละลาย ถ้าใช้ความหนาของเซลล์ (b) คงที่ ในทางปฏิบัติค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่วัดได้จะรวมถึงปริมาณของแสงที่ดูดกลืนโดยสารรีเอเจนต์ที่เหลือหลังจากปฏิกิริยา (ซึ่งต้องใส่ลงไปมากเกินพอเพื่อให้แน่ใจว่าสารที่ต้องการวิเคราะห์ทำปฏิกิริยาหายไปเป็นสารที่มีสีทั้งหมด) รวมถึงปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารที่เป็นตัวทำละลาย และปริมาณของแสงที่หักเหหายไป อัน

เนื่องจากการกระทบกับผนังเซลล์ เพื่อป้องกันผลดังกล่าวจึงต้องทำการวัดสารละลายไว้ตัวอย่าง ถ้ำเซลล์ที่ใส่สารไว้สารตัวอย่างและเซลล์ที่ใส่สารละลายเหมือนกัน สารละลายไว้ตัวอย่างเป็น สารละลายซึ่งประกอบด้วยตัวทำละลายและสารละลายรีเอเจนต์ต่าง ๆ ที่ไม่มีสารที่ต้องการ วิเคราะห์ เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากสารละลายไว้ตัวอย่างนำไปลบออกจากค่าการดูดกลืน แสงของสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ผลที่ได้จะเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการ วิเคราะห์ (ชัยวัฒน์ วามวรรธน์, 2556)

2.3.3 การเขียนกราฟมาตรฐาน

เมื่อไม่ทราบค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการวิเคราะห์ หรือไม่ สามารถวัดค่าการดูดแสงที่ความยาวคลื่นและสภาวะ เดียวกับที่ใช้คำนวณหาค่า ϵ ได้ สามารถใช้ วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานแทน โดยกรณีนี้จะต้องมีสารมาตรฐานที่ต้องการวิเคราะห์ที่มีความ บริสุทธิ์ มาเตรียมสารละลายความเข้มข้นต่างกัน โดยทั่วไปอย่างน้อย 4-5 ค่า และนำไปวัดค่าการ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สารนั้นดูดกลืนแสงได้สูงสุด แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น จะได้กราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดเริ่มต้น เรียกว่า เส้นกราฟมาตรฐาน เมื่อทราบค่าการดูดแสงของสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่นเดียวกับ สารละลายมาตรฐาน ก็สามารถหาความเข้มข้นได้ โดยแทนค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ตัวอย่างในสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น โดยแสดงดังภาพที่ 2-2 (ปิยะเนตร จันท์ศิริดิกุล, 2553)



ภาพที่ 2-2 กราฟมาตรฐานของสารละลาย A

2.3.4 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

การวัดการดูดกลืนแสงกระทำโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) ซึ่งแบ่งออกตามความยาวคลื่นของแสงที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

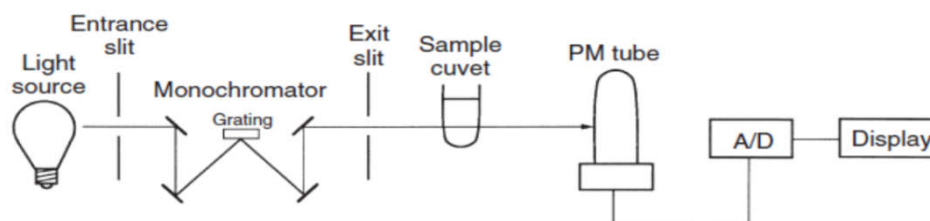
2.3.4.1 สเปกโทรโฟโตเมทรีในช่วงแสงอินฟราเรดเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงคลื่นระหว่าง 1-15 ไมโครเมตร

2.3.4.2 สเปกโทรโฟโตเมทรีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงคลื่นระหว่าง 200-380 นาโนเมตร

2.3.4.3 สเปกโทรโฟโตเมทรีในช่วงแสงวิสิเบิลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงคลื่นระหว่าง 380-780 นาโนเมตร (รัชนี ศัมพะพานิชกุล, 2548)

2.3.5 ชนิดของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

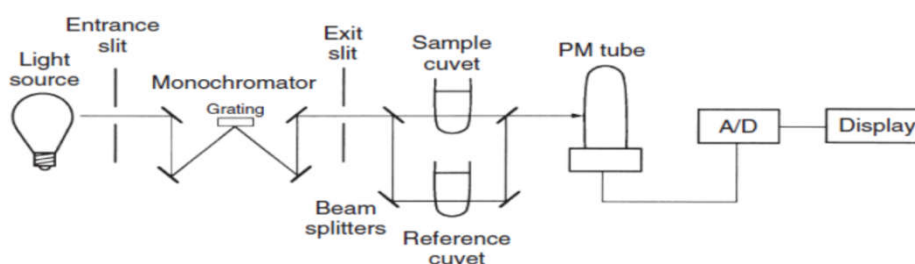
2.3.5.1 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single beam spectrophotometer) เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยวมีหลักการคือ ลำแสงจะถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแสง ผ่านเข้าโมโนโครมาเตอร์ และควบคุมลำแสงให้พอเหมาะด้วยช่อง (Slit) หลังจากแยกช่วงคลื่นของแสงที่ต้องการออกมาแล้ว แสงจะผ่านตรงไปที่เซลล์ของสารละลาย ลำแสงที่ผ่านจากเซลล์จะกระทบกับผนังของโฟโตเซลล์ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมา เซลล์ที่หน่วยตรวจวัดจะบอกในหน่วยของ transmittance และ absorbance โดยใช้สารที่เป็นตัวทำละลาย (เช่น น้ำกลั่นถ้าใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) ใส่ลงในเซลล์แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น หลังจากนั้นจึงนำเซลล์ที่บรรจุสารละลายของสารที่ต้องการวิเคราะห์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-3 (ชัยวัฒน์ วามวรรรัตน์, 2556)



ภาพที่ 2-3 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยว (ชัยวัฒน์ วามวรรรัตน์, 2556)

2.3.5.2 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (Double beam spectrophotometer)

ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ เซลล์ของสารละลายไว้ตัวอย่างและเซลล์ของสารละลายจะวัดในเวลาพร้อมกัน ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ให้ความแม่นยำมากขึ้น โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไว้ตัวอย่างและสารละลายที่ได้จะหักลบกันทำให้ทราบผลได้ทันที ส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-4 (ชัยวัฒน์ วามวรรรัตน์, 2556)

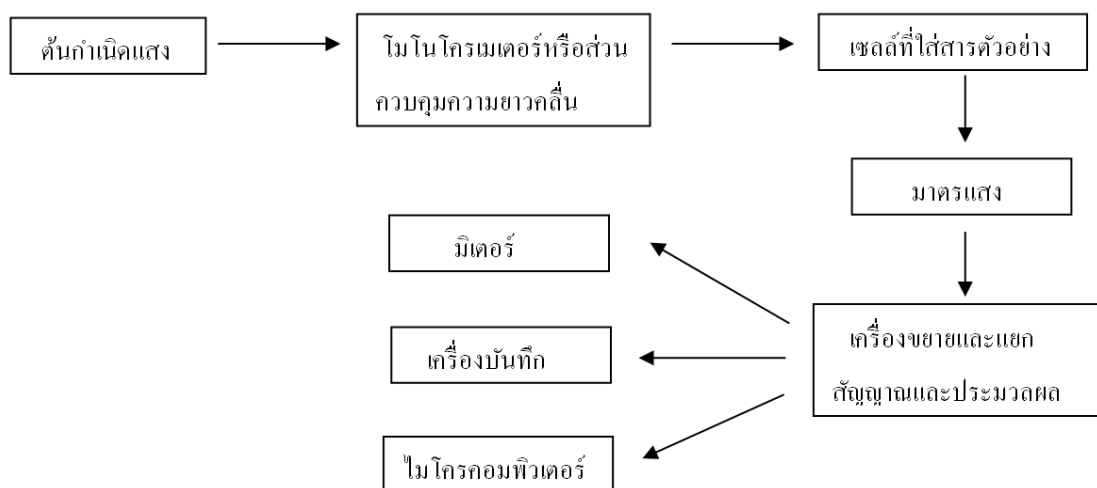


ภาพที่ 2-4 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงคู่ (ชัยวัฒน์ วามวรรรัตน์, 2556)

2.3.6 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ

ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

(แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2552)

2.3.6.1 ต้นกำเนิดแสง (Light source)

สำหรับเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์นั้น ต้นกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นหลอดไฮโดรเจนหรือหลอดควเทอริยม ให้แสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 185-375 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการคายพลังงานของไฮโดรเจนหรือควเทอริยมอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ช่องที่จะให้แสงออกจากหลอดจะต้องทำด้วยควอร์ตหรือซิลิกาหลอม แต่ถ้าใช้วัสดุอื่น เช่น แก้วจะดูดกลืนแสงในช่วงนี้ได้ ทั้งหลอดไฮโดรเจนและหลอดควเทอริยม ภายในบรรจุด้วยแก๊สไว้ที่ความดันต่ำ (5 มิลลิเมตรปรอท) และใช้ระบบไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (Direct Current, D.C.) ขนาด 40 โวลต์ เท่านั้น ซึ่งหลอด ควเทอริยมและหลอดไฮโดรเจนมีอายุใช้งานจำกัด แต่หลอดควเทอริยมมีราคาแพงกว่าจะมีอายุการใช้งานนานกว่าและให้ความเข้มแสงมากกว่า ส่วนหลอดทั้งสแตน มีลักษณะคล้าย ๆ หลอดไฟธรรมดา โดยใช้หลอดเป็นโลหะทั้งสแตน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไป ลวดทั้งสแตนจะถูกเผาให้ร้อนและเปล่งแสงออกมาอยู่ในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร ถ้าใช้อุณหภูมิสูงขึ้นลักษณะสเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นมากขึ้น แต่อายุของหลอดก็จะสั้นขึ้นเช่นกัน จึงมีการปรับปรุงให้หลอดมีอายุยาวขึ้นโดยใส่แก๊สไอโอดีนหรือแก๊สโบรมีนที่มีความดันต่ำเข้าไปในหลอดที่ทำด้วยซิลิกาหลอม เรียกว่า หลอดควอร์ตแฮโลเจน (Quartz halogen lamp) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน (นิพนธ์ ตั้งคณานุกรณ์, 2549)

2.3.6.2 โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ส่วนประกอบนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพราะเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสง โดยทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (คือแสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติกซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ โมโนโครเมเตอร์จะประกอบด้วย

- 1) ช่องที่ปล่อยให้แสงเข้า (entrance slit) เพื่อให้แสงที่เข้ามาแรงพอที่จะผ่านไปยังสารตัวอย่างโดยติดต่อกันที่ที่แสงผ่าน
- 2) กระจกและเลนส์ (mirror and lens) เพื่อใช้ทำให้แสงเกิดการสะท้อนไปมาในเครื่อง บางครั้งทำให้แสงเกิดการรวมกันทั้งนี้เพื่อช่วยลดขนาดของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้เล็กลง
- 3) ส่วนที่ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เพื่อให้เหมาะแก่การเลือกใช้หรือเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ มีให้เลือกใช้ดังนี้

ก) ฟิลเตอร์ (filters) จัดว่าเป็นโมโนโครเมเตอร์ที่ง่ายที่สุด ซึ่งอาจประกอบด้วยกระจกสีต่างๆ ทำเป็นแผ่นกลมเพื่อให้สะดวกแก่การเปลี่ยนด้วยการหมุนแผ่นกลมนั้น หรืออาจใช้วิธีเลื่อนไปตามแนวอนกก็ได้ ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะให้ความกว้างของแถบคลื่นแสงขนาด 25 นาโนเมตร ฟิลเตอร์ที่ใช้กันมีอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า อินเทอร์เฟรนซ์ฟิลเตอร์หรือ ไดอิเล็กทริกฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นฟิลเตอร์ที่ฉาบด้วยสารที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำและเป็นสารไดอิเล็กทริก เช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ แล้วฉาบด้วยเงินบางๆ เพื่อให้แสงผ่านได้บางส่วน แล้วประกอบด้วยกระจกเป็นแบบแซนวิชอีกครั้งหนึ่ง ฟิลเตอร์นี้ยอมให้แสงผ่านออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันตามความยาวของแผ่นประมาณ 50 % เท่านั้น และความกว้างของแถบคลื่นแสงประมาณ 10 นาโนเมตร เครื่องมือที่ใช้ฟิลเตอร์มักจะเป็นคัลเลอริมิเตอร์ (colorimeter) ซึ่งไม่นิยมใช้ทำสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ข) ปริซึม (prism) มีการใช้มากในการศึกษาทางสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แต่ในปัจจุบันไม่นิยมใช้

ค) เกรตติง (grating) เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในปัจจุบันนิยมใช้เกรตติงเป็นส่วนกระจายแสง เกรตติงมี 2 แบบ คือ ทรานสมิซชันเกรตติง (transmission grating) ทำด้วยวัสดุโปร่งใสเพื่อให้แสงผ่านได้ เช่น กระจกแล้วนำมาขีดให้ร่องขนานกัน จำนวนร่องต่อมิลลิเมตรมีมากน้อยได้แตกต่างกัน เกรตติงชนิดนี้ไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน และรีเฟลกชันเกรตติง (reflection grating) หรือเกรตติงแบบ สะท้อนแสง เป็นเกรตติงที่ใช้การสะท้อนแสง ดังนั้นผิวหน้าของร่องวัสดุที่ใช้ทำจะต้องเรียบและสะท้อนแสงได้ เกรตติงที่ใช้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลควรรจะต้องมีจำนวนร่อง 300 – 2,000 ร่องต่อมิลลิเมตร แต่ที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในราว 1,200 ร่องต่อมิลลิเมตร เนื่องการทำร่องซึ่งจะต้องให้เหมือนกันทุกร่องและขนานกันทำได้ยากในอดีต จึงมีราคาแพง ในปัจจุบันนี้ได้ใช้เทคนิคทาง ฮอโลกราฟีแล้วใช้วัสดุประเภทพลาสติกหรือเรซินหล่อจากต้นแบบ (replica) แล้วฉาบด้วยอลูมิเนียมบางๆ จึงทำได้ง่ายและราคาถูก

4) ช่องแสงออก เป็นส่วนที่จะปล่อยให้แสงที่ผ่านจากสารตัวอย่าง ผ่านไปยังมาตรวัดแสงตลอดจนเป็นส่วนที่ช่วยตัดแสงที่รบกวนอีกด้วย โดยทั่วไปช่องแสงเข้าและช่องแสงออกมักจะเปิดเท่ากันหรือสามารถปรับได้ตามต้องการ (ปิยะเนตร จันทรธิริติกุล, 2553)

2.3.6.3 ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell compartment)

เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบแล้วนำไปใส่ที่สำหรับวัด ซึ่งส่วนนี้จะมีฝาปิดเพื่อกันแสงจากภายนอกเข้าไปและถูกกั้นออกจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์

ทรอนิกส์และระบบแสง เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่างบางครั้งเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) มีด้วยกันหลายแบบและที่ใช้กันโดยทั่วไป มีดังนี้

1) เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะในช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้

2) เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา (silica) และควอร์ต (quartz) ใช้ได้ทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล และยังมีเซลล์ที่เป็นเกรดพิเศษ เรียกว่า Special UV Grade โดยเขียนไว้ว่าเป็น UV-Cell ในการซื้อเซลล์มาใช้ในงานวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี มักจะซื้อเป็นคู่ ซึ่งเรียกว่า “Matched Cells” เซลล์ดังกล่าวนี้เป็นเซลล์ที่ได้คัดเลือกแล้วว่า มีลักษณะเหมือนกันทั้งขนาดและการดูดกลืนแสง (แม็น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2552)



ภาพที่ 2-6 แสดงเซลล์ในสารตัวอย่างของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ภิญโญ พานิชพันธ์, ม.ป.ป.)

2.3.6.4 เครื่องวัดแสง (Radiation detector)

ที่ใช้สำหรับวัดแสง มีด้วยกันหลายแบบซึ่งแต่ละแบบอาจแตกต่างกันที่ความกว้างของช่วงคลื่นแสงที่สามารถตรวจสอบได้ ความเร็วต่อการตอบสนองต่อแสง สภาพไวของการรับแสง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อต้องการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องวัดแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

1) โฟโตโวลตาอิกเซลล์หรือแบริเออร์-เลเยอร์เซลล์ (photovoltaic or barrier layer cell) มีความไวสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร แต่จะลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 350 และ 750 นาโนเมตร ลักษณะของเซลล์นี้ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ

โดยมีแผ่นทองแดงหรือเหล็กเป็นขั้วบวกด้านบนฉาบด้วยวัสดุกึ่งตัวนำบาง ๆ เช่น ซีลีเนียมหรือคอปเปอร์(I)ออกไซด์ แล้วฉาบผิวด้านนอกเป็นฟิล์มบางโปร่งแสง ซึ่งอาจเป็นทอง เงินหรือตะกั่ว และทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอน หรือเป็นขั้วลบ ทั้งหมดนี้บรรจุอยู่ในพลาสติก ส่วนที่รับแสงเป็นแผ่นกระจกใส โฟโตเซลล์อีกอย่างหนึ่งเป็นซิลิกอน โฟโตเซลล์ (silicon photocell) ซึ่งเหมาะที่จะใช้วัดแสงในช่วงวิสิเบิลและช่วงใกล้อินฟราเรดแต่ให้สภาพไวต่ำในช่วงอุลตราไวโอเลต

2) หลอดรับแสง (phototube) เป็นหลอดที่ทำด้วยแก้วหรือซิลิกา ภายในหลอดเป็นสุญญากาศหรือเกือบเป็นสุญญากาศ มีแคโทดที่ฉาบด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกแสง

3) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube ; PMT) หลอด PMT เป็นหลอดที่มีลักษณะคล้ายกับหลอดรับแสง แต่ PMT มีสภาพไวดีกว่าและสามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่น 190 - 900 นาโนเมตร ดังนั้นหลอด PMT จึงนิยมใช้ในการนำมาวัดแสงในเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (แม็น อมรลิตซ์ และ อมร เพชรสม, 2522)

2.3.6.5 เครื่องขยาย-แยกสัญญาณและประมวลผล (Signal processors and data read out) สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดจะนำเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ขยายสัญญาณให้มากขึ้นหรืออาจเปลี่ยนสัญญาณ DC เป็น AC หรือ AC เป็น DC อาจมีการกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป หรือนำสัญญาณที่ได้ไปแยกออกเข้าเครื่อง อินทิเกรชัน หรือเปลี่ยนให้เป็น log scale เป็นต้น จากนั้นสัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ จึงเสนอออกมาในหลายรูปแบบโดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ดังนี้

1) มิเตอร์มีสเกลอ่านทั้งที่เป็น linear scale, logarithm scale บอกค่า absorbance และ %transmittance

2) ดิจิตอลมิเตอร์ โดยแสดงค่าที่วัดได้ออกมาเป็นตัวเลขบอกค่า absorbance และ %transmittance

3) เครื่องบันทึก recorder หรือ printer ซึ่งสามารถเขียนสเปกตรัม พิมพ์ข้อมูลหรือกราฟ

4) เครื่องคอมพิวเตอร์ (computer) เป็นเครื่องที่สามารถควบคุมการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ใช้ในการคำนวณผลการทดลอง เขียนกราฟผลการทดลอง พิมพ์ข้อมูลและผลของการทดลองทั้งหมดได้ (ปิยะเนตร จันทร์ถิรดิกุล, 2553)

2.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติดังต่อไปนี้

2.4.1 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (mean) โดยคำนวณจากสูตร (ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ, 2538)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X}{N} \quad (2.8)$$

เมื่อ \bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

$\sum X$ แทน ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

N แทน จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.4.2 การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นการวัดการกระจายที่นิยมใช้กันมากเขียนแทนด้วย S.D. หรือ S โดยคำนวณจากสูตร (ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ, 2540)

$$S.D. = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X)^2}}{N-1} \quad (2.9)$$

เมื่อ S.D. แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X แทน ข้อมูลแต่ละค่า

\bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล

N แทน จำนวนข้อมูล

2.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (coefficient of variation : CV) หรือ %RSD ซึ่งค่านี้เป็นค่าส่วนความเบี่ยงเบนมาตรฐานคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยโดยคำนวณจากสูตร (ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ, 2540)

$$\%RSD = \frac{\bar{X}}{S.D.} \times 100 \quad (2.10)$$

เมื่อ %RSD แทน ค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร

\bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

S.D. แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยภายในประเทศ

จินตนา กิจเจริญวงศ์ และยุพเรศ เอื้อตรงจิตต์ (2558) ได้ทำวิจัยการประเมินการได้รับสัมผัสของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการบริโภคผักและผลไม้แห้ง นำเข้าจากต่างประเทศของคนไทย พ.ศ. 2548-2557 ได้แก่ เห็ดหูหนูขาว ดอกไม้จีน เยื่อไผ่ พุทราจีน และสมุนไพรรอบจำนวน 621 ตัวอย่าง ระหว่างปี พ.ศ. 2548-2557 โดยตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Modified Rankine's method ตรวจพบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในช่วง 10 ถึง 26,590 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตัวอย่างมีปริมาณเกินข้อกำหนดถึงร้อยละ 34.0 ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในพืชผักผลไม้ชนิดแห้งและแช่เย็นไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

งานวิจัยต่างประเทศ

Alizadeh, Mohseni, Zamani, and Kamali (2015) ได้ทำการศึกษาวิธีการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยวิธีโพลารोगราฟีในตัวอย่างน้ำตาลและน้ำตาลปึก โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์ คือ ค่าพีเอช สารละลายของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 4.6 ความกว้างของสัญญาณไฟ เท่ากับ 9 โวลต์ ขนาดของหยดปรอท เท่ากับ 4 ซึ่งเท่ากับ 5-40 มิลลิกรัม/ลิตร ที่สภาวะนี้เหมาะสมนี้ ได้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ เท่ากับ 1.40-4.66 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และเมื่อนำวิธีโพลารोगราฟีมาวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำตาล 51 ตัวอย่างพบว่า มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ปนเปื้อนอยู่ในช่วง 1.40 -13.24 มิลลิกรัม/ลิตร

James, Apblett, and Materer (2012) ได้ศึกษาวิธีการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี ในระบบ Metrohm Advanced IC-2 และคอลัมน์ Metrosep A Supp 7-250 และมี Metrosep RP เป็น Guard column ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยมีสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 3.60 มิลลิโมลาร์ เป็นเฟสเคลื่อนที่ ในอัตราไหล 0.7 มิลลิลิตร/นาที พบว่าวิธีไอออนโครมาโทกราฟีให้ค่าความแม่นยำมากกว่าวิธี ไอโอโดเมตริกไทเทรต โดยมีการตรวจวัด เท่ากับ 0.3-100 %w/w โดยไอออนโครมาโทกราฟี มีขั้นตอนที่ง่ายกว่าเปรียบเทียบกับวิธี ไอโอโดเมตริกไทเทรตซึ่งมีหลายขั้นตอน

Carvalho and Schwedt (2002) วิธีการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ใช้ในภาคครัวเรือนในแต่ละสูตรทางการค้าด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตริกโดยใช้ Naphthol Yellow S เป็นรีเอเจนต์ โดยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของหมู่ไนโตรของ Naphthol Yellow S ในสารละลายแอมโมเนียด้วยสารไฮโดรซัลไฟด์และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่เกิดขึ้น (2-amino-4-nitro-1-naphthol-7-

sulfonate) ด้วยเครื่อง ยูวี วิสิเบิล สเปกโตร โฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 502 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ Naphthol Yellow S ที่ให้ความเสถียรในการวัดมากที่สุด เท่ากับ 8.92×10^{-4} โมล/ลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง และการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรซัลไฟต์ด้วยวิธีนี้ มีช่วงความเข้มข้นของการตรวจวัดอยู่ที่ 16.7 -133.1 มิลลิกรัม/ลิตร (1.3×10^{-4} - 1.04×10^{-3} โมล/ลิตร) และเมื่อเปรียบเทียบการหาปริมาณไฮโดรซัลไฟต์ที่ใช้ในภาคครัวเรือน ใน 3 สูตรการค้าที่มีปริมาณที่มีปริมาณไม่น้อยกว่า 30% ระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีใหม่ที่พัฒนาขึ้นพบว่าวิธีใหม่เป็นวิธีที่ดี ให้ความแม่นยำไม่แตกต่างจากวิธีดั้งเดิม

Westbroek, Govaert, Gasana, Temmerman, and Kiekens (1999) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ในอุตสาหกรรมยางเทคนิคอวแทนเมทรี พบว่าโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ สามารถออกซิไดซ์บนขั้วอิเล็กโทรดได้ บนขั้วไฟฟ้า แพลททินัม พาลาเดียม คาร์บอน และทอง โดยควบคุมสัญญาณไฟฟ้าไว้ที่ 0.3 โวลต์ และทำการเปรียบเทียบสัญญาณค่า SSE กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ โดยจากการทดลองพบว่า สามารถสร้างกราฟมาตรฐานที่มีค่า $r^2 = 0.999$ และมีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดในช่วง 0.007 - 0.026 โมลต่อลิตร

De Groot (1967) ได้ศึกษาวิธีการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ด้วยการไทเทรตกับ โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์ต(III) และใช้เมทิลลีนบลูเป็นอินดิเคเตอร์ จากการวิจัยพบว่า สามารถวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ในเชิงพาณิชย์ที่มีความบริสุทธิ์ 91% ได้แม่นยำ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.3 %

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 8350 บริษัท Helett Pacard, ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เตาให้ความร้อน(Hot plate) รุ่น M21/1 บริษัท Framo-Geratechnik ประเทศนอร์เวย์
3. อ่างอุณหภูมิต่ำ บริษัท ISOLAB Laborgeraete GmbH ประเทศเยอรมัน
4. เครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น RC250S บริษัท Sartorius ประเทศเยอรมัน
5. เตาอบ รุ่น 1375 FX บริษัท Sheldon Manufacturing ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เซลล์ใส่ตัวอย่างสำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสง ขนาด 1000 ไมโครลิตร บริษัท Hellma, ประเทศเยอรมัน
7. ไมโครปิเปต ขนาด 200 และ 1000 ไมโครลิตร บริษัท GISON ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. ขวดแก้วใส่ตัวอย่างพร้อมฝา ขนาด 4 และ 30 มิลลิลิตร
9. กระดาษกรอง เบอร์ 4 ขนาด 25 มิลลิเมตร บริษัท Whatman ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องแก้ว

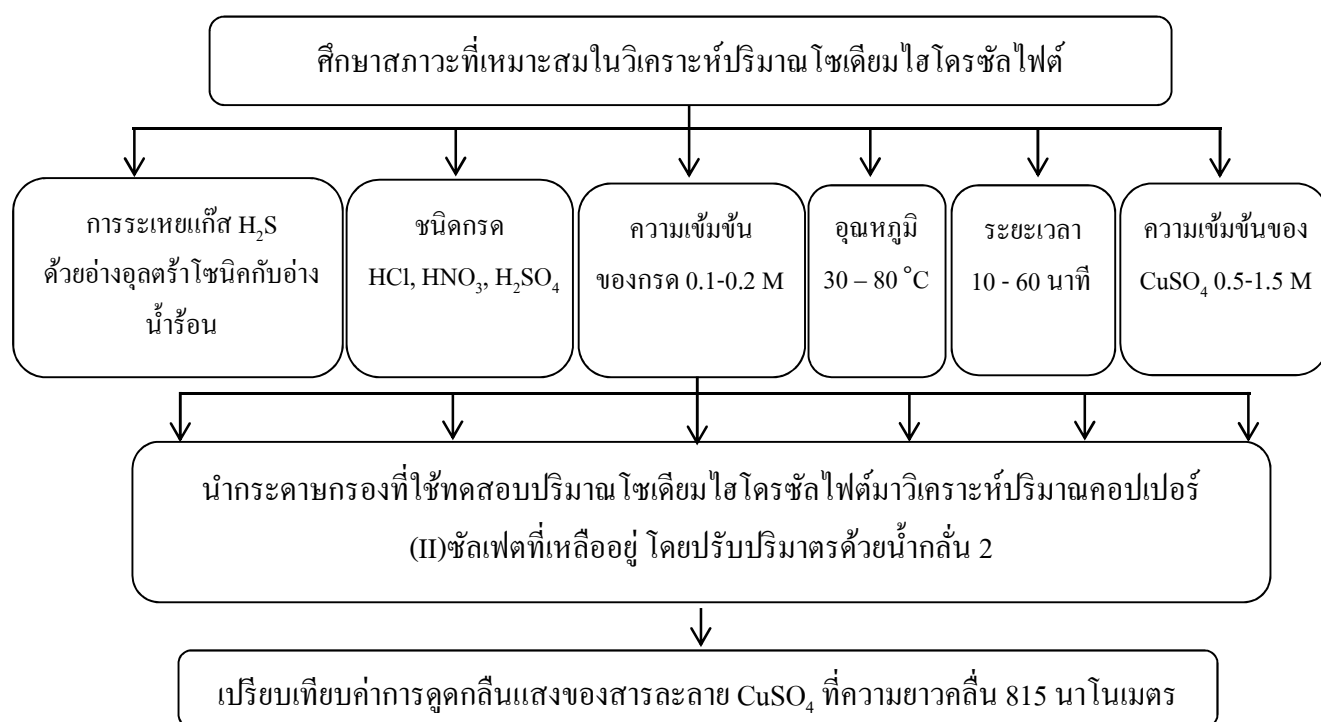
3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 80%w/w ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) เกรดอุตสาหกรรม (Technical grade) บริษัท Ajax finechem, ประเทศออสเตรเลีย
2. คอปเปอร์(II)ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (MW = 249.68 g/mol) เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent) บริษัท VWR, ประเทศอังกฤษ

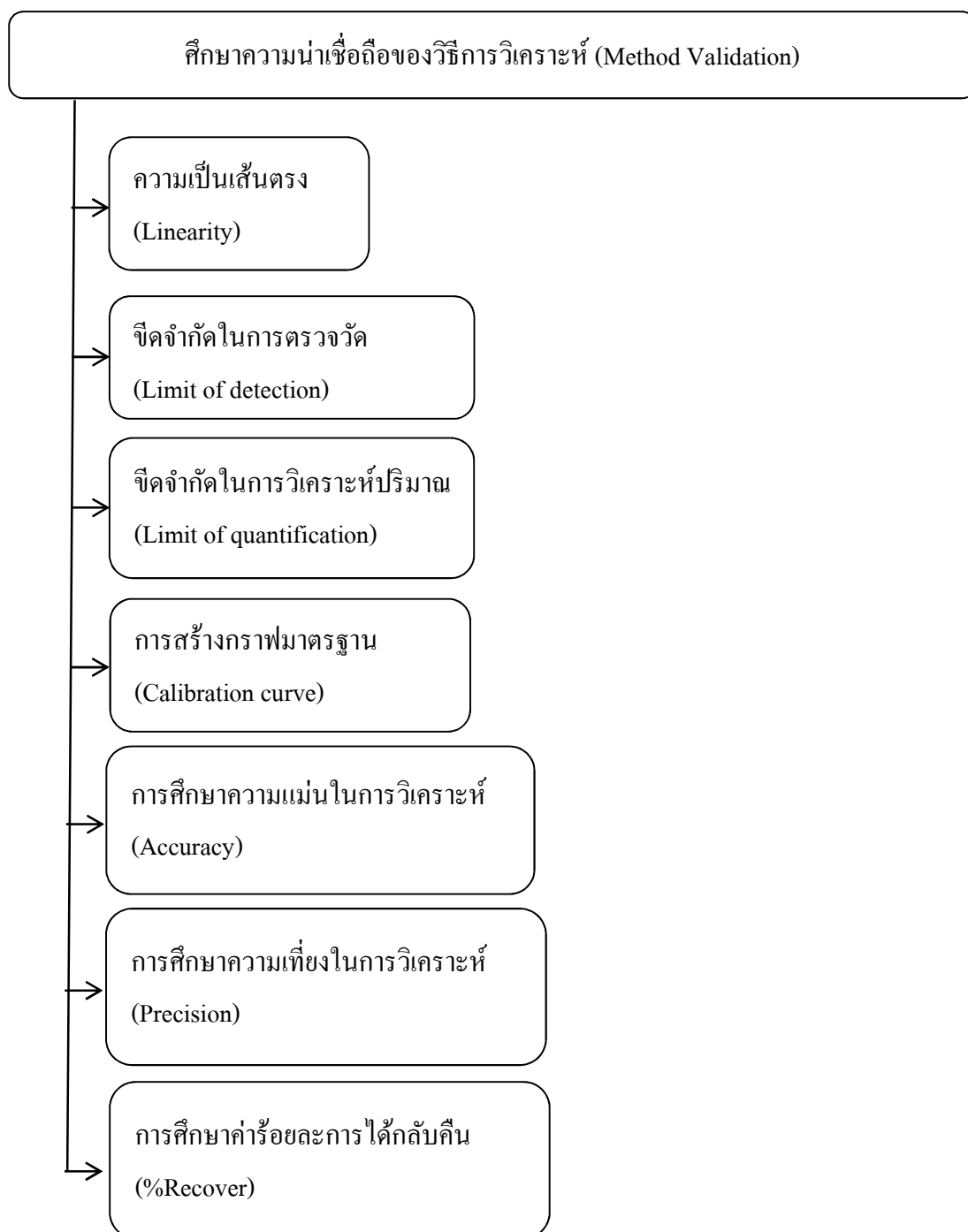
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% (w/w) เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent) บริษัท Merck ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) 98% (w/w) เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent) บริษัท QREC ประเทศนิวซีแลนด์
5. กรดไนตริก (HNO₃) 65% (w/w) เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent) บริษัท QREC ประเทศนิวซีแลนด์

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

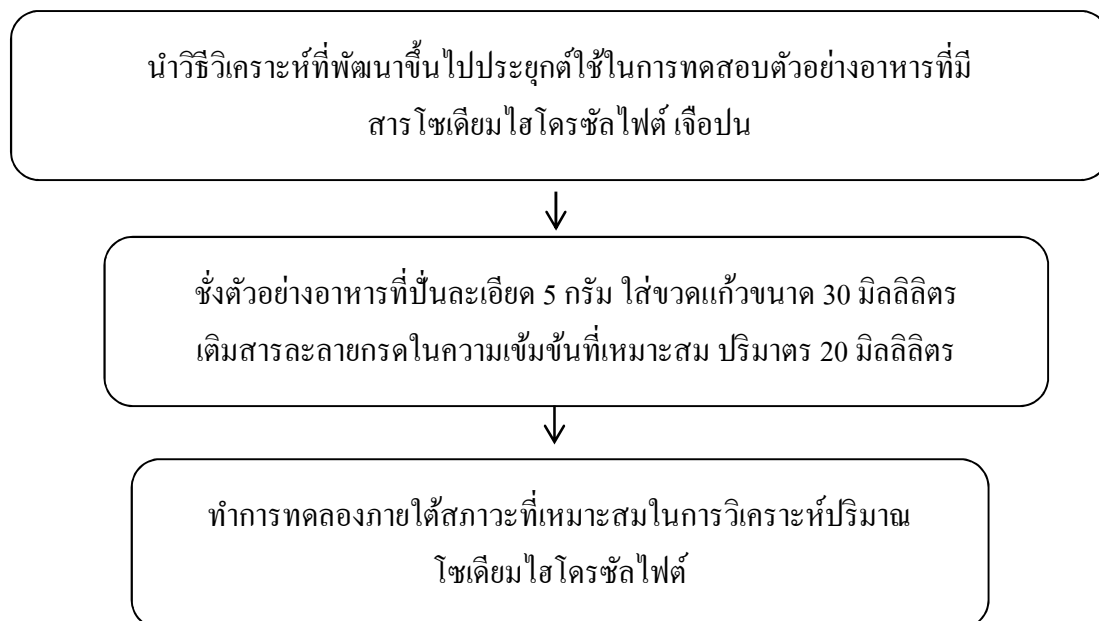
ในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ และวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่เจือปนในตัวอย่างอาหาร ดังแผนภาพการดำเนินการวิจัย ที่ 3-1 – 3-3



ภาพที่ 3-1 แผนการดำเนินการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์



ภาพที่ 3-2 การศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Method Validation)



ภาพที่ 3-3 การวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่เจือปนในอาหาร

3.3 การเตรียมสารเคมี

3.3.1 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

3.3.1.1 ความเข้มข้น 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.5 โมล/ลิตร โดยชั่งคอปเปอร์(II)ซัลเฟต 6.2420, 9.3630, 15.6050, 18.7260 กรัม ละลายใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.3.2 การเตรียมสารละลายกรด

3.3.2.1 เตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมล/ลิตร จากกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% w/v ความหนาแน่น 1.18 g/cm^3 เท่ากับ 11.96 โมล/ลิตร โดยตวงมาในปริมาตร 41.81 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100 มิลลิลิตร

3.3.2.2 เตรียมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 5 โมล/ลิตร จากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 %w/v ความหนาแน่น 1.8 g/cm^3 เท่ากับ 18 โมล/ลิตร โดยตวงมาในปริมาตร 27.78 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100 มิลลิลิตร

3.3.2.3 เตรียมกรดไนตริก ความเข้มข้น 5 โมล/ลิตร จากกรดไนตริก เข้มข้น 65 %w/v ความหนาแน่น 1.38 g/cm^3 เท่ากับ 14.24 โมล/ลิตร โดยตวงมาในปริมาตร 35.11 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100 มิลลิลิตร

3.3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)

3.3.3.1 ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร (Stock solution) ชั่งโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 0.5 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร จนครบ 25 มิลลิลิตร การคำนวณการเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร คำนวณโดย

สารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 20 กรัม/ลิตร หมายความว่า
สารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 1000 มิลลิลิตร จะมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 20 กรัม
สารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 25 มิลลิลิตรจะมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เท่ากับ

$$\frac{20 \times 25}{1000} = 0.5 \text{ กรัม}$$

โดยสารมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เข้มข้น 80 %w/w หมายความว่า
มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์บริสุทธิ์ 80 กรัม ในสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 100 กรัม
ถ้าต้องการโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์บริสุทธิ์ 0.5 กรัม จะต้องชั่งสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เท่ากับ

$$\frac{100 \times 0.5}{80} = 0.6250 \text{ กรัม}$$

สรุปได้ว่าจะต้องชั่งโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ จำนวน 0.6250 กรัม บนกระจก
นาฬิกา ชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจาก
ไอออนในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เข้มข้น 20
กรัม/ลิตร

3.3.2.2 ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 กรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลาย
มาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เข้มข้น 20 กรัม/ลิตร (Stock solution) จำนวน 200, 400, 600,
800, 1000 ไมโครลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 20 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจาก
ไอออน

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1. การเตรียมสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเคลือบบนกระดาษกรอง

เปิดสารละลายการคอปเปอร์(II)ซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรอง ขนาด 25 มิลลิเมตร ทิ้งให้สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตซึมซับบนกระดาษกรองทั่วทั้งแผ่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เก็บในภาชนะที่มีฝาปิด ดังภาพ ที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเคลือบบนกระดาษกรอง

3.4.2. การหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในวิเคราะห์ปริมาณคอปเปอร์(II)ซัลเฟต

3.4.2.1 นำสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตความเข้มข้น 0.0625 โมล/ลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี - วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด และนำความยาวคลื่นที่วัดค่าได้ มาใช้ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม

3.4.2.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของแบลงค์ด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.4.3.1 การศึกษาวิธีการระเหยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยอ่างอุลตราโซนิกกับอ่างน้ำร้อน

1) ทำการควบคุมสภาวะอื่น ๆ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 กรัม/ลิตร โดยมีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.125 โมล/ลิตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเข้มข้น 1 โมล/ลิตร ปริมาตร 100

ไมโครลิตร บนกระดาษกรองโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที

2) นำกระดาษกรองที่เคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในฝาของขวดแก้วขนาด 30 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 กระดาษกรองที่เคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ใส่ลงในฝาของขวดแก้วขนาด 30 มิลลิลิตร

3) ปิเปตสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 20 กรัม/ลิตร จำนวน 1000 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดแก้วที่ใช้ทดสอบขนาด 30 มิลลิลิตร

4) ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5 โมล/ลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ในขวดทดสอบข้อ 3) แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 20 มิลลิลิตร

5) ปิดขวดด้วยฝาที่มีกระดาษกรองเคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟตและนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอ่างน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ดังภาพที่ 3-6 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สังเกตการเปลี่ยนสีบนกระดาษกรองและบันทึกผล



ภาพที่ 3-6 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขวด โดยปิดฝาที่มีกระดาษกรองเคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต

6) เปิดฝาขวดนำกระดาษกรองที่เกิดปฏิกิริยาแล้วมาตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง และนำกระดาษกรองออกมาแช่ในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ในขวดแก้วขนาด 4 มิลลิลิตร ปิดฝาและแช่เป็นเวลา 30 วินาที กรองตะกอนออกจากสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยาด้วยสำลี

7) นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 815 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง

8) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1) – 7) โดยเปลี่ยนวิธีการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อน เป็นอ่างอุลตราโซนิก ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

9) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการให้ความร้อนกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง โดยค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง คำนวณได้จากค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต (แบบลค์) - ค่าการดูดกลืนแสงคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

10) เลือกวิธีการให้ความร้อนที่ทำให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุด มาใช้ในศึกษาพารามิเตอร์ถัดไป

3.4.3.2 ศึกษาชนิดของกรดที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

การศึกษาชนิดของกรดที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 แต่เปลี่ยนชนิดของกรดเป็น กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ และเลือกชนิดของกรดที่ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุดมาใช้ในศึกษาพารามิเตอร์ถัดไป

3.4.3.3 การศึกษาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

การศึกษาความเข้มข้นกรดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดเป็น 0.100, 0.125, 0.150, 0.175 และ 0.200 โมล/ลิตร ตามลำดับ และเลือกความเข้มข้นของกรดที่ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุดมาใช้ในศึกษาพารามิเตอร์ถัดไป

3.4.3.4 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ทำได้โดยทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเลือกอุณหภูมิที่ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุดมาใช้ในศึกษาพารามิเตอร์ถัดไป

3.4.3.5 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ทำได้โดยทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1.1 - 3.4.3.1.10 โดยใช้เวลาในการทดลองที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ และเลือกเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ที่ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุดมาใช้ในศึกษาพารามิเตอร์ถัดไป

3.4.3.6 ศึกษาความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

การศึกษาเข้มข้นที่เหมาะสมของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ทำโดยการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 โดยศึกษาคอปเปอร์(II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 , และ 1.50 โมลต่อลิตร และเลือกเข้มข้นที่ของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ที่ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ดีที่สุดมาใช้ในศึกษาทำการทดลอง

3.4.4 ศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Method Validation)

3.4.4.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ได้จากข้อ 3.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร แต่ละความเข้มข้นทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง สร้างกราฟหาความสัมพันธ์เส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

3.4.4.2 ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of detection: LOD) และขีดจำกัดในการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit of quantification: LOQ)

ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ได้จากข้อ 3.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการวัดสัญญาณเบลงค์ ซ้ำ 10 ครั้ง วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยคำนวณค่าความชันจากกราฟมาตรฐานแล้วแทนค่าลงในสมการ $LOD = 3SD/slope$ และ $LOQ = 10SD/slope$ (น้ำหนักกันยานิวตริ่น และนางนุชนาท นาคำ, 2555)

3.4.4.3. การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ได้จากข้อ 3.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่มีความเข้มข้นในช่วง 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 กรัม/ลิตร แต่ละความเข้มข้นทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์กับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง โดยกราฟมาตรฐานต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ไม่น้อยกว่า 0.99 เพื่อนำสมการเส้นตรงที่ได้มาใช้คำนวณหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่มีในตัวอย่างอาหาร

3.4.4.4. การศึกษาความเที่ยงในการวิเคราะห์ (Precision)

ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่างกันจำนวน 3 ความเข้มข้น ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรง คือ ช่วงความเข้มข้นต่ำ ช่วงความเข้มข้นกลาง และช่วงความเข้มข้นสูง โดยเลือกโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.5, 0.8 กรัม/ลิตร ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 12 ครั้ง ในแต่ละความเข้มข้นในวันเดียว (repeatability) และ ระหว่างวัน (intermediate precision) จากนั้นคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

3.4.4.5. การศึกษาความแม่นยำในการวิเคราะห์ (Accuracy)

ศึกษาความแม่นยำในการวิเคราะห์จากร้อยละการได้กลับคืน (% recovery) โดยเติมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงในตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ด้วยสภาวะที่เหมาะสม แต่ละตัวอย่างวิเคราะห์ 3 ความเข้มข้น แต่ละความเข้มข้นวิเคราะห์ 3 ครั้ง คำนวณ หาความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่มีในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่มีโอกาสปนเปื้อนและนำความเข้มข้นที่ทำได้คำนวณร้อยละการได้กลับคืน (% recovery) จากสูตร

$$\% \text{ recovery} = \frac{(\text{ความเข้มข้นหลังเติมสารมาตรฐาน}) - (\text{ความเข้มข้นก่อนเติมสารมาตรฐาน}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไป}}$$

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในตัวอย่างอาหาร

3.4.5.1 นำตัวอย่างอาหารมาบั่นให้ละเอียด จำนวน 20 กรัม

3.4.5.2 ชั่งตัวอย่างอาหารที่บั่นละเอียด 5 กรัม ใส่ขวดแก้วขนาด 30 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดที่ได้จากการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของกรด ข้อที่ 3.4.3.2 - 3.4.3.3

3.4.5.3 ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ที่ได้จากข้อ 3.4.3 (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)

3.4.5.4 นำค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือจากปฏิกิริยา มาคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐานและหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่เจือปนในอาหาร

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปราย

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร โดยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร และทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.1.1 การให้ความร้อนด้วยอ่างอุตุร้ำาโซนิคและอ่างน้ำร้อน

4.1.2 ชนิดของกรด

4.1.3 ความเข้มข้นของกรด

4.1.4 อุณหภูมิ

4.1.5 ระยะเวลา

4.1.6 ความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต

4.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

4.2.1 ความเป็นเส้นตรงและกราฟมาตรฐาน

4.2.2 ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ

4.2.3 ค่าร้อยละการได้กลับคืน

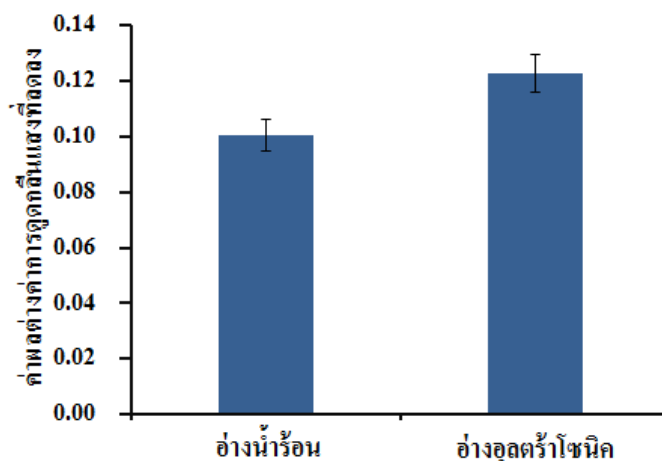
4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหาร

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.1.1 ผลการศึกษาวิธีการระเหยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่างอุตุร้ำาโซนิค

จากการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่างอุตุร้ำาโซนิคเพื่อใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ พบว่า อ่างอุตุร้ำาโซนิคให้ผลค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง เท่ากับ 0.1228 ± 0.0081 และอ่างน้ำร้อนให้ผลค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง เท่ากับ 0.1006 ± 0.0067 โดยที่อุณหภูมิเท่ากัน การให้ความร้อนด้วยอ่างอุตุร้ำาโซนิคให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ได้ดีกว่าการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 โดยให้ค่า Sig. เท่ากับ 0.018 เนื่องจากอ่างอุตุร้ำาโซนิคมีคลื่นอุตุร้ำาโซนิคสะท้อนช่วยเร่ง

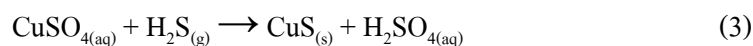
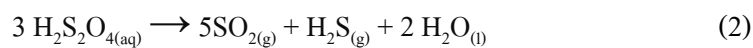
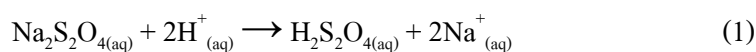
อัตราการระเหยของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟต บนกระดาษกรองได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกอ่างอุลตราโซนิกช่วยสำหรับการศึกษาต่อไป ซึ่งแสดงผลไว้ ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 กราฟผลการศึกษาวิธีการระเหยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่างอุลตราโซนิก

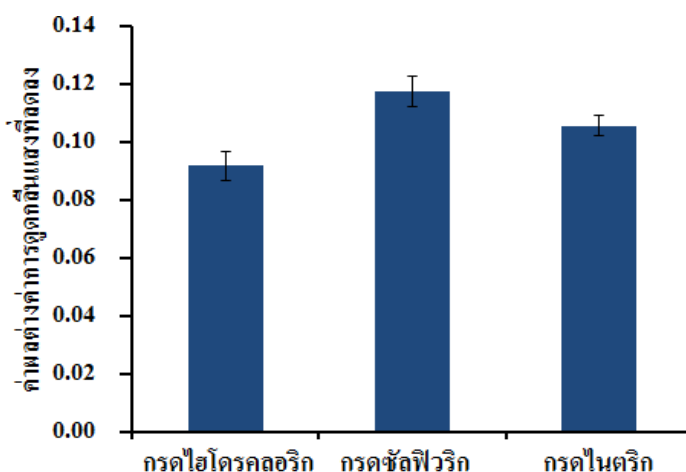
4.1.2 ผลการศึกษาการชนิดของกรด

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาชนิดของกรด 3 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก ซึ่งเป็นกรดแก่ ที่หาได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการศึกษาวิธีการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้ โดยอาศัยกระบวนการสลายตัวให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ระเหยเป็นไอ มาทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เคลือบบนกระดาษกรองภายในขวดทดสอบ (ดังสมการที่ 1- 3) (Ter Maat, Hogendoorn & Versteeg, 2005)



จากการศึกษาชนิดของกรดกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงพบว่า กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง เท่ากับ 0.0918 ± 0.0049 , 0.1173 ± 0.0074 และ 0.1056 ± 0.0035 ตามลำดับ เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกรดกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงพบว่า กรดซัลฟิวริกให้ค่าผลต่างค่า

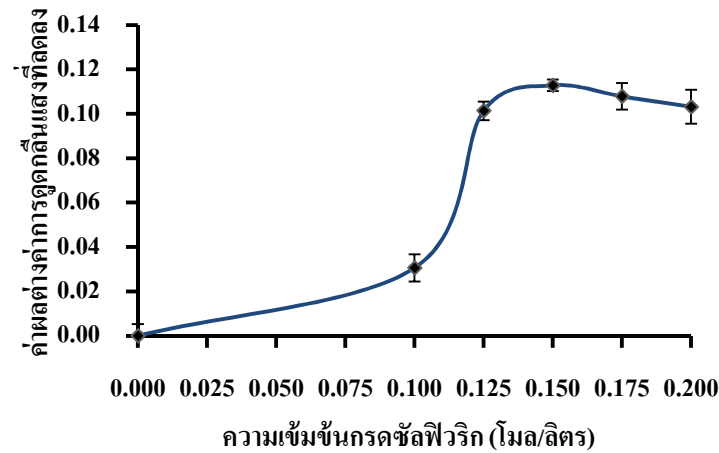
การดูดกลืนแสงที่ลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากที่ความเข้มข้นของกรดเท่ากัน กรดซัลฟูริกสามารถแตกตัวให้ H^+ มากกว่ากรดตัวอื่น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรดอีก 2 ชนิด ดังนั้นจึงเลือกกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยแสดงดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 กราฟการหาชนิดของกรดที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

4.1.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรด

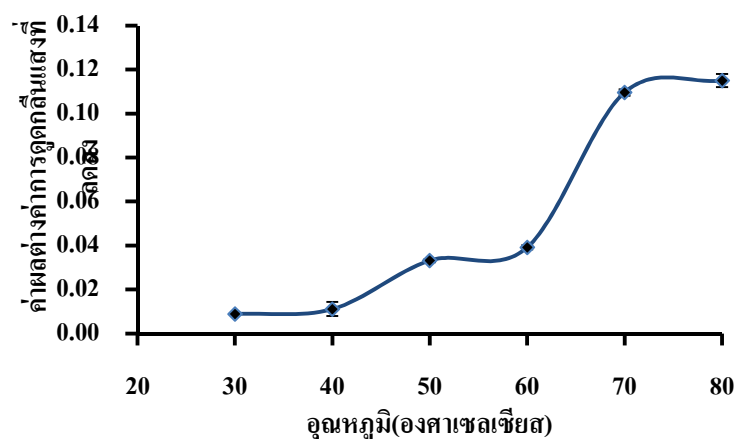
ในการศึกษาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ผู้วิจัยทำการศึกษาลเลือกกรดซัลฟูริก โดยเลือกที่ความเข้มข้น 0.100, 0.125, 0.150, 0.175 และ 0.200 โมล/ลิตร (คิดจากปริมาตรรวมของสารละลาย) พบว่า ได้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเท่ากับ 0.0306 ± 0.0061 , 0.1013 ± 0.0042 , 0.1128 ± 0.0026 , 0.1078 ± 0.0059 และ 0.1031 ± 0.0076 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงพบว่าที่กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.150 โมล/ลิตร ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงมากที่สุดและมีค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่ากรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.150 โมล/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแสดงดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 กราฟการศึกษาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.1.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิ

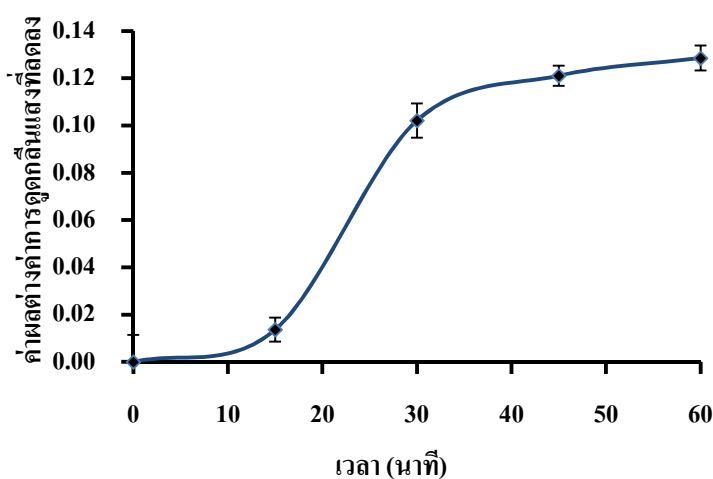
ในการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยการให้ความร้อนด้วยอ่างอุตุตราโซนิคที่มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 องศาเซลเซียส โดยทำศึกษาที่อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ให้ผลค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเท่ากับ 0.0089 ± 0.0003 , 0.0111 ± 0.0032 , 0.0332 ± 0.0007 , 0.0392 ± 0.0009 , 0.1096 ± 0.0014 และ 0.1150 ± 0.0029 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง พบว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จึงเลือกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยแสดงดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 กราฟการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.1.5 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำศึกษาที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่า ได้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง เท่ากับ 0.0145 ± 0.0051 , 0.1029 ± 0.0073 , 0.1220 ± 0.0043 และ 0.1294 ± 0.0053 ตามลำดับ โดยแสดงดังภาพที่ 4-5 พบว่าที่เวลา 45 และ 60 นาที เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ใกล้เคียงกัน แต่ที่เวลา 45 นาที แต่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าที่เวลา 60 นาที จึงเลือกเวลาที่ 45 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

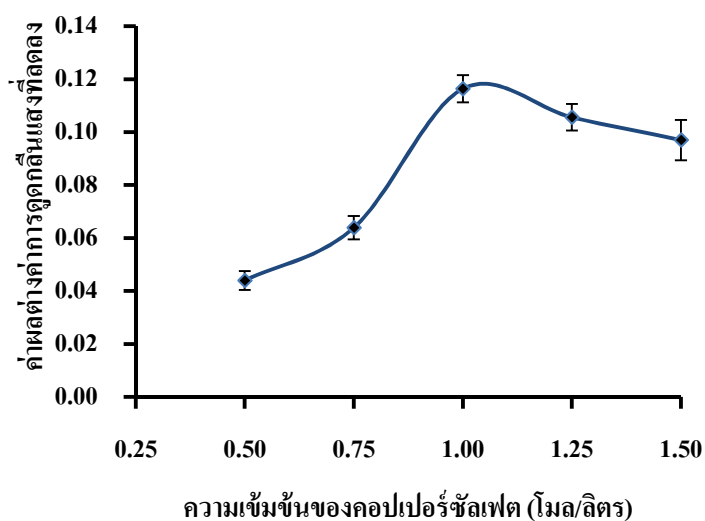


ภาพที่ 4-5 กราฟการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.1.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากการศึกษาความเข้มข้นของคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 โมล/ลิตร พบว่า ได้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง เท่ากับ 0.0439 ± 0.0035 , 0.0639 ± 0.0044 , 0.1164 ± 0.0052 , 0.1056 ± 0.0050 และ 0.0970 ± 0.0076 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า คอปเปอร์(II)ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 1.00 โมล/ลิตร ให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต 1.25 และ 1.50 โมล/ลิตร ที่ให้สัญญาณลดลง โดยการทดลองนี้วัดการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต ซึ่งเมื่อใช้คอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ความเข้มข้นสูงจะให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มคงที่และลดลง

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์กับคอปเปอร์(II)ซัลเฟต จะเกิดบริเวณผิวหน้าด้านในของกระดวยกรองที่เคลือบคอปเปอร์(II)ซัลเฟต การเพิ่มความเข้มข้นคอปเปอร์(II)ซัลเฟตมาก ๆ แต่พื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเท่าเดิมจึงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ดี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.00 โมล/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสม เนื่องจากให้ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงมากที่สุด โดยแสดงดังภาพที่ 4-6



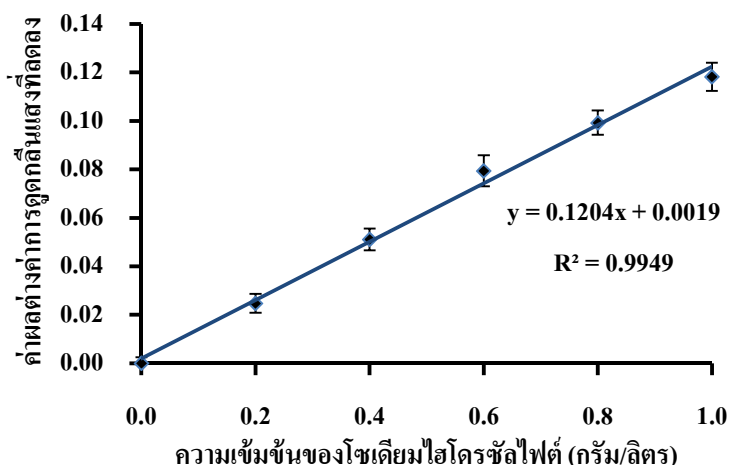
ภาพที่ 4-6 กราฟผลการศึกษาเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหมาะสมต่อการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์

4.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

4.2.1 ความเป็นเส้นตรงและกราฟมาตรฐาน

จากการศึกษาความเป็นเส้นตรงด้วยการสร้างกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ คือ ศึกษาการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในช่วง 0.2-1.0 กรัมต่อลิตร โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขวดแก้วที่มีปริมาตรสารละลายรวม 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และใช้อ่างอุลตราโซนิกเป็นตัวให้ความร้อนและเร่งการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเข้มข้น 1 โมล/ลิตร บนกระดวยทดสอบโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที เมื่อนำคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือจากการเกิด ปฏิกิริยามาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 815 นาโนเมตร และสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์โดยพล็อต

ระหว่างค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงกับปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้สมการเส้นตรง คือ $y = 0.1204x + 0.0019$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.9949 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการวิเคราะห์ โดยแสดงดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ

ขีดจำกัดการตรวจวัดและขีดจำกัดการหาปริมาณศึกษาโดยการสกัดและวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย แบลงค์ 12 ครั้ง ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการดูดกลืนแสงของและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบลงค์ แล้วหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดจาก 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อความชันของกราฟมาตรฐาน และค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ 10 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อความชันของกราฟมาตรฐาน โดยค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและขีดจำกัดการหาปริมาณที่หาได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.05 และ 0.16 กรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยแสดงข้อมูลไว้ในภาคผนวก ตารางที่ ก-8 ซึ่งค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและขีดจำกัดการหาปริมาณที่ได้จากวิธีการนี้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดไว้ให้มีปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทำให้สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบการปนเปื้อนของไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารได้จริง

4.2.3 ผลการศึกษาความเที่ยงของการวิเคราะห์

ความเที่ยงของการวิเคราะห์โดยศึกษา 3 ความเข้มข้น คือ 0.2, 0.5 และ 0.8 กรัม/ลิตร โดยการสกัดและวิเคราะห์ซ้ำภายใน วันเดียวกัน (repeatability) คำนวณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD) จากการวิเคราะห์ซ้ำ 12 ครั้ง ได้ค่า %RSD อยู่ในช่วง 6.18- 9.01 % และเมื่อทำการวิเคราะห์ซ้ำระหว่างวัน (intermediate precision) 4.61-9.51 % ซึ่งได้ค่า%RSD ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AOAC (AOAC International, 1993) ซึ่งมีค่าไม่เกิน 11.09% โดยแสดงดังตารางที่ 4-1 และ 4-2

ตารางที่ 4-1 ผลการศึกษากการวิเคราะห์ค่า Repeatability

ครั้งที่	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่วัดได้		
	0.2g/L	0.5g/L	0.8g/L
1	0.17359	0.44527	0.83405
2	0.22035	0.52666	0.72434
3	0.23115	0.43422	0.82218
4	0.18962	0.51312	0.87350
5	0.19693	0.43065	0.75631
6	0.20150	0.45507	0.79244
7	0.18032	0.52093	0.84020
8	0.19003	0.46495	0.74817
9	0.19211	0.53248	0.87018
10	0.21811	0.50573	0.76993
11	0.21055	0.56412	0.78248
12	0.20806	0.52018	0.84875
\bar{X}	0.20102	0.49278	0.80521
S.D.	0.01717	0.04440	0.04976
%RSD	8.53968	9.00948	6.17956

ตารางที่ 4-2 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Reproducibility

วันที่	ครั้งที่	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่วัดได้		
		0.2g/L	0.5g/L	0.8g/L
1	1	0.22035	0.44527	0.83405
	2	0.23115	0.52018	0.72434
	3	0.21811	0.46495	0.82218
	4	0.21055	0.51312	0.78248
2	5	0.18198	0.52359	0.80648
	6	0.22965	0.45507	0.76885
	7	0.18729	0.46678	0.79925
	8	0.20723	0.52093	0.83688
3	9	0.19884	0.52184	0.80739
	10	0.17882	0.52865	0.78713
	11	0.18472	0.53248	0.74435
	12	0.22841	0.54136	0.84020
	\bar{X}	0.20642	0.50285	0.79613
	S.D.	0.01962	0.03423	0.03669
	%RSD	9.50685	6.80681	4.60883

4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าร้อยละการได้กลับคืน

เมื่อนำวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรีที่พัฒนาได้ มาศึกษาความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์โดยนำตัวอย่างอาหาร(หน่อไม้ดอง) โดยเติมสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (Spike Standard) 3 ความเข้มข้น และทำการทดลองหาค่าร้อยละการได้กลับคืน จำนวน 3 ความเข้มข้น คือ 0.2, 0.5 และ 0.8 กรัม/ลิตร พบว่าได้ค่าร้อยละการได้กลับคืน เท่ากับ 103.08 ± 7.82 , 96.46 ± 9.13 และ 93.04 ± 3.71 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-3 โดยได้ค่าร้อยละการได้กลับคืนในตัวอย่างอาหารอยู่ในช่วง 93.04 – 103.08 % ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AOAC (AOAC International, 1993) อยู่ในช่วง 80 - 110%

ตารางที่ 4-3 ค่าร้อยละการได้กลับคืนการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในอาหาร

ชนิดตัวอย่าง	ความเข้มข้นโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่เติม (g/L)	ร้อยละการได้กลับคืน			\bar{x}	S.D.	%RSD
		1	2	3			
หน่อไม้ดอง	0.2	94.28	109.24	105.73	103.08	7.82	7.59
หน่อไม้ดอง	0.5	88.04	95.20	106.16	96.46	9.13	9.46
หน่อไม้ดอง	0.8	90.48	97.30	91.34	93.04	3.71	3.99
ร้อยละการได้กลับคืนเฉลี่ย					97.53	5.10	5.23

4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในอาหาร

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ จึงนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหารที่มีโอกาสปนเปื้อนจำนวน 3 ชนิด คือ หน่อไม้ดอง เห้าไก่ และถั่วงอก สามารถตรวจพบว่ามีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ปนเปื้อนในตัวอย่างถั่วงอกเท่านั้น โดยในปริมาณ 0.27 ± 0.02 กรัม/กิโลกรัม ซึ่งแสดงว่ายังมีการนำสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มาใช้ในอาหารอยู่ แต่ค่าที่ตรวจพบยังไม่เกินค่ามาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดไว้ โดยแสดงไว้ ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างหน่อไม้ดอง

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบ	ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (กรัม/กิโลกรัม)
หน่อไม้ดอง	ND*
เห้าไก่	ND*
ถั่วงอก	0.27 ± 0.02

หมายเหตุ ND* คือ not detectable

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์การหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในอาหารด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยอาศัยหลักการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในสถานะที่มีกรดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ มาทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตบนกระดาษทดสอบ พบว่าได้สถานะที่เหมาะสมดังนี้ คือ ศึกษาการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในช่วง 0.2-1.0 กรัมต่อลิตร โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขวดแก้วที่มีปริมาตรสารละลายรวม 20 มิลลิลิตร โดยใช้อ่างอุลตราโซนิกเป็นตัวให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเร่งการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาเกิดปฏิกิริยากับคอปเปอร์(II)ซัลเฟตเข้มข้น 1.0 โมล/ลิตร บนกระดาษทดสอบโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที เพื่อศึกษาการลดลงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต เมื่อมีปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อสร้างกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ได้ความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9949 มีค่าขีดจำกัดการตรวจวัด และขีดจำกัดการหาปริมาณ เท่ากับ 0.05 และ 0.16 กรัม/ลิตร ตามลำดับ และค่าร้อยละการได้กลับคืนของการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยวิธีนี้อยู่ในช่วง 93.04 - 103.08 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละการได้กลับคืน เท่ากับ 93.53 ± 5.10 ซึ่งผลการศึกษาคูณภาพของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการวิเคราะห์

เมื่อนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในตัวอย่างอาหารที่มีโอกาสปนเปื้อนโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ จำนวน 3 ชนิด คือ หน่อไม้ เท้าไก่ ถั่วงอก ซึ่งตรวจพบว่า มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เจือปนในตัวอย่างถั่วงอกเท่านั้น ในปริมาณ 0.27 กรัม/กิโลกรัม

การวิเคราะห์การหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ตัวอย่างหลายตัวอย่างได้พร้อมๆ กัน ทำให้ลดเวลาในการทำทดลองได้เมื่อต้องวิเคราะห์ตัวอย่างในปริมาณมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองแต่ละครั้งไม่ควรปิดฝาขวดทดสอบแน่นจนเกินไป เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนจะเกิดแรงดันภายในขวดมากเกินไปจนทำให้กระดาษกรองขาด ส่งผลให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน

5.2.2 ในการวิจัยครั้งต่อไป อาจจะออกแบบขวดทดสอบให้สามารถนำแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาเกิดปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตได้โดยตรง เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการทำการทดลอง

5.2.3 ในการทดลองนี้ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ในการระเหยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจส่งผลทำให้เกิดแรงดันภายในขวดมากเกินไป และทำให้กระดาษทดสอบฉีกขาดได้

5.2.4 ในการวิจัยครั้งต่อไปอาจทำการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการใช้เอนเจนด์ตัวอื่นเปรียบเทียบกับคอปเปอร์(II) ซัลเฟต ในการทดสอบหาโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เนื่องจากสีของสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ มีสีค่อนข้างจางไม่สามารถแยกความแตกต่างได้จากสีของสารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตได้โดยตรง

5.2.5 นำเทคนิควิธีการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มาออกแบบการวิธีการหาปริมาณสารอื่น ๆ

บรรณานุกรม

- กระทรวงสาธารณสุข. (2549). พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ข้อกำหนดการใช้วัตถุเจือปนอาหาร ฉบับที่ 2. นนทบุรี: สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา.
- กองอาหาร. (ม.ป.ป.). บริโภคถั่วอกดิบระวังสารฟอสฟอรัสอันตราย. เข้าถึงได้จาก http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=13.
- จินตนา กิจเจริญวงศ์ และยุพรศ เอื้อตรงจิตต์.(2558). การประเมินการได้รับสัมผัสของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการบริโภคผักและผลไม้แห้งนำเข้าจากต่างประเทศของคนไทย พ.ศ. 2548-2557. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 57(1), 58-68.
- จรีภรณ์ บุญยวงศ์วิโรจน์, ลัดดาวัลย์ โรจนพรรณทิพย์, ปรีชา จึงสมานกุล และลดาพรรณ แสงคล้าย. (ม.ป.ป.). คู่มือการใช้ชุดทดสอบอาหาร. กรุงเทพฯ: สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.
- ชัยวัฒน์ วามวรรธน์. (2556). ปฏิบัติการทดลองที่ 2 สเปกโทรโฟโตเมทรี. เข้าถึงได้จาก <http://biochem.flas.kps.ku.ac.th/01402312/01402312lab02spectro 156.pdf>.
- นันทนา กันยานุวัฒน์. (2555). แนวทางการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบทางเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. (2549). สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นงนิตย์ มรกต. (2551). สเปกตรอลิเกกทรอนิกส์ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชัน. มหาสารคาม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ประภา คงปัญญา. (2546, 1 ธันวาคม). สารฟอสฟอรัสในอาหาร. หมอชาวบ้าน, 296, 10.
- ปิยะเนตร จันทร์ถิรดิกุล. (2553). การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยสเปกโทรสโกปี. มหาสารคาม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 เรื่องข้อกำหนดการใช้วัตถุเจือปนอาหาร ฉบับที่ 2. (2549, 6 ตุลาคม). ราชกิจจานุเบกษา. หน้า 105.
- ภิญโญ พานิชพันธ์. (ม.ป.ป.). ทีวีเวด. เข้าถึงได้จาก http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_2.html.
- แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. (2552). หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- เย็นหทัย แน่นหนา. (2549). *สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชณี ตันตะพานิชกุล. (2548). *สเปกโทรสโกปีในเคมีอินทรีย์*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ. (2540). *สถิติวิทยาทางการวิจัย*. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.
- ศูนย์ปฏิบัติการความปลอดภัยด้านอาหาร. (2556). *สถานการณ์อาหารปลอดภัยในมิติด้านสุขภาพ*. เข้าถึงได้จาก <http://www.fda.moph.go.th>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). *สารฟอกขาวโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์*. เข้าถึงได้จาก http://fieldtrip.ipst.ac.th/intro_sub_content.php?content_id=21&content_folder_id=205
- Alizadeh, A.M., Mohseni, M., Zamani, A.A., & Kamali, K. (2015). Polarographic determination of sodium hydrosulfite residue (Dithionite) in sugar and loaf sugar. *Food Anal. Method*, 8, 483-488.
- AOAC International. (1993). *AOAC[®] peer-verified method program: manual on policies and procedures*. United States of America: AOAC International.
- Carvalho, L., & Schwedt, G. (2002). Spectrophotometric determination in household commercial formulations using Naphthol yellow S. *Mikrochim. Acta.*, 138, 83-87.
- Danehy, J. P., & Zubritsky, C. W. (1974). Iodometric method for the determination of dithionite, bisulfite, and thiosulfate in the presence of each other and its use in following the decomposition of aqueous solution of sodium dithionite. *Anal. Chem.*, 46(3), 391-395.
- Food Standards Australia New Zealand. (2014). *Approval Report – Application A1088 Sodium Hydrosulphite as a Food Additive*. Convening as the Australia and New Zealand Food Regulation Ministerial Council.
- Groot, D. C. (1997). Titrimetric determination of sodium dithionite with potassium hexacyanoferrate (III) as reagent and methylene blue as indicator. *Journal Fresenius Zeitschrift für analytische Chemie*, 229(5), 335-339.
- Hofmann, U., & Rudorff, W. (1969). *Anorganische Chemie* (20th ed.). Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn.

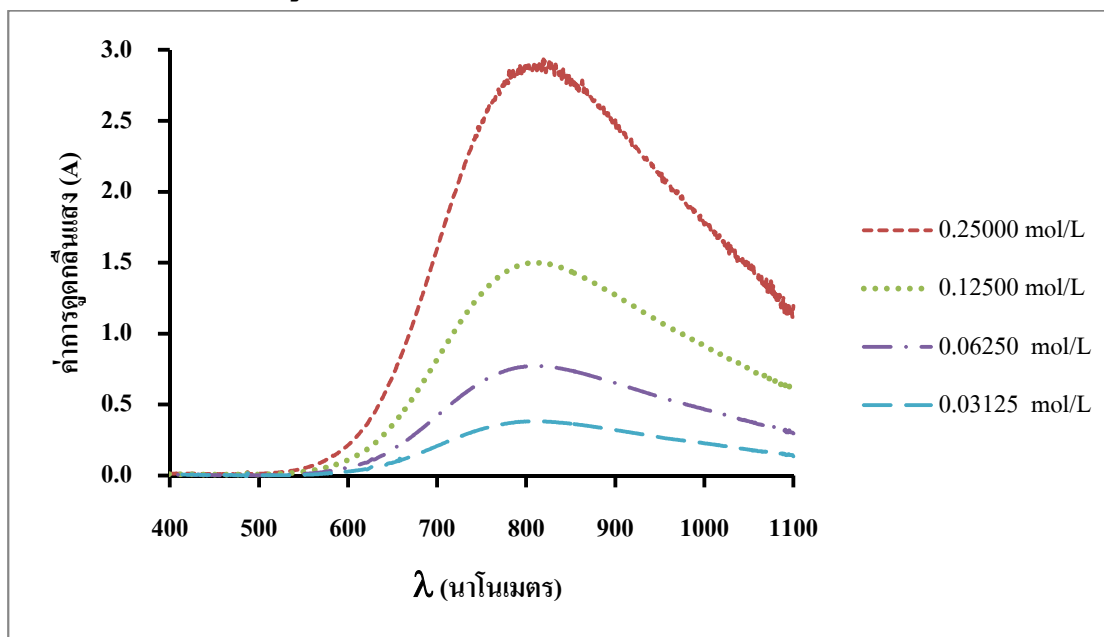
- International Programme on Chemical Safety.(1974). *Sulfurdioxide and sulfites. Seventeenth report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives*. Switzerland: World Health Organization Technology.
- IPCS inchem. (2006). *Sodium dithionite Toxicity*. เข้าถึงได้จาก<http://www.inchem.org/documents/sids/sids/7775146.pdf>
- James, T., Apblett, A., & Materer, N. F. (2012). Rapid Quantification of Sodium Dithionite by Ion Chromatography. American Chemical. *Chem. Res*, 51, 7742-7746.
- JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). (1999). Sulfur dioxide and Sulfites; Safety evaluation of certain food additives. *WHO Food Additives Series*, (42), 95-116.
- Lewis, R.J. Sr. (2004). *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials* (11th ed.). New Jersey: Wiley & Sons.
- Pratt, L. A. (1924). The Manufacture of Sodium Hyposulfite. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16 (7), 676–677.
- Science Lab. (2555). *Material Safety Data Sheet Sodium hydrosulfite MSDS Catalog Codes: SLS3463, SLS1246*. Retrieved from <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9927595>.
- Westbroek, P., Govaert, F., Gasana, E., Temmerman, E., & Kiekens, P. (1999). Possibilities to measure the concentration of sodium dithionite in textile applications by means of amperometric sensors. *AUTEX Research*, 11(1), 30-38.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพภาคผนวก ก-1 สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

2. ผลการศึกษาการวิธีการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่างอุลตราโซนิก

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนและอ่างอุลตราโซนิกที่มีผลต่อค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

วิธีการให้ความร้อน	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
อ่างน้ำร้อน	0.10234	0.09423	0.10520	0.10059	0.00569	5.65734
อ่างอุลตราโซนิก	0.12233	0.11495	0.13113	0.12280	0.00810	6.59640

2. ผลการศึกษาการชนิดของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

ชนิดของกรด	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
กรดไฮโดรคลอริก	0.09353	0.08621	0.09561	0.09178	0.00494	5.37955
กรดซัลฟิวริก	0.11972	0.10907	0.12324	0.11734	0.00738	6.28612
กรดไนตริก	0.10768	0.10158	0.10768	0.10564	0.00352	3.33369

3. ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

กรดซัลฟิวริก (โมล/ลิตร)	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
0.000	0.00298	0.00316	0.00613	0.00000	0.00531	0.00000
0.100	0.03756	0.02759	0.02656	0.03057	0.00608	9.87368
0.125	0.10339	0.09652	0.10403	0.10131	0.00416	4.11042
0.150	0.10981	0.11448	0.11414	0.11281	0.00260	2.30798
0.175	0.11469	0.10476	0.10407	0.10784	0.00594	5.51029
0.200	0.11044	0.09523	0.10368	0.10312	0.00762	7.39030

4. ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางภาคผนวก ก-4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
30	0.00854	0.00893	0.00921	0.00889	0.00034	3.78375
40	0.01388	0.01181	0.00763	0.01111	0.00318	8.66574
50	0.03257	0.03299	0.03398	0.03318	0.00072	2.18188
60	0.03824	0.04000	0.03927	0.03917	0.00088	2.25747
70	0.11122	0.10905	0.10852	0.10960	0.00143	1.30534
80	0.11410	0.11828	0.11257	0.11498	0.00296	2.57056

5. ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางภาคผนวก ก-5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

เวลา (นาที)	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
15	0.01987	0.01391	0.00968	0.01449	0.00512	5.33882
30	0.11120	0.09787	0.09961	0.10289	0.00725	7.04244
45	0.11706	0.12463	0.12419	0.12196	0.00425	3.48411
60	0.13249	0.12336	0.13240	0.12942	0.00525	4.05313

6. ผลการศึกษาความเข้มข้นของคอป(II)เปอร์ซัลเฟตที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางภาคผนวก ก-6 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง

ความเข้มข้น CuSO ₄ (โมล/ลิตร)	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
0.50	0.04077	0.04774	0.04328	0.04393	0.00353	8.03590
0.75	0.06699	0.05887	0.06581	0.06389	0.00439	6.86696
1.00	0.11932	0.11942	0.11043	0.11639	0.00516	4.43488
1.25	0.10871	0.09980	0.10823	0.10558	0.00501	4.74637
1.50	0.10271	0.09995	0.08837	0.09701	0.00761	7.84316

7. ผลการสร้างกราฟมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ก-7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น Na ₂ S ₂ O ₄ (กรัม/ลิตร)	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
0.0	0.00233	0.00042	0.00274	0.00000	0.00256	0.00000
0.2	0.02621	0.02779	0.02031	0.02477	0.00394	15.91698
0.4	0.04668	0.05575	0.05090	0.05111	0.00454	8.88073
0.6	0.08606	0.07910	0.07323	0.07946	0.00642	8.08231
0.8	0.10245	0.09346	0.10197	0.09929	0.00506	5.09368
1.0	0.11787	0.12420	0.11257	0.11821	0.00582	4.92564

8. ผลการวิเคราะห์ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ

ตารางภาคผนวก ก-8 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ใช้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.62363
2	0.62680
3	0.62425
4	0.62417
5	0.62360
6	0.62408
7	0.62721
8	0.62600
9	0.62275
10	0.62353
\bar{X}	0.62068
S.D.	0.00196
%RSD	0.31447
Slope	0.1204
LOD	0.04891
LOQ	0.16304

การคำนวณค่าขีดจำกัดการตรวจวัดและค่าขีดจำกัดการหาปริมาณ

$$\text{LOD} = 3\text{S.D.} / \text{Slope}$$

$$\text{LOD} = (3 \times 0.00196) / 0.1204 = 0.04891$$

$$\text{LOQ} = 10\text{S.D.} / \text{Slope}$$

$$\text{LOQ} = (10 \times 0.00196) / 0.1204 = 0.16304$$

9. การวิเคราะห์ค่า Repeatability

ตารางภาคผนวก ก-9 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Repeatability

ครั้งที่	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ ลดลงที่ความเข้มข้น			ความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ไฟต์ที่วัดได้ (กรัม/ลิตร)		
	0.2 g/L	0.5 g/L	0.8 g/L	0.2 g/L	0.5 g/L	0.8 g/L
1	0.02280	0.05551	0.10232	0.17359	0.44527	0.83405
2	0.02843	0.06531	0.08911	0.22035	0.52666	0.72434
3	0.02973	0.05418	0.10089	0.23115	0.43422	0.82218
4	0.02473	0.06368	0.10707	0.18962	0.51312	0.87350
5	0.02561	0.05375	0.09296	0.19693	0.43065	0.75631
6	0.02616	0.05669	0.09731	0.20150	0.45507	0.79244
7	0.02361	0.06462	0.10306	0.18032	0.52093	0.84020
8	0.02478	0.05788	0.09198	0.19003	0.46495	0.74817
9	0.02503	0.06601	0.10667	0.19211	0.53248	0.87018
10	0.02816	0.06279	0.09460	0.21811	0.50573	0.76993
11	0.02725	0.06982	0.09611	0.21055	0.56412	0.78248
12	0.02695	0.06453	0.10409	0.20806	0.52018	0.84875
\bar{X}	0.02610	0.06123	0.09885	0.20102	0.49278	0.80521
S.D.	0.00207	0.00535	0.00599	0.01717	0.04440	0.04976
%RSD	7.91810	8.72992	6.06078	8.53968	9.00948	6.17956

10. การวิเคราะห์ค่า Reproducibility

ตารางภาคผนวก ก-10 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่า Reproducibility

วันที่	ครั้งที่	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่			ความเข้มข้นของโซเดียม		
		ลดลงที่ความเข้มข้น			ไฮโดรซัลไฟด์ที่วัดได้		
		0.2 g/L	0.5 g/L	0.8 g/L	0.2 g/L	0.5 g/L	0.8 g/L
1	1	0.02843	0.05551	0.10232	0.22035	0.44527	0.83405
	2	0.02973	0.06453	0.08911	0.23115	0.52018	0.72434
	3	0.02816	0.05788	0.10089	0.21811	0.46495	0.82218
	4	0.02725	0.06368	0.09611	0.21055	0.51312	0.78248
2	5	0.02381	0.06494	0.09900	0.18198	0.52359	0.80648
	6	0.02955	0.05669	0.09447	0.22965	0.45507	0.76885
	7	0.02445	0.05810	0.09813	0.18729	0.46678	0.79925
	8	0.02685	0.06462	0.10266	0.20723	0.52093	0.83688
3	9	0.02584	0.06473	0.09911	0.19884	0.52184	0.80739
	10	0.02343	0.06555	0.09667	0.17882	0.52865	0.78713
	11	0.02414	0.06601	0.09152	0.18472	0.53248	0.74435
	12	0.02940	0.06708	0.10306	0.22841	0.54136	0.84020
	\bar{X}	0.02675	0.06244	0.09775	0.20642	0.50285	0.79613
	S.D.	0.00236	0.00412	0.00442	0.01962	0.03423	0.03669
	%RSD	8.83168	6.59969	4.51925	9.50685	6.80681	4.60883

11. สรุปสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ และผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก ก-11 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์และผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

สถานะที่ศึกษา	ผลการศึกษา
1. วิธีการให้ความร้อนในปฏิกิริยา	ใช้อ่างอุตสาหกรรม
2. ชนิดของกรด	กรดซัลฟูริก
3. ความเข้มข้นของกรด	0.150 โมล/ลิตร
4. อุณหภูมิ	70 องศาเซลเซียส
5. เวลา	45 นาที
6. ความเข้มข้นของคอปเปอร์(II)ซัลเฟต	1.0 โมล/ลิตร
ช่วงการตรวจวัดปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์	0.2 – 1.0 กรัม/ลิตร
8. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	0.9949
9. ขีดจำกัดการตรวจวัด	0.05 กรัม/ลิตร
10. ขีดจำกัดการหาปริมาณ	0.16 กรัม/ลิตร
11. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์	6.18- 9.01 %
12. ร้อยละการได้กลับคืน	93.04 – 103.08 %
13. ร้อยละการได้กลับคืนเฉลี่ย	97.53±5.10

12. ผลการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ตารางภาคผนวก ก-12 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ใช้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
หน่อไม้	0.62558	0.62533	0.62573	0.62555	0.00021	0.03298
เท้าไก่	0.62453	0.62383	0.62397	0.62411	0.00037	0.05937
ถั่วงอก	0.62002	0.6191	0.61896	0.61936	0.00058	0.09288

ตารางภาคผนวก ก-13 ผลการวิเคราะห์ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงที่ใช้ในการหาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ตัวอย่าง	ค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
หน่อไม้ดอง	0.00231	0.00256	0.00216	0.00234	0.00021	8.80599
เท้าไก่	0.00336	0.00406	0.00392	0.00037	0.00037	9.79596
ถั่วงอก	0.00787	0.00879	0.00893	0.00853	0.00058	6.74479

ตารางภาคผนวก ก-14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ตัวอย่าง	ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (กรัม/ลิตร)					
	1	2	3	\bar{X}	S.D.	%RSD
หน่อไม้ดอง	0.01767	0.01975	0.01649	0.01797	0.00165	9.19865
เท้าไก่	0.02614	0.03174	0.03065	0.02951	0.00297	10.06198
ถั่วงอก	0.06226	0.0696	0.07076	0.06754	0.00461	6.82481

ตารางภาคผนวก ก-15 สรุปผลการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในตัวอย่างอาหาร

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบ	ปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (กรัม/กิโลกรัม)
หน่อไม้ดอง	ND*
เท้าไก่	ND*
ถั่วงอก	0.27

หมายเหตุ ND* คือ Not detectable

วิธีการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในถั่วงอกในหน่วย กรัม/กิโลกรัม

มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 0.06754 กรัม/ลิตร หมายความว่า

ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 0.06754 กรัม

ถ้าในสารละลาย 20 มิลลิลิตร จะโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ $\frac{20 \times 0.06754}{1000} = 0.00135$ กรัม

ในตัวอย่างถั่วงอก 5 กรัม มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 0.00135 กรัม

ถ้าตัวอย่างถั่วงอก 1000 กรัม จะโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ $\frac{1000 \times 0.00135}{5} = 0.27$ กรัม

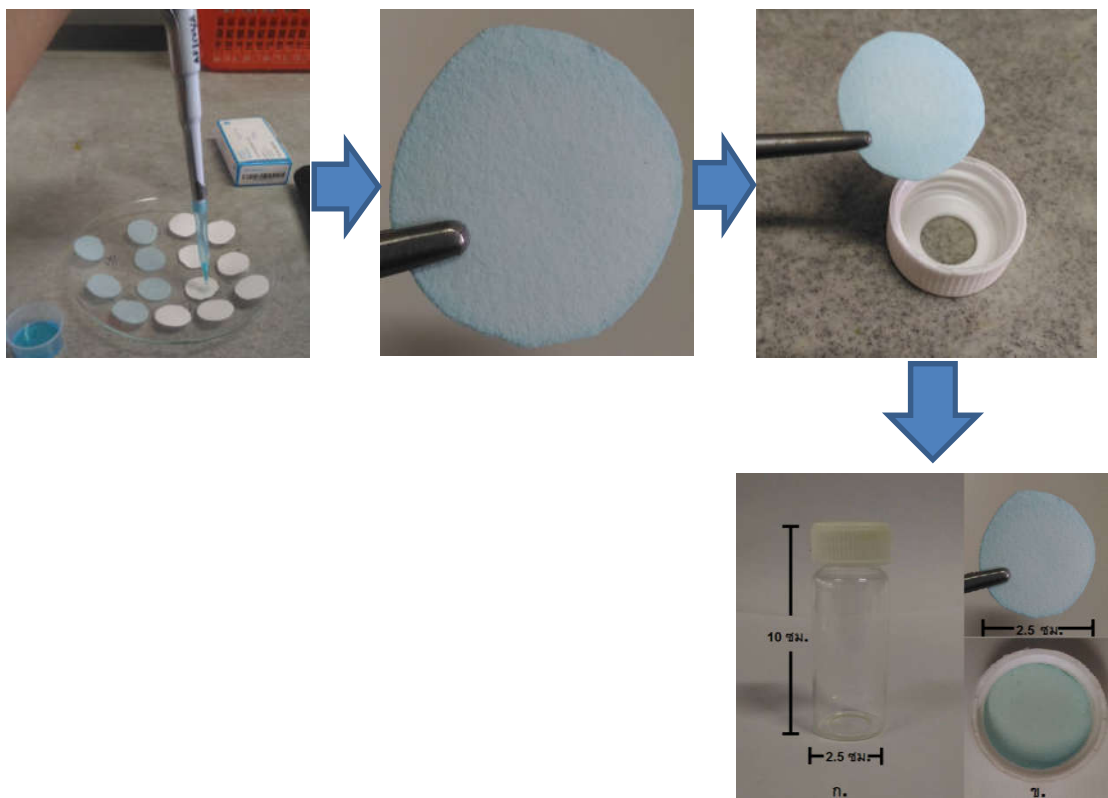
มีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เจือปนอยู่ในตัวอย่างถั่วงอก 0.27 กรัม/กิโลกรัม

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การเตรียมกระดาษทดสอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์

ปีเปตสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จำนวน 100 ไมโครลิตร
ใส่ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร

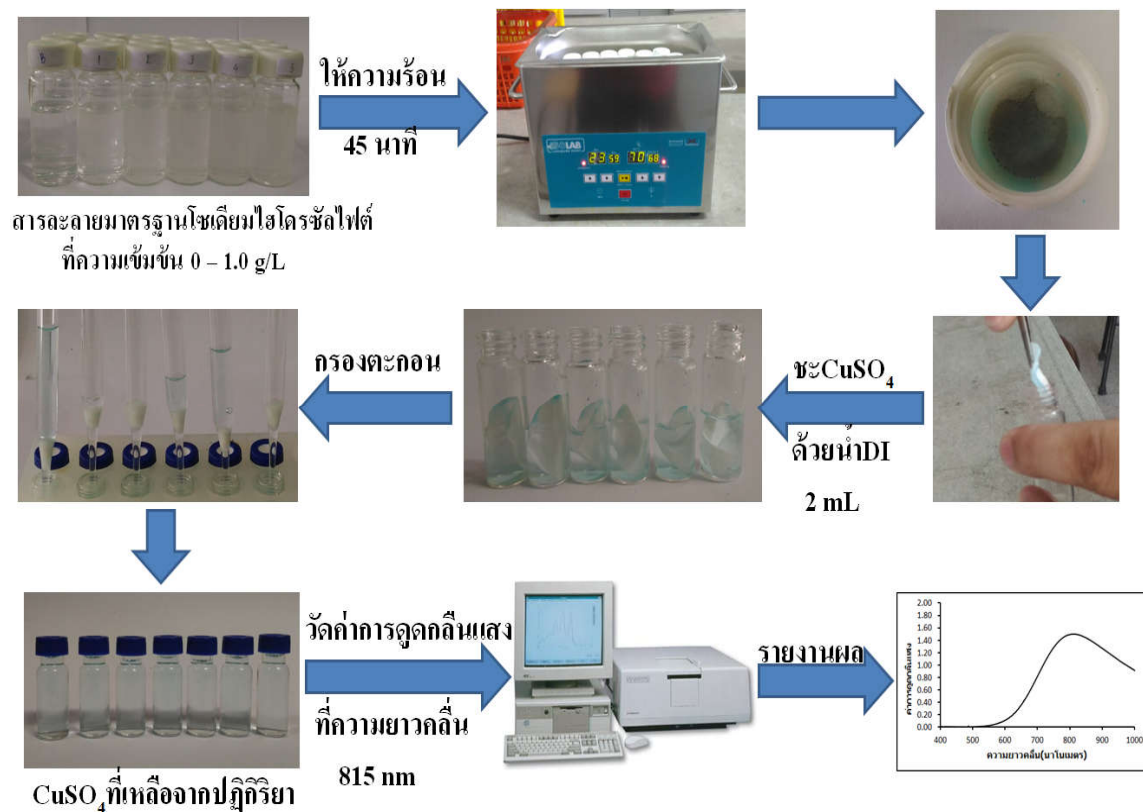


ภาพภาคผนวก ข-1 ขั้นตอนการเตรียมกระดาษทดสอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์

การดำเนินการทดลองสร้างกราฟมาตรฐานหาโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์

สร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการหาโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ ทำการทดลองภายใต้
สภาวะที่เหมาะสม โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ เข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร จำนวน
20 มิลลิตร ในขวดทดสอบขนาด 30 มิลลิตร และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 โมล/ลิตร เป็น
ตัวเร่งปฏิกิริยา (คิดความเข้มข้นกรดจากปริมาตรสารละลายรวมในขวดทดสอบ) ปิดฝาด้วย
กระดาษกรองที่ฉาบด้วย คอปเปอร์(II)ซัลเฟต เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ให้ความร้อนด้วยอ่างอุลตรา

โชนิก ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 815 นาโนเมตร

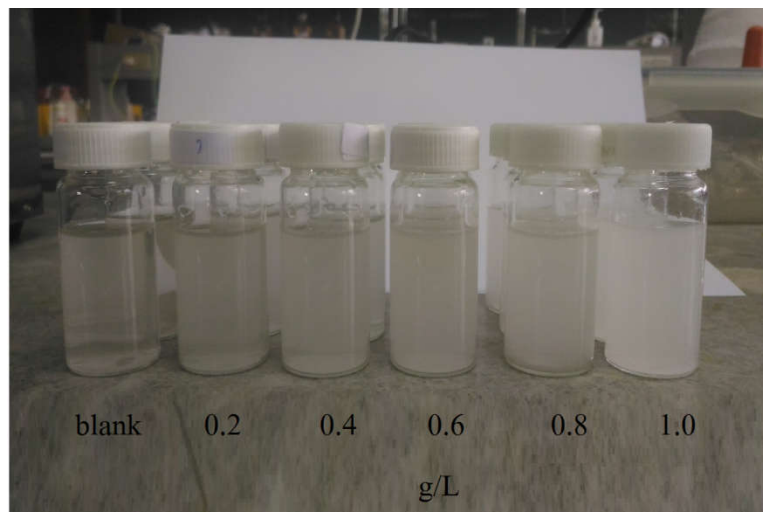


ภาพภาคผนวก ข-2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองสร้างกราฟมาตรฐานหาไฮดรอกซีอะซิโตน

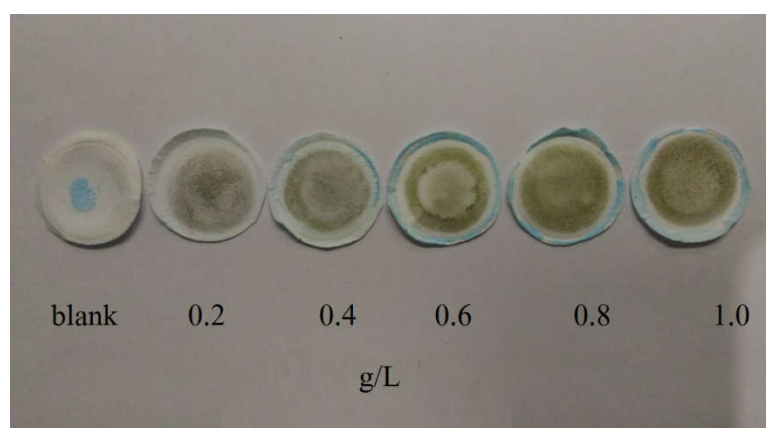
ภาคผนวก ค

รูปผลการทดลอง

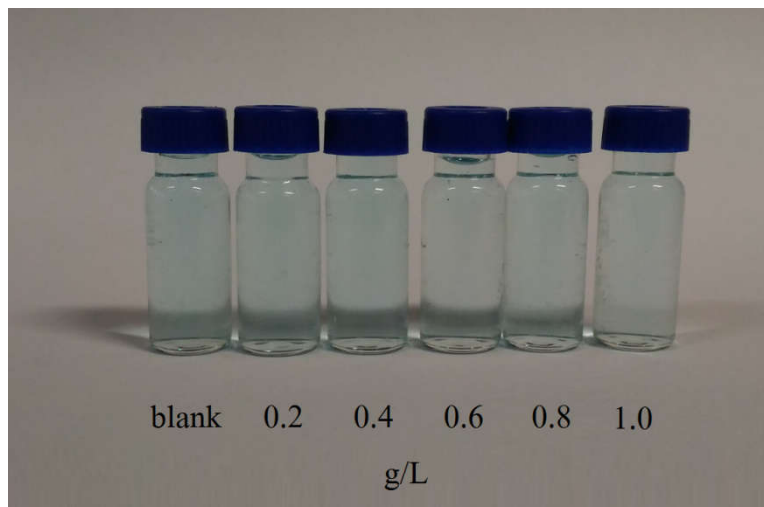
1. การสร้างกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์



ภาพภาคผนวก ค-1 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร

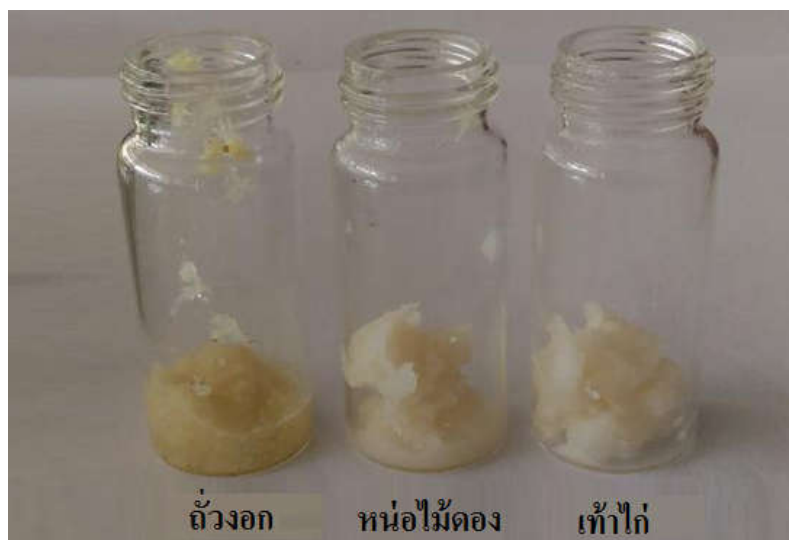


ภาพภาคผนวก ค-2 กระดาษทดสอบหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 กรัม/ลิตร

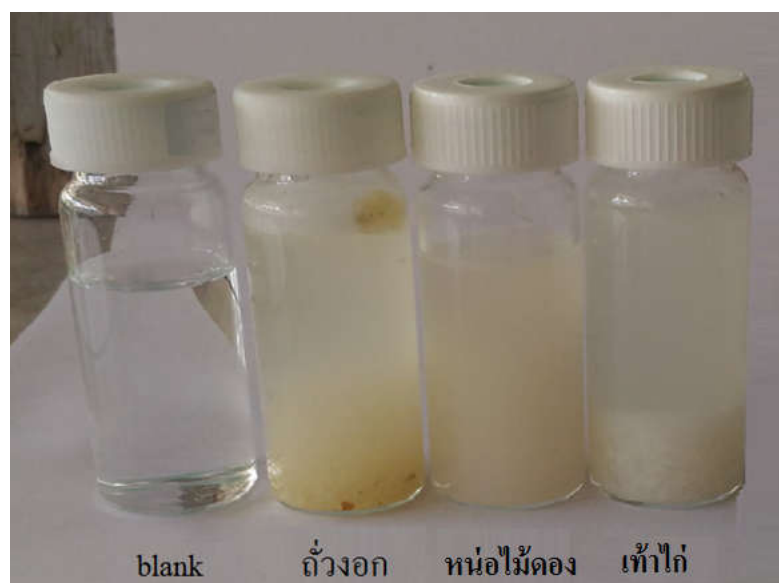


ภาพภาคผนวก ค-3 สารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์

2. การวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่างอาหาร



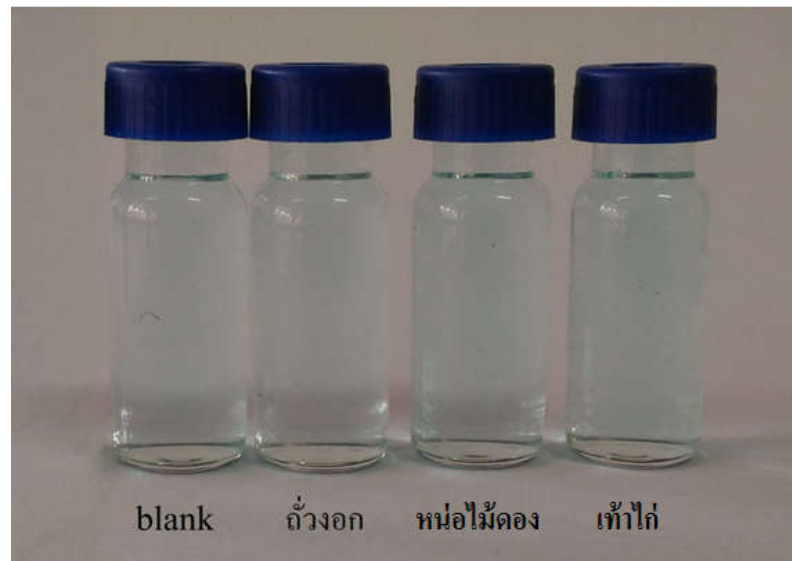
ภาพภาคผนวก ค-4 ตัวอย่างอาหารบดละเอียดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพภาคผนวก ค-5 ตัวอย่างอาหารบดละเอียดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์หลังเกิดปฏิกิริยาเคมี



ภาพภาคผนวก ค-6 ลักษณะของกระดาษทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์หลังเกิดปฏิกิริยาเคมี



ภาพภาคผนวก ค-7 สารละลายคอปเปอร์(II)ซัลเฟตที่เหลือหลังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ไฟต์ในตัวอย่างอาหาร