



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช

Determination of heavy metals in drinking water

of schools in Nakhon Si Thammarat

เบญจวรรณ นิลวงศ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ประจำปีงบประมาณ 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุน แนะนำ และสร้างแรงบันดาลใจให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ นางสาวอาชีชะห์ ดอเลาะ นางสาวสุนิศา เม้าะสนิ นางสาวจूरรัตน์ จันจรา และนางสาวปราณี ดาวดึง นักศึกษาสาขาวิชาเคมี ในการช่วยให้งานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราชทั้ง 21 แห่ง ที่ให้การอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำดื่ม

เบญจวรรณ นิลวงศ์

ชื่อโครงการวิจัย	การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช (Determination of heavy metals in drinking water of schools in Nakhon Si Thammarat)
ผู้ทำวิจัย	นางสาวเบญจวรรณ นิลวงศ์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในน้ำดื่มด้วยอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ อุปกรณ์ที่สร้างโดยการสกรีนด้วยเทียนและออกแบบให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและมีความจำเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในระดับมิลลิกรัมต่อลิตร อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษจะกำหนดส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ บริเวณตรวจวัดจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างนิกเกิล(II) กับ Dimethylglyoxime (DMG) เกิดเป็นสีชมพู ส่วนอลูมิเนียม(III) จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงเกิดเป็นสีน้ำเงิน และเหล็ก(II) จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับ 1,10-phenanthroline ให้สีส้มแดง บันทึกผลการทดลองด้วยเครื่องสแกนเนอร์และหาความเข้มข้นเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทา ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมกราฟมาตรฐานของนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) อยู่ในช่วงความเข้มข้น 1–15 mg/L ($R^2=0.9985$) 0.05–15 mg/L ($R^2=0.9952$) และ 0.005–1.0 mg/L ($R^2=0.9978$) ตามลำดับขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) ของนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) เท่ากับ 1, 0.05 และ 0.005 mg/L ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษมีความเที่ยงสูง มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วง 0.48–3.12 % สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในน้ำดื่มของโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราชได้ ซึ่งจากการตรวจวัดการปนเปื้อนของโลหะนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) พบว่าตรวจไม่พบโลหะทั้งสามชนิด ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (% Recovery) อยู่ในช่วง 84–120 % เมื่อเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธี Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) ทั้งสองวิธีให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t-test) ดังนั้นวิธีนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ที่สามารถทำได้รวดเร็ว ย่อยสลายได้ดี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
การสืบค้นข้อมูล	3
วัตถุประสงค์ของโครงการ	7
ขอบเขตของโครงการวิจัย	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎี	
ลิแกนด์	8
ทฤษฎีแสง	12
Colorimetric method	16
อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ (Lab-on-paper)	16
หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES	17
การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation)	17
บทที่ 3 การทดลอง	
เครื่องมือและอุปกรณ์	20
สารเคมี	21
การเตรียมสารละลาย	21
การเตรียมแผ่นฟิล์มต้นแบบ	26
การเตรียมรูปแบบของไหลบนกระดาษ	27
การสูมตัวอย่างน้ำดื่ม	27
ขั้นตอนการวิเคราะห์	28

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
การศึกษาลิแกนด์สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก	33
การออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	35
ลักษณะของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	37
สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	39
การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve method)	41
ผลของสารรบกวน	47
การตรวจวัดโลหะในตัวอย่างไม่ดื่ม	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการทดลอง	59
ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	63
ประวัติผู้วิจัย	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	เปอร์เซ็นต์การคืนกลับของสารวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	18
2.2	ค่าความเที่ยงเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารวิเคราะห์	19
3.1	ปริมาณที่ใช้เตรียมนิกเกิลความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L	22
3.2	ปริมาณของสารละลายนิกเกิลผสมกับสารรบกวน	23
3.3	ปริมาณที่ใช้เตรียมอลูมิเนียมความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L	23
3.4	ปริมาณของสารละลายอลูมิเนียมผสมกับสารรบกวน	24
3.5	ปริมาณที่ใช้เตรียมสารละลายเหล็กมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 mg/L	25
4.1	ผลการทดลองของลิแกนด์จากธรรมชาติที่ทดสอบกับโลหะต่างๆ และ pH	34
4.2	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษต่อการวิเคราะห์นิกเกิล(II)	39
4.3	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษต่อการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III)	40
4.4	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษต่อการวิเคราะห์เหล็ก(II)	41
4.5	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานนิกเกิลที่ความเข้มข้น 5, 15 และ 35 mg/L	45
4.6	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 25, 35 และ 50 mg/L	46
4.7	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.4 และ 1.0 mg/L	47
4.8	สารรบกวนที่มีผลต่อการเกิดสีของนิกเกิล(II)	48
4.9	สารรบกวนที่มีผลต่อการเกิดสีของอลูมิเนียม(III)	49
4.10	การเปรียบเทียบระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (ICP-OES)	51
4.11	การเปรียบเทียบระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (UV-Vis)	51
4.12	พีเอชของน้ำดื่มในโรงเรียน	52
4.13	แสดงผลการตรวจวัดนิกเกิล(II)	53
4.14	แสดงผลการตรวจวัดอลูมิเนียม(III)	55
4.15	แสดงผลการตรวจวัดเหล็ก(II)	57

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สามเหลี่ยมสี (CIE)	12
2.2 ฮีสโทแกรมที่เปิดรับแสงถูกต้อง	13
2.3 ฮีสโทแกรมที่เปิดรับแสงถูกต้องทุกรายละเอียด	14
2.4 ฮีสโทแกรมที่เปิดรับแสงน้อยลง	14
2.5 ฮีสโทแกรมที่เปิดรับแสงน้อยมากๆ	14
2.6 อุณหภูมิสีในแต่ละสภาพแวดล้อม	15
2.7 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	16
3.1 บล็อกสำหรับสกรีนเทียน	20
3.2 การออกแบบร่องการไหล	26
3.3 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่ได้จากการสกรีนด้วยเทียน	27
3.4 การวัดค่าความเข้มสีในโปรแกรม Image J	30
4.1 ปฏิกริยาระหว่างโลหะต่างๆ กับ dimethylglyoxime	33
4.2 ความแตกต่างระหว่างเหล็ก(III) และเหล็ก(II) ทำปฏิกริยากับ 1,10-phenanthroline	34
4.3 ผลการทดลองของลิแกนด์จากธรรมชาติที่ทดสอบกับโลหะต่างๆ และ pH	35
4.4 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	36
4.5 แบบที่ใช้พิมพ์บนกระดาษลอกลาย	36
4.6 รูปแบบของบล็อกสกรีนที่ใช้สร้างอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	37
4.7 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่ผ่านการสกรีนด้วยเทียน	37
4.8 โครงสร้างของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	38
4.9 ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) กับส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) บนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ	38
4.10 ปฏิกริยาของนิกเกิล(II) กับ Dimethylglyoxime ในรูปของสารเชิงซ้อน $Ni(dmg)_2$ จะเกิดเป็นสีชมพู	39
4.11 ปฏิกริยาของเหล็ก(II) กับ 1,10-phenanthroline ในรูปของสารเชิงซ้อน $[Fe(phen)_3]^{2+}$ จะเกิดเป็นสีส้มแดง	40
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) ในช่วงความเข้มข้น 1 – 15 mg/L	42
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) ในช่วงความเข้มข้น 0.05 – 15 mg/L	42

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) ในช่วงความเข้มข้นต่ำ 0.005 – 1 mg/L	43
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) ในช่วงความเข้มข้นสูง 1 – 9 mg/L	43
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของนิกเกิล(II)	48
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอลูมิเนียม(III)	49
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเหล็ก(II)	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

น้ำเป็นสิ่งจำเป็น เพราะมนุษย์ต้องนำน้ำไปใช้ในการดำรงชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะน้ำดื่มต้องเป็นน้ำที่สะอาดมีคุณภาพ มิฉะนั้นจะก่อให้เกิดโทษต่อร่างกาย น้ำดื่มที่ใช้ในครัวเรือนจะมีการดูแลและควบคุมมากกว่าน้ำดื่มที่ใช้บริโภคในชุมชน เช่น โรงเรียน ซึ่งการดูแลอาจจะน้อยกว่า เพราะขาดคน หรืองบประมาณ จึงมีโอกาสสูงที่เด็กนักเรียนจะบริโภคน้ำที่ไม่มีคุณภาพ แล้วเกิดการสะสมของโรคต่างๆ ตามมา คุณภาพน้ำดื่มในโรงเรียนส่วนใหญ่ยังไม่ดีพอ จากรายงานผลสำรวจพบว่าน้ำจากทุกแหล่งยังผ่านมาตรฐานไม่ครบร้อยละเจ็ดสิบห้า สาเหตุของน้ำที่ไม่ได้มาตรฐานเนื่องจากมีเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อนเกินมาตรฐาน มีการปนเปื้อนด้วยสารเคมี ได้แก่ แคดเมียม เหล็ก ตะกั่ว แมงกานีส และมีปัญหาทางกายภาพไม่เหมาะสม คือ มีความขุ่นและสีเกินมาตรฐาน

เหล็ก (Iron) เป็นโลหะที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ เช่น น้ำ การปนเปื้อนในอาหาร ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตมนุษย์ เพราะเราไม่สามารถที่จะขาดอาหารได้ในการดำรงชีวิต อาหารที่รับประทานเข้าไปถึงแม้ว่าเราจะดูด้วยตาว่าอาหารนี้สะอาดแต่แท้ที่จริงแล้วอาจมีสารปนเปื้อนที่ไม่ปลอดภัยในการนำมาอุปโภคบริโภคจึงควรที่จะมีการปรับปรุงคุณภาพเสียก่อน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานอาหารทะเลบริโภคคุณภาพอาหารทะเลที่เหมาะสมกับการบริโภค ควรเป็นน้ำที่ปราศจากสี กลิ่น รส ความขุ่น สารพิษ เชื้อโรค และมีปริมาณเกลือแร่ที่เหมาะสม ดังนั้นการตรวจคุณภาพน้ำที่ใช้ในการบริโภค ต้องตรวจลักษณะทางกายภาพ เคมี สารพิษ และแบคทีเรีย มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อบริโภค ซึ่งกำหนดโดยประกาศกระทรวงสาธารณสุข (2524) เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะที่ปิดสนิทและประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2521) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (มอก.257-2521) กำหนดให้มีปริมาณเหล็กในน้ำดื่มไม่เกิน 0.3 mg/L

นิกเกิล (Nickel) เป็นโลหะมีสีเทาเงิน^[1] มีความคล้ายคลึงกับเหล็กด้านความแข็งแรงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีคล้ายทอง โดยส่วนใหญ่จะถูกใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมมากกว่า มีการค้นพบในภายหลังว่ามีประโยชน์ในด้านโภชนาศาสตร์ แต่มีประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับแร่ธาตุอื่นๆ และยังเป็นโลหะที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ เช่น น้ำ เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต แต่ในปัจจุบัน น้ำกลับเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในปัญหามลพิษทางสภาวะแวดล้อมเพราะน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีจึงอาจมีสารพิษละลายปนอยู่ ปัจจุบันการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำมีความสำคัญมากเนื่องจากในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนืออุตสาหกรรมเกิดขึ้นมากมาย มีโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตประเภทต่างๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการปล่อยโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ จึงมีความจำเป็นจะต้องตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก คุณภาพน้ำเพื่อบริโภค ซึ่งกำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (2539) เรื่องมาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค (2539) กำหนดให้มีปริมาณนิกเกิลในน้ำดื่มไม่เกิน 0.02 mg/L^[2]

อลูมิเนียม (Aluminium) เป็นโลหะที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย^[3] มีทั้งที่เป็นโลหะชนิดเดียวและที่อยู่ในรูปของโลหะผสม ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือและอุปกรณ์หลายๆชนิด อาทิเช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องใช้ในครัวเรือน ส่วนประกอบของเครื่องบินในชีวิตประจำวัน เราอาจไม่รู้เลยว่าขณะนี้ อาหารที่เรารับประทานหรือผลิตภัณฑ์ที่เราใช้อยู่มีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ เพราะแม้แต่ในยาลดกรดในกระเพาะอาหาร (Antacid) ยาแอสไพรินแก้ปวดก็มีส่วนผสมเป็นอลูมิเนียม ขนมอบางชนิด เช่น โดนนัท วาฟเฟิล มัฟฟิน (ในขนมเหล่านี้จะใช้เกลือโซเดียมอลูมิเนียมฟอสเฟต) สีสผสมอาหาร ยาสีฟันโดยเฉพาะชนิดที่ทำให้ฟันขาว สารระงับเห็บเหอ หรือแม้แต่ในน้ำที่มีการเติมอลูมิเนียมซัลเฟตเพื่อทำให้น้ำใสขึ้น และภัยมืดที่เรามักมองข้ามไป คือภาชนะที่เราใช้ประกอบอาหาร เช่น กระทะ หม้อ ซึ่งถ้าเรานำภาชนะเหล่านี้มาประกอบอาหารนั้นหมายถึงการปนเปื้อนของโลหะอลูมิเนียมในอาหารที่เรารับประทาน หรือแม้แต่การใช้ฟอยด์อลูมิเนียมห่ออาหาร เช่น การเผาอาหารทะเล หรือการอบขนมหวาน และในอุตสาหกรรมน้ำอัดลมและนมก็มีการใช้กระป๋องหรือกล่องบรรจุที่มีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ จะเห็นว่าเรามีโอกาสที่จะได้รับหรือสัมผัสกับโลหะชนิดนี้ได้หลายทางด้วยกันถึงแม้ว่าอลูมิเนียมจะมีอันตรายน้อยกว่าสารปรอท ตะกั่ว แคดเมียม สารหนูก็ตาม แต่การได้รับสารประเภทนี้เป็นประจำจะเกิดการสะสมในร่างกายและเกิดการสลายที่ค่อนข้างช้ากว่าโลหะชนิดอื่น ดังนั้นทางที่ดีที่สุดคุณควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสหรือได้รับสารที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ จึงมีความจำเป็นจะต้องตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก คุณภาพน้ำเพื่อบริโภค ซึ่งกำหนดโดยโดยองค์การอนามัยโลก (2539) เรื่องมาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค (2539) กำหนดให้มีปริมาณอลูมิเนียมในน้ำดื่มไม่เกิน 0.2 mg/L^[4]

เทคนิคทั่วไปที่ใช้วิเคราะห์โลหะหนักมีหลายวิธีเช่นเทคนิค Atomic absorption spectrometry (AAS)^[6], Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES), Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) และ Anodic stripping voltammetry (ASV) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ต้องใช้ความชำนาญสูงและต้องเสียค่าใช้จ่ายมากในการวิเคราะห์ตัวอย่างนอกจากนี้การคิดค้นพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและสามารถพกพาได้สะดวก อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ Lab-on-paper เป็นอีกเทคนิคหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเพราะนอกจากจะประดิษฐ์ขึ้นได้ง่ายแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์สารได้หลายชนิดในอุปกรณ์ชิ้นเดียวและสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณสารที่ใช้วิเคราะห์ใช้ใน ระดับไมโครลิตร สร้างจากวัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูก ย่อยสลายได้ดีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม^[7]

การคิดค้นพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถพกพาได้สะดวกนั้นเริ่มมีการให้ความสนใจมากขึ้น อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ (lab-on-paper) ก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้ง่ายแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์สารได้หลายชนิดในอุปกรณ์ชิ้นเดียว มีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ และปริมาณสารที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในระดับไมโครสเกลอีกด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์นี้ทำจากวัสดุกระดาษซึ่งหาได้ง่าย มีราคาถูก และย่อยสลายได้ดีไม่รบกวนต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์โลหะหนัก ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษและเทคนิคสเปกโทรเมตรี ในตัวอย่างน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อ

ใช้เป็นข้อมูลยืนยันความปลอดภัย หรือเป็นข้อมูลในการนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพน้ำในโรงเรียน รวมทั้งสามารถบูรณาการงานวิจัยกับการเรียนการสอน และการบริการวิชาการ ให้นักศึกษาสามารถเรียนรู้กระบวนการวิจัยร่วมกับการถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 การสืบค้นข้อมูล

ในปี ค.ศ. 2007 Whitesides และคณะ^[10] เป็นผู้บุกเบิกและออกแบบ hydrophilic paper substrate สามารถวิเคราะห์และตรวจวัดบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ซึ่งอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่มีบริเวณตรวจวัด 3 ช่อง สำหรับการไหลของ substrate เพราะเส้นใยเซลลูโลสเป็นไฟเบอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเชื่อมการไหลได้เช่นเดียวกับหลอดแคปิลารีที่ทำหน้าที่ดูดของเหลว ช่องที่ปรากฏบนกระดาษจะถูกกั้นด้วยวัสดุที่ไม่ชอบน้ำที่เป็นไขเพื่อสร้างขอบเขตการไหลในระดับไมโครลิตร กระดาษจะเป็นตัวดึงดูด substrate ที่ไหลบนอุปกรณ์ ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อดีหลายอย่างคือ ราคาไม่แพง ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ใช้งานง่าย วิเคราะห์ได้มาก มีช่องการไหลบนกระดาษสำหรับการตรวจวัดสีในช่วงที่สายตามองเห็น และง่ายสำหรับการปฏิบัติงานทางเคมี

ในปี ค.ศ. 2008 Li และคณะ^[11] ได้เสนอเทคนิคการพิมพ์บนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ โดยให้พื้นผิวกระดาษเป็นแบบไฮโดรโฟบิก และทำร่องการไหลแบบไฮโดรฟิลิก ซึ่งใช้เยื่อหุ้มเซลล์เป็นส่วนประกอบประโยชน์หลักของเทคนิคนี้คือรูปแบบการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการขนส่ง และวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษนี้ใช้เยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งมีประโยชน์มากในการออกแบบตัวกีดขวาง โดยอาศัยฟังก์ชันง่ายๆ เช่น การสลับสับเปลี่ยน การกรอง การแยก ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยพัฒนาอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษในขั้นสูงๆ ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2009 Dungchai และคณะ^[12] ได้นำเทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามาใช้หาปริมาณกลูโคส ยูริก และแลคเตส ซึ่งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่จะใช้กับอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย รวดเร็วและมีความไวในการตรวจวัดสูง เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าหลายเทคนิคสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์นี้ได้เช่น เทคนิคแอนดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เทคนิคแอมเพอโรเมตรี (โดยสามารถเลือกเทคนิคในการตรวจวัดที่เหมาะสมกับสารในแต่ละกลุ่ม) การสร้างขั้วไฟฟ้าบนกระดาษนั้นใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สกรีน ซึ่งหมึกชนิดที่เหมาะสมกับการทดลองและคุณสมบัตินำไฟฟ้าจะถูกสกรีนลงบนวัสดุด้วยแรงกดผ่านแบบพิมพ์ให้เป็นรูปแบบที่ต้องการลงบนแผ่นวัสดุ จากนั้นนำไปอบด้วยความร้อน โดยการทดลองนี้หมึกที่นำไฟฟ้าจะถูกสกรีนลงบนแผ่นกระดาษที่สร้างรูปแบบการไหล

ในปี ค.ศ. 2010 Wijitar และคณะ^[13] ได้พัฒนาอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษโดยจะมีตัวกำหนดการเกิดสีหลายๆ ชนิดสำหรับการตรวจวัด Lactate, Uric acid และ Glucose ในการใช้ตัวกำหนดการเกิดสีหลายๆ ชนิด เพื่อให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ส่วนสารที่มีความเข้มข้นต่างกันสามารถแยกสีกันได้ชัดเจน ตามทฤษฎีของ Derices based ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอินดิเคเตอร์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Hydrogen peroxide โดยจะใช้สารผสมของ 4-aminoantipyrine และ 3,5-dichloro-2-hydroxy-benzenesulfonic acid, o-dianisidinedihydrochloride, potassium

iodide, acid black และ acid yellow ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์สำหรับให้เกิดสีของการตรวจวัด Lactate, Uric acid และ Glucose การพัฒนาวิธีนี้จะใช้ปริมาณ Glucose (0.5-20 mM), ปริมาณของ Lactate (1-25 mM) และปริมาณของ Uric acid (0.1-7 mM) ผลของการเปรียบเทียบอินดิเคเตอร์หลายตัวกับอินดิเคเตอร์ตัวเดียวจะใช้ Untrained readers เป็นการพิสูจน์เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ในปี ค.ศ. 2011 Temsiri Songjaroen และคณะ^[14] ได้พัฒนาอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษซึ่งเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งสำหรับการทำที่ง่ายและต้นทุนต่ำ รวมทั้งสามารถนำมาใช้แบบพกพาได้ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งเหมาะกับการใช้งานทางคลินิก wax dipping เป็นวิธีการใหม่สำหรับอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ แม่พิมพ์เหล็กสำหรับ wax dipping ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการตัดแบบเลเซอร์ รูปแบบการออกแบบเปเปอร์จะจุ่มลงในขี้ผึ้งที่ละลาย ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมอยู่ในช่วง 120-130 °C และเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มอยู่ที่ 1 วินาที กระบวนการสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษจะเสร็จสิ้นภายใน 1 นาที โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือตัวทำละลายอินทรีย์ใดๆ ช่องของส่วนที่ขอบน้ำที่เล็กที่สุด คือ ที่สร้างโดยวิธี wax dipping ที่มีขนาด $639 \pm 7 \mu\text{m}$ การวิเคราะห์ซ้ำของตัวอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษที่บริเวณช่องของส่วนที่ขอบน้ำหรือบริเวณทดสอบเท่ากับ 1.48 % และบริเวณทดสอบตัวอย่างเท่ากับ 6.3 % สำหรับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษสามารถที่จะตรวจวัดสีของ Glucose และ Protein ได้แบบพร้อมๆ กันในตัวอย่างจริง โดยใช้เอนไซม์ และ bromocresol green ในการตรวจวัด glucose และ protein เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนากับวิธีดั้งเดิม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ ดังนั้นการสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ โดยวิธี wax dipping จึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการผลิตอุปกรณ์บนกระดาษ

ในปี ค.ศ. 2012 Amara และคณะ^[15] ได้เสนอเทคนิคการวิเคราะห์อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษอนุภาคนาโน เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องมือใหม่ที่ง่ายและรวดเร็วสำหรับการตรวจวัดวิเคราะห์ Hg (II) ซึ่งผลของการวัดด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสามารถที่จะวิเคราะห์ Hg(II) ได้เพียงแค่ 2 μL ของสารละลายตัวอย่าง และสีของ silver nano ที่บริเวณใช้ทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีเมื่อมี Hg(II) และสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า วิธีการวิเคราะห์นี้มีความจำเพาะเจาะจงกับ Hg(II) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ นอกจากนี้สัญญาณของการวิเคราะห์ Hg(II) จะเพิ่มขึ้น โดยการเติม Cu(II) ในบริเวณทดสอบที่มี Ag Nanoplates ในการทำปริมาณวิเคราะห์ สามารถทำได้โดยการถ่ายภาพและใช้โปรแกรมประมวลผล เทคนิคนี้มีค่าความเป็นเส้นตรงอยู่ในระดับความเข้มข้นอยู่ที่ 5-75 mg/L ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด Hg(II) อยู่ที่ 0.12 mg/L เทคนิคนี้สามารถหยดสารละลายตัวอย่างได้แค่ 2 μL ในบริเวณทดสอบ ทำให้ขีดจำกัดของอาหารตรวจวัดลดลงถึงระดับ 2 $\mu\text{g/L}$ ดังนั้นเทคนิคนี้เป็นการศึกษาวิธีการทดสอบที่ง่ายและรวดเร็วที่สามารถวิเคราะห์ Hg(II) ในน้ำและเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม

ในปี ค.ศ. 2012 Mallory M.Mentele และคณะ^[16] ได้คิดค้นอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ (μPAD) สร้างโดยการพิมพ์ด้วยไซ วิธีนี้มีการออกแบบเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและเฉพาะเจาะจงของอนุภาคโลหะในระดับไมโครลิตร โดยเติมกรดในบริเวณที่ทำการเจาะ

จากนั้นระเหยแห้งเพื่อกรองตัวอย่าง ส่วนที่เจาะของอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษที่ทำการย่อยโลหะเป็นการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณตรวจวัดที่จุดสะสมเมื่อเติมน้ำ ส่วนบริเวณจุดสะสมจะบรรจุสารละลายที่ทำให้เกิดสีสำหรับการตรวจวัด Fe, Ni, และ Cu บัพเฟอร์ถูกใช้สำหรับสภาวะที่เหมาะสมของ pH สำหรับการตรวจวัดที่จุดสะสม ในขณะที่การเกิดสารเชิงซ้อนจะอยู่ในช่องระหว่างตัวอย่างและบริเวณตรวจวัดเพื่อเป็นการลดสารรบกวน ความเข้มข้นของโลหะจะวิเคราะห์จากภาพที่มีความเข้มข้นของสีโดยใช้เครื่องสแกนต่อเข้ากับโปรแกรมประมวลผลรูปภาพ จะได้สมการความเป็นเส้นตรงของโลหะแต่ละตัวและขีดจำกัดของวิธีการตรวจวัดอยู่ที่ 1.0–1.5 μg สุดท้ายกราฟมาตรฐานของตัวอย่างซีเอ็นทีที่เป็นแอร์โซลที่สะสมบนกระดาษกรองและวิเคราะห์สารที่สนใจ 3 ตัว Fe, Ni, และ Cu การวิเคราะห์การสะสมของตัวอย่างแอร์โซลโดยใช้อุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษแสดงถึงความเที่ยงที่ดี เทคโนโลยีนี้สามารถทำได้รวดเร็วในการวิเคราะห์อนุภาคของโลหะและตรวจวัดความเข้มข้นหรือที่ระดับต่ำของอนุภาคโลหะได้ รวมทั้งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ในปี ค.ศ. 2013 P. Nalawade , S. Kapoor^[17] ได้ทำการวิเคราะห์วิธีการตรวจวัดทางแสงของปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคทองระดับนาโนรูปดอกไม้ของ Hg(II) และ Pb(II) ได้ถูกรายงานขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ หลังจากเกิดปฏิกิริยาอนุภาคทองระดับนาโนรูปดอกไม้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีแดงไวน์ อนุภาคทองระดับนาโนรูปดอกไม้สามารถวิเคราะห์ Hg(II) และ Pb(II) ได้ในช่วงความเข้มข้น 1.0×10^{-6} และ 1.0×10^{-5} M ตามลำดับ เวลาที่ตอบสนองของอนุภาคระดับนาโนรูปดอกไม้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน ถ้าโลหะไอออน Hg(II) และ Pb(II) ที่ผสมอยู่ในสารละลายอนุภาคทองระดับนาโนรูปดอกไม้สีของสารละลายจะเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-6} M โลหะทั่วไปถูกนำมาทดสอบเพื่อหาว่าในสารละลายมีตัวรบกวนหรือไม่ สำหรับการวิเคราะห์ Hg(II) และ Pb(II) โดยความเข้มข้นของแต่ละโลหะที่นำมาศึกษาจะต้องมีความเข้มข้น 1.0×10^{-5} M ซึ่งปรากฏว่าโลหะตัวอื่นๆ จะไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} M ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิธีการตรวจวัด Hg(II) และ Pb(II) ที่ความเข้มข้นสูงในตัวอย่างน้ำ ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ได้จากห้องปฏิบัติการโดยไม่มีกรปรับสภาพและไม่มีกรเตรียม อนุภาคทองระดับนาโนรูปดอกไม้ที่เตรียมสามารถนำมาใช้ได้เป็นเวลา 3 เดือน

ในปี ค.ศ. 2013 Anob Kantacha และคณะ^[18] ได้ทำการสังเคราะห์และคุณลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนเหล็กและสังกะสีกับลิแกนด์มัลติเดนเตต โดยทำการศึกษารูปประกอบเชิงซ้อนโลหะคู่ Fe(III)-Fe(II) และ Fe(III)- Zn(II) ถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาของลิแกนด์ H2L กับเกลือของเหล็ก (III) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ในตัวทำละลายเมทานอล และโซเดียมอะซิเตตไตรไฮเดรต ที่อุณหภูมิห้อง(เมื่อ H2L คือ เมทิล-2-[(2-ไฮดรอกซิล-5-เมทิล-3-(((2-อะมิโน-2-ออกโซเอทิล) ฟิรีดิน-2-อิลเมทิลอะมิโน)เมทิล)เบนซิล)(2-ไฮดรอกซิลเบนซิล)อะมิโน]-อะซิเตต ได้สารประกอบเชิงซ้อน(1) ส่วนสารประกอบเชิงซ้อน (2) เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาเดียวกันแต่ใช้เกลือสังกะสี(II) อะซิเตตไตรไฮเดรต ศึกษาคุณลักษณะโดยอินฟราเรด ยูวี-วิสิเบิลและแมสสเปกโตรเมตรี พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนโลหะคู่ Fe(III)-Fe(II) และ Fe(III)- Zn(II) มีสูตรทางเคมี คือ $[\text{Fe}^{2+}(\text{L})(\mu\text{-O})(\text{H}_2\text{O})_2](\text{ClO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1) และ $[\text{Fe}^{2+}\text{Zn}^{2+}(\text{L})(\mu\text{-O})(\mu\text{-OH})(\text{OAc})_2](\text{ClO}_4)_2$ (2) ตามลำดับ ทั้งสารประกอบเชิงซ้อน (1) และ (2) มีรูปร่างโมเลกุลที่คาดหวังเป็นรูปทรงเหลี่ยมแปดหน้าทึบเปียว

ในปี ค.ศ. 2013 A. Panada และคณะ^[19] การพัฒนาเทคนิคสำหรับการตรวจวัดวินิจฉัยโรคที่เรียกว่า ไบโอะเซนเซอร์ ในปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยและนักประดิษฐ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการจากวิธีเดิมเช่น เทคนิค GC, HPLC, microsphere-based arrays, radioimmunoassay (RIA) และ ELISA ยังมีข้อจำกัดในด้านระยะเวลา การตรวจวัด ค่าใช้จ่าย ขั้นตอนที่ยุ่งยากและเกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีอันตราย เป็นต้น นอกจากนี้การพัฒนาชุดทดสอบอย่างง่าย (test strip) เช่น ชุดตรวจการตั้งครรภ์ ซึ่งสามารถใช้ได้ง่ายและสะดวก แต่ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ สำหรับการตรวจวัดเพื่อวินิจฉัยโรคหรือสารเคมีบางชนิด บางครั้งจำเป็นที่จะต้องตรวจวัดเชิงปริมาณเพื่อบ่งบอกความแตกต่างของระดับสารได้แม้ในปริมาณที่น้อยหรือสามารถบ่งชี้โรคได้ในระยะปฐมภูมิ เช่น สาร fetoprotein ในครรภ์มนุษย์ ตัวบ่งชี้มะเร็งระดับปฐมภูมิและ carcinoembryonic ตัวบ่งชี้มะเร็งลำไส้ เป็นต้น เพื่อเป็นการปรับปรุงข้อบกพร่องดังกล่าว จึงได้มีการปรับปรุงและพัฒนางานด้านไบโอะเซนเซอร์หรือชุดตรวจขนาดเล็กที่มีความไวสูงอย่างต่อเนื่อง

ในปี ค.ศ. 2013 R. Patsuda และคณะ^[20] การพัฒนาไบโอะเซนเซอร์แบบกระดาษสู่ระบบการวินิจฉัยโรคใกล้ชิดผู้ป่วย โดยใช้กระดาษเป็นวัสดุยึดเกาะสำหรับไบโอะเซนเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างขนาดเล็กแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยไบโอะเซนเซอร์แบบกระดาษจะถูกพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์และวินิจฉัยโรคได้หลากหลาย โดยการปรับเปลี่ยนตัวตรวจจับที่เป็นสารชีวภาพและตัววัดสัญญาณ ไบโอะเซนเซอร์สามารถออกแบบเป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่สามารถพกพาไปใช้นอกห้องปฏิบัติการหรือภาคสนามได้ และในทางการแพทย์ได้มีการพัฒนาไบโอะเซนเซอร์ให้ผู้ใช้สามารถอ่านวิเคราะห์ผลได้ด้วยตนเองที่บ้านโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อการรายงานผลการวินิจฉัยโรค และเพื่อเพิ่มศักยภาพของไบโอะเซนเซอร์แบบกระดาษทดแทนเครื่องมือในรูปแบบเดิมที่มีขนาดใหญ่ ราคาแพง นำเข้าจากต่างประเทศลดข้อจำกัดของผู้เชี่ยวชาญในการอ่านผลการวิเคราะห์ เป็นประโยชน์สำหรับระบบการวินิจฉัยโรคใกล้ชิดผู้ป่วยเป็นระบบที่จะยกระดับการสาธารณสุขของประเทศให้เข้าถึงประชาชนทั่วไปหรือที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลได้มีสุขภาพที่ดี

ในปี ค.ศ. 2014 W. Khaodee^[21] การตรวจวัด Cu(II), Pb(II), Al(III) และ Fe(III) โดยใช้ cyaniding ในการตรวจวัดปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์ cyanidin จะสกัดได้จากกะหล่ำปลีสีแดงซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นของไทย การตรวจวัดด้วยวิธีการนี้จะใช้ pH ของสารละลาย cyanidin ร่วมกับ masking agents เป็นตัวควบคุม ซึ่งการตรวจวัด Cu(II), Pb(II), Al(III) และ Fe(III) จะเกิดการเปลี่ยนสีที่ pH7, pH6, pH5 และ pH4 ตามลำดับ ร่วมกับการใช้ KF, DMG และส่วนผสมระหว่าง KF กับDMG เป็น masking agents ในการตรวจวัด Fe(III), Al(III), และ Pb(II) ผลที่ได้จะสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ inductively coupled plasma (ICP) พบว่าผลที่ได้ไม่แตกต่างกัน การใช้ cyanidin จะสามารถตรวจวัด Cu(II), Pb(II), Al(III) และ Fe(III) ได้พร้อมกันในครั้งเดียว และจะใช้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจวัดที่ 50, 80, 50 และ 200 μM ตามลำดับ ที่ pH ต่างกันเล็กน้อย ยิ่งกว่านี้วิธีนี้ยังสามารถนำมาใช้กับตัวอย่างน้ำได้ง่าย รวดเร็ว ค่าใช้จ่ายน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้เทคนิคอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษร่วมกับการตรวจวัดสีและเทคนิคทางสเปกโทรเมตรี
- 2) เพื่อส่งเสริมและถ่ายทอดให้แก่นักศึกษาได้เรียนรู้กระบวนการวิจัยอย่างเป็นระบบ

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ เพื่อวิเคราะห์โลหะหนัก ศึกษาภาวะที่เหมาะสม และทดสอบประสิทธิภาพเชิงปริมาณวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้น เช่น ช่วงความเป็นเส้นตรง ขีดจำกัดของการตรวจวัด ความเที่ยงและความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ และยืนยันผลการทดลองด้วยเทคนิคสเปกโทรเมตรี รวมทั้งนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช อีกทั้งถ่ายทอดงานวิจัยผ่านทางวิชาโครงงานวิจัยสู่ นักศึกษาสาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเทคนิคอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษร่วมกับการตรวจวัดสี และเทคนิคทางสเปกโทรเมตรีมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราชได้ รวมทั้งสามารถถ่ายทอดกระบวนการวิจัยแก่นักศึกษา เพื่อพัฒนาศักยภาพด้านการวิจัยได้อย่างเป็นระบบ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลิแกนด์

2.1.1 ความหมายของลิแกนด์

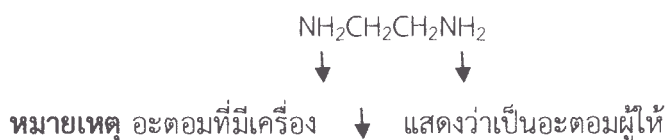
ลิแกนด์ หมายถึง โมเลกุลหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดพันธะจำนวนมาก เมื่อลิแกนด์เกิดพันธะกับอะตอมกลางก็จะนำอิเล็กตรอนเหล่านั้นมาสร้างพันธะ ลิแกนด์ทำหน้าที่ เป็นเบสของลิวอิส (Lewis base : คือ ตัวที่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่ได้) สำหรับอะตอมกลาง ทำหน้าที่เป็นกรดของลิวอิส (Lewis acid : คือ ตัวที่สามารถรับอิเล็กตรอนคู่ได้)

2.1.2 ชนิดของลิแกนด์

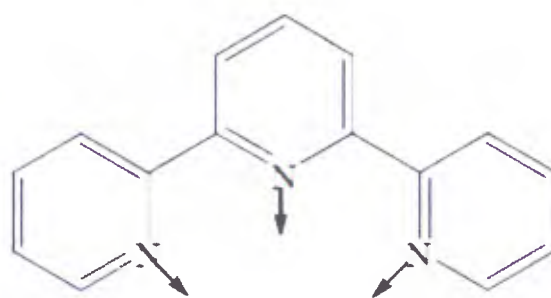
การแบ่งชนิดของลิแกนด์สามารถแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ ได้หลายแบบ แต่ในที่นี้จะจัด แบ่งชนิดของลิแกนด์ตามลักษณะการให้อิเล็กตรอนคู่ของลิแกนด์แก่อะตอมกลางคือ

1. มอโนเดนเทต หรือ ยูนิเดนเทตลิแกนด์ (monodentate or unidentate ligand) หมายถึง ลิแกนด์ที่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่แก่อะตอมกลางได้เพียง 1 คู่เท่านั้น หรืออาจกล่าวว่ามี อะตอมผู้ให้เพียง 1 อะตอม เช่น F^- , Cl^- , Br^- และ I^- ถ้าเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหลายอะตอม เช่น H_2O NH_3 จะมีอะตอมผู้ให้เพียงอะตอมเดียวเช่น H_2O อะตอมผู้ให้คือ O ส่วน NH_3 อะตอมผู้ให้คือ N
2. พอลิเดนเทตลิแกนด์ (polydentate ligand) หมายถึง ลิแกนด์ที่มีอะตอมผู้ให้หลายอะตอมในโมเลกุลหรือกลุ่มไอออนเดียวกัน ลิแกนด์กลุ่มนี้อาจมีชื่อเรียกย่อยไปอีกตามจำนวนอะตอมผู้ให้ ดังนี้

2.1 ไบเดนเทตลิแกนด์ (bidentate ligand) หมายถึง ลิแกนด์ที่มีอะตอมผู้ให้ 2 อะตอม เช่น ethylenediamine : en มี N เป็นอะตอมผู้ให้ 2 อะตอม ดังสูตรต่อไปนี้



2.2 ไตรเดนเทตลิแกนด์ (tridentate ligand) หมายถึง ลิแกนด์ที่มีอะตอมผู้ให้ 3 อะตอม เช่น terpyridine : terpy หรือ tpy ที่มี N เป็นอะตอมผู้ให้ 3 อะตอม ดังสูตรต่อไปนี้

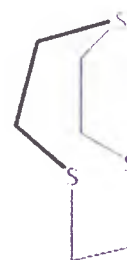


3. แมโครไซคลิกลิแกนด์ (macrocyclic ligand) คือ ลิแกนด์ที่มีอะตอมต่างๆ ต่อกันเป็นวง จำนวนอะตอมภายในวงต้องไม่น้อยกว่า 9 อะตอมและมีอะตอมผู้ให้อย่างน้อย 3 อะตอม

3.1 แมโครไซคลิกไตรเดนเทต (macrocyclic tridentate) เป็นลิแกนด์ที่ต่อเป็น วง ภายในวงมีอะตอมผู้ให้ 3 อะตอม เช่น 1,4,7-triaza cyclononane มี N เป็นอะตอมผู้ให้และ 1,4,7-trithia cyclononane มี S เป็นอะตอมผู้ให้ ดังสูตรต่อไปนี้

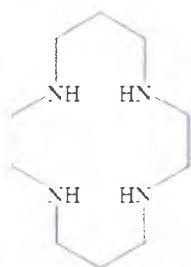


1,4,7-triazacyclononane

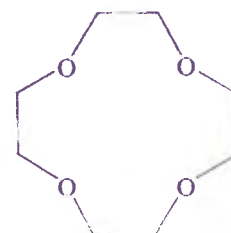


1,4,7-trithiacyclononane

3.2 แมโครไซคลิกเตตระเดนเทต (macrocyclic tetradentate) เป็นลิแกนด์ ที่ต่อ เป็นวง ภายในวงมีอะตอมผู้ให้ 4 อะตอม เช่น cyclam มี N เป็นอะตอมผู้ให้ และ 1,4,7,10-tetraoxa cyclododecane มี O มีอะตอมผู้ให้ ดังสูตรต่อไปนี้

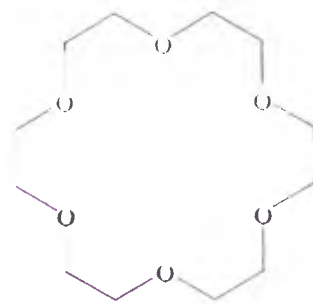


1,4,8,11-tetra-azacyclododecane
(cyclam)



1,4,7,10-tetraoxa cyclododecane

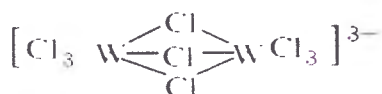
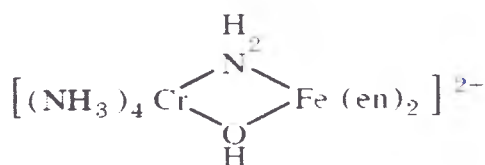
3.3 แมโครไซคลิกเฮกซะเดนเทต (macrocyclic hexadentate) เป็นลิแกนด์ ที่ต่อเป็นวงภายในวงมีอะตอมผู้ให้ 6 อะตอม เช่น 18-crown-6 มี O เป็นอะตอมผู้ให้ (Jones, 2001 : 59) ดังสูตรต่อไปนี้



1,4,7,10,13,16-hexaoxacyclooctadecane (18-crown-6)

4. บริดจิงลิแกนด์ (bridging ligand) คือ ลิแกนด์ที่มีอะตอมผู้ให้ 1 อะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่แก่อะตอมกลาง 2 อะตอมพร้อมกัน มีลักษณะคล้ายสะพาน เช่น OH⁻ NH₂⁻ CO⁻ CN⁻ NO₂⁻ O²⁻ O₂²⁻ Cl⁻ SO₄²⁻ SCN⁻ เป็นต้น

ตัวอย่างการเกิดพันธะของบริดจิงลิแกนด์



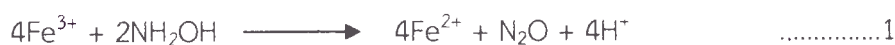
5. แอมบิเดนเทตลิแกนด์ (ambidentate ligand) คือ ลิแกนด์ที่มีอะตอมผู้ให้ มากกว่า 1 อะตอม แต่อะตอมเหล่านั้นไม่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่แก่อะตอมกลางได้พร้อมกัน เช่น

NCS ⁻	อะตอมผู้ให้ คือ N กับ S สามารถสร้างพันธะกับอะตอมกลาง M ได้ดังนี้ M – NCS และ M – SCN
NO ₂	อะตอมผู้ให้ คือ N กับ O สามารถสร้างพันธะกับอะตอมกลาง M ได้ดังนี้ M – NO ₂ และ M – ONO
CN ⁻	อะตอมผู้ให้คือ C กับ N สามารถสร้างพันธะกับอะตอมกลาง M ได้ดังนี้ M – CN และ M – NC

2.1.3 การวัดเหล็กด้วยลิแกนด์ฟีแนนโทรีน

การวัดเหล็กวิธีฟีแนนโทรีนเป็นวิธีที่นิยม อาศัยหลักที่ว่า 1,10-phenanthroline จะรวมกับเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่พีเอชประมาณ 3.2-5.5 เกิดเป็นสารประกอบสีแดงส้ม สีของสารละลายเป็นไปตาม Beer's law ซึ่งกล่าวว่าความเข้มข้นของสีที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาณของสารในสารละลายนั้น ความเข้มของสีที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นอยู่กับพีเอชในช่วง 4-9 และสีของสารละลายนี้จะอยู่ตัวได้นานประมาณ 6 เดือน วัดความเข้มสีได้ด้วยการเปรียบเทียบกับตา หรืออาจใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 510 มิลลิไมครอน

เนื่องจาก 1,10 – phenanthroline ใช้วัดได้เฉพาะ Fe^{2+} ดังนั้นเหล็กอยู่ในรูป Fe^{3+} จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ใน Fe^{2+} ให้หมดโดยใช้ไฮดรอกซิลลามีน (hydroxylamine) ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการ



หลังจากที่พีเอชของสารละลายอยู่ในช่วงพีเอช 3.2-3.3 โดยการเติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (ammonium acetate buffer) ลงไป แล้วจึงตามด้วย 1,10 – phenanthroline พบว่า 3 โมเลกุลของฟีแนนโทรีนจะจับกับ Fe^{2+} 1 โมเลกุลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ดังนี้



ตัวขัดขวางสำหรับวิธีนี้คือ ตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง ไฮยาไนด์ ไนไตรท์ และฟอสเฟต นอกจากนี้พวกโลหะหนัก เช่น โครเมียม สังกะสี (ถ้ามีมากเป็น 10 เท่าของเหล็ก) โคบอลต์และทองแดง (ถ้ามากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) นิเกิล (ถ้ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) บิสมัท แคดเมียมปรอท เงิน และโมลิบดีนัม จะตกตะกอนฟีแนนโทรีน

การต้มกับกรดจะเปลี่ยน poryphosphate ให้เป็น orthophosphate และกำจัดไฮยาไนด์กับไนไตรท์ การเติมไฮดรอกซิลลามีนเพื่อกำจัดค่าผิดพลาดเนื่องจากพวกตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงที่มีอยู่จำนวนมาก ๆ ในกรณีที่มีโลหะหนักซึ่งเป็นตัวขัดขวางมากต้องเติมฟีแนนโทรีนให้มากเกินไปเพื่อให้ไปแทนที่พวกที่ไปจับเป็นสารประกอบกับโลหะหนักเหล่านั้นส่วนใหญ่มักใช้ di-isopropyl ether ก่อนที่จะเติมฟีแนนโทรีน

ถ้าสารตัวอย่างมีสีหรือสารอินทรีย์อยู่มากให้ระเหยตัวอย่างให้แห้ง แล้วละลายตะกอนที่เผาให้เป็นแก้อ่อน ๆ ด้วยกรดในถ้วยระเหย (porcelain crucible)

วิธีนี้ใช้หาตัวอย่างซึ่งมีเหล็กอยู่ในช่วง 0.02 - 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรได้โดยตรง แต่ถ้าความเข้มข้นเหล็กมากกว่านี้ก็ให้ลดปริมาตรตัวอย่างลง

2.2 ทฤษฎีแสง

2.2.1 แสงและสี

แสง เป็นพลังงานรังสี (Radiation Energy) ที่ตารับรู้และมีปฏิกิริยาตอบสนองด้วยกระบวนการวิเคราะห์แยกแยะของสมอง ตาสามารถวิเคราะห์พลังงานแสงโดยการรับรู้วัตถุ สัมพันธ์กับตำแหน่งทิศทางระยะทาง ความเข้มของแสง และความยาวคลื่นที่มองเห็นได้

สีคือลักษณะความเข้มของแสงที่ปรากฏแก่สายตาให้เห็นเป็นสี ผ่านกระบวนการรับรู้ด้วยตาสมองจะรับข้อมูลจากตา โดยที่ตาได้ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแสงมาแล้วผ่านประสาทสัมผัสการมองเห็นผ่านศูนย์สลับเปลี่ยนในสมองไปสู่ศูนย์การมองเห็นภาพ ดังนั้นการสร้างภาพหรือการมองเห็นก็คือการที่ข้อมูลได้ผ่านการวิเคราะห์แยกแยะให้รับรู้ถึงสิ่งรอบข้าง

2.2.2 สามเหลี่ยมสี (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)

สามเหลี่ยมสีเป็นภาพแสดงรูปสามเหลี่ยมเกือกม้า แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยการวิเคราะห์สีจากแสงสเปกตรัม สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงซึ่งโค้งรูปเกือกม้าจะแสดงความยาวคลื่นจาก 400-700 nm สามเหลี่ยมสี CIE สร้างขึ้นตามระบบความสัมพันธ์พิกัด X และ Y คาร์เตเซียน ในทางคณิตศาสตร์จากมุมตรงข้าม 3 มุมของรูปเกือกม้า คือสีน้ำเงินม่วงเข้มประมาณ 400 nm สีเขียวประมาณ 520 nm และสีแดงประมาณ 700 nm คือสีจากแสง ที่จะนำมาผสมกันและก่อให้เกิดสีต่างๆ ขึ้นแสงสีแดงมีความยาวคลื่นสูงสุด แต่มีความถี่คลื่นต่ำสุดจะหักเหได้น้อยที่สุดและแสงสีม่วงจะมีความยาวคลื่นน้อยสุด แต่มีความถี่คลื่นสูงสุด และหักเหได้มากที่สุด



รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมสี (CIE)

ที่มา : (วิรัชพัชร แสงวัชรมรกด, 2553)

จากสามเหลี่ยมสีพบว่าแสงสีเป็นพลังงานเพียงชนิดเดียวที่ปรากฏสี จากด้านทั้ง 3 ด้านของรูปสามเหลี่ยมสี นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดแม่สีของแสงไว้ 3 สีคือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) แสงทั้งสามสีเมื่อนำมาฉายส่องรวมกันจะทำให้เกิดสีต่าง ๆ ขึ้นมาคือ

แสงสีแดง + แสงสีเขียว = แสงสีเหลือง (Yellow)

แสงสีแดง + แสงสีน้ำเงิน = แสงสีแดงมาเจนตา (Magenta)

แสงสีน้ำเงิน + แสงสีเขียว = แสงสีฟ้าไซแอน (Cyan)

และถ้าแสงสีทั้งสามสีฉายรวมกันจะได้แสงสีขาว หรือไม่มีสี

แสงสีที่เป็นแม่สี คือ สีแดงน้ำเงิน เขียว จะเรียกว่า สีพื้นฐานบวก (Additive primary colors) เกิดจากการหักเหของแสงสีขาว ได้แก่ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ส่วนสีที่เกิดจากการดูดกลืนแสงสะท้อนจากวัตถุ คือ เมื่อมีลำแสงสีขาวตกกระทบวัตถุสีต่างๆ คลื่นแสงบางส่วนจะดูดกลืนไว้ และสะท้อนเพียงบางสีออกมาจึงเรียกการผสมสีแบบนี้ว่า การผสมสีแบบลบ (Subtractive Color Mixing) คือ สีฟ้าไซแอน (Cyan) สีแดงมาเจนต้า (Magenta) และสีเหลือง (Yellow) ทั้งสามสีเป็นแม่สีแม่ใช้ในระบบการพิมพ์ออฟเซตหรือที่เรียกว่าระบบสี CMYK โดยมีสีดำ (Black) เพิ่มเข้ามา

2.2.3 ฮิสโทแกรม (Histogram)

ฮิสโทแกรมมีลักษณะเป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณของพิกเซลที่มีค่าความสว่าง (Brightness) ตั้งแต่ค่า “0” ซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ดำที่สุดของภาพ (Shadows) จนกระทั่งถึงค่า “255” ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขาวที่สุด (Highlight) แขนงอนเป็นระดับความสว่างที่แบ่งระดับเป็น 256 ระดับ (มักเรียกว่าระดับสีเทาหรือ gray level) โดยมีค่าตั้งแต่ 0-255 เมื่อระดับสีเทามีค่าต่ำ หมายถึงมีความสว่างน้อยจะมองเห็นเป็นสีดำ ค่าระดับสีเทามาก หมายถึง มีความสว่างมากจะมองเห็นเป็นสีขาว แกนตั้งของกราฟแสดงจำนวนพิกเซลในแต่ละความระดับสีเทาซึ่งเป็นค่าสัมพัทธ์ แสดงดังรูปที่ 2.2

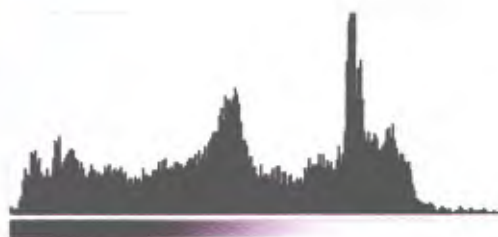


รูปที่ 2.2 ฮิสโทแกรมที่เปิดรับแสงอย่างถูกต้อง
ที่มา : (สวคนธ์ ดุสฎี, 2556)

จากรูปที่ 2.2 ฮิสโทแกรมด้านบนเราสามารถวิเคราะห์ได้ว่ารูปนี้ได้รับการเปิดรับแสงมาอย่างถูกต้องเพราะมีจำนวนพิกเซลครอบคลุมอยู่ตั้งแต่ค่าระดับ สีเทาน้อยๆ ในส่วนเงาไปจนค่าระดับสีเทาหลายๆ ในส่วนสว่าง

2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฮิสโทแกรมกับการถ่ายภาพ

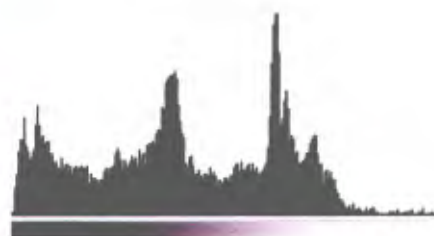
ฮิสโทแกรมจะทำให้สามารถตรวจสอบค่าการฉายแสงที่ใช้ถ่ายภาพนั้นๆ ว่าถูกต้องพอดีหรือไม่ พิจารณาผลของการถ่ายรูปด้วยค่าการเปิดรับแสงต่างๆ กัน ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของรูปและฮิสโทแกรม แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ฮิสโทแกรมที่เปิดรับแสงถูกต้องทุกรายละเอียด

ที่มา : (สุคนธ์ ดุสฎี, 2556)

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปิดรับแสงน้อยลงไป 2/3 stop รูปจะมีมืดลงกว่าที่ควรเป็น และเมื่อพิจารณาจากฮิสโทแกรมจะเห็นว่า จำนวนพิกเซลที่ระดับความสว่างมาก ๆ มีจำนวนพิกเซลน้อยลง และแท่งกราฟจะเลื่อนไปด้านซ้ายเล็กน้อย



รูปที่ 2.4 ฮิสโทแกรมที่เปิดรับแสงน้อยลง

ที่มา : (สุคนธ์ ดุสฎี, 2556)

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อถ่ายภาพโดยที่เปิดรับแสงน้อยมากๆ จำนวนพิกเซลที่ระดับสีเทากลางบางส่วนและที่ความสว่างมาก ๆ จะไม่มีเลย แท่งกราฟไปกระจุกรวมตัวกันอยู่ทางด้านซ้าย แสดงว่ารูปนี้มีแต่พิกเซลที่มีค่าสีดำและสีเทาเข้มเท่านั้น ไม่มีสีขาว



รูปที่ 2.5 ฮิสโทแกรมที่เปิดรับแสงน้อยมาก ๆ

ที่มา : (สุคนธ์ ดุสฎี, 2556)

2.2.5 ค่าความไวแสง (ISO)

ค่าความไวแสง (ISO Sensitivity) เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการให้แสงผ่านเข้ามายังกล้องที่ถูกกำหนดขึ้นโดยองค์การ International Organization for Standardization ให้เป็นค่ามาตรฐานที่บอกความไวแสงของเซ็นเซอร์ของกล้องดิจิทัลซึ่งมีค่าความไวแสงมาก (ISO สูง) ก็จะใช้แสงน้อยลงในการเก็บภาพ ทำให้รูปมีความชัดเงนมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าใช้ค่าความไวแสงที่มากเกินไป อาจเกิดสัญญาณรบกวน (noise) ในการบันทึกภาพขึ้น ค่าของ ISO จะเป็นตัวเลขโดยมีการเพิ่มขึ้นเป็นขั้นๆ คือ 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 เป็นต้น

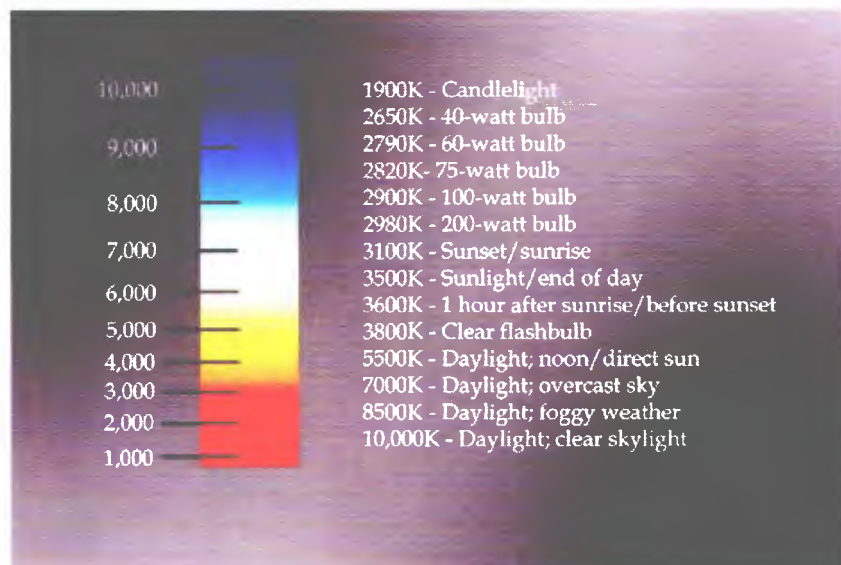
2.2.6 สมดุลแสงขาว (White Balance)

2.2.6.1 สีของแสง

สีของแสง คือสีที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น แสงแดดมีสีต่างกันโดยช่วงเช้าจะออกเหลือง ช่วงเที่ยงจะขาว และช่วงเย็นจะออกสีส้มหรือสีของแสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์จะอมเขียว

2.2.6.2 อุณหภูมิสี

หน่วยวัดที่ใช้ระบุค่าสีของแสง เรียกเป็นอุณหภูมิสีมีหน่วยเป็นเคลวิน (Kelvin) อุณหภูมิสีไม่เกี่ยวกับความร้อนของแสงหรือไฟนะครับเป็นการวัดคลื่นความถี่ของแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตาคนเราสามารถมองเห็นได้ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงอุณหภูมิสีในแต่ละสภาพแวดล้อม

ที่มา : (ความรู้พื้นฐาน ทางด้านแสงสว่าง, 2006)

การตั้งค่า White Balance หรือปรับสมดุลแสงสีขาว คือการตั้งค่าของกล้อง ให้เห็นแสงสีใดๆก็ตาม ให้เป็นสีขาว

2.3 Colorimetric method

เป็นเทคนิคในการระบุความเข้มข้นของสารประกอบเคมีในสารละลายกับสารที่ก่อให้เกิดสี (color reagent) เทคนิคนี้นำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ เทคนิค colorimetric เป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ รวดเร็ว และราคาถูก ซึ่งความเข้มสีจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในสารละลายนั้น ทั้งนี้โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐาน

2.4 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ (Lab-on-paper)

พาราฟิน แวกซ์ (Paraffin wax) คือ แวกซ์ที่เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอน เป็นแวกซ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มปิโตรเลียมแวกซ์ (Petroleum wax) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ C_nH_{2n+2} มีจำนวนคาร์บอนในห่วงโซ่โมเลกุล 19-36 อะตอม ($C_{19}-C_{36}$) มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีเหลืองอ่อนถึงขาว มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 38-68 °C

อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษใช้ตรวจร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบความเข้มของสีตัวตรวจวัดจะประกอบไปด้วยรีเอเจนต์ สำหรับเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพื้นที่ตรวจวัด (detection zone) และตัวอ้างอิงจะประกอบไปด้วยสารตัวอย่างที่ตำแหน่งพื้นที่อ้างอิง (blank zone) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ
ที่มา : (Whitesides, 2007)

2.5 หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ทดสอบ เชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งใช้งานได้หลากหลายและได้ทีละหลายธาตุ (ข้อดีที่แตกต่างจาก AAS) เทคนิคนี้แยกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ Inductively Couple Plasma (ICP) เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตพลาสมาที่ให้อุณหภูมิสูง ด้วยการปล่อยแก๊สอาร์กอนผ่านเข้าไปในคอบ (torch) ที่ปลายคอบจะมีท่อกลางทาด้วยทองแดงล้อมรอบคอบซึ่งต่อกับเครื่องส่งความถี่วิทยุ เมื่อให้ความถี่วิทยุ (RF generator) ปล่อยเข้าไปจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ปลายคอบแล้วชักนำให้มีกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำให้เกิดการสปาร์คด้วยเทสลาเพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนจากอาร์กอนที่มีพลังงานสูง และอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงนี้จะชนกับอิเล็กตรอนอื่นต่อไปอีกกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลายเป็นพลาสมา Optical Emission Spectrometer เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการทำให้สารเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นเพื่อให้สารที่จะวิเคราะห์นั้นเปล่งแสงหรือสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะอยู่ในช่วงของยูวี-วิสิเบิล และมีลักษณะเฉพาะตัวและวัดความเข้มของแสงนั้น

2.6 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation)

Method validation เป็นกระบวนการยืนยันความถูกต้องความเหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์ที่ศึกษาเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการช่วยให้ทราบถึงคุณสมบัติเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของวิธีการวิเคราะห์นั้นๆ กระบวนการนี้จะยืนยันความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ที่ผู้วิเคราะห์พัฒนาขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของห้องปฏิบัติการ และยืนยันวิธีวิเคราะห์ที่ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและยอมรับได้

วิธีการทดสอบที่ใช้สำหรับ Method validation

Method validation จะครอบคลุมถึงสมบัติของวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

(1) ความถูกต้อง (accuracy) ความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ที่วัดได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากที่สุดแสดงว่าการวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องสูง (High accuracy) แต่ถ้าค่าที่วัดได้ห่างไกลจากค่าจริงแสดงว่าการทดสอบนั้นมีความถูกต้องน้อย (Low accuracy) การหา accuracy ทำได้โดย การหาค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (%recovery) โดยใช้ตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (spiked sample) ซึ่งจะมีข้อจำกัดว่า accuracy ที่ได้นั้นครอบคลุมเฉพาะขั้นตอนที่วิเคราะห์ spiked sample เท่านั้นการทำ recovery จะทำ 3 ระดับความเข้มข้นและอย่างน้อยความเข้มข้นละ 7 ซ้ำ

$$\% \text{ recovery} = \frac{(\text{ค่าความเข้มข้นจากตัวอย่างที่เติม}) - (\text{ค่าความเข้มข้นจากตัวอย่างที่ไม่เติม}) \times 100}{(\text{ค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม})}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การคืนกลับของสารวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

Active Ingred. [%]	Analyte ratio	Unit	Mean recovery [%]
100	1	100%	98-102
> = 10	10 ¹	10%	98-102
> = 1	10 ²	1%	97-103
> = 0.1	10 ³	0.1%	95-105
0.01	10 ⁴	100 ppm	90-107
0.001	10 ⁵	10 ppm	80-110
0.0001	10 ⁶	1 ppm	80-110
0.00001	10 ⁷	100 ppb	80-110
0.000001	10 ⁸	10 ppb	60-115
0.0000001	10 ⁹	1 ppb	40-120

(2) ความเที่ยง (precision) หมายถึง ความแม่นยำของการวิเคราะห์ซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง ความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ซ้ำๆ นี้มักจะแสดงเป็นค่า SD หรือสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation, CV) ระดับของความแม่นยำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ตามตารางที่การหาระดับความแม่นยำโดยหาค่า % RSD

$$\%RSD = \frac{SD \times 100}{\bar{X}}$$

เมื่อ % RSD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
 SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 \bar{X} คือ ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความเที่ยงเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารวิเคราะห์

Analyte [%]	Analyte ratio	Unit	RSD [%]
100	1	100%	1.3
10	10-1	10%	2.8
1	10-2	1%	2.7
0.1	10-3	0.1%	3.7
0.01	10-4	100 ppm	5.3
0.001	10-5	10 ppm	7.3
0.0001	10-6	1 ppm	11
0.00001	10-7	100 ppb	15
0.000001	10-8	10 ppb	21
0.0000001	10-9	1 ppb	30

(3) ขีดจำกัดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ)

LOD หมายถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ใน ตัวอย่างที่สามารถตรวจวัดได้

LOQ หมายถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างที่สามารถหาปริมาณหรือรายงานผลโดยมีความถูกต้องและความเที่ยงที่ยอมรับได้

$$\text{LOD คำนวณได้จากสูตร } LOD = \frac{3SD}{\text{Slope}}$$

$$\text{LOQ คำนวณได้จากสูตร } LOQ = \frac{10SD}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

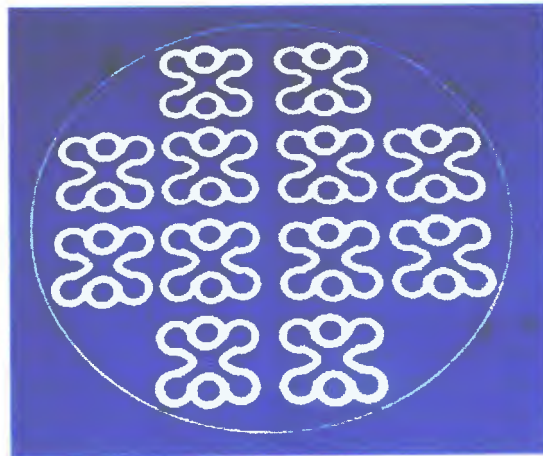
Slope คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐาน

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์เตรียมกระดาษ

- กระดาษกรอง เบอร์ 1
- แผ่นความร้อน
- เทียนไข
- เทปกาว
- กระจกนาฬิกา
- บล็อกสำหรับสกรีนเทียน
- กรรไกร
- ผ้าเบอร์ 8
- บล็อกสำหรับสกรีนเทียน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกสำหรับสกรีนเทียน

3.1.2 อุปกรณ์เตรียมสารเคมี

- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
- เครื่องพีเอชมิเตอร์
- ไมโครปิเปต ขนาด 0.5 และ 10 μ L
- ซ้อนตักสาร
- ขวดสีชาขนาดเล็ก
- ขวดโพลีเอธิลีน ขนาด 60 CC
- ปีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250 mL
- ขวดวัดปริมาตรขนาด
- แผ่นความร้อน
- กระจกนาฬิกา
- จานหลุม
- หลอดทดลอง
- ปิเปต ขนาด 25 mL

3.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัด

- อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ
- เครื่องสแกนเนอร์ ยี่ห้อ Cannon MP 287
- คอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรม Image J
- ไมโครปิเปต ขนาด 0.5 10 100 และ 1,000 μL
- เครื่องระเหยสุญญากาศ
- เครื่องยิวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.2 สารเคมี

- | | |
|--|--|
| - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Fe(II)) | - $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (Co(II)) |
| - $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Al(III)) | - $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (Pb(II)) |
| - ZnCl_2 (Zn(II)) | - HNO_3 |
| - $\text{CdCl}_2 \cdot 2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Cd(II)) | - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Cu(II)) |
| - NaOH | - $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Cu(II)) |
| - $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Bi(III)) | - $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Ni(II)) |
| - FeCl_3 (Fe(III)) | - NH_3NO_3 |
| - NH_3 | - CH_3COOH |
| - Dimethylglyoxime (DMG) | - HCl |
| - Ethylenediamine | - 2-aminopyridine |
| - Benzene | - Nitrosobenzene |
| - Hexene | - Ethyl acetate |
| - 2,6-diaminopyridine | - Silica gel G 60 |
| - Hydroxylamine | - Poly (acrylic acid) |
| - 1,10-phenanthroline | - Acetic acid |
| - Sodium acetate | |

3.3 การเตรียมสารละลาย

3.3.1 สารละลาย Ethylenediamine 1% v/v ปริมาตร 100 mL

ปิเปตสารละลาย Ethylenediamine ปริมาตร 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL

3.3.2 สารละลาย Dimethylglyoxime (DMG) stock solution ของ DMG 100 mM ปริมาตร 250 mL

ชั่ง DMG 7.605 g ละลายในเมทานอลแล้วปรับปริมาตรเป็น 250 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL

3.3.3 สารละลายแอมโมเนียต่อน้ำกลั่น ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 50 mL

ปิเปตสารละลายแอมโมเนีย ปริมาตร 25 mL ผสมกับ น้ำกลั่น ปริมาตร 25 mL แล้วใส่ในขวดพลาสติก ขนาด 60 mL

3.3.4 สารละลายนิกเกิล (stock solution) ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 1,000 mL

ซึ่ง $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 4.4786 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 mL

3.3.5 สารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L ปริมาตร 50 mL

ปิเปตสารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 1,000 mg/L แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรที่ใช้เตรียมนิกเกิลที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L

ความเข้มข้น (mg/L)	ปริมาตรนิกเกิล (mL)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)
1	0.05	49.95
3	0.15	49.85
5	0.25	49.75
10	0.50	49.50
15	0.75	49.25
20	1.00	49.00
25	1.25	48.75
30	1.50	48.50
35	1.75	48.25
40	2.00	48.00
45	2.25	47.75
50	2.50	47.50

3.3.6 สารละลายผสมนิกเกิลและสารรบกวน Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II), Al(III) และ Bi(II) อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 ปริมาตร 25 mL

ปิเปตสารละลายนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 1.25 mL ผสมกับสารรบกวน ความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 1.25 mL 100 mg/L ปริมาตร 2.5 mL 150 mg/L ปริมาตร 3.75 mL 200 mg/L ปริมาตร 5 mL แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาตรของสารละลายนิกเกิลผสมกับสารรบกวน

อัตราส่วน	ปริมาตรสารละลายนิกเกิล (mL)	ปริมาตรของสารละลายที่เป็นสารรบกวน (mL)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (mL)
1:1	1.25	1.25	22.50
1:2	1.25	2.50	21.25
1:3	1.25	3.75	35.00
1:4	1.25	5.00	20.00
2:1	2.50	1.25	21.25

3.3.7 สารละลายอลูมิเนียม (stock solution) ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 1,000 mL

ชั่ง $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 8.9419 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 mL

3.3.8 สารละลายอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L ปริมาตร 50 mL

ปิเปตสารละลายอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาตรที่ใช้เตรียมอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L

ความเข้มข้น (mg/L)	ปริมาตรอลูมิเนียม (mL)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)
1	0.05	49.95
3	0.15	49.85
5	0.25	49.75
10	0.50	49.50
15	0.75	49.25
20	1.00	49.00
25	1.25	48.75
30	1.50	48.50
35	1.75	48.25
40	2.00	48.00
45	2.25	47.75
50	2.50	47.50

3.3.9 สารละลายผสมอลูมิเนียมและสารรบกวน Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II) , Ni(II) และ Bi(II) อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 ปริมาตร 25 mL

ปิเปตสารละลายอลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 1.25 mL ผสมกับสารรบกวน ความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 1.25 mL 100 mg/L ปริมาตร 2.5 mL 150 mg/L ปริมาตร 3.75 mL 200 mg/L ปริมาตร 5 mL แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาตรของสารละลายอลูมิเนียมผสมกับสารรบกวน

อัตราส่วน	ปริมาตรสารละลาย อลูมิเนียม (mL)	ปริมาตรของ สารละลายที่เป็นสาร รบกวน (mL)	ปริมาตรของน้ำ กลั่น (mL)
1:1	1.25	1.25	22.50
1:2	1.25	2.50	21.25
1:3	1.25	3.75	35.00
1:4	1.25	5.00	20.00
2:1	2.50	1.25	21.25

3.3.10 สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ (acetate buffer)

stock solution ของ acetic acid 0.2 M ปริมาตร 250 mL

ปิเปต acetic acid 2.85 mL ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 250 mL ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 250 mL

stock solution ของ Sodium acetate 0.2 M ปริมาตร 250 mL

ชั่ง $C_2H_3O_2Na$ 4.10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 250 mL ในขวดวัด ปริมาตรขนาด 250 mL

3.3.11 สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 4.5 ปริมาตร 500 mL

ปิเปตสารละลาย acetic acid ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 127.5 mL ผสมกับ Sodium acetate ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 122.5 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ปรับค่า pH ให้เป็น 4.5 ด้วย pH meter โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดไนตริก แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 mL

3.3.12 สารละลายเหล็กความเข้มข้น 0.005 mg/L ปรับปริมาตร 100 mL และ สารละลายเหล็กความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mg/L ปรับปริมาตร 25 mL

ปิเปตสารละลายเหล็กความเข้มข้น 1,000 mg/L และสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 4.5 ผสมกัน ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงปริมาณที่ใช้เตรียมสารละลายหลักมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mg/L

ความเข้มข้น mg/L	ปริมาตรหลัก (μ L)	ปริมาตรอะซิเตตบัฟเฟอร์ (μ L)
0.005	0.5	999
0.2	5	990
0.4	10	980
0.6	15	970
0.8	20	960
1.0	25	950

3.3.13 สารละลาย hydroxylamine ความเข้มข้น 0.1 mg/L ปริมาตร 50 mL

ซึ่ง hydroxylamine 5 g ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL

3.3.14 สารละลาย 1,10-phenanthroline ความเข้มข้น 8,000 mg/L ปริมาตร 50 mL

mL

ซึ่ง 1,10- phenanthroline 0.4 g ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL

3.3.15 สารละลาย poly(acrylic acid)

ซึ่ง poly (acrylic acid) 0.035g ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL

3.3.16 สารละลายผสมและสารรบกวน Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Hg^{2+} , Al^{3+} , Bi^{2+} และ Ni^{2+} อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 3:1 และ 2:1 ปริมาตร 1 mL

ปิเปตสารละลายหลักความเข้มข้น 1000 mg/L ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงปริมาณที่ใช้ศึกษาเหล็กและสารรบกวนที่อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

อัตราส่วน	ปริมาณสารละลายเหล็ก (μL)	ปริมาณสารรบกวน (μL)	ปริมาณอะซิเตดบัปเฟอร์ (μL)
1:1	50	50	900
1:2	50	100	850
1:3	50	150	800
3:1	150	50	800
2:1	100	50	850

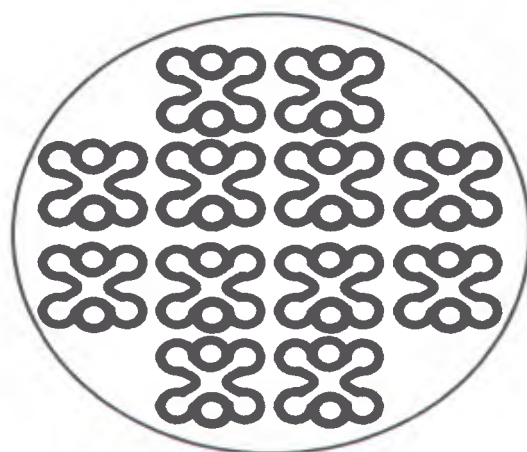
3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มต้นแบบ

3.4.1 ออกแบบร่องการไหลด้วยโปรแกรม Adobe illustrator CS3

3.4.2 นำแบบที่ได้ไปพิมพ์บนกระดาษลอกกลาย แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 การออกแบบร่องการไหล

(ก) รูปแบบที่ใช้ทดสอบหาพื้นที่ตรวจวัดที่เหมาะสม

(ข) รูปแบบที่ใช้ทำบล็อกเพื่อในการสกรีนเทียน

3.5 การเตรียมรูปแบบของไหลบนกระดาษ

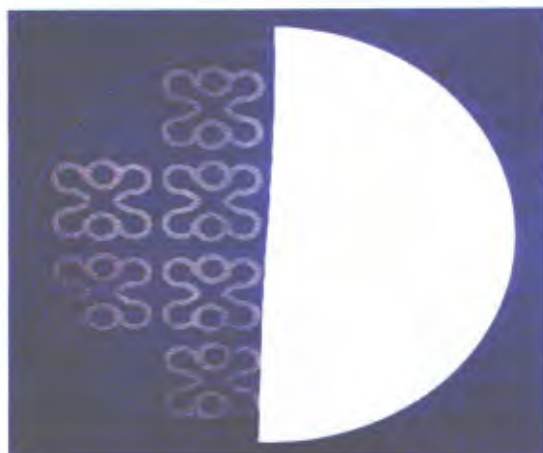
3.5.1 อุ่นแผ่นความร้อนให้ความร้อนอยู่ที่ 50 °C จากนั้นทับด้วยกระดาษทิชชูแผ่นใหญ่เพื่อใช้กันความร้อน

3.5.2 วางกระดาษกรองเบอร์ 1 บนแผ่นความร้อนโดยกระดาษกรองจะต้องแบ่งครึ่งจากนั้นวางบล็อกทับบนกระดาษกรอง

3.5.3 ทำการสกรีนเทียนให้ทั่วบริเวณที่มีการกำหนดบริเวณร่องการไหลเป็นเวลา 30 วินาที

3.5.4 ยกบล็อกขึ้นแล้วดึงกระดาษกรองออกจากบล็อก

3.5.5 กระดาษกรอง 1 แผ่นจะได้อุปกรณ์ 6 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่ได้จากการสกรีนด้วยเทียน

3.6 การสุ่มตัวอย่างน้ำดื่ม

การสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มของโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราช จะเลือกการสุ่มตัวอย่างตามเขตพื้นที่การศึกษา โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างของโรงเรียนในเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษาเพราะมีความเสี่ยงสูงกว่าเขตพื้นที่ศึกษามัธยมศึกษา

เขตพื้นที่การศึกษา แบ่งออกเป็น 4 ได้แก่

- เขต 1 - อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช อำเภอพระพรหม อำเภอเฉลิมพระเกียรติ และอำเภอลานสกา
- เขต 2 - อำเภอบางขัน อำเภอฉำพรณรา อำเภอทุ่งใหญ่ อำเภอนาบอน อำเภอทุ่งสง อำเภอฉวาง อำเภอพิปูน และอำเภอช้างกลาง
- เขต 3 - อำเภอจุฬาภรณ์ อำเภอหัวไทร อำเภอร่อนพิบูลย์ อำเภอปากพนัง อำเภอเชียรใหญ่ และอำเภอชะอวด
- เขต 4 - อำเภอสีชล อำเภอท่าศาลา อำเภอนบพิตำ อำเภอพรหมคีรี และอำเภอขนอม

การสุ่มตัวอย่างจะเลือกอำเภอละ 1-2 โรงเรียนตามเขตพื้นที่การศึกษา ซึ่งมีตัวอย่างน้ำดื่มทั้งหมด 21 ตัวอย่าง

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.7.1 วิธีการสกัดสารจากผักและผลไม้ที่มีสี

เลือกผักและผลไม้ที่มีสี ได้แก่ แก้วมังกรสีม่วง กะหล่ำปลีสีม่วง แครอท มะเขือเทศ ชมื่นชั้น เปลือกแก้วมังกรสีม่วง และเปลือกมังคุด ได้นำ แก้วมังกรสีม่วงมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆนำไปชั่งให้ได้ 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ 2 บีกเกอร์ บีกเกอร์ที่ 1 เติมน้ำกลั่น 80 mL และบีกเกอร์ที่ 2 เติมหอทานอล 80 mL นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 20 นาที แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้มาทดสอบกับโลหะหนัก ได้แก่ Fe(II), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Co(II), Al(III), Bi(III), Hg(II) และ Cd(II) ทำการทดสอบในหลอดทดลอง โดยเติมสารสกัดแก้วมังกรสีม่วง 1 mL กับเติมสารโลหะหนัก 1 mL จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.7.2 การหาพีเอชที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กะหล่ำปลีสีม่วง

นำกะหล่ำปลีสีม่วงมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆนำไปชั่งให้ได้ 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 80 mL นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 20 นาที แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้มาทดสอบกับ pH 1-13 ทำการหยุด pH จำนวน 2 หยด หยดกะหล่ำปลีสีม่วง 2 หยด และหยุดโลหะหนัก 2 หยด ได้แก่ Fe(II), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Co(II), Al(III), Bi(III), Ni(II) และ Cd(II) พร้อมคนให้เข้ากันแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น

3.7.3 การสกัดสารจากกะหล่ำปลีสีม่วง ด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ

นำกะหล่ำปลีสีม่วงมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆนำไปชั่งให้ได้ 10 g ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 80 mL นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 20 นาที แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้มาใส่ในขวดกั้นกลมขนาด 250 mL (ก่อนใส่สารละลายต้องชั่งขวดกั้นกลม ก่อนทุกครั้ง) จากนั้นนำไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ ตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำขวดที่มีสารไปชั่ง เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วง นำสารสกัดที่ได้มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 25 mL พร้อมคำนวณหาความเข้มข้นของสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วง

3.7.4 การหาผลของสารรบกวนในการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II)

3.7.4.1 การวิเคราะห์หาสถานะของสารรบกวนในการวิเคราะห์นิกเกิล(II)

นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดกับเทปขาวที่ขึงไว้กับกระจกนาฬิกา หยด DMG หยด NH₃: H₂O จากนั้นหยดสารละลายผสมนิกเกิล(II) และสารรบกวนที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 ไปยังบริเวณตรวจตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

3.7.4.2 การวิเคราะห์หาสถานะของสารรบกวนในการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III)

นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดกับเทปขาวที่ขึงไว้กับกระจกนาฬิกา หยดสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงที่ความเข้มข้น 16,000 mg/L จากนั้นหยดสารละลายผสมอลูมิเนียม(III) และสาร

รบกวนที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 ไปยังบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

3.7.4.3 การวิเคราะห์หาสถานะของสารรบกวนในการวิเคราะห์เหล็ก(II)

นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดกับเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวา หยอด Hydroxylamine หยอด Poly (acrylic acid) และ หยด 1,10-phenanthroline จากนั้นหยดสารละลายผสมเหล็กและสารรบกวนที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 และ 3:1 ไปยังบริเวณตรงกลาง

3.7.5 การวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

3.7.5.1 การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity) และกราฟมาตรฐาน (calibration curve)

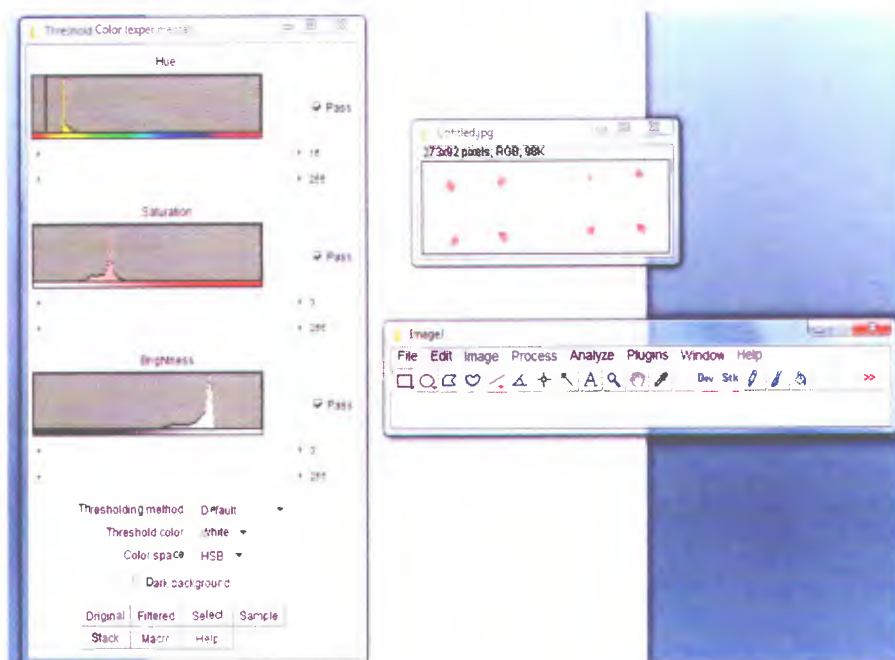
3.7.5.1.1 สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวา แล้วนำไปหยดสารละลาย DMG ที่ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.9 μL 3 ครั้ง หยด $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 0.7 μL 2 ครั้ง และสารละลายนิกเกิลที่ความเข้มข้น 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 mg/L ปริมาตร 14 μL หยด 10 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏเป็นสีชมพูของสารเชิงซ้อนระหว่าง Ni(II) กับ DMG

3.7.5.1.2 สำหรับการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III) นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวา แล้วนำไปหยดสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงที่ความเข้มข้น 16,000 mg/L ปริมาตร 0.6 μL 2 ครั้ง และสารละลายอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L ปริมาตร 14 μL หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏเป็นสีน้ำเงินที่บริเวณตรงกลาง

3.7.5.1.3 สำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II) นำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดกับเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวา เพื่อป้องกันการซึมออกจากแนวกันของกระดาษ จากนั้นหยดสารแต่ละตัวบริเวณตรงกลาง โดยหยด Hydroxylamine 0.5 μL , Poly(acrylic acid) 0.5 μL และ 1,10-phenanthroline 0.5 μL ที่บริเวณตรงกลาง เมื่ออุปกรณ์แห้งแล้วหยดสารละลายตัวอย่างเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 mg/L ปริมาตร 10 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏเป็นสีส้มแดงที่บริเวณตรงกลาง

3.7.5.1.4 ทำการสแกนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษและบันทึกเป็นรูปภาพเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มสีเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทา

3.7.5.1.5 นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานแล้วหาช่วงความเป็นเส้นตรงจากกราฟที่ได้



รูปที่ 3.4 การวัดค่าความเข้มสีในโปรแกรม Image J

3.7.5.2 ศึกษาความเที่ยงในการวิเคราะห์ (Precision)

3.7.5.2.1 สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดเทปกาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารละลาย DMG ที่ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.9 μL หยด 3 ครั้ง หยด $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 0.7 หยด 2 ครั้ง และสารละลายนิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 5, 15 และ 35 mg/L ปริมาตร 14 μL หยด 10 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏว่าเป็นสีชมพูตรงบริเวณตรวจวัด (detection zone)

3.7.5.2.2 สำหรับการวิเคราะห์ออลูมิเนียม(III) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดเทปกาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงที่ความเข้มข้น 16,000 mg/L ปริมาตร 0.6 μL หยด 2 ครั้ง และสารละลายออลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 25, 35 และ 50 mg/L ปริมาตร 14 μL หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏว่าเป็นสีน้ำเงินตรงบริเวณตรวจวัด (detection zone)

3.7.5.2.3 สำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดเทปกาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารละลาย Hydroxylamine ปริมาตร 0.5 μL หยด 2 ครั้ง หยดสารละลาย Poly(acrylic acid) 0.5 μL 1 ครั้ง บริเวณตรวจวัดทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ นำแผ่นอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่หยดตัวรีดิวซ์กับเหล็กแล้ว มาหยดสารละลาย 1,10-phenanthroline ปริมาตร 0.5 μL ที่บริเวณตรวจวัดของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ หยดสารละลายมาตรฐานเหล็ก 10 μL ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.4 และ 1.0 mg/L 2 ครั้ง

บริเวณตรงกลางอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษทุกครั้งที่ยึดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที จะเกิดการเปลี่ยนสี เป็นสีส้มแดงจากนั้นรอให้อุปกรณ์แห้ง

3.7.5.2.4 ทำซ้ำ 10 ครั้ง แล้วทำการสแกนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษและบันทึกเป็นรูปภาพ เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทา

3.7.5.2.5 นำค่าที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ได้จากสมการ

$$\%RSD = \frac{SD \times 100}{\bar{X}}$$

3.7.5.3 ศึกษาขีดจำกัดการวิเคราะห์ (LOD, LOQ)

3.7.5.3.1 สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารละลาย DMG ที่ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.9 μ L 3 ครั้ง หยด $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 0.7 μ L 2 ครั้ง และสารละลายนิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L ปริมาตร 14 μ L หยด 10 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ ปรากฏว่า เมื่อทำการหยดหลายๆครั้งก็จะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูจากนั้นรอให้อุปกรณ์แห้ง

3.7.5.3.2 สำหรับการวิเคราะห์หอลูมิเนียม(III) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงที่ความเข้มข้น 16,000 mg/L ปริมาตร 0.6 μ L 2 ครั้ง และสารละลายอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 mg/L ปริมาตร 14 μ L หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ ปรากฏว่า เมื่อทำการหยดหลายๆครั้งก็จะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำเงินจากนั้นรอให้อุปกรณ์แห้ง

3.7.5.3.3 สำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปกาวที่ซึ่งไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ หยดสารแต่ละตัวบริเวณตรวจวัด โดยหยด Hydroxylamine 0.5 μ L , Poly(acrylic acid) 0.5 μ L และ 1,10-phenanthroline 0.5 μ L ที่บริเวณตรวจวัด เมื่ออุปกรณ์แห้งแล้วหยดสารละลายตัวอย่างเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 mg/L ปริมาตร 10 μ L หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทุกครั้งที่หยดต้องรอให้แห้งก่อนที่จะหยดซ้ำ จะปรากฏเป็นสีส้มแดงที่บริเวณตรวจวัด

3.7.5.3.4 สแกนอุปกรณ์แล้วบันทึกเป็นไฟล์ภาพรูป จากนั้นประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทาเพื่อหาค่าความเข้มข้นเฉลี่ย

3.7.5.3.5 นำค่าที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$\text{LOD} = \frac{3 \times \text{SD}}{\text{slope}}$$

$$\text{LOQ} = \frac{10 \times \text{SD}}{\text{slope}}$$

3.7.5.4 ศึกษาความถูกต้องในการวิเคราะห์ (Accuracy)

3.7.5.4.1 สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปขาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารละลาย DMG ที่ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.9 μL หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด หยด $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาตร 0.7 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด แล้วหยดตัวอย่างน้ำดื่มที่ผ่านการย่อย 14 μL หยด 10 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษทุกครั้งที่ยกตัวอย่างน้ำดื่มที่เติมสารมาตรฐานนิกเกิล(II) (spiked standard) ที่ความเข้มข้น 12, 24 และ 32 mg/L

3.7.5.4.2 สำหรับการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปขาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ แล้วนำไปหยดสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงที่ความเข้มข้น 16,000 mg/L ปริมาตร 0.6 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด จากนั้นหยดตัวอย่างน้ำดื่มที่ผ่านการย่อย 14 μL หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษทุกครั้งที่ยกตัวอย่างน้ำดื่มที่เติมสารมาตรฐานอลูมิเนียม(III) (spiked standard) ที่ความเข้มข้น 28, 38 และ 48 mg/L

3.7.5.4.3 สำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II) โดยนำอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษติดบนเทปขาวที่ซิงไว้กับกระดาษฟิวเจอร์ หยดสารแต่ละตัวบริเวณตรวจวัด โดยหยด Hydroxylamine 0.5 μL , Poly(acrylic acid) 0.5 μL และ 1,10-phenanthroline 0.5 μL ที่บริเวณตรวจวัด แล้วหยดตัวอย่างน้ำดื่มที่ผ่านการย่อย 10 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษทุกครั้งที่ยกตัวอย่างน้ำดื่มที่เติมสารมาตรฐานเหล็ก(II) (spiked standard) ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 0.9 mg/L

3.7.5.4.4 สแกนอุปกรณ์บันทึกเป็นไฟล์รูปภาพ จากนั้นประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทาเพื่อหาค่าความเข้มสีเฉลี่ย

3.7.5.4.5 นำค่าที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (% recovery) ได้จากสมการ

$$\% \text{ recovery} = \frac{(\text{ค่าความเข้มข้นจากตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัด}) - (\text{ค่าความเข้มข้นจาก Blank}) \times 100}{(\text{ค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน})}$$

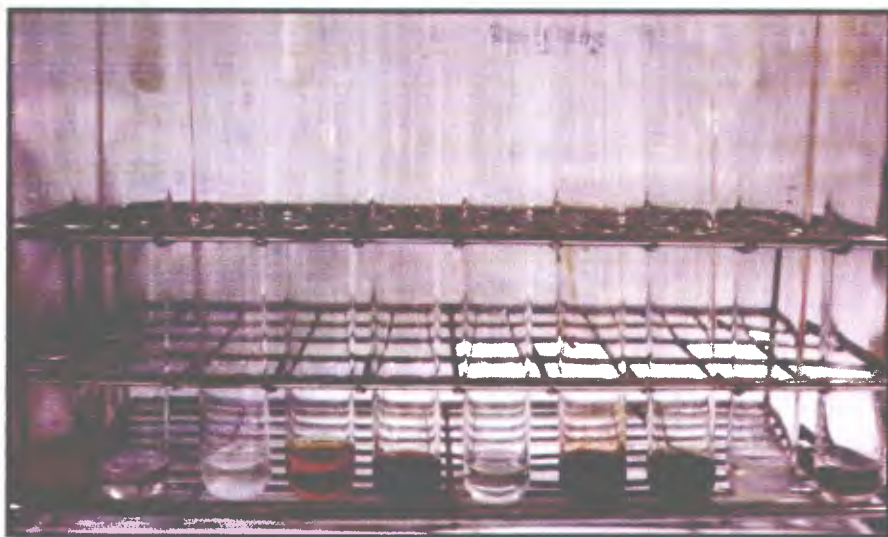
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาลิแกนด์สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก

4.1.1 ลิแกนด์ Dimethylglyoxime (DMG)

จากการทดสอบลิแกนด์ Dimethylglyoxime กับโลหะต่างๆ ได้แก่ Ni(II), Al(III), Pb(II), Co(II), Zn(II), Fe(II), Cu(II), Cd(II) และ Bi(II) พบว่า DMG จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ Ni(II) โดยให้เป็นสารละลายสีชมพูแดง ส่วนกับโลหะ Co(II), Zn(II), Cu(II) และ Cd(II) เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปฏิกริยาระหว่างโลหะต่างๆ กับ dimethylglyoxime

4.1.2 ลิแกนด์ 1,10-phenanthroline

Fe^{2+} เท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยากับ 1,10-phenanthroline จากการทดลองพบว่า เมื่อเติม hydroxylamine จะเกิดสารเชิงซ้อนสีส้มแดง ในขณะที่เมื่อไม่เติม hydroxylamine จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ลักษณะของสารละลายยังคงสภาพเป็นสีของสารละลายหลัก แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า 1,10-phenanthroline มีความจำเพาะเจาะจง (selectivity) สำหรับการวิเคราะห์ Fe^{2+}



รูปที่ 4.2 แสดงความแตกต่างระหว่างเหล็ก (III) กับเหล็ก (II) ทำปฏิกิริยากับ 1,10-phenanthroline

จากรูปที่ 4.2 ก. แสดงปฏิกิริยาของเหล็ก (II) กับ 1,10- phenanthroline ในรูปของสารเชิงซ้อน $[\text{Fe}(\text{phen})_3]^{2+}$ จะเกิดเป็นสีส้มแดง

จากรูปที่ 4.2 ข. แสดงปฏิกิริยาของเหล็ก (III) กับ 1,10- phenanthroline ที่ไม่เกิดเป็นสารเชิงซ้อน

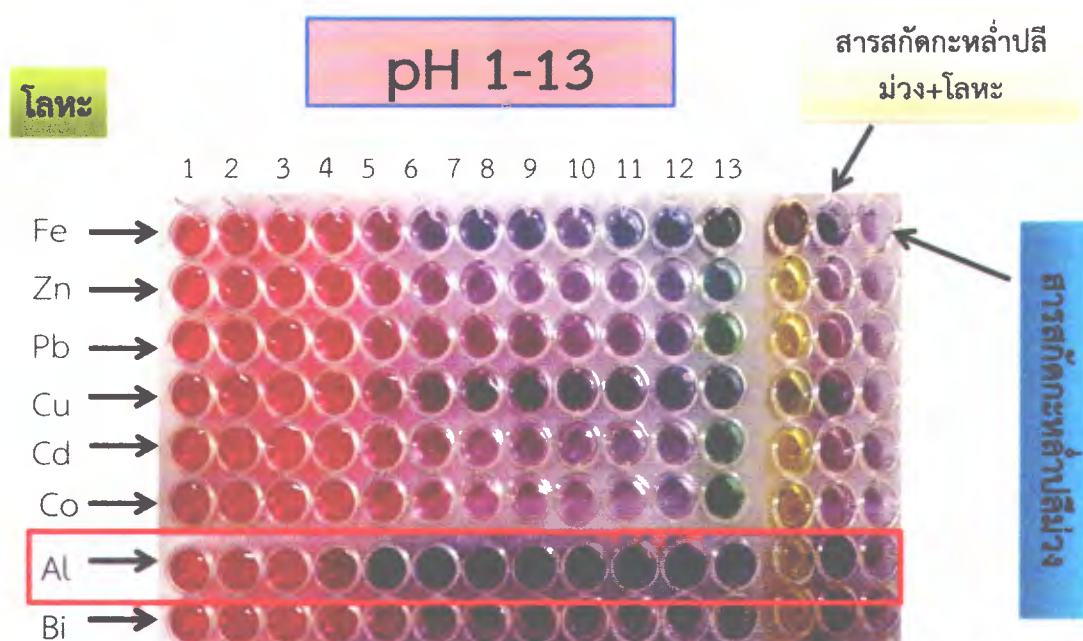
4.1.3 การศึกษาลิแกนด์ธรรมชาติ

สำหรับลิแกนด์ธรรมชาติได้ทำการสกัดสารจากผักและผลไม้ที่มีสีได้แก่ กะหล่ำปลีสีม่วง, เนื้อแก้วมังกร, เปลือกแก้วมังกร, ขมิ้นชัน, แครอท, มะเขือเทศ และเปลือกมังคุด โดยนำสารสกัดมาทดสอบกับ pH 1-13 และโลหะต่างๆ ในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกทำการทดลองด้วยโลหะ ได้แก่ Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II), Ni(II), Al(III) และ Bi(III) ซึ่งผลจะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของลิแกนด์จากธรรมชาติที่ทดสอบกับโลหะต่างๆ และ pH

ผักและผลไม้ที่มีสี	pH 1-13	ทดสอบกับโลหะ Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II), Ni(II), Al(III) และ Bi(III)
1. กะหล่ำปลีสีม่วง	6-11	Al(III) เปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีน้ำเงิน
2. เนื้อแก้วมังกร	1-12	Pb(II), Cu(II) เปลี่ยนจากสีม่วงอ่อนเป็นสีส้มแดง
3. เปลือกแก้วมังกร	1-12	Pb(II), Cu(II) เปลี่ยนจากสีม่วงอ่อนเป็นสีส้มแดง
4. ขมิ้นชัน	1-12	Fe(II) เปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเขียวเข้ม
5. แครอท	1-13	Fe(II) เปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเขียว
6. มะเขือเทศ	1-13	Fe(II) เปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเขียว
7. เปลือกมังคุด	1-12	Al(III) เปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีม่วงอ่อน

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเลือกสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงมาทำการทดลองโดยมีช่วง pH ที่สามารถใช้งานได้ที่ pH 6-11 และเมื่อนำมาทดลองด้วยโลหะ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีกับโลหะ Al(III) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเป็นสีน้ำเงิน เหตุผลที่เลือกสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงมาทดลอง เนื่องจากสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะ Al(III) ที่เห็นได้ชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการวิเคราะห์สารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงกับโลหะ Al(III) สำหรับโลหะอื่นๆ ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ชัดเจนและจะมีตะกอนเกิดขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองของลิแกนด์จากธรรมชาติที่ทดสอบกับโลหะต่างๆ และ pH

4.2 การออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

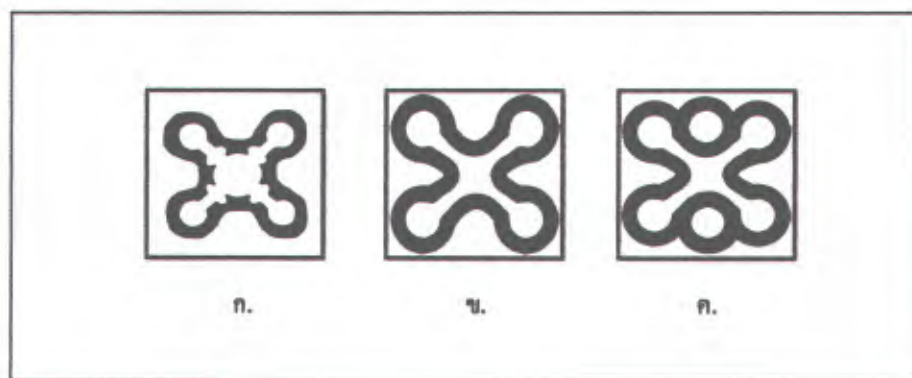
4.2.1 ออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษด้วยโปรแกรม Adobe illustrator CS3

อุปกรณ์สร้างโดยการสกรีนด้วยเทียนบนกระดาษกรองเบอร์ 1 และกำหนดขอบเขตที่เป็นส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำด้วยโปรแกรม Adobe illustrator CS3 ที่มีการกำหนดบริเวณใส่ตัวอย่าง อยู่ตรงกลาง โชนสำหรับตรวจวัดสีช่อง โชนสำหรับใส่สารเปรียบเทียบซึ่งอยู่นอกโชนใส่ตัวอย่างและ โชนตรวจวัด

รูปที่ 4.4 ก. เป็นการออกแบบครั้งที่ 1 พบว่าเมื่อทำการหยดสารตัวอย่างลงไปทีบริเวณใส่ตัวอย่าง ส่งผลให้สารตัวอย่างไม่แพร่ไปเกิดที่บริเวณตรวจวัด จึงแก้ไขโดยการตัดบริเวณปรับสภาพ ออกโดยให้แขนของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษมีลักษณะเป็นแขนตรง เพื่อให้สารตัวอย่างแพร่ไปเกิดที่บริเวณตรวจวัด

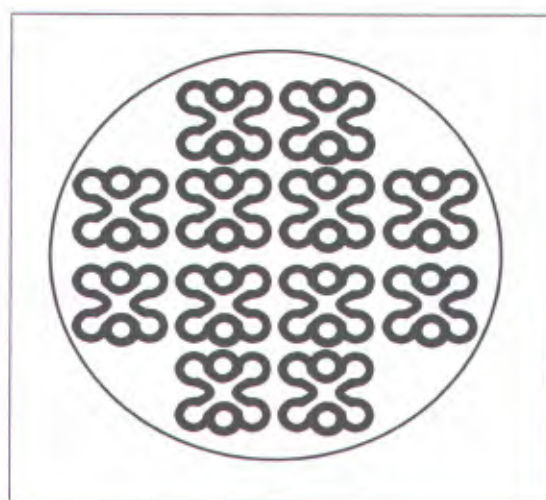
รูปที่ 4.4 ข. เป็นการออกแบบครั้งที่ 2 พบว่าเมื่อทำการหยดสารลงไปบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ส่งผลให้ไม่สามารถเปรียบเทียบสีที่เกิดขึ้นได้ว่ามีเปลี่ยนแปลง จึงแก้ไขโดยการเพิ่มบริเวณใส่สารเพื่อเปรียบเทียบสีตรงบริเวณภายนอกของแขน เพื่อให้มองเห็นสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน

รูปที่ 4.4 ค. เป็นการออกแบบครั้งที่ 3 มีการเพิ่มบริเวณใส่สารเพื่อเปรียบเทียบสีตรงบริเวณภายนอกของแขน เพื่อให้มองเห็นสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

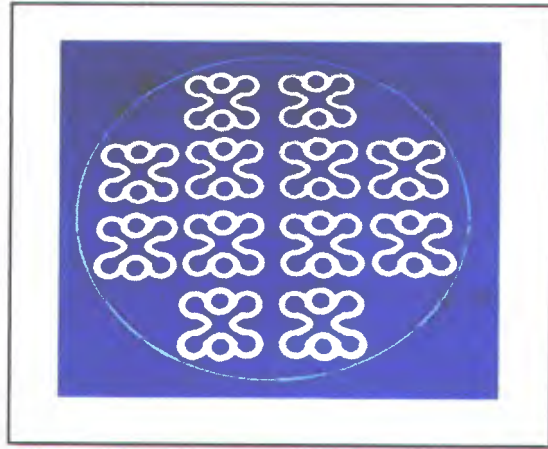
รูปที่ 4.5 แสดงแบบที่ใช้พิมพ์บนกระดาษลอกลายจากการศึกษาพบว่ากระดาษกรอง 1 แผ่นสามารถวางแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษได้มากที่สุด 12 แบบ



รูปที่ 4.5 แบบที่ใช้พิมพ์บนกระดาษลอกลาย

รูปที่ 4.6 รูปแบบของบล็อกสกรีนที่ใช้สร้างอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ จากการทดลองพบว่าการสร้างบล็อกสกรีน ใช้ผ้าเบอร์ 100 เนื้อผ้ามีระยะห่างน้อยทำให้เทียนสามารถซึมลงผ้าใน

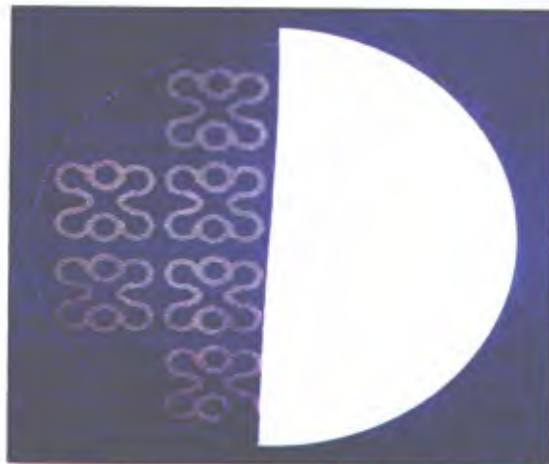
ปริมาณน้อยลง ทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีความต่อเนื่องกัน ส่งผลให้เทียนซึมผ่านผ้าและกระดาษในปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลองเมื่อทำการสกรีนด้วยเทียนจะได้อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่สามารถแยกส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำได้อย่างชัดเจน โดยทำการแบ่งครึ่งกระดาษกรอง 1 แผ่นให้เป็นสองส่วน เพื่อให้ได้อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ 12 ชิ้นซึ่งทุกแผ่นสามารถใช้งานได้



รูปที่ 4.6 รูปแบบของบล็อกสกรีนที่ใช้สร้างอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

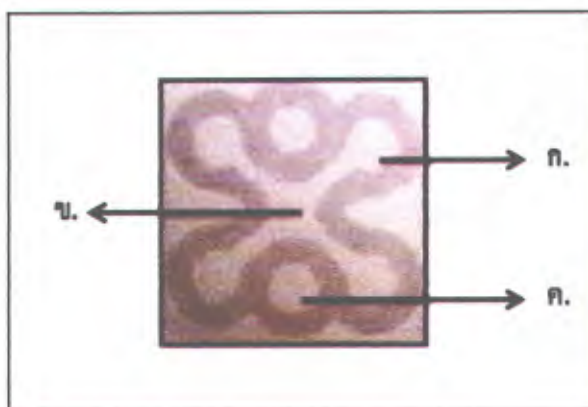
4.3 ลักษณะของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

การศึกษาการสร้างอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่ทำการสกรีนด้วยเทียนเมื่อให้ความร้อนเทียนจะละลายและซึมลงกระดาษกรองทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีลักษณะตามที่ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ 4.7



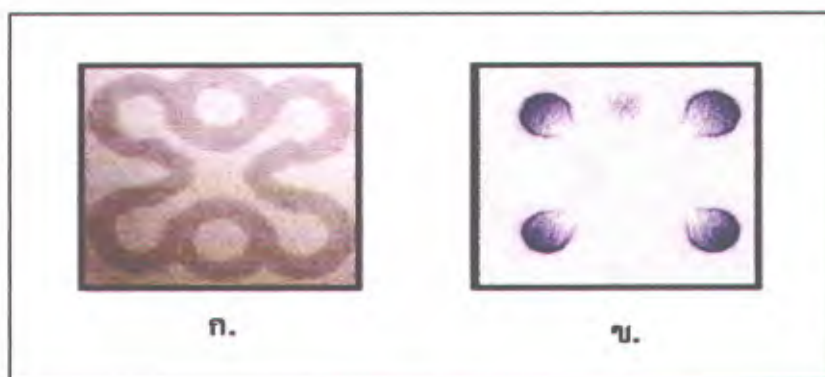
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษที่ผ่านการสกรีนด้วยเทียน

การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษมีความได้เปรียบที่ช่องใส่ตัวอย่างสามารถเก็บสารละลายได้ปริมาณมากที่สามารถแพร่ตัวอย่างออกไปยังช่องตรวจวัดด้วยแรงแคปิลารี การกำหนดบริเวณปรับสภาพของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษเพื่อปรับสภาพการตรวจวัดสี โดยบริเวณนี้สารสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อน รวมทั้งสามารถกำจัดสารรบกวน บริเวณตรวจวัดสามารถตรวจวัดได้ 4 ตัวอย่างในอุปกรณ์เดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ รูปที่ ก. คือบริเวณตรวจวัด รูปที่ ข.คือบริเวณใส่สารตัวอย่าง รูปที่ ค. คือบริเวณใส่สารตัวอย่าง

รูปที่ 4.9 ก.แสดงส่วน Hydrophobic คือส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ที่สกรีนด้วยเทียนเป็นแนวกันเพื่อไม่ให้สารละลายซึมออกรูปที่ 4.9 ข. แสดงส่วน Hydrophilic คือส่วนที่ชอบน้ำเป็นบริเวณที่สารตัวอย่างเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารละลายที่เหมาะสม

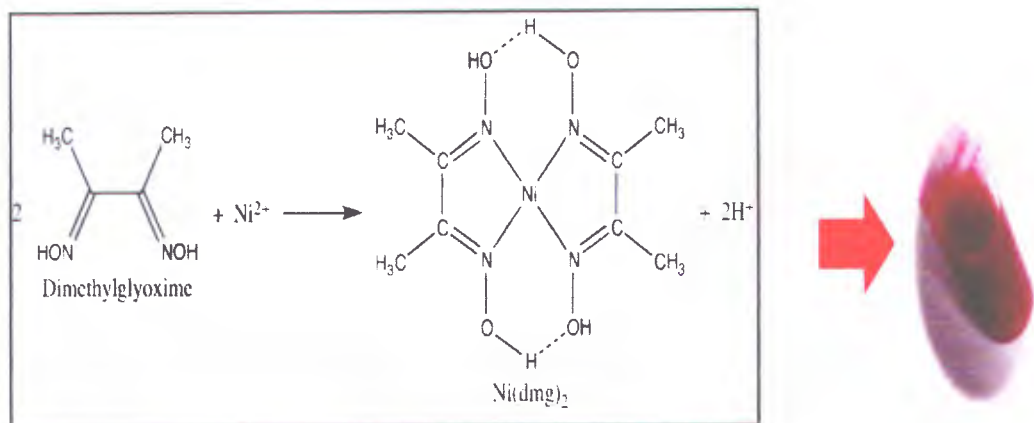


รูปที่ 4.9 ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) กับส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) บนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

4.4 สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ

4.4.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II)

ในการวิเคราะห์นิกเกิลโมเลกุลของ Dimethylglyoxime 2 โมลจะจับกับ Ni^{2+} 1 โมล เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีชมพู $\text{Ni}(\text{dmg})_2$ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปฏิกิริยาของนิกเกิล(II) กับDimethylglyoxime ในรูปของสารเชิงซ้อน $\text{Ni}(\text{dmg})_2$ จะเกิดเป็นสีชมพูแดง

ในการวิเคราะห์นิกเกิล(II) จะต้องมีการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองได้แก่ ปริมาณของ Dimethylglyoxime ปริมาณของแอมโมเนีย และปริมาณของสารตัวอย่าง ซึ่งผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II)

พารามิเตอร์	ช่วงที่ปรับเปลี่ยน	ค่าที่เหมาะสม
ปริมาณของ Dimethylglyoxime	0.5-1.0 μL	3x0.9 μL
อัตราส่วนของแอมโมเนีย	1:1-3:1	1:1
ปริมาณของแอมโมเนีย	0.5-1.0 μL	2x0.7 μL
ปริมาณสารละลายมาตรฐานและสารตัวอย่าง	8-18 μL	2x14 μL

4.4.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์อะลูมิเนียม(III)

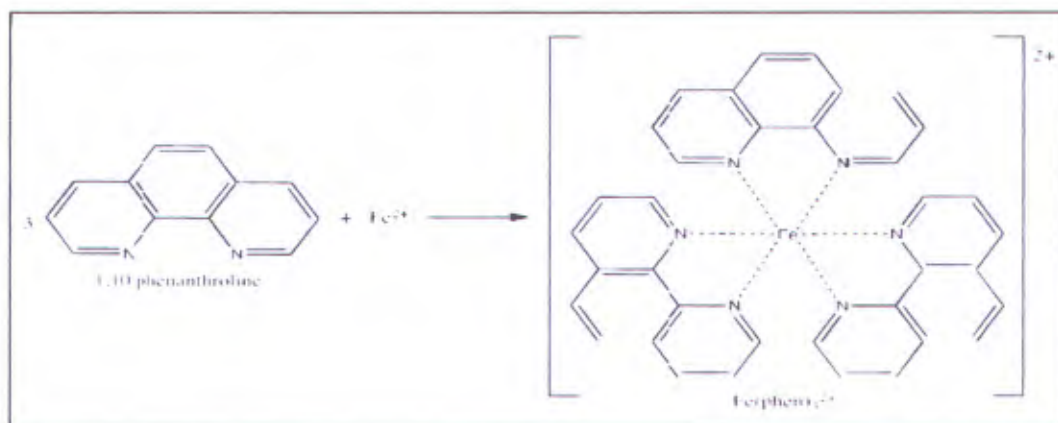
ในการวิเคราะห์อะลูมิเนียมจะต้องมีการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองได้แก่ ปริมาณของสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วง และปริมาณของสารตัวอย่าง ซึ่งผลการทดลอง แสดงดังตาราง ที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ อะลูมิเนียม(III)

พารามิเตอร์	ช่วงที่ปรับเปลี่ยน	ค่าที่เหมาะสม
ปริมาณของสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วง	0.5-1.0 μL	$2 \times 0.6 \mu\text{L}$
ปริมาณของสารละลายมาตรฐาน อะลูมิเนียม(III)	6-16 μL	$2 \times 14 \mu\text{L}$

4.4.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II)

ในการวิเคราะห์เหล็กโมเลกุลของฟีแนนโทรีน 3 โมล จะจับกับ Fe^{2+} 1 โมล เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มแดง $[\text{Fe}(\text{phen})_3]^{2+}$ ซึ่งในธรรมชาติจะพบเหล็กในรูป Fe^{3+} ดังนั้นจึงมีการเติม hydroxylamine เพื่อต้องการรีดิวซ์ให้ Fe^{3+} อยู่ในรูปของ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยากับ 1,10-phenanthroline ดังสมการในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงปฏิกิริยาของเหล็ก (II) กับ 1,10-phenanthroline ในรูปของสารเชิงซ้อน $[\text{Fe}(\text{phen})_3]^{2+}$ จะเกิดเป็นสีส้มแดง

ในการวิเคราะห์เหล็กจะต้องมีการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองได้แก่ ปริมาตรของไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine) ปริมาตร Poly(acrylic acid) ปริมาตรของ 1,10-phenanthroline และปริมาตรของสารตัวอย่าง ซึ่งผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II)

พารามิเตอร์	ช่วงที่ปรับเปลี่ยน (μL)	ค่าที่เหมาะสม (μL)
ปริมาตร Hydroxylamine	0.5-1.3	2×0.5
ปริมาตร Poly(acrylic acid)	0.5-1.3	0.5
ปริมาตร 1,10-phenanthroline	0.5-1.3	2×0.5
ปริมาตรสารละลายมาตรฐานและสารตัวอย่าง	5-25	10×2

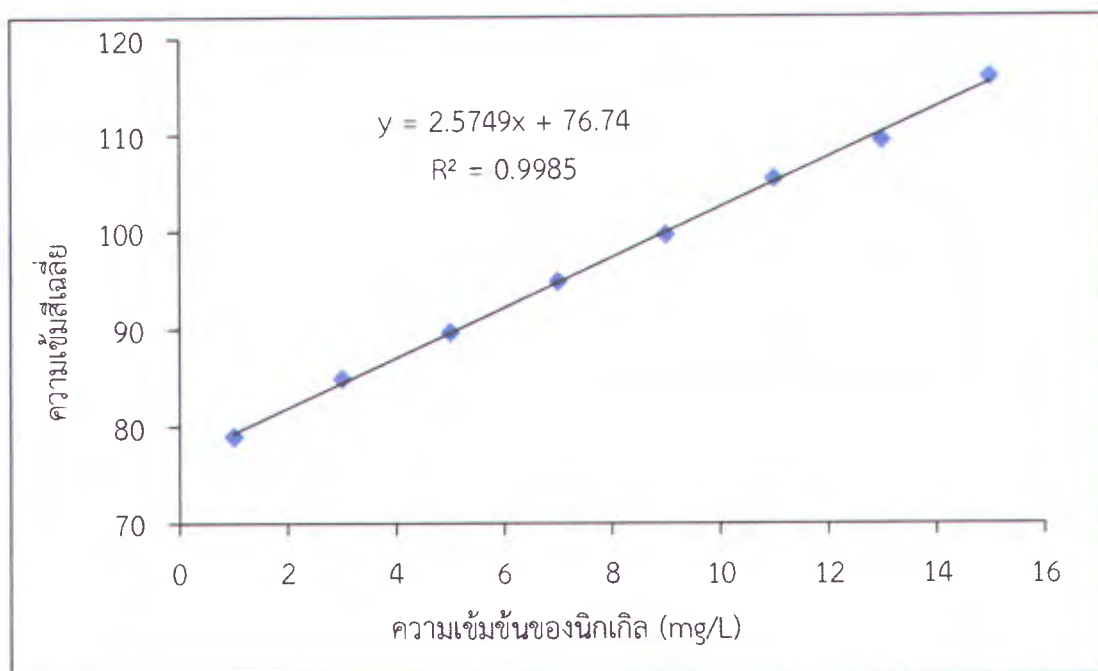
4.5 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve method)

4.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve method) ของสารตัวอย่าง นิกเกิล(II) กับสารตัวอย่างอลูมิเนียม(III)

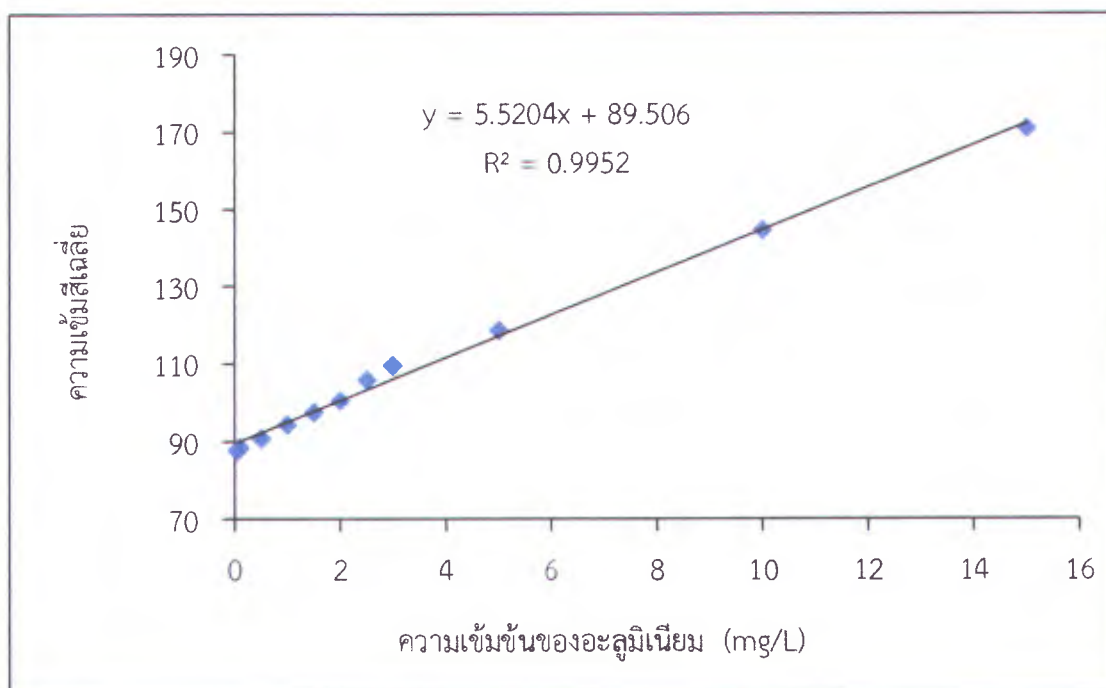
สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล(II) ในช่วงระหว่างความเข้มข้น 1 mg/L ถึง 15 mg/L โดยใช้เทคนิคการเทียบสี (colorimetric method) วัดความเข้มสีของสารละลายมาตรฐาน นิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 mg/L ปริมาตร 14 μL จำนวน 20 ครั้ง นำข้อมูลมาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้น จะได้ความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 4.12

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณอลูมิเนียม(III) ในช่วงระหว่างความเข้มข้น 0.05 mg/L ถึง 15 mg/L โดยใช้เทคนิคการเทียบสี (colorimetric method) วัดความเข้มสีของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 5, 10 และ 15 mg/L ปริมาตร 14 μL จำนวน 2 ครั้ง นำข้อมูลมาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้น จะได้ความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 4.13

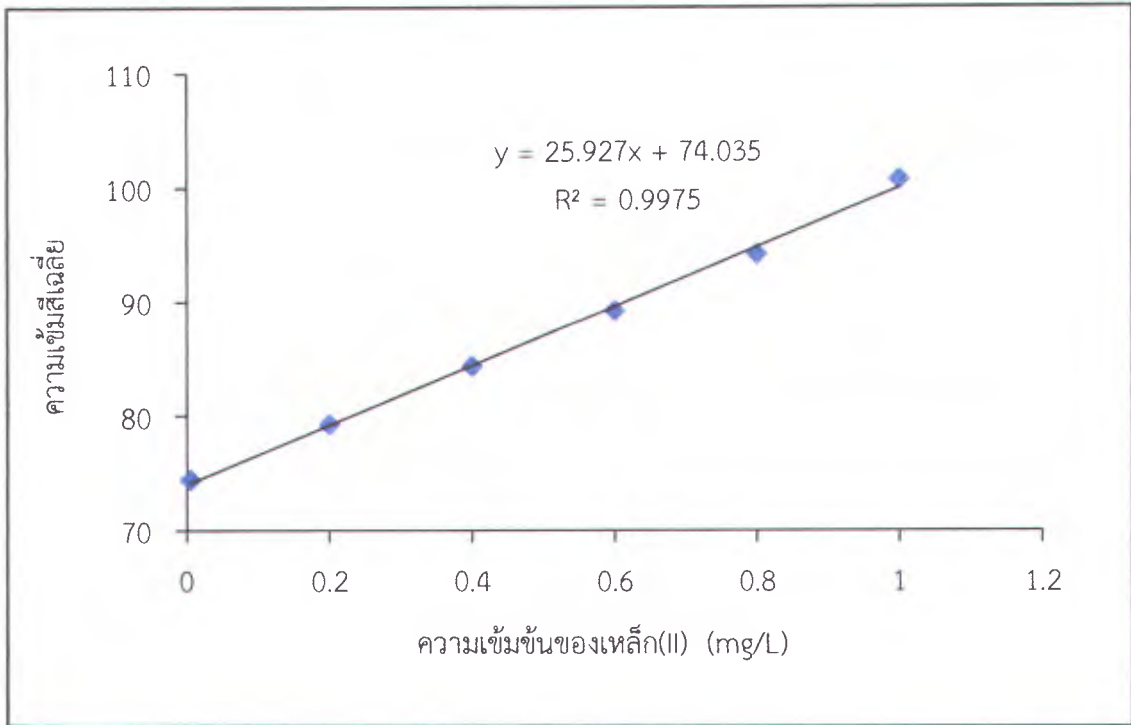
สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก(III) โดยใช้เทคนิคการเทียบสี (colorimetric method) มีช่วงความเป็นเส้นตรงสองช่วงคือช่วงความเข้มข้นต่ำ 0.005 – 1 mg/L วัดความเข้มสีของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(III) ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mg/L และช่วงความเข้มข้นสูง 1 – 9 mg/L วัดความเข้มสีของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(III) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 7 และ 9 mg/L ปริมาตร 10 μL จำนวน 5 ครั้ง นำข้อมูลมาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้น จะได้ความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



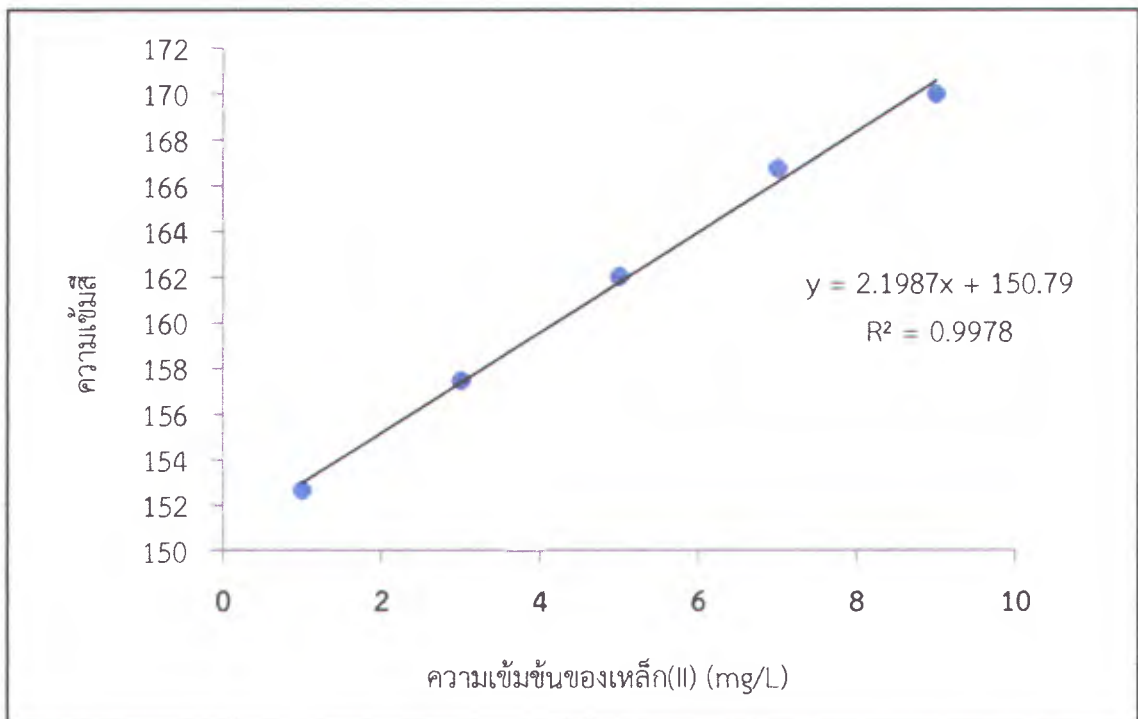
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน นิกเกิล(II) ในช่วงความเข้มข้น 1 – 15 mg/L



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน อะลูมิเนียม(III) ในช่วงความเข้มข้น 0.05 – 15 mg/L



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) ในช่วงความเข้มข้นต่ำ 0.005 – 1 mg/L



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ยกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) ในช่วงความเข้มข้นสูง 1 – 9 mg/L

4.5.2 การหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) และขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II)

สามารถคำนวณหา LOD และ LOQ ได้จากสูตร

$$\text{LOD คำนวณได้จากสูตร } LOD = \frac{3SD}{\text{Slope}}$$

$$\text{LOQ คำนวณได้จากสูตร } LOQ = \frac{10SD}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Slope คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐาน

พบว่า ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า LOD และ LOQ ที่ได้จากการวัดจริง ดังนั้นการรายงานค่า LOD และ LOQ จึงรายงานค่าตามค่าที่วัดได้จริง ซึ่ง LOD และ LOQ ของนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) มีค่าเท่ากับ 1, 0.05 และ 0.005 mg/L ตามลำดับ

4.5.3 การหาความเที่ยง (Precision) ของนิกเกิล(II) และอลูมิเนียม(III)

4.5.3.1 การหาความเที่ยง (Precision) ของนิกเกิล(II)

ทดสอบวัดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 5, 15 และ 35 mg/L (ทำซ้ำ 10 ครั้ง) ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 5, 15 และ 35 mg/L ให้ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 1.66, 0.84 และ 0.59 ตามลำดับแสดงว่ากระบวนการวิเคราะห์มีความเที่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานขององค์กร AOAC INTERNATIONAL (อ้างอิงจาดตารางที่ 2.2) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) ที่ความเข้มข้น 5, 15 และ 35 mg/L

ความเข้มข้น Ni(II)	5 mg/L	15 mg/L	35 mg/L
ความเข้มข้น	53.75	65.22	73.46
	51.25	64.63	74.73
	55.93	66.50	73.24
	50.24	64.88	74.68
	52.18	63.81	74.39
	53.77	66.09	74.71
	53.75	66.38	74.12
	54.25	65.86	74.85
	53.30	65.41	74.67
	54.50	65.33	74.89
เฉลี่ย	53.29	65.41	74.37
SD	1.66	0.84	0.59
%RSD	3.12	1.28	0.79

4.5.3.2 การหาความเที่ยง (Precision) อลูมิเนียม(III)

ทดสอบวัดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 25, 35 และ 50 mg/L (ทำซ้ำ 10 ครั้ง) ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 25, 35 และ 50 mg/L ให้ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.94, 1.40 และ 0.96 ตามลำดับแสดงว่ากระบวนการวิเคราะห์มีความเที่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานขององค์กร AOAC INTERNATIONAL (อ้างอิงจากรายที่ 2.2) แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) ที่ความเข้มข้น 25, 35 และ 50 mg/L

ความเข้มข้น Al(III)	25 mg/L	35 mg/L	50 mg/L
ความเข้มข้น	73.18	81.08	102.86
	73.13	82.30	101.80
	72.74	83.82	104.54
	72.98	84.53	101.03
	74.83	81.59	102.83
	73.43	84.96	102.19
	73.69	84.75	103.04
	72.74	82.77	103.58
	71.29	82.75	102.63
	74.19	81.83	102.24
เฉลี่ย	73.22	83.04	102.68
SD	0.95	1.40	0.96
%RSD	1.30	1.69	0.94

4.5.3.3 การหาความเที่ยง (Precision) ของเหล็ก(II)

ทดสอบวัดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.4 และ 1.0 mg/L (ทำซ้ำ 10 ครั้ง) ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.2 และ 1.0 mg/L ให้ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.642, 0.475 และ 0.548 ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการวิเคราะห์มีความเที่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานขององค์กร AOAC INTERNATIONAL (อ้างอิงจากรายการที่ 2.2) แสดงดังตารางที่ 4.7

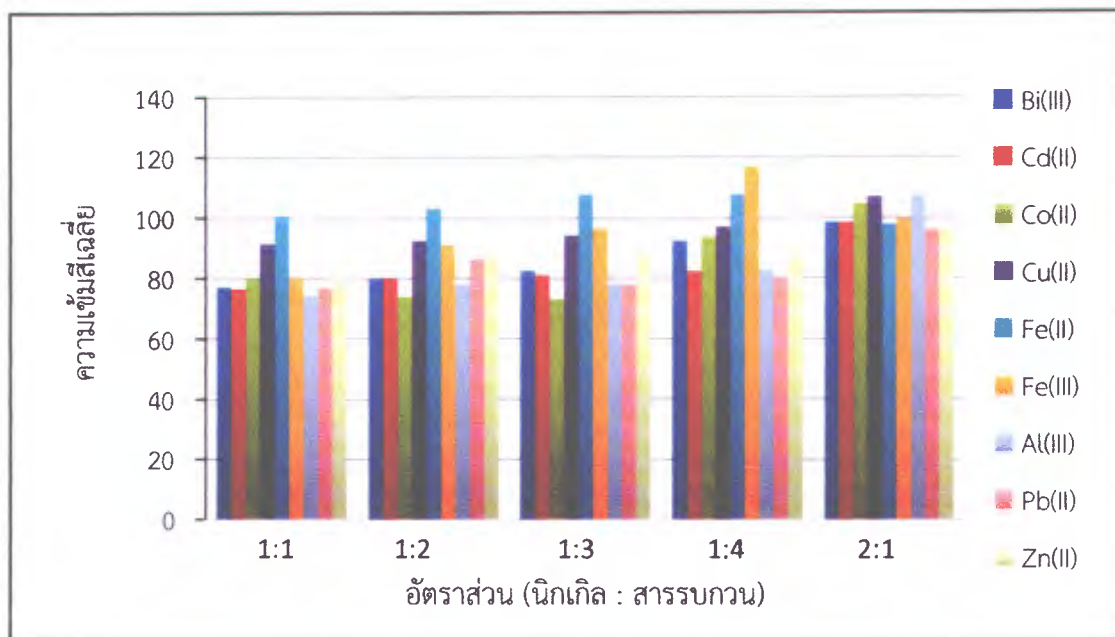
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐานเหล็กที่ความเข้มข้น 0.005, 0.4 และ 1.0 mg/L

ความเข้มข้น Fe (II)	0.005 mg/L	0.4 mg/L	1.0 mg/L
ความเข้มข้น	126.982	137.012	156.556
	125.741	136.354	155.684
	125.521	136.418	156.847
	127.721	137.791	156.489
	126.598	137.658	157.561
	127.374	138.641	156.684
	125.989	137.398	157.511
	125.955	137.784	156.249
	126.678	136.859	156.398
	126.981	135.989	155.498
เฉลี่ย	126.554	137.804	156.547
SD	0.812	0.652	0.859
%RSD	0.642	0.475	0.548

4.6 ผลของสารรบกวน

4.6.1 ผลของสารรบกวนต่อการวิเคราะห์นิกเกิล(II)

ทดสอบสารรบกวนของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) มีทั้งหมด 9 ตัวคือ Fe(III), Fe(II), Al(III), Pb(II), Cu(II), Zn(II), Co(II), Cd(II) และ Bi(III) โดยกำหนดเป็นอัตราส่วนของนิกเกิล(II) ต่อสารรบกวน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 สารรบกวนจะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงประมาณ 10-15% จากการทดลองพบว่าสารรบกวน Zn(II), Pb(II), Cu(II), Co(II), Cd(II), Al(III) และ Bi(III) ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ส่วน Fe(III) และ Fe(II) จะส่งผลต่อการวิเคราะห์ที่อัตราส่วน 1:2, 1:3 และ 1:4 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8



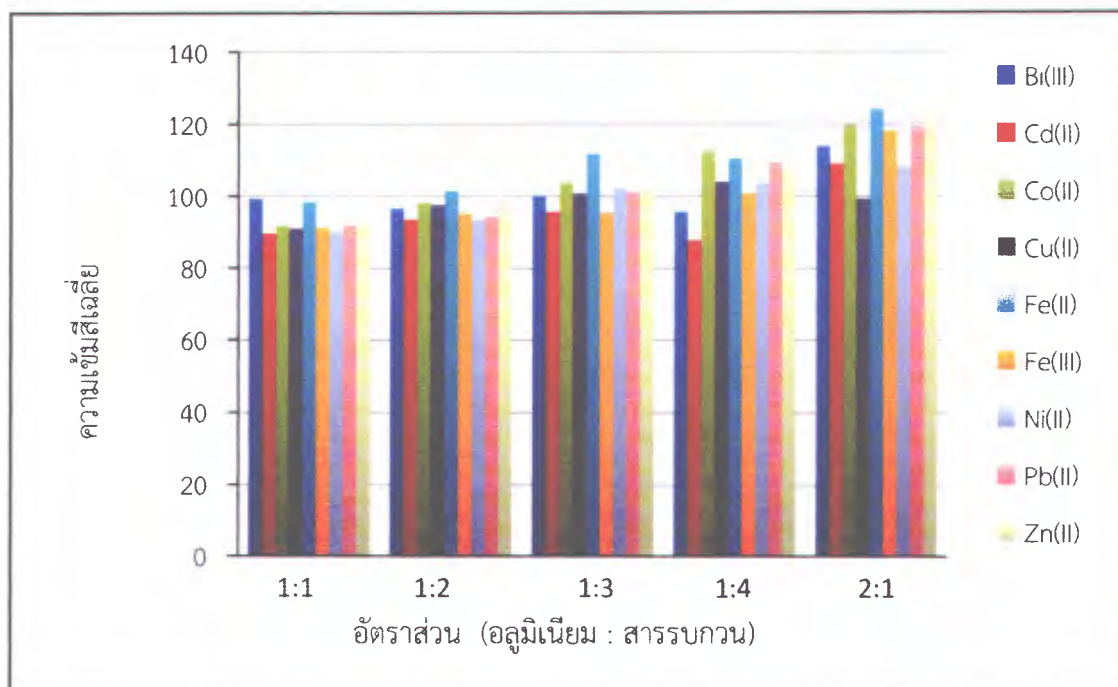
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มสีเฉลี่ยของนิกเกิล(II)

ตารางที่ 4.8 สารรบกวนที่มีผลต่อการเกิดสีของนิกเกิล(II)

อัตราส่วน	Mean Intensity (%)								
	Bi(III)	Cd(II)	Co(II)	Cu(II)	Fe(II)	Fe(III)	Al(III)	Pb(II)	Zn(II)
1:1	91.0	91.7	95.0	108.0	119.6	95.0	88.0	91.6	95.0
1:2	94.0	94.0	88.0	109.0	121.4	107.0	91.0	102.0	105.0
1:3	97.6	95.0	85.7	111.9	127.9	114.0	92.0	92.8	105.0
1:4	109.0	97.6	110.0	114.0	127.9	138.0	97.6	95.0	107.0
2:1	95.0	95.0	100.9	102.9	94.8	96.0	103.8	93.0	93.0

4.6.2 ผลของสารรบกวนต่อการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III)

ทดสอบสารรบกวนของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) 9 ตัวคือ Fe(III), Fe(II), Ni(II), Pb(II), Cu(II), Zn(II), Co(II), Cd(II) และ Bi(III) โดยกำหนดเป็นอัตราส่วนของอลูมิเนียม(III) ต่อสารรบกวน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 สารรบกวนจะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อความเข้มข้นลดลงประมาณ 10-15 % จากการทดลองพบว่าสารรบกวน Fe(III), Fe(II), Ni(II), Pb(II), Cu(II), Zn(II), Co(II), Cd(II) และ Bi(III) ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียม (III)

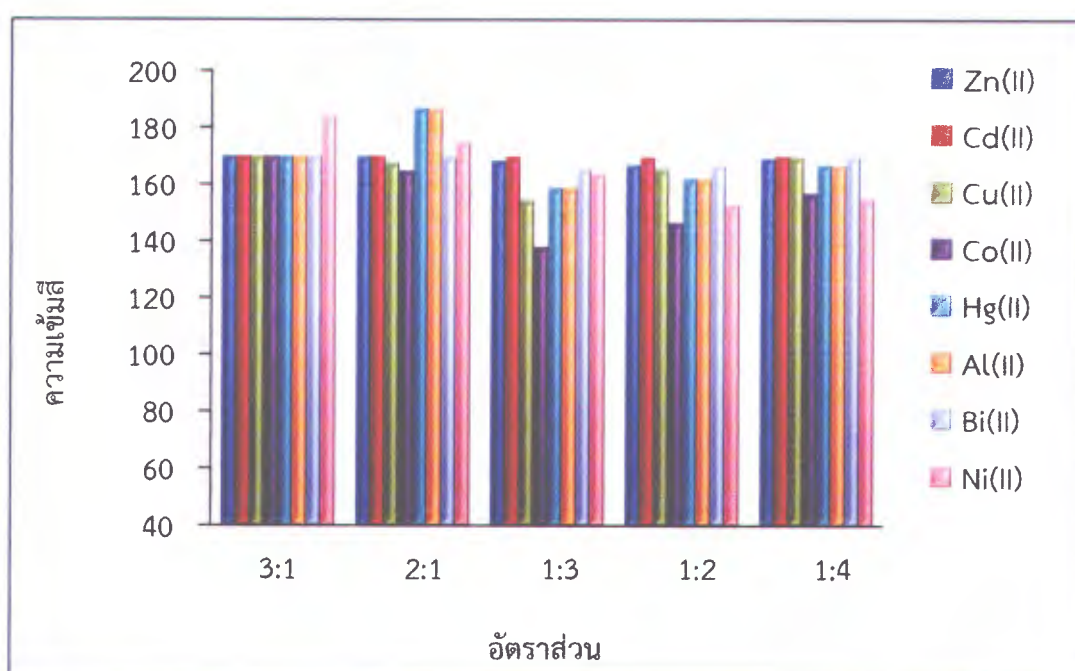
ตารางที่ 4.9 สารรบกวนที่มีผลต่อการเกิดสีของอลูมิเนียม(III)

อัตราส่วน	Mean Intensity (%)								
	Bi(III)	Cd(II)	Co(II)	Cu(II)	Fe(II)	Fe(III)	Ni(II)	Pb(II)	Zn(II)
1:1	100.0	90.3	92.4	91.7	98.0	91.9	90.6	92.5	92.6
1:2	97.4	94.2	98.9	98.3	101.7	95.6	94.0	94.6	98.6
1:3	100.0	96.5	104.5	101.0	112.4	96.0	102.7	101.0	102.0
1:4	96.4	88.4	113.0	104.8	111.2	101.6	104.0	110.0	107.0
2:1	102.0	97.8	107.0	89.0	111.0	106.0	96.8	107.0	109.0

4.6.2 ผลของสารรบกวนต่อการวิเคราะห์เหล็ก(II)

ทดสอบสารรบกวน 8 ตัวคือ Ni(II), Pb(II), Cu(II), Zn(II), Co(II), Cd(II) และ Bi(III) และ Al(III) โดยกำหนดเป็นอัตราส่วนของเหล็กต่อสารรบกวน 3:1, 2:1, 1:3, 1:2, 1:1 สารรบกวนจะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงประมาณ 10-15% จากการทดลองพบว่าสารรบกวนสารทุกตัวไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์

Al(III), Pb(II), Zn(II), Co(II) 1:1, 1:2, 1:5 และ 1:10 สารรบกวนจะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงประมาณ 10-15% จากการทดลองพบว่าสารรบกวน Al(III), Zn(II) และ Co(II) ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ส่วน Pb(II) จะส่งผลต่อการวิเคราะห์ที่อัตราส่วน 1:10 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารรบกวนกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเหล็ก(II)

4.7 การตรวจวัดโลหะในตัวอย่งน้ำดื่ม

4.7.1 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษกับวิธี Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) และวิธี UV-vis Spectrometry (UV-Vis)

จากการทดลองเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่าเทคนิคที่พัฒนาเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์ ใช้งานง่าย สะดวก ราคาถูก และย่อยสลายได้ดีไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม สามารถตรวจวัดนิกเกิล(II) และอลูมิเนียม(III) ในภาคสนามได้ เมื่อเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น (Lab-on-paper) กับวิธีมาตรฐาน Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) ด้วยค่าทางสถิติ t-tast พบว่าทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี แสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ดังนั้นจึงใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้จึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดื่มในโรงเรียนได้

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (ICP-OES)

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)		% Recovery	
		วิธีที่พัฒนา	ICP-OES	วิธีที่พัฒนา	ICP-OES
นิกเกิล(II)	Blank	ND	ND	ND	ND
	12	11.50	13.27	95.83	100.53
	24	22.52	27.25	93.83	113.54
	32	32.63	36.47	101.95	113.96
อลูมิเนียม(III)	Blank	ND	ND	ND	ND
	28	28.52	27.72	101.82	99
	38	40.01	35.98	105.95	94.68
	48	49.34	46.01	102.79	95.85

ND=not detected.

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (UV-Vis)

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)		% Recovery	
		วิธีที่พัฒนา	UV-Vis	วิธีที่พัฒนา	UV-Vis
เหล็ก(II)	Blank	ND	ND	ND	ND
	0.50	0.50	0.43	100.0	86.6
	3.00	3.07	3.20	102.3	109.8

ND=not detected.

4.7.2 การตรวจวัดพีเอช (pH) ของน้ำดื่มในโรงเรียน

จากการทดสอบ pH ของน้ำดื่มในโรงเรียนทั้ง 21 แห่ง จากกลุ่มตัวอย่างในจังหวัด นครศรีธรรมราช ซึ่งตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขเรื่องน้ำบริโภค ได้กำหนดให้น้ำบริโภคควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5 – 8.5 จากการตรวจวัด pH ของน้ำดื่มในโรงเรียนพบว่ามีค่า pH อยู่ในช่วง 3.96 – 7.53 แสดงให้เห็นว่าโรงเรียนส่วนใหญ่ยังคงมีสภาพน้ำเป็นกรด มี pH ต่ำกว่า 6.5 แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงพีเอชของน้ำดื่มในโรงเรียน

ลำดับที่	ชื่อโรงเรียนของตัวอย่างน้ำ	พีเอช ของตัวอย่างน้ำ
1	โรงเรียนบ้านหน้าเปา	5.23 (น้ำกรอง), 5.12 (น้ำก๊อกไม่กรอง)
2	โรงเรียนบ้านเขาฝ้าย	6.16
3	โรงเรียนนาทรง	4.41
4	โรงเรียนบ้านคลองเหลง	4.11
5	โรงเรียนชุมชนวัดสระแก้ว	5.12
6	โรงเรียนวัดวัวหลง	4.21
7	โรงเรียนบ้านควนมุด	7.53 (น้ำบ่อลูกรัง), 6.97 (น้ำประปา)
8	โรงเรียนวัดทุ่งโพธิ์	5.03
9	โรงเรียนบ้านห้วยน้ำเย็น	7.04 (น้ำกรอง), 6.99 (น้ำฝน)
10	โรงเรียนวัดปากตรง	5.70 (น้ำกรอง), 6.05 (น้ำฝน)
11	โรงเรียนบ้านน้ำบ่อ	5.65
12	โรงเรียนชุมชนลานสกา	4.32
13	โรงเรียนวัดราชบุรุษวรากรม	5.86
14	โรงเรียนวัดหัวอิฐ	3.96
15	โรงเรียนบ้านคลองงาน	5.08
16	โรงเรียนบ้านคลองกุ่ม	6.29
17	โรงเรียนวัดมณีเจริญ	5.39
18	โรงเรียนบ้านเกาะขวัญ	4.90
19	โรงเรียนวัดควน	4.93
20	โรงเรียนวัดลำนาว	5.04
21	โรงเรียนวัดก้างปลา	5.80

4.7.2 การตรวจวัดโลหะของน้ำดื่มในโรงเรียน

จากการตรวจวัดการปนเปื้อนของโลหะนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) พบว่า ตรวจไม่พบโลหะทั้งสามชนิด และให้ค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับอยู่ในช่วง 84 – 120 % ซึ่งผลการวิเคราะห์ยอมรับได้ตามมาตรฐานขององค์กร AOAC INTERNATIONAL (อ้างอิงจากรายที่ 2.1) แสดงดังตารางที่ 4.13, 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการตรวจวัดนิกเกิล(II)

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
โรงเรียนบ้านหน้าเปา	Blank	ND	-
	8	7.53	94
โรงเรียนบ้านเขาฝ้าย	Blank	ND	-
	8	8.25	103
โรงเรียนนาทรง	Blank	ND	-
	8	8.0	100
โรงเรียนบ้านคลองเหลง	Blank	ND	-
	8	7.67	95
โรงเรียนชุมชนวัดสระแก้ว	Blank	ND	-
	8	8.84	110.5
โรงเรียนวัดวัวหลุง	Blank	ND	-
	8	7.12	89
โรงเรียนบ้านควนมุด	Blank	ND	-
	8	8.32	104
โรงเรียนวัดทุ่งโพธิ์	Blank	ND	-
	8	8.23	102
โรงเรียนบ้านห้วยน้ำเย็น	Blank	ND	-
	8	7.25	90
โรงเรียนวัดปากตรง	Blank	ND	-
	8	7.41	92
โรงเรียนบ้านน้ำบ่อ	Blank	ND	-
	8	7.79	97
โรงเรียนชุมชนลานสกา	Blank	ND	-
	8	7.75	96

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
โรงเรียนวัดราษฎร์วาราม	Blank	ND	-
	8	8.66	108
โรงเรียนวัดหัวอิฐ	Blank	ND	-
	8	7.30	91
โรงเรียนบ้านคลองงาน	Blank	ND	-
	8	8.10	101
โรงเรียนบ้านคลองกุย	Blank	ND	-
	8	8.13	101
โรงเรียนวัดมณีเจริญ	Blank	ND	-
	8	7.53	94
โรงเรียนบ้านเกาะขวัญ	Blank	ND	-
	8	8.72	109
โรงเรียนวัดควน	Blank	ND	-
	8	8.89	111
โรงเรียนวัดลำนาว	Blank	ND	-
	8	8.07	100
โรงเรียนวัดก้างปลา	Blank	ND	-
	8	7.45	93

ND=not detected.

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการตรวจวัดอลูมิเนียม(III)

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
โรงเรียนบ้านหน้าแก	Blank	ND	-
	8	7.02	87
โรงเรียนบ้านเขาฝ้าย	Blank	ND	-
	8	7.31	91
โรงเรียนนาทรง	Blank	ND	-
	8	6.85	85
โรงเรียนบ้านคลองเหลง	Blank	ND	-
	8	7.2	90
โรงเรียนชุมชนวัดสระแก้ว	Blank	ND	-
	8	7.45	93
โรงเรียนวัดวัวหลุง	Blank	ND	-
	8	7.12	89
โรงเรียนบ้านควนมุด	Blank	ND	-
	8	7.24	90.5
โรงเรียนวัดทุ่งโพธิ์	Blank	ND	-
	8	7.54	94
โรงเรียนบ้านห้วยน้ำเย็น	Blank	ND	-
	8	7.27	90
โรงเรียนวัดปากตรง	Blank	ND	-
	8	7.49	93
โรงเรียนบ้านน้ำบ่อ	Blank	ND	-
	8	7.03	87
โรงเรียนชุมชนลานสกา	Blank	ND	-
	8	7.21	90
โรงเรียนวัดราษฎร์ วราราม	Blank	ND	-
	8	6.92	86.5
โรงเรียนวัดหัวอิฐ	Blank	ND	-
	8	7.62	95
โรงเรียนบ้านคลองงาน	Blank	ND	-
	8	7.32	91.5
โรงเรียนบ้านคลองกุ่ม	Blank	ND	-

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
	8	7.22	90
โรงเรียนวัดมณีเจริณู	Blank	ND	-
	8	7.22	90
โรงเรียนบ้านเกาะขวัญ	Blank	ND	-
	8	6.93	86
โรงเรียนวัดควน	Blank	ND	-
	8	7.73	96
โรงเรียนวัดลำนาว	Blank	ND	-
	8	6.96	87
โรงเรียนวัดก้างปลา	Blank	ND	-
	8	6.83	85

ND=not detected.

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการตรวจวัดเหล็ก(II)

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
โรงเรียนบ้านหน้าเปา	Blank	ND	-
	0.5	0.48	96
โรงเรียนบ้านเขาฝ้าย	Blank	ND	-
	0.5	0.56	112
โรงเรียนนาทรง	Blank	ND	-
	0.5	0.6	120
โรงเรียนบ้านคลองเหลง	Blank	ND	-
	0.5	0.55	110
โรงเรียนชุมชนวัดสระแก้ว	Blank	ND	-
	0.5	0.59	118
โรงเรียนวัดวัวหลง	Blank	ND	-
	0.5	0.47	94
โรงเรียนบ้านควนมุด	Blank	ND	-
	0.5	0.54	108
โรงเรียนวัดทุ่งโพธิ์	Blank	ND	-
	0.5	0.45	90
โรงเรียนบ้านห้วยน้ำเย็น	Blank	ND	-
	0.5	0.52	104
โรงเรียนวัดปากตรง	Blank	ND	-
	0.5	0.58	116
โรงเรียนบ้านน้ำบ่อ	Blank	ND	-
	0.5	0.56	112
โรงเรียนชุมชนลานสกา	Blank	ND	-
	0.5	0.48	96
โรงเรียนวัดราษฎร์วราราม	Blank	ND	-
	0.5	0.44	88
โรงเรียนวัดหัวอิฐ	Blank	ND	-
	0.5	0.55	110
โรงเรียนบ้านคลองงาน	Blank	ND	-
	0.5	0.57	114
โรงเรียนบ้านคลองกุย	Blank	ND	-

ชื่อโรงเรียน	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	% recovery
	0.5	0.49	98
โรงเรียนวัดมณีเจริณู	Blank	ND	-
	0.5	0.46	92
โรงเรียนบ้านเกาะขวัญ	Blank	ND	-
	0.5	0.50	100
โรงเรียนวัดควน	Blank	ND	-
	0.5	0.56	112
โรงเรียนวัดลำนาว	Blank	ND	-
	0.5	0.42	84
โรงเรียนวัดก้างปลา	Blank	ND	-
	0.5	0.51	102

ND=not detected.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในน้ำดื่มด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษร่วมกับการตรวจวัดสีอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสร้างโดยการสกรีนด้วยเทียนกำหนดส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์นิกเกิล(II) พบว่าสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) ที่พีเอชเป็นกลาง ปริมาตรของ Dimethylglyoxime 0.9 μL หยด 3 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด ปริมาตรของแอมโมเนียต่อน้ำ ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 0.7 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด และปริมาตรของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) 14 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณใส่ตัวอย่าง จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างนิกเกิล(II) กับ Dimethylglyoxime ให้สีชมพูแดงบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III) ที่พีเอชเป็นกลาง ปริมาตรของสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วง 0.6 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณตรวจวัด และปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม 14 μL หยด 2 ครั้ง ที่บริเวณใส่สารตัวอย่าง จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างอลูมิเนียม(III) กับสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงให้สีน้ำเงินบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เหล็ก(II) ใช้ปริมาตรสารละลาย Hydroxylamine 0.5 μL 2 ครั้ง ปริมาตรสารละลาย Poly(acrylic acid) 0.5 μL 1 ครั้ง ปริมาตรสารละลาย 1,10-phenanthroline ปริมาตร 0.5 μL 2 ครั้ง และปริมาตรสารละลายมาตรฐานเหล็ก(III) 10 μL 2 ครั้ง ที่บริเวณใส่สารตัวอย่าง จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มแดง โดยการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) จะวิเคราะห์จากภาพที่มีความเข้มสีโดยสแกนภาพและหาค่าความเข้มสีเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Image J

การวิเคราะห์นิกเกิล(II) ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้สมการของกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล(II) กับค่าความเข้มสีเฉลี่ย (Mean Intensity) $Y = 2.5749x + 76.74$ ค่า $R^2 = 0.9985$ ที่ความเข้มข้น 1 – 15 mg/L ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) จากการวัดจริงของการวิเคราะห์นิกเกิล(II) คือ 1 mg/L ทดสอบความเที่ยง 3 ความเข้มข้น คือ 5, 15 และ 35 mg/L ให้ค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.79-3.12 % แสดงว่ามีความเที่ยง (precision) สูงตามเกณฑ์มาตรฐานขององค์กร Associational Official Analytical Chemists (AOAC International) การศึกษาผลของสารรบกวนต่อการวิเคราะห์นิกเกิล(II) ได้แก่ Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II), Al(III) และ Bi(II) ที่อัตราส่วนของนิกเกิล(II) สารรบกวน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 พบว่า Cd(II), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Co(II), Al(III) และ Bi(II) ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ส่วน Fe(II) และ Fe(III) จะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อมีสารรบกวนมากกว่า 4 เท่า

การวิเคราะห์อลูมิเนียม(III) ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้สมการของกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอลูมิเนียม(III) กับค่าความเข้มสีเฉลี่ย (Mean Intensity) $Y = 5.5204x + 89.506$ ค่า $R^2 = 0.9952$ ที่ความ

เข้มข้น 0.05 – 15 mg/L ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) จากการวัดจริงของการวิเคราะห์อลูมิเนียม(III) คือ 0.05 mg/L ทดสอบความเที่ยง 3 ความเข้มข้น คือ 25, 35 และ 50 mg/L ให้ค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.94-1.69 % แสดงว่ามีค่าความเที่ยง (precision) สูงตามเกณฑ์มาตรฐานขององค์กร Associational Official Analytical Chemists (AOAC International) การศึกษาผลของสารรบกวนต่อการวิเคราะห์อลูมิเนียมได้แก่ Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Cd(II), Co(II) , Ni(II) และ Bi(II) ที่อัตราส่วนของอลูมิเนียม(III) สารรบกวน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 2:1 พบว่า Fe(II), Fe(III), Zn(II), Pb(II), Cu(II), Co(II) , Ni(II) และ Bi(II) ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ส่วน Cd(II) จะส่งผลต่อการวิเคราะห์เมื่อมีสารรบกวนมากกว่า 4 เท่า

การวิเคราะห์เหล็ก(II) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้สมการของกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) กับค่าความเข้มสีเฉลี่ย (Mean Intensity) $Y = 30.524x + 126.84$ ค่า $R^2 = 0.9978$ ที่ความเข้มข้น 0.005-1.0 mg/L และ $Y = 2.198x + 130.7$ ค่า $R^2 = 0.9950$ ที่ความเข้มข้น 1.0-9.0 mg/L ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) จากการวัดจริงของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(II) เท่ากับ 0.005 mg/L ซึ่งความสามารถของการวัดซ้ำได้ของวิธีวิเคราะห์ (Precision) ที่ 3 ความเข้มข้น คือ 0.005, 0.4 และ 1.0 mg/L มีเปอร์เซ็นต์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) เท่ากับ 0.542, 0.475 และ 0.548 % ตามลำดับ แสดงว่ามีค่าความเที่ยง (precision) สูงตามเกณฑ์มาตรฐานขององค์กร Associational Official Analytical Chemists (AOAC International) การทดสอบสารรบกวน (Interference) ด้วยโลหะชนิดต่างๆ (Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Al^{3+} , Bi^{3+} และ Ni^{2+}) พบว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของการวิเคราะห์เหล็ก(II)

อุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(III) ในตัวอย่างน้ำดื่มจากโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราช จากการศึกษาให้ค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับอยู่ในช่วง 84 – 120 % ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 8 mg/L เมื่อเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษกับวิธี ICP-OES พบว่าผลการวิเคราะห์ของทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t-test) เทคนิคที่พัฒนาขึ้นเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้วิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ที่ใช้งานง่าย สะดวก ราคาถูก สร้างจากวัสดุที่หาได้ง่าย ย่อยสลายได้ดีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในภาคสนามได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การสร้างรูปแบบการไหลของอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ อาจมีรูปแบบที่แตกต่างจากนี้ได้ ควรพิจารณาการใช้ประโยชน์แต่ละด้าน

5.2.2 การตรวจวัดบนอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษ อาจใช้โลหะอื่นก็ได้ แต่ต้องพิจารณาถึงการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่เฉพาะเจาะจง

5.2.3 ต้องมีการปรับเปลี่ยนสภาวะของการทดลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สารในระดับต่ำได้

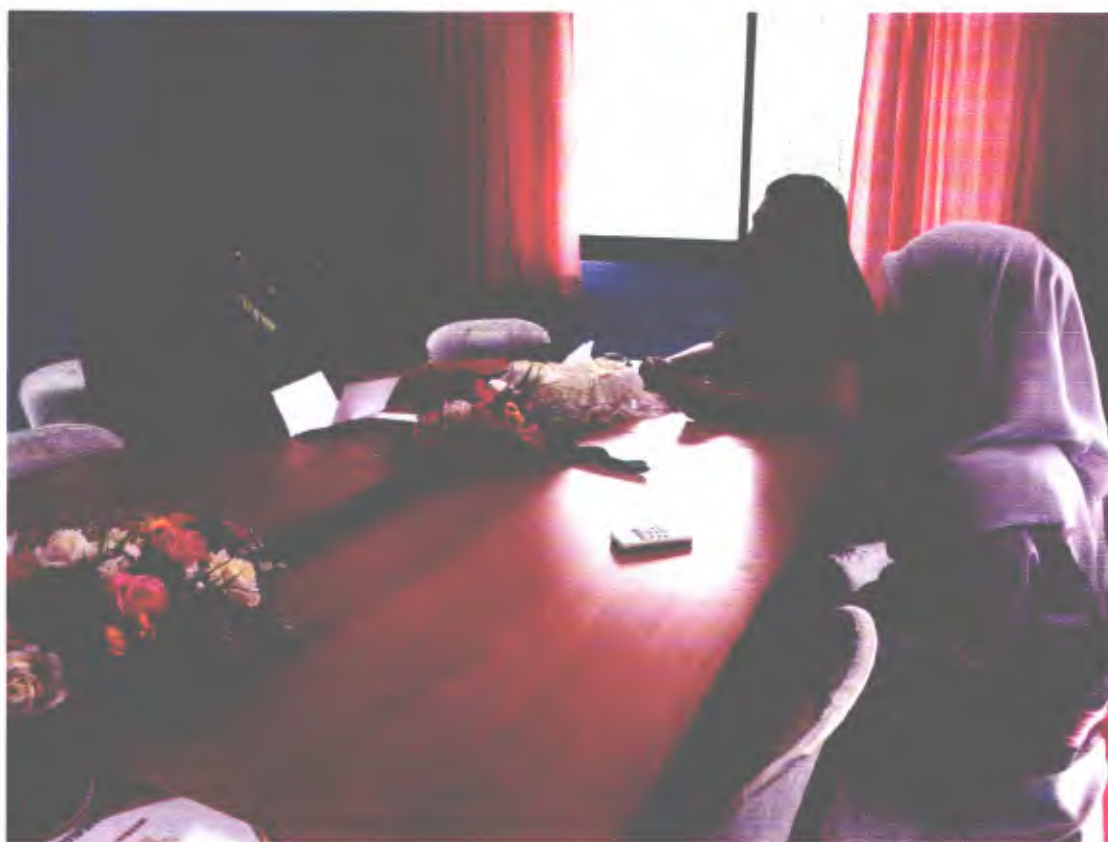
บรรณานุกรม

- [1] กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน “โลหะกับการพัฒนาประเทศ” สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
- [2] องค์การอนามัยโลก. “มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค” Guidelines for drinking-water quality [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://plan.dgr.go.th/school/5>.
- [3] บริษัท กู๊ดเฮลท์ ประเทศไทยจำกัด. (2549) “อลูมิเนียมสารพิษที่คนมองข้าม” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : www.goodhealth.co.th/new_page_74.htm
- [4] องค์การอนามัยโลก. “มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค” Guidelines for drinking-water quality [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://plan.dgr.go.th/school/5>.
- [5] ฉันทนา ผดุงทศ พ.บ., DrPH in Occupational Health, วารสารคลินิกเล่มที่ 263. “สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม” กรมควบคุมโรค. กระทรวงสาธารณสุข.2548
- [6] วิรัช เรื่องศรีตระกูล และธัญญาภรณ์ สุวรรณไพบูรณ์. “การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในตู้น้ำดื่มที่ให้บริการในมหาวิทยาลัยขอนแก่น” สาขาเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [7] อติสร เตือนตรานนท์.(2554). Lab on a Paper. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://Adisorn.tuantranont@nectec.or.th>. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 เมษายน 2557
- [8] Martinez, A.W.; Phillips, S.T. : Butte, M.J. : Whitesides,(2007) G.M. Angew. Chem., Int.Ed., 46,1318-1320
- [9] สุปล มานะเกษตรธาร. (2556).ประโยชน์ที่อาจคาดไม่ถึงของกระดาษในการวิเคราะห์สาร. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก : <http://ostc.thaiembdc.org/13th/?p=176>. สืบค้นเมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม 2557
- [10] Martinez, S. T. Phillips, and G. M. Whitesides, Diagnostics for the Developing World: Microfluidic Paper-Based Analytical Devices, *Anal. Chem.* 2010, 82, 3-10
- [11] Liang Feng, HuiLi, et.al, Colorimetric sensing of anions in water using ratiometric indicator-displacement assay *Anal.Chem*, 2012, 743, 1-8
- [12] Dungchai, W.:Chailapakul, O.: Henry, C.S., Electrochemical detection for paper-based microfluidics. *Ana. Chem.* 2009, 81, 5821-5826
- [13] WijitarDungchai, A, OrawonChailapakul, et.al. Use of multiple colorimetric indicators for paper-based microfluidic devices, *Anal. Chem*, 2012, 674, 227-233
- [14] T.Songjaroen, W.Dungchai, O.Chailapakul, W.Laiwattanapaisal, “Novel, simple and low-cost alternative method for fabrication of paper-based microfluidics by wax dipping”. *Talanta* 85(2011) 2587-2593

- [15] Amara, A.; Weena, S.; Narong, P.; Orawan, C.; “ Simple and repid colorimetric detection of Hg(II) by a paper-based device using silver nanoplates” *Talanta*2012, 97, 388-394.
- [16] Mallory M. Mentele, Josephine Cunningham, Kirsten Koehler, John Volclens, and Charles S.Henry “Microfluidic Paper-Based Analytical Device for Particulate Metals” *Anal.Chem.*2012, 84, 4474-4480.
- [17] P. Nalawade , S. Kapoor , “Gold nanoflowers based colorimetric detection of Hg²⁺ and Pb²⁺ ions” *Spectrochimica Acta Part A.*116(2013) 132-135.
- [18] อานอบ คันทะชา และคณะ. (2557). การสังเคราะห์และคุณลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนเหล็กและสังกะสีกับลิแกนด์มัลติเดนเตต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีปีที่ 22 ฉบับ ที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2557
- [19] ปันดนา อเนกเวียง และ รินา ภัทรมานนท์. (2556). ความก้าวล้ำของเทคโนโลยีไบโอเซอร์: นวัตกรรมสู่โลกอนาคต. วารสารคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นปีที่ 41. เล่มที่ 2. หน้า 262-280.
- [20] ภัทรสุดา รักทอง และ รินา ภัทรมานนท์. (2556). การพัฒนาไบโอเซนเซอร์แบบกระดาษสู่ระบบการวินิจฉัยโรคใกล้ชิดผู้ป่วย. วารสารคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 41.เล่มที่ 4. หน้า 873-884.
- [21] W.Khaodee, W.Aeungmaitrepirom, T.Tuntulani, “Effectively simultaneous naked- eye detection of Cu(II), Pb(II), Al(III) and Fe(III) using cyaniding extracted from red cabbage as chelating agent” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 126(2014) 98-104
- [22] กุลธิดา ศรีสังข์ “ประโยชน์และโทษของนิกเกิล” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.geocities.com/vitandmin/NICKEL.htm>
- [23] ทรงพล โตซารี (2555). “โลหะหนักที่มีผลต่อสุขภาพ” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://eic.wu.ac.th/Data_Download/Research/Metals%20toxic.pdf
- [24] ลาวัลย์ เอียวสวัสดิ์. การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ.สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี).[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.sec.psu.ac.th>

ภาคผนวก

ภาพการเก็บตัวอย่าง





















ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นางสาวเบญจวรรณ นิลวงศ์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Miss Benjawan Ninwong
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน : 1800700084321
- ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทร : 0839096332
E-mail : ben-benone@hotmail.com
- ประวัติการศึกษา
 - ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2552
 - ปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2555
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
เคมีเครื่องมือวิเคราะห์ รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานทางด้านระบบของไหลร่วมกับเคมีไฟฟ้า
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : กรณีนำเสนอผลงาน (ผู้วิจัย)
 - 1) On-line preconcentration and determination of trace heavy metals by sequential injection coupled with anodic stripping voltammetry ในงานประชุมวิชาการชื่อ The 2nd Regional Electrochemistry Meeting of South-East Asia on Applied Electrochemistry for Modern Life (2nd REMSEA 2010) ระหว่างวันที่ 16-19 November 2010, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
 - 2) On-line preconcentration and determination of lead and cadmium by sequential injection/anodic stripping voltammetry ในงานประชุมวิชาการชื่อ The 17th International Conference on Flow Injection Analysis (ICFIA 2011) ระหว่างวันที่ 3-8 July 2011, Krakow, Poland.

- 3) Method development for preconcentration and determination of lead and cadmium by sequential injection-anodic stripping voltammetry using bismuth film screen-printed carbon nanotube electrode ในงานประชุมวิชาการชื่อ The 14th Asian Chemical Congress 2011 (14 ACC) ระหว่างวันที่ 5-8 September 2011, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand.

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : กรณีศึกษาพิมพ์ในวารสารต่างประเทศ (ผู้วิจัย)

- 1) Benjawan N.inwong, Suchada Chuanuwatanakul, Orawon Chailapakul, Wijitar Dungchaic and Shoji Motomizud “On-line preconcentration and determination of lead and cadmium by sequential injection/anodic stripping voltammetry” *Talanta*, 96 (2012) 75– 81.
- 2) B. NINWONG and W. DUNGCHAI “Determination of Fe(II) in Drinking Water by Paper-Based Microfluidic Devices with Colorimetric Sensing” *Asian journal of chemistry*, 26 (2014) 133-136

งานวิจัยที่กำลังทำ : หัวหน้าโครงการวิจัย

- 1) เบญจวรรณ นิลวงศ์. (2558). การพัฒนาวิธีวิเคราะห์โลหะหนักด้วยอุปกรณ์ปฏิบัติการบนกระดาษร่วมกับการตรวจวัดสีในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง. งานวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช. [ทุน วช 2558]