



การพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดตรวจวัดสีสำหรับคลอรีนในน้ำ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพดิจิทัล
Development of Colorimetric Sensor for Detection of Chlorine in Water
by Using Digital Image Analysis

หทัยกาญจน์ แสงทอง
Hataikran Sangtong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดตรวจวัดสีสำหรับคลอรีนในน้ำ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพดิจิทัล
Development of Colorimetric Sensor for Detection of Chlorine in Water
by Using Digital Image Analysis

หทัยกาญจน์ แสงทอง
Hataikran Sangtong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Technology and Environmental Management
Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดตรวจวัดสีสำหรับคลอรีนในน้ำ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์
 ภาพดิจิทัล

ผู้เขียน นางสาวหทัยกาญจน์ แสงทอง

สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ภูระหงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

.....กรรมการ
 (ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

.....กรรมการ
 (ดร.ธนิดา อารีรบ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและ
 การจัดการสิ่งแวดล้อม

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคล
ที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวหทัยกาญจน์ แสงทอง)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวหทัยกาญจน์ แสงทอง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดตรวจวัดสีสำหรับคลอรีนในน้ำ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพดิจิทัล
ผู้เขียน	นางสาวหทัยกาญจน์ แสงทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเซ็นเซอร์วัดสีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำ ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ได้สามารถพกพาได้ง่ายและสะดวกในการใช้งาน นอกสถานที่ เช่น เซ็นเซอร์วัดสีนี้ ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้วัสดุธรรมชาติจากการผสมผสานของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับกักเก็บสาร *N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine sulfate (DPD) ไว้ภายในแผ่นฟิล์มบางของวัสดุธรรมชาติ ซึ่งแผ่นฟิล์มดังกล่าวจะถูกเคลือบภายในฝาหลอดพลาสติก (micro-PCR tube) และอาศัยหลักการของปฏิกิริยาการเกิดสี (colorimetric reaction) ระหว่างสาร DPD กับคลอรีนอิสระ โดยทำการตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นตัวตรวจวัด (detector) สำหรับหาความเข้มสีแดง เขียวและน้ำเงิน (Red Green Blue Intensity, RGB) จากการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ ได้แก่ การใช้ความเข้มข้นของสาร DPD 2.0 กรัมต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร ปริมาณสาร EDTA 0.16 กรัม ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร อัตราส่วนของปริมาตรบัฟเฟอร์ต่อสารรีเอเจนต์ DPD 0.5: 1 และกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยการอบเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ± 5 นาที ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ได้จะให้ประสิทธิภาพสูงและมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาสั้นเพียง 1 นาที นอกจากนี้ เมื่อใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีหรือค่าการดูดกลืนแสง RGB และความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ พบว่า มีช่วงความเป็นเส้นตรงกว้างเท่ากับ 0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความไวในการวิเคราะห์สูงสุด เท่ากับ 8.6 ± 0.2 a.u./(mgL^{-1}) ขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำสุด 0.26 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และเซ็นเซอร์มีความแม่นยำและความเที่ยงในการตรวจวัดสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 0.31 – 10.10 เปอร์เซ็นต์ และมีค่า

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 0.83 – 3.98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดตัวอย่างน้ำประเภทต่างๆ ได้แก่ น้ำในสระว่ายน้ำ น้ำประปา น้ำดื่มและน้ำทะเล และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานซึ่งใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรีในการตรวจวัด พบว่า วิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน โดยให้ผลการตรวจวัดแตกต่างกันน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนั้นมีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำตัวอย่างจริงได้

คำสำคัญ: พอลิเมอร์ชีวภาพ เซ็นเซอร์วัดสี คลอโรฟิลล์ เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล

Thesis Title	Development of Colorimetric Sensor for Detection of Chlorine in Water by Using Digital Image Analysis
Author	Miss Hataikran Sangtong
Major Program	Technology and Environmental Management
Academic Year	2019

ABSTRACT

In this work, a green colorimetric sensor was successfully developed for free chlorine determination with the portability for on-site detection. It was prepared from the cross-linkage of natural materials, which were tapioca starch (TAS) and agar (AG). The hybrid biopolymer was employed to entrap *N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) as chromogenic species and it was coated on the lid of plastic micro-PCR tube. The colorimetric determination was based on the reaction between DPD reagent and free chlorine in sample. The intensity of color product was measured by using a smartphone and reported as Red-Green-Blue (RGB) intensity. The optimum condition for the sensor film synthesis was studied and it was found at 2.0 g DPD/10 mL solution, 0.16 g EDTA in 10 mL phosphate buffer, and 0.5: 1 of the volume ratio between buffer and DPD solution. The biofilm was completely polymerized by using the incubation at of 60 °C and 60±5 minutes to obtain the best film performance with a fast analysis of 1 min reaction time. By the combination with digital image analysis, semi-quantitative analysis could be obtained via the establishment of calibration graph showing the relationship between intensity or absorption RGB and free chlorine concentration. The developed method presented the great performances of wide linear range (0.3–15 mg/L), low detection limit (0.26±0.00 mg/L), good accuracy (0.31–10.10% relative error) high precision (0.83–3.98 %RSD) and the excellent sensitivity of 8.6±0.2 a.u./(mgL^{-1}) for chlorine determination.

When the proposed sensors was applied with the different kind of real water sample, *i.e.* the tap water, swimming pool water, drinking water and sea water, it showed the comparable results of less than 10% difference with the standard spectrophotometric method. This indicated the high potential of developed film as the powerful technique for free chlorine analysis

Keywords: Biopolymer, colorimetric sensor, free chlorine, digital image analysis.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจากคณาจารย์และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล ที่ให้คำปรึกษา การวางแผนงาน แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ให้แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างมาก รวมทั้งการตรวจสอบข้อมูลและความถูกต้อง เพื่อให้การทำวิจัยครั้งนี้สมบูรณ์ที่สุด และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ รวมถึงชี้แนะเทคนิคต่างๆ และประสบการณ์ในการทำงานวิจัยมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.วิลาสินี ศรีพรหม ดร.ธนิตา อารีรบ และ ผศ.ดร.สุจิตรา ภูระหงษ์ ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งได้มอบโอกาสทางการศึกษา และทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษา ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือในทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

หทัยกาญจน์ แสงทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	(5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ.....	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการรูป.....	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 คลอรีน.....	6
2.1.1 ประวัติความเป็นมา.....	6
2.1.2 คุณสมบัติของคลอรีน.....	7
2.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination).....	8
2.2.1 ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ.....	9
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน	12
2.2.3 Break point chlorination	13
2.3 สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน	15
2.4 ความเป็นพิษของคลอรีน	17
2.5 วิธีการตรวจวัดคลอรีน.....	20
2.5.1 วิธีการวัดสีด้วย DPD (DPD Colorimetric method)	21
2.5.2 วิธีแอมเพอโรเมตริก (Amperometric method).....	23
2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (Digital image Colorimetry, DIC).....	25
2.7 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer).....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 วัสดุและสารเคมี	30
3.2 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์	31
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.3.1 การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่	32
3.3.2 การพัฒนาของเซ็นเซอร์ตรวจวัดสี	33
3.3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยระบบภาพดิจิทัล	37
3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะของเซ็นเซอร์	38
3.3.5 การศึกษาสมรรถนะของระบบการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์	38
3.3.6 การศึกษาความเสถียรภาพของเซ็นเซอร์ (Stability).....	40
3.3.7 การทดสอบกับตัวอย่างจริงเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน	41
บทที่ 4 ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย	42
4.1 ผลของปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์	42
4.1.1 ปริมาณสารในสารละลาย DPD	42
4.1.2 ปริมาณสาร EDTA ในสารปรับ pH ในการทำปฏิกิริยา (Buffer solution) และผลการ รบกวนที่เกิดจากไอออนชนิดอื่น (Tolerance limit).....	46
4.1.3 อัตราส่วนของปริมาตรบัฟเฟอร์ต่อปริมาตร DPD ที่ pH ต่างๆ.....	57
4.1.4 ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและวุ้น	59
4.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์.....	62
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	62
4.2.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการอบ	63
4.3 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา	65
4.4 คุณลักษณะของเซ็นเซอร์	66
4.4.1 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM	66
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซ็นเซอร์ด้วย FTIR.....	66
4.5 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยระบบภาพดิจิทัล (Quantitative image analysis).....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 สมรรถนะของระบบการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์	77
4.6.1 ความแม่นยำ (Accuracy).....	77
4.6.2 ความเที่ยง (Precision)	78
4.6.3 ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range, LDR)	79
4.6.4 ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD)	80
4.6.5 ความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity)	81
4.7 ความเสถียรของเซ็นเซอร์ (Stability).....	82
4.8 วิเคราะห์ตัวอย่างจริง	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	135

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของคลอรีน	7
2.2 ศักยภาพของการก่อกัมเริงของสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคบางชนิด	16
2.3 ระดับความเข้มข้นของคลอรีนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ	18
2.4 แสดงค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารเคมีแบบเฉียบพลันของคลอรีนระดับต่างๆ	19
3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์และสารละลาย DPD	37
3.2 สถานที่เก็บตัวอย่างจริงในจังหวัดภูเก็ต	41
4.1 ผลการรบกวนของไอออนชนิดต่างๆ ที่มีต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ	56
4.2 อัตราส่วนผสมของฟอสเฟตบัพเฟอร์กับบรีเอเจนต์ DPD ในพอลิเมอร์ชีวภาพผสม โดยมี ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 5 มิลลิลิตร	58
4.3 สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน	77
4.4 ความแม่นยำของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน	78
4.5 ความเที่ยงของวิธีที่พัฒนาขึ้น	79
4.6 ช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน	80
4.7 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดคลอรีนของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน	81
4.8 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน	82
4.9 ความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำตัวอย่างที่ตรวจวัดได้ โดยใช้เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นและ เปรียบเทียบกับ spectrophotometer	86
4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน	88

รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สภาพ pH ของน้ำต่อการก่อตัวชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ 10
2.2	ความสัมพันธ์ของ pH และสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ 11
2.3	ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนอิสระและคลอรีนรวม 13
2.4	ช่วงการเกิด Breakpoint chlorination 14
2.5	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคลอรีนอิสระกับ DPD 21
2.6	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPD 22
2.7	ชุดทดสอบคลอรีนในน้ำของบริษัท Hach 23
2.8	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร Chromium (VI) และค่าความเข้มสี RGB รวมถึงอัตราส่วนทั่วไปของภาพถ่ายสารละลายในความเข้มข้นต่างๆ (ภาพเล็ก) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Adobe Photoshop 25
2.9	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับการตรวจวัดสาร 26
2.10	การจำแนกชนิดของพอลิเมอร์สีภาพ 27
2.11	โครงสร้างภายในของเม็ดแป้งมันฝรั่งจากธรรมชาติ (NPS) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500x และองค์ประกอบของแป้ง 28
2.12	โครงสร้างจุลภาคระหว่างฟิล์มแป้ง (PS) และฟิล์มวุ้น (AG) เทียบกับฟิล์มแป้งที่วุ้นผสมอยู่ 15% (PSAG15) และฟิล์มแป้งที่วุ้นผสมอยู่ 30% (PSAG30) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2000x 29
3.1	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน 31
3.2	ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ 32
3.3	ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ 33
4.1	ผลของปริมาณ DPD sulfate ที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความเข้มสี RGB 43
4.2	ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสาร DPD 43
4.3	ผลของปริมาตรกรดซัลฟิวริกในสารละลาย DPD ที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความเข้มสี RGB 44
4.4	การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ที่มีกรดและไม่มีกรดซัลฟิวริกกับตัวอย่างน้ำจริง 46
4.5	ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Na^+ 47

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Cu^{2+}	48
4.7 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Ca^{2+}	49
4.8 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Mn^{2+}	50
4.9 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Mg^{2+}	50
4.10 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Fe^{2+}	51
4.11 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Fe^{3+}	51
4.12 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Cl^-	52
4.13 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ CO_3^{2-}	53
4.14 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ PO_4^{2-}	54
4.15 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ NO_3^-	54
4.16 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ MnO_4^-	55
4.17 ผลของปริมาณ EDTA ต่ออัตราส่วนความเข้มสี RGB ระหว่างตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe^{3+}	
4.18 (ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไม่มี Fe^{3+}	57
ผลของอัตราส่วนปริมาตรระหว่างบัฟเฟอร์ฟอสเฟตและรีเอเจนต์ DPD ต่อค่าความเข้มสี	
4.19 RGB ที่ตัวอย่าง (a) pH 6, (b) pH 7 และ (c) pH 8	59
(a) ผลของปริมาณวุ้นต่อค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา และ (b)	
4.20 ลักษณะแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่ใช้ปริมาณวุ้นแตกต่างกัน	60
(a) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา	
4.21 และ (b) ลักษณะแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่ใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน	61
(a) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มสี RGB	
4.22 ที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างและน้ำปราศจากคลอรีน และ (b) ลักษณะแผ่นฟิล์มของ	
เซ็นเซอร์หลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ	63
(a) ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มสี RGB	
4.23 และ (b) ผลของน้ำหนักร่อนและหลังการอบแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ	64
ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์กับคลอรีนอิสระ	65
4.24 ลักษณะพื้นผิวของ (a) แผ่นฟิล์มผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น	
4.25 และ (b) แผ่นฟิล์มที่มีส่วนผสมของสารรีเอเจนต์ (เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น)	66

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	สเปกตรัม FTIR ของ (a) แผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (b) แผ่นฟิล์มวุ้น (c) แผ่นฟิล์มผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น และ (d) แผ่นฟิล์มที่ผสมกับของสารรีเอเจนต์ (เช่น เซอร์ที่พัฒนาขึ้น) 69
4.27	สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับสารละลายมาตรฐานคลอรีนที่ความเข้มข้น 0 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 71
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสี RGB (I_x) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงิน (ภาพเล็ก) 71
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง RGB (A_x) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสงของสีเขียวและสีน้ำเงิน (ภาพเล็ก) 72
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับค่าผลต่างของความเข้มสี RGB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างกับแบล็ค ($ I_x - I_{blank} $) และช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ดังกล่าว (ภาพเล็ก) 73
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับผลต่างของค่าดูดกลืนแสง RGB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างกับแบล็ค ($ A_x - A_{blank} $) และช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ดังกล่าว (ภาพเล็ก) 74
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีรวม RGB (I_{total}) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าความเข้มสีรวม RGB (ภาพเล็ก) 75
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงรวม RGB (A_{total}) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสงรวม RGB (ภาพเล็ก)..... 75
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสง (ภาพเล็ก) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจวัด..... 76
4.35	ผลเสถียรภาพของเซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มสีเขียว (G intensity) ในการบรรจุแบบสุญญากาศ (without vacuum seal) และแบบไม่สุญญากาศ (vacuum sealed) ที่เก็บไว้ใน (a) อุณหภูมิห้อง (b) ตู้ดูดความชื้น (c) ตู้เย็น และ (d) ช่องแช่แข็ง 85
4.36	เปรียบเทียบวิธีสำหรับการตรวจวัดคลอรีนในตัวอย่างสระว่ายน้ำ (SW) สระน้ำเกลือ (SA) และน้ำประปา (TW)..... 88

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A_x	Absorbance of each color (Red, Green, Blue)
AU หรือ a.u.	Arbitrary Unit
DPD	<i>N,N</i> -diethyl- <i>p</i> -phenylenediamine reagent
I_x	Intensity of each color (Red, Green, Blue)
LDR	Linear Dynamic Range
LOD	Limit of Detection
mg L^{-1} หรือ mg/L	Milligram per Liter
pH	Power of Hydrogen
RGB	Red Green Blue
%RSD	Relative Standard Deviation Percentage
SD	Standard Deviation

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

สารประกอบคลอรีนจัดเป็นหนึ่งในกลุ่มของสารประกอบฮาโลเจน ซึ่งปัจจุบันถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในระบบประปา สระว่ายน้ำ น้ำดื่ม รวมทั้งน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่จากการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากคลอรีนมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิด (Jia, *et al.*, 2015; Ma and Bibby, 2017; Luo, *et al.*, 2019; Han, *et al.*, 2020) ทั้งนี้ความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคนั้นส่งผลโดยตรงต่อผู้ใช้น้ำสำหรับการอุปโภคและบริโภค เพราะหากคลอรีนอยู่ในน้ำปริมาณที่น้อยจะไม่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดเชื้อโรคได้ แต่ถ้าหากคลอรีนมีปริมาณเหลือตกค้างอยู่ในน้ำมากเกินไป และเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้และเป็นอันตรายต่อสุขภาพตามมา (Khan, *et al.*, 2016; Szala, *et al.*, 2017; Zhang, *et al.*, 2019) ซึ่งคลอรีนที่ตกค้างอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค หรือรูปที่เรียกว่า คลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual chlorine) กล่าวคือ คลอรีนในรูปของ Hypochlorous acid (HOCl) และ hypochlorite ion (OCl^-) โดยปริมาณทั้งสองของ HOCl และ OCl^- จะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย (Black and Veatch, 2010; Engelhardt and Malkov, 2015) ถ้าในน้ำมีสารประกอบไนโตรเจนปนเปื้อนอยู่ เช่น สารแอมโมเนียที่สามารถพบปะปนในน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปา หรือสารอินทรีย์อื่นที่ไม่พึงประสงค์จากการหลั่งออกจากร่างกายของมนุษย์ในสระว่ายน้ำ (น้ำลาย เหงื่อ และปัสสาวะ) เป็นต้น คลอรีนอิสระจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้ และก่อให้เกิดสารคลอรามินหรือที่เรียกว่า Combined residual chlorine ซึ่งถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อต่ำกว่าคลอรีนอิสระ แต่สามารถคงรูปอยู่ในน้ำได้นาน ทำให้สามารถขนส่งหรือเคลื่อนย้ายไปได้ไกลกว่าคลอรีนอิสระ ผลรวมของคลอรีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำ

ดังกล่าว อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้ใช้น้ำจากการสูดดม การกลืนกิน การระคายเคืองของตาและระบบทางเดินหายใจในกรณีของผู้ใช้สระว่ายน้ำ (Carter and Joll, 2017; Felgueiras, *et al.*, 2020) หรือเกิดการสะสมความเป็นพิษในร่างกายได้ (Chowdhury, 2013; Legay, *et al.*, 2019) นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนอิสระกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) ในน้ำ ยังก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาบางชนิด (Disinfection by-products, DBPs) เช่น สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) และสารกลุ่มฮาโลอะซิติก (Haloacetic acid, HAAs) ซึ่งเป็นสารอันตรายอาจก่อให้เกิดมะเร็งในคนได้ (U.S.EPA, 1999b; Panyakapo, *et al.*, 2008; Pan, *et al.*, 2014) ดังนั้นการเติมคลอรีนสามารถออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อที่ปนเปื้อนได้ดีและมีให้สารเหลือตกค้างอยู่ในน้ำนาน จึงต้องควบคุมให้มีปริมาณของคลอรีนอิสระอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยทางองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้แนะนำให้มีปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำประปาไม่ต่ำกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และสูงสุดไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (World Health Organization, 2011) และกรมควบคุมมลพิษของประเทศไทยได้อนุญาตให้มีปริมาณคลอรีนอิสระในแหล่งน้ำธรรมชาติไม่ควรเกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559)

การตรวจหาและวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำมีได้หลากหลายวิธี ได้แก่ การใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) (Melchert, *et al.*, 2010; Zarei and Sovizi, 2011; Abou Taleb, *et al.*, 2019) เทคนิคโครมาโทกราฟี (Chromatography) (Shin, 2010; Wakigawa, *et al.*, 2013) เทคนิคการเรืองแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Luminescence) (Hallaj, *et al.*, 2014; Szili, *et al.*, 2014; Tang, *et al.*, 2014) และเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry/Amperometry) (Saputro, *et al.*, 2010; Cooper, *et al.*, 2016) เป็นต้น ในบรรดาวิธีการเหล่านี้ วิธีทางสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ถือเป็นเทคนิคดั้งเดิมที่ใช้ในการตรวจวัดการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดปริมาณคลอรีนในน้ำ ซึ่งอาศัยหลักการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนอิสระกับสาร *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) ที่มีสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ละลายอยู่ และวัดการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (APHA, AWWA and WEF, 2017) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความไวและความจำเพาะสูง (Xiong, *et al.*, 2017b; Laszakovits, *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ ค่าใช้จ่ายสูง มีขั้นตอนที่ซับซ้อนจึงต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และสารเคมี

ที่ใช้ทดสอบจะอยู่ในรูปของเหลว อาจเกิดการหกเลอะเทอะได้ อีกทั้งไม่สะดวกต่อการใช้งาน นอกสถานที่และไม่เหมาะสำหรับการตรวจสอบแบบเรียลไทม์ (Harp, 2002; Xiong, *et al.*, 2017a; Li, *et al.*, 2019) เนื่องด้วยต้องขนส่งตัวอย่างจากจุดเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียตัวอย่างจากการออกซิไดซ์ในอากาศและเกิดการปนเปื้อนได้ง่าย ในระหว่างการเดินทาง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาชุดตรวจวัดคลอรีนอิสระภาคสนาม (Test kit) เพื่อลดขั้นตอนยุ่งยากและข้อด้อยดังกล่าว อีกทั้งยังสามารถลดความเสี่ยงในการสัมผัสสารเคมีอันตรายของผู้ใช้งานได้อีกด้วย

ปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (Digital image analysis) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก (Firdaus, *et al.*, 2014; Pohanka, 2015; Choodum, *et al.*, 2019) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและทันสมัย ช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ และสามารถนำมาใช้ปฏิบัติได้ทั้งนอกและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้มักจะทำควบคู่กับปฏิกิริยาการเกิดสี (Colorimetric reaction) เพื่อตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นพื้นฐาน คือ สีแดง (Red, R) สีเขียว (Green, G) และสีน้ำเงิน (Blue, B) ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี โดยจะทำการถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ที่มีสี ซึ่งสีดังกล่าวจะเกิดจากการสะท้อนแสงจากผลิตภัณฑ์ผ่านตัวกรองสี RGB ของกล้องถ่ายภาพ แล้วถูกรวบรวมเป็นภาพถ่าย จากนั้นจึงทำการแปลค่าความเข้มสีเหล่านี้เป็นค่าปริมาณของสารที่มีอยู่ในน้ำ ตัวอย่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชนิดต่างๆ ปัจจุบัน มีนักวิจัยหลายคนได้นำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายนี้ มาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่น Shin, *et al.* (2017) ได้ใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่าย โดยการพัฒนาแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่าระบบ “Smart Forensic Phone” สำหรับการประเมินอายุของคราบเลือด และ Choodum, *et al.* (2013) ทำการตรวจวัดสาร trinitrotoluene (TNT) ในดินด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายและแปลผลภาพถ่ายด้วยซอฟต์แวร์ Adobe Photoshop CS3 เป็นต้น

การใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติสำหรับการพัฒนาฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภทแป้งทำอาหารชนิดต่างๆ เนื่องจากฟิล์มแป้งสามารถยึดเกาะกับภาชนะบรรจุได้ รวมถึงยังช่วยรักษาหน้าสัมผัสของฟิล์มในรูปของเหลวกับพื้นผิวของวัสดุ และให้ความเสถียรภาพคงทนต่อความร้อนได้ดี ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมากเกี่ยวกับสมบัติของฟิล์มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ (Mendes, *et al.*, 2016; Medina-jaramillo, *et al.*, 2017; Boonkanon, *et al.*, 2020) เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาพอลิเมอร์ชีวภาพสำหรับขึ้นรูปฟิล์มในรูปแบบต่างๆ อย่างไรก็ตามฟิล์มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ จะมี

สมบัติเชิงกลต่ำและมีความไวต่อความชื้นสูง การนำวุ้นมาผสมจะสามารถช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มที่มีแป้ง และพอลิเมอร์ทั้งสองดังกล่าว ยังสามารถผสมเข้ากันได้ดี (Jumaidin *et al.*, 2016; Choi *et al.*, 2017) ดังนั้น ฟิล์มที่มีแป้งกับวุ้นเป็นองค์ประกอบ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในพอลิเมอร์ชีวภาพสำหรับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ให้ต้นทุนต่ำและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาเซ็นเซอร์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับตรวจวัดคลอรีนอิสระ โดยการใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวกักเก็บสารทำปฏิกิริยาและออกแบบให้อยู่ในรูปของแข็งที่เป็นฟิล์มบาง เพื่อช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากสารเคมี ซึ่งกลไกการทำงานจะอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีของ *N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) กับคลอรีนอิสระและทำการตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล โดยใช้กล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และทำการแปลผลเป็นปริมาณคลอรีนอิสระในแหล่งน้ำด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ (customed-built) ทั้งนี้เพื่อให้เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถพกพาไปใช้ในงานภาคสนามและช่วยให้ทราบผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่รวดเร็ว

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาเซ็นเซอร์ที่สามารถใช้ได้ง่าย พกพาสะดวก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับตรวจหาปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำ

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ร่วมกับวิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับตรวจหาปริมาณคลอรีนอิสระในตัวอย่างน้ำประเภทต่างๆ ของจังหวัดภูเก็ต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 พอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ จะประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังและผงวุ้น

1.3.2 หลอดพลาสติก (micro-PCR tube) ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ใช้เป็นภาชนะในการบรรจุเซ็นเซอร์

1.3.3 การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดมีการกำหนดสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณของสารละลายในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วยสารละลายรีเอเจนต์และพอลิเมอร์ชีวภาพ อัตราส่วนระหว่างสาร DPD ต่อบัพเฟอร์ในสารละลาย ที่ pH ต่างๆ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารรีเอเจนต์ DPD ในเซ็นเซอร์ฟิล์มกับคลอรีนอิสระ

1.3.4 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอาศัยหลักการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลของผลิตภัณฑ์สีจากปฏิกิริยา โดยใช้โปรแกรมที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีแดง เขียว น้ำเงิน (RGB intensity)

1.3.5 สมรรถนะของการวิเคราะห์ (analytical performance) ของเซ็นเซอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ความแม่นยำ (accuracy) ความเที่ยง (precision) ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear dynamic range, LDR) ขีดจำกัดในการตรวจวัด (limit of detection, LOD) และความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity)

1.3.6 เทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และ Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) จะใช้สำหรับศึกษาลักษณะของเซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์ได้

1.3.7 เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นจะถูกใช้เพื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระกับตัวอย่างน้ำชนิดต่างๆ ได้แก่ สระว่ายน้ำ น้ำประปา น้ำดื่ม น้ำผิวดิน และน้ำทะเล

1.3.8 ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (DPD colorimetric method) ซึ่งใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ในการตรวจวัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เซ็นเซอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับตรวจวัดคลอรีนในน้ำที่มีประสิทธิภาพต่อการใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว และมีศักยภาพนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลอรีน

2.1.1 ประวัติความเป็นมา

สารประกอบคลอรีนมีการกล่าวถึงมาตั้งแต่อดีตในปี ค.ศ. 77 โดยมีการรายงานจากชาวโรมันชื่อ Pliny ได้ทำการทดลองทางเคมีเพื่อแยกทองคำบริสุทธิ์ พบว่าเกิดสารไฮโดรเจนคลอไรด์จากปฏิกิริยาดังกล่าว และต่อมาอีกประมาณ 800 ปี นักเคมีชาวอาหรับพบว่า ขณะที่นำกรดเกลือ (HCl) มาผสมกับดินประสิว (HNO_3) เพื่อใช้การกัดทอง จะได้ก๊าซชนิดหนึ่งที่มีกลิ่นฉุน สีเขียวอ่อน และหนักกว่าอากาศ แต่ก็ไม่ได้มีการบันทึกรายละเอียดไว้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1774 นักเคมีชาวสวีเดนชื่อ Carl Wilhelm Scheele ได้เป็นคนแรกที่ค้นพบก๊าซคลอรีนจากการเผาส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของคลอรีน โดยบังเอิญพบว่าดอกไม้และใบไม้ที่นำไปใส่ลงในขวดที่บรรจุด้วยก๊าซคลอรีนภายในชั่วครู่ จะเปลี่ยนเป็นสีขาว ซึ่งเป็นครั้งแรกที่ได้มีการบันทึกถึงคุณสมบัติฟอกสีของคลอรีน และในปี ค.ศ. 1814 Sir Humphry Davy ได้ตั้งชื่อธาตุใหม่นี้ว่า "chlorine" ซึ่งมาจากคำกรีก "chloros" ที่แปลว่าเหลืองปนเขียวตามลักษณะสีของตัวเอง หลังจากการค้นพบไม่นานมีบริษัทผู้ผลิตสิ่งทอของฝรั่งเศสที่เมืองจาเวลล์ (Javelle) ได้ทำการผลิตน้ำยาคลอรีนฟอกสีออกมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก จากนั้นถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างรวดเร็วแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ และในปี ค.ศ. 1923 ได้มีการตั้งโรงงานแยกความชื้นออกจากคลอรีนเหลว ซึ่งมลรัฐเพนซิลวาเนียได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเป็นมลรัฐแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1930 อุตสาหกรรมด้านเคมีเจริญก้าวหน้าอย่างมาก ได้มีการนำคลอรีนมาใช้กันอย่างกว้างขวางนอกเหนือจากคุณสมบัติฟอกสีและการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งกลายเป็นส่วนประกอบสำคัญต่อโภชนาการในชีวิตประจำวันของมนุษย์ (Black and Veatch, 2010; จรงค์พันธ์ และชัยศรี, 2551; การประปานครหลวง, 2553) จนถึงปัจจุบันได้มีการนำ

คลอรีนมาใช้ เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลาสติก PVC (Polyvinyl chloride) เพื่อใช้ทำเป็นวัสดุในครัวเรือนหรือเครื่องอุปโภคและบริโภคอื่นๆ ผลิตน้ำยาทำความสะอาดเสื้อผ้า คราบน้ำมัน จารบีฉาบผิวโลหะ สกัดคาเฟอีนจากกาแฟ ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม กระจก ยีเอ็ม ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ยารักษาโรค เป็นส่วนประกอบพื้นฐานในสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำพวกออร์กาโนคลอรีน และยังใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุสำหรับทำความเย็น (Hydro Instruments, 2016) โดยคลอรีนที่นำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะสามารถช่วยในการควบคุมกลิ่น รสชาติ และยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่อาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Pereira, *et al.*, 2013)

2.1.2 คุณสมบัติของคลอรีน

คลอรีน (Cl₂) เป็นสารอนินทรีย์ในกลุ่มฮาโลเจน (Halogen group) ในตารางธาตุหรือเป็นธาตุประกอบของเกลือ สามารถพบได้ในรูปของสารประกอบต่างๆ ในธรรมชาติและก๊าซในบรรยากาศ ซึ่งคลอรีนจะมีลักษณะทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้ (2.1)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของคลอรีน

สูตรทางเคมี	Cl ₂
สถานะ*	ก๊าซ, ของเหลว
มวลอะตอม	35.5
มวลโมเลกุล	70.905
จุดเดือด	-34.6 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	-100.98 องศาเซลเซียส
ความหนืด	มากกว่า 133
สี/กลิ่น	เหลือง-เขียว/กลิ่นฉุน
อุณหภูมิวิกฤต	144.0 องศาเซลเซียส
ความดันวิกฤต	76.1 บรรยากาศ
ระดับการละลายในน้ำ	0.7 กรัม/น้ำ 100 กรัม (20 องศาเซลเซียส)
ความถ่วงจำเพาะ	หนักกว่าอากาศ 2.5 เท่า

ที่มา: Tseng, *et al.* (2008) และ Soman and Sundararaj (2015)

หมายเหตุ * สถานะของเหลวเปลี่ยนเป็นก๊าซปริมาตรจะเพิ่มขึ้น 460 เท่า

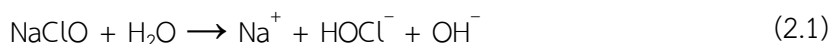
จากลักษณะทางกายภาพของคลอรีนที่มีสภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ จะอยู่ในรูปของก๊าซสีเขียวอมเหลืองและจะเปลี่ยนเป็นของเหลวสีเหลืองอำพันเมื่อคลอรีนอยู่ในสภาวะภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และหากคลอรีนมีการสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาได้สารที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์และออกฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรง โดยไม่ระเบิดและไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟติดเหมือนก๊าซออกซิเจน (Gonzalez and Jai, 1993)

2.2 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)

การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนซึ่งเรียกว่า คลอรีเนชัน (Chlorination) เป็นวิธีที่ได้รับ ความนิยมและใช้กันมานาน เนื่องจากราคาถูกและมีอำนาจออกซิไดซ์สูง (Oxidizing power) ทำให้ หยุดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียส่วนใหญ่ได้ และคงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในเส้นท่อได้นาน โดยสามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งสามารถฆ่าเชื้อจำพวก อี.โคไล (E.coli) และเชื้อไวรัส (Jia, *et al.*, 2015; Luo, *et al.*, 2019) อีกทั้งง่ายในการจัดหา ซึ่งคลอรีนที่ใช้กันแพร่หลายมีอยู่ 3 รูปแบบ (EPA, 2011) ได้แก่

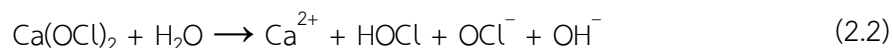
1) ก๊าซคลอรีน (Chlorine Gas) เป็นคลอรีนในสถานะก๊าซที่นิยมใช้มากสำหรับการ ฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยจะเป็นก๊าซคลอรีนบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ปฏิกิริยา การแตกตัวของก๊าซคลอรีนเมื่อละลายในน้ำ จะได้กรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ตามสมการ (2.3)

2) คลอรีนน้ำ (Liquid Chlorine) หรือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO) เป็นคลอรีน ที่อยู่ในรูปของสารละลายสีเขียวอมเหลือง มีปริมาณของคลอรีนประมาณ 7 – 15 เปอร์เซ็นต์ โดยมี ชื่อในทางการค้า เช่น Pure Chlor, Top Chlor และ Liquid Bleach เป็นต้น ซึ่งมักใช้ใน ระบบผลิตน้ำประปาที่มีขนาดเล็ก ระบบบำบัดน้ำเสียและระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ การฆ่าเชื้อในท่อน้ำ การฆ่าเชื้อบนอุปกรณ์และผลิตภัณฑ์ เป็นต้น คลอรีนประเภทนี้สามารถนำไปใช้งานง่าย แต่จะมีราคา สูงกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซคลอรีน ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตของ โรงงานอุตสาหกรรมน้ำยาซักผ้าขาว ซึ่งการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaClO) ลงในน้ำจะได้ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา คือ ไฮโปคลอไรท์ไอออน (HOCl^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังสมการ (2.1)



แต่ทั้งนี้สารโซเดียมไฮโปคลอไรต์จะสามารถแตกตัวได้ง่าย โดยเฉพาะสภาพที่มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำ สารจะระเหยกลายเป็นไอของคลอรีนออกมา ซึ่งอาจทำให้ภาชนะบรรจุของสารนี้ระเบิดได้ จึงต้องเก็บไว้ให้พ้นแสงแดด ที่มีอุณหภูมิไม่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และอายุในการเก็บไม่ควรนานเกิน 3 เดือน

3) คลอรีนผง (Solid Chlorine) หรือ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) เป็นคลอรีนที่อยู่ในรูปของแข็ง จะมีลักษณะเป็นผงสีขาว โดยปริมาณของคลอรีนที่มีอยู่ประมาณ 65 – 70 เปอร์เซ็นต์ จึงนิยมใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม และระบบผลิตน้ำประปาขนาดเล็กในพื้นที่ที่ยากต่อการขนส่งหรือทุรกันดาร ซึ่งเวลาใช้มักนำมาละลายน้ำก่อนใช้งาน การแตกตัวปฏิกิริยาของผงคลอรีนกับน้ำแสดงดังสมการ (2.2)



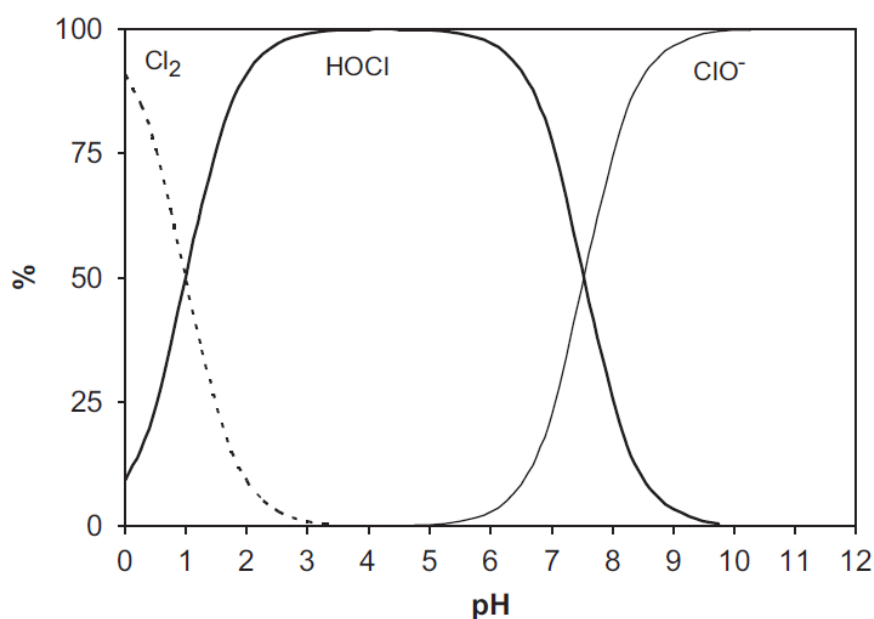
และเมื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ได้จากก๊าซคลอรีนกับผง (Calcium hypochlorite, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$) หรือสารละลาย (Sodium hypochlorite, NaOCl) ผลการออกซิไดซ์จะเหมือนกัน กล่าวคือ ทั้งสามรูปแบบสามารถผลิตกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์สำหรับการฆ่าเชื้อในน้ำและน้ำเสียได้ (การประปานครหลวง, 2553)

2.2.1 ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

คลอรีนที่จำหน่ายในท้องตลาดอยู่ในรูปคลอรีนเหลวบรรจุในถังเหล็ก การนำก๊าซคลอรีนมาใช้นิยมมากสำหรับในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคของโรงผลิตน้ำประปา มักต้องนำก๊าซคลอรีนมาละลายน้ำก่อนนำมาใช้งาน เมื่อก๊าซคลอรีน (Cl_2) ถูกเติมลงไปในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ดังสมการ (2.3) และกรดเกลือ (HCl) สามารถแตกตัวกลายเป็นไอออน H^+ และ Cl^- ได้อย่างสมบูรณ์ แต่กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) เป็นกรดอ่อนจึงแตกตัวได้เพียงบางส่วน ดังสมการที่ (2.4) (Squadrito, *et al.*, 2010; Escudero-Oñate, 2015)



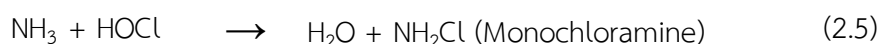
ดังนั้นในน้ำจึงมีคลอรีนอยู่ในรูป HOCl, OCl⁻ และ Cl₂ ที่เหลืออยู่ในรูปอิสระ หรือที่เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual chlorine) ซึ่งปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับสภาพ pH ของน้ำ เพราะกรดที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้น้ำมี pH ลดลง แต่ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคลดลง โดยถ้า pH ต่ำ น้ำจะมี HOCl มาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมี pH สูง จะมี OCl⁻ มาก (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และมันรัช ตัณฑุลเวศม์, 2551) ดังรูปที่ 2.1 โดยที่ pH ของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระคงเหลือที่พบมักอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีนทั้งหมด (Cl₂) และอาจจะเหยในบรรยากาศ กรณีที่ค่า pH ของน้ำอยู่ในช่วง 1 ถึง 3.5 อาจพบคลอรีนอิสระในรูปของก๊าซและ HOCl ถ้ามี pH อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 5.5 จะพบในรูปของ HOCl ทั้งหมด ถ้ามี pH อยู่ในช่วง 5.5 ถึง 9 จะพบอยู่ในรูปของ HOCl และ OCl⁻ และน้ำที่มี pH มากกว่า 9 เป็นต้นไป มักจะอยู่ในรูปของ OCl⁻ ซึ่งคลอรีนอิสระในรูป OCl⁻ นี้จะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำกว่า HOCl (Chlorine Chemistry Council (CCC), 2002; Gombas, *et al.*, 2017)



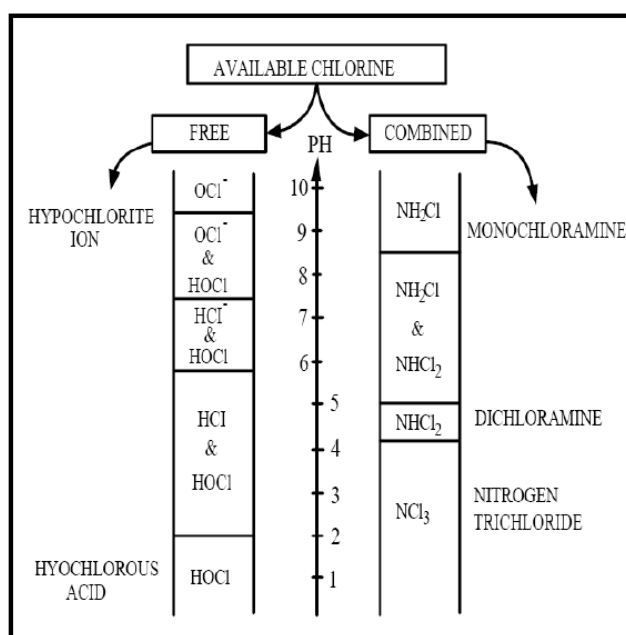
รูปที่ 2.1 สภาพ pH ของน้ำต่อการก่อตัวชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ (Deborde and von Gunten, 2008)

ในกรณีที่น้ำมีสารละลายอื่นปะปนหรือตะกอนแขวนลอย จะส่งผลให้มีปฏิกิริยาของคลอรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ง่ายเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะแอมโมเนีย (NH₃) ที่เหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถพบได้ในน้ำประปาและน้ำดื่มที่ผลิตจากน้ำผิวดินหรือ

แหล่งน้ำตามธรรมชาติ รวมทั้งแอมโมเนียที่เจือปนในน้ำเสีย และเมื่อสารประกอบไนโตรเจนดังกล่าวทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระ (HOCl หรือ OCl^-) จะได้คลอรีนคงเหลืออีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่าคลอรามิน หรือคลอรีนรวม (Combined residual chlorine) ซึ่งมี 3 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอรามิน (NH_2Cl) ไดคลอรามิน (NHCl_2) และไตรคลอรามิน (NCl_3) โดยปฏิกิริยาการเกิดคลอรามินทั้งสามชนิดจาก HOCl และแอมโมเนีย (NH_3) แสดงดังในสมการ (2.5 – 2.7) (Deborde and von Gunten, 2008; How, *et al.*, 2017)



ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (รูปที่ 2.2) ทั้งนี้คลอรีนอิสระและคลอรีนรวมยังสามารถเรียกรวมกันว่า คลอรีนคงเหลือทั้งหมด (Total residual chlorine) และเมื่อเปรียบเทียบอำนาจของคลอรีนทั้งสองชนิด คลอรีนรวมจะให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ต่ำ แต่มีสภาพคงทนอยู่ในน้ำได้ยาวกว่าคลอรีนอิสระ (Manitoba Water Stewardship, 2005; Engelhardt and Malkov, 2015)



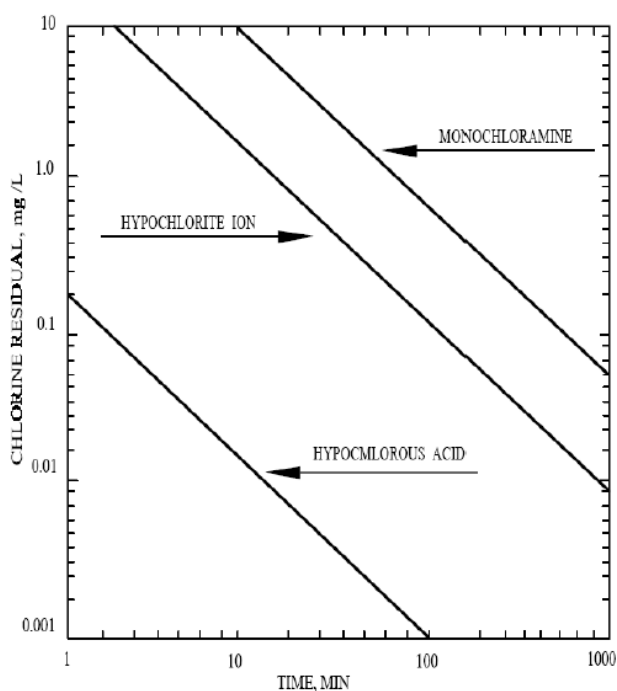
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ pH และสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542)

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน

2.2.2.1 สภาพความเป็นกรด - ด่างของน้ำ (pH) ดังได้กล่าวไว้แล้วว่าที่ pH ต่ำ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ HOCl ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อได้ดีมาก และทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนน้อย แต่ถ้า pH ของน้ำมีค่าสูงกว่า 7.5 นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำ ยังมีผลต่อการก่อตัวของสารกลุ่ม Disinfection by Product (DBP) อีกด้วย (Hansen, *et al.*, 2012) ดังนั้นคลอรีนจะทำงานได้ดีที่ pH 6 - 7 เป็นช่วงค่า pH ที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงและปลอดภัยที่สุด เนื่องจากไม่ได้ อยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน ซึ่งจะช่วยลดอาการการระคายเคืองต่อผู้ใช้งาน รวมถึงลดปัญหาการ กัดกร่อนของเครื่องมือและอุปกรณ์ (Len, *et al.*, 2002; Ayebah and Hung, 2005) โดยทาง องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้แนะนำให้ pH ของน้ำไม่ควรสูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU หลังจากเติมปริมาณคลอรีน 30 นาที สำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทั้งแบบที่เรียวและไวรัสทั่วไป (World Health Organization, 2011)

2.2.2.2 อุณหภูมิ (Temperature) จะมีผลต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ โดยที่ อุณหภูมิของน้ำต่ำ ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl มาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพ ในการฆ่าเชื้อโรคสูง ในทางกลับกัน ถ้าหากในน้ำมีอุณหภูมิสูง ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ใน รูปของ HOCl น้อย หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ อุณหภูมิสูงจะทำให้คลอรีนอิสระสลายตัวได้ ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของคลอรีนต่ำลงอีกด้วย (Roccaro, *et al.*, 2008)

2.2.2.3 เวลาสัมผัส (Contact time) โดยเริ่มตั้งแต่เวลาที่เติมคลอรีนลงไปในน้ำ จนถึงระยะเวลาที่ผู้ใช้รายแรกสัมผัสน้ำ ไม่ควรน้อยกว่า 30 นาที หรือถ้าเวลาสัมผัสนานกว่านั้น การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนจะมีมากขึ้นและทำให้น้ำมีกลิ่นลดลง นอกจากนี้เวลาสัมผัสยังขึ้นอยู่กับ ปริมาณและชนิดของคลอรีนที่ใช้ (รูปที่ 2.3) เช่น ถ้าใช้คลอรีนมากเวลาสัมผัสอาจจะต่ำ แต่ถ้าใช้ คลอรีนน้อยจำเป็นต้องมีเวลาสัมผัสนาน อีกทั้งการใช้คลอรีนอิสระในการฆ่าเชื้อ ยังใช้ระยะเวลา สัมผัสในน้ำน้อยกว่าคลอรีนรวม เนื่องจากคลอรีนอิสระมีประสิทธิภาพสูงสามารถฆ่าเชื้อโรคได้รวดเร็ว แต่ถ้าใช้คลอรีนรวมต้องใช้ระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำนานกว่า เพื่อให้มีการฆ่าเชื้อโรคเกิดขึ้นได้ (Zhang, *et al.*, 2019)



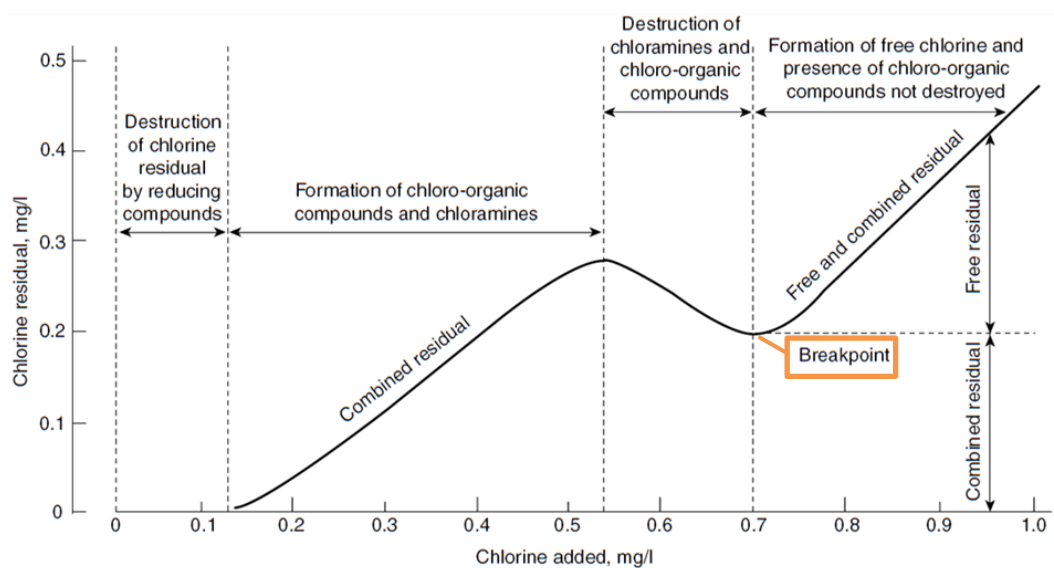
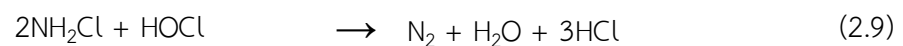
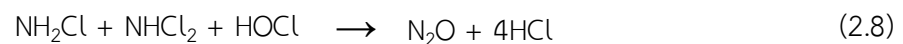
รูปที่ 2.3 ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนอิสระและคลอรีนรวม (มันสัน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.2.2.4 ความเข้มข้นของคลอรีน หรือเรียกได้ว่า ความต้องการคลอรีน (Chlorine demand) จะขึ้นกับปริมาณของคลอรีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารในน้ำ รวมทั้งปริมาณของคลอรีนที่ตกค้างเพื่อสำรองไว้ฆ่าเชื้อโรคด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำ เช่น ความขุ่นของน้ำมากมักต้องการคลอรีนสูง เป็นต้น และหากปริมาณการเติมคลอรีนน้อยอาจทำลายเชื้อโรคได้ไม่หมด แต่ถ้าเติมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้น้ำมีกลิ่นฉุนและรสชาติ ของน้ำเปลี่ยนไป นอกจากนี้คลอรีนยังมีฤทธิ์กัดกร่อน อาจทำให้วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ เสียหาย ดังนั้นระดับคลอรีนตกค้าง ควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาตามที่กำหนดขึ้น (Grellier, *et al.*, 2015; กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

2.2.3 Break point chlorination

ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของคลอรีนอิสระ หรือเรียกว่า Breakpoint chlorination เป็นการแสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคลอรีนที่เติมและปริมาณคลอรีนตกค้าง หลังจากเติมคลอรีนในน้ำ 30 นาทีตามทฤษฎี ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2.4) คือ ขั้นตอนแรก เป็นช่วงของสารที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย เช่น Fe^{+2} , H_2S , NO_2^- เป็นต้น โดยสารประกอบอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนและเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ ขั้นตอนที่สอง สารคลอรีนได้รวมกับ

สารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน จึงเกิดเป็นสารประกอบคลอรามินและคลอโรไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าคลอรีนอิสระจะลดลงแต่คลอรีนรวม (Combined chlorine) มีเพิ่มมากขึ้น ในขั้นตอนที่สาม เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างคลอรีนอิสระและสารคลอโรไนโตรเจนที่ได้จากสาร N_2O , Cl^- และ N_2 ดังสมการ (2.8 – 2.9) ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระลดลงและเข้าสู่ช่วง Break point chlorination และขั้นตอนที่สี่หรือสุดท้าย เมื่อเติมคลอรีนลงไปหลังจากเกิด Break point chlorination จะทำให้มีปริมาณคลอรีนอิสระ ($HOCl$ และ OCl^-) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณคลอรีนที่เติมในน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งจะไม่เกิด Break point chlorination เนื่องจากไม่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้ การเกิด N_2O และ N_2 เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน แต่ยังมีข้อดีในการกำจัดไนโตรเจนในการบำบัดน้ำเสีย (Spon, 2008; มยุรฉัตร และคณะ, 2553)



รูปที่ 2.4 ช่วงการเกิด Breakpoint chlorination (Kalyani, et al., 2017)

2.3 สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Disinfection by-products, DBPs) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำดิบ สารตั้งต้นที่ทำให้เกิดสารตกค้าง มีทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (Richardson and Postigo, 2015) รวมทั้งในกรณีของสระว่ายน้ำยังมีสารอินทรีย์ที่มาจากคนว่ายน้ำ เช่น ปัสสาวะ เหงื่อ น้ำลาย และครีมกันแดดหรือโลชั่นทาผิวที่นักท่องเที่ยวใช้ก่อนลงสระ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญประเภทหนึ่งที่จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้เช่นกัน (Kim, *et al.*, 2002; Carter and Joll, 2017) น้ำดิบที่เข้าสู่สระว่ายน้ำส่วนใหญ่เป็นน้ำประปาที่มีคลอรีนและสารตกค้างอยู่แล้ว และเมื่ออยู่ในสระว่ายน้ำโดยมีการเติมคลอรีนเพิ่มอีกหรือการนำน้ำในสระว่ายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นและคลอรีนจะทำให้ปริมาณของสารตกค้างในสระว่ายน้ำสูงขึ้น (จรรยา บริวิชัยวิสุทธิ์, 2552) โดยสารตกค้างสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

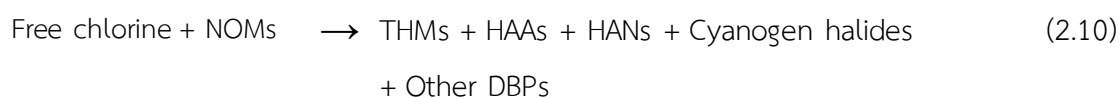
2.3.1 สารตกค้างสำหรับการฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant residuals) ได้แก่ คลอรีนอิสระ (Free chlorine) และคลอรีนรวม หรือกลุ่มคลอรามิน (Chloramines)

2.3.2 สารตกค้างประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic by-products) ได้แก่ คลอไรต์ไอออน คลอไรท์ไอออน เป็นต้น

2.3.3 สารตกค้างประเภทสารอินทรีย์ หรือกลุ่มสารฮาโลเจน (Halogenated organic by-products) ได้แก่ กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) กลุ่มฮาโลอะซีติก (Haloacetic acids, HAAs) กลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น

การใช้คลอรีนในน้ำที่มีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) ในน้ำดิบ เช่น กรดฮิวมิก (Humic acid) กรดฟูลวิก (Fulvic acid) และสารที่ไม่ใช่สารประกอบฮิวมิก เป็นต้น (UNEP, 2000; จรงค์พันธ์ และ ชัยศรี, 2551) ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (DBPs) ประเภทสารฮาโลเจน (Halogenation) เช่น กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMs), กลุ่มฮาโลอะซีติก (HAAs), กลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (HANs) และอื่นๆ ตามที่แสดงในสมการ (2.10) (Nikolaou, *et al.*, 2004; Hang, *et al.*, 2016) แต่กลุ่มที่มีความเข้มข้นสูงสุด คือ สารในกลุ่มไตรฮาโลมีเทน ประกอบไปด้วย คลอโรฟอร์ม (Chloroform, CHCl_3) ไดโบรโมคลอโรมีเทน

(Dibromochloromethane, CHBr_2Cl) โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane, CHBrCl_2) และโบรโมฟอร์ม (Bromoform, CHBr_3) เป็นต้น โดย U.S.EPA (1999a) รายงานว่า สารตกค้างจากกระบวนการเติมคลอรีนบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ สารตกค้างประเภทกลุ่มสารฮาโลเจนบางชนิด ยังส่งผลต่อระบบการสืบพันธุ์ เกี่ยวกับการตั้งครรภ์และการคลอด ระบบไหลเวียนโลหิต ระบบประสาท และอาจส่งผลต่ออวัยวะภายในต่างๆ ได้ เช่น ปอด ตับ ไต เป็นต้น ตัวอย่างเช่น กรดไตรคลอโรอะซิติก (Trichloroacetic acid, TCA) ซึ่งถือเป็นสารอันตรายกับตัวมนุษย์และอาจทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับสมองและระบบประสาท อีกทั้งความผิดปกติที่พบในตัวอ่อนของหนู (Nikolaou, *et al.*, 2004)



ตารางที่ 2.2 ศักยภาพของการก่อมะเร็งของสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคบางชนิด

สารตกค้าง	ศักยภาพของการก่อมะเร็ง
Chloroform	B
Dibromochloromethane	C
Bromodichloromethane	B
Bromoform	B
Dichloroacetic acid	B
Trichloroacetic acid	C
Dibromoacetonitrile	C
2-Chlorophenol and 2,4-Dichlorophenol	D
2,4,6-Trichlorophenol	B
Chloral Hydrate	C
Formaldehyde	B
Chlorite	D
Bromate	B
Ammonia	D
Chlorine Dioxide	D

ที่มา: จิราวรรณ งานทอง (2553) อ้างโดย U.S.EPA (1999a)

หมายเหตุ ศักยภาพของการก่อมะเร็ง มีดังนี้

ระดับ A หมายถึง เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (Human carcinogen)

ระดับ B หมายถึง สามารถก่อมะเร็งในมนุษย์ได้ (Probable human carcinogen)

ระดับ C หมายถึง อาจจะก่อมะเร็งในมนุษย์ได้ (Possible human carcinogen)

ระดับ D หมายถึง ไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะระบุว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (Not classifiable)

Panyakapo, *et al.* (2008) พบว่า ความเข้มข้นของสาร THMs ทั้งหมด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม โบรโมไดคลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม ในน้ำสระว่ายน้ำมีค่าสูงกว่าในน้ำประปา เนื่องจากน้ำที่ล้นจากสระมีการนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่โดยผ่านเครื่องกรองทราย จึงเป็นเพียงการบำบัดสารอินทรีย์แขวนลอยเท่านั้น ไม่ได้เป็นการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักของการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMs) โดยมีการสะสมสารนี้อยู่ภายในสระว่ายน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของการได้รับสารจากสระว่ายน้ำสูงสุด คือ คลอโรฟอร์ม รองลงมาได้แก่ โบรโมไดคลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม ส่วนความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของการได้รับสารจากน้ำประปาสูงสุด คือ โบรโมไดคลอโรมีเทน รองลงมาได้แก่ คลอโรฟอร์ม ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม

2.4 ความเป็นพิษของคลอรีน

สารคลอรีนจัดเป็นก๊าซพิษชนิดหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากคลอรีนมีฤทธิ์กัดกร่อนต่อเนื้อเยื่อ จึงก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อตาและระบบทางเดินหายใจ และเป็นพิษร้ายแรงต่อปอดที่ความเข้มข้นสูงๆ หรืออาจทำให้เสียชีวิตได้ (U.S.EPA, 1999b) คลอรีนสามารถแพร่ไปถึงปอดได้ เนื่องจากละลายน้ำได้ปานกลางและทางเดินหายใจส่วนต้นไม่สามารถดูดซึมคลอรีนความเข้มข้นสูงได้ทั้งหมด และความเข้มข้นต่ำสุดของคลอรีนที่มนุษย์สามารถได้กลิ่นอยู่ที่ระดับ 0.31 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (National Research Council, 2004) หรือที่ช่วงความเข้มข้น 0.2 – 0.4 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (Gonzalez and Jai, 1993) ดังตารางที่ 2.3 ได้แสดงถึงข้อมูลระดับความเข้มข้นของคลอรีนที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสามารถส่งผลกระทบต่อทันทีหลังจากสูดดมหรือสัมผัสกับคลอรีน

ตารางที่ 2.3 ระดับความเข้มข้นของคลอรีนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ

ระดับความเข้มข้น (ppm)	ผลกระทบต่อสุขภาพ
0.2 – 0.4	สามารถรับรู้ได้ถึงกลิ่น
1 – 3	เกิดการระคายเคืองที่โพรงจมูก
5 – 15	ทำให้ปวดศีรษะจากการระคายเคืองดวงตา จมูก และลำคอ
30	เกิดการเจ็บหน้าอกในทันที มีอาการอาเจียน หายใจติดขัด และเจ็บคอ
40 – 60	ทำให้ปอดอักเสบและเกิดน้ำท่วมปอด หรือการสัมผัสในระยะเวลาดังกล่าว อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้
430	อาจทำให้เสียชีวิต หากได้รับสัมผัสนานเกินกว่า 30 นาที
900 – 1000	เสียชีวิตได้ทันที หรือหมดสติภายใน 2 – 3 นาที

ที่มา: Saroha (2006) และ Soman and Sundararaj (2015)

นอกจากนี้ กรมควบคุมมลพิษ (2561) ยังได้รายงานถึงขีดจำกัดการรับสัมผัสสารแบบเฉียบพลันของคลอรีน ที่ระยะเวลาสัมผัส (Exposure Duration) ต่างๆ กัน โดยแบ่งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ 10 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง และพบว่า ค่าขีดจำกัดฯ มีความแตกต่างกันในแต่ละระยะเวลารับสัมผัส เนื่องจากผลกระทบต่อสุขภาพมักสัมพันธ์กับปริมาณสารที่เข้าสู่ร่างกาย (dose) ที่มนุษย์รับเข้าสู่ร่างกายในช่วงเวลาหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยจะสังเกตได้ว่าค่าขีดจำกัดฯ ในระดับที่ 1 ซึ่งเป็นระดับของผลกระทบต่อสุขภาพที่ผู้สัมผัสยังสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ (non-disabling) นั้น ค่าขีดจำกัดฯ จะเท่ากันในทุกช่วงระยะเวลารับสัมผัส ในขณะที่ระดับที่ 2 และระดับที่ 3 ค่าขีดจำกัดฯ จะมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะเวลารับสัมผัส ดังนั้นผลกระทบต่อสุขภาพบางระดับจึงขึ้นอยู่กับทั้งระยะเวลาในการรับสัมผัสและความเข้มข้นของคลอรีนที่ได้รับด้วย

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารเคมีแบบเฉียบพลันของคลอรีนระดับต่างๆ

ขีดจำกัดการรับสัมผัสสารเคมี	ปริมาณการรับสัมผัส (ppm)					ผลกระทบต่อสุขภาพ
	10 นาที	30 นาที	1 ชม.	4 ชม.	8 ชม.	
ระดับที่ 1 (ช่วยเหลือตัวเองได้)*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5 **	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า NOAEL ที่ระดับ 0.5 ppm ไม่ก่อให้เกิดอาการ มีอาการระคายเคือง การเปลี่ยนแปลงต่อ สมรรถภาพของปอดมนุษย์เพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นชั่วคราวและหายคืนได้ ดั้งเดิม ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที และ 8 ชั่วโมง - ค่า UFH เท่ากับ 1 เนื่องจากใช้ข้อมูลจากประชากรกลุ่มที่มีอาการภูมิแพ้และหอบหืด - ไม่มีการปรับค่า NOAEL จากระยะเวลาสัมผัส เนื่องจากเป็นการศึกษาถึง 8 ชั่วโมง ผลกระทบไม่รุนแรงขึ้นในระยะเวลา 15 นาที – 8 ชั่วโมง - อาการระคายเคืองจากคลอรีนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นมากกว่าระยะเวลาสัมผัส เป็นเหตุผลของค่าขีดจำกัดที่เท่ากันในระยะสัมผัสต่าง ๆ
ระดับที่ 2 (ช่วยเหลือตัวเองไม่ได้)	2.8	2.8	2.0	1.0	0.7	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า NOAEL ที่ไม่ก่อให้เกิดอาการคล้ายหอบหืดรุนแรง ในประชากรกลุ่มศึกษา อยู่ที่ระดับ 1 ppm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง - ค่า UFH เท่ากับ 1 เนื่องจากใช้ข้อมูลจากประชากร กลุ่มที่มีอาการภูมิแพ้และหอบหืด - ปรับระยะเวลาสัมผัสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยสูตรคำนวณ $C^2 \times t = k$
ระดับที่ 3 (เสียชีวิต)	50	28	20	10	7.1	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า NOAEL ที่ระดับ 200 ppm ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ไม่พบว่ามี หนูตาย ที่ระดับ LC01 = 288 ppm ในหนู - ค่า UFA เท่ากับ 3 เนื่องจากใช้ข้อมูลการศึกษา ในหนู และข้อมูลแสดงถึงตัวแปรความแตกต่างระหว่างเผ่าพันธุ์ หนูและมนุษย์ พบว่า แตกต่างประมาณ 2 เท่า - ค่า UFH เท่ากับ 3 เพื่อปกป้องประชากรกลุ่มเสี่ยง แม้ว่าคลอรีนจะเป็นพิษแบบสัมผัสโดยตรงมากกว่าการผ่านกระบวนการพิษจลนศาสตร์
* ประชาชนส่วนมากรับรู้กลิ่นที่ระดับนี้						
** ผลกระทบต่อสุขภาพระดับนี้ไม่รุนแรงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส						

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2561)

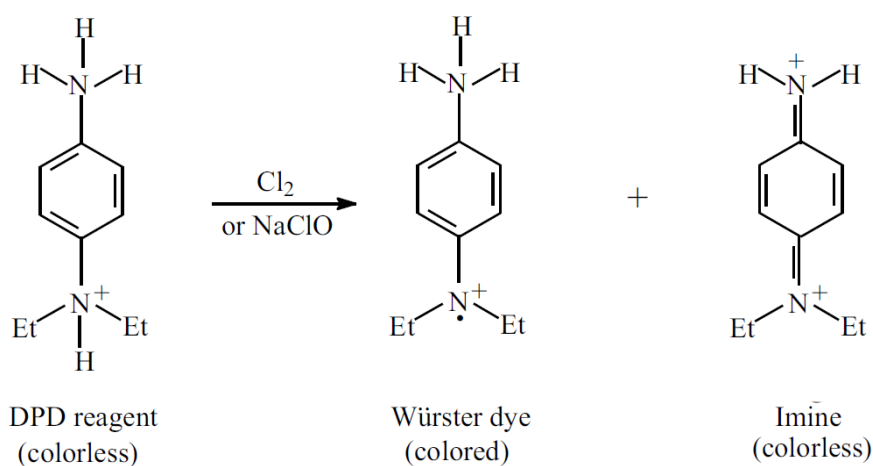
Nieuwenhuijsen, *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาพบการปนเปื้อนของสารไตรฮาโลมีเทน (THMs) ในสระว่ายน้ำที่มีปริมาณที่สูงมากผิดปกติและสูงกว่าในน้ำประปา ซึ่งสารนี้เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากคลอรีนในน้ำสัมผัสกับฝุ่นละออง เหงื่อหรือผิวหนังของผู้ใช้บริการ และสาร THMs มีความสัมพันธ์กับการแท้งลูกหรือมีลูกพิการ ทั้งนี้หากว่ายน้ำในสระว่ายนาน 1 ชั่วโมง อาจจะได้รับสาร THMs ในปริมาณมากถึง 141 เท่า เมื่อเทียบกับการอาบน้ำประปาจากฝักบัวเพียง 10 นาที รวมทั้งยังมีความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง ซึ่งถือได้ว่าเป็นความเสี่ยงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ตามคำแนะนำของ U.S.EPA สอดคล้องกับงานวิจัยของ จรรยา บริวิชยาวิสุทธิ (2552) ที่ได้รายงานไว้ว่าเจ้าหน้าที่ดูแลสระว่ายน้ำในเขตกรุงเทพมหานครมีความเสี่ยงที่ได้รับสาร THMs ผ่านทางการหายใจในระดับสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสัมผัสของกลุ่มเด็กหรือผู้ใหญ่ที่ว่ายน้ำ และครูสอนว่ายน้ำ เนื่องจากการทำงานของเจ้าหน้าที่ดูแลอยู่ในบริเวณสระว่ายน้ำแบบในร่มและมีการสัมผัสบ่อยครั้ง ซึ่งการระเหยของสาร THMs ที่ไม่ดีและมีการสะสมอยู่ในสระว่ายน้ำ ทำให้สามารถรับเอาไอระเหยของสาร THMs ได้มากกว่ากลุ่มอื่นๆ และ Paopuree, *et al.* (2010) ได้ทำการตรวจสอบความเข้มข้นของสาร THMs ในเขตเทศบาลนครนครปฐม โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือนักว่ายน้ำและไม่ใช่นักว่ายน้ำ พบว่า นักว่ายน้ำมีความเสี่ยงจากการได้รับสาร THMs สูงสุดเท่ากับ 93.9 – 94.2 เปอร์เซ็นต์ และมีความเสี่ยงของโรคมะเร็งจากการสัมผัสผิวหนังขณะว่ายน้ำถึง 94.18 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาของ Shi, *et al.* (2019) ซึ่งเป็นการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการได้รับสารกลุ่ม DBPs ในสระว่ายน้ำสาธารณะที่ร่มจำนวน 16 แห่ง ในเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน พบว่านักว่ายน้ำอายุ 9 – 17 ปี ได้รับปริมาณสาร DBPs โดยเฉลี่ยต่อวันสูงกว่านักว่ายน้ำที่อายุตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไป และมีความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งจากการสูดดมสาร THMs มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งยังมีภาวะที่สูญเสียด้านสุขภาพประจำปี (disability-adjusted life years, DALYs) อยู่ที่ 19 คนต่อปีจากการได้รับสาร DBPs ในสระว่ายน้ำของเซี่ยงไฮ้

2.5 วิธีการตรวจวัดคลอรีน

โดยทั่วไปการตรวจวัดคลอรีนในน้ำสามารถทำได้หลายวิธี และมีสองวิธีที่พบมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์หาคลอรีนอิสระ คือ เทคนิคการตรวจวัดด้วยแอมเพอโรเมตริก (Amperometric method) และเทคนิคการวัดสีด้วย DPD (DPD Colorimetric method) ดังนี้

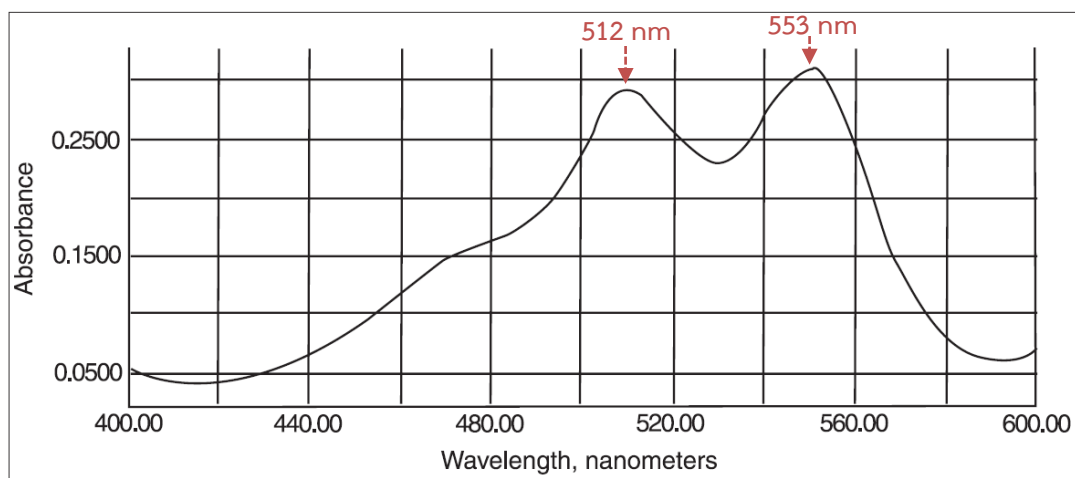
2.5.1 วิธีารวัดสีด้วย DPD (DPD Colorimetric method)

วิธี DPD (*N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Palin ในปี พ.ศ. 2500 (Palin, 1957) และได้กลายมาเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับการตรวจหาคลอรินอิสระและคลอรินรวมทั้งในน้ำประปาและน้ำเสีย ซึ่งวิธีดังกล่าวอาศัยพื้นฐานทางเคมีของปฏิกิริยา DPD ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือ เมื่อ DPD ทำปฏิกิริยากับคลอรินที่สภาวะ pH เป็นกลาง จะได้ผลิตภัณฑ์สีม่วงแดงหรือสีส้มของ Würster และหากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวถูกออกซิเดชันต่อไปจากการเติมคลอรินปริมาณมากขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของ Imine และได้สีที่ไม่เสถียรหรือสีซีดจางลง (Harp, 2002)



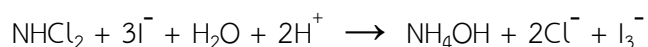
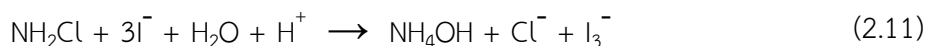
รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์สีที่ได้จากปฏิกิริยาคลอรินอิสระกับ DPD (Xiong, *et al.*, 2017b)

สีส้มของ Würster จะให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 490 ถึง 555 นาโนเมตร ซึ่งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPD ที่แสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีส้มดังกล่าว (λ_{\max}) จะมี 2 ค่า คือ 512 และ 553 นาโนเมตร และมีความไวสูงสุดสำหรับการวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร (Zarei and Sovizi, 2011)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPD (Harp, 2002)

วิธีการวัดสีด้วย DPD (DPD Colorimetric method) สำหรับการวิเคราะห์หาคลอรินในน้ำ เป็นวิธีที่อาศัยหลักการปฏิกิริยาการเกิดสี (Colorimetric reaction) ระหว่างสาร *N, N*-Diethyl-*p*-Phenylenediamine (DPD) กับคลอริน ปฏิกิริยานี้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์คลอรินตกค้างและสารออกซิไดซ์คลอรินอื่น (APHA, AWWA and WEF, 2017) และเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับจาก U.S. EPA สำหรับการตรวจวัดคลอรินอิสระและคลอรินรวมที่อยู่ในน้ำ วิธีนี้มีการใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ในการช่วยลดค่า pH ร่วมกับสาร Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) เพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของสาร DPD ที่เกิดออกซิเดชันได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศ (Cooper, *et al.*, 1982) ซึ่งการทำปฏิกิริยาของคลอรินอิสระกับสาร DPD จะให้สารละลายเป็นสีแดงได้ทันทีในช่วงที่ pH เป็นกลาง โดยมีสารละลายบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer) สำหรับปรับสถานะให้ค่า pH คงที่ในการทำปฏิกิริยา และยังช่วยลดผลของคลอรินรวมจำพวกโมโนคลอรามิน (NH_2Cl) และไดคลอรามิน ($NHCl_2$) อีกด้วย ส่วนการหาคลอรินรวมสามารถวัดได้จากปฏิกิริยาการเกิดสีของ DPD ซึ่งมีโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการหาคลอรินรวมของคลอรามินทั้งสองชนิดนี้ สามารถทดสอบได้ภายใต้สภาวะเป็นกรดเล็กน้อยที่มีไอโอไดด์ไอออน ซึ่งไอโอไดด์จะทำปฏิกิริยากับคลอรามิน เกิดเป็นไอโอดีนและถูกเปลี่ยนให้เป็นไตรไอโอไดด์ไอออน (I_3^-) ดังสมการ (2.11) จากนั้นไตรไอโอไดด์จะทำปฏิกิริยากับสาร DPD เพื่อเกิดการออกซิเดชันได้ผลิตภัณฑ์สีของ Würster ซึ่งการทำปฏิกิริยาดังกล่าวที่ใช้ไอโอไดด์กับสาร DPD สำหรับหาปริมาณของจำพวกคลอรามินนั้น จะไม่สามารถระบุปริมาณของไตรคลอโรมินได้ หรืออาจจะบ่งชี้เล็กน้อย (Gordon, *et al.*, 1988)



ในปัจจุบันได้มีการนำวิธี DPD ไปพัฒนาต่อยอดหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น บริษัท Hach ได้นำวิธีดังกล่าวมาพัฒนาเป็นชุดทดสอบ (test kit) เพื่อให้ใช้งานง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน นอกสถานที่ (รูปที่ 2.7) และสามารถลดความผิดพลาดเนื่องจากการขนส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ ซึ่งชุดทดสอบนี้ มีการแก้ไขและปรับสูตรของสารเคมีบางส่วน เพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การใช้สารเคมี DPD แบบดั้งเดิม เช่น การสอบเทียบเชิงเส้น (Calibration curve) ความเสถียรของรีเอเจนต์ ความเสถียรของผลิตภัณฑ์ในการทำปฏิกิริยา และความปลอดภัยของสารเคมีจากการทดลอง เป็นต้น

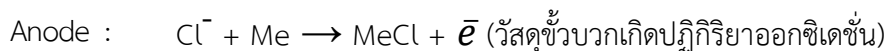
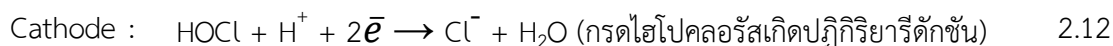


รูปที่ 2.7 ชุดทดสอบคลอรีนในน้ำของบริษัท Hach

ที่มา: www.elicrom.com/colorimetro-portable-pcii-cloro-libre-y-total-mas-ph-5870012/

2.5.2 วิธีแอมเพอโรเมตริก (Amperometric method)

วิธีแอมเพอโรเมตริก (Amperometric method) เป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและวิเคราะห์ค่าให้อยู่ในรูปของความเข้มข้น ซึ่งเซ็นเซอร์แอมเพอโรเมตริกที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัด (Amperometric sensor) ทั่วไปประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ (เช่น ซิลเวอร์/แพลตตินัม หรือ ทองแดง/ทอง) และมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในระบบแอมเพอโรเมตริก (Olivé-Monllau, *et al.*, 2009; Saputro, *et al.*, 2010) ดังสมการที่ (2.12)

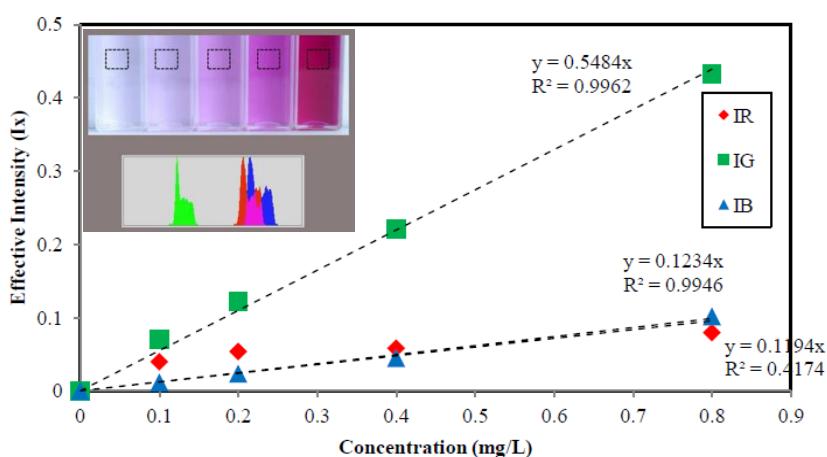


โดยมีขั้วลบ (Cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) และขั้วบวก (Anode) อาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary or counter electrode) ซึ่งระบบดังกล่าวนี้เรียกว่าเซ็นเซอร์แบบสามขั้ว (Three-electrode sensors) ทำให้การวัดมีความเสถียรมากขึ้น โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดจะถูกหุ้มด้วยเมมเบรนเพื่อเลือกผ่านไอออนและช่วยให้การวิเคราะห์ที่ดีขึ้นมีการใช้แรงดันไฟฟ้าขนาดเล็ก (ศักย์ไฟฟ้า) ข้ามขั้วไฟฟ้า ในกรณีที่เซ็นเซอร์ไม่มีเมมเบรนจะเรียกว่าระบบแอมเพอโรเมตริกแบบลวดเชื่อมเปลือย (Bare-electrode amperometric) และกรณีที่เซ็นเซอร์ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าระบบเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) (อินศาสตร์ สุขศรีเมือง, 2548) ซึ่งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้การวัดของแอมเพอโรเมตริกแบบลวดเชื่อมเปลือยและกัลวานิกหรือในบางครั้งก็เรียกว่า โพลารोगราฟิค (Polarographic) นอกจากนี้สิ่งสำคัญสำหรับเซ็นเซอร์แอมเพอโรเมตริกที่แตกต่างกับการไตเตรทแอมเพอโรเมตริกในห้องปฏิบัติการ (Amperometric titration) คือจะต้องสอบเทียบกับการวัดอ้างอิงเพื่อแสดงผลลัพธ์ที่แม่นยำทุกครั้งที่การใช้งาน และข้อจำกัดเมื่อใช้เซ็นเซอร์แอมเพอโรเมตริกในการวัดแบบออนไลน์อย่างต่อเนื่อง คือ อาจถูกรบกวนจากตัวแปรต่างๆ เช่น ตัวอย่างและสภาพแวดล้อมของจุดเก็บตัวอย่างอาจทำให้ความเข้มข้นของคลอรีนเปลี่ยนแปลง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ อัตราการไหลของตัวอย่าง ความดัน หรือบางครั้งอาจเกี่ยวข้องกับแอฟฟลิเคชันที่ให้งานง่าย เซ็นเซอร์มีการเปราะเปื้อนหรือโดนรบกวน และการสอบเทียบของเครื่องมือ (Malkov, *et al.*, 2009)

เมื่อเปรียบเทียบวิธีแอมเพอโรเมตริกกับวิธีวัดสี DPD พบว่า วิธี DPD มีความไวในการตรวจวัดสูง เป็นที่นิยมใช้งานสำหรับทดสอบแบบออนไลน์และได้รับการอนุมัติจาก EPA (Harp, 2002) โดยเฉพาะน้ำยาฆ่าเชื้อโรคที่เหลืตกค้างทั่วไป มักใช้กับวิธีการวัดสี เพราะสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้วิธีการวัดแบบแอมเพอโรเมตริก (Amperometric) หรือโพลารोगราฟิค (Polarographic) อีกทั้งไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ความผันผวนของอัตราการไหล และความดันของตัวอย่าง ดังนั้นวิธีการวัดสีด้วย DPD จึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการวิเคราะห์หาคลอรีนมากกว่า (Malkov, *et al.*, 2009; Engelhardt and Malkov, 2015)

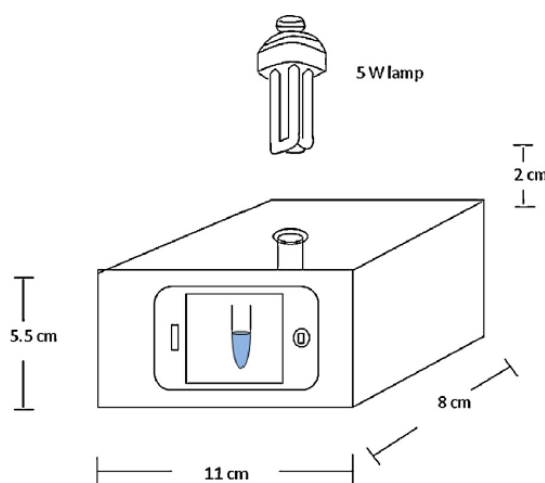
2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล (Digital image Colorimetry, DIC)

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัลได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้อย่างรวดเร็ว และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ได้ (Goddijn and White, 2006; Shen, *et al.*, 2012; Pohanka, 2015) โดยเทคนิคนี้จะอาศัยหลักของการวิเคราะห์ค่าสีพื้นฐาน ได้แก่ สีแดง (Red, R) สีเขียว (Green, G) และสีน้ำเงิน (Blue, B) ของภาพถ่ายที่ได้จากกล้องดิจิทัล ซึ่งทั้งสามสีเกิดขึ้นจากเซ็นเซอร์รับภาพของกล้องดิจิทัล ได้ทำการแปลงแสงที่สะท้อนจากวัตถุถ่ายภาพผ่านตัวกรองสี (RGB filter) และแยกตามช่วงของสเปกตรัม (Spectral ranges) ที่แตกต่างกัน (Choodum, *et al.*, 2015) โดยที่ RGB จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 255 ซึ่งเมื่อค่า RGB เป็น 0 ภาพถ่ายเป็นสีดำ ขณะที่ค่า RGB เท่ากับ 255 ภาพถ่ายจะเป็นสีขาว โดยค่าสี RGB สามารถถูกแปลงเป็นระบบสีอื่นๆ (Color space) ได้ตามความต้องการใช้งาน ค่าสี RGB นี้ สามารถถูกอ่านและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ เช่น Matlab (Lopez-Moliner, *et al.*, 2010), Klyx (Silva-Lyra, *et al.*, 2009), Visual Basic (Suzuki, *et al.*, 2006) และ Adobe Photoshop (Firdaus, *et al.*, 2014) ค่าความเข้มแสง RGB ที่ได้จากการผสมสีของภาพดิจิทัลเหล่านี้ สามารถนำมาใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration graph) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารและค่าความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณได้ (ตัวอย่างกราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร Chromium (VI) และค่าความเข้มสี RGB รวมถึงฮิสโตแกรมทั่วไปของภาพถ่ายสารละลายในความเข้มข้นต่างๆ (ภาพเล็ก) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Adobe Photoshop (Firdaus, *et al.*, 2014)

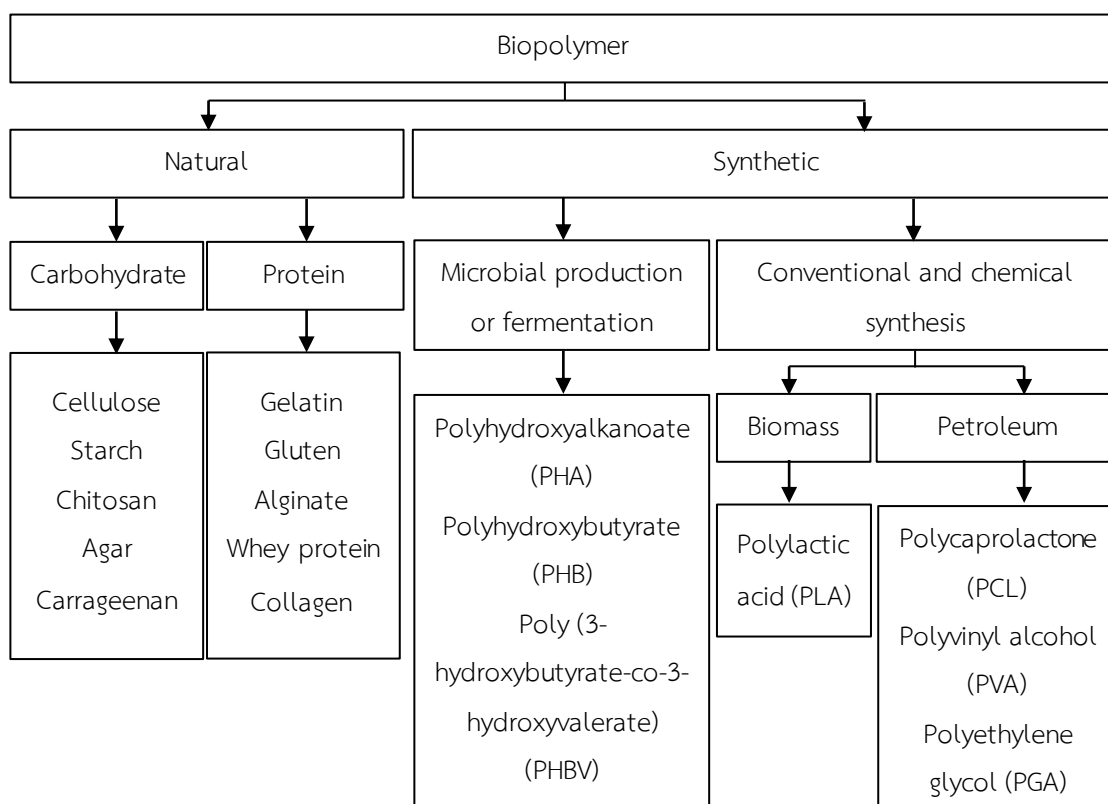
นอกจากนี้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ยังสามารถใช้กับกล้องดิจิทัลที่ติดตั้งอยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สมรรถนะสูงที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป จากการศึกษาของ Choodum, *et al.* (2014) ได้ใช้กล้องดิจิทัลที่ติดตั้งบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ iPhone ร่วมกับโปรแกรมแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์ค่าสี RGB เพื่อหาปริมาณของสาร Methamphetamine (ดังอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.9) ทำให้การวิเคราะห์สะดวกยิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถทำการวิเคราะห์ ค่า RGB จากผลิตภัณฑ์สีได้ทันทีโดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้โปรแกรมอื่นในการประมวลผล



รูปที่ 2.9 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับการตรวจวัดสาร (Choodum, *et al.*, 2014)

2.7 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer)

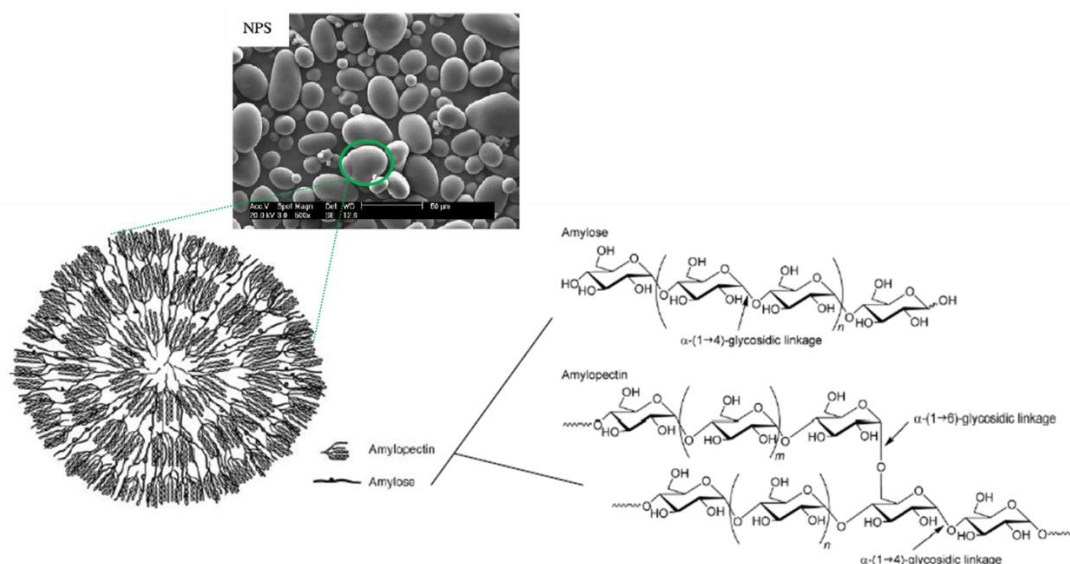
พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถพบได้ในสิ่งที่มีชีวิตและสลายตัวง่ายหรือย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยมีจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ทำหน้าที่เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และผลผลิตที่ได้ไม่มีความเป็นพิษหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Ali Shah, *et al.*, 2013; Castro-Aguirre, *et al.*, 2017) โดยพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถจำแนกออกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย พอลิเมอร์จากธรรมชาติจำพวก พอลิแซคคาไรด์หรือคาร์โบไฮเดรต พอลิเมอร์จากธรรมชาติจำพวกโปรตีน พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์หรือการหมัก และพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนเมอร์ชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 2.10



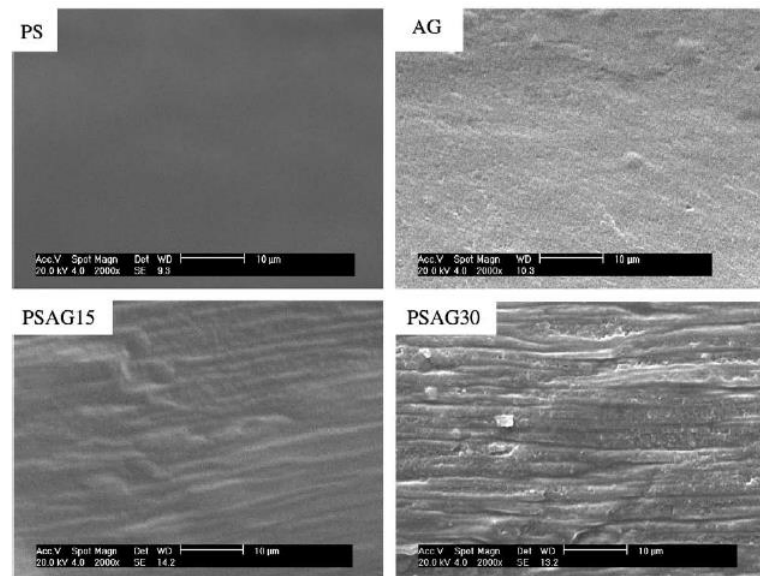
รูปที่ 2.10 การจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ชีวภาพ (ธนพร หีดจันทร์, 2559)

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ชีวภาพจากธรรมชาติเป็นที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะแป้ง เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่สามารถรับประทานได้ อีกทั้งไม่ได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ นอกจากนี้ แป้งยังเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีราคาถูก ไม่มีสีและกลิ่น ไม่ทำให้เกิดภูมิแพ้ จึงได้มีการนำแป้งไปแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอางและเคมีภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์อาหาร รวมถึงผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกมากมาย (Breuninger, *et al.*, 2009; สวทช., 2554) นอกจากนี้ ยังมีการนำแป้งมาใช้เป็นสารช่วยในตำรับของเภสัชภัณฑ์ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มปริมาณ สารช่วยแตกตัว สารยึดเกาะ สารช่วยชะลอการปลดปล่อยยา และสารก่อฟิล์ม (Builders, *et al.*, 2011; Woraphatphadung, *et al.*, 2012; Medina-jaramillo, *et al.*, 2017) เป็นต้น โดยแป้งที่นำมาประยุกต์ใช้มีหลายชนิด ได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งถั่วเขียว แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้า (Mali, *et al.*, 2006) ซึ่งแป้งมันสำปะหลัง (Tapioca/Cassava starch) เป็นแป้งอีกชนิดที่ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้อย่างมาก เนื่องจากเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่ได้จากมันสำปะหลัง ซึ่งถือเป็นหนึ่ง

ในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย หาซื้อง่าย และมีราคาถูก (Santisopasri, *et al.*, 2001) จากการศึกษาพบว่า แป้งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน (Lawton, 1996) แต่มีโครงสร้างภายในของเม็ดแป้งและองค์ประกอบของแป้งคล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ 2.11 โดยทั่วไป แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ให้ความหนืดสูง (high viscosity) และเกิดการคืนตัวต่ำ (low retrogradation) จึงนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขึ้นรูปอย่างเช่นแผ่นฟิล์มหรือเจลได้น้อย แต่เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งชนิดอื่นที่มีความสามารถในการคืนตัวดี จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปได้ดีขึ้น รวมถึงการนำแป้งแต่ละชนิดผสมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดอื่น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมีคุณสมบัติหลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น การศึกษาของ Mendes, *et al.* (2016) ได้ผสมพลาสมาเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวโพดกับไคโตซานด้วยการหลอมอัดรีด เพื่อได้ฟิล์มที่มีความสามารถในการยึดตัวและเสถียรต่อความร้อนได้ดี เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้ Lopez, *et al.* (2014) ยังพบว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดที่มีไคโตซาน สามารถช่วยลดการเติบโตของ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ในบริเวณที่สัมผัสอีกด้วย และจากการศึกษาของ Phan The, *et al.* (2009) และ Wu, *et al.* (2009) พบว่า การเติมวุ้นเข้าไปในฟิล์มที่มีแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 2.12) ทำให้ได้ฟิล์มแป้งที่มีคุณสมบัติเชิงกลละลายน้ำได้ การซึมผ่านของไอน้ำที่สภาวะความชื้นสูง มีความทนต่อแรงดึงและการยึดตัวเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถป้องกันการคืนตัวกลับของฟิล์มแป้งได้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างภายในของเม็ดแป้งมันฝรั่งจากธรรมชาติ (NPS) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500x และองค์ประกอบของแป้ง (Wu, *et al.*, 2009; ธนาภร, 2559)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคระหว่างฟิล์มแข็ง (PS) และฟิล์มวุ้น (AG) เทียบกับฟิล์มแข็งที่วุ้นผสมอยู่ 15% (PSAG15) และฟิล์มแข็งที่วุ้นผสมอยู่ 30% (PSAG30) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2000x (Wu, *et al.*, 2009)

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 ดีพีดีซัลเฟต (*N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine sulfate: DPD) ผลิตจาก Sigma Aldrich Co. (USA)

3.1.2 โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งมีคลอรีนอยู่ 7% โดยน้ำหนัก (Sodium hypochlorite: NaOCl with available chlorine 7% w/w) ผลิตจาก Carlo Erba Reagents S.A.S. (Italy)

3.1.3 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate anhydrous: Na_2HPO_4) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate anhydrous: KH_2PO_4) กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid: EDTA) ผลิตจาก Ajax Finechem Pty Ltd. (Australia)

3.1.4 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% (Sulfuric acid: H_2SO_4) ผลิตจาก Merck Ltd. (Germany)

3.1.5 น้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีน (Ultrapure water) ผลิตจาก Merck Ltd. (Thailand)

3.1.6 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ยี่ห้อ ช้างสามเศียร (Thailand)

3.1.7 ผงวุ้น (Agar powder) ยี่ห้อ นางกวัก (Thailand)

3.1.8 หลอดพลาสติก micro-PCR ขนาด 1.5 มิลลิลิตร

3.2 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

3.2.1 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1601

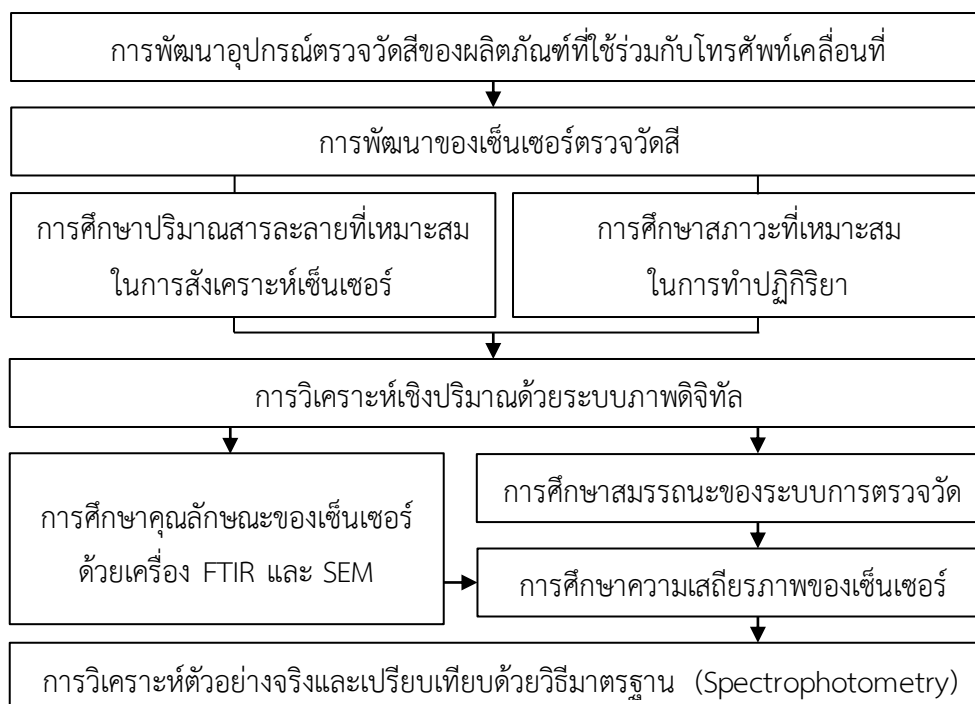
3.2.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น VERTEX 70

3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400 (SEM-Quanta)

3.2.4 โทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อ iPhone รุ่น 7

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

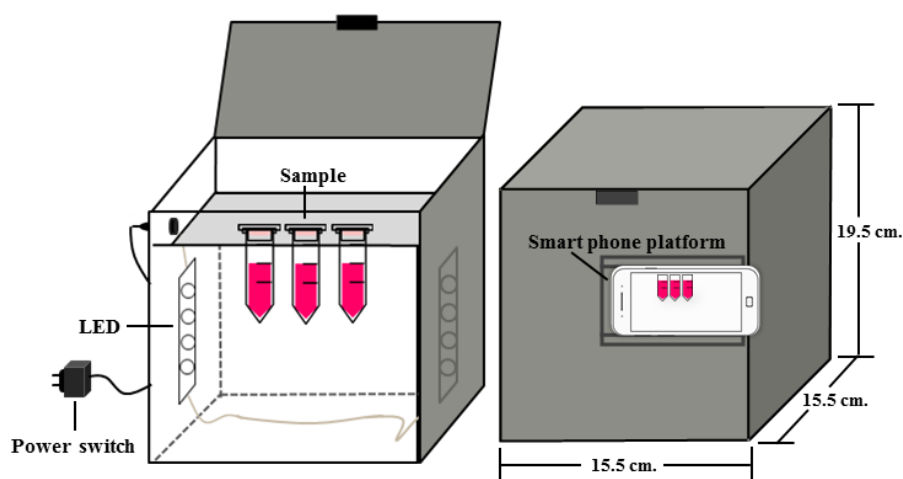
ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสีที่ใช้ควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อหาปริมาณคลอรีนในน้ำ ตามขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง ดังแผนผังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่

กล่องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีขนาดความกว้าง 15.5 เซนติเมตร ความยาว 15.5 เซนติเมตร และความสูง 19.5 เซนติเมตร (แสดงดังรูปที่ 3.2) ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์ และป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอก ซึ่งลักษณะของกล่องทำจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีการพันด้วยเทปกาวสีดำ ภายในกล่องตกแต่งให้มีพื้นผิวเป็นสีขาวจากกระดาษสติ๊กเกอร์ และมีหลอดไฟ LED สีขาว จำนวน 2 แถวๆ ละ 4 หลอด วางไว้บนผนังแต่ละด้านของกล่อง เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง ดังแสดงในรูป 3.2 ระบบภาพดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวจะมีความทำงานควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อ iPhone รุ่น 7 โดยที่ระบบการถ่ายภาพของกล่องมีความคมชัด 12 ล้านพิกเซล รูรับแสงขนาด $f/1.8$ ซึ่งการตั้งค่าจะปิดโหมดถ่ายภาพช่วงการรับแสงสูง (HDR) และปิดการใช้งานแฟลช

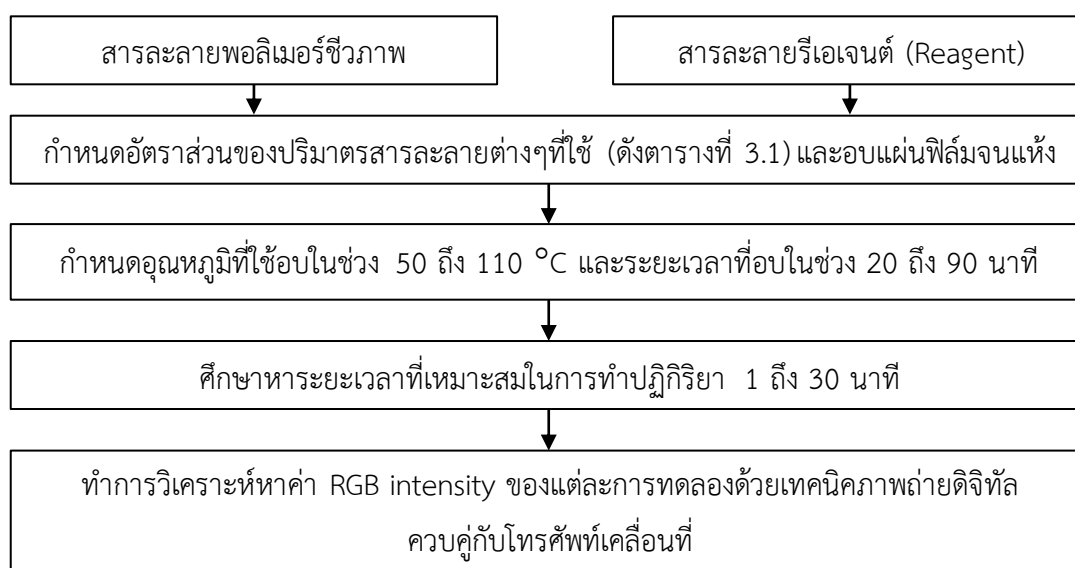


รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสีที่ใช้ควบคู่กับโทรศัพท์เคลื่อนที่

การวิเคราะห์ความเข้มแสงของสีพื้นฐาน 3 สี (RGB intensity) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายมาตรฐานกับเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยผลิตภัณฑ์สีที่ได้จำนวน 3 หลอด ถูกนำไปวางไว้ภายในกล่องถ่ายภาพตามตำแหน่งของช่องใส่ตัวอย่าง และบันทึกภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (iPhone 7) จำนวน 6 ภาพ ผ่านรูเล็กๆ ข้างกล่อง ไฟล์ภาพทั้งหมดของผลิตภัณฑ์จะถูกถ่ายโอนเข้าสู่คอมพิวเตอร์และทำการวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการกำหนดพื้นที่ของภาพสำหรับการวิเคราะห์ให้คงที่ (200x200 พิกเซล) และนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลในโปรแกรม Microsoft Excel 2010 โดยอัตโนมัติ

3.3.2 การพัฒนาของเซ็นเซอร์ตรวจวัดสี

การสังเคราะห์เซ็นเซอร์ของคลอรีนอิสระสามารถเตรียมได้ โดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพ จากวุ้นและแป้งมันสำปะหลังเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสร้างโครงข่ายของพอลิเมอร์ฟิล์ม ซึ่งทำหน้าที่ ในการกักเก็บสาร DPD ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้ไว้ในโครงข่ายของพอลิเมอร์นี้ สัดส่วน การผสมสารพอลิเมอร์และสาร DPD รวมถึงสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการปรับสถานะของปฏิกิริยา จะถูกปรับเปลี่ยนจากวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (APHA, AWWA and WEF, 2017) เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุด โดยในการทำปฏิกิริยาระหว่างสาร DPD ในเซ็นเซอร์กับ สารละลายมาตรฐานคลอรีน สารตัวอย่างจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู ซึ่งในการกำหนดสถานะที่ เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ ความเข้มข้นของคลอรีนจะถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับ 5 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และมีการเตรียมสารใหม่ทุกครั้งก่อนทดสอบ ขั้นตอนการศึกษาหา สถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

สารที่ใช้ในการผลิตเซ็นเซอร์ประกอบด้วยสารละลาย 3 ชนิด ซึ่งสถานะที่ใช้ในการ เตรียมก่อนนำมาผสมรวมกัน คือ ขวดที่ 1 สารละลายพอลิเมอร์ชีวภาพ เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง 0.05 กรัม และวุ้น 0.1 กรัม นำมาละลายในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ นำสารละลายทั้งสองมาผสมกันในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร ขวดที่ 2 สารละลายรีเอเจนต์ DPD ที่ เตรียมจากสาร DPD sulfate 0.011 กรัม EDTA 0.002 กรัม และกรดซัลฟูริก (3M) 0.08 ไมโครลิตร

ละลายในน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีนปริมาตร 10 มิลลิลิตร และขวดที่ 3 เป็นสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซึ่งเตรียมจากการละลาย Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 และ EDTA ปริมาณ 0.24, 0.46 และ 0.008 กรัม ในน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีนปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยสารละลายขวดที่ 2 และ 3 จะถูกนำมาผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร ก่อนที่จะนำสารละลายผสมที่ได้และสารละลายพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างละ 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในฝาของหลอดพลาสติก micro-PCR ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นภาชนะที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลอรีนปริมาตร 1 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 นาที และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ด้วยระบบถ่ายภาพที่พัฒนาขึ้น เพื่อนำข้อมูลความเข้มข้นมาใช้ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

3.3.2.1 การศึกษาหาปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

1) ปริมาณสารในสารละลาย DPD

N,N-diethyl-*p*-phenylenediamine sulfate (DPD) เป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนและทำให้สารละลายมีสี ในสารละลาย DPD ที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ประกอบด้วยสาร 3 ชนิด ได้แก่ DPD sulfate, EDTA และกรดซัลฟิวริก โดยการหาปริมาณสาร DPD ที่เหมาะสมจะทำการศึกษาโดยผสมปริมาณ DPD sulfate ในช่วง 0.011, 0.022, 0.033, 0.055, 0.11, 0.33, 0.55, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 และ 6.0 กรัม ขณะที่การศึกษา EDTA ที่เหมาะสมจะใช้สาร EDTA ในปริมาณ 0, 0.002, 0.004, 0.02, 0.01 และ 0.2 กรัม และกรดซัลฟิวริก (3M) ปริมาตร 0, 0.08, 0.16, 0.24, 0.40, 0.80, 2.4 และ 4.0 มิลลิลิตร โดยจะทำการเตรียมสารทั้งหมดในน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีนปริมาตร 10 มิลลิลิตร สารละลายที่เตรียมได้จะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในขวดที่บับแสง หากสารละลายมีการเปลี่ยนสีจะไม่สามารถนำมาใช้ได้

2) ปริมาณสาร EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) ในสารปรับ pH

ในการทำปฏิกิริยา (Buffer) และผลการรบกวนที่เกิดจากไอออนชนิดอื่น (Tolerance limit)

ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer) เป็นสารปรับสภาวะในการทำปฏิกิริยาเพื่อช่วยรักษาค่า pH ของสารละลายให้คงที่ในช่วงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุด ในการตรวจวัดคลอรีนอิสระด้วยวิธีมาตรฐาน จะมีการเติมสาร EDTA ลงในสารละลายบัฟเฟอร์ เพื่อช่วยชะลอ

ความเสื่อมสภาพของสาร DPD และลดผลการรบกวนจากไอออนอื่นได้ โดยเฉพาะกลุ่มสารโลหะหนัก ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงทำโดยการนำ EDTA ปริมาณ 0, 0.008, 0.016, 0.024, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.24 และ 0.28 กรัม มาละลายในน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่มี Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ปริมาณ 0.24 และ 0.46 กรัม ตามลำดับ เซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทดสอบกับสารละลายมาตรฐานที่ปรับความเป็นกรดต่าง ให้อยู่ในช่วง pH 3 ถึง pH 12 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาผลของการรบกวนที่เกิดจากไอออนชนิดต่างๆ ในน้ำ เพื่อหาปริมาณสูงสุดของไอออนที่ยอมให้มีได้ (Tolerance limit) ทำโดยเลือกไอออนรบกวนที่เป็นตัวแทนของทั้งไอออนบวกและไอออนลบ ได้แก่ Na^+ , NH_4^+ , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cl^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- และ MnO_4^- โดยจะศึกษาไอออนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 10, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลของการรบกวนจะแสดงในรูปของค่าร้อยละการเบี่ยงเบน (%Deviation) ตามสมการ (3.1) และเนื่องจากสาร EDTA สามารถช่วยลดการรบกวนของกลุ่มสารโลหะหนัก โดยเฉพาะเหล็กที่ปะปนอยู่ในน้ำและมักพบได้ทั่วไปในตัวอย่างน้ำหลายชนิด เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน รวมถึงน้ำประปาบางกรณีซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำดิบที่ใช้ ดังนั้นเพื่อทดสอบความสามารถของสาร EDTA ในการกำจัดไอออนรบกวนดังกล่าวในน้ำ จึงทำการศึกษาหาปริมาณของ EDTA ที่เหมาะสมในสารละลาย Phosphate buffer ในช่วงที่กำหนดไว้ข้างต้น (ปริมาณ 0, 0.008, 0.016, 0.024, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.24 และ 0.28 กรัม) อีกครั้งหนึ่ง โดยในการศึกษาครั้งนี้ จะเลือกสารรบกวนของ Fe^{3+} ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมลงในปริมาณของ EDTA ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณ EDTA ต่อสารรบกวนในการสังเคราะห์ เซ็นเซอร์

$$\% \text{ Deviation} = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่

% Deviation	คือ ร้อยละการเบี่ยงเบน
X_1	คือ ความเข้มข้นของสารในสถานะที่ไม่มีไอออนรบกวน
X_2	คือ ความเข้มข้นของสารในสถานะที่มีไอออนรบกวน

3) ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและวุ้น

การศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ทำโดยการเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังและวุ้นที่ความเข้มข้นต่างๆ และนำมาผสมกันในอัตราส่วน 1: 2 โดยปริมาตร ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ศึกษา คือ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 กรัมต่อน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะถูกบรรจุลงในภาชนะที่มีฝาปิดและให้ความร้อนโดยการกวนผสมที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จนกระทั่งสารละลายมีสีขาวใสและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง ก่อนจะนำมาผสมกับสารละลายวุ้น ในขณะที่ปริมาณของวุ้นที่เหมาะสมจะศึกษาในช่วง 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 กรัมต่อน้ำปราศจากไอออนบริสุทธิ์ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และให้ความร้อนเช่นเดียวกับการเตรียมแป้ง จนได้สารละลายใส ไม่มีสี แล้วตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงอยู่ในช่วง 45 ถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิต่ำเกินไป สารละลายจะมีการแข็งตัวที่เร็วจนไม่สามารถนำมาผสมกับสารชนิดอื่นได้ และหากอุณหภูมิสูงไป อาจส่งผลต่อสารละลาย DPD เปลี่ยนสีเข้มขึ้น

4) อัตราส่วนผสมระหว่างปริมาตรสารละลายบัฟเฟอร์ต่อปริมาตร DPD ที่ pH ต่างๆ

การศึกษานี้ทำโดยการผสมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 และ EDTA ปริมาณ 24, 46 และ 16 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) สารละลาย DPD (กรดซัลฟิวริก (3M) 400 ไมโครลิตร ใน DPD sulfate เข้มข้น 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร) และสารละลายพอลิเมอร์ชีวภาพ (ปริมาตรของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นเท่ากับ 1: 2) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยมีปริมาตรสารละลายผสมที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 5 มิลลิลิตร และทำการปรับความเป็นกรดต่างของสารละลายมาตรฐาน ให้อยู่ในช่วง pH 3 ถึง 12 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์และสารละลาย DPD

อัตราส่วนของ บัพเฟอร์ต่อ DPD	ปริมาตรรีเอเจนต์ (มล.)		ปริมาตรพอลิเมอร์ชีวภาพ (มล.) ของแป้งและวุ้น ในอัตราส่วน 1: 2
	บัพเฟอร์	DPD	
0:1	0.0	1.0	4.0
0.5:1	0.5	1.0	3.50
1:1	1.0	1.0	3.0
2:1	2.0	1.0	2.0
3:1	3.0	1.0	1.0

3.3.2.2 อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

การศึกษาผลอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ สามารถทำได้โดยใช้สารละลายผสมตามอัตราส่วนที่เหมาะสมจากข้างต้นข้อ 4) นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยคงที่เวลาการอบที่ 30 นาที และนำอุณหภูมิการอบที่ให้ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์สูงสุดมาใช้ในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ในช่วง 20 ถึง 90 นาที

3.3.2.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

ทำการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในสภาวะที่เหมาะสมจากข้างต้น โดยทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที และเปรียบเทียบความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้

3.3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยระบบภาพดิจิทัล (Quantitative digital image analysis)

การวิเคราะห์คลอรีนอิสระในเชิงปริมาณจำเป็นต้องมีการสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานคลอรีนเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยใช้สารโซเดียมไฮโปคลอไรท์เข้มข้น 80,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 62 ไมโครลิตร ในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีน 5 มิลลิลิตร) เจือจางสารละลายคลอรีนให้ได้ความเข้มข้นที่ 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 7, 10, 15, 20, 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำสารละลายมาตรฐานคลอรีนที่ความเข้มข้นดังกล่าวมาตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม และทำการวิเคราะห์

ความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ด้วยระบบภาพดิจิทัลบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อนำค่าความเข้มสี RGB ที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอรีนและความเข้มสี RGB หลังจากนั้นนำค่าความเข้มสี RGB (RGB intensity) มาคำนวณตามสมการ (3.2) (Choodum and Daeid, 2011) เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสง RGB (RGB Absorbance) และสร้างกราฟมาตรฐาน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอรีนและค่าดูดกลืนแสง RGB

$$A_x = -\log \frac{(I_x - I_{x,b})}{(I_{x,w} - I_{x,b})} \quad (3.2)$$

โดยที่

A_x คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร x

I_x คือ ค่าความเข้มสี (Intensity)

$I_{x,b}$ คือ ความเข้มสีของแสงสีดามีค่าเท่ากับ 0

$I_{x,w}$ คือ ความเข้มสีของแสงสีขาวมีค่าเท่ากับ 255

3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะของเซ็นเซอร์

แผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดคลอรีนอิสระจะถูกนำมาศึกษาห่มู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) และศึกษา ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

3.3.5 การศึกษาสมรรถนะของระบบการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์

สมรรถนะของระบบการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำที่พัฒนาขึ้น จะพิจารณาจาก พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) ช่วงความเป็นเส้นตรง (LDR) ขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) และความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity) โดยมีรายละเอียด การศึกษาดังนี้

3.3.5.1 ความแม่นยำ (Accuracy)

เป็นการทดสอบความใกล้เคียงกันของผลการตรวจวัดปริมาณสารที่วัดได้จากการใช้ กราฟมาตรฐานกับปริมาณสารที่มีอยู่จริง ซึ่งแสดงในรูปของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ดังสมการ (3.3)

$$\% \text{ Relative Error} = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่	% Relative Error	คือ ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
	X_1	คือ ค่าความเข้มข้นของสารที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	X_2	คือ ค่าความเข้มข้นของสารจริง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.3.5.2 ความเที่ยง (Precision)

แสดงถึงความใกล้เคียงของผลที่วัดได้จากตัวอย่างเดียวหลายครั้ง โดยการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบภายในวันเดียวกัน (Intraday precision) โดยจะทำการตรวจวัดซ้ำที่เวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง และรูปแบบระหว่างวัน (Interday precision) โดยทำการตรวจวัดซ้ำในวันที่ 1, 3 และ 5 วัน จากนั้นนำค่าความเข้มสี RGB ที่ได้มาคำนวณหาร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ดังสมการ (3.4)

$$\% \text{ RSD} = \frac{sd}{\bar{X}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่	% RSD	คือ ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
	sd	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	\bar{X}	คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มสี (Intensity)

3.3.5.3 ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range, LDR)

ศึกษาโดยการสร้างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนอิสระกับค่าความเข้มสี RGB หรือค่าการดูดกลืนแสง และกำหนดช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วงความสัมพันธ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มากกว่า 0.99 หรือมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งจะได้สมการเส้นตรงที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณดังสมการ (3.5)

$$y = m(x) + C \quad (3.5)$$

โดยที่	y	คือ ความเข้มสี (Intensity) หรือค่าการดูดกลืนแสง RGB
	x	คือ ค่าความเข้มข้นของคลอรีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	m	คือ ค่าความชันของสมการเส้นตรง (Slope)
	C	คือ จุดตัดแกน y (Intercept)

3.3.5.4 ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD)

เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น ซึ่งคำนวณโดยอาศัยสมการเส้นตรง (Calibration Equation) จากกราฟมาตรฐาน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบลงค์ตามสมการ (3.6) (International Council for Harmonisation, 1996)

$$\text{LOD} = 3.3 S_B/S \quad (3.6)$$

โดยที่

LOD คือ ขีดจำกัดในการตรวจวัด

S_B คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวิเคราะห์แบลงค์ (blank) 10 ซ้ำ

S คือ ความชันของกราฟมาตรฐาน

3.3.5.5 ความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity)

หมายถึง ความสามารถของวิธีการวิเคราะห์ในการแยกสารที่มีปริมาณต่างๆ ออกจากกัน โดยพิจารณาจากความชันของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน

3.3.6 การศึกษาความเสถียรภาพของเซ็นเซอร์ (Stability)

เป็นการศึกษาความคงสภาพของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาได้ ทำโดยการส่งเคราะห์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคลอรีน จำนวน 240 ชุด บรรจุลงในถุงซิปล็อคแบบทึบแสงที่มีทั้งการบรรจุแบบสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติหรือไม่มีการสุญญากาศใดๆ (การทำสุญญากาศจะนำเซ็นเซอร์ 3 หลอดใส่ในซองเดียวกัน) เซ็นเซอร์ดังกล่าว ทั้งแบบสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติจะถูกเก็บรักษาใน 4 สภาวะ ได้แก่ เก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) ในตู้เย็นอุณหภูมิอยู่ที่ 4 องศาเซลเซียส และในช่องแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์ที่เก็บรักษาไว้จะถูกนำออกมาทดสอบกับสารละลายมาตรฐานและน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีนที่ใช้เป็นแบลงค์ อย่างละ 3 หลอด ในทันทีและทดสอบซ้ำในทุกวัน เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ในทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 1 เดือน และในทุกเดือนจนครบ 6 เดือน และคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงสี RGB ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลง

3.3.7 การทดสอบกับตัวอย่างจริงเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวอย่างจากสระว่ายน้ำ น้ำดื่ม น้ำประปา น้ำผิวดิน และน้ำทะเล โดยบริเวณของการเก็บตัวอย่างในจังหวัดภูเก็ต ได้แก่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สถานที่ประกอบการหรือโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว โรงผลิตน้ำประปา และตามบ้านเรือน เป็นต้น ดังในตารางที่ 3.2 ซึ่งตัวอย่างถูกเก็บไว้ในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทและแช่ในถังน้ำแข็ง เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำระหว่างการขนส่งมายังห้องปฏิบัติการ และถูกนำมาทดสอบทันทีด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (DPD colorimetric method) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

ตารางที่ 3.2 สถานที่การเก็บตัวอย่างจริงในจังหวัดภูเก็ต

ตัวอย่างจริง		สถานที่เก็บตัวอย่าง
ตัวอย่างสระว่ายน้ำ (Swimming pool)	SW1	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
	SW2	สถานที่ประกอบการหรือโรงแรม
	SW3	สวนน้ำบูบลี เชียงทะเล
ตัวอย่างสระน้ำเกลือ (Saltwater pool)	SA1	บ้านเรือน
	SA2	โรงเรียน Manta kid
ตัวอย่างน้ำประปา (Tap water)	TW1	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
	TW2	โรงผลิตของเทศบาลนครภูเก็ต (ซอยพะเนียง)
	TW3	บ้านเรือนในซอยพะเนียง อำเภอเมืองภูเก็ต
ตัวอย่างน้ำดื่ม (Drinking water)	DW1	น้ำดื่มบรรจุขวดของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ผ่านการกรองแบบ RO และฆ่าเชื้อด้วยโอโซน)
	DW2	น้ำดื่มจากเครื่องกรองตามบ้านเรือน (ผ่านไส้กรองคาร์บอนกัมมันต์ และฆ่าเชื้อด้วยหลอด อัลตราไวโอเล็ต (UV))
ตัวอย่างน้ำผิวดิน (Natural water)	NW1	ชุมชนเมืองเก่าในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตัวอย่างน้ำทะเล (Sea water)	SEA1	ชายหาดป่าตอง

บทที่ 4

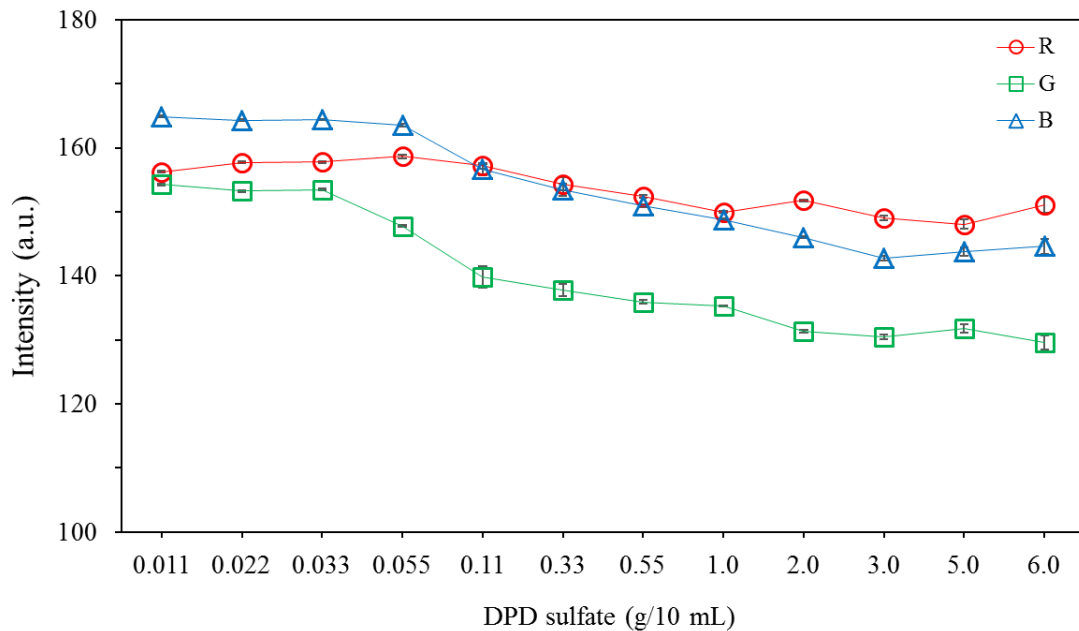
ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ผลของปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

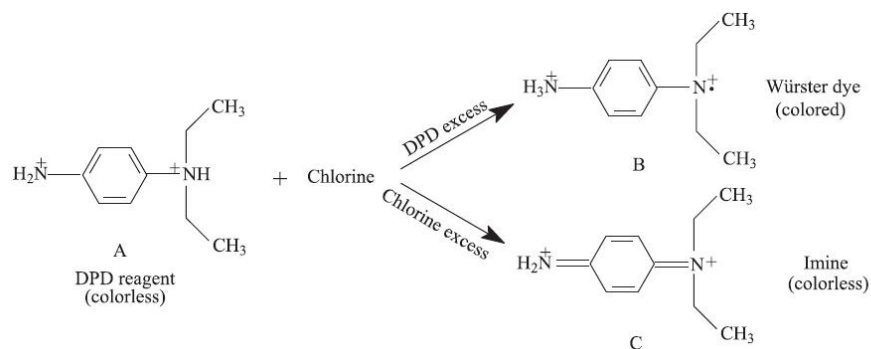
4.1.1 ปริมาณสารในสารละลาย DPD

ปริมาณของ *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine sulfate หรือสาร DPD มีความสำคัญต่อความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเป็นสารที่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคลอรีนได้เป็นผลิตภัณฑ์ของ Würster dye หรือสารละลายมีสีชมพู โดยผลิตภัณฑ์สีจะเกิดขึ้นได้ แม้มีปริมาณคลอรีนในตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (Zarei and Sovizi, 2011) ดังนั้นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยามีสีเข้มที่สุด และให้ผลการตรวจวัดที่มีความเที่ยงเท่ากันทุกครั้ง ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาหาปริมาณของ DPD ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ โดยศึกษาปริมาณของสาร DPD sulfate ในช่วง 0.011 – 6.0 กรัม (ต่อปริมาตรสารละลาย 10 มิลลิลิตร) และคงที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากการศึกษาพบว่า ค่าความเข้มสีแดงมีแนวโน้มสูงกว่าค่าความเข้มสีน้ำเงินและสีเขียว ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นสีชมพู จึงสามารถสะท้อนแสงสีแดงออกมาให้เห็นด้วยตาเปล่า โดยในช่วงแรกที่มีปริมาณสาร DPD ต่ำ (0.011 – 0.033 กรัม) การเพิ่มปริมาณสาร DPD จะไม่ส่งผลให้ค่าความเข้มสี RGB เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากในสภาวะปกติที่มีสัดส่วนปริมาณของสาร DPD เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับคลอรีน (excess DPD) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสีชมพูของ Würster dye (แสดงดังรูปที่ 4.2) แต่ในกรณีที่มีปริมาณของสาร DPD ต่ำ คลอรีนจะออกซิไดส์สาร DPD ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีสีของ imine compound ที่มีความเสถียรต่ำ (Xiong, *et al.*, 2017a) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสาร DPD ในช่วงแรก ค่าความเข้มสี RGB จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีสีของ imine เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยา (dominant species)

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสาร DPD ให้สูงขึ้นจาก 0.33 – 2.0 กรัม ค่าความเข้มสี RGB จะมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสาร DPD และคลอรีนเกิดได้มากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยามีมากและเกิดสีที่เข้มขึ้น การสะท้อนแสงจากผลิตภัณฑ์เข้าสู่เซ็นเซอร์รับภาพ (image sensor) ของกล้องจึงลดลง ดังนั้นความเข้มสีที่วัดได้จึงมีค่าลดลงในช่วงดังกล่าว แต่เมื่อปริมาณของสาร DPD มีมากกว่า 2.0 กรัมขึ้นไป ค่าความเข้มสีจะมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลอรีนแล้ว ดังนั้นปริมาณสาร DPD ที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ คือ 2.0 กรัม

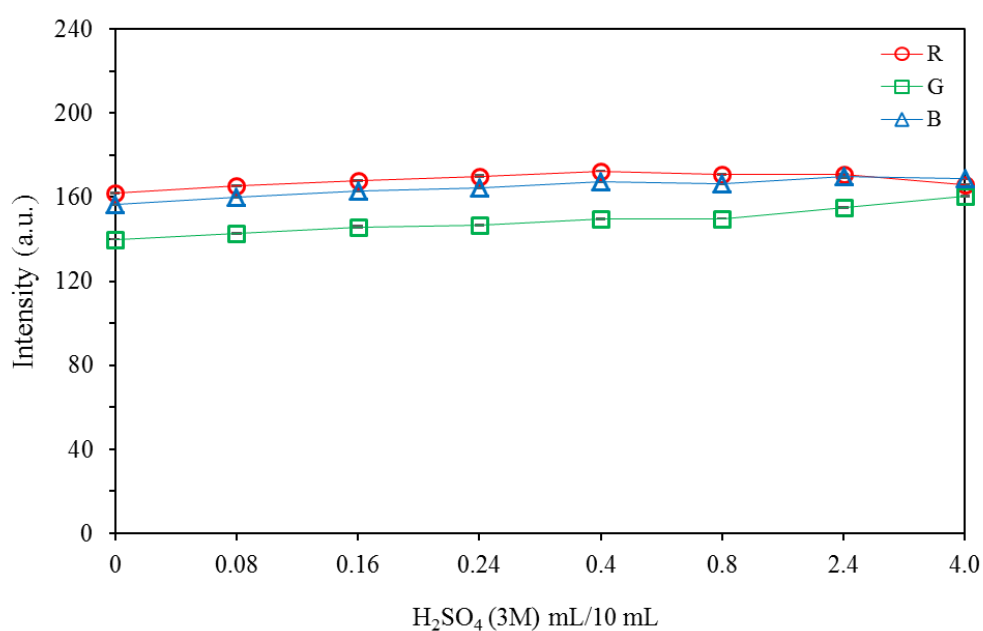


รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณ DPD sulfate ที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความเข้มของสี RGB



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสาร DPD

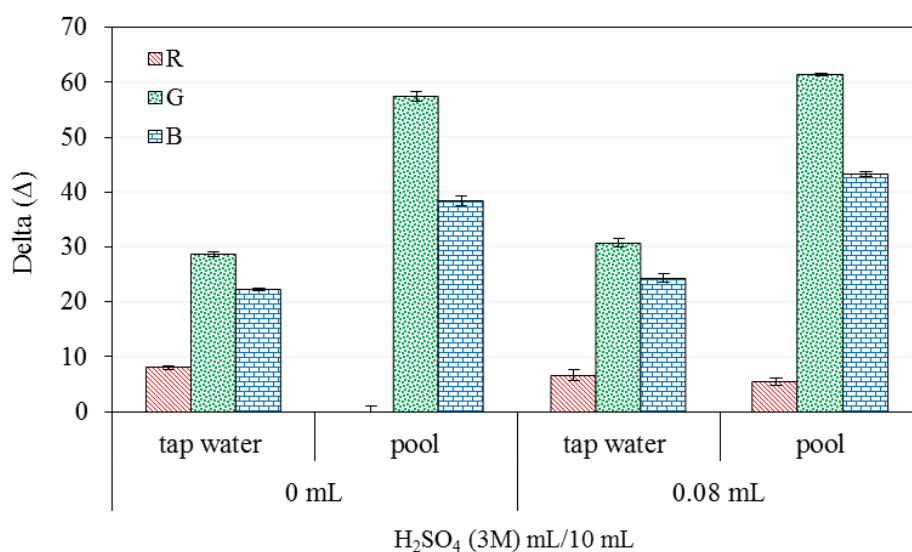
สารรีเอเจนต์ DPD เป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถเกิดการออกซิเดชันได้ง่ายกับออกซิเจนในบรรยากาศ หรือออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ Cooper, *et al.* (1982) ได้รายงานว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ DPD จากออกซิเจนดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับค่า pH ซึ่งการรักษาความเสถียรของสารรีเอเจนต์ DPD จะต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังนั้นการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก (3M) เติมลงในสารละลาย DPD เพื่อช่วยลดค่า pH จะสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสาร DPD ได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 โมลาร์ ในช่วง 0 – 4.0 มิลลิลิตร ที่เติมลงในสารละลายรีเอเจนต์ DPD ปริมาตรรวม 10 มิลลิลิตร อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาในรูปแบบที่ 4.3 พบว่า ปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เติมลงในสารละลาย DPD ไม่ส่งผลต่อค่าความเข้มสี RGB อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้ มีการเตรียมสารละลาย DPD ใหม่ทุกครั้งที่ใช้งาน มิได้มีการเตรียมสารละลายทิ้งไว้ ดังนั้นสาร DPD จึงไม่ถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศหรือเกิดการสูญเสียไป ทำให้ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เติมลงไป ไม่ส่งผลต่อการคงอยู่ของสาร DPD และค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่ได้



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกในสารละลาย DPD ที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความเข้มของสี RGB

อย่างไรก็ตาม ในแหล่งน้ำดิบจากธรรมชาติที่ใช้อุปโภคและบริโภคนั้น โดยทั่วไป มักจะมีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้น เพื่อตรวจสอบผลการสูญเสียของ DPD จากการเกิดออกซิเดชันในน้ำ ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการใช้งานเซ็นเซอร์ที่ผลิตจากสารละลาย DPD ที่มีการเติมและไม่เติมกรดซัลฟูริก สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำจริง ได้แก่ น้ำประปาและน้ำจากสระว่ายน้ำ โดยเลือกใช้กรดซัลฟูริกปริมาตร 0.08 มิลลิลิตร ในสารละลาย DPD ปริมาตรรวม 10 มิลลิลิตร และเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์ที่ไม่มีการเติมกรด แต่เนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมีพื้นฐานมาจากการวัดการเปลี่ยนแปลงของสีตัวอย่าง ซึ่งสีเริ่มต้นของตัวอย่างน้ำก่อนการทําปฏิกิริยา (background color) อาจส่งผลกระทบต่อ การวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสี RGB ได้ ดังนั้น เพื่อลดปัญหาการรบกวนของสีดั้งเดิมของตัวอย่างน้ำจริงประเภทต่างๆ ในการศึกษา นี้ จึงได้ทำการหักลบค่าความเข้มสี RGB ที่วิเคราะห์ได้ด้วยค่าความเข้มสีจากตัวอย่างน้ำที่ปราศจากคลอรีนหรือแบลนก์ (blank) (subtracted RGB, delta (Δ)) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยเห็นได้ชัดว่าความแตกต่างของค่าความเข้มสี RGB หรือค่า Delta (Δ) ของเซ็นเซอร์ที่มีกรดซัลฟูริกนั้นจะสูงกว่าเซ็นเซอร์ที่ไม่มีกรดในทุกตัวอย่างน้ำจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กรดซัลฟูริกสามารถลดผลกระทบจากการสูญเสียสาร DPD อันเนื่องมาจากการออกซิไดซ์ของออกซิเจนในตัวอย่างน้ำได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กรดซัลฟูริก (3M) 0.08 มิลลิลิตร ในสารละลาย DPD สำหรับการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

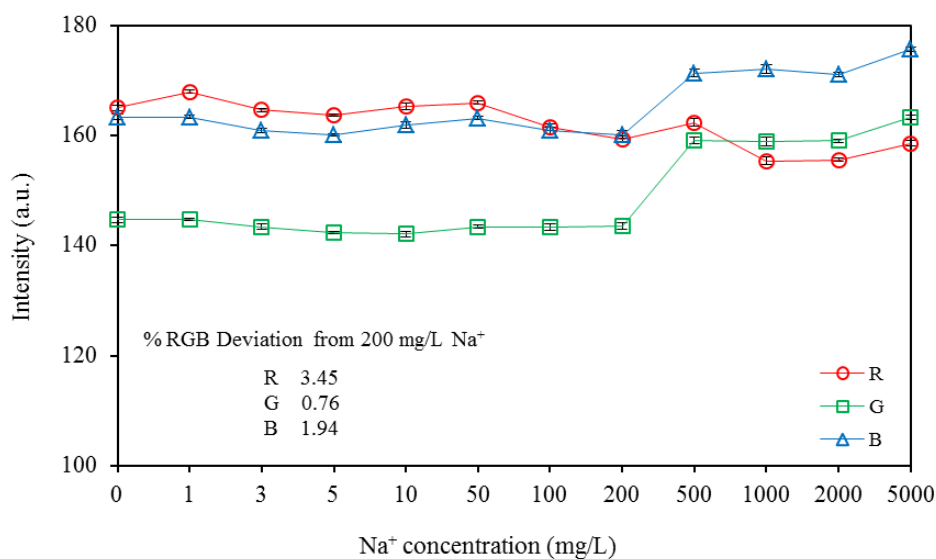
นอกจากกรดซัลฟูริกแล้ว ในการตรวจวัดคลอรีนด้วยวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WEF, 2017) ยังมีการแนะนำให้ใส่สาร EDTA ในสารละลาย DPD ด้วย เนื่องจากสาร EDTA สามารถช่วยชะลอความเสื่อมสภาพของ DPD ได้ แต่จากการสังเกตพบว่า สาร EDTA ไม่สามารถละลายในสารละลาย DPD ได้หมด อีกทั้งจากการทดสอบเบื้องต้น (preliminary study) พบว่า ปริมาณของสาร EDTA ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสี RGB ดังนั้นในงานวิจัย นี้ จะทำการใส่สาร EDTA ลงในสารละลายบัฟเฟอร์ (เนื่องจากสาร EDTA สามารถละลายได้) ก่อนที่จะนำมาผสมรวมกับสารละลาย DPD เพื่อทำการสังเคราะห์เซ็นเซอร์



รูปที่ 4.4 การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ที่มีกรดและไม่มีกรดซัลฟูริกกับตัวอย่างน้ำจริง

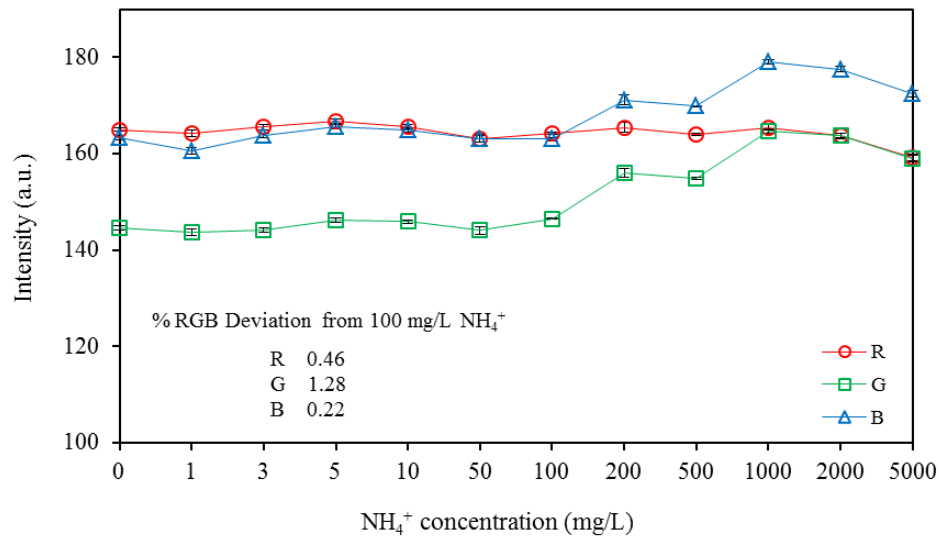
4.1.2 ปริมาณสาร EDTA ในสารปรับ pH ในการทำปฏิกิริยา (Buffer solution) และผลการรบกวนที่เกิดจากไอออนชนิดอื่น (Tolerance limit)

ในการใช้งานเซ็นเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจริงนั้น อาจให้ผลที่แตกต่างกับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากตัวอย่างน้ำจริงหลายประเภทจะมีการปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบการวิเคราะห์จากไอออนชนิดต่างๆ ในน้ำ โดยทั่วไปแล้ว ระดับของผลการรบกวนที่เกิดจากไอออนชนิดต่างๆ มักจะแสดงในรูปปริมาณสูงสุดของไอออนที่ยอมให้มีได้ (Tolerance limit) โดยในงานวิจัยนี้ จะเลือกศึกษาชนิดของไอออนรบกวนที่เป็นตัวแทนของไอออนบวกและไอออนลบ ได้แก่ Na^+ , NH_4^+ , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cl^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- และ MnO_4^- ไอออนเหล่านี้ จะถูกเติมลงไปในตัวอย่งสารละลายมาตรฐานคลอรีนความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของไอออน 0, 1, 3, 5, 10, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากสาร EDTA ในสารละลายบัฟเฟอร์ ทำหน้าที่เป็น chelating agent ซึ่งสามารถลดการรบกวนของกลุ่มสารโลหะได้ ดังนั้นเพื่อต้องการวัดระดับความเข้มข้นของการรบกวนจากไอออนชนิดต่างๆ ข้างต้น ที่อาจมีผลต่อเซ็นเซอร์ จึงทำการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยไม่มีการเติมสาร EDTA ใดๆ ลงในสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ดังกล่าว ซึ่งค่าปริมาณไอออนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ จะถูกกำหนด ณ จุดที่ความเข้มข้นของไอออนเริ่มส่งผลให้ความเข้มข้นของคลอรีนที่ตรวจวัดได้เปลี่ยนแปลงไปจากสถานะที่ไม่มีไอออนในน้ำหรือมีร้อยละการเบี่ยงเบน (%Deviation) มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ผลจากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.5 – 4.17

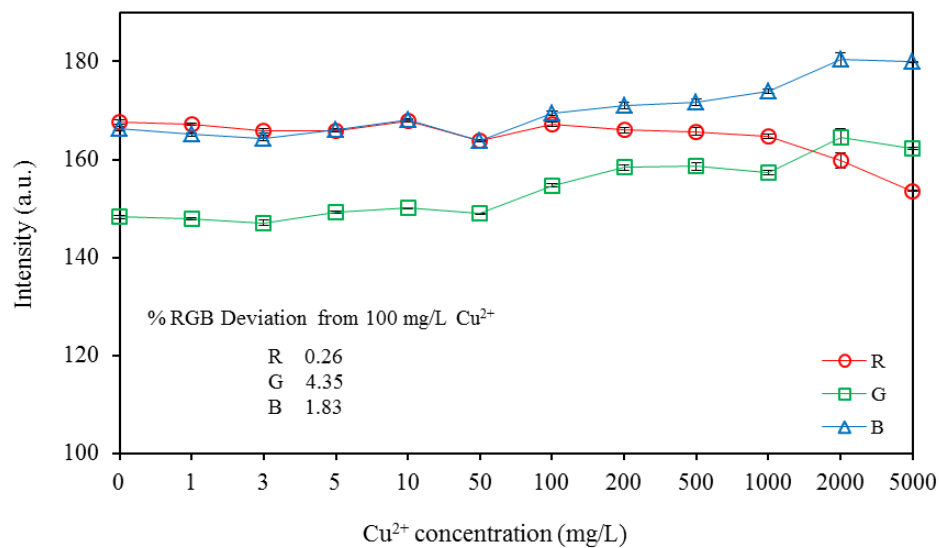


รูปที่ 4.5 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Na⁺ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการรบกวนของ Na⁺ ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า การที่ตัวอย่างน้ำมีปริมาณไอออน Na⁺ ละลายอยู่ในช่วง 1 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลต่อค่าความเข้มสี RGB ของคลอรีนที่ตรวจวัดได้ แต่ถ้าตัวอย่างมีปริมาณไอออน Na⁺ ละลายอยู่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ค่าความเข้มสีที่ตรวจวัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไอออน Na⁺ จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยลง ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีปริมาณไอออน Na⁺ เจือปนในตัวอย่าง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ค่าความเข้มสีเขียวที่ตรวจวัดได้ เกิดการเบี่ยงเบนไปจากค่าความเข้มสีในสภาวะที่ปราศจากไอออน Na⁺ ร้อยละ 10 หรือคิดเป็นความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 4.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเบี่ยงเบนจากความเข้มข้นจริง (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) เท่ากับ 11.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ดังนั้นปริมาณสูงสุดของไอออน Na⁺ ที่ยอมให้มีได้ในตัวอย่างจึงเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งที่ระดับดังกล่าวจะมีค่าร้อยละการเบี่ยงเบนในรูปความเข้มสีเขียวเพียง 0.76 เปอร์เซ็นต์



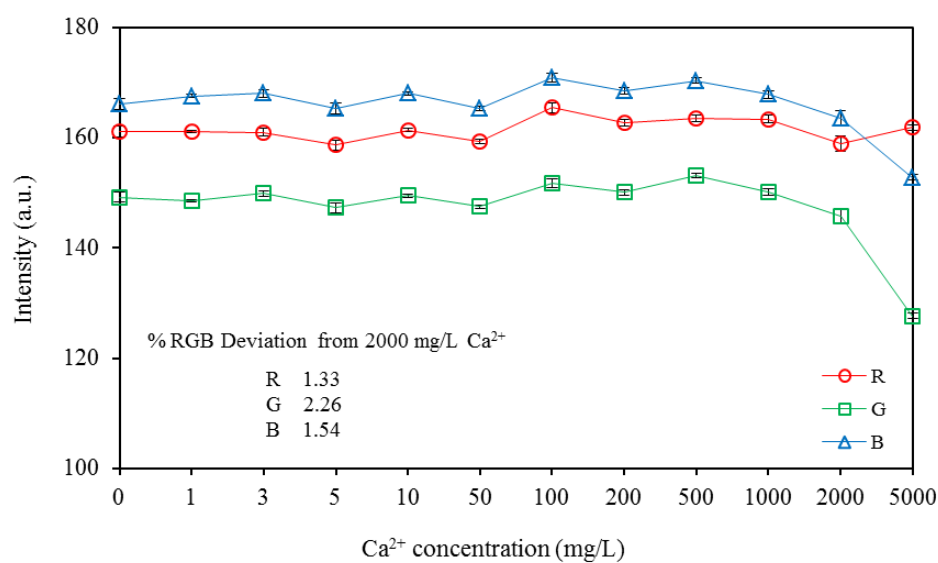
รูปที่ 4.6 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ NH_4^+ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Cu^{2+} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

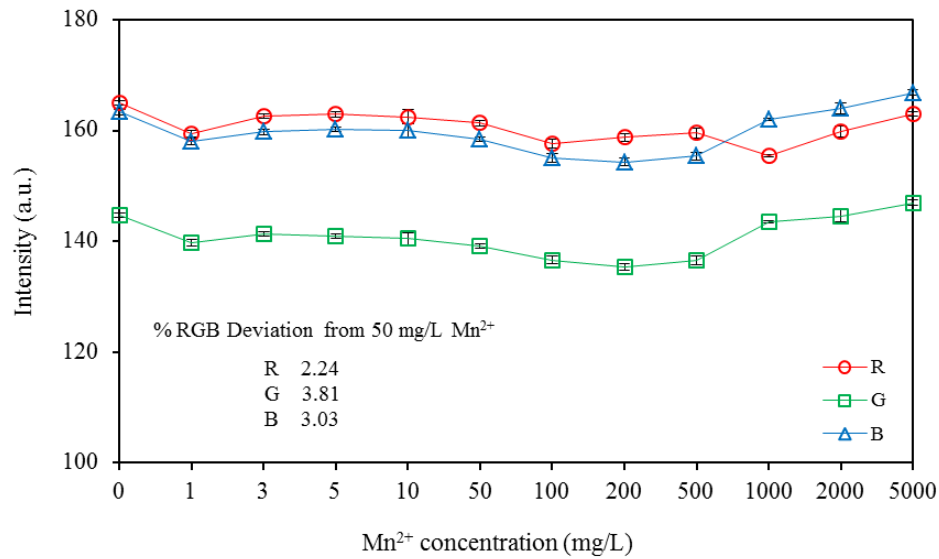
จากผลการรบกวนของ NH_4^+ และ Cu^{2+} ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ) พบว่า ถ้ามีไอออนของ NH_4^+ และ Cu^{2+} ปนเปื้อนในน้ำต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์คลอรีนอิสระด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้ามีปริมาณไอออนทั้งสองชนิดสูงเกินกว่าระดับดังกล่าว ปริมาณความเข้มสี RGB ที่ตรวจวัดได้จะมีค่าสูงขึ้นหรือมีปริมาณคลอรีนที่ตรวจวัดได้ลดลง โดยถ้ามีไอออน NH_4^+ และ

Cu^{2+} ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนในน้ำ จะส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มสีเขียวที่ตรวจวัดได้ เกิดการเบี่ยงเบนไปจากค่าความเข้มสีในสภาวะที่ปราศจากไอออน NH_4^+ และ Cu^{2+} ร้อยละ 7.81 และ 6.82 ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณสูงสุดของไอออน NH_4^+ และ Cu^{2+} ที่ยอมให้มีได้ในตัวอย่างจึงเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งที่ระดับดังกล่าวจะมีค่าร้อยละการเบี่ยงเบนในรูปความเข้มสีเขียว 1.28 และ 4.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

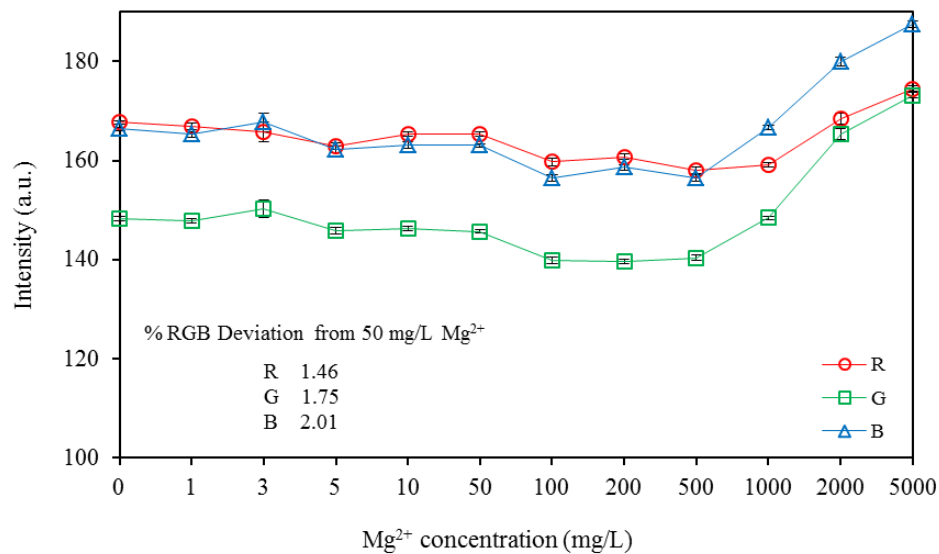


รูปที่ 4.8 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Ca^{2+} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการรบกวนของ Ca^{2+} ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า การมีปริมาณของไอออน Ca^{2+} ปนเปื้อนในน้ำที่ต่ำกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์คลอรีนอิสระด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น แต่ถ้าหากตัวอย่างน้ำมีไอออน Ca^{2+} ละลายอยู่มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ค่าความเข้มสีที่ตรวจวัดได้จะมีค่าลดลง หรือมีผลผิดพลาดจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นมาก ดังนั้นปริมาณสูงสุดของไอออน Ca^{2+} ที่ยอมให้มีได้จึงอยู่ที่ระดับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในระดับดังกล่าวจะให้ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนของความเข้มสีเขียวเท่ากับ 2.26



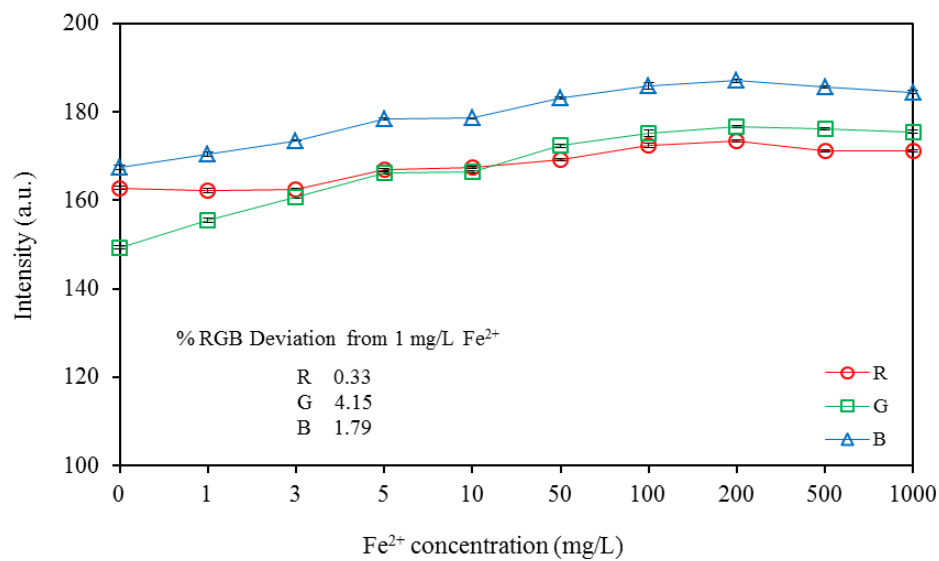
รูปที่ 4.9 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Mn²⁺ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



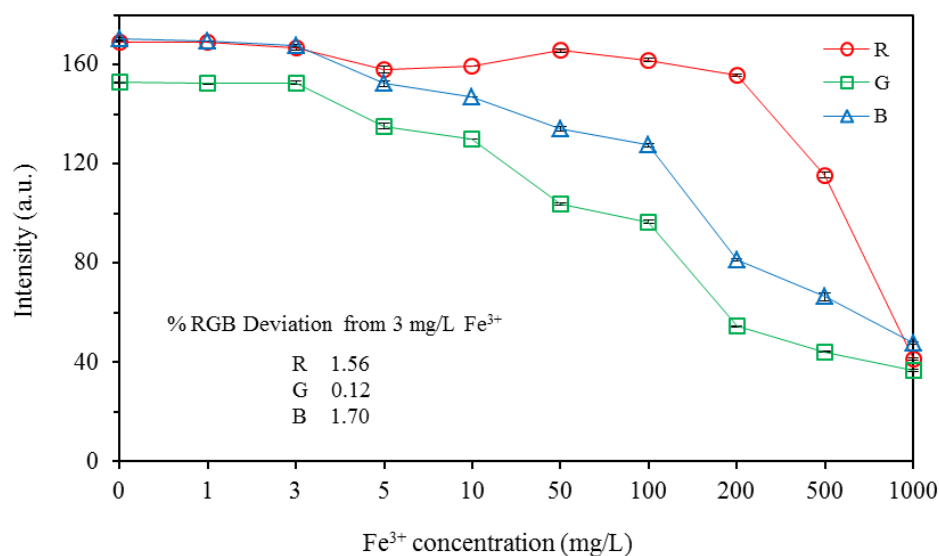
รูปที่ 4.10 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Mg²⁺ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการรบกวนของ Mn²⁺ และ Mg²⁺ ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.9 และ 4.10) พบว่า ถ้าตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนของไอออน Mn²⁺ และ Mg²⁺ ปริมาณต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์คลอรีนด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ความเข้มสีที่ตรวจวัดได้เบี่ยงเบนไป < 5%) แต่ถ้าตัวอย่างมีปริมาณของไอออนทั้งสองชนิดสูงกว่าระดับดังกล่าว ปริมาณความเข้มสี RGB ที่ตรวจวัดได้จะน้อยลง หรือทำให้

ความเข้มข้นของคลอรีนที่ตรวจวัดได้เพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้จริง (เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยถ้ามีความเข้มข้นของไอออน Mn^{2+} ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลให้ความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงินเบี่ยงเบนไปเท่ากับ 5.60 และ 5.08 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่ไอออนของ Mg^{2+} ที่ระดับดังกล่าว จะทำให้ความเข้มของสีเขียวและสีน้ำเงินเบี่ยงเบนไปเท่ากับ 5.66 และ 5.97 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

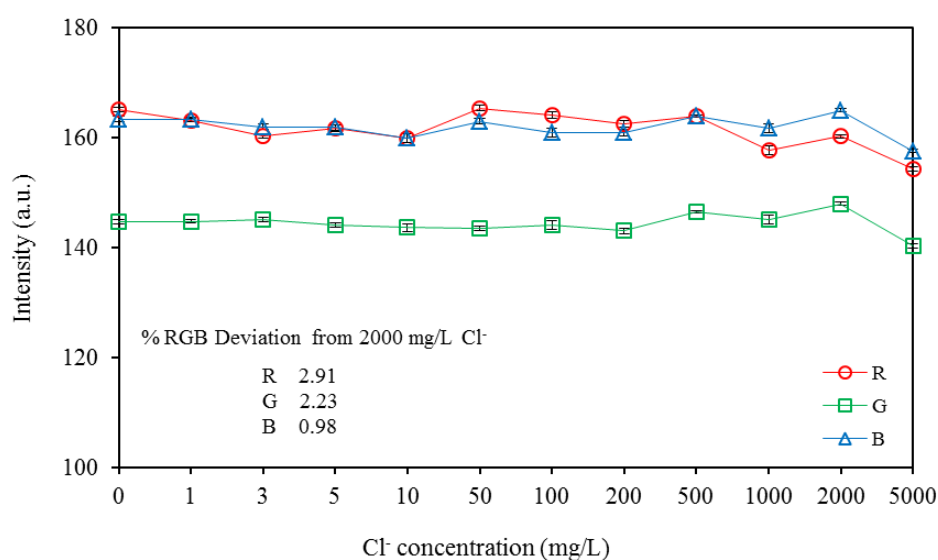


รูปที่ 4.11 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Fe^{2+} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

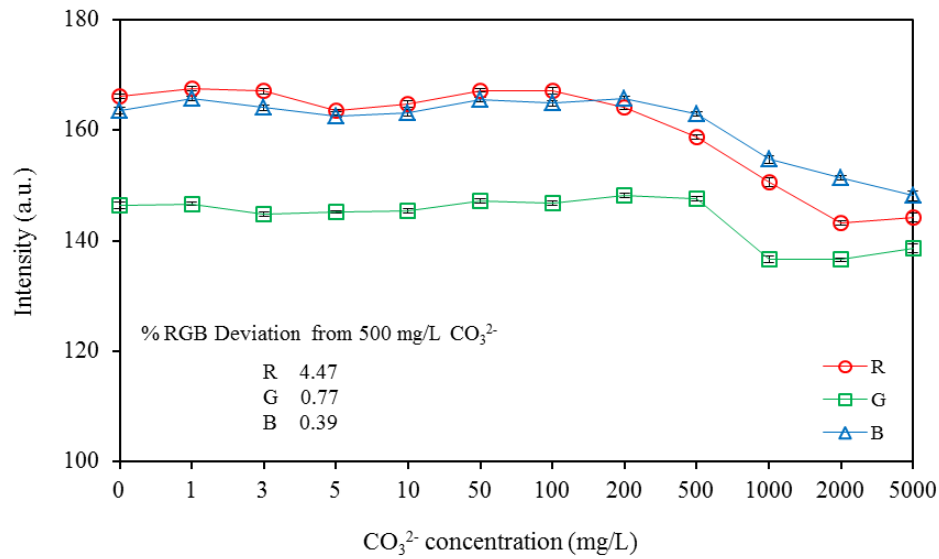


รูปที่ 4.12 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Fe^{3+} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการรบกวนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ต่อการตรวจวัดคลอไรด์อิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังในรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณของไอออน Fe^{2+} และ Fe^{3+} ละลายอยู่ด้วย จะส่งผลกระทบอย่างมากต่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นคลอไรด์ ด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยถ้ามีปริมาณของไอออน Fe^{2+} ตั้งแต่ 3 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป จะทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้เพิ่มขึ้นหรือมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น คิดเป็นค่าร้อยละการเบี่ยงเบนของความเข้มข้นสีเขียวและน้ำเงินเท่ากับ 7.57 และ 3.63 ตามลำดับ ซึ่งในทางกลับกันปริมาณของไอออน Fe^{3+} ตั้งแต่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป จะส่งผลกระทบ ทำให้ความเข้มข้นของสี RGB ที่ตรวจวัดได้ลดลงหรือมีปริมาณคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้เพิ่มขึ้น โดยคิดเป็นค่าร้อยละการเบี่ยงเบนของความเข้มข้นสีเขียวและน้ำเงินเท่ากับ 11.55 และ 10.59 เนื่องจากเหล็กไอออนเฟอริก (Fe^{3+}) สามารถออกซิไดซ์สาร DPD เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สีของ Würster dye ได้เช่นเดียวกันกับการทำปฏิกิริยาด้วยคลอไรด์อิสระ (Zou, *et al.*, 2019) โดยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะมีค่าความยาวคลื่นสูงเท่ากับ 551 nm และ 510 nm (Liu, *et al.*, 2018) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเกิดสีมากขึ้นตามปริมาณของไอออน Fe^{3+} ที่เพิ่มสูงขึ้น

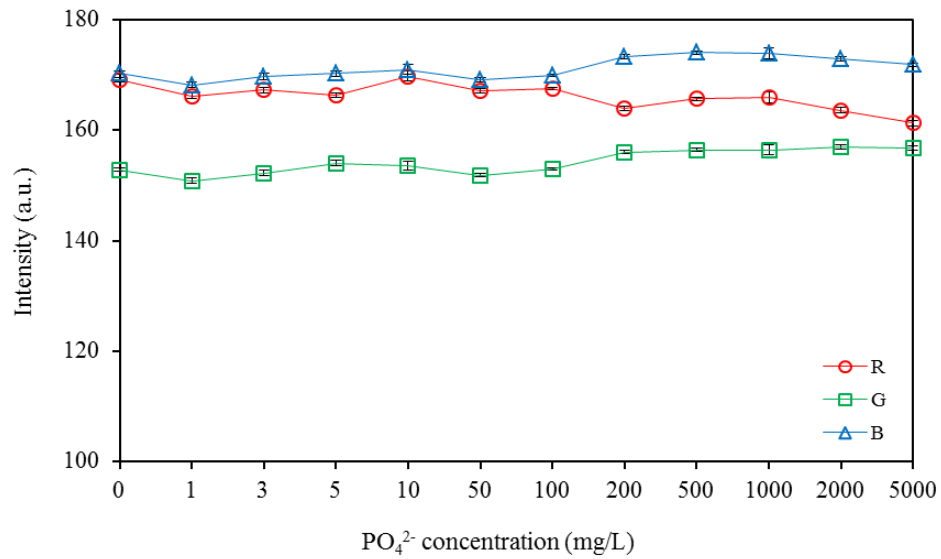


รูปที่ 4.13 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ Cl^- ต่อการตรวจวัดคลอไรด์อิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

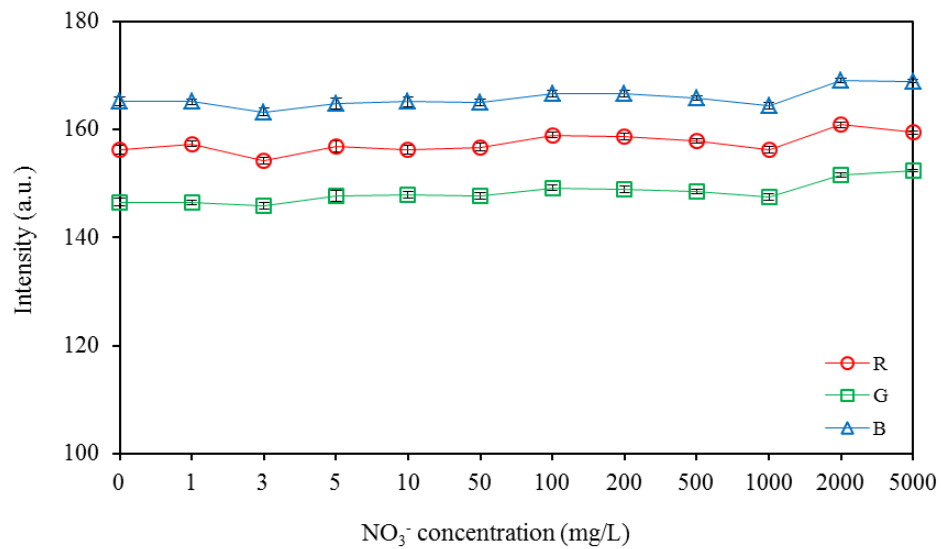


รูปที่ 4.14 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ CO_3^{2-} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการรบกวนตัวแทนไอออนลบของ Cl^- ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปที่ 4.13 พบว่า ถ้าตัวอย่างน้ำมีการปนเปื้อนของไอออน Cl^- ในช่วงความเข้มข้น 1 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นคลอรีนด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตาม หากไอออนของ Cl^- สูงถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ความเข้มสี RGB ที่วิเคราะห์ได้ลดลง โดยเบี่ยงเบนไปจากความเข้มสีจริง 5.92 และ 4.28 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเข้มสีเขียวและน้ำเงินตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของไอออน CO_3^{2-} จะเริ่มส่งผลกระทบต่อความเข้มสี RGB เมื่อมีมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป (ดังแสดงในรูปที่ 4.14) โดยจะให้ความเข้มสี RGB ลดลงในรูปของค่าร้อยละการเบี่ยงเบนเท่ากับ 6.88 และ 6.08 สำหรับความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงิน ตามลำดับ (เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างที่มี CO_3^{2-} ปนเปื้อนอยู่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

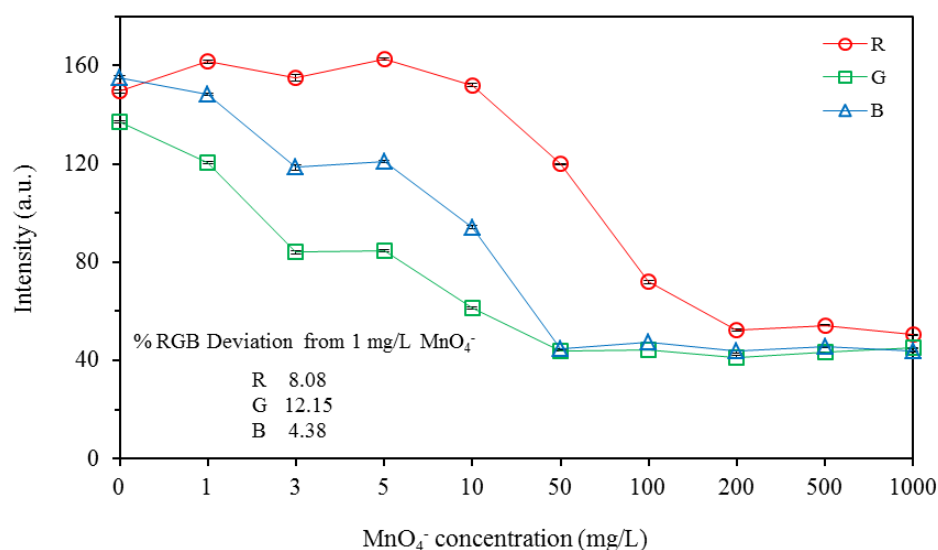


รูปที่ 4.15 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ PO_4^{2-} ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.16 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ NO_3^- ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการรบกวนของ PO_4^{2-} และ NO_3^- ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.15 และ 4.16) พบว่า ปริมาณไอออนลบของทั้งสองชนิด คือ PO_4^{2-} และ NO_3^- ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะไม่ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระด้วย เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น (โดยมีค่าร้อยละการเบี่ยงเบนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 4.17 ผลการรบกวนการวิเคราะห์ของ MnO_4^- ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

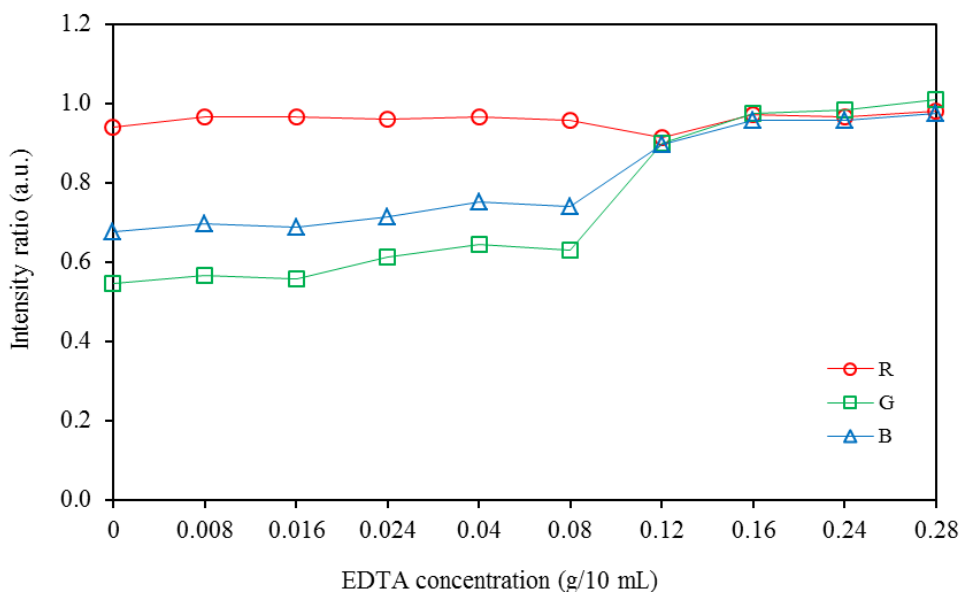
ผลการรบกวนของ MnO_4^- ต่อสารละลายมาตรฐานคลอรีน แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ปริมาณของไอออน MnO_4^- ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ จะส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในทุกความเข้มข้นตั้งแต่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป เนื่องจาก MnO_4^- ที่ใช้ในการศึกษา จะอยู่ในรูปของ KMnO_4 ซึ่งเป็นสารละลายที่มีสีม่วงและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (maximum wavelength, λ_{max}) เท่ากับ 530 นาโนเมตร (Hamada, *et al.*, 2016) ใกล้เคียงกับค่าการดูดกลืนแสงของ Würster dye ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 515 นาโนเมตร ดังนั้นไอออน MnO_4^- ที่ปนเปื้อนในน้ำ จึงสามารถรบกวนการตรวจวัดสีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสาร DPD ได้ โดยการมีไอออน MnO_4^- 1 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนในน้ำตัวอย่าง จะทำให้ความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงินที่ตรวจวัดได้เบี่ยงเบนไปจากสถานะที่ไม่มีไอออนดังกล่าวในน้ำร้อยละ 12.15 และ 4.38 ตามลำดับ

จากผลการศึกษารูปที่ 4.5 - รูปที่ 4.17 สามารถสรุปปริมาณของไอออนชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ และผลการรบกวนจากไอออนแต่ละชนิดต่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นคลอรีนอิสระด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นที่ตรวจวัดได้จริง เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณสูงสุดของไอออนแต่ละชนิดสามารถยอมให้มีได้ จะคำนวณจากค่าร้อยละการเบี่ยงเบนในรูปความเข้มสี RGB ที่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการรบกวนของไอออนชนิดต่างๆ ที่มีต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ

ไอออนอื่น	ปริมาณสูงสุดของไอออนที่ยอมให้มีได้ (Tolerance limit), มิลลิกรัมต่อลิตร	%RSD
Na ⁺	200	0.39
NH ₄ ⁺ , Cu ²⁺	100	0.13, 0.25
Ca ²⁺ , Cl ⁻	2,000	0.89, 0.19
Mn ²⁺ , Mg ²⁺	50	0.26, 0.20
Fe ²⁺	1	0.30
Fe ³⁺	3	0.39
CO ₃ ²⁻	500	0.27
PO ₄ ³⁻ , NO ₃ ⁻	ไม่พบการรบกวนการวิเคราะห์	-
MnO ₄ ⁻	0	-

จากตารางที่ 4.1 ชี้ให้เห็นได้ว่าการมีอยู่ของโลหะบางชนิด โดยเฉพาะเหล็กเฟอร์รัสและเฟอร์ริกที่สามารถพบได้ทั่วไปในตัวอย่างน้ำหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน รวมถึงน้ำประปาในบางกรณี (ขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำดิบที่ใช้) แม้มืออยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะส่งผลกระทบต่อตรวจวัดคลอรีนด้วยเซ็นเซอร์ที่ไม่มีการผสมของสาร chelating agent หรือสาร EDTA ดังนั้น เพื่อลดผลรบกวนจากโลหะต่างๆ ในน้ำ การเติมสาร chelating agent ลงในเซ็นเซอร์ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยลดการรบกวนของกลุ่มสารโลหะดังกล่าวได้ ในงานวิจัยนี้ จะใช้ EDTA เป็นสาร chelating agent ที่จะเติมลงในเซ็นเซอร์ โดยจะทำการศึกษาหาปริมาณของ EDTA ที่เหมาะสมในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ใช้ผลิตเซ็นเซอร์ และจะเลือกใช้ Fe³⁺ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวแทนของสารรบกวนในน้ำ โดยช่วงความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ศึกษา คือ 0 – 0.28 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร ผลการตรวจวัดที่ได้จะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสีของคลอรีนในตัวอย่างที่มี Fe³⁺ และไม่มี Fe³⁺ (Intensity ratio) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณของ EDTA จะทำให้อัตราส่วนของความเข้มสี RGB ระหว่างตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe³⁺ และที่ไม่มี Fe³⁺ เพิ่มขึ้น และมีอัตราส่วนดังกล่าวเข้าใกล้ 1 (หรือระดับที่ Fe³⁺ ไม่มีผลรบกวนการวิเคราะห์) เมื่อปริมาณของ EDTA มากกว่า 0.16 กรัมขึ้นไป ดังนั้นปริมาณของ EDTA ที่เหมาะสมในสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งสามารถลดปัญหาการรบกวนของโลหะได้ คือ 0.16 กรัม



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณ EDTA ต่ออัตราส่วนความเข้มสี RGB ระหว่างตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe^{3+} (ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และไม่มี Fe^{3+}

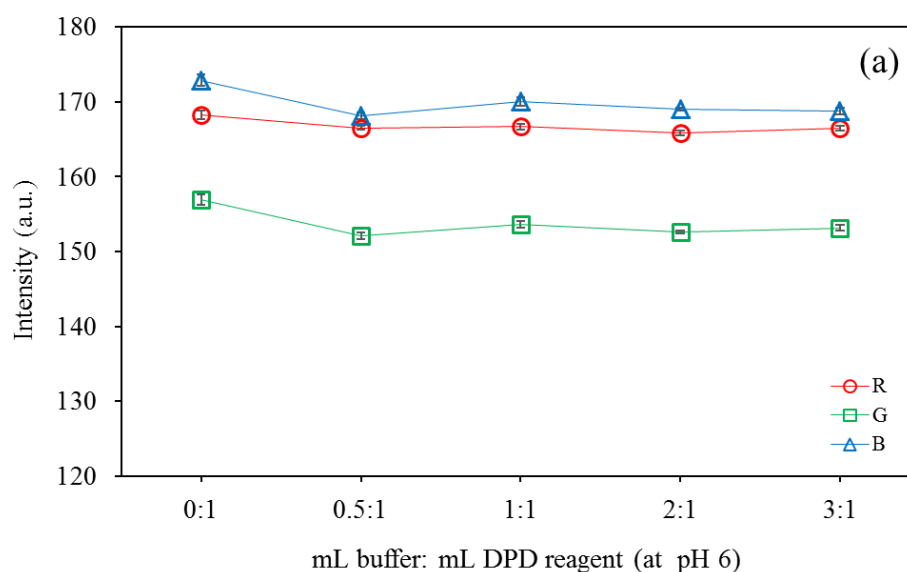
4.1.3 อัตราส่วนของปริมาตรบัฟเฟอร์ต่อปริมาตร DPD ที่ pH ต่างๆ

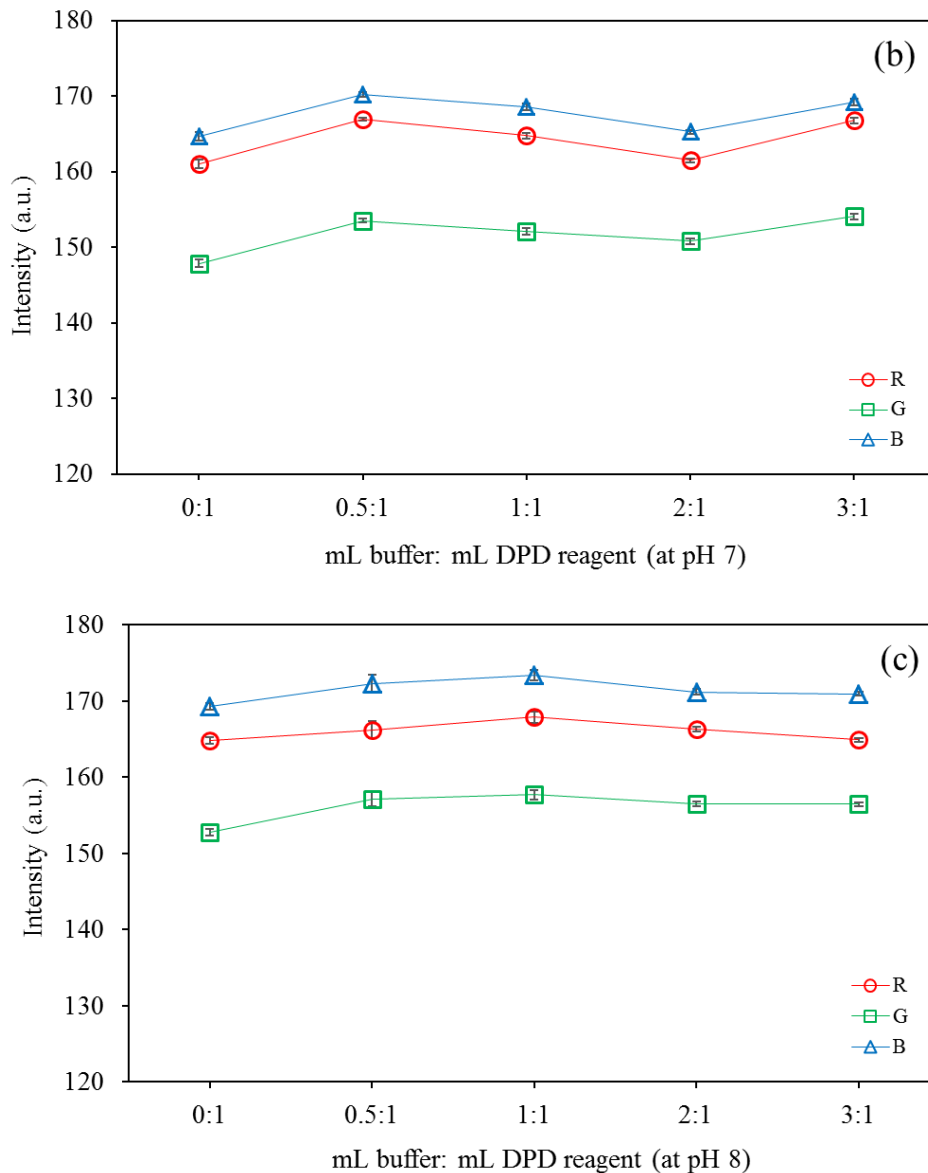
ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer) มีบทบาทสำคัญในการรักษาค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยามีความเสถียร ซึ่งช่วยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์มากขึ้น (Zarei and Sovizi, 2011; Xiong, *et al.*, 2017a) ในการศึกษาสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ สารรีเอเจนต์ของ DPD ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผสมแล้ว (ผสมจากสารละลายของวุ้น (agar) และแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) ในอัตราส่วน 2:1 โดยปริมาตร) โดยในงานวิจัยนี้ จะศึกษาอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายระหว่างบัฟเฟอร์ต่อรีเอเจนต์ DPD เท่ากับ 0:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ ซึ่งปริมาตรของพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้จะปรับให้สอดคล้องกับอัตราส่วนดังกล่าว เพื่อรักษาปริมาตรรวมของสารละลายผสมทั้งหมดให้เท่ากับ 5 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมของฟอสเฟตบัฟเฟอร์กับรีเอเจนต์ DPD ในพอลิเมอร์ชีวภาพผสม โดยมี ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 5 มิลลิลิตร

อัตราส่วนของ บัฟเฟอร์ต่อ DPD	ปริมาตรรีเอเจนต์ (มล.)		ปริมาตรพอลิเมอร์ชีวภาพ (มล.) ของแป้งและวุ้น ในอัตราส่วน 1:2
	บัฟเฟอร์	DPD	
0:1	0	1.0	4
0.5:1	0.5	1.0	3.50
1:1	1.0	1.0	3.0
2:1	2.0	1.0	2.0
3:1	3.0	1.0	1.0

โดยทั่วไปแล้ว ในสภาวะย่นน้ำและน้ำประปาที่ใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อ จะมีระดับของ ค่า pH ที่แนะนำอยู่ที่ 7.2 – 7.6 และ 6.5 – 8.5 ตามลำดับ (กรมอนามัย, 2558; Wojtowicz, 2004) ดังนั้นในการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาตรของบัฟเฟอร์ต่อรีเอเจนต์ DPD ที่เหมาะสม จึงเลือก ทำการศึกษาในช่วง pH 6 – 8 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่า เซ็นเซอร์ที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วน ระหว่าง 0.5:1 – 2:1 ให้ผลการตรวจวัดในรูปความเข้มสี RGB ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในทุกช่วง pH (6 – 8) ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนของสารเคมีและลดของเสียจากสารเคมีที่ใช้ แล้วหลังการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างฟอสเฟตบัฟเฟอร์และรีเอเจนต์ DPD ที่ 0.5:1 ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์



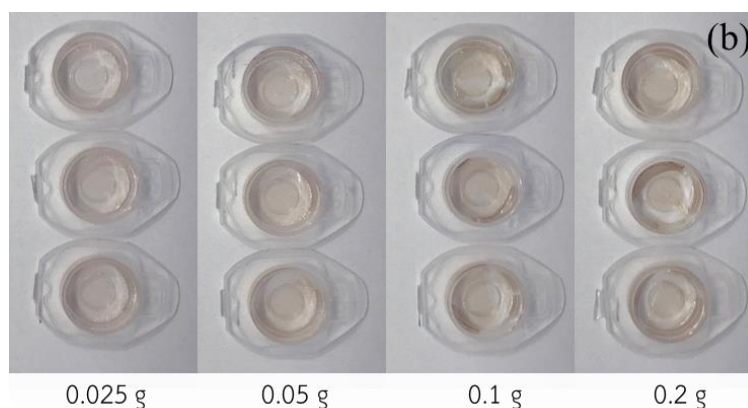
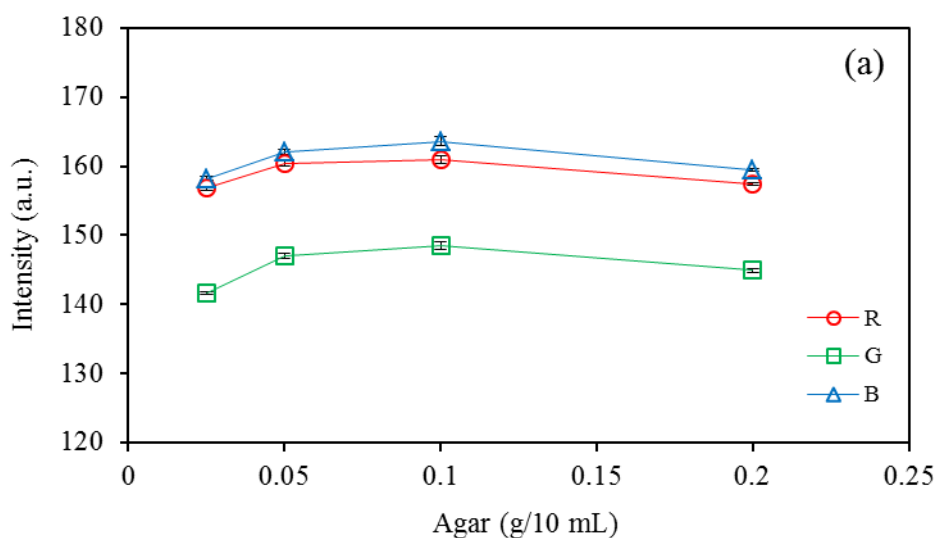


รูปที่ 4.19 ผลของอัตราส่วนปริมาตรระหว่างบัฟเฟอร์ฟอสเฟตและรีเอเจนต์ DPD ต่อค่าความเข้มของสี RGB ที่ตัวอย่าง (a) pH 6, (b) pH 7 และ (c) pH 8

4.1.4 ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและวุ้น

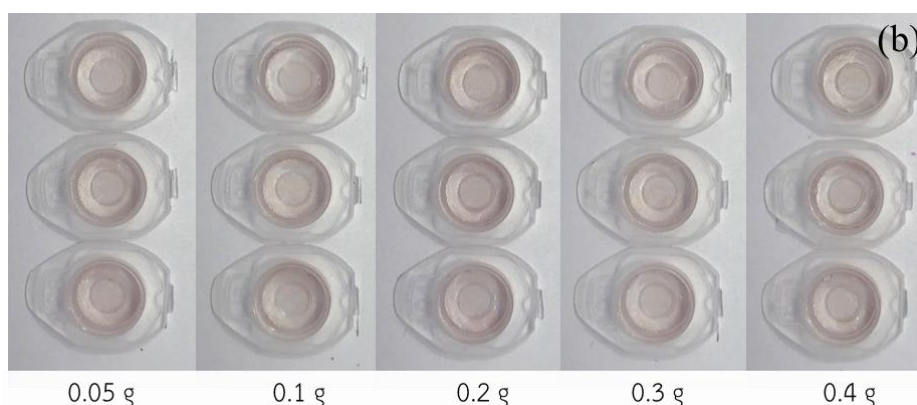
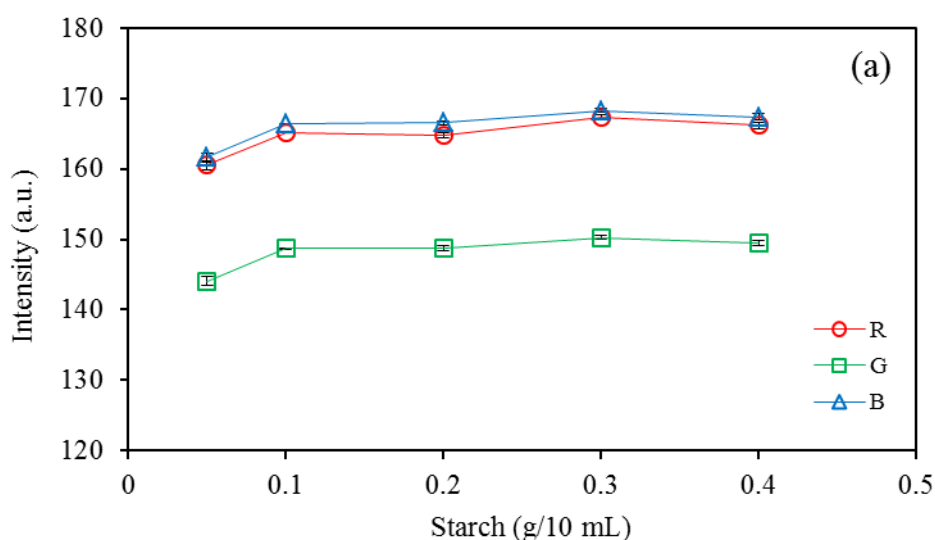
วุ้น (agar, AG) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติในการยึดติดสูง (cohesive property) ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพลีแซคคาไรด์ได้ ทั้งนี้การผสมวุ้นกับแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch, TAS) ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกน้ำของพื้นผิว (surface wettability) ได้ ทำให้ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และการยืดตัว (elongation) สูงขึ้น (Phan The, *et al.*, 2009) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้พอลิเมอร์ชีวภาพผสมจากแป้งมันสำปะหลัง

และวุ้นเป็นสารตั้งต้นเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง สำหรับกักเก็บสารทำปฏิกิริยาไว้ภายในแผ่นฟิล์ม ซึ่งการเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสองชนิด มาจากการผสมสารละลายของวุ้นและแป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 2: 1 โดยปริมาตร ก่อนนำมาผสมรวมกับสารละลายรีเอเจนต์ DPD และฟอสเฟต บัฟเฟอร์ตามอัตราส่วนข้างต้น (ตารางที่ 4.2) โดยการศึกษ ปริมาณสารละลายวุ้น (AG) ที่เหมาะสม จะศึกษาในช่วง 0.025 – 0.2 กรัม ต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร ในขณะที่สารละลายของแป้งมันสำปะหลัง (TAS) จะศึกษาในช่วง 0.05 – 0.4 กรัม ต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร ซึ่งผลจากการศึกษาแสดงดังในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 (a) ผลของปริมาณวุ้นต่อค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา และ (b) ลักษณะแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่ใช้ปริมาณวุ้นแตกต่างกัน

ผลจากการศึกษาดังรูปที่ 4.20 (a) พบว่า การเพิ่มปริมาณของวุ้น ทำให้ค่าความเข้มของสี RGB สูงหรือผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาเกิดสีน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของวุ้นให้มากขึ้น จะทำให้ค่าความเข้มสี RGB มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณของวุ้นมากขึ้น จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านการเปียกน้ำ (wettability) ของพื้นผิวพอลิเมอร์ (Phan The, *et al.*, 2009) ทำให้การละลายของสาร DPD ออกจากแผ่นฟิล์มเข้าสู่ตัวอย่างน้ำ เพื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดสีได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การมีปริมาณของวุ้นที่มากเกินไป ทำให้ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการอบมีความยืดหยุ่นลดลง สารละลายที่ใช้ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเกิดความหนืดและแข็งตัวเร็ว ทำให้ไม่สามารถกระจายตัวและเคลือบได้ทั่วทั้งภาชนะที่ใช้บรรจุ (แสดงดังรูปที่ 4.20 (b)) ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความยากในกระบวนการผลิตเซ็นเซอร์ อีกทั้งยังต้องใช้สารละลายวุ้นในปริมาณที่มากขึ้นอีกด้วย



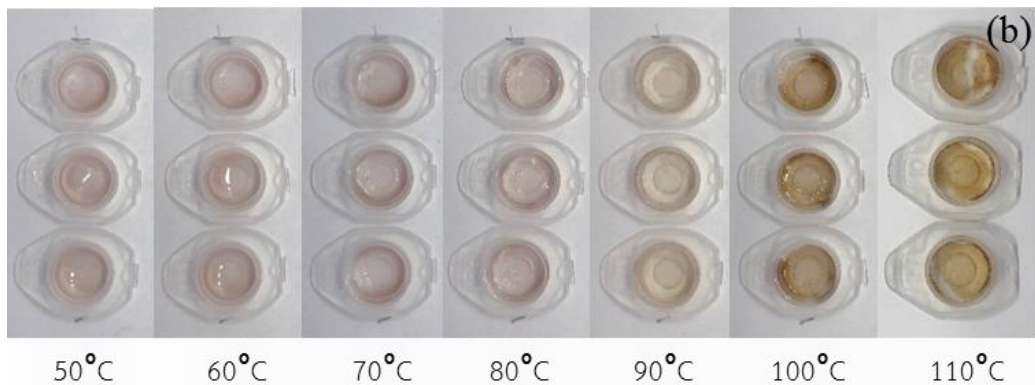
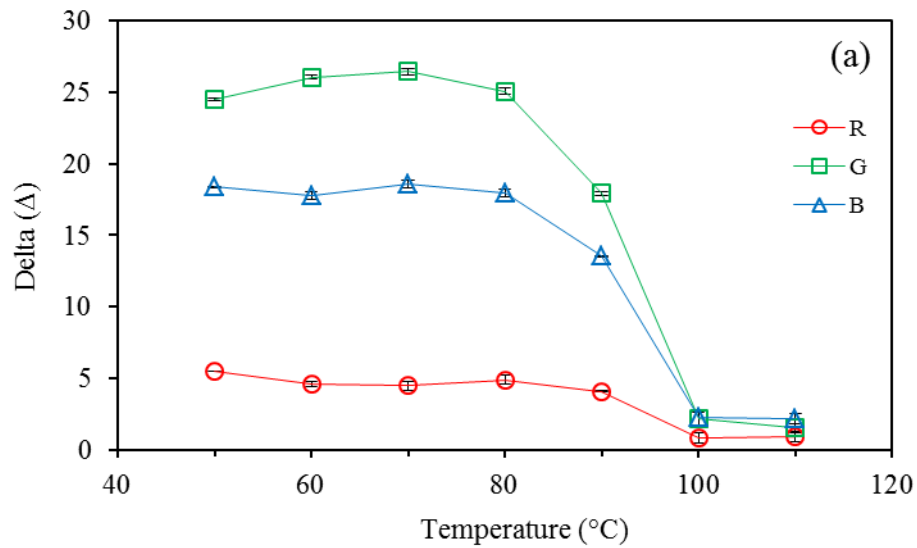
รูปที่ 4.21 (a) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา และ (b) ลักษณะแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่ใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน

ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มปริมาณของแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ไม่ได้มีผลต่อลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้หลังการอบ (รูปที่ 4.21 (b)) รวมถึงค่าความเข้มสี RGB เพิ่มขึ้น ยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยลง (รูปที่ 4.21 (a)) เนื่องจากการเพิ่มโมเลกุลของแป้ง จะทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ชีวภาพเพิ่มขึ้นและแผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนามากขึ้น ส่งผลให้สาร DPD ที่ถูกกักเก็บไว้ในแผ่นฟิล์มออกมาทำปฏิกิริยาได้น้อยลง ด้วยสาเหตุเหล่านี้จึงเลือกใช้ปริมาณของวุ้น (AG) เท่ากับ 0.025 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง (TAS) เท่ากับ 0.05 กรัม เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

4.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ

อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำออกจากแผ่นฟิล์มและลักษณะของฟิล์มที่ได้หลังจากการอบ นอกจากนี้ ยังส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์สำหรับการรักษาสภาพของแผ่นฟิล์มให้ยืดอายุการใช้งานได้นาน ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบในช่วง 50 – 110 องศาเซลเซียส และคงที่เวลาในการอบ 30 นาที นอกจากนี้ เพื่อลดผลรบกวนจากสีพื้นของน้ำตัวอย่าง ผลที่ได้จะแสดงในรูปค่าความเข้มสีที่ตรวจวัดได้จากน้ำตัวอย่างที่กลบด้วยค่าความสีที่ได้จากการตรวจวัดน้ำปราศจากคลอรีน (substracted RGB, delta (Δ)) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (a) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส มีค่าแตกต่างของความเข้มของสี RGB สูงสุด หรือมีประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ดีที่สุดในชุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแตกต่างของความเข้มสีลดลง ทั้งนี้ จากการสังเกตแผ่นฟิล์มด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่า แผ่นฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 4.22 (b)) เนื่องจากการให้ความร้อนที่สูงเกินไปสามารถทำลายลักษณะโครงสร้างของฟิล์มและทำให้แผ่นฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) ลดลง แม้ว่าอุณหภูมิสูง อาจทำให้น้ำระเหยออกจากเซ็นเซอร์ได้หมด ทั้งนี้ ความแตกต่างของความเข้มของสี RGB ที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความแตกต่างกันน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเพื่อประหยัดต้นทุนด้านพลังงานสำหรับการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ จึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบเซ็นเซอร์

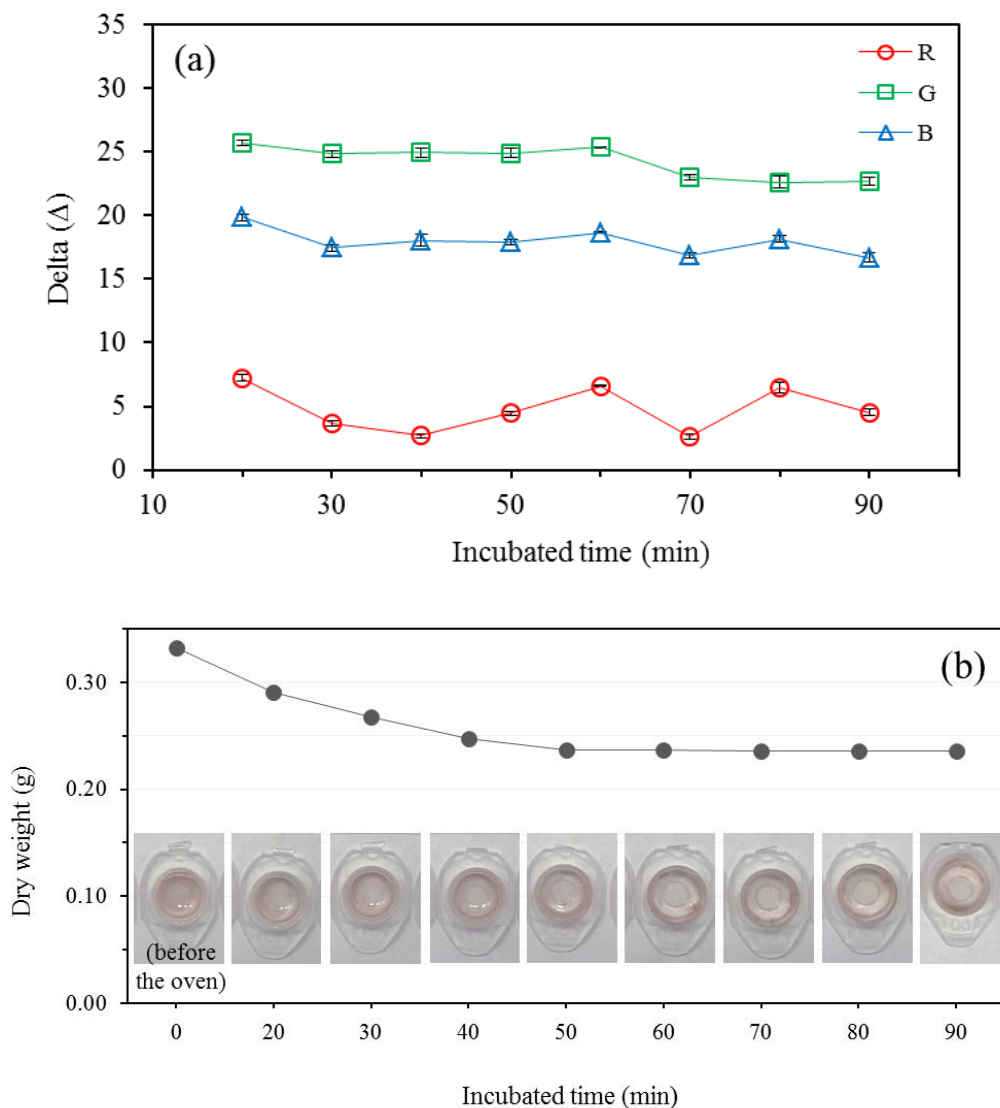


รูปที่ 4.22 (a) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มของสี RGB ที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างและน้ำปราศจากคลอรีน (blank) และ (b) ลักษณะแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์หลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการอบ

การศึกษาระยะเวลาในการอบแห้งของเซ็นเซอร์จะกระทำหลังจากทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ โดยศึกษาระยะเวลาในช่วง 20 – 90 นาที ผลของเวลาที่ใช้ในการอบแสดงดังในรูปที่ 4.23 (a) พบว่า ค่าความแตกต่างของความเข้มสี RGB ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตลอดทุกช่วงเวลาที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่า ในสภาวะที่ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ซึ่งกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ สาร DPD ยังสามารถแพร่ออกจากแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์และเข้าทำปฏิกิริยากับคลอรีนในชั้นน้ำได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราการแพร่ใกล้เคียงกับการแพร่ในรูปสารละลายของเหลว (ในสภาวะที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย สารละลายยังเป็นของเหลว

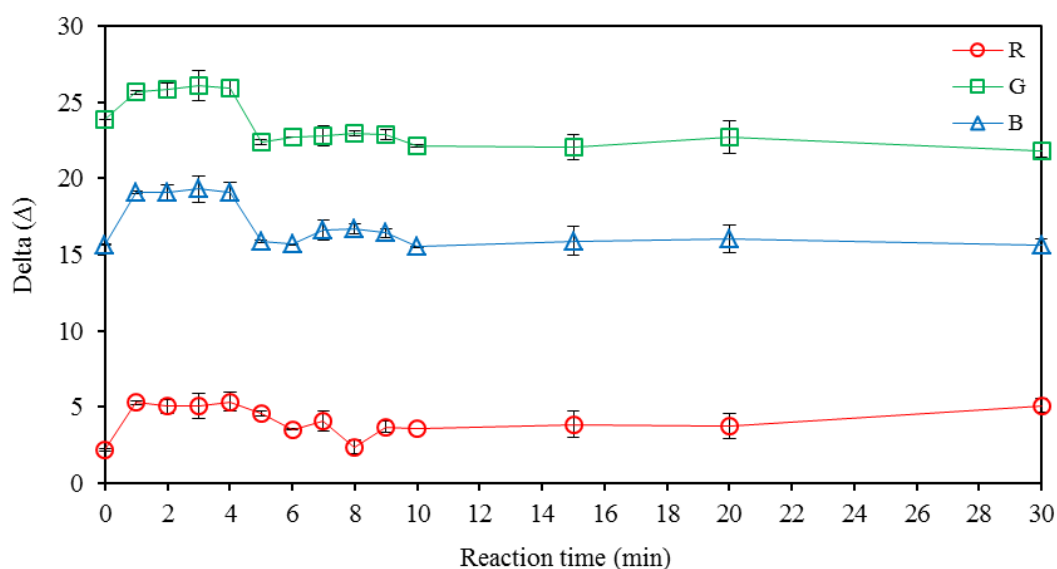
หรือไม่เกิดการพอลิเมอไรเซชันเป็นแผ่นฟิล์มทั้งหมด) ทำให้ค่าความเข้มข้นไม่แตกต่างกันทั้งการใช้เวลา มากหรือน้อยในการอบแห้ง และจากการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบของแผ่นฟิล์มที่เคลือบใน ภาชนะบรรจุ พบว่า การใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า 50 นาทีเป็นต้นไป ค่าน้ำหนักที่ได้หลังการอบ มีแนวโน้มคงที่ ซึ่งให้เห็นว่าน้ำสามารถระเหยออกจากแผ่นฟิล์มได้ทั้งหมดในช่วงเวลาดังกล่าว (รูปที่ 4.23 (b)) ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบสั้นที่สุด สำหรับสังเคราะห์เซ็นเซอร์ จึงเลือกเวลาที่ เหมาะสมในการอบแห้ง คือ 60 ± 5 นาที



รูปที่ 4.23 (a) ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มข้น RGB และ (b) ผลของน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ

4.3 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของเวลาที่ทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนอิสระและสาร DPD จากฟิล์มบาง ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ดังกล่าวข้างต้น จะทำการศึกษาในช่วง 0 – 30 นาที ผลจากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่า ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยมีค่าความแตกต่างของความเข้มของสี RGB สูงสุดภายใน 1 นาทีแรก อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าความเข้มสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของเซ็นเซอร์นานกว่า 4 นาที ทั้งนี้ อาจด้วยเหตุผลที่เป็นไปได้ 2 ประการ กล่าวคือ ประการแรก สารรีเอเจนต์ในแผ่นฟิล์มเปล่า (blank) เกิดการละลายออกจากแผ่นฟิล์มและมีการตรวจวัดความเข้มสีเพิ่มขึ้นได้ (จึงเป็นเหตุผลที่ต้องมีการนำค่าความเข้มสีจากแผ่นฟิล์มเปล่ามาหักลบจากค่าความเข้มสีของตัวอย่าง) และประการที่สอง ผลิตภัณฑ์สีที่เกิดขึ้นมีความไม่เสถียร (ผลิตภัณฑ์ของ imine compound) สามารถเกิดการเปลี่ยนรูปไปได้ และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างมีสีจางลง เมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน (Cooper, *et al.*, 1982; Harp, 2002) ดังนั้น เพื่อป้องกันการลดลงของค่าความเข้มสี RGB จึงเลือกใช้เวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาที่ 1 นาที

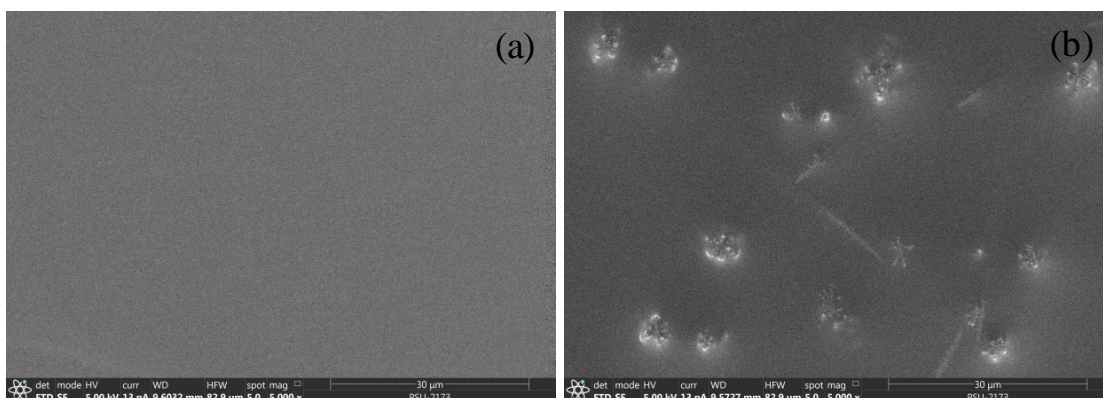


รูปที่ 4.24 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์กับคลอรีนอิสระที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4 คุณลักษณะของเซ็นเซอร์

4.4.1 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM ที่กำลังขยาย 5000X (แสดงดังรูปที่ 4.25) พบว่า ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้น (a) มีลักษณะพื้นผิวเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน บ่งบอกถึงแผ่นฟิล์มของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้างและความเข้ากันที่ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu, *et al.* (2009) และ Jumaidin, *et al.* (2016) และเมื่อเติมสารรีเอเจนต์ของ DPD ที่มีฟอสเฟตบัพเฟอร์ผสมอยู่ด้วยลงในเซ็นเซอร์ (b) พบว่า แผ่นฟิล์มมีลักษณะขรุขระและมีโครงสร้างที่เป็นผลึก ซึ่งแสดงถึงอนุภาคของสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยสารรีเอเจนต์ DPD กับฟอสเฟตบัพเฟอร์ ที่มีการกระจายทั่วแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ



รูปที่ 4.25 ลักษณะพื้นผิวของ (a) แผ่นฟิล์มผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น และ (b) แผ่นฟิล์มที่มีส่วนผสมของสารรีเอเจนต์ (เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น)

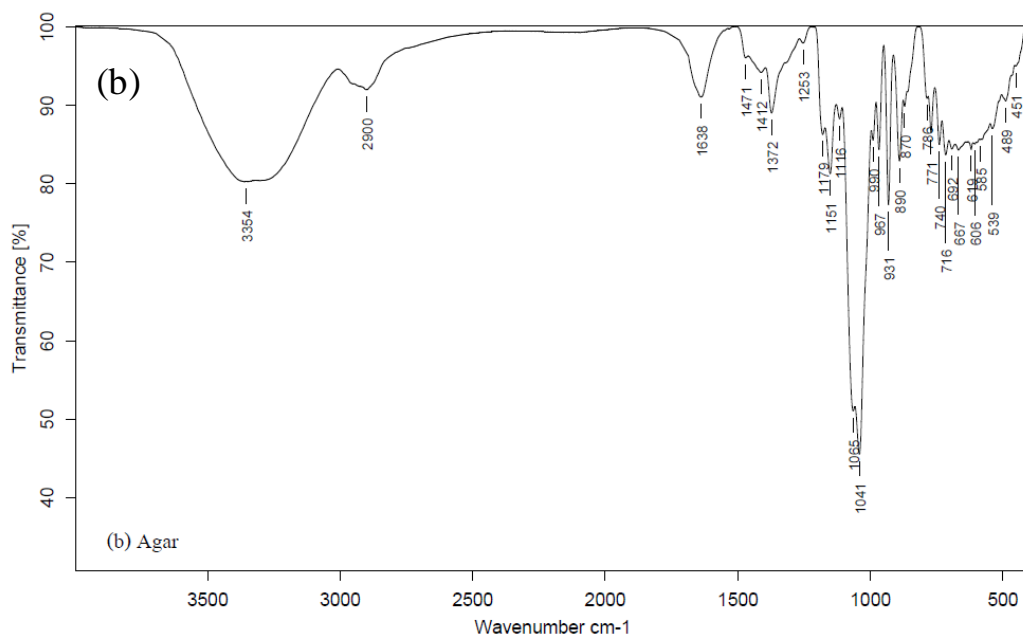
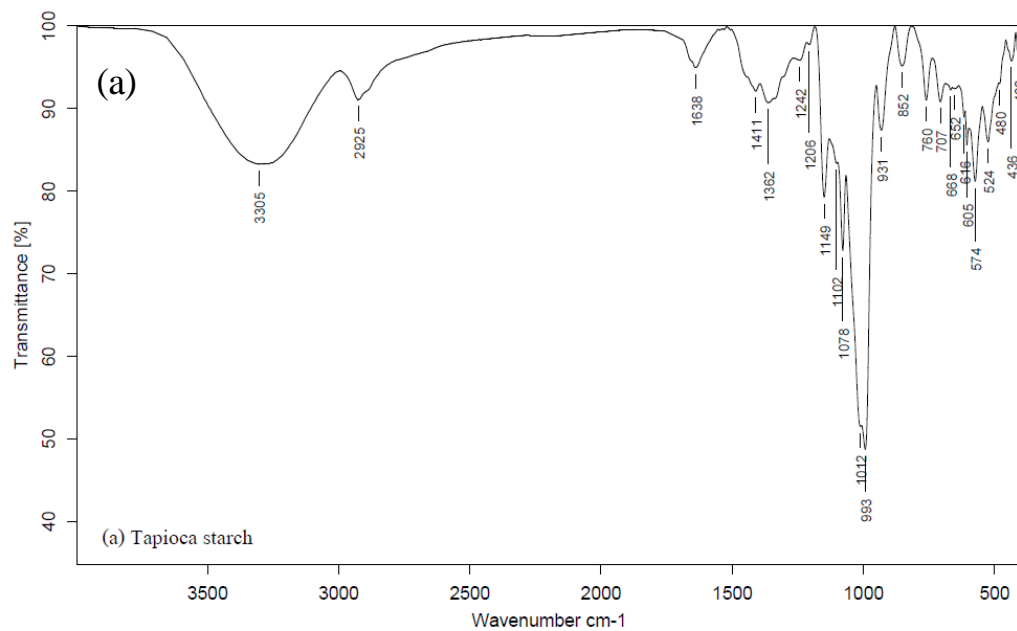
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซ็นเซอร์ด้วย FTIR

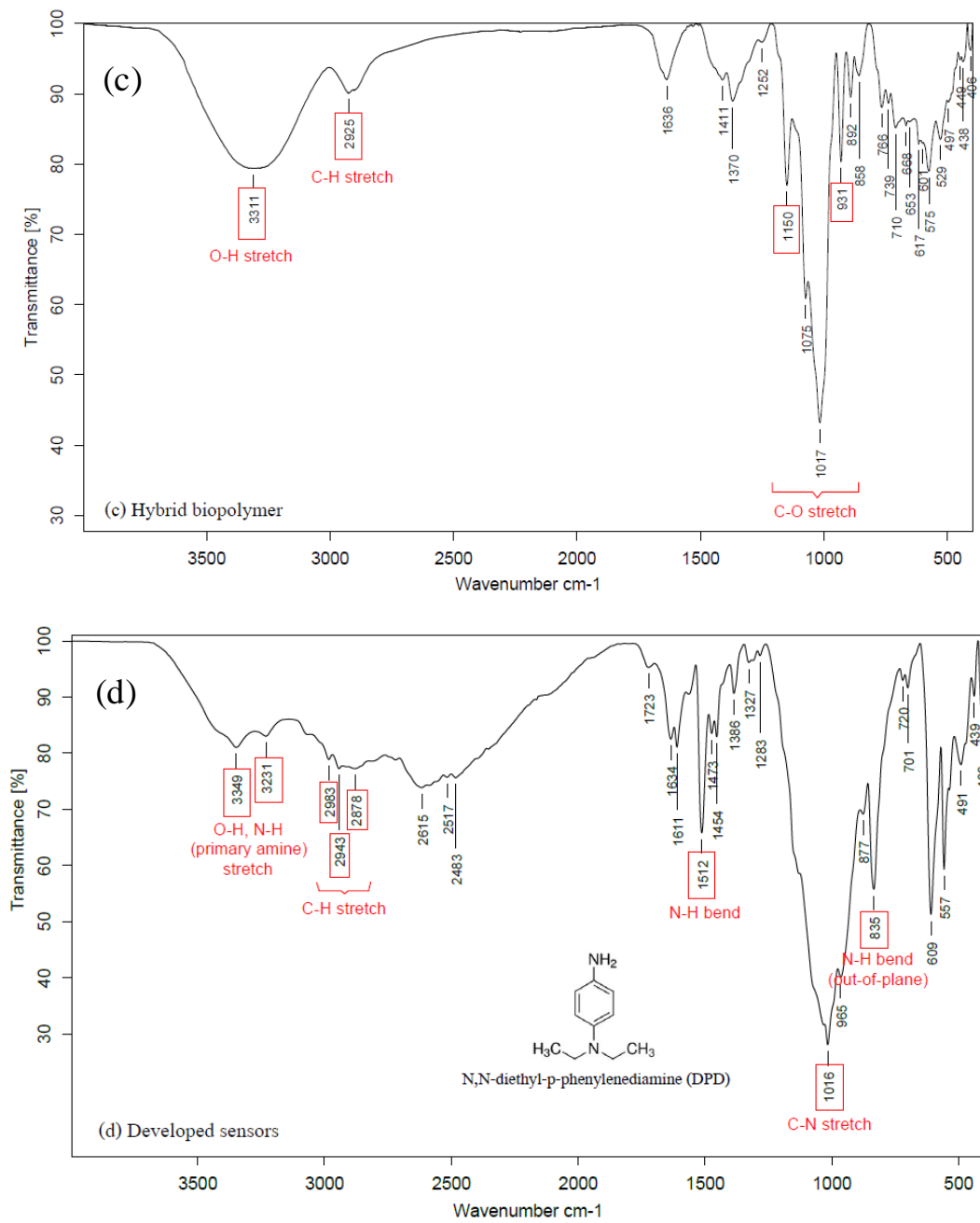
การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเซ็นเซอร์ ด้วยเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 4000 – 400 cm^{-1} โดยทำการศึกษาจากแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง แผ่นฟิล์มวุ้น แผ่นฟิล์มผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาแสดงเป็นสเปกตรัมดังรูปที่ 4.26 พบว่า สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (a) มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของวุ้น (b) ในช่วง 4000 – 2000 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าสัญญาณพีคที่เหมือนกันในช่วงประมาณ 3100 – 3700 cm^{-1}

เป็นช่วงที่มีพีคกว้างมากที่สุด ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระ (O-H stretch) ที่อยู่ระหว่างและภายในของโมเลกุล (Wu, *et al.*, 2009) การปรากฏพีคตำแหน่ง 2925 cm^{-1} (a) และ 2900 cm^{-1} (b) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C-H stretch โดยในแง่มาจากโครงสร้างทั่วไปของกลูโคส แต่ของวุ้นเกิดจากกลุ่มเมทอกซิล (methoxy) (El-Hefian, *et al.*, 2012; Woraphatphadung, *et al.*, 2012) และการปรากฏพีคของทั้งสองในตำแหน่งเดียวกันที่ 1638 cm^{-1} โดยในแง่มันสำปะหลัง (a) บ่งบอกถึงโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้ (Prachayawarakorn, *et al.*, 2012) ขณะที่วุ้น (b) แสดงถึงการยืดของพันธะเพปไทด์ ที่เกิดการคอนจูเกตด้วยกลุ่มของเอมีน (NH) และอะซิโตน (CO) (Wu, *et al.*, 2009; El-Hefian, *et al.*, 2012) นอกจากนี้ลักษณะที่แตกต่างกันของทั้งสองสเปกตรัม ยังพบว่า พีคของแป้งมันสำปะหลัง (a) ในช่วง $931 - 1149\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของพันธะ C-O stretch โดยตำแหน่งที่ 1078 และ 1149 cm^{-1} ได้แสดงถึงการเชื่อมต่อของ C-O, C-C และ O-H stretch รวมถึงการโค้งงอและการยืดแบบไม่สมมาตรของ C-O-C ด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Capron, *et al.*, 2007; Hong, *et al.*, 2016) สำหรับการปรากฏพีคของวุ้น (b) พบว่า ตำแหน่งที่ 1372 cm^{-1} แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเอสเทอร์ซัลเฟต (ester sulfate) พีคที่ 1065 , 1041 และ 931 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C-O ของ 3,6-anhydro-galactose และสัญญาณพีคในตำแหน่งที่ 890 cm^{-1} บ่งบอกถึงพันธะ C-H ที่เหลือตกค้างจาก β -galactose (Freile-Pelegrin, *et al.*, 2007)

จากการศึกษา FTIR ของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นที่เป็นสารตั้งต้น (c) พบว่า การปรากฏของสเปกตรัมสามารถเห็นได้ชัดของหมู่ O-H stretch ที่ 3311 cm^{-1} พีคของ C-H stretch ที่ 2925 cm^{-1} และพีคของ C-O stretch ในช่วง $931 - 1150\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งผลที่ได้ไม่แตกต่างกับสเปกตรัมของ (a) และ (b) แต่เมื่อได้เพิ่มสารรีเอนเจนต์ลงในเซ็นเซอร์ (d) พบว่า มีพีคกว้างที่ตำแหน่ง 3349 และ 3231 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ O-H stretch และ N-H stretch (เอมีนปฐมภูมิ หรือ primary amine) (Coates, 2006) พีคมีความถี่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 2983 , 2943 และ 2878 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลคิลของ C-H stretch ซึ่งความกว้างของพีคในช่วง $3600 - 2800\text{ cm}^{-1}$ ได้แสดงให้เห็นว่าพันธะของไฮโดรเจนมีปริมาณมากขึ้น สัญญาณพีคที่ตำแหน่ง 1723 cm^{-1} บ่งบอกว่ามีกลุ่มคาร์บอนิล และการปรากฏของกลุ่มเอไมด์ปฐมภูมิ (amide I) และเอไมด์ทุติยภูมิ (amide II) ที่ตำแหน่ง 1611 cm^{-1} (C=O stretch) และ 1512 cm^{-1} (N-H bend) ตามลำดับ อีกทั้งการระบุของสองตำแหน่งดังกล่าว ยังสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดจากวงแหวนอะโรมาติก (C-N stretch) ที่ตำแหน่ง 1016 cm^{-1} และการสั่นออกนอกระนาบของ N-H (out-of-plane bend) ที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} (Lopez, *et al.*, 2014; Silva-Pereira, *et al.*, 2015) แสดงให้เห็นว่ามีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันของกลุ่มเอมีน

ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างเคมีของสารทำปฏิกิริยา DPD (*N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine) (Harp, 2002) นอกจากนี้ยังพบสัญญาณของพีคที่ 1454 และ 1386 cm^{-1} (CH_2 และ CH_3 bend) และตำแหน่งที่ 609 และ 557 cm^{-1} (ring stretch) (Jackson, *et al.*, 2017) ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ของแป้งมันสำปะหลัง วุ้น และสารรีเอเจนต์ สามารถเชื่อมโยงเข้ากันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์กับสารรีเอเจนต์ มีความแข็งแรงกว่าพันธะที่อยู่ระหว่างและภายในโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและวุ้น แสดงให้เห็นว่าสารรีเอเจนต์มีปฏิสัมพันธ์กับพอลิเมอร์ชีวภาพที่ดี ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้



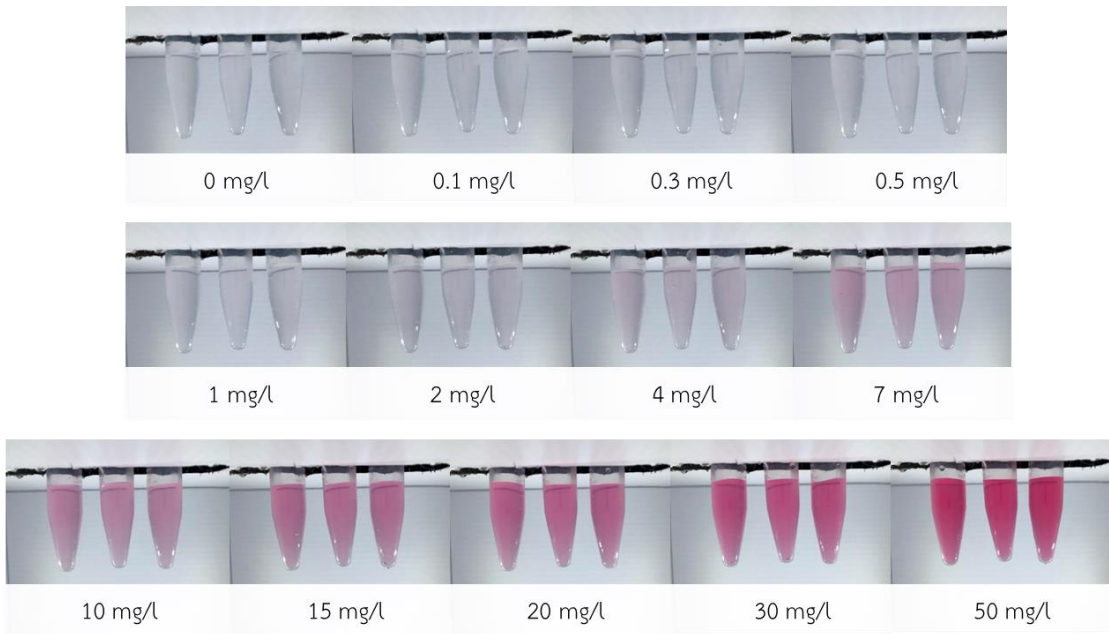


รูปที่ 4.26 สเปกตรัม FTIR ของ (a) แผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (b) แผ่นฟิล์มวุ้น (c) แผ่นฟิล์มผสมของแป้งมันสำปะหลังและวุ้นสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น และ (d) แผ่นฟิล์มที่ผสมกับของสารรีเอเจนต์ (เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น)

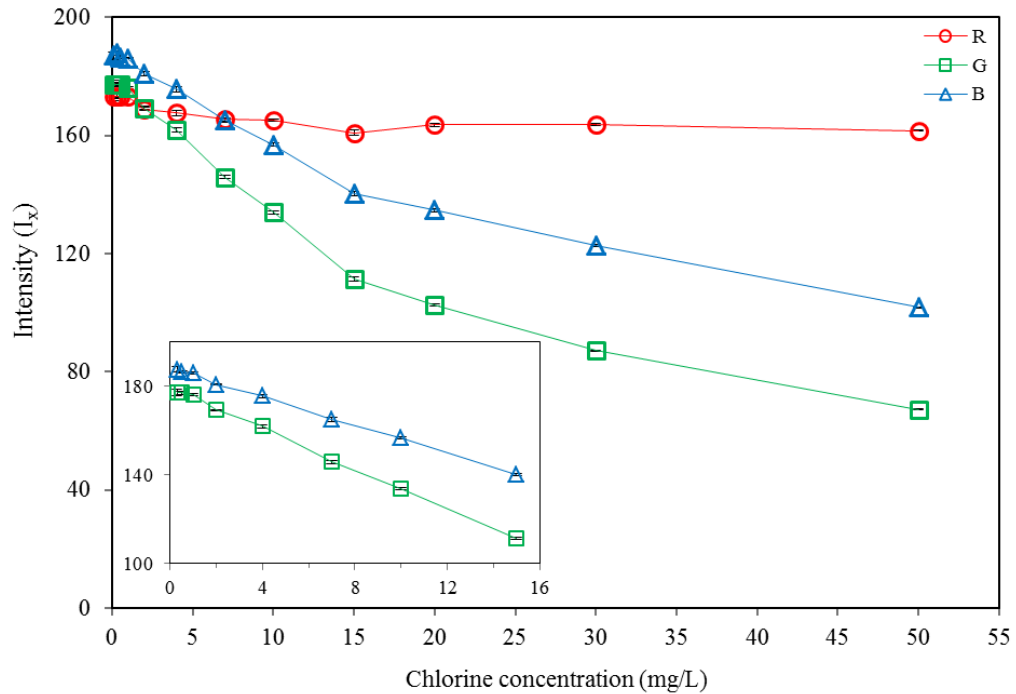
4.5 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยระบบภาพดิจิทัล (Quantitative image analysis)

การวิเคราะห์หาปริมาณของคลอรีนอิสระด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น และสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มสี RGB กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (หรือสร้างกราฟมาตรฐาน) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณต่อไป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความเข้มสี RGB (I_R , I_G และ I_B) กับความเข้มข้นของคลอรีนในช่วง 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสารละลายสีชมพู และมีความเข้มของสีชมพูเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคลอรีน (ดังรูปที่ 4.27) สอดคล้องกับผลที่ได้ในรูปที่ 4.28 ซึ่งค่าความเข้มสีแดงจะสูงกว่าความเข้มสีน้ำเงินและเขียว ตามลำดับ รวมถึงมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยามีสีชมพู จึงสะท้อนแสงสีแดงได้มาก ค่าความเข้มสีแดงจึงมีค่าสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนสูงขึ้น ค่าความเข้มสีเขียวและน้ำเงินมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามีสีชมพูเข้มขึ้น ปริมาณโพตอนแสงที่สะท้อนจากผลิตภัณฑ์เข้าสู่กล้องดิจิทัลจึงลดลง ทำให้ค่าความเข้มสีที่ตรวจวัดได้ลดลงตามไปด้วย และเมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.28 มากำหนดช่วงความเป็นเส้นตรง โดยพิจารณาจากช่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.99 เพื่อสร้างสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีกับความเข้มข้นของคลอรีนสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ดังภาพเล็กในรูปที่ 4.28 พบว่า ความสัมพันธ์ทั้งสองของค่าความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงิน มีช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นของคลอรีนตั้งแต่ 0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

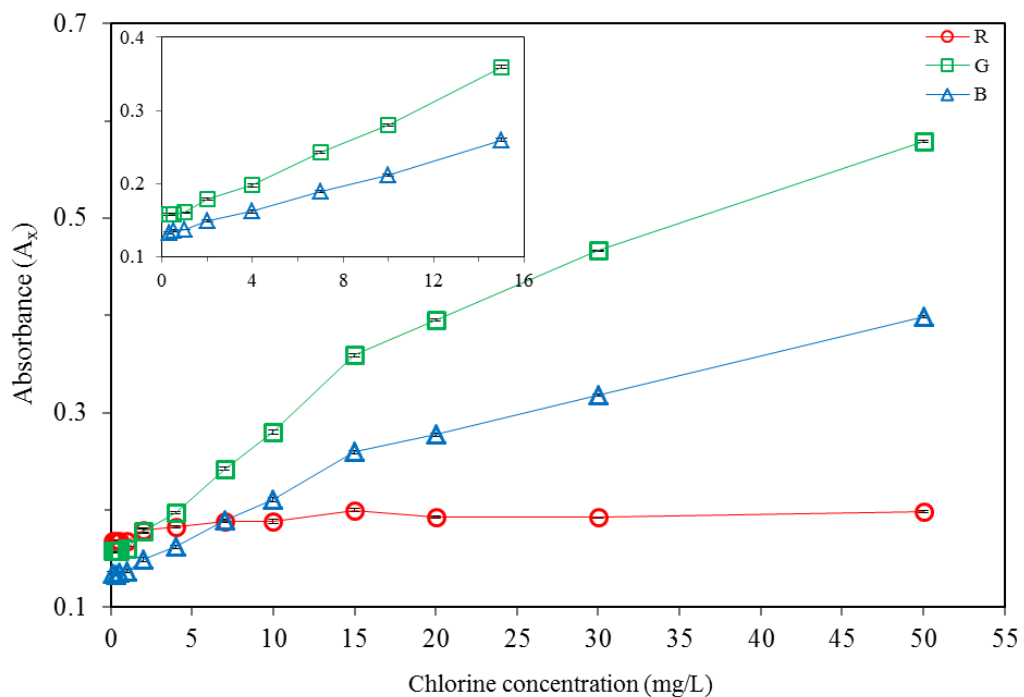


รูปที่ 4.27 สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับสารละลายมาตรฐานคลอรีนที่ความเข้มข้น 0 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



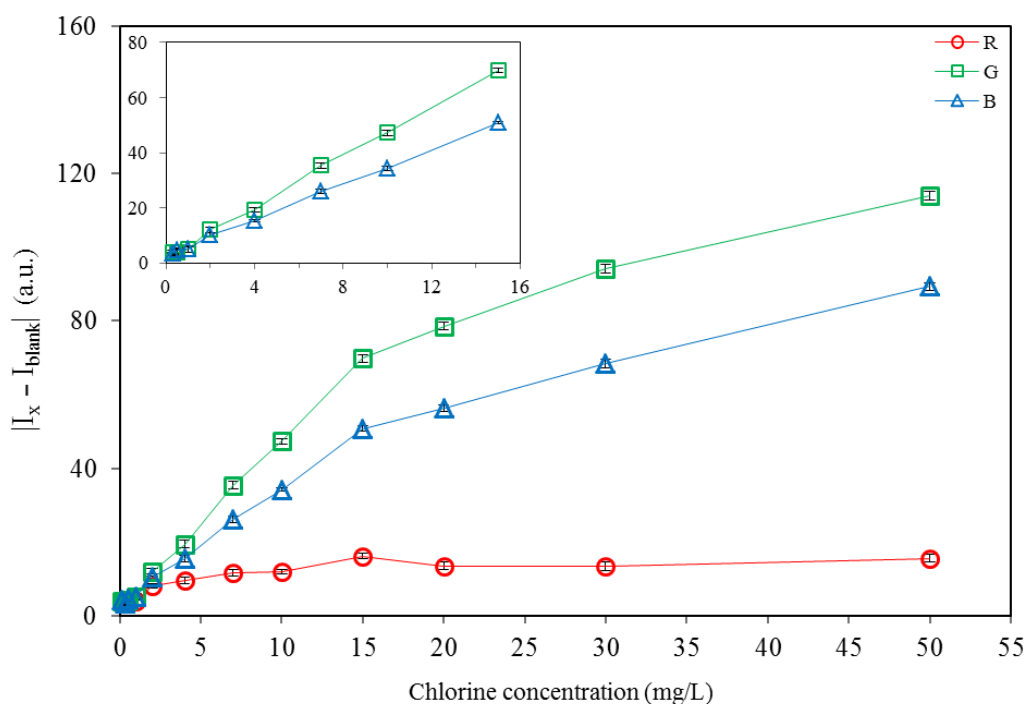
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสี RGB (I_x) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าความเข้มสีเขียวและสีน้ำเงิน (ภาพเล็ก)

แม้ว่าการตรวจวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายจะแสดงผลในรูปความเข้มสี แต่ข้อมูลผลการตรวจวัดดังกล่าวนี้ สามารถถูกแปลงให้อยู่ในรูปของค่าการดูดแสงเช่นเดียวกับเทคนิคมาตรฐานที่ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจวัดได้ โดยการคำนวณตามสมการที่ (3.2) (Kompany-Zareh, *et al.*, 2002; Choodum and Daed, 2011) และผลการคำนวณค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จะถูกนำมาใช้การสร้างกราฟมาตรฐานเช่นเดียวกับค่าความเข้มสี ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวมีค่าสูงกว่าสีน้ำเงินและสีแดง ตามลำดับ เนื่องจากสีเขียวเป็นคู่สีตรงข้าม (complimentary color) ของผลิตภัณฑ์ที่สีชมพู (Westland, *et al.*, 2007) ทำให้ผลิตภัณฑ์สะท้อนแสงสีชมพูและดูดกลืนแสงสีเขียวได้ดี นอกจากนี้ ค่าการดูดกลืนแสงของสีเขียวและสีน้ำเงินจะเพิ่มขึ้น และแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนในช่วง 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดงมีแนวโน้มคงที่ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาค่าดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้จาก spectrophotometer (รูปที่ 4.34) ที่มีความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (maximum wavelength, λ_{max}) เท่ากับ 515 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว (500 – 580 นาโนเมตร) โดยมีช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสงสีเขียวและสีน้ำเงินตั้งแต่ 0.3 ถึง 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพเล็กรูปที่ 4.29

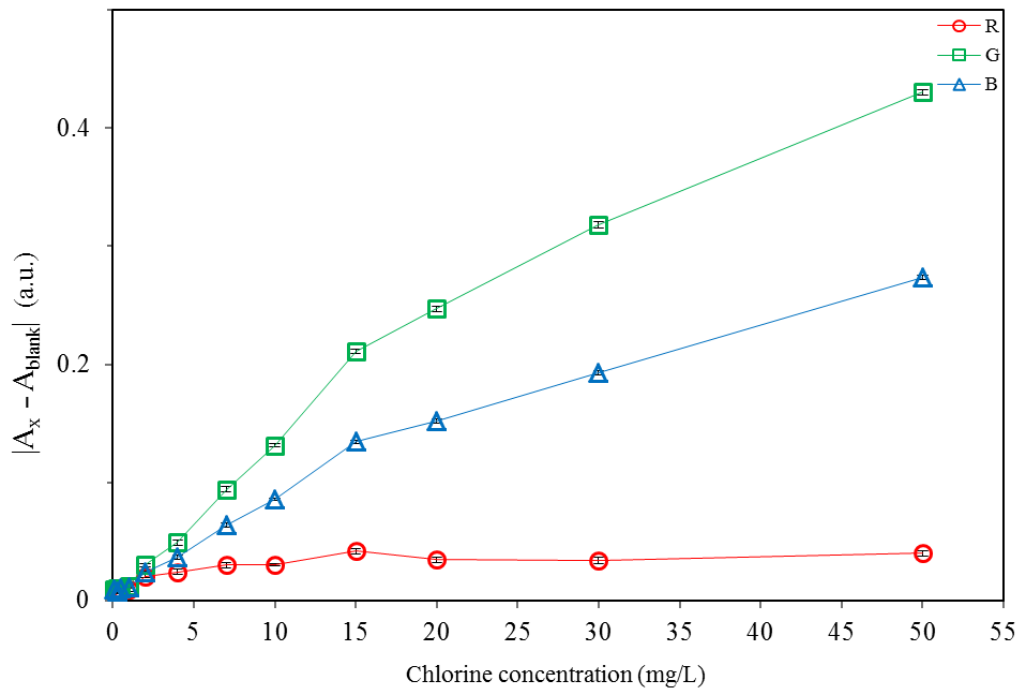


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง RGB (A_{λ}) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสงของสีเขียวและสีน้ำเงิน (ภาพเล็ก)

เนื่องจากสีของแผ่นฟิล์มเปล่าและน้ำตัวอย่างอาจส่งผลต่อค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่ตรวจวัดได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีการนำค่าความเข้มสี RGB ของพื้นผิวเซ็นเซอร์หรือ แบลงค์ (I_{blank}) พิจารณา โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีนแทนสารละลายมาตรฐานคลอรีน และ นำผลการตรวจวัดที่ได้มาหักลบกับค่าความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ (I_x) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.30 โดยพบว่า ค่าผลต่างของความเข้มของสี RGB ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างและแบลงค์ ($|I_x - I_{\text{blank}}|$) แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน ซึ่งสอดคล้องกับผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง RGB ของตัวอย่างเทียบกับแบลงค์ ($|A_x - A_{\text{blank}}|$) ดังรูปที่ 4.31 โดยมีช่วงความเป็นเส้นตรง เท่ากันทั้งในส่วน of ค่าความเข้มสีและค่าการดูดกลืนแสง กล่าวคือ 0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพเล็กรูปที่ 4.30 และ 4.31

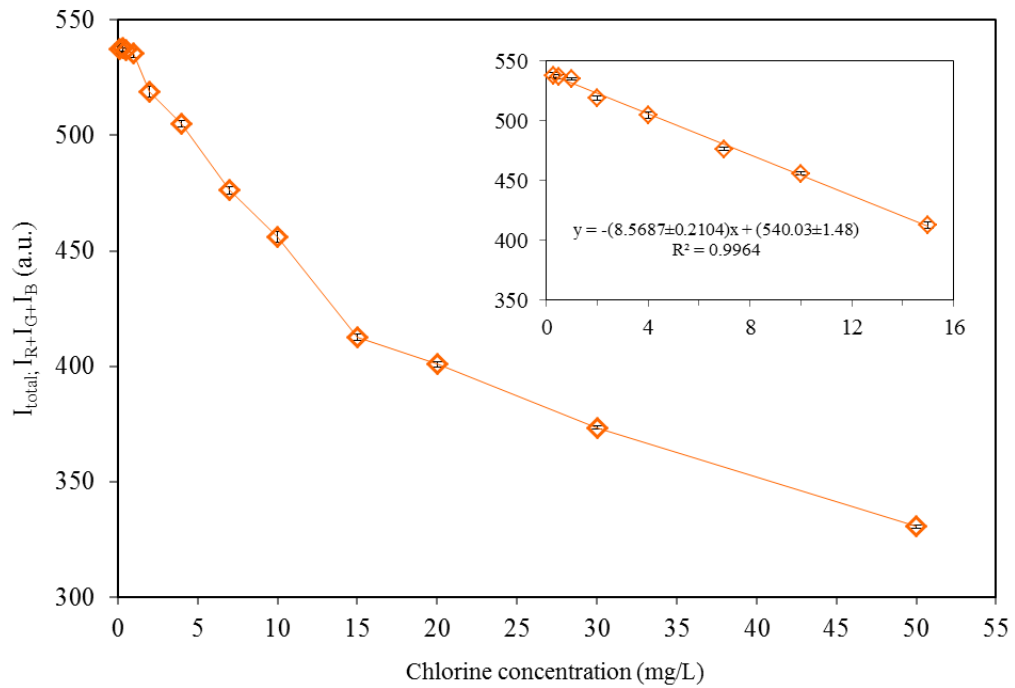


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับค่าผลต่างของความเข้มสี RGB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างกับแบลงค์ ($|I_x - I_{\text{blank}}|$) และช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ดังกล่าว (ภาพเล็ก)

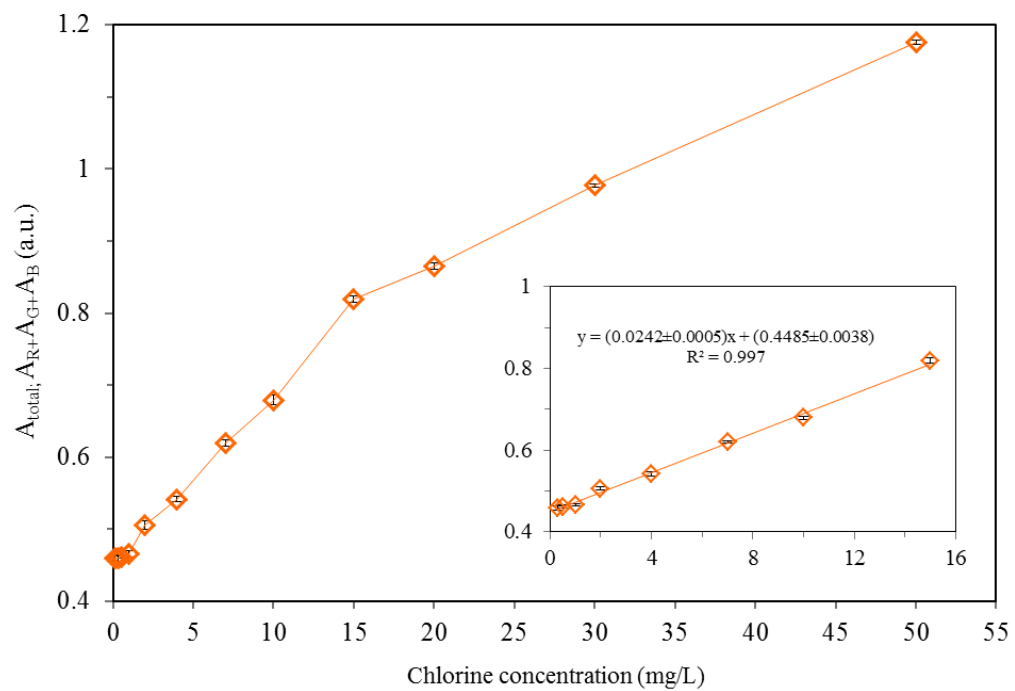


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนกับผลต่างของค่าดูดกลืนแสง RGB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างกับแบล็ก ($|A_x - A_{\text{blank}}|$) และช่วงความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ดังกล่าว (ภาพเล็ก)

เนื่องจากภาพสีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเกิดจากการผสมของข้อมูลสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ดังนั้นในงานวิจัย จึงเลือกที่จะแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีในรูปของค่าความเข้มสีรวม ($I_{\text{total}} = I_R + I_G + I_B$) และการดูดกลืนแสงรวม ($A_{\text{total}} = A_R + A_G + A_B$) และสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีนในช่วงความเข้มข้น 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 โดยพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าว มีช่วงความเป็นเส้นตรงเท่ากัน คือ 0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความไวในการวิเคราะห์ของค่าผลรวมจะมีค่าสูงกว่าค่าของแต่ละสี แสดงในตารางที่ 4.3

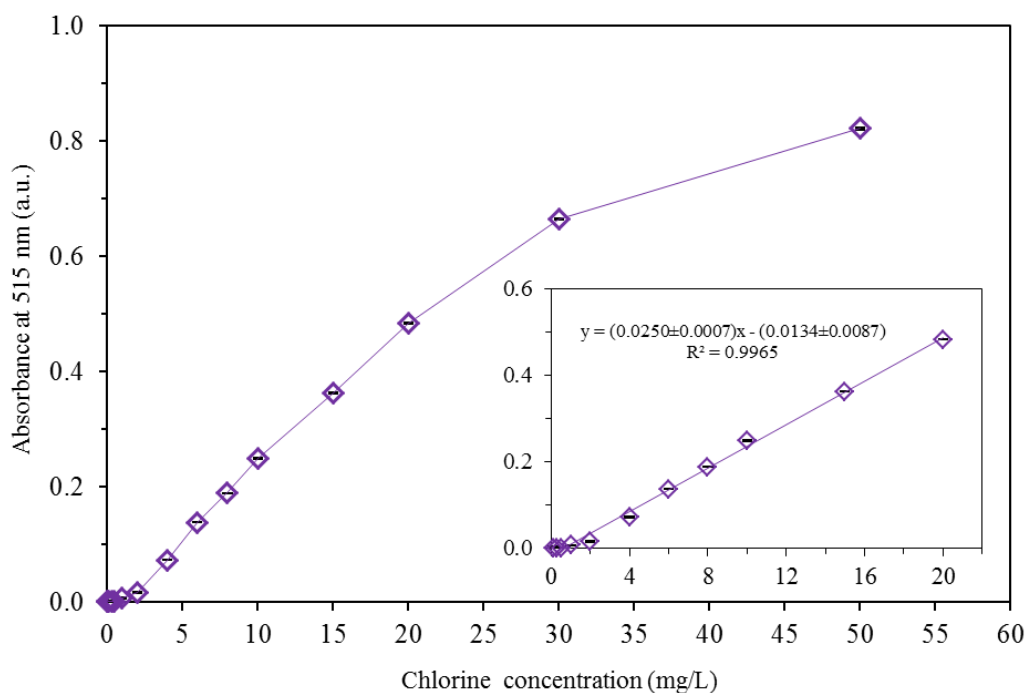


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีรวม RGB (I_{total}) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าความเข้มสีรวม RGB (ภาพเล็ก)



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงรวม RGB (A_{total}) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสงรวม RGB (ภาพเล็ก)

ในการแสดงประสิทธิภาพของการตรวจวัดด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดของคลอรีนอิสระด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันว่า ให้ผลการตรวจวัดใกล้เคียงกันหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้วิธีมาตรฐาน DPD colorimetric ซึ่งใช้เครื่อง spectrophotometer ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายรีเอเจนต์ DPD กับสารละลายมาตรฐานคลอรีนเข้มข้น 0.01 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 515 นาโนเมตร และนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคลอรีน แสดงดังรูปที่ 4.34 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตามความเข้มข้นของคลอรีน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นคลอรีน จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ที่ได้ มีช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่าง 0.1 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งกว้างกว่าเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรีน และช่วงความเป็นเส้นตรงของค่าดูดกลืนแสง (ภาพเล็ก) โดยใช้เครื่อง spectrophotometer ในการตรวจวัด

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอรีนอิสระและค่าความเข้มสีหรือค่าการดูดกลืนแสง RGB ในรูปที่ 4.28 – 4.34 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

พารามิเตอร์	สมการเส้นตรง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R ²)
I _G	$y = -(4.54 \pm 0.08)x + (179.2 \pm 0.5)$	0.9984
I _B	$y = -(3.21 \pm 0.06)x + (188.3 \pm 0.4)$	0.9982
I _G -I _{blank}	$y = (4.54 \pm 0.08)x + (2.0 \pm 0.5)$	0.9984
I _B -I _{blank}	$y = (3.21 \pm 0.06)x + (2.8 \pm 0.4)$	0.9982
I _{TOTAL}	$y = -(8.6 \pm 0.2)x + (540 \pm 1)$	0.9964
A _G	$y = (0.0136 \pm 0.0004)x + (0.149 \pm 0.003)$	0.9960
A _B	$y = (0.0085 \pm 0.0002)x + (0.130 \pm 0.001)$	0.9975
A _G -A _{blank}	$y = (0.0136 \pm 0.0004)x + (0.001 \pm 0.003)$	0.9960
A _B -A _{blank}	$y = (0.0085 \pm 0.0002)x + (0.005 \pm 0.001)$	0.9975
A _{TOTAL}	$y = (0.0242 \pm 0.0005)x + (0.449 \pm 0.004)$	0.9970
Spectrophotometer	$y = (0.0250 \pm 0.0007)x - (0.013 \pm 0.009)$	0.9965

4.6 สมรรถนะของระบบการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์

สมรรถนะของระบบการตรวจวัดจะพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ความเที่ยง (Precision) ช่วงความเป็นเส้นตรง (LDR) ขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) และความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity) โดยผลจากการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

4.6.1 ความแม่นยำ (Accuracy)

เป็นการศึกษาเพื่อแสดงถึงความใกล้เคียงกันของความเข้มข้นของสารที่วัดได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นจริงที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยความแม่นยำของระบบจะแสดงในรูปความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%Relative Error) ในงานวิจัยนี้จะเลือกทำการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่

ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%Relative error) ของค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.31 – 10.10 เปอร์เซ็นต์ และค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 2.31 – 4.96 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 ความแม่นยำของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นจริง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์ (%Relative Error)
I_G	3.00	3.01	+0.31
I_B	3.00	3.05	+1.83
$ I_G - I_{blank} $	3.00	3.01	+0.34
$ I_B - I_{blank} $	3.00	3.06	+1.85
I_{TOTAL}	3.00	3.30	+10.10
A_G	3.00	2.85	-4.96
A_B	3.00	2.93	-2.31
$ A_G - A_{blank} $	3.00	2.85	-4.95
$ A_B - A_{blank} $	3.00	2.92	-2.52
A_{TOTAL}	3.00	3.14	+4.79
Spectrophotometer	3.00	3.04	+1.47

4.6.2 ความเที่ยง (Precision)

ความเที่ยงแสดงถึงความใกล้เคียงของผลที่ได้จากการวัดตัวอย่างเดียวกันหลายครั้ง โดยการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบภายในวันเดียวกัน (Intraday precision) และรูปแบบระหว่างวัน (Interday precision) ซึ่งได้ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเที่ยงของวิธีที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	Intraday precision				Interday precision			
	1 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	%RSD	1 วัน	3 วัน	5 วัน	%RSD
I_G	152.41	150.26	151.94	0.83	148.26	147.67	148.48	1.48
I_B	169.98	166.31	167.39	1.10	164.62	164.58	165.01	1.37
$ I_G - I_{\text{blank}} $	21.13	19.66	20.24	2.98	20.43	21.02	20.85	1.21
$ I_B - I_{\text{blank}} $	14.45	14.01	15.34	3.98	15.16	13.75	14.90	4.21
I_{TOTAL}	488.61	477.21	482.34	1.16	472.95	472.74	473.88	1.44
A_G	0.17	0.18	0.17	2.60	0.18	0.18	0.18	3.17
A_B	0.14	0.15	0.14	3.13	0.15	0.16	0.15	3.71
$ A_G - A_{\text{blank}} $	0.06	0.05	0.05	2.29	0.06	0.06	0.06	1.88
$ A_B - A_{\text{blank}} $	0.04	0.04	0.04	4.04	0.04	0.03	0.04	4.30
A_{TOTAL}	0.49	0.52	0.50	2.87	0.53	0.52	0.52	3.26

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ระบบการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์มีความเที่ยงสูง (ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) น้อยกว่าร้อยละ 5 ในทุกรูปแบบของค่าการตรวจวัด) โดยรูปแบบการตรวจวัดภายในวันเดียวกัน (Intraday precision) มีค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าความเข้มสี RGB อยู่ในช่วง 0.83 – 3.98 เปอร์เซ็นต์ และค่าดูดกลืนแสง RGB อยู่ในช่วง 2.29 – 4.04 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รูปแบบการตรวจวัดระหว่างวัน (Interday precision) มีค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าความเข้มสี RGB อยู่ในช่วง 1.21 – 4.21 เปอร์เซ็นต์ และค่าดูดกลืนแสง RGB อยู่ในช่วง 1.88 – 4.30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มสี RGB จะมีความเที่ยงสูงกว่าค่าดูดกลืนแสง RGB

4.6.3 ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Dynamic Range, LDR)

การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลอรินกับค่าความเข้มสี RGB หรือค่าการดูดกลืนแสง RGB และกำหนดช่วงความเป็นเส้นตรงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of determination, R^2) ที่มากกว่า 0.99 ผลการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 4.6 พบว่า เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น ให้ช่วงความเป็นเส้นตรง

เท่ากันในทุกค่าความเข้มข้นและค่าดูดกลืนแสง (0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยค่าความเข้มข้นสีเขียวจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด คือ 0.9984 ทั้งในรูปแบบค่าความเข้มข้นสีเขียวของตัวอย่างและรูปแบบผลต่างของค่าความเข้มข้นสีเขียวเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างตัวอย่างกับแบลนด์ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน DPD colorimetric ซึ่งมีช่วงความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.1 – 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9965 จะเห็นได้ว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้มีช่วงสั้นกว่า เนื่องจากวิธีที่พัฒนาขึ้นเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ช่วงคลื่นแสงที่กว้างในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นช่วงของแสงสีแดง (660 – 760 นาโนเมตร) สีเขียว (500 – 580 นาโนเมตร) หรือสีน้ำเงิน (430 – 470 นาโนเมตร) มิได้จำเพาะที่ความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่งที่เหมาะสมกับตัวอย่าง ทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดในรูปของช่วงความเป็นเส้นตรงด้อยกว่าวิธีที่ใช้ spectrophotometry ซึ่งทำการตรวจวัดที่ความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงกับสารนั้นๆ (515 นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.6 ช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

พารามิเตอร์	R ²	ช่วงความเป็นเส้นตรง		พารามิเตอร์	R ²	ช่วงความเป็นเส้นตรง	
		(มิลลิกรัมต่อลิตร)				(มิลลิกรัมต่อลิตร)	
I _G	0.9984	0.3 – 15		A _G	0.9960	0.3 – 15	
I _B	0.9982	0.3 – 15		A _B	0.9975	0.3 – 15	
I _G -I _{blank}	0.9984	0.3 – 15		A _G -A _{blank}	0.9960	0.3 – 15	
I _B -I _{blank}	0.9982	0.3 – 15		A _B -A _{blank}	0.9975	0.3 – 15	
I _{TOTAL}	0.9964	0.3 – 15		A _{TOTAL}	0.9970	0.3 – 15	
Spectrophotometer	0.9965	0.1 – 20					

4.6.4 ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD)

ระบบการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพควรมีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำหรือสามารถตรวจวิเคราะห์สารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้ ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดสามารถคำนวณได้โดยนำข้อมูลของกราฟมาตรฐานมาคำนวณตามวิธีของ International Council for Harmonization (1996) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ขีดจำกัดการตรวจวัดที่คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเข้มข้นในทุกรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง ผลต่างของค่าความเข้มข้น

ของตัวอย่างเทียบกับแปลงค์หรือค่าความเข้มสีรวม โดยค่าการดูดกลืนแสงของสีเขียวต่ำที่สุด (A_G) จะให้ขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำที่สุด กล่าวคือ 0.26 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (spectrophotometer) พบว่า ขีดจำกัดในการตรวจวัดของวิธีมาตรฐาน (0.05 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะต่ำกว่าเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น ยังคงอยู่ในช่วง $0.2 - 5.0$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามเกณฑ์มาตรฐานของ WHO ที่กำหนดให้มีปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำประปาได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการตรวจวัดตัวอย่างน้ำประปาจริง

ตารางที่ 4.7 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดคลอรีนของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

พารามิเตอร์	ขีดจำกัดในการตรวจวัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พารามิเตอร์	ขีดจำกัดในการตรวจวัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
I_G	0.3 ± 0.4	A_G	0.26 ± 0.00
I_B	0.5 ± 0.4	A_B	0.40 ± 0.00
$ I_G - I_{\text{blank}} $	0.3 ± 0.4	$ A_G - A_{\text{blank}} $	0.26 ± 0.00
$ I_B - I_{\text{blank}} $	0.5 ± 0.4	$ A_B - A_{\text{blank}} $	0.40 ± 0.00
I_{TOTAL}	0.7 ± 1.7	A_{TOTAL}	0.58 ± 0.00
Spectrophotometer	0.05 ± 0.00		

4.6.5 ความไวในการวิเคราะห์ (Sensitivity)

ความไวในการวิเคราะห์ของระบบการตรวจวัด ซึ่งพิจารณาจากค่าความชันของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าความไวในการวิเคราะห์สูงสุดเท่ากับ $8.6 \pm 0.2 \text{ a.u.}/(\text{mgL}^{-1})$ เมื่อใช้ค่าความเข้มสีรวมในการวิเคราะห์ และ $0.0242 \pm 0.0005 \text{ a.u.}/(\text{mgL}^{-1})$ เมื่อใช้ค่าการดูดกลืนแสงรวมในการวิเคราะห์ ในขณะที่ spectrophotometer มีค่าความไวในการวิเคราะห์เท่ากับ $0.0250 \pm 0.0007 \text{ a.u.}/(\text{mgL}^{-1})$ จะเห็นได้ว่า ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นมีค่าสูงกว่าวิธีมาตรฐาน ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะที่สูงของวิธีที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.8 ความไวในการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน

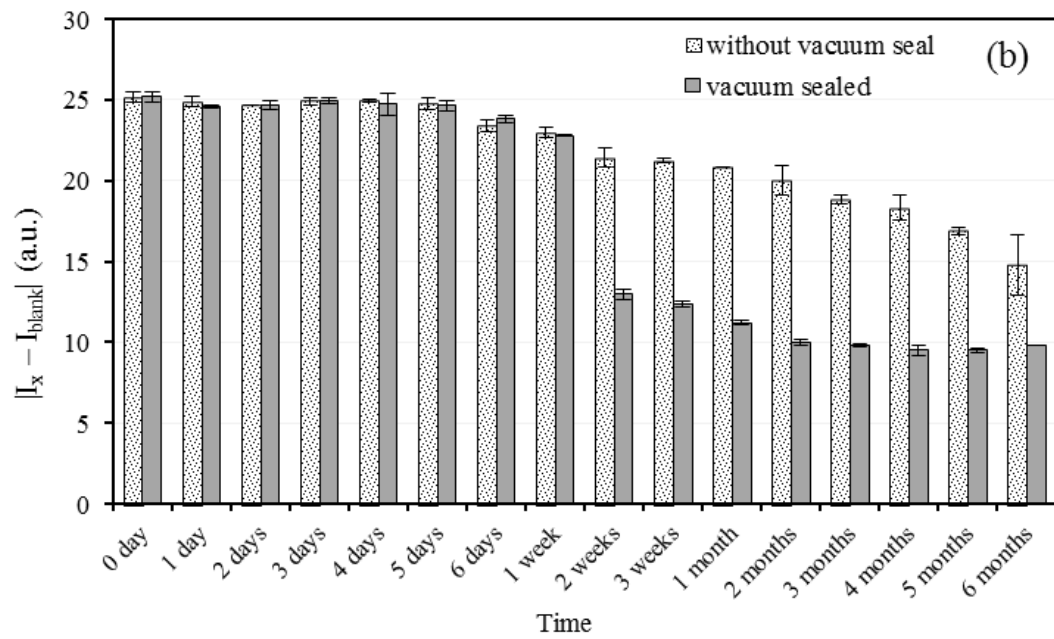
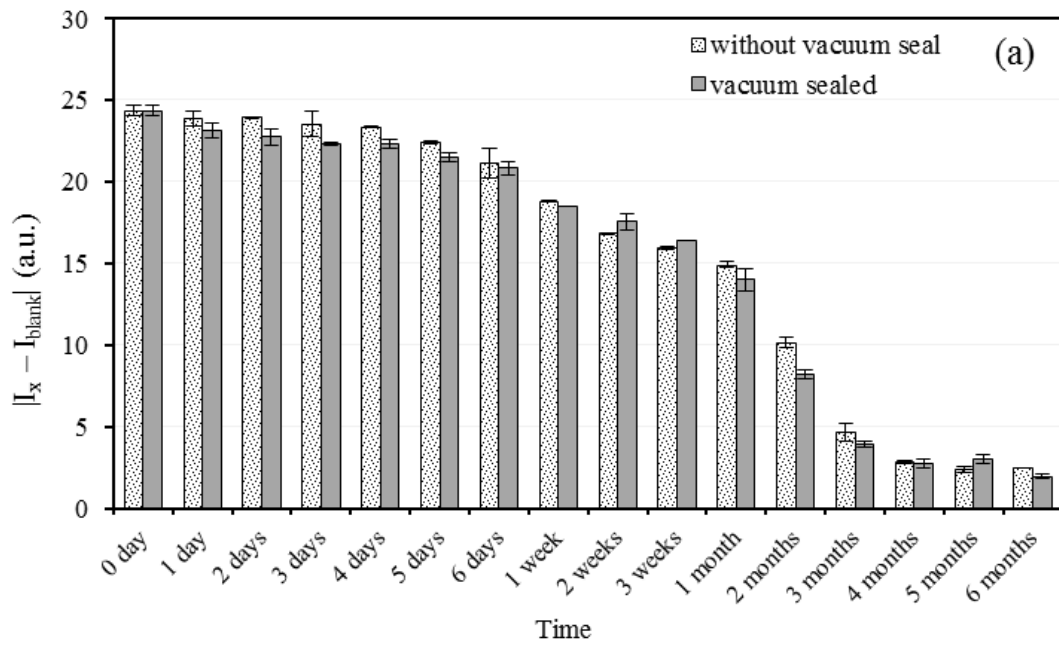
พารามิเตอร์	ความไวในการวิเคราะห์ (a.u./(mgL^{-1}))	พารามิเตอร์	ความไวในการวิเคราะห์ (a.u./(mgL^{-1}))
I_G	4.54 ± 0.08	A_G	0.0136 ± 0.0008
I_B	3.21 ± 0.06	A_B	0.0085 ± 0.0005
$ I_G - I_{\text{blank}} $	4.54 ± 0.08	$ A_G - A_{\text{blank}} $	0.0136 ± 0.0008
$ I_B - I_{\text{blank}} $	3.21 ± 0.06	$ A_B - A_{\text{blank}} $	0.0085 ± 0.0003
I_{TOTAL}	8.6 ± 0.2	A_{TOTAL}	0.0242 ± 0.0005
Spectrophotometer	0.0250 ± 0.0007		

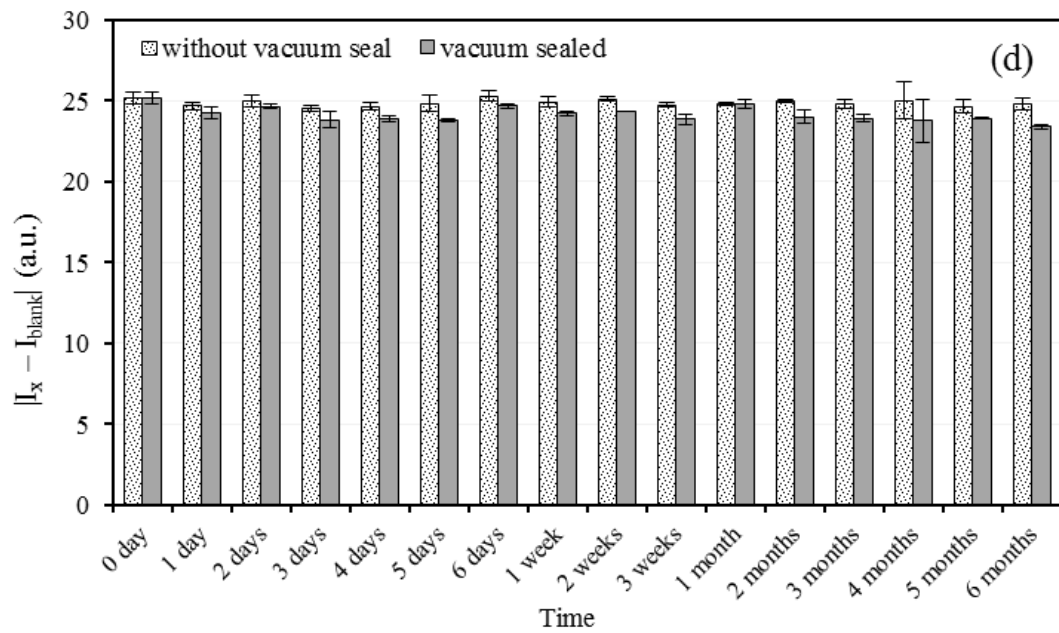
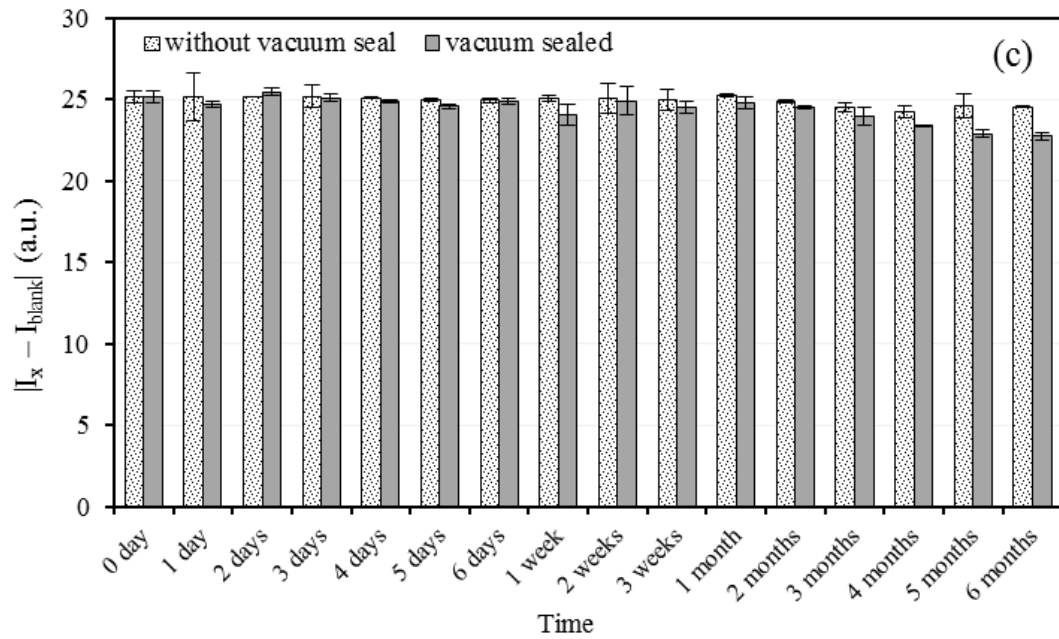
4.7 ความเสถียรของเซ็นเซอร์ (Stability)

เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมีโอกาสเสื่อมสภาพจากจุลินทรีย์สูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาความเสถียรของเซ็นเซอร์ ในระยะเวลา 6 เดือน โดยมีการเก็บรักษาเซ็นเซอร์ทั้งในสภาวะสุญญากาศ (with vacuum sealed) และสภาวะความดันบรรยากาศ (without vacuum sealed) เซ็นเซอร์ทั้งสองรูปแบบจะถูกบรรจุลงในถุงซิปล็อคชนิดทึบแสง (เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสมบัติด้านความไวต่อแสงของสารรีเอเจนต์ในพอลิเมอร์) และจะเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) ในตู้เย็น (4 องศาเซลเซียส) และในช่องแช่แข็ง (-20 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำมาทดสอบด้วยสารมาตรฐานคลอรีนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีนที่ใช้เป็นแบลนด์ ในทันที และทดสอบซ้ำในทุกวัน เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ในทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 1 เดือน และในทุกเดือนจนครบ 6 เดือน ผลการศึกษาจะแสดงในรูปค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวอย่างเทียบกับแบลนด์ ($|I_x - I_{\text{blank}}|$) ดังในรูปที่ 4.35 ซึ่งพบว่า เซ็นเซอร์ที่เก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศและสภาวะความดันบรรยากาศปกติ ตลอดระยะเวลา 6 เดือน ให้ผลการตรวจวัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งการเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น ในตู้เย็น และในช่องแช่แข็ง โดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้น เซ็นเซอร์ที่เก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น (b) ซึ่งรูปแบบสุญญากาศ จะให้ความเข้มข้นต่ำกว่ารูปแบบความดันบรรยากาศปกติ กล่าวคือ การเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น

เซ็นเซอร์ที่อยู่ในรูปแบบสุญญากาศ จะให้ผลผลิตที่ต่ำกว่าจากปฏิกิริยาเกิดสีน้อยลง หลังเก็บไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยสัปดาห์ที่ 2 มีค่าความเข้มสีเปลี่ยนไปจากวันแรก เท่ากับ 48.46 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รูปแบบความดันบรรยากาศปกติ เซ็นเซอร์จะให้ค่าความเข้มของสีเปลี่ยนไปจากวันแรก เท่ากับ 14.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งสองสภาวะดังกล่าวมีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่จัดเก็บในถุงก่อนนำไปสุญญากาศจะอยู่ในรูปแบบหลอดที่พร้อมใช้งานเรียบร้อยแล้ว จึงคาดว่าความชื้นที่อยู่ในหลอดของเซ็นเซอร์ที่มีการสุญญากาศไว้ อาจเกิดความชื้นสะสมตามระยะเวลาที่จัดเก็บ และส่งผลให้เซ็นเซอร์เสื่อมสภาพเร็วกว่าการเก็บเซ็นเซอร์ไว้ในตู้ดูดความชื้นแบบความดันบรรยากาศปกติ ดังนั้น ถ้าจำเป็นต้องมีการเก็บเซ็นเซอร์ไว้ในตู้ดูดความชื้น ควรเก็บรักษาเซ็นเซอร์ในรูปแบบความดันบรรยากาศปกติ เนื่องจากประสิทธิภาพการตรวจวัดจะสูงกว่า เมื่อใช้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่เท่ากัน รวมทั้งยังช่วยลดวัสดุที่ใช้สำหรับสุญญากาศและระยะเวลาในการบรรจุของอีกด้วย

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการเก็บรักษาของเซ็นเซอร์ในสภาวะอื่นๆ สำหรับการบรรจุให้อยู่ในสภาวะของความดันบรรยากาศปกติหรือไม่มีการสุญญากาศใดๆ (รูปที่ 4.35) พบว่าการเก็บรักษาเซ็นเซอร์ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง (a) เซ็นเซอร์จะให้ค่าความแตกต่างของความเข้มสีเฉลี่ยลดลง หลังการเก็บไว้ได้เพียง 5 วัน โดยให้ค่าความแตกต่างของความเข้มสีเมื่อเทียบกับวันแรก เท่ากับ 8.0 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งลักษณะของแผ่นฟิล์มที่เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องของสัปดาห์แรก เริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเห็นได้ชัดด้วยตาเปล่า ซึ่งให้เห็นว่า การเสื่อมสภาพของเซ็นเซอร์สูง ซึ่งไม่เหมาะในการจัดเก็บเซ็นเซอร์ไว้ในอุณหภูมิห้อง (30 ± 5 องศาเซลเซียส) ทั้งนี้ ยังพบว่า เซ็นเซอร์ที่เก็บไว้ในตู้เย็น (c) และช่องแช่แข็ง (d) ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการเก็บรักษา 6 เดือน รวมถึงการใช้งานในการตรวจวัดจะยังคงให้ค่าความเข้มของสีไม่แตกต่างจากเซ็นเซอร์ที่เตรียมขึ้นใหม่ (ความแตกต่างน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงแนะนำให้เก็บรักษาเซ็นเซอร์ ไว้ในตู้เย็นหรือช่องแช่แข็ง โดยสามารถบรรจุเซ็นเซอร์ได้ทั้งในรูปแบบที่สุญญากาศและในความดันบรรยากาศทั่วไป ซึ่งเซ็นเซอร์ดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 6 เดือน





รูปที่ 4.35 ผลเสถียรภาพของเซ็นเซอร์ต่อค่าความแตกต่างของความเข้มสีเขียว (G intensity) ในการบรรจุแบบสุญญากาศ (without vacuum seal) และแบบไม่สุญญากาศ (vacuum sealed) ที่เก็บไว้ใน (a) อุณหภูมิห้อง (b) ตู้ดูดความชื้น (c) ตู้เย็น และ (d) ช่องแช่แข็ง

4.8 วิเคราะห์ตัวอย่างจริง

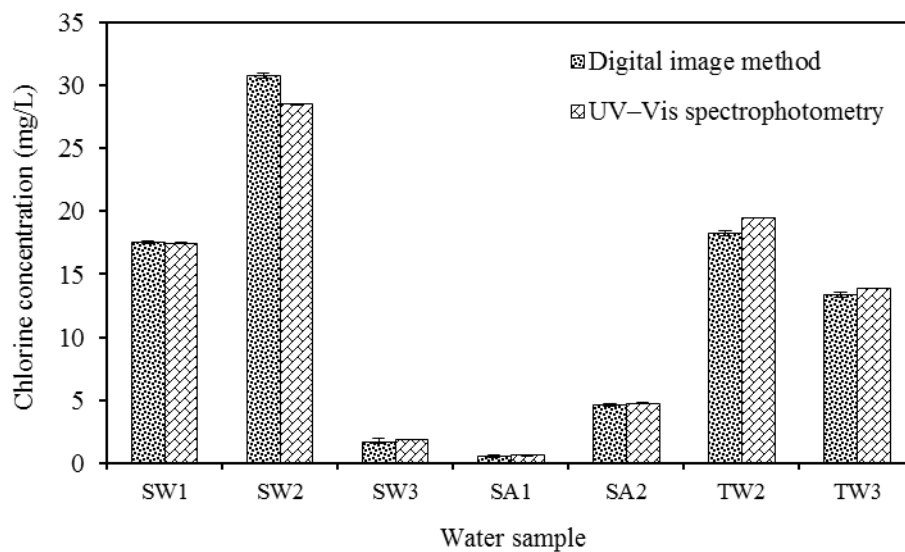
การวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำจากตัวอย่างสระว่ายน้ำน้ำคลอรีน (SW) สระน้ำเกลือ (SA) น้ำประปา (TW) น้ำดื่ม (DW) น้ำผิวดิน (NW) และน้ำทะเล (SEA) ในบริเวณต่างๆ ของจังหวัดภูเก็ต ได้แก่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สถานที่ประกอบการหรือโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว โรงผลิตน้ำประปา และบ้านเรือนประชาชน โดยใช้เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการตรวจวัดคลอรีนอิสระ และเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน DPD colorimetric ซึ่งตรวจวัดด้วยเครื่อง spectrophotometer ผลจากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำตัวอย่างที่ตรวจวัดได้ โดยใช้เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นและเปรียบเทียบกับ spectrophotometer

ตัวอย่างจริง		วิธีที่พัฒนาขึ้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วิธีมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Relative error (%)
ตัวอย่างสระว่ายน้ำ	SW1	17.5 ± 0.1	17.5 ± 0.0	+0.3
	SW2	30.8 ± 0.2	28.5 ± 0.0	+7.9
	SW3	1.7 ± 0.2	1.9 ± 0.0	+7.6
ตัวอย่างสระน้ำเกลือ	SA1	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.0	+9.8
	SA2	4.6 ± 0.1	4.8 ± 0.0	+3.1
ตัวอย่างน้ำประปา	TW1	nd	nd	nd
	TW2	18.3 ± 0.2	19.8 ± 0.0	+6.2
	TW3	13.4 ± 0.2	13.9 ± 0.0	+3.8
ตัวอย่างน้ำดื่ม	DW1	nd	nd	nd
	DW2	nd	nd	nd
ตัวอย่างน้ำผิวดิน	NW	nd	nd	nd
ตัวอย่างน้ำทะเล	SEA	nd	nd	nd

หมายเหตุ nd คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (not detectable)

ตารางที่ 4.9 การตรวจวัดตัวอย่างน้ำประเภทต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต พบว่า วิธีที่พัฒนาขึ้นตรวจพบปริมาณคลอรีนในสระน้ำคลอรีน (SW) สระน้ำเกลือ (SA) และน้ำประปา (TW) โดยปริมาณคลอรีนในสระว่ายน้ำจากโรงแรม (SW2) มีค่าสูงสุด จากการสอบถามทางโรงแรมซึ่งเป็นสถานที่ที่เปิดให้บริการมาระยะหนึ่ง ได้มีการเติมคลอรีนสำหรับการฆ่าเชื้อตามสภาพของน้ำแต่ละวัน ขึ้นอยู่กับการใช้บริการของนักท่องเที่ยว ซึ่งทางผู้วิจัยไม่แน่ชัดถึงข้อมูลความถี่ในการเติมคลอรีนของทางโรงแรมในระหว่างวัน คาดว่า ผลอาจมาจากการเหลือตกค้างของปริมาณสารคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อเกิดการสะสมอยู่ภายในสระว่ายน้ำ ทำให้ปริมาณของคลอรีนอิสระมีค่าสูง ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณของคลอรีนที่เติมลงในสระจากสวนน้ำ (SW3) ที่เป็นสถานที่ท่องเที่ยวเปิดใหม่และยังไม่ได้เปิดให้ใช้บริการแก่นักท่องเที่ยว จึงส่งผลให้ค่าที่ตรวจวัดได้ต่ำกว่าสระว่ายน้ำจากโรงแรม (SW2) ทั้งนี้ ปริมาณของคลอรีนที่วัดได้จากตัวอย่างโรงผลิตน้ำประปา (TW2) ที่มีค่าสูงรองลงมา ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับตัวอย่างน้ำประปาจากบ้านเรือน (SW3) ที่มีการเก็บตัวอย่างในวันเดียวกัน เนื่องจากคลอรีนได้มีการระเหยออกระหว่างการจ่ายน้ำจากโรงผลิต ทำให้ปริมาณสารคลอรีนที่ตรวจวัดได้ตามบ้านเรือนลดน้อยลงกว่าจากโรงผลิตน้ำ และผลจากการตรวจวัดยังสามารถระบุได้ชัดเจนว่าไม่มีปริมาณคลอรีนอยู่ในน้ำดื่ม น้ำผิวดินและน้ำทะเล นอกจากนี้ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำโดยใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีมาตรฐาน (รูปที่ 4.36) โดยมีค่าความคาดเคลื่อนสัมพันธ์ (%Relative error) น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ t-test พบว่า t_{cal} เท่ากับ 0.94 และ t_{crit} เท่ากับ 2.45 เมื่อพิจารณาจากค่า t ($t_{cal} < t_{crit}$) พบว่า ทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน และมีศักยภาพในการใช้งานจริง แต่มีข้อดีเหนือกว่า คือ ปริมาตรรีเอเจนต์ที่ใช้ต่ำกว่า และของการพกพาได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการตรวจวัดคลอรีนภาคสนาม (ดังการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.10)



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบวิธีสำหรับการตรวจวัดคลอรีนในตัวอย่างสระว่ายน้ำน้ำ (SW) สระน้ำเกลือ (SA) และน้ำประปา (TW)

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

วิธีที่ เปรียบเทียบ	ช่วงความเป็น เส้นตรง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาที่ทำ ปฏิกิริยา	ขีดจำกัด การตรวจวัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสารที่ใช้ ในการตรวจวัด (มิลลิลิตร)	การ พกพา
วิธีที่พัฒนาขึ้น	0.3 - 15	~ 1 นาที	0.3	1.0	ได้
วิธีมาตรฐาน	0.1 - 20	~ 1 นาที	0.05	5.0 - 10	ไม่ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

เซ็นเซอร์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมถูกจัดทำขึ้นโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติ คือ แป้งมันสำปะหลังและวุ้น สำหรับการกักเก็บสารทำปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นฟิล์มบาง โดยอาศัยหลักการทำปฏิกิริยาสีของสารรีเอเจนต์ *N, N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) กับสารคลอรีนในตัวอย่าง จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์พบว่า สารที่ใช้ในการผลิตเซ็นเซอร์ประกอบด้วยสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ ขวดที่ 1 สารละลายพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้สำหรับขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง 0.05 กรัม และวุ้น 0.025 กรัม นำมาละลายในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ด้วยความร้อนจนได้สารละลายใส ไม่มีสี และตั้งทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิห้อง โดยสารละลายวุ้นจะถูกตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิของสารลดลงเหลือประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการแข็งตัวเร็วกลายเป็นวุ้น แล้วจึงนำสารละลายทั้งสองดังกล่าวมาผสมในอัตราส่วน 1: 2 โดยปริมาตรของแป้งต่อวุ้น ส่วนขวดที่ 2 สารละลายรีเอเจนต์ DPD เป็นสารเกิดสีที่ใช้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคลอรีนอิสระ ถูกเตรียมจากสาร DPD sulfate 2.0 กรัม และกรดซัลฟูริก (3M) 0.08 มิลลิลิตร ละลายในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากคลอรีน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และขวดที่ 3 เป็นสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เพื่อใช้สำหรับการปรับค่า pH ในการทำปฏิกิริยากับตัวอย่างน้ำ ซึ่งเตรียมจากการละลาย Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 และ EDTA ปริมาณ 0.24, 0.46 และ 0.16 กรัม ตามลำดับ ในน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากคลอรีน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยสารละลายขวดที่ 2 และ 3 จะถูกนำมาผสมกันในอัตราส่วน 1: 0.5 ก่อนเติมสารละลายขวดที่ 1 ลงไป โดยปริมาตรรวมของสารละลายทั้ง 3 ชนิดเหล่านี้ เท่ากับ 5 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากันและนำสารละลายผสมที่ได้ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในฝาของหลอดพลาสติก micro-PCR ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นภาชนะที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ และนำภาชนะดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ± 5 นาที เพื่อให้การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน จะได้เซ็นเซอร์เป็นฟิล์มบางสีชมพูอ่อนเคลือบในฝาหลอด ซึ่งมีลักษณะพร้อมใช้งานกับตัวอย่างสารละลายคลอรีนที่ถูกเติมลงไปหลอด ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วจากการทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระในระยะเวลา 1 นาที หลังจากการเขย่าให้เข้ากัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารละลายสีชมพู ในงานวิจัยนี้ จะมีการศึกษาผลการรบกวนจากไอออนอื่นๆ ที่มีต่อการตรวจวัดของคลอรีนด้วยชุดตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งพบว่า ตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยไอออนแต่ละชนิด ได้แก่ Na^+ , NH_4^+ , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cl^- , CO_3^{2-} และ MnO_4^- ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเข้มสีที่ตรวจวัดได้ เกิดการเบี่ยงเบนไปจากค่าความเข้มสีในสภาวะที่ปราศจากไอออนมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยไอออนของ Fe^{3+} , Fe^{2+} และ MnO_4^- จะส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอรีนสูง ซึ่งไอออนทั้งสามชนิดนี้มีปริมาณสูงสุดที่สามารถยอมให้มีได้ในตัวอย่าง เท่ากับ 3, 1 และ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้นการเติมสาร EDTA ปริมาณ 0.16 กรัม ลงในขวดที่ 3 ของสารละลายบัฟเฟอร์ จะสามารถลดปัญหาการรบกวนของไอออนดังกล่าวหรือไอออนจากโลหะต่างๆ ได้ โดยเฉพาะตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วย Fe^{3+} นอกจากนี้ ลักษณะของเซ็นเซอร์จากการศึกษาด้วย SEM พบว่า แผ่นฟิล์มมีลักษณะขรุขระและมีโครงสร้างที่เป็นผลึกของสาร ซึ่งแสดงถึงสารรีเอเจนต์ที่ได้เติมเข้าไปมีการกระจายตัวภายในของแผ่นฟิล์ม และผลที่ได้จาก FTIR แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีปฏิสัมพันธ์ที่ระหว่างสารรีเอเจนต์กับพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถเชื่อมโยงเข้ากันได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน

เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล โดยใช้กล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ และทำการแปลผลเป็นปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ (customed-built program) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มของสีพื้นฐาน 3 สี (RGB intensity) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์กับสารละลายมาตรฐานคลอรีน ซึ่งสามารถตรวจวัดหาปริมาณของคลอรีนอิสระได้โดยใช้กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสี RGB และความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ จากผลการศึกษาสมรรถนะสำหรับการตรวจวัดของวิธีที่พัฒนาขึ้น (system performance) พบว่า วิธีดังกล่าวจะมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้าง เมื่อใช้ความเข้มของสีเขียวและสีน้ำเงินในการวิเคราะห์ กล่าวคือ ช่วงความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.3 – 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ($R^2 > 0.99$) ซึ่งเมื่อนำค่าความเข้มสี RGB คำนวณเป็นค่าการดูดกลืนแสง RGB จะพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงให้ช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างเท่ากับ ความเข้มสี นอกจากนี้ ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวจะมีขีดจำกัดในตรวจวัดได้ต่ำกว่าค่าความเข้มของสี

และสามารถตรวจวัดได้ต่ำสุด เท่ากับ 0.26 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ วิธีการตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น ยังมีความแม่นยำสูง โดยเมื่อใช้ชุดตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นในการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานคลอรีน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า จะให้ผลการตรวจวัดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%relative error) ต่ำ ทั้งในรูปของค่าความเข้มสี RGB และค่าการดูดกลืนแสง RGB เท่ากับ $0.31 - 10.10$ เปอร์เซ็นต์ และ $2.31 - 4.96$ เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่มีความเที่ยงในการตรวจวัดสูง โดยค่าความเข้มสี RGB จะมีความเที่ยงสูงกว่าค่าการดูดกลืนแสง RGB โดยค่าความเข้มสี RGB จะมีร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สำหรับการตรวจวัดภายในวันเดียวกัน (Intraday precision) อยู่ในช่วง $0.83 - 3.98$ เปอร์เซ็นต์ และ $1.21 - 4.21$ เปอร์เซ็นต์ สำหรับการตรวจวัดระหว่างวัน (Interday precision) และวิธีที่พัฒนาขึ้นยังมีความไวในการวิเคราะห์สูงสุด เมื่อใช้ค่าความเข้มสีรวม (I_{total}) และค่าการดูดกลืนแสงรวม (A_{total}) ในการวิเคราะห์ โดยมีค่าความไวในการวิเคราะห์สำหรับค่าความเข้มสีรวมและค่าการดูดกลืนแสงรวม เท่ากับ $8.6 \pm 0.2 \text{ a.u.}/(\text{mgL}^{-1})$ และ $0.0242 \pm 0.0005 \text{ a.u.}/(\text{mgL}^{-1})$ ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อนำเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดตัวอย่างน้ำประเภทต่างๆ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานด้วยเครื่อง spectrophotometer พบว่า ทั้งสองวิธีสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนอิสระได้ใกล้เคียงกัน โดยให้ค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดสอบความเสถียรของเซ็นเซอร์ พบว่า เซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีอายุการใช้งานได้นานอย่างน้อย 6 เดือน โดยผ่านการเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นหรือช่องแช่แข็ง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าวิธีในการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำประปาหรือสระว่ายน้ำได้จริง และมีข้อดี คือ สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่ และวัสดุที่ใช้ได้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เซ็นเซอร์ตรวจวัดคลอรีนที่พัฒนาขึ้นมีความไวต่อแสง จึงควรเก็บรักษาเซ็นเซอร์ไว้ให้พ้นแสง

5.2.2 หากมีการนำงานวิจัยไปศึกษาต่อยอด ควรจะมีการศึกษาหาปริมาณของคลอรีนคงเหลือชนิดคลอรามีนหรือคลอรีนรวม เพื่อประยุกต์ใช้กับวิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับตรวจวัดในตัวอย่างจริงได้ และสามารถนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ สำนักงานการกากของเสียและสารอันตราย. (2554). *เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง คลอรีน (CHLORINE)*, กรุงเทพฯ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2561). *คู่มือการปกป้องประชาชนจากเหตุฉุกเฉินสารเคมีรั่วไหล*, กรุงเทพฯ.
- กรมอนามัย. (2553). “เกณฑ์คุณภาพน้ำประปา.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ <http://intranet.hpc7.anamai.moph.go.th/WSP/WSpDoc/StdMoph.pdf> (วันที่ 26 มิถุนายน 2563)
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2559) *กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม*, กรุงเทพฯ.
- การประปานครหลวง. (2553). “คลอรีน.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ https://web.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa_internet/ewt_dl_link.php?nid=440 (วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2563).
- จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และชัยศรี สุขสาโรจน์. (2551). “การลดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบประปาเพื่อควบคุมปริมาณการเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำประปา.” โครงการวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จรรยา บริวิชยาวิสุทธิ์. (2552). “การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสารไตรฮาโลมีเทนจากสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- จิรวรรณ จานทอง. (2553). “ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาและน้ำสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ธนพร หีดจันทร์. (2559). “การพัฒนาเซ็นเซอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับตรวจวัดเหล็กในน้ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธนศาสตร์ สุขศรีเมือง. (2548). “การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี.” *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*, 76–79.
- ธนากร รติธรรมธร. (2559). “ผลของการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยของแป้ง.” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 21(2), 246–259.

- มยุรฉัตร เปี้ยกลาง, วราลักษณ์ ตั้งคณะกุล, ชัยวัฒน์ พลูศรีกาญจน์, วินัย วุฒิวิโรจน์, พรชัย เกิดศิริ, ปฏิคม วิวัฒนาคม, รัตนาธ อีระวัฒน์ และโอภาส การย์ภินพงค์. (2553). “การเปรียบเทียบการตรวจคลอรีนอิสระจากน้ำอุปโภคบริโภค ณ ทำอากาศยานสุวรรณภูมิ กับการตรวจทางจุลชีววิทยา.” สำนักโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรค, กระทรวงสาธารณสุข.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). *วิศวกรรมการประปา เล่ม 1*, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และมันรัช ตัณฑุลเวศม์. (2551). *เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย*, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช). (2554). *ยุทธศาสตร์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมมันสำปะหลังประเทศไทย (พ.ศ. 2555-2559) และโปรแกรมวิจัยและพัฒนา มันสำปะหลังภายใต้แผนกลยุทธ์การวิจัยและพัฒนา สวทช. ระยะที่ 2 พ.ศ. 2554-2559 (Strategic Planning Alliance II : SPA II)*. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- Abou Taleb, M., Mowafi, S., and El-Sayed, H. (2019). “Utilization of keratin or sericin-based composite in detection of free chlorine in water.” *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127379.
- Ali Shah, A., Hasan, F., Shah, Z., Kanwal, N., and Zeb, S. (2013). “Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review.” *International Biodeterioration and Biodegradation*, 83, 145–157.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (APHA, AWWA and WEF). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition*, United States of America.
- Ayebah, B. and Hung, Y. C. (2005). “Electrolyzed water and its corrosiveness on various surface materials commonly found in food processing facilities.” *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 247–264.
- Black and Veatch. (2010). *White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants, 5th edition*, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.

- Boonkanon, C., Phatthanawiwat, K., Wongniramaikul, W., and Choodum, A., (2020). "Curcumin nanoparticle doped starch thin film as a green colorimetric sensor for detection of boron." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 224, 117351.
- Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K., and Sriroth, K. (2009). "Tapioca / Cassava Starch : Production and Use." *Starch: Chemistry and Technology*, 3rd edition, 541-568.
- Builders, P. F., Ogwuche, P., Isimi, Y., and Kunle, O. O. (2011). "Some critical effects of starch gel on the granule and tablet properties of a potent herbal extract AM-1." *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 5(13), 1603–1611.
- Capron, I., Robert, P., Colonna, P., Brogly, M., and Planchot, V., (2007). "Starch in rubbery and glassy states by FTIR spectroscopy." *Carbohydrate Polymers*, 68(2), 249–259.
- Carter, R. A. A. and Joll, C. A. (2017). "Occurrence and formation of disinfection by-products in the swimming pool environment: A critical review." *Journal of Environmental Sciences*, 58, 19-50.
- Castro-Aguirre, E., Auras, R., Selke, S., Rubino, M., and Marsh, T. (2017). "Insights on the aerobic biodegradation of polymers by analysis of evolved carbon dioxide in simulated composting conditions." *Polymer Degradation and Stability*, 137, 251–271.
- Chlorine Chemistry Council (CCC). (2002). *Chlorine and Food Safety White Paper*, United States of America.
- Choi, I., Young, J., Lacroix, M., and Han, J. (2017). "Intelligent pH indicator film composed of agar / potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato." *Food Chemistry*, 218, 122–128.
- Choodum, A., Parabun, K., Klawach, N., and Daeid, N. N., Proespichaya, K., and Worawit, W. (2014). "Real time quantitative colourimetric test for methamphetamine detection using digital and mobile phone technology." *Forensic Science International*, 235, 8–13.

- Choodum, A., Pichapat, B., Daeid, N. N., and Worawit, W. (2015). "On-site semi-quantitative analysis for ammonium nitrate detection using digital image colourimetry." *Science and Justice*, 55(6), 437–445.
- Choodum, A., Kanatharana, P., and Wongniramaikul, W. (2013). "Using the iPhone as a device for a rapid quantitative analysis of trinitrotoluene in soil." *Talanta*, 115, 143–149.
- Choodum, A. and Daeid, N. N. (2011). "Digital image-based colourimetric tests for amphetamine and methylamphetamine." *Drug Testing and Analysis*, 3(5), 277–282.
- Choodum, A., Sriprom, W., and Wongniramaikul, W. (2019). "Portable and selective colorimetric film and digital image colorimetry for detection of iron." *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 208, 40–47.
- Chowdhury, S. (2013). "Exposure assessment for trihalomethanes in municipal drinking water and risk reduction strategy." *Science of the Total Environment*, 463–464, 922–930.
- Coates, J. (2006). *Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach (Encyclopedia of Analytical Chemistry)*, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- Cooper, W. J., Mehran, M. F., Slifker, R. A., Smith, D. A., Villate, J. T., and Gibbs, P. H. (2016). "Comparison of several instrumental methods for determining chlorine residuals in drinking water." *American Water Works Association*, 74(10), 546–552.
- Cooper, W. J., Roscher, N. M., and Slifker, R. A. (1982). "Determining free available chlorine by DPD-colorimetric, DPD-Steadifac (colorimetric), and FACTS procedures." *American Water Works Association*, 74(7), 362–368.
- Deborde, M. and von Gunten, U. (2008). "Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and mechanisms: A critical review" *Water Research*, 42(1–2), 13–51.

- El-Hefian, E. A., Nasef, M. M., and Yahaya, A. H. (2012). "Preparation and characterization of chitosan/agar blended films: Part 1. chemical structure and morphology." *E-Journal of Chemistry*, 9(3), 1431–1439.
- Engelhardt, T. L. and Malkov, V. B. (2015). *Chlorination, chloramination and chlorine measurement*, Hach Company, Inc., United States of America.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection*, United States of America.
- Escudero-Oñate, C. (2015). *Survey of sodium and calcium hypochlorite*, Danish Environmental Protection Agency, Denmark.
- Felgueiras, F., Mourão, Z., Morais, C., Santos, H., Gabriel, F. M., and de Oliveira Fernandes, E. (2020). "Comprehensive assessment of the indoor air quality in a chlorinated Olympic-size swimming pool." *Environment International*, 136, 105401.
- Firdaus, M. L., Firdaus, M. L., Alwi, W., Trinoveldi, F., Rahayu, I., Rahmidar, L., and Warsito, K. (2014). "Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry." *Procedia Environmental Sciences*, 20, 298–304.
- Freile-Pelegrín, Y., Madera-Santana, T., Robledo, D., Veleza, L., Quintana, P., and Azamar, J. A. (2007). "Degradation of agar films in a humid tropical climate: Thermal, mechanical, morphological and structural changes." *Polymer Degradation and Stability*, 92(2), 244–252.
- Goddijn, L. M., and White, M. (2006). "Using a digital camera for water quality measurements in Galway Bay." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66, 429–436.
- Gombas, D., Luo, Y., Brennan, J., Shergill, G., Petran, R., Walsh, R., Hau, H., Khurana, K., Zomorodi, B., Rosen, J., Varley, R., and Deng, K. (2017). "Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables." *Journal of Food Protection*, 80(2), 312–330.

- Gonzalez, M. R. and Jai, R. C. (1993). "Qualification test program for emergency chlorine scrubber systems." *Transactions on Ecology and the Environment*, 1(1743–3541), 747–759.
- Gordon, G., Cooper, W. J., Rice, R. G., and Pacey, G. E. (1988). "Methods of measuring disinfectant residuals." *Journal of American Water Works Association*, 80(9), 94–108.
- Grellier, J., Rushton, L., Briggs, D. J., and Nieuwenhuijsen, M. J. (2015). "Assessing the human health impacts of exposure to disinfection by-products - A critical review of concepts and methods." *Environment International*, 78, 61–81.
- Hach Company. (2020). "COLORIMETRO PORTABLE PCII." (Online) Available on <http://www.elicrom.com/colorimetro-portable-pcii-cloro-libre-y-total-mas-ph-5870012/> (1 April 2020).
- Hallaj, T., Amjadi, M., Manzoori, J. L., and Shokri, R. (2014). "Chemiluminescence reaction of glucose-derived graphene quantum dots with hypochlorite, and its application to the determination of free chlorine." *Microchimica Acta*, 182(3–4), 789–796.
- Hamada, Y. Z., Makoni, N., and Hamada, H. (2016). "Three very different UV-VIS absorption spectra of three different transition metals found in biological solutions." *Electronic Journal of Biology*, 6-9.
- Han, Z., An, W., Yang, M., and Zhang, Y. (2020). "Assessing the impact of source water on tap water bacterial communities in 46 drinking water supply systems in China." *Water Research*, 172, 115469.
- Hang, C., Zhang, B., Gong, T., and Xian, Q. (2016). "Occurrence and health risk assessment of halogenated disinfection byproducts in indoor swimming pool water." *Science of the Total Environment*, 543, 425–431.
- Hansen, K. M. S. Willach, S., Antoniou, M. G., Mosbæk, H., Albrechtsen, H. J., and Andersen, H. R. (2012). "Effect of pH on the formation of disinfection byproducts in swimming pool water - Is less THM better?." *Water Research*, 46(19), 6399–6409.

- Harp, D. L. (2002). *Current Technology of Chlorine Analysis for Water and Wastewater*, Hach Company, Inc., United States of America.
- Hong, J. Chen, R., Zeng, X. A., and Han, Z. (2016). "Effect of pulsed electric fields assisted acetylation on morphological, structural and functional characteristics of potato starch." *Food Chemistry*, 192, 15–24.
- How, Z. T. Kristiana, I., Buseti, F., Linge, K. L., and Joll, C. A. (2017). "Organic chloramines in chlorine-based disinfected water systems: A critical review." *Journal of Environmental Sciences (China)*, 58, 2–18.
- Hydro Instruments. (2016). "Chlorine Handling Manual." (Online) Available on <http://www.hydroinstruments.com/files/Chlorine%20Handling%20Manual%20201%2005%2006.pdf> (21 February 2020).
- International Conference for Harmonisation (ICH). (1996). *Guideline for Industry, Q2B Validation of analytical procedures: Methodology*, Federal Register Publications, United States of America.
- Jackson, M., Wagnieres, G., and Mantsch, H. M. (2017). "IR, Medical Science Applications." *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition)*, 479–487.
- Jia, S. Shi, P., Hu, Q., Li, B., Zhang, T., and Zhang, X. X. (2015). "Community Shift Drives Antibiotic Resistance Promotion during Drinking Water Chlorination." *Environmental Science and Technology*, 49(20), 12271–12279.
- Jumaidin, R., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., and Sahari, J. (2016). "Characteristics of thermoplastic sugar palm Starch/Agar blend: Thermal, tensile, and physical properties." *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 575–581.
- Kalyani, D. S. Monica, C. L., Vishnuvardhan, Z., and Krishna, N. M. (2017). "Effect of "Pushkaram" Activities on Quality of Krishna River Water - A Study Based On Determination of Residual Chlorine." *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4(2), 044–048.

- Khan, S., Beattie, T. K., and Knapp, C. W. (2016). "Relationship between antibiotic- and disinfectant-resistance profiles in bacteria harvested from tap water." *Chemosphere*, 152, 132–141.
- Kim, H., Shim, J., and Lee, S. (2002). "Formation of disinfection by-products in chlorinated swimming pool water." *Chemosphere*, 46(1), 123–130.
- Kompany-Zareh, M., Mansourian, M., and Ravaee, F. (2002). "Simple method for colorimetric spot-test quantitative analysis of Fe(III) using a computer controlled hand-scanner." *Analytica Chimica Acta*, 471(1), 97–104.
- Laszakovits, J. R., Patterson, A., Hipsher, C., and Mackay, A. A. (2019). "Diethyl phenylene diamine (DPD) oxidation to measure low concentration permanganate in environmental systems." *Water Research*, 151, 403–412.
- Lawton, J. W. (1996). "Effect of starch type on the properties of starch containing films." *Carbohydrate Polymers*, 29(3), 203–208.
- Legay, C., Leduc, S., Dubé, J., Levallois, P., and Rodriguez, M. J. (2019). "Chlorination by-product levels in hot tap water: Significance and variability." *Science of the Total Environment*, 651, 1735–1741.
- Len, S. V., Hung, Y. C., Chung, D., Anderson, J. L., Erickson, M. C., and Morita, K. (2002). "Effects of storage conditions and pH on chlorine loss in electrolyzed oxidizing (EO) water." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(1), 209–212.
- Li, P., Yoshimura, T., Furuta, T., Yanagawa, T., and Shiozaki, K. (2019). "Sunlight caused interference in outdoor *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine colorimetric measurement for residual chlorine and the solution for on-site work." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 640–644.
- Liu, X., Cai, H., Zou, J., Pang, Z., Yuan, B., Zhou, Z., and Cheng, Q. (2018). "Spectrophotometric determination of trace permanganate in water with *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD)." *Chemosphere*, 212, 604–610.

- Lopez-Molinero, A. Liñan, D., Sipiera, D., and Falcon, R. (2010). "Chemometric interpretation of digital image colorimetry. Application for titanium determination in plastics." *Microchemical Journal*, 96(2), 380–385.
- Lopez, O., Garcia, M. A., Villar, M. A., Gentili, A., Rodriguez, M. S., and Albertengo, L. (2014). "Thermo-compression of biodegradable thermoplastic corn starch films containing chitin and chitosan." *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 106–115.
- Luo, Y., Feng, L., Liu, Y., and Zhang, L. (2019). "Disinfection by-products formation and acute toxicity variation of hospital wastewater under different disinfection processes." *Separation and Purification Technology*, 238, 116405.
- Ma, X. and Bibby, K. (2017). "Free chlorine and monochloramine inactivation kinetics of *Aspergillus* and *Penicillium* in drinking water." *Water Research*, 120, 265–271.
- Mali, S., Grossmann, M. V. E., Garcia, M. A., Martino, M. N., and Zaritzky, N. E. (2006). "Effects of controlled storage on thermal, mechanical and barrier properties of plasticized films from different starch sources." *Journal of Food Engineering*, 75, 453–460.
- Malkov, V. B., Zachman, B., and Scribner, T. (2009). "Comparison of On-line Chlorine Analysis Methods and Instrumentation Built on Amperometric and Colorimetric Technologies." *American Water Works Association*, 1–22.
- Manitoba Water Stewardship. (2005). *Chlorine and alternative disinfectants guidance manual*, Earth Tech, Inc., Canada.
- Medina-jaramillo, C., Medina-jaramillo, C., Ochoa-yepes, O., Bernal, C., and Famá, L. (2017). "Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts." *Carbohydrate Polymers*, 176, 187–194.
- Melchert, W. R., Oliveira, D. R., and Rocha, F. R. P. (2010). "An environmentally friendly flow system for high-sensitivity spectrophotometric determination of free chlorine in natural waters." *Microchemical Journal*, 96(1), 77–81.

- Mendes, J. F., Paschoalin, R. T., Carmona, V. B., Sena, Alfredo, R., Marques, A. C. P., Marconcini, J. M., Mattoso, L. H. C., Medeiros, E. S., and Oliveira, J. E. (2016). "Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion." *Carbohydrate Polymers*, 137, 452–458.
- National Research Council. (2004). *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals Volume 4*, United States of America.
- Nieuwenhuijsen, M. J., Northstone, K., Golding, J., and the ALSPAC Study Team. (2002). "Swimming and Birth Weight." *Epidemiology*, 13(6), 725-728.
- Nikolaou, A. D., Lekkas, T. D., and Golfinopoulos, S. K. (2004). "Kinetics of the formation and decomposition of chlorination by-products in surface waters." *Chemical Engineering Journal*, 100(1–3), 139–148.
- Olivé-Monllau, R., Orozco, J., Fernández-Sánchez, C., Baeza, M., Bartrolí, J., Jimenez-Jorquera, C., and Céspedes, F. (2009). "Flow injection analysis system based on amperometric thin-film transducers for free chlorine detection in swimming pool waters." *Talanta*, 77(5), 1739–1744.
- Palin, A. T. (1957). "The Determination of Free and Combined Chlorine in Water by the Use of Diethyl- p -phenylene Diamine." *Journal - American Water Works Association*, 49(7), 873–880.
- Pan, S., An, W., Li, H., Su, M., Zhang, J., and Yang, M. (2014). "Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years." *Journal of Hazardous Materials*, 280, 288–294.
- Panyakapo, M., Soontornchai, S., and Paopuree, P. (2008). "Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water." *Journal of Environmental Sciences*, 20(3), 372–378.
- Paopuree, P., Panyakapo, M., and Soontornchai, S. (2010). "Multi-pathway cancer risk assessment of trihalomethanes exposure from chlorinated tap water and indoor swimming pool.", *Proceeding of International Conference on Chemistry and Chemical Engineering (ICCCE2010)*, Kyoto, Japan: 1-3 August, 2010.

- Pereira, V. J., Marques, R., Marques, M., Benoliel, M. J., and Barreto Crespo, M. T. (2013). "Free chlorine inactivation of fungi in drinking water sources." *Water Research*, 47(2), 517–523.
- Phan The, D., Debeaufort, F., Voilley, A., and Luu, D. (2009). "Biopolymer interactions affect the functional properties of edible films based on agar, cassava starch and arabinoxylan blends." *Journal of Food Engineering*, 90(4), 548–558.
- Pohanka, M. (2015). "Photography by cameras integrated in smartphones as a tool for analytical chemistry represented by an butyrylcholinesterase activity assay." *Sensors (Switzerland)*, 15(6), 13752–13762.
- Prachayawarakorn, J., Limsiriwong, N., Kongjindamunee, R., and Surakit, S. (2012). "Effect of Agar and Cotton Fiber on Properties of Thermoplastic Waxy Rice Starch Composites." *Journal of Polymers and the Environment*, 20(1), 88–95.
- Richardson, S. D. and Postigo, C. (2015). "Formation of DBPs: State of the Science." *American Chemical Society*, 1190, 189–214.
- Roccaro, P., Chang, H. S., Vagliasindi, F. G. A., and Korshin, G. V. (2008). "Differential absorbance study of effects of temperature on chlorine consumption and formation of disinfection by-products in chlorinated water." *Water Research*, 42(8–9), 1879–1888.
- Santisopasri, V., Kurotjanawong, K., and Chotineeranat, S. (2001). "Impact of water stress on yield and quality of cassava starch." *Industrial Crops and Products* 13(2), 115–129.
- Saputro, S., Takehara, K., Yoshimura, K., Matsuoka, S., and Narsito. (2010). "Differential pulse voltammetric determination of free chlorine for water disinfection process." *Electroanalysis*, 22(23), 2765–2768.
- Saroha, A. K. (2006). "Safe handling of chlorine." *Journal of Chemical Health and Safety*, 13(2), 5–11.
- Shen, L., Hagen, J. A., and Papautsky, I. (2012). "Point-of-care colorimetric detection with a smartphone." *Lab on a Chip*, 12(21), 4240–4243.

- Shi, Y., Ma, W., Han, F., Geng, Y., Yu, X., Wang, H., Kimura, S. Y., Wei, X., Kau, A., and Xiao, S. (2019). "Precise exposure assessment revealed the cancer risk and disease burden caused by trihalomethanes and haloacetic acids in Shanghai indoor swimming pool water." *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121810–121820.
- Shin, H. S. (2010). "Simple and simultaneous determination of free chlorine, free bromine and ozone in water by LC." *Chromatographia*, 71(7–8), 647–651.
- Shin, J., Choi, S., Yang, J. S., Song, J., Choi, J. S., and Jung, H. I. (2017). "Smart Forensic Phone: Colorimetric analysis of a bloodstain for age estimation using a smartphone." *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 243, 221–225.
- Silva-Pereira, M. C., Teixeira, J. A., Pereira-Júnior, V. A., and Stefani, R. (2015). "Chitosan/corn starch blend films with extract from Brassica oleraceae (red cabbage) as a visual indicator of fish deterioration." *LWT - Food Science and Technology*, 61(1), 258–262.
- Silva-Lyra, W., dos Santos, V. B., Dionízio, A. G., Martins, V. L., Almeida, L. F., Nóbrega Gaião, E., Diniz, P. H., Silva, E. C., and Araújo, M. C. (2009). "Digital image-based flame emission spectrometry." *Talanta*, 77(5), 1584–1589.
- Soman, A. R. and Sundararaj, G. (2015). "Accidental release of chlorine from a storage facility and an on-site emergency mock drill: A case study." *Scientific World Journal*, 2015, 1-11.
- Spon, R. (2008). "Do You Really Have a Free Chlorine Residual." *Opflow*, 34(6), 24–27.
- Squadrito, G. L., Postlethwait, E. M., and Matalon, S. (2010). "Elucidating mechanisms of chlorine toxicity: Reaction kinetics, thermodynamics, and physiological implications." *American Journal of Physiology - Lung Cellular and Molecular Physiology*, 299(3), 289–301.
- Suzuki, Y., Endo, Ma., Jin, J., Iwase, K., and Iwatsuki, M. (2006). "Tristimulus Colorimetry Using a Digital Still Camera and Its Application to Determination of Iron and Residual Chlorine in Water Samples." *Analytical Sciences*, 22, 411-414.

- Szala, M., Beer-Lech, K., and Walczak, M. (2017). "A study on the corrosion of stainless steel floor drains in an indoor swimming pool." *Engineering Failure Analysis*, 77(2016), 31–38.
- Szili, M. Kasik, I., Matejec, V., Nagy, G., and Kovacs, B. (2014). "Poly(luminol) based sensor array for determination of dissolved chlorine in water." *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 192, 92–98.
- Tang, Y. Su, Y., Yang, N., Zhang, L., and Lv, Y. (2014). "Carbon nitride quantum dots: A novel chemiluminescence system for selective detection of free chlorine in water." *Analytical Chemistry*, 86(9), 4528–4535.
- Tseng, J. M., Liu, M. Y., Chang, R. H., Su, J. L., and Shu, C. M. (2008). "Emergency response plan of chlorine gas for process plants in Taiwan." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21(4), 393–399.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (1999a). *EPA Guidance Manual, Alternative Disinfectants and Oxidants*, United States of America.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (1999b). *Reregistration Eligibility Decision (RED) Chlorine Gas*, United States of America.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2000). *Environmental health criteria for disinfectants and disinfectant by-products, Environmental Health Criteria*, World Health Organization, United States of America.
- Wakigawa, K., Wakigawa, K., Gohda, A., Fukushima, S., Mori, T., Niidome, T., and Katayama, Y. (2013). "Rapid and selective determination of free chlorine in aqueous solution using electrophilic addition to styrene by gas chromatography/mass spectrometry." *Talanta*, 103, 81–85.
- Westland, S., Laycock, K., Cheung, V., Henry, P., and Mahyar, F. (2007). "Colour Harmony." *Colour: Design and Creativity*, 1(1), 1-15.
- Wojtowicz, J. A. (2004). "Swimming pool and spa water chemical adjustments." *Journal of the Swimming Pool and Spa Industry*, 5, 39-56.

- Woraphatphadung, T., Sutthiparinyanont, S., and Chitropas, P. (2012). "Physicochemical properties of tapioca starch modified by alcoholic-alkali treated technique.", *Proceeding of The 13th Graduate Research Conference*, Knon kaen University, Thailand: 17 February, 2012.
- World Health Organization. (2011). *Guidelines for Drinking water Quality, 4th edition*, Gutenberg Press, Malta.
- Wu, Y., Geng, F., Chang, P. R., Yu, J., and Ma, X. (2009). "Effect of agar on the microstructure and performance of potato starch film." *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 299–304.
- Xiong, Y., Tan, J., Fang, S., Wang, C., Wang, Q., Wu, J., Chen, J., and Duan, M. (2017a). "A LED-based fiber-optic sensor integrated with lab-on-valve manifold for colorimetric determination of free chlorine in water." *Talanta*, 167, 103–110.
- Xiong, Y., Tan, J., Wang, C., Wu, J., Wang, Q., Chen, J., Fang, S., and Duan, M. (2017b). "A miniaturized evanescent-wave free chlorine sensor based on colorimetric determination by integrating on optical fiber surface." *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 245, 674–682.
- Zarei, A. R. and Sovizi, M. R. (2011). "Application of cloud point extraction technique to preconcentration and spectrophotometric determination of free chlorine in water samples." *Journal of Analytical Chemistry*, 66(3), 269–274.
- Zhang, H., Tian, Y., Kang, M., Chen, C., Song, Y., and Li, H. (2019). "Effects of chlorination/chlorine dioxide disinfection on biofilm bacterial community and corrosion process in a reclaimed water distribution system." *Chemosphere*, 215, 62–73.
- Zou, J., Cai, H., Wang, D., Xiao, J., Zhou, Z., and Yuan, B. (2019). "Spectrophotometric determination of trace hydrogen peroxide via the oxidative coloration of DPD using a Fenton system." *Chemosphere*, 224, 646–652

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์
และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ตารางภาคผนวก ก 1 ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาปริมาณสาร DPD

Intensity		ปริมาณสาร DPD (กรัม)											
		0.011	0.022	0.033	0.055	0.11	0.33	0.55	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0
I _R	ค่าเฉลี่ย	156.26	157.69	157.76	158.64	157.16	154.36	152.39	149.94	151.75	149.07	148.04	151.15
	SD _R	0.15	0.10	0.26	0.41	1.03	0.22	0.16	0.16	0.36	0.74	1.25	0.39
I _G	ค่าเฉลี่ย	154.26	153.21	153.48	147.77	139.78	137.76	135.94	135.32	131.34	130.43	131.78	129.57
	SD _G	0.14	0.18	0.18	1.66	0.91	0.23	0.10	0.15	0.34	0.66	1.14	0.39
I _B	ค่าเฉลี่ย	164.90	164.33	164.40	163.48	156.63	153.45	150.93	148.81	146.00	142.77	143.76	144.59
	SD _B	0.10	0.13	0.19	0.89	0.94	0.22	0.14	0.15	0.32	0.69	1.20	0.44

ตารางภาคผนวก ก 2 ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาปริมาณกรดซัลฟูริกในสารละลาย DPD

Intensity	ปริมาณกรดซัลฟูริก (ไมโครลิตร)								
	0	0.08	0.16	0.24	0.4	0.8	2.4	4.0	
I _R	ค่าเฉลี่ย	161.98	165.42	167.89	169.96	172.53	170.81	171.03	165.77
	SD _R	0.08	0.20	0.33	0.48	0.21	0.08	0.28	0.24
I _G	ค่าเฉลี่ย	139.84	142.89	145.88	146.62	149.50	149.85	155.13	160.41
	SD _G	0.03	0.18	0.31	0.42	0.18	0.06	0.31	0.19
I _B	ค่าเฉลี่ย	156.50	160.08	162.81	164.54	167.22	166.32	169.61	168.65
	SD _B	0.08	0.18	0.30	0.50	0.25	0.10	0.30	0.24

ตารางภาคผนวก ก 3 ความแตกต่างของค่าความเข้มสี RGB ระหว่างผลิตภัณฑ์สีที่ได้จากปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์มเปล่า ($I_x - I_{blank}$) จากเซ็นเซอร์ที่มีกรดและไม่มีกรดซัลฟูริกในตัวอย่างน้ำจริง

Intensity	เซ็นเซอร์ไม่มีกรดซัลฟูริก		เซ็นเซอร์มีกรดซัลฟูริก (0.08 ไมโครลิตร)	
	ตัวอย่างสระว่ายน้ำ	ตัวอย่างน้ำประปา	ตัวอย่างสระว่ายน้ำ	ตัวอย่างน้ำประปา
I _R ค่าเฉลี่ย ± SD _R	8.04 ± 0.34	0.31 ± 0.73	6.65 ± 0.94	5.42 ± 0.56
I _G ค่าเฉลี่ย ± SD _G	28.76 ± 0.43	57.41 ± 0.87	30.80 ± 0.74	61.43 ± 0.17
I _B ค่าเฉลี่ย ± SD _B	22.26 ± 0.26	38.40 ± 0.78	24.38 ± 0.84	43.26 ± 0.42

ตารางภาคผนวก ก 4 ปริมาณสาร EDTA ต่ออัตราส่วนของค่าความเข้มสี RGB ระหว่างตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe^{3+} และที่ไม่มี Fe^{3+}

ปริมาณสาร EDTA (กรัม)	Intensity					
	ตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe^{3+}			อัตราส่วนของตัวอย่างคลอรีนที่มี Fe^{3+} ต่อที่ไม่มี Fe^{3+}		
	I_R	I_G	I_B	I_R	I_G	I_B
0	159.29	83.36	115.19	0.9	0.5	0.7
0.008	163.66	86.68	118.62	1.0	0.6	0.7
0.016	163.54	85.48	117.12	1.0	0.6	0.7
0.024	162.74	93.66	121.91	1.0	0.6	0.7
0.04	163.43	98.59	128.39	1.0	0.6	0.8
0.08	162.21	96.38	126.16	1.0	0.6	0.7
0.12	154.97	137.52	152.89	0.9	0.9	0.9
0.16	164.34	149.32	163.27	1.0	1.0	1.0
0.24	163.49	150.55	163.27	1.0	1.0	1.0
0.28	165.80	154.59	166.45	1.0	1.0	1.0
ตัวอย่างคลอรีนที่ไม่มี Fe^{3+}	169.11	152.80	170.36			

ตารางภาคผนวก ก 5 ค่าความเข้มสี RGB ของอัตราส่วนปริมาตรระหว่างฟอสเฟตบัพเฟอร์และรีเอเจนต์ DPD ที่ตัวอย่าง pH 6

Intensity		อัตราส่วนของฟอสเฟตบัพเฟอร์ต่อรีเอเจนต์ DPD ที่ pH 6				
		0:1	0.5:1	1:1	2:1	3:1
I _R	ค่าเฉลี่ย	168.25	166.52	166.65	165.81	166.45
	SD _R	0.70	0.46	0.50	0.18	0.32
I _G	ค่าเฉลี่ย	156.89	152.11	153.60	152.62	153.15
	SD _G	0.72	0.43	0.45	0.18	0.42
I _B	ค่าเฉลี่ย	172.86	168.05	170.04	169.01	168.75
	SD _B	0.78	0.45	0.56	0.18	0.42

ตารางภาคผนวก ก 6 ค่าความเข้มสี RGB ของอัตราส่วนปริมาตรระหว่างบัพเฟอร์ฟอสเฟตและรีเอเจนต์ DPD ที่ตัวอย่าง pH 7

Intensity		อัตราส่วนของฟอสเฟตบัพเฟอร์ต่อรีเอเจนต์ DPD ที่ pH 7				
		0: 1	0.5: 1	1: 1	2: 1	3: 1
I _R	ค่าเฉลี่ย	161.03	166.95	164.80	161.49	166.77
	SD _R	0.60	0.25	0.38	0.27	0.36
I _G	ค่าเฉลี่ย	147.87	153.51	152.13	150.81	154.08
	SD _G	0.51	0.23	0.41	0.38	0.40
I _B	ค่าเฉลี่ย	164.64	170.22	168.56	165.27	169.18
	SD _B	0.59	0.31	0.43	0.28	0.47

ตารางภาคผนวก ก 7 ค่าความเข้มสี RGB ของอัตราส่วนปริมาตรระหว่างบัพเฟอร์ฟอสเฟตและรีเอเจนต์ DPD ที่ตัวอย่าง pH 8

Intensity		อัตราส่วนของฟอสเฟตบัพเฟอร์ต่อรีเอเจนต์ DPD ที่ pH 8				
		0:1	0.5:1	1:1	2:1	3:1
I _R	ค่าเฉลี่ย	164.78	166.22	167.87	166.24	164.91
	SD _R	0.44	1.09	0.73	0.32	0.25
I _G	ค่าเฉลี่ย	152.72	157.10	157.65	156.45	156.42
	SD _G	0.42	0.98	0.63	0.26	0.22
I _B	ค่าเฉลี่ย	169.31	172.27	173.40	171.16	170.91
	SD _B	0.44	1.11	0.67	0.36	0.24

ตารางภาคผนวก ก 8 ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาปริมาณนุ่น

Intensity		ปริมาณนุ่น (กรัม)			
		0.025	0.05	0.1	0.2
I _R	ค่าเฉลี่ย	156.79	160.41	160.96	157.42
	SD _R	0.20	0.40	0.60	0.14
I _G	ค่าเฉลี่ย	141.62	146.96	148.44	144.92
	SD _G	0.22	0.40	0.57	0.26
I _B	ค่าเฉลี่ย	158.20	162.13	163.64	159.41
	SD _B	0.28	0.40	0.65	0.19

ตารางภาคผนวก ก 9 ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

Intensity		ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (กรัม)				
		0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
I_R	ค่าเฉลี่ย	160.50	165.18	164.83	167.33	166.14
	SD_R	0.69	0.08	0.35	0.37	0.46
I_G	ค่าเฉลี่ย	144.07	148.66	148.72	150.27	149.47
	SD_G	0.64	0.12	0.36	0.27	0.38
I_B	ค่าเฉลี่ย	161.64	166.35	166.52	168.32	167.35
	SD_B	0.65	0.13	0.34	0.34	0.44

ตารางภาคผนวก ก 10 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{blank}$) ของการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

Intensity		อุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง (องศาเซลเซียส)						
		50	60	70	80	90	100	110
I_R	ค่าเฉลี่ย	5.53	4.63	4.46	4.90	4.08	0.82	0.88
	SD_R	0.00	0.17	0.29	0.32	0.05	0.33	0.36
I_G	ค่าเฉลี่ย	24.49	26.06	26.45	25.04	17.92	2.18	1.49
	SD_G	0.07	0.13	0.24	0.23	0.14	0.43	0.29
I_B	ค่าเฉลี่ย	18.36	17.77	18.57	17.99	13.52	2.23	2.16
	SD_B	0.02	0.24	0.27	0.27	0.08	0.48	0.37

ตารางภาคผนวก ก 11 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{blank}$) ของการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์

Intensity		เวลาที่ใช้อบแห้ง (นาทิจ)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
I_R	ค่าเฉลี่ย	7.20	3.64	2.67	4.45	6.59	2.63	6.45	4.51
	SD_R	0.27	0.23	0.19	0.13	0.06	0.22	0.43	0.27
I_G	ค่าเฉลี่ย	25.72	24.84	24.95	24.89	25.36	22.96	22.60	22.69
	SD_G	0.23	0.24	0.38	0.37	0.03	0.21	0.46	0.34
I_B	ค่าเฉลี่ย	19.87	17.47	18.03	17.88	18.65	16.85	18.12	16.70
	SD_B	0.27	0.25	0.45	0.23	0.06	0.23	0.25	0.34

ตารางภาคผนวก ก 12 น้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งของแผ่นฟิล์มที่ระยะเวลาต่างๆ ในการสังเคราะห์เซ็นเซอร์ (อุณหภูมิที่ใช้คงที่ 60 องศาเซลเซียส)

หลอดที่	น้ำหนักก่อนการอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังการอบแห้งในระยะเวลาที่ใช้ 20 - 90 นาที (กรัม)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
1	0.3336	0.291	0.2673	0.2468	0.2392	0.2399	0.2398	0.2398	0.2397
2	0.3364	0.2954	0.2728	0.2527	0.2392	0.2384	0.2383	0.2383	0.2382
3	0.3277	0.2861	0.2637	0.2438	0.2309	0.2306	0.2307	0.2304	0.2304
เฉลี่ย	0.3326	0.2908	0.2679	0.2478	0.2364	0.2363	0.2363	0.2362	0.2361

ตารางภาคผนวก ก 13 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{\text{blank}}$) ของการศึกษาระยะเวลาที่สารละลายมาตรฐานคลอรีนทำปฏิกิริยากับเซ็นเซอร์

Intensity	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	
I_R	ค่าเฉลี่ย	2.19	5.28	5.04	5.09	5.34	4.55	3.52	4.08	2.38	3.69	3.57	3.86	3.78	5.08
	SD_R	0.11	0.11	0.43	0.84	0.63	0.15	0.05	0.65	0.47	0.39	0.01	0.85	0.82	0.45
I_G	ค่าเฉลี่ย	23.86	25.63	25.82	26.08	25.93	22.34	22.72	22.77	22.97	22.85	22.15	22.06	22.70	21.83
	SD_G	0.01	0.10	0.46	0.98	0.59	0.16	0.00	0.67	0.19	0.32	0.07	0.82	1.06	0.49
I_B	ค่าเฉลี่ย	15.66	19.09	19.09	19.28	19.09	15.87	15.67	16.59	16.68	16.41	15.51	15.89	15.99	15.59
	SD_B	0.07	0.08	0.48	0.85	0.61	0.05	0.03	0.65	0.33	0.27	0.04	0.96	0.90	0.48

ภาคผนวก ข

ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาไอออนอื่นๆ ที่รบกวนการวิเคราะห์

ตารางภาคผนวก ข 1 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Na^+ ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Na^+ (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	165.03	167.98	164.64	163.67	165.37	166.01	161.5	159.33	162.35	155.44	155.59	158.59
	SD_R	0.43	0.29	0.31	0.18	0.62	0.32	0.56	0.63	0.72	0.75	0.33	0.45
I_G	ค่าเฉลี่ย	144.67	144.78	143.45	142.33	142.11	143.42	143.37	143.58	159.19	158.95	159.04	163.34
	SD_G	0.46	0.27	0.48	0.17	0.54	0.31	0.59	0.56	0.62	0.78	0.32	0.38
I_B	ค่าเฉลี่ย	163.36	163.37	160.89	160.08	161.96	163.19	160.95	160.19	171.37	172.05	171.13	175.71
	SD_B	0.49	0.28	0.38	0.18	0.65	0.35	0.62	0.70	0.69	0.83	0.37	0.39

ตารางภาคผนวก ข 2 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ NH^+ ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ NH^+ (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	165.03	164.14	165.54	166.79	165.7	163.09	164.26	165.45	164.03	165.48	163.69	159.14
	SD_R	0.43	0.69	0.54	0.50	0.34	0.78	0.30	1.09	0.13	0.49	0.50	0.71
I_G	ค่าเฉลี่ย	144.67	143.79	144.15	146.2	145.88	144.06	146.53	155.97	154.85	164.77	163.85	158.92
	SD_G	0.46	0.70	0.47	0.45	0.27	0.73	0.19	0.95	0.23	0.43	0.42	0.66
I_B	ค่าเฉลี่ย	163.36	160.55	163.8	165.56	164.86	163.12	163	171.14	169.86	179.12	177.58	172.42
	SD_B	0.49	0.73	0.52	0.46	0.39	0.80	0.33	1.04	0.19	0.51	0.47	0.67

ตารางภาคผนวก ข 3 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Cu^{2+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Cu^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	167.69	167.14	165.92	165.74	167.86	163.72	167.24	166.04	165.73	164.8	159.81	153.51
	SD_R	0.38	0.26	0.46	0.20	0.20	0.19	0.41	0.57	0.73	0.45	1.51	0.11
I_G	ค่าเฉลี่ย	148.25	147.84	147.07	149.27	150.04	148.91	154.69	158.36	158.58	157.31	164.57	162.2
	SD_G	0.37	0.27	0.50	0.17	0.17	0.15	0.39	0.53	0.79	0.51	1.73	0.25
I_B	ค่าเฉลี่ย	166.34	165.12	164.32	166.14	168.11	163.88	169.37	171.03	171.66	173.91	180.38	179.92
	SD_B	0.38	0.30	0.53	0.18	0.28	0.14	0.47	0.65	0.76	0.50	1.49	0.10

ตารางภาคผนวก ข 4 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Ca^{2+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Ca^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	161.11	161.14	160.99	158.63	161.38	159.33	165.47	162.67	163.54	163.41	158.97	161.83
	SD_R	0.96	0.27	0.67	0.91	0.32	0.32	0.88	0.56	0.56	0.68	1.37	0.58
I_G	ค่าเฉลี่ย	149.16	148.52	149.88	147.28	149.47	147.47	151.72	150.12	153.17	150.12	145.79	127.66
	SD_G	0.90	0.24	0.56	0.94	0.25	0.34	0.80	0.50	0.47	0.63	1.30	0.47
I_B	ค่าเฉลี่ย	166.11	167.60	168.03	165.26	168.02	165.31	170.87	168.47	170.34	167.84	163.56	152.80
	SD_B	0.94	0.27	0.67	0.98	0.33	0.32	0.86	0.59	0.51	0.65	1.37	0.50

ตารางภาคผนวก ข 5 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Mn^{2+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Mn^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	165.03	159.38	162.61	162.91	162.48	161.33	157.55	158.74	159.51	155.37	159.82	163.02
	SD_R	0.43	0.67	0.44	0.45	1.22	0.47	0.82	0.71	0.85	0.18	1.00	0.42
I_G	ค่าเฉลี่ย	144.67	139.75	141.30	140.90	140.44	139.16	136.57	135.34	136.50	143.46	144.56	146.94
	SD_G	0.46	0.62	0.45	0.36	1.08	0.36	0.71	0.65	0.74	0.17	1.13	0.54
I_B	ค่าเฉลี่ย	163.36	158.07	159.71	160.20	160.07	158.41	155.06	154.33	155.34	162.07	164.01	166.84
	SD_B	0.49	0.68	0.42	0.44	1.19	0.46	0.78	0.68	0.77	0.19	0.94	0.46

ตารางภาคผนวก ข 6 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Mg^{2+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Mg^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	167.69	166.90	165.76	162.85	165.31	165.24	159.72	160.74	158.04	159.13	168.38	174.45
	SD_R	0.38	0.59	1.90	0.72	0.54	0.43	0.74	0.55	0.59	0.38	1.07	0.59
I_G	ค่าเฉลี่ย	148.25	147.87	150.23	145.83	146.27	145.65	139.85	139.52	140.34	148.45	165.30	173.13
	SD_G	0.37	0.43	1.73	0.73	0.46	0.29	0.66	0.45	0.54	0.34	1.19	0.59
I_B	ค่าเฉลี่ย	166.34	165.26	167.74	162.19	163.09	162.99	156.40	158.63	156.46	166.66	179.98	187.49
	SD_B	0.38	0.59	1.88	0.65	0.57	0.40	0.68	0.52	0.66	0.39	0.89	0.67

ตารางภาคผนวก ข 7 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Fe^{2+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Fe^{2+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000
I_R	ค่าเฉลี่ย	162.80	162.27	162.40	167.01	167.39	169.22	172.37	173.44	171.20	171.22
	SD_R	0.39	0.47	0.21	0.25	0.19	0.28	0.54	0.34	0.19	0.34
I_G	ค่าเฉลี่ย	149.34	155.53	160.64	166.17	166.48	172.36	175.16	176.70	176.12	175.49
	SD_G	0.37	0.46	0.24	0.31	0.23	0.29	0.75	0.34	0.18	0.32
I_B	ค่าเฉลี่ย	167.48	170.47	173.56	178.38	178.60	183.17	185.95	187.02	185.62	184.45
	SD_B	0.43	0.50	0.23	0.27	0.19	0.30	0.70	0.36	0.20	0.39

ตารางภาคผนวก ข 8 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Fe^{3+} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Fe^{3+} (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000
I_R	ค่าเฉลี่ย	169.11	169.19	166.47	157.99	159.35	165.54	161.68	155.64	115.42	41.23
	SD_R	0.32	0.28	0.62	1.31	0.19	0.85	0.70	0.60	1.31	0.47
I_G	ค่าเฉลี่ย	152.80	152.29	152.62	135.15	129.95	103.73	96.61	54.41	44.04	36.65
	SD_G	0.29	0.21	0.60	1.20	0.13	0.52	0.48	0.17	0.22	0.33
I_B	ค่าเฉลี่ย	170.36	169.33	167.47	152.32	146.94	133.98	127.53	81.20	66.37	47.65
	SD_B	0.29	0.28	0.66	1.24	0.13	0.79	0.62	0.27	1.48	0.43

ตารางภาคผนวก ข 9 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ Cl^- ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ Cl^- (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	165.03	163.15	160.31	161.67	159.87	165.36	164.08	162.44	163.79	157.64	160.22	154.27
	SD_R	0.43	0.33	0.44	0.51	0.85	0.56	0.68	0.60	0.23	0.80	0.28	0.41
I_G	ค่าเฉลี่ย	144.67	144.73	145.00	144.05	143.62	143.48	144.00	142.99	146.42	145.08	147.90	140.27
	SD_G	0.46	0.32	0.37	0.45	0.70	0.44	0.77	0.54	0.24	0.76	0.27	0.36
I_B	ค่าเฉลี่ย	163.36	163.29	161.91	161.77	159.92	162.96	160.86	160.90	163.85	161.72	164.96	157.56
	SD_B	0.49	0.34	0.46	0.49	0.81	0.51	0.77	0.62	0.26	0.84	0.26	0.36

ตารางภาคผนวก ข 10 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ CO_3^{2-} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรินอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ CO_3^{2-} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	166.13	167.51	167.04	163.51	164.80	167.21	167.15	164.13	158.71	150.57	143.18	144.28
	SD_R	0.48	0.44	0.50	0.19	0.58	0.39	0.61	0.38	0.36	0.79	0.39	0.79
I_G	ค่าเฉลี่ย	146.38	146.69	144.84	145.27	145.39	147.21	146.79	148.19	147.50	136.63	136.57	138.62
	SD_G	0.54	0.36	0.42	0.18	0.48	0.45	0.47	0.41	0.40	0.65	0.34	0.79
I_B	ค่าเฉลี่ย	163.49	165.73	164.04	162.56	163.20	165.56	164.84	165.68	162.86	154.69	151.30	148.15
	SD_B	0.57	0.40	0.47	0.21	0.60	0.42	0.55	0.37	0.42	0.76	0.38	0.88

ตารางภาคผนวก ข 11 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ PO_4^{2-} ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรินอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ PO_4^{2-} (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	169.11	166.17	167.27	166.33	169.77	167.17	167.48	163.96	165.63	165.91	163.55	161.27
	SD_R	0.32	0.52	0.52	0.48	0.86	0.36	0.22	0.46	0.29	1.03	0.49	0.44
I_G	ค่าเฉลี่ย	152.80	150.87	152.27	154.02	153.63	151.81	152.96	156.05	156.45	156.43	156.89	156.71
	SD_G	0.29	0.47	0.54	0.45	0.79	0.33	0.17	0.37	0.23	0.97	0.37	0.35
I_B	ค่าเฉลี่ย	170.36	168.22	169.71	170.22	170.99	169.10	169.93	173.29	174.06	173.97	172.93	171.81
	SD_B	0.29	0.57	0.52	0.47	0.84	0.38	0.18	0.43	0.26	1.01	0.46	0.39

ตารางภาคผนวก ข 12 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ NO_3^- ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ NO_3^- (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000	2000	5000
I_R	ค่าเฉลี่ย	156.24	157.27	154.18	156.90	156.31	156.70	158.91	158.65	157.88	156.26	160.81	159.46
	SD_R	0.80	0.51	0.68	0.99	0.82	0.65	0.54	0.55	0.41	0.63	0.50	0.30
I_G	ค่าเฉลี่ย	146.51	146.47	145.88	147.60	147.94	147.65	149.14	148.88	148.56	147.39	151.46	152.43
	SD_G	0.69	0.47	0.64	1.02	0.65	0.57	0.48	0.61	0.39	0.60	0.41	0.22
I_B	ค่าเฉลี่ย	165.17	165.15	163.16	164.77	165.09	164.92	166.58	166.57	165.74	164.32	169.05	168.93
	SD_B	0.74	0.51	0.71	1.08	0.87	0.62	0.53	0.59	0.43	0.62	0.49	0.29

ตารางภาคผนวก ข 13 ค่าความเข้มสี RGB ของผลิตภัณฑ์ที่มีการรบกวนของ MnO_4^- ในความเข้มข้นต่างๆ ต่อการตรวจวัดคลอรีนอิสระ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Intensity		ความเข้มข้นของ MnO_4^- (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
		0	1	3	5	10	50	100	200	500	1000
I_R	ค่าเฉลี่ย	149.64	161.72	155.11	162.71	152.13	119.96	71.95	52.38	54.33	50.46
	SD_R	0.68	0.67	1.18	0.56	0.62	0.17	0.59	0.42	0.17	0.21
I_G	ค่าเฉลี่ย	137.17	120.51	84.04	84.72	61.41	43.94	44.34	41.34	43.37	45.04
	SD_G	0.60	0.57	0.76	0.41	0.36	0.04	0.11	0.57	0.16	0.20
I_B	ค่าเฉลี่ย	155.15	148.35	118.58	121.00	94.26	44.59	47.51	43.62	45.48	43.63
	SD_B	0.65	0.63	0.98	0.49	0.48	0.12	0.13	0.51	0.09	0.22

ภาคผนวก ค

ค่าความเข้มสี RGB และค่าจุดกลืนแสง RGB ที่ใช้สร้างกราฟมาตรฐาน
และความแม่นยำของการตรวจวัดคลอรีนด้วยเซ็นเซอร์

ตารางภาคผนวก ค 1 ค่าความเข้มสี RGB (I_x) และค่าดูดกลืนแสง RGB (A_x) ของผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลอรีนอิสระ ในช่วงความเข้มข้น 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของคลอรีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเข้มสี						ค่าดูดกลืนแสง					
	Intensity			Standard Deviation (SD)			Absorbance			Standard Deviation (SD)		
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	A_R	A_G	A_B	SD_R	SD_G	SD_B
0.1	173.22	177.34	186.99	0.70	0.73	0.68	0.17	0.16	0.13	0.00	0.00	0.00
0.3	173.12	177.22	187.71	0.51	0.49	0.52	0.17	0.16	0.13	0.00	0.00	0.00
0.5	173.24	177.19	186.49	0.36	0.34	0.26	0.17	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00
1	173.24	176.18	186.08	0.54	0.58	0.70	0.17	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00
2	168.94	169.24	180.79	0.85	0.78	0.86	0.18	0.18	0.15	0.00	0.00	0.00
4	167.53	161.88	175.60	0.41	0.43	0.47	0.18	0.20	0.16	0.00	0.00	0.00
7	165.33	145.93	164.97	0.51	0.47	0.48	0.19	0.24	0.19	0.00	0.00	0.00
10	165.15	133.95	156.86	0.83	0.73	0.83	0.19	0.28	0.21	0.00	0.00	0.00
15	160.90	111.48	140.24	0.55	0.41	0.50	0.20	0.36	0.26	0.00	0.00	0.00
20	163.56	102.64	134.68	0.40	0.33	0.42	0.19	0.40	0.28	0.00	0.00	0.00
30	163.70	87.10	122.60	0.22	0.16	0.20	0.19	0.47	0.32	0.00	0.00	0.00
50	161.59	67.27	101.74	0.35	0.18	0.25	0.20	0.58	0.40	0.00	0.00	0.00

ตารางภาคผนวก ค 2 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{\text{blank}}$) และค่าดูดกลืนแสง RGB ($A_x - A_{\text{blank}}$) ของผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลอรีนอิสระ ในช่วงความเข้มข้น 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของคลอรีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเข้มสี						ค่าดูดกลืนแสง					
	Intensity			Standard Deviation (SD)			Absorbance			Standard Deviation (SD)		
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	A_R	A_G	A_B	SD_R	SD_G	SD_B
0.1	3.85	3.94	4.08	0.69	0.73	0.58	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.3	3.95	4.06	3.36	0.88	0.97	0.74	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.5	3.83	4.09	4.57	1.02	1.12	1.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
1	3.83	5.10	4.99	0.85	0.88	0.57	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
2	8.13	12.04	10.28	0.54	0.69	0.41	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
4	9.54	19.39	15.46	0.98	1.03	0.79	0.02	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00
7	11.74	35.34	26.10	0.88	0.99	0.79	0.03	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00
10	11.92	47.33	34.21	0.56	0.74	0.44	0.03	0.13	0.09	0.00	0.00	0.00
15	16.16	69.80	50.83	0.84	1.05	0.76	0.04	0.21	0.13	0.00	0.00	0.00
20	13.51	78.64	56.39	0.99	1.14	0.85	0.03	0.25	0.15	0.00	0.00	0.00
30	13.37	94.18	68.47	1.17	1.30	1.07	0.03	0.32	0.19	0.00	0.00	0.00
50	15.48	114.00	89.32	1.04	1.28	1.02	0.04	0.43	0.27	0.00	0.00	0.00

ตารางภาคผนวก ค 3 ค่าความเข้มสี RGB (I_{total}) และ ค่าดูดกลืนแสง RGB (A_{total}) ของผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลอรีนอิสระ ในช่วงความเข้มชั้น 0.1 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มชั้นของคลอรีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเข้มสี		ค่าดูดกลืนแสง	
	Intensity	Standard Deviation (SD)	Absorbance	Standard Deviation (SD)
	$I_R + I_G + I_B$	$SD_R + SD_G + SD_B$	$A_R + A_G + A_B$	$SD_R + SD_G + SD_B$
0.1	537.55	2.12	0.46	0.01
0.3	538.05	1.53	0.46	0.00
0.5	536.92	0.96	0.46	0.00
1	535.49	1.82	0.47	0.00
2	518.96	2.49	0.51	0.01
4	505.01	1.31	0.54	0.00
7	476.23	1.47	0.62	0.00
10	455.96	2.39	0.68	0.01
15	412.62	1.47	0.82	0.00
20	400.87	1.15	0.87	0.00
30	373.40	0.59	0.98	0.00
50	330.60	0.78	1.18	0.00

ตารางภาคผนวก ค 4 ค่าการดูดกลืนแสงกับสารละลายมาตรฐานคลอรีนอิสระ โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจวัด ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร

Absorbance (515 nm)	ความเข้มข้นของคลอรีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)															
	0.01	0.025	0.05	0.1	0.3	0.5	1	2	4	6	8	10	15	20	30	50
1	0.003	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.008	0.018	0.074	0.138	0.189	0.250	0.363	0.484	0.663	0.824
2	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.003	0.008	0.017	0.073	0.138	0.189	0.250	0.363	0.485	0.664	0.823
3	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.007	0.017	0.073	0.138	0.189	0.248	0.362	0.483	0.665	0.820
ค่าเฉลี่ย	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.008	0.017	0.073	0.138	0.189	0.249	0.363	0.484	0.664	0.822
SD	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002

ตารางภาคผนวก ค 5 ค่าความเข้มสี RGB และค่าดูดกลืนแสง RGB ของการศึกษาความแม่นยำการตรวจวัด (Accuracy) คลอรีนที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร

พารามิเตอร์	Intensity			Absorbance		
	I_x	$I_x - I_{\text{blank}}$	I_{total}	A_x	$A_x - A_{\text{blank}}$	A_{total}
G	165.56	15.71	511.73	0.19	0.04	0.52
B	178.50	12.57		0.15	0.03	

ภาคผนวก ง

ค่าความเข้มสี RGB ของการศึกษาความเสถียรเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

ตารางภาคผนวก ง 1 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{blank}$) จากการศึกษาความเสถียรของเซ็นเซอร์ โดยเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องในรูปแบบไม่สุญญากาศและสุญญากาศ

ระยะเวลา	แบบไม่สุญญากาศ						แบบสุญญากาศ					
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B
0 วัน	8.19	24.33	18.99	0.35	0.34	0.38	8.19	24.33	18.99	0.35	0.34	0.38
1 วัน	9.62	23.85	17.98	0.45	0.49	0.54	8.06	23.10	18.45	0.55	0.47	0.57
2 วัน	6.00	23.93	18.10	0.01	0.05	0.13	4.44	22.72	16.68	0.52	0.47	0.50
3 วัน	5.68	23.52	17.20	0.60	0.79	0.78	4.48	22.31	16.21	0.02	0.08	0.12
4 วัน	8.89	23.32	17.57	0.08	0.04	0.13	9.63	22.27	18.03	0.11	0.27	0.20
5 วัน	5.09	22.38	17.23	0.15	0.08	0.19	5.98	21.51	18.36	0.30	0.29	0.30
6 วัน	4.77	21.15	16.77	0.97	0.92	0.99	6.81	20.82	16.75	0.46	0.41	0.48
1 สัปดาห์	5.90	18.80	14.55	0.12	0.05	0.11	4.65	18.47	13.64	0.27	0.01	0.30
2 สัปดาห์	3.72	16.82	12.29	0.04	0.05	0.01	5.55	17.53	11.26	0.57	0.52	0.57
3 สัปดาห์	3.72	15.97	11.35	0.01	0.09	0.07	4.51	16.37	9.79	0.14	0.02	0.17
1 เดือน	2.83	14.89	11.19	0.31	0.18	0.27	2.47	14.00	9.10	0.73	0.68	0.66
2 เดือน	3.62	10.14	10.40	0.40	0.35	0.33	3.31	8.17	6.58	0.32	0.25	0.24
3 เดือน	7.86	4.64	6.14	0.55	0.54	0.56	5.76	3.91	6.29	0.30	0.22	0.23
4 เดือน	3.73	2.80	2.34	0.00	0.11	0.03	3.93	2.73	2.49	0.19	0.26	0.23
5 เดือน	3.07	2.38	2.89	0.24	0.21	0.25	3.80	2.99	3.39	0.21	0.27	0.31
6 เดือน	1.17	2.47	3.08	0.02	0.01	0.01	2.45	1.95	1.34	0.11	0.15	0.14

ตารางภาคผนวก ง 2 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{\text{blank}}$) จากการศึกษาความเสถียรของเซ็นเซอร์ โดยเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นทั้งรูปแบบไม่สุญญากาศและสุญญากาศ

ระยะเวลา	แบบไม่สุญญากาศ						แบบสุญญากาศ					
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B
0 วัน	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38
1 วัน	9.58	24.89	18.97	0.48	0.28	0.36	6.41	24.56	17.42	0.01	0.07	0.12
2 วัน	6.72	24.67	18.39	0.11	0.00	0.08	7.75	24.68	19.22	0.18	0.25	0.18
3 วัน	7.71	24.90	19.33	0.27	0.26	0.32	8.65	24.91	20.04	0.24	0.18	0.24
4 วัน	8.64	24.94	19.43	0.19	0.12	0.18	9.55	24.71	20.18	0.64	0.71	0.60
5 วัน	11.28	24.79	20.51	0.40	0.36	0.35	11.68	24.66	21.64	0.26	0.33	0.37
6 วัน	7.66	23.41	18.19	0.53	0.35	0.44	12.84	23.81	20.48	0.29	0.25	0.25
1 สัปดาห์	9.11	22.98	15.26	0.26	0.28	0.27	11.01	22.79	17.16	0.09	0.05	0.09
2 สัปดาห์	7.33	21.41	15.23	0.53	0.57	0.60	0.21	12.97	4.06	0.29	0.31	0.37
3 สัปดาห์	7.99	21.24	18.14	0.12	0.13	0.14	4.74	12.36	10.51	0.19	0.22	0.24
1 เดือน	6.27	20.86	16.86	0.09	0.02	0.10	3.39	11.22	8.26	0.09	0.13	0.19
2 เดือน	8.92	20.00	18.13	0.88	0.89	0.94	3.36	10.01	8.90	0.23	0.21	0.25
3 เดือน	6.06	18.83	15.50	0.32	0.24	0.29	3.03	9.81	5.31	0.05	0.13	0.10
4 เดือน	6.74	18.33	14.20	0.60	0.74	0.62	2.37	9.51	6.87	0.19	0.30	0.25
5 เดือน	6.65	16.91	15.41	0.19	0.23	0.22	3.89	9.53	7.26	0.18	0.13	0.16
6 เดือน	4.83	14.79	11.40	1.89	1.87	1.73	0.16	9.84	11.15	0.14	0.02	0.12

ตารางภาคผนวก ง 3 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{\text{blank}}$) จากการศึกษาความเสถียรของเซ็นเซอร์ โดยเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นในรูปแบบไม่สุญญากาศและสุญญากาศ

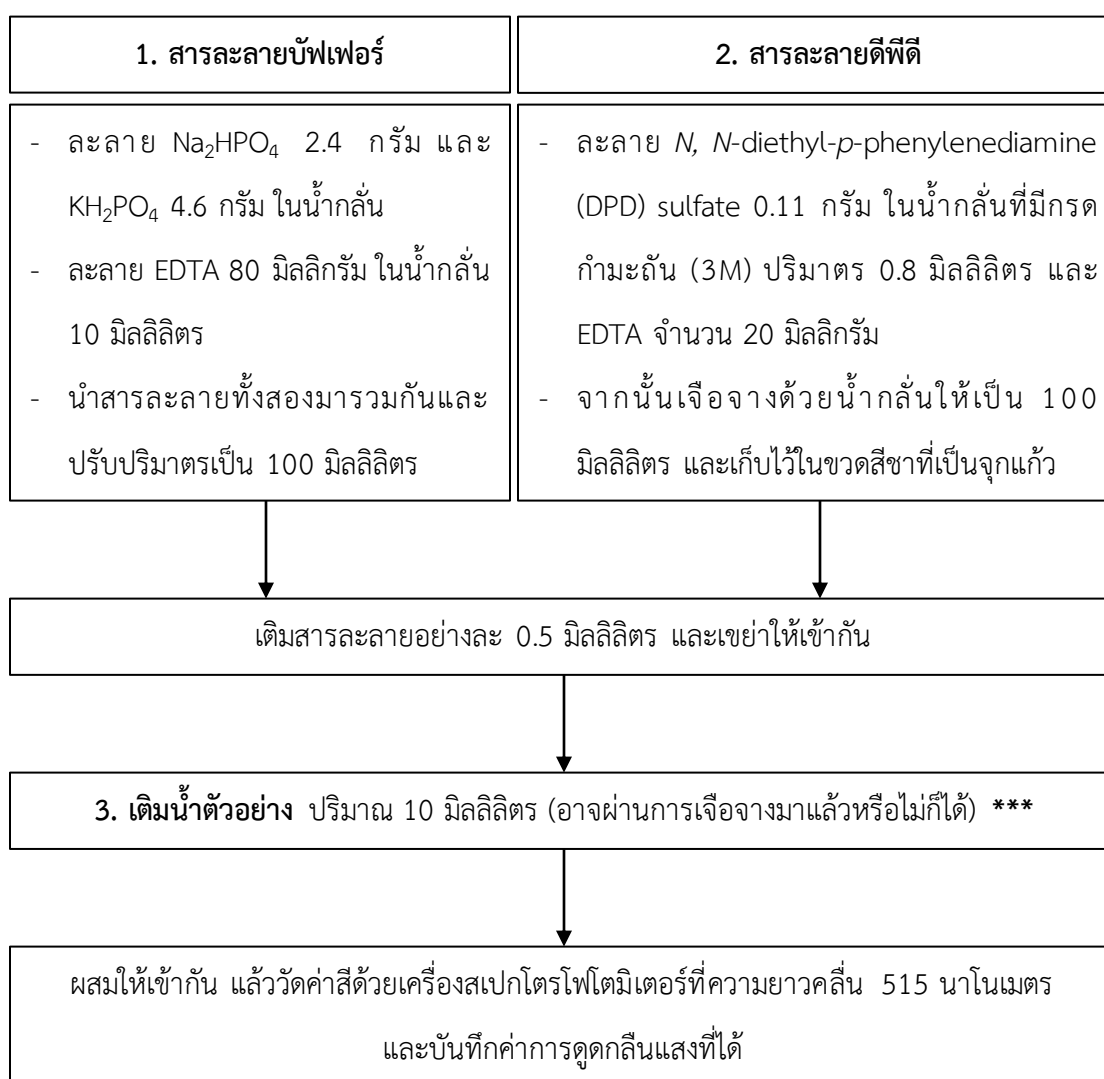
ระยะเวลา	แบบไม่สุญญากาศ						แบบสุญญากาศ					
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B
0 วัน	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38
1 วัน	9.02	25.14	19.00	1.47	1.46	1.31	11.88	24.74	20.01	0.12	0.18	0.17
2 วัน	5.97	25.16	18.85	0.12	0.02	0.14	9.99	25.49	20.54	0.26	0.24	0.31
3 วัน	7.51	25.22	19.09	0.67	0.70	0.76	8.39	25.11	19.50	0.16	0.24	0.22
4 วัน	4.89	25.14	18.35	0.05	0.03	0.03	9.75	24.88	20.05	0.01	0.07	0.08
5 วัน	5.84	24.97	18.36	0.17	0.07	0.17	10.44	24.62	20.29	0.44	0.14	0.42
6 วัน	6.84	24.96	18.81	0.02	0.13	0.36	10.08	24.93	20.52	0.28	0.19	0.21
1 สัปดาห์	7.43	25.09	17.88	0.07	0.21	0.18	6.84	24.05	17.36	0.59	0.65	0.61
2 สัปดาห์	7.57	25.09	18.45	0.70	0.88	0.87	7.40	24.91	18.53	0.79	0.87	0.87
3 สัปดาห์	9.29	25.01	19.08	0.65	0.63	0.70	5.94	24.52	16.79	0.40	0.38	0.39
1 เดือน	10.59	25.26	19.70	0.00	0.13	0.06	8.84	24.83	18.60	0.20	0.38	0.26
2 เดือน	11.88	24.90	20.86	0.08	0.07	0.06	7.62	24.56	19.15	0.04	0.07	0.05
3 เดือน	6.52	24.52	17.61	0.29	0.28	0.23	6.49	23.98	16.89	0.50	0.56	0.58
4 เดือน	7.20	24.24	17.14	0.45	0.39	0.40	6.27	23.41	16.69	0.01	0.05	0.04
5 เดือน	12.46	24.62	21.09	0.69	0.74	0.51	10.19	22.91	18.17	0.26	0.24	0.22
6 เดือน	10.09	24.58	17.76	0.04	0.08	0.03	9.51	22.77	18.03	0.07	0.23	0.26

ตารางภาคผนวก ง 4 ค่าความเข้มสี RGB ($I_x - I_{\text{blank}}$) จากการศึกษาความเสถียรของเซ็นเซอร์ โดยเก็บรักษาไว้ในช่องแช่แข็งในรูปแบบไม่สุญญากาศและสุญญากาศ

ระยะเวลา	แบบไม่สุญญากาศ						แบบสุญญากาศ					
	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B	I_R	I_G	I_B	SD_R	SD_G	SD_B
0 วัน	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38	7.17	25.17	18.65	0.35	0.34	0.38
1 วัน	7.61	24.68	18.46	0.31	0.24	0.09	8.69	24.25	18.93	0.35	0.41	0.38
2 วัน	10.48	25.01	20.29	0.19	0.36	0.14	5.10	24.65	18.01	0.00	0.12	0.07
3 วัน	5.18	24.54	17.78	0.20	0.20	0.19	5.14	23.84	17.77	0.49	0.47	0.53
4 วัน	4.80	24.65	17.68	0.16	0.25	0.23	5.98	23.88	18.05	0.28	0.16	0.25
5 วัน	9.52	24.84	19.61	0.15	0.53	0.31	8.67	23.80	18.92	0.28	0.06	0.26
6 วัน	8.56	25.29	19.56	0.19	0.30	0.27	10.09	24.67	19.95	0.22	0.12	0.11
1 สัปดาห์	8.17	24.94	18.30	0.26	0.29	0.28	9.27	24.24	18.56	0.14	0.14	0.15
2 สัปดาห์	6.46	25.13	17.52	0.27	0.11	0.27	5.13	24.36	16.64	0.21	0.02	0.17
3 สัปดาห์	10.23	24.74	19.11	0.05	0.14	0.08	7.86	23.85	17.60	0.36	0.33	0.33
1 เดือน	7.96	24.83	18.01	0.18	0.08	0.06	8.92	24.78	18.34	0.54	0.29	0.46
2 เดือน	9.22	24.99	18.63	0.07	0.10	0.03	6.98	24.01	17.14	0.30	0.40	0.35
3 เดือน	7.77	24.80	18.14	0.21	0.24	0.21	9.49	23.92	18.91	0.13	0.20	0.15
4 เดือน	8.76	25.04	18.88	1.06	1.16	1.16	7.40	23.77	17.79	1.32	1.31	1.27
5 เดือน	10.10	24.65	18.92	0.30	0.40	0.45	10.53	23.92	18.90	0.06	0.02	0.03
6 เดือน	10.44	24.81	19.66	0.19	0.40	0.25	9.30	23.38	17.74	0.00	0.13	0.07

ภาคผนวก ฉ

วิธีมาตรฐาน (DPD colorimetric method)



รูปภาคผนวก ฉ 1 แผนผังการวิเคราะห์คลอรีนอิสระด้วยวิธีมาตรฐานกับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

หมายเหตุ *** ควรเติมสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลาย DPD ลงขวดบรรจุก่อนเติมน้ำตัวอย่างลงไป เพราะถ้าเติมตัวอย่างก่อนเติมบัฟเฟอร์การทดลองจะล้มเหลวทันที