



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจินตและเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานินสำหรับตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

Preparation of anthocyanin loaded alginate-cellulose blend film for detect heavy metal ions

ชื่อนิสิต นายเมธา ขวนประสิทธิ์กุล

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจิเนตและเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานิน
สำหรับตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

Preparation of anthocyanin loaded alginate-cellulose blend film
for detect heavy metal ions

โดย

นายเมธา ชวนประสิทธิ์กุล

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

โครงการ การเตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจินตและเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานิน
สำหรับตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

โดย นายเมธา ชวนประสิทธิ์กุล

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... นันท วรรณ ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวนศิริ)

..... พัทธรา ธีรพิบูลย์เดช อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธรา ธีรพิบูลย์เดช)

..... อุ่นอบ กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องฟ้า อุ่นอบ)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)
วันที่ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2560

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การเตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจินตและเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานิน
สำหรับตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

ชื่อนิติโนโครงการ นายเมธา ขวนประสิทธิ์กุล เลขประจำตัว 5533138323

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธรา อีร์พิบูลย์เดช

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

เตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจินตและเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานินได้ 6 แบบ โดยใช้แอนโทไซยานินที่สกัดได้จากดอกอัญชันด้วยเมทานอล พบว่า เซลลูโลสช่วยในการกระจายตัวของแอนโทไซยานินในแผ่นฟิล์มผสมและการแช่แผ่นฟิล์มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะเพิ่มความหนาและความแข็งแรงของฟิล์ม นอกจากนี้สีของแอนโทไซยานินมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมไอออนโลหะทองแดง (Cu^{2+}) และเหล็ก (Fe^{3+}) ความเข้มของการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมยูวีในสารละลายผสมระหว่างแอนโทไซยานินและไอออนโลหะทองแดง (Cu^{2+})/เหล็ก (Fe^{3+}) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะ แผ่นฟิล์มผสมที่มีอัลจินตและเซลลูโลสแต่ไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุดในการตรวจวัดการเปลี่ยนสีของสารละลายโลหะ

คำสำคัญ: แอนโทไซยานิน, อัลจินต, เซลลูโลส, แผ่นฟิล์มผสม, ไอออนโลหะ

Project Title Preparation of anthocyanin loaded alginate-cellulose blend film
for detect heavy metal ions

Student Name Mr Medha Chuanprasitkul Student ID 5533138323

Advisor Name Assistant Professor Pattara Thiraphibundet, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2016

Abstract

Six types of anthocyanin loaded alginate-cellulose blend film were prepared. Anthocyanin was obtained from the butterfly pea with methanol. The results indicated that cellulose facilitated the dispersion of anthocyanin in the blend film. The immersion blend film in the calcium chloride solution increased the thickness and strength of film. Moreover, the color of anthocyanin changed when added with Cu^{2+} and Fe^{3+} . The intensity of UV spectrum of the mixture between anthocyanin and Cu^{2+} / Fe^{3+} were increase with the increasing concentration of metal solution. Blend film prepared by alginate and cellulose without immersing in calcium chloride solution showed the best result for color change detection of metal solution.

Keywords: Anthocyanin, alginate, cellulose, blend film, metal ion

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและรายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาและการให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา ธีรพิบูลย์เดช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยให้ความรู้คำแนะนำ ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ติดตามผลงานและให้กำลังใจช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาทำงานวิจัย อีกทั้งสละเวลาในการตรวจทานแก้ไขและช่วยเหลือในการทำรายงานฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องฟ้า อุ่นอบ ที่ให้ความกรุณาสละเวลาในการตรวจทานแก้ไข พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เกิดประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และให้เกียรติเป็นประธานและกรรมการในการสอบวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาโทที่ให้ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการใช้เครื่องมือต่าง ๆ คอยให้คำแนะนำคำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ต่าง ๆ อันมีประโยชน์แก่ผู้วิจัยตลอดเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่ ซึ่งทำให้สามารถนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณกำลังใจและความช่วยเหลือจากครอบครัว รวมถึงเพื่อน ๆ ในภาควิชาเคมี ผู้วิจัยขอระลึกถึงความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่าความรู้ที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ และก่อให้เกิดแนวคิดในการพัฒนางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	11
2.1 สารเคมีและเครื่องมือที่สำคัญ	11
2.2 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลส	11
2.3 การเตรียมสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน	11
2.4 การเตรียมแผ่นตรวจวัดไอออนโลหะหนัก	11
2.5 การวัดความหนาของแผ่นตรวจวัด	12
2.6 การตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy	12
2.7 การตรวจหามุ่ฟังก์ชันของแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy	13
2.8 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก	13
2.9 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของแผ่นตรวจวัดกับสารละลายโลหะหนัก	14
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	16
3.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นตรวจวัด	16
3.2 การศึกษาขนาดของแผ่นตรวจวัด	16
3.3 การตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy	17
3.4 การตรวจหามุ่ฟังก์ชันของแผ่นตรวจวัด ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy	19
3.5 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก	20
3.6 การตรวจสอบสีของแอนโทไซยานินกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	22
3.7 การตรวจสอบการดูดกลืนแสงของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อผสมกับสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy	22

3.8 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของแผ่นตรวจวัดกับสารละลายโลหะหนัก	23
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	25
4.1 สรุปผลการทดลอง	25
4.2 ข้อเสนอแนะ	25
บรรณานุกรม	26
ภาคผนวก	30
ประวัติผู้วิจัย	31



สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
รูปที่ 1.1 โครงสร้างโมเลกุลหน่วยย่อยของอัลจินต	2
รูปที่ 1.2 การเกิด Egg-box Model ของอัลจินต	2
รูปที่ 1.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย	3
รูปที่ 1.4 โครงสร้างพื้นฐานของแอนโทไซยานิน	4
รูปที่ 1.5 แอนโทไซยานินที่พบมากในธรรมชาติ	5
รูปที่ 1.6 แอนโทไซยานินที่พบมากที่สุด	5
รูปที่ 1.7 ตำแหน่งในการแทนที่ flavylum ion ของไฮดรอกซิลและเมทอกซิล	6
รูปที่ 1.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน	7
รูปที่ 1.9 การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากอนุมูลอิสระที่สูงขึ้น	8
รูปที่ 1.10 การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากเอนไซม์ glycosidases	8
รูปที่ 1.11 การสลายตัวของแอนโทไซยานินด้วยปฏิกิริยา enzymatic browning	9
รูปที่ 1.12 ดอกอัญชัน	9
รูปที่ 1.13 ตัวอย่างโครงสร้างของ ternatins ในอัญชัน	10
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	
รูปที่ 2.1 แผ่นตรวจวัดสารละลายโลหะหนัก	15
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่นตรวจวัด	16
รูปที่ 3.2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร	17
รูปที่ 3.3 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 621 นาโนเมตร	18
รูปที่ 3.4 สเปกตรัม FT-IR ของผงโซเดียมอัลจินต แผ่นเซลลูโลส และสารสกัดแอนโทไซยานิน	19
รูปที่ 3.5 สเปกตรัม FT-IR ของแผ่นตรวจวัด	20
รูปที่ 3.6 สีของสารละลายแอนโทไซยานินเมื่อหยดสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ ที่ pH 1 และ 5	20
รูปที่ 3.7 สีของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ที่ pH 1 และ 5	21
รูปที่ 3.8 การตรวจสอบผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ที่ pH 5	22

รูปที่ 3.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายแอนโทไซยานินกับสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ pH 5 23

รูปที่ 3.10 แผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ เมื่อจุ่มในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ที่ pH 5 24



สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ	17
ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดและประสิทธิภาพการกักเก็บสาร ที่ความยาวคลื่น 574 และ 621 นาโนเมตร	18
ตารางที่ 3.3 สีของสารละลายแอนโทไซยานินเมื่อหยดสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ ที่ pH 1 และ 5	21
ตารางที่ 3.4 สีของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานิน และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ที่ pH 1 และ 5	22



สัญลักษณ์และคำย่อ

อักษรย่อ	ความหมาย
Alg-0	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-10	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและแซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที
Alg-C2-0	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและเซลลูโลส 2 กรัม ไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-C2-10	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและเซลลูโลส 2 กรัม แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที
Alg-C4-0	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและเซลลูโลส 4 กรัม ไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-C4-10	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินิตและเซลลูโลส 4 กรัม แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที
A1	สารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 864 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
A2	สารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 1,728 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
A3	สารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 3,456 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
A4	สารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 6,912 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
C1	สารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
C2	สารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ปัจจุบันโลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ รวมไปถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพในชีวิตประจำวันมนุษย์เรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางกระบวนการบริโภคอาหารหรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้เจือปนอยู่ โดยเฉพาะในชุมชนที่อาศัยอยู่ใกล้โรงงานที่ขาดจิตสำนึกซึ่งมักจะลักลอบทิ้งของเสียลงดินหรือลงแหล่งน้ำ กำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี อย่างไรก็ตามโลหะหนักบางชนิดมีทั้งผลดีและผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณของสารที่ร่างกายได้รับเข้าไป (1)

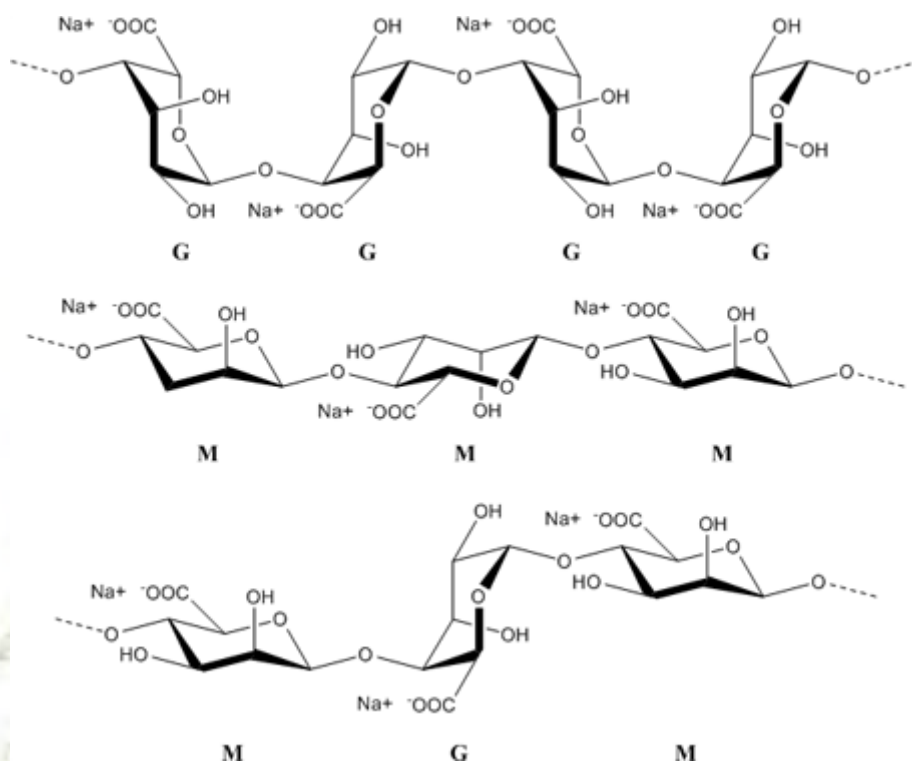
มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการตรวจวัดไอออนโลหะหนักด้วยวิธีการต่างๆ (2-4) โดยรูปแบบหนึ่งที่ใช้คือการใช้รงควัตถุที่สกัดได้จากธรรมชาติเป็นตัวตรวจวัดไอออนโลหะหนัก เช่น แอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีม่วง โดยจะกักเก็บแอนโทไซยานินในรูปปิดอัลจินต อัลจินตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายไม่มีความเป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สายพอลิเมอร์อัลจินตจะมีหมู่คาร์บอกซิเลตที่สามารถเกิดเจลลาชันได้กับไควาเลนต์ไอออนต่างๆ เช่น แคลเซียมไอออน อย่างไรก็ตามการเตรียมปิดอัลจินตในรูปแบบทั่วไป คือ การผสมสารสกัดจากกะหล่ำปลีม่วงที่สกัดได้ลงในสารละลายอัลจินต แล้วหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ทำให้มีปริมาณของรงควัตถุที่กักเก็บในปิดอัลจินตมีไม่มากเท่าที่ควร

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนารูปแบบการตรวจวัดไอออนโลหะหนักจากรูปเม็ดปิดเป็นรูปแผ่น ด้วยการเตรียมแผ่นฟิล์มผสมอัลจินตและเซลลูโลสโดยใช้รงควัตถุที่สกัดได้จากธรรมชาติเป็นตัวตรวจวัดไอออนโลหะหนักซึ่งรงควัตถุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แอนโทไซยานิน เป็นสีที่ได้จากการสกัดดอกอัญชัน สามารถละลายน้ำได้ ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารอย่างกว้างขวาง อีกทั้งยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และมีฤทธิ์ต้านการอักเสบ (5)

1.2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

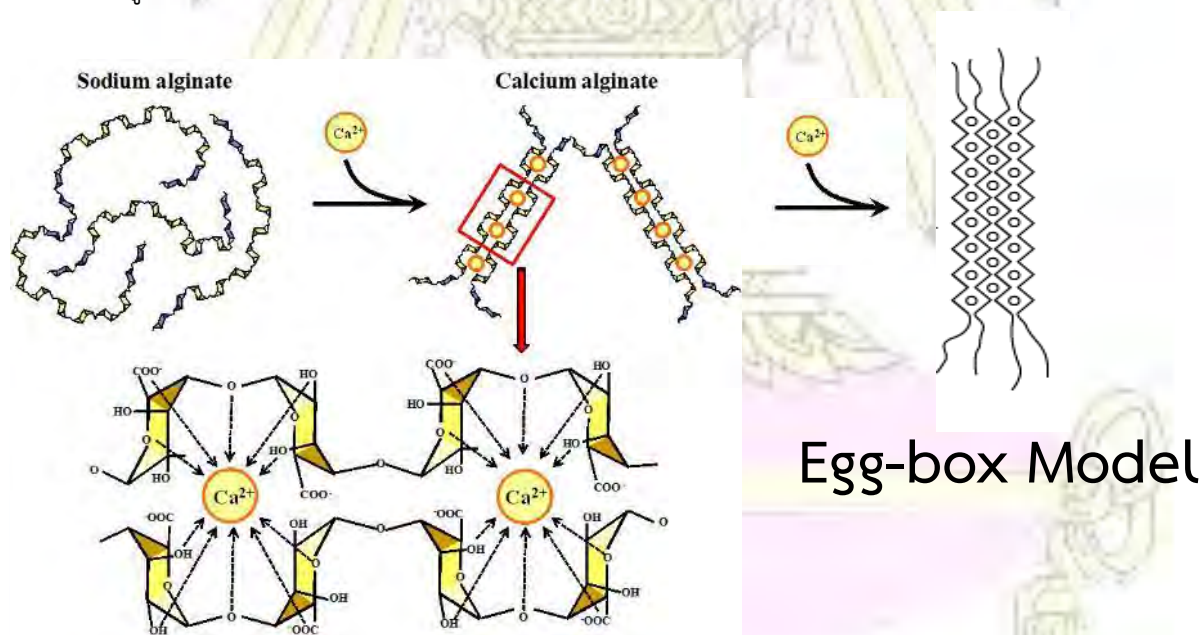
1.2.1 อัลจินต (Alginate)

อัลจินต เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล *Macrocystis pyrifera* โดยมีโครงสร้างเป็นโคโพลิเมอร์ ประกอบด้วย กรดเบตา-D-แมนนูโรนิก (β -D-mannuronic acid, M) และ กรดแอลฟา-แอล-กลูโรนิก (α -L-guluronic acid, G) ในสายโซ่นี้อาจอยู่ในรูปของโฮโมโพลิเมอร์ คือ MM และ GG Blocks หรือเฮเทอโรโพลิเมอร์ คือ MG-Block โดยมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ สามารถละลายน้ำและอยู่ในรูปคาร์บอกซิเลต (6) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างโมเลกุลหน่วยย่อยของอัลจินตแบบ GG-Block MM-Block และ MG-block (7)

โดยเกลืออัลจินตสามารถทำการเชื่อมโยงกันด้วยไอออนไดวาเลนต์ เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และเหล็กไอออน (Fe^{2+}) ทำให้เกิดเป็นเจลและขึ้นรูปเป็นบีดได้ การเกิดเป็นเจลจะเกิดได้ดีและมีความแข็งแรงมากเกิดจากโครงสร้าง GG Block ที่จับกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า Egg-box Model ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (8-10)



รูปที่ 1.2 การเกิด Egg-box Model ของอัลจินต (11)

จากการที่อัลจินเตเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การดูดซับโลหะ การขนส่งยา การเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

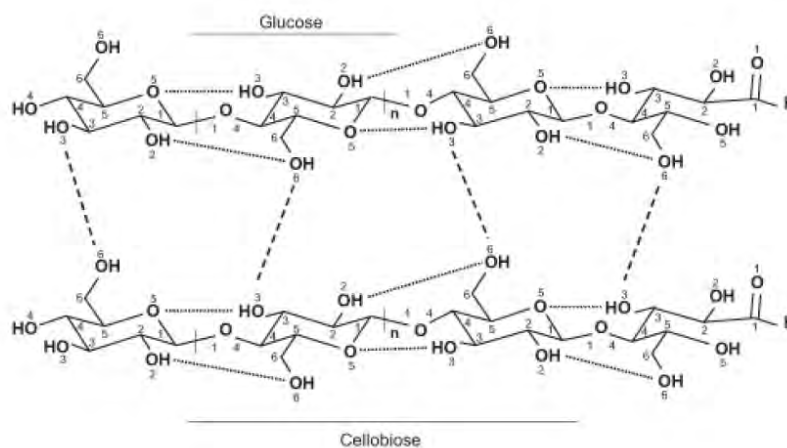
ในปี 2008 Papageorgiou และคณะ ได้นำอัลจินเตมาช่วยในการดูดซับโลหะ เมื่ออัลจินเตเกิดพันธะเชื่อมโยง (cross-linked) กับแคลเซียมไอออน พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง และแคดเมียมในสารละลายโลหะเจือจาง (12)

ในปี 2014 Erick และคณะ ได้ทำการกักเก็บน้ำมัน *Lippia sidoides* ด้วยอัลจินเตและ Cashew gum เพื่อเพิ่มความสามารถในการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ ด้วยการทำให้อยู่รูปแบบอิมัลชัน แล้วหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เพื่อให้เกิดการจับกันในลักษณะปิด จากผลการทดลองพบว่า มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยในปิด 1.9-2.6% โดยน้ำหนัก และสามารถรักษาความเสถียรของน้ำมันได้ดี เมื่อเทียบกับน้ำมันที่ไม่ได้ทำการกักเก็บ (13)

ในปี 2017 Wang และคณะ ได้ทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม โดยนำอัลจินเตซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักไปผสมกับเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) และผลึกนาโนเซลลูโลส (cellulose nanowhiskers) ที่แยกได้จากเยื่อปอสา เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกล การซึมผ่านของไอน้ำ และคุณสมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมโพสิตอัลจินเต จากผลการทดลองพบว่า ผลึกนาโนเซลลูโลสมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มอัลจินเต โดยมีความต้านทานแรงดึงของฟิล์มอัลจินเตเพิ่มขึ้น 25% (14)

1.2.2 เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose)

เซลลูโลสจากแบคทีเรียหรือวุ้นมะพร้าว เป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่ง โดยเป็นผลผลิตที่เกิดจากการหมักแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ในน้ำมะพร้าว มีโครงสร้างภายในเป็นไฟบริล หรือสายโซ่เบต้า-1,4 กลูแคน (β -1,4 glucan) ประกอบด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยของพืช 100 เท่า สายกลูแคนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดโครงข่ายสามมิติ เป็นแผ่นไฮโดรเจลที่มีพื้นที่ผิวมาก และมีรูพรุน มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเซลลูโลสจากพืช ไม่มีการเจือปนของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกติน เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีน้ำสามารถอุ้มน้ำได้มากประมาณ 60-700 เท่าของน้ำหนักแห้ง มีความแข็งแรงและมีความเป็นผลึกสูง (15)



รูปที่ 1.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (16)

เซลลูโลสจากแบคทีเรียถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ทางการแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมอาหาร ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

ในปี 2005 Svensson และคณะ ได้พัฒนาแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพทดแทนเนื้อเยื่อกระดูกอ่อน โดยไม่ก่อให้เกิดอาการอักเสบ ซึ่งจะกระตุ้นการเพิ่มคอนโดโรไซต์ (chondrocyte) และคอลลาเจน (collagen) (17)

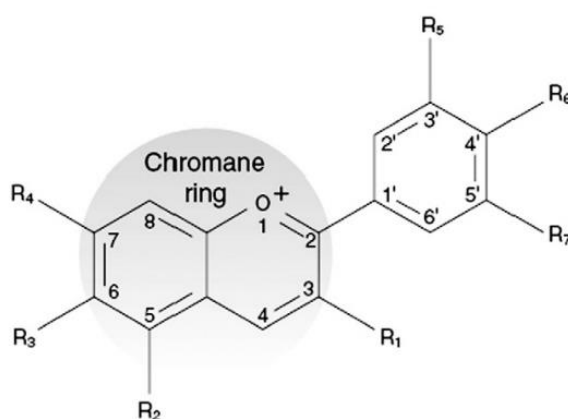
ในปี 2009 Chen และคณะ ได้พัฒนาคาร์บอกซีเมทิลเลตแบคทีเรียเซลลูโลส (carboxymethylated-bacterial cellulose) เพื่อใช้ในสำหรับดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง และตะกั่ว พบว่า ทั้งแบคทีเรียเซลลูโลสและคาร์บอกซีเมทิลเลตแบคทีเรียเซลลูโลสสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี (18)

ในปี 2017 Pourjavaher และคณะ ได้พัฒนาแผ่นตรวจวัดกรด-เบส โดยใช้แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นตัวดูดซับแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีม่วง พบว่า แผ่นตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถอุ้มน้ำได้ดี ไม่เป็นอันตรายไม่ต้านการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pH (19)

1.2.3 แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)

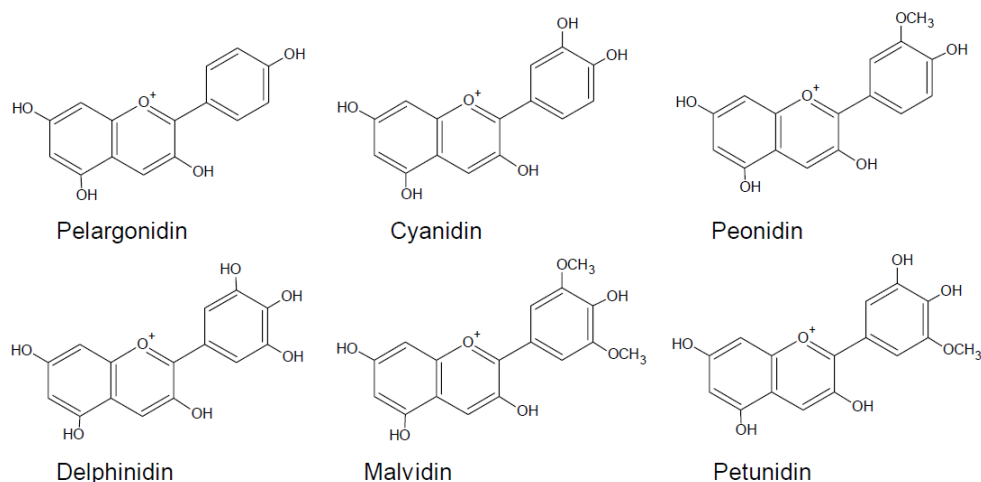
แอนโทไซยานิน เป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) พบได้ในใบ ดอก และผลของพืชดอก ให้สีแดง น้ำเงิน และม่วง ในผักและผลไม้ เช่น กะหล่ำปลีม่วง กระจับแดง บีทรูท แอปเปิล ชมพู และมังคุด นอกจากนี้ยังพบได้ในดอกไม้ เช่น อัญชัน แอนโทไซยานินมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และยังมีบทบาทในการป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดหัวใจ เป็นต้น (20)

แอนโทไซยานินมีลักษณะโครงสร้างเป็น 2-ฟีนิลเบนโซไพริเลียม (2-phenylbenzopyrylium) หรือเกลือของฟลาเวียม (flavylium salt) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 ตัว เชื่อมต่อกัน (C6-C3-C6) และเป็นสารประกอบประเภทไกลโคไซด์ (glycoside) โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidins) ที่เรียกว่าอะไกลโคน (aglycone) น้ำตาล และหมู่เอซิล (acyl group) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งหมู่เอซิลหรือกรดอาจมีหรือไม่มีก็ได้ โดยแอนโทไซยานินที่มีกรดเป็นองค์ประกอบเรียกว่า นอนอะซิลเลตเทตแอนโทไซยานิน (non acylated anthocyanin) จะมีความเสถียรกว่าอะซิลเลตเทตแอนโทไซยานิน (acylated anthocyanin) หรือแอนโทไซยานินที่ไม่มีกรดเป็นองค์ประกอบ (21)



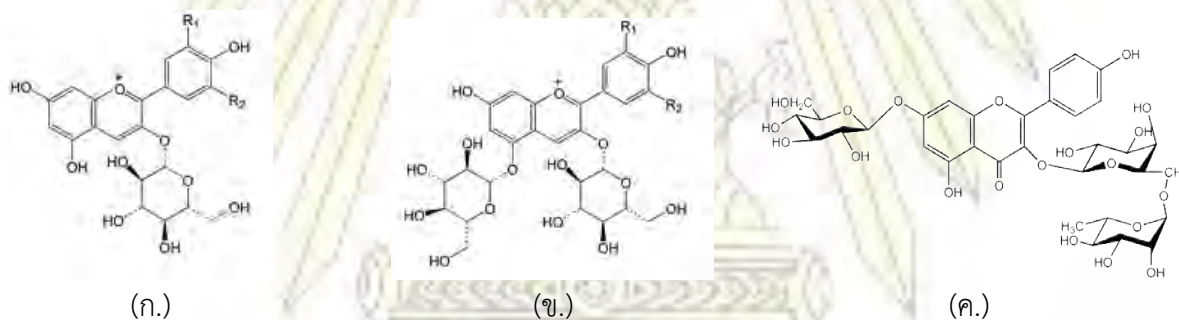
รูปที่ 1.4 โครงสร้างพื้นฐานของแอนโทไซยานิน (22)

แอนโทไซยานิดินที่พบมากในปัจจุบันมี 6 ชนิด ได้แก่ เพลาโกนิน (pelargonidin), ไซยานิดิน (cyanidin), พีโอนิน (peonidin), เดลฟินิดิน (delphinidin), มอลวิดิดิน (malvidin) และเพทูนิดิน (petunidin) (21) ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แอนโทไซยานิดินที่พบมากในธรรมชาติทั้ง 6 ชนิด (23)

น้ำตาลที่ต่อกับแอนโทไซยานิดิน ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แรมโนส (rhamnose) อะราบินโนส (arabinose) ไดแซ็กคาไรด์ และไตรแซ็กคาไรด์ โดยแอนโทไซยานินที่พบมากที่สุดคือ 3-monoside, 3,5-diglycosides และ 3,7- diglycosides (21) ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 แอนโทไซยานินที่พบมากที่สุด ได้แก่ (ก.) 3-monoside anthocyanins (ข.) 3,5- diglycosides anthocyanins และ (ค.) 3,7- diglycosides anthocyanins (22)

1.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแอนโทไซยานิน ได้แก่ โครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบของแอนโทไซยานิน ความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ แสง เอนไซม์ และน้ำตาล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. โครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบของแอนโทไซยานิน

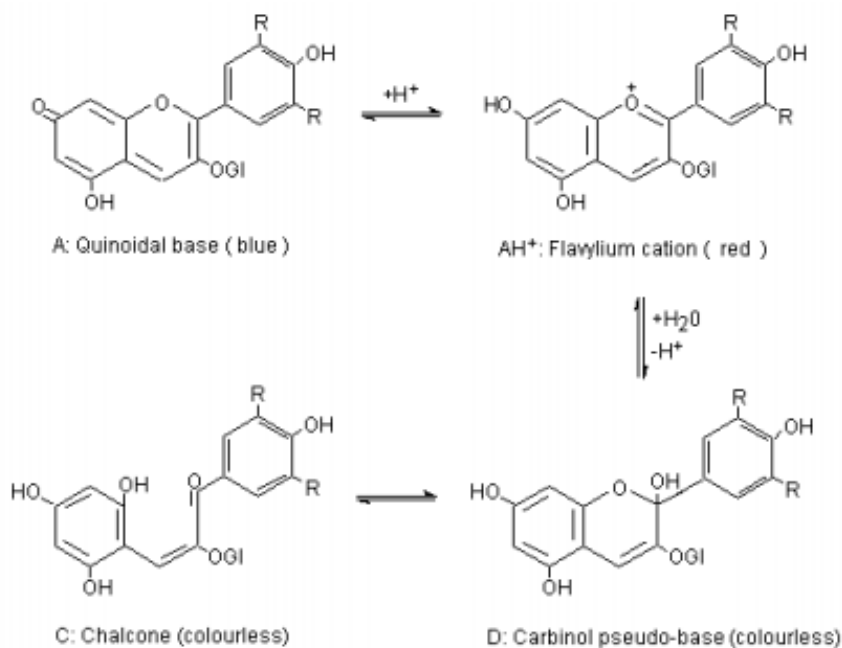
ความคงตัวของแอนโทไซยานินขึ้นอยู่กับธรรมชาติและจำนวนของน้ำตาลที่ใกล้กับฟลาวิลเลียมไอออน (flavylium ion) และจำนวนของกรดที่เชื่อมต่อกับไกลโคซิลิก รวมทั้งเกี่ยวข้องกับจำนวนและตำแหน่งในการแทนที่ฟลาวิลเลียมไอออนของไฮดรอกซิลและเมทอกซิล ตัวอย่างเช่น 3-deoxy anthocyanins (Luteolinidin) ที่มีสีเหลืองเนื่องจากการดีไฮดรอกซิเลชัน (dehydroxylation) ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ทำให้มีความเสถียรมากกว่า 3-hydroxy anthocyanins (Cyanidin) ที่มีสีแดงและมีความเสถียรต่ำกว่ามาก และหากโครงสร้างในส่วนของวงแหวนพินิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่เมทอกซิลเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อแอนโทไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้น และสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้น และการเพิ่มหมู่เมทอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น (24)



รูปที่ 1.7 ตำแหน่งในการแทนที่ flavylium ion ของไฮดรอกซิลและเมทอกซิล

2. ความเป็นกรด-เบส (pH)

แอนโทไซยานินทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์วัดความเป็นกรด-เบส (pH Indicator) ซึ่งแอนโทไซยานินจะมีความคงตัวในสารละลายที่มี pH ต่ำมากกว่าในสารละลายที่มี pH สูง โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะไกลโคนภายในแอนโทไซยานินได้ 4 โครงสร้าง ได้แก่ flavylium cation (AH^+), quinonoidal base (A), chalcone (C) และ carbinol pseudo-base (D) กล่าวคือ ความแตกต่างกันของความเป็นกรด-เบส มีผลต่อโครงสร้างและสมดุลของแอนโทไซยานิน โดยสารละลายที่เป็นกรดและ pH ต่ำกว่า 2 จะมี AH^+ เป็นโครงสร้างเด่นจะให้สีแดง เมื่อ pH เพิ่มขึ้น AH^+ จะเกิดการสูญเสียโปรตอนเกิดเป็นสารละลาย quinonoidal base (A) ให้สีน้ำเงินหรือม่วง และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ของ AH^+ จะอยู่ในสภาวะเบส ทำให้เกิด carbinol pseudobase (D) ซึ่งไม่มีสี และจะเกิดสมดุลอย่างช้า ๆ จนกระทั่งอยู่ในรูปของ chalcone ดังแสดงในรูปที่ 1.8 โดยการปรากฏสีที่แตกต่างกันตามระดับของ pH นั้นเป็นผลมาจากแอนโทไซยานินมีการดูดกลืนพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างกันอย่างชัดเจน (25)



รูปที่ 1.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (24)

จากการที่ความเป็นกรด-เบส (pH) มีผลต่อความคงตัวและสีของแอนโทไซยานิน จึงมีงานวิจัยมากมายที่นำคุณสมบัตินี้มาพัฒนาแผ่นตรวจวัดโลหะหนัก ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

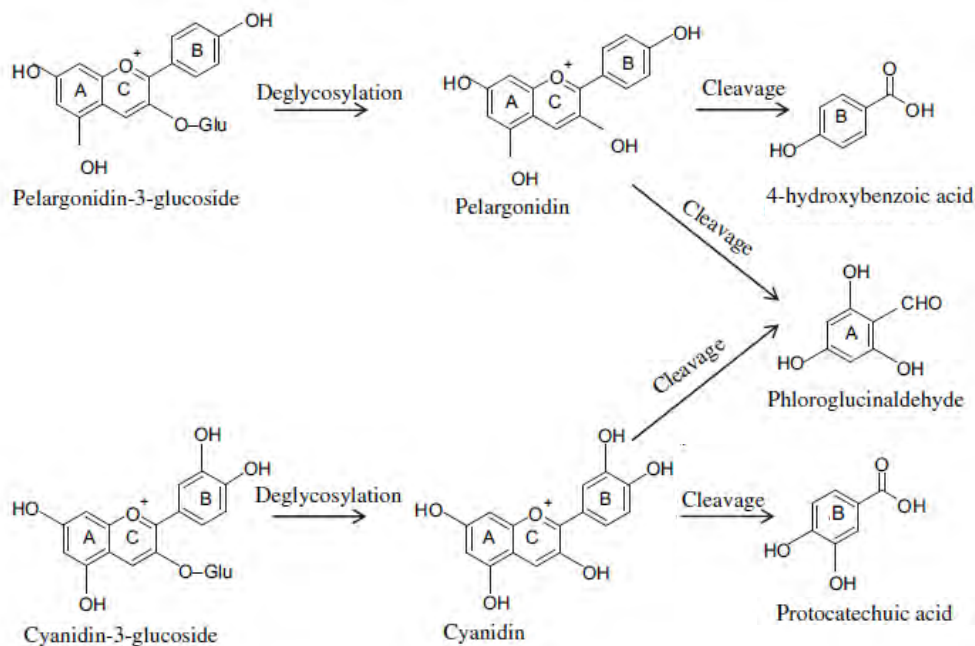
ในปี 2014 Khaodee และคณะ (26) ได้พัฒนาตัวตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ Cu^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+} และ Fe^{3+} โดยใช้ Cyanidin ที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีม่วงเป็นสารควบคุมคีเลต (chelating agent) ซึ่งได้รับการตรวจสอบทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ จากการวัดความเป็นกรด - เบสของสารละลาย Cyanidin ร่วมกับตัวทำละลาย พบว่า Cu^{2+} , Pb^{2+} , Al^{3+} และ Fe^{3+} ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสีที่ pH 7, pH 6, pH 5 และ pH 4 ตามลำดับ และวิธีการนี้สามารถนำไปตรวจสอบกับตัวอย่างน้ำจริงได้ง่าย รวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่ายและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

ในปี 2017 Fedenko และคณะ (27) ได้พัฒนาวิธีการตรวจจับสารประกอบโลหะ-แอนโทไซยานินทั้งในหลอดทดลองและเนื้อเยื่อพืช โดยใช้เทคนิค UV-vis spectroscopy และ colorimetric models ซึ่งการตรวจดูสเปกตรัมของรังสียูวี (UV-vis spectra) การดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน และเทคนิคการวัดสี (colorimetry techniques) จะใช้สำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบโลหะ-แอนโทไซยานินในหลอดทดลอง ในขณะที่สเปกโทรสโคปสะท้อน (reflectance spectroscopy) และพารามิเตอร์สี (colorimetric parameters) จะใช้สำหรับวิเคราะห์สารประกอบโลหะ-แอนโทไซยานินในเนื้อเยื่อพืช

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน ทำให้อัตราการสลายตัวของแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มสูงจะทำให้เกิดการสูญเสีย moieties glycosyl ของแอนโทไซยานินโดยการเกิดปฏิกิริยา deglycosylation บริเวณ

พันธะไกลโคสิติกที่ตำแหน่งที่ 3 ของโครงสร้างแอนโทไซยานิน และเมื่อแอนโทไซยานินสูญเสียหมู่ น้ำตาล เปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นแอนโทไซยานิน และแอนโทไซยานินถูกทำลายโครงสร้างโดยทำให้เกิดการแตกของวงแหวนบริเวณเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic ring) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานิน โดยโครงสร้างแบบ chalcone จะเป็นโครงสร้างแรกหรือขั้นตอนแรกในการย่อยสลายด้วยความร้อนของแอนโทไซยานิน และการทำลายด้วยความร้อนของแอนโทไซยานินจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลและเกิดการสลายตัวมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (28)



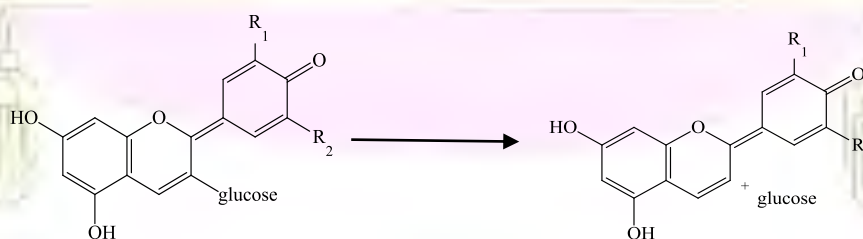
รูปที่ 1.9 การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น (28)

4. แสง

แสงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชและช่วยเร่งการอัตราการย่อยสลายของแอนโทไซยานิน โดยแสงจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวที่เกี่ยวข้องกับการกระตุ้น flavylium cation ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (29)

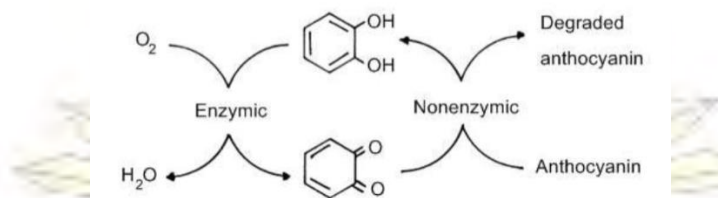
5. เอนไซม์

เอนไซม์พบมากและมีบทบาทในการทำลายแอนโทไซยานิน คือ glycosidases ซึ่งจะทำลายพันธะโคเวเลนต์ระหว่าง glycosyl residual และอะไกลโคโคนของแอนโทไซยานิน ส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินสูญเสียหมู่ น้ำตาล เปลี่ยนไปเป็นแอนโทไซยานิน (29) ดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 การสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากเอนไซม์ glycosidases (29)

เอนไซม์ peroxidases และ phenolases พบได้ตามธรรมชาติในผลไม้จะมีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานินโดยการเกิดปฏิกิริยา enzymatic browning จะทำให้เกิดสารควิโนนซึ่งทำปฏิกิริยา non-enzymatic browning ส่งผลให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.11 (22)



รูปที่ 1.11 การสลายตัวของแอนโทไซยานินด้วยปฏิกิริยา enzymatic browning (22)

6. น้ำตาล

น้ำตาลมีส่วนในการเพิ่มความคงตัวของแอนโทไซยานินเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยโมเลกุลน้ำตาลช่วยป้องกัน pyrylium ring ของแอนโทไซยานิน ไม่ให้โมเลกุลน้ำซึ่งเป็นนิวคลีโอฟิลิกเข้าทำปฏิกิริยา ช่วยลดการสลายตัวของแอนโทไซยานิน (30)

1.2.4 อัญชัน (Butterfly pea)

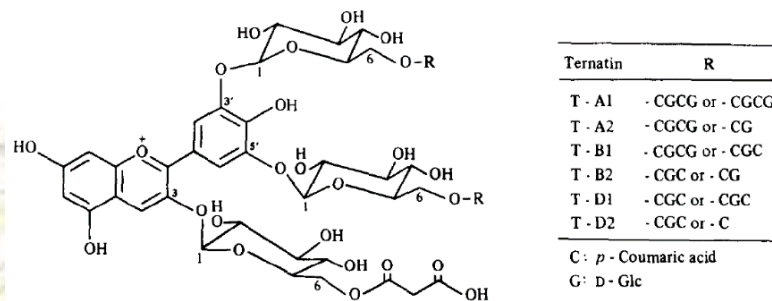
อัญชัน (Butterfly pea) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Clitoria ternatea* L. เป็นพืชในตระกูล Leguminosae-Papilionoideae และตระกูลย่อย Papilionoideae มีชื่อสามัญหลายชื่อ คือ butterfly pea และ blue pea มีชื่อไทยพื้นเมืองเรียกว่า อัญชัน (ภาคกลาง) แดงชัน และเอื้องชัน (ภาคเหนือ) อัญชันมีลักษณะทั่วไป คือ เป็นไม้เถาเลื้อยใช้ยอดพันแบบ twiner มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในปานามา อินเดีย และหมู่เกาะโมกุลละ เป็นพืชที่โตเร็วและขึ้นได้ดีในบริเวณที่มีดินร่วน มีใบประกอบแบบขนนก ออกใบสลับใบย่อย 4-9 ใบ เป็นรูปไข่กว้าง 2-3 เซนติเมตร ปลายและโคนมน ดอกเป็นสีน้ำเงิน ฟ้าม่วง หรือขาว มีทั้งชนิดที่เป็นชั้นเดียวและดอกซ้อน ออกดอกเดี่ยวตามซอกใบคล้ายถั่ว มีกลีบดอก 5 กลีบ (21) ดังแสดงในรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 ดอกอัญชัน

วัตถุดิบสีในดอกอัญชันเป็นสารประเภทแอนโทไซยานิน ละลายน้ำได้ สีจากดอกอัญชันเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-เบส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความสมดุลของไอออนของสารที่ปรากฏอยู่ในสารละลาย ดอกอัญชันถูกนำมาใช้เป็นสีผสมอาหารและใช้ในเครื่องสำอาง

สารหลักที่พบในดอกอัญชันเป็นพวก ternatins ซึ่งเป็น acylated anthocyanins มีโครงสร้างเป็น malonylated delphinidin 3,3',5'-triglucosides โดย D-glucose และ *p*-coumaric acid ต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 1.13 ทำให้มีความเสถียรมากกว่า nonacylated anthocyanins อื่น ๆ (31-32)



รูปที่ 1.13 ตัวอย่างโครงสร้างของ ternatins ในอัญชัน (33)

ในปี 2009 Chaovanalikit และคณะ ได้ศึกษาผลของ pH และอุณหภูมิต่อสีและความคงตัวของสารสกัดจากอัญชัน โดยนำสารสกัดอัญชันที่ pH 2, 4, 6, 8 และ 10 มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อความคงตัวของสารสกัดอัญชันที่ pH 8 โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าครึ่งชีวิตของแอนโทไซยานินในสารสกัดมีค่าลดลงและร้อยละของสีของพอลิเมอร์มีค่ามากขึ้น (34)

ในปี 2010 Abdullah และคณะ ได้ศึกษาสีของสารสกัดอัญชันและความเสถียรของอัญชันในสภาวะกรดและเบส พบว่า สารสกัดอัญชันให้สีแดง ม่วง น้ำเงิน น้ำเงินเขียว เขียว และเหลืองที่ pH 0.05-12.0 และสารละลายอัญชันในสภาวะกรดมีความเสถียรในการเก็บรักษามากกว่าสภาวะเบส โดยในสภาวะกรดมีการสลายตัวเพียง 20-30% เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 27 และ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วัน และสารสกัดอัญชันเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปีเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส (35)

ในปี 2015 Saptarini และคณะ ได้ศึกษาการนำสารสกัดจากดอกอัญชันมาเป็นอินดิเคเตอร์ในการไทเทรตกรด-เบส พบว่า สารสกัดอัญชันเกิดการเปลี่ยนสีจากม่วงไปเป็นน้ำเงินที่ pH 4 เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นเขียวที่ pH 9 และเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองที่ pH 12 สารสกัดอัญชันจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการไทเทรตกรด-เบสได้ (36)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมแผ่นตรวจวัดโลหะหนักจากอัลจินต เซลลูโลส และแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน
2. ศึกษาการเปลี่ยนสีของแอนโทไซยานินจากดอกอัญชันในสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แผ่นตรวจวัดโลหะหนักที่เตรียมจากอัลจินต เซลลูโลส และแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีและเครื่องมือที่สำคัญ

- วัณมะพร้าวไม่มีน้ำตาล จากตลาดสดในจังหวัดชลบุรี
- โซเดียมอัลจิเนต ความหนืด 850 cps จากบริษัท ทริปเปิ้ลไอน์ โซลูชั่น จำกัด
- ดอกอัญชันแห้ง จากร้านขายยาจีนเจ้ากรมเปอ กรุงเทพมหานคร
- แคลเซียมคลอไรด์ จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- กลีเซอรอล จากบริษัท รวมเคมี จำกัด
- เครื่องระเหยสารแบบหมุน ยี่ห้อ BÜCHI Rotavapor รุ่น R-114
- เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Agilent 8453
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF110
- ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ จากบริษัท เมอร์ค จำกัด

2.2 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลส

นำวัณมะพร้าวจำนวน 1 กิโลกรัม มาต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 400 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโปรตีนและแบคทีเรีย จากนั้นล้างวัณมะพร้าวด้วยน้ำกลั่นและปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดแอสติกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จากนั้นล้างวัณมะพร้าวด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งหนึ่ง นำวัณมะพร้าวมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้เป็นเวลา 5 นาที ทำการกรอง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C จะได้แผ่นเซลลูโลสแห้งสำหรับใช้งานต่อไป

2.3 การเตรียมสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน

สกัดดอกอัญชันแห้ง 102 กรัม ในเมทานอล 2 ลิตร โดยแช่ไว้ 1 คืน จากนั้นนำไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน BÜCHI Rotavapor R-114 สกัดซ้ำอีกครั้ง จะได้สารสกัดแอนโทไซยานินสีน้ำเงินเข้ม 32.0 กรัม

2.4 การเตรียมแผ่นตรวจวัดไอออนโลหะหนัก

เตรียมแผ่นตรวจวัดไอออนโลหะหนักโดยใช้วิธีตามเอกสารอ้างอิง (14) และปรับเปลี่ยนวิธีการเล็กน้อย ดังนี้

สูตรที่ 1 นำผงโซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม แช่ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ตุ๋นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นเติมกลีเซอรอล 0.8 กรัม และสารสกัดแอนโทไซยานิน 530 มิลลิกรัม นำส่วนผสมไปปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และสั่นด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Sonicator) เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารละลายใส นำสารละลายผสมนี้เทลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 7.5 x 14.5 ตารางเซนติเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้แผ่นตรวจวัดใช้ชื่อว่า Ag-0

สูตรที่ 2 นำผงโซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม และเซลลูโลสแห่ง 2 กรัม แช่ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ตุ๋นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นเติมกลีเซอรอล 0.8 กรัม และสารสกัดแอนโทไซยานิน 530 มิลลิกรัม นำส่วนผสมไปปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮมจิโนเซอร์ ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และสั่นด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Sonicator) เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารละลายใส นำสารละลายผสมนี้เทลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 7.5 x 14.5 ตารางเซนติเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้แผ่นตรวจวัดใช้ชื่อว่า Alg-C2-0

สูตรที่ 3 เตรียม Alg-C4-0 ด้วยวิธีเดียวกันกับ Alg-C2-0 แต่ใช้เซลลูโลสแห่ง 4 กรัม

นำ Alg-0, Alg-C2-0 และ Alg-C4-0 แช่ใน 2% สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เป็นเวลา 10 นาที ชุบน้ำบริเวณผิวฟิล์มออกแล้วผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้แผ่นตรวจวัด Alg-10, Alg-C2-10 และ Alg-C4-10 ตามลำดับ

กล่าวโดยสรุป จะมีแผ่นตรวจวัดทั้งหมด 6 แบบ ได้แก่

Alg-0	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-10	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที
Alg-C2-0	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และเซลลูโลส 2 กรัม (C2) ไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-C2-10	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และเซลลูโลส 2 กรัม (C2) แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที
Alg-C4-0	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และเซลลูโลส 4 กรัม (C4) ไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
Alg-C4-10	คือ	แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจิเนต (Alg) และเซลลูโลส 4 กรัม (C4) แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที

2.5 การวัดความหนาของแผ่นตรวจวัด

ทำการวัดความหนาของแผ่นตรวจวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Calipers) โดยวัดความหนาของแผ่นฟิล์มบริเวณต่าง ๆ จำนวน 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.6 การตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy

2.6.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของปริมาณแอนโทไซยานิน

เตรียมสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 1090, 2180, 3815, 5450, 7630, 9810 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ในตัวทำละลายผสมน้ำกลั่นและเมทานอล ในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 574 และ 621 นาโนเมตร แล้วนำไปสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและค่าการดูดกลืนแสง

2.6.2 การหาปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด

นำแผ่นตรวจวัดน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม แช่ในตัวทำละลายผสมน้ำกลั่นและเมทานอล ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 6 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 คืน และกวนสารละลายตลอดเวลา จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที นำสารละลายใสขึ้นบนไปวัดปริมาณแอนโทไซยานินด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 574 และ 621 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาปริมาณของแอนโทไซยานินจากกราฟมาตรฐาน คำนวณปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (%Loading capacity, %LC) และประสิทธิภาพการกักเก็บสาร (%Encapsulation efficiency, %EE) โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (\%LC)} = \frac{\text{ปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแผ่นตรวจวัด (กรัม)}} \times 100$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกักเก็บสาร (\%EE)} = \frac{\text{ปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (กรัม)}}{\text{ปริมาณแอนโทไซยานินที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

2.7 การตรวจหามูฟิงค์ชั้นของแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy

นำแผ่นตรวจวัดไปตรวจสอบหามูฟิงค์ชั้นด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy และเปรียบเทียบผลที่ได้กับผงโซเดียมอัลจิเนต แอนโทไซยานิน และแผ่นเซลลูโลสแห้ง ด้วยเทคนิค Attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR)

2.8 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก

2.8.1 การเตรียมสารละลายโลหะหนัก

เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ Ba^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , K^+ , Pb^{2+} และ Ni^{2+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ จาก $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, CuSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, KCl , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ และปรับ pH ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์กรดแอสซีติก

สารละลายบัฟเฟอร์กรดแอสซีติกเตรียมโดยหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ลงในสารละลายกรดแอสซีติกเจือจางที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร จนกระทั่งสารละลายมี pH เท่ากับ 1 และ 5

2.8.2 การตรวจสอบสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก

เตรียมสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 864 และ 1,728 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ Ba^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , K^+ , Pb^{2+} และ Ni^{2+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 1 และ 5

ทำการตรวจสอบสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ โดยปิเปตสารละลายแอนโทไซยานิน 100 ไมโครลิตร ในหลุมขนาด 96 หลุม จากนั้นเติมสารละลายโลหะหนักลงไป 100 ไมโครลิตร สังเกตสีเทียบกับสารละลายควบคุม (สารละลายควบคุมหรือ Blank คือ สารละลายที่มีส่วนผสมของแอนโทไซยานิน 100 ไมโครลิตร และสารละลายบัฟเฟอร์กรดแอสซิดิก 100 ไมโครลิตร)

2.8.3 การตรวจสอบสีของแอนโทไซยานินกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

ปิเปตสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 11,702 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 ไมโครลิตร ในหลุมขนาด 96 หลุม จากนั้นเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2% ลงไป 50 ไมโครลิตร และสารละลายบัฟเฟอร์กรดแอสซิดิก 50 ไมโครลิตร สังเกตสีเทียบกับสารละลายควบคุม

ปิเปตสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 11,702 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 ไมโครลิตร ในหลุมขนาด 96 หลุม จากนั้นเติมสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และสารละลายบัฟเฟอร์กรดแอสซิดิกปริมาตร 50 ไมโครลิตร ตามลำดับ สังเกตสีเทียบกับสารละลายควบคุม

ปิเปตสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 11,702 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 ไมโครลิตร ในหลุมขนาด 96 หลุม จากนั้นเติมสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2% ลงไป 50 ไมโครลิตร ตามลำดับ สังเกตสีเทียบกับสารละลายควบคุม

ทำแบบเดียวกันกับขั้นตอนข้างต้น แต่ปรับเปลี่ยนสารละลายโลหะหนักจาก Cu^{2+} เป็น Fe^{3+}

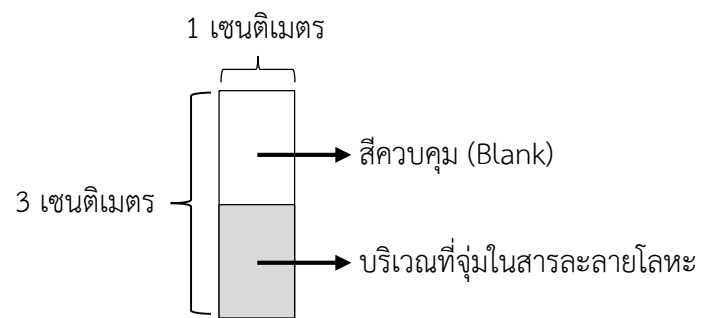
2.8.4 การตรวจสอบการดูดกลืนแสงของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อผสมกับสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy

นำสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 11,702 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร หยดสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy

ทำแบบเดียวกันกับขั้นตอนข้างต้น แต่เปลี่ยนเป็นสารละลายโลหะหนัก Fe^{3+}

2.9 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของแผ่นตรวจวัดกับสารละลายโลหะหนัก

จุ่มแผ่นตรวจวัด Alg-0, Alg-10, Alg-C2-0, Alg-C2-10, Alg-C4-0 และ Alg-C4-10 ขนาด 1×3 ตารางเซนติเมตร ในสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 วินาที โดยจุ่มแผ่นตรวจวัดเพียงครั้งหนึ่งในสารละลายโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 บันทึกสีของแผ่นตรวจวัดด้วยกล้องดิจิทัล



รูปที่ 2.1 แผ่นตรวจวัดสารละลายโลหะหนัก



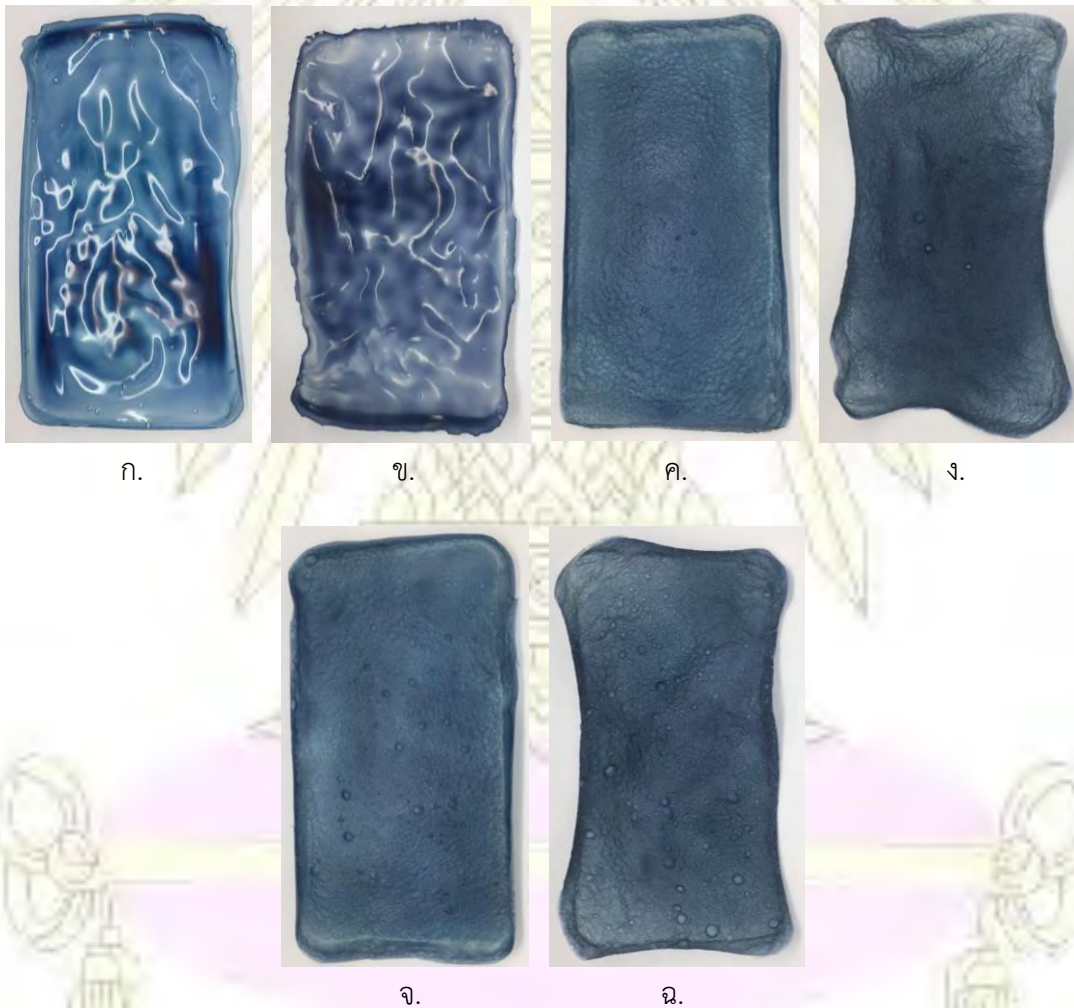
บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นตรวจวัด

จากการเตรียมแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ ได้แก่ Alg-0, Alg-10, Alg-C2-0, Alg-C2-10, Alg-C4-0 และ Alg-C4-10 ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 วัดความหนาของแผ่นฟิล์ม อันเนื่องมาจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะซึมแพร่เข้าไปในแผ่นตรวจวัดและเกิดการเชื่อมขวางกับสายโซ่อัลจิเนต ทำให้สายโซ่อัลจิเนตห่างกันมากขึ้น ความหนาของแผ่นตรวจวัดจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นตรวจวัดอีกด้วย และความหนาของแผ่นตรวจวัดจะเพิ่มตามปริมาณของเซลล์โลส

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า การใส่เซลล์โลสลงไปช่วยทำให้สีของแอนโทไซยานิน กระจายตัวได้ดีขึ้น การแช่แผ่นตรวจวัดในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้เกิดการหดตัวของแผ่นตรวจวัด อันเนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมขวางนั่นเอง



รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่นตรวจวัด

ก. Alg-0 ข. Alg-10 ค. Alg-C2-0 ง. Alg-C2-10 จ. Alg-C4-0 และ ฉ. Alg-C4-10

3.2 การศึกษาขนาดของแผ่นตรวจวัด

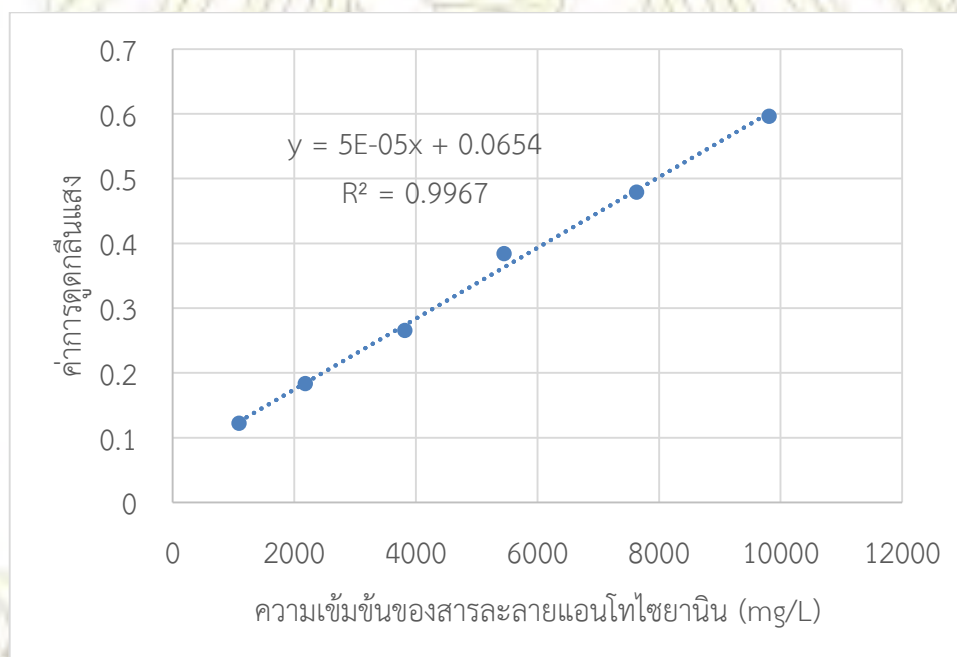
ทำการวัดความหนาของแผ่นตรวจวัดที่เตรียมได้ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ

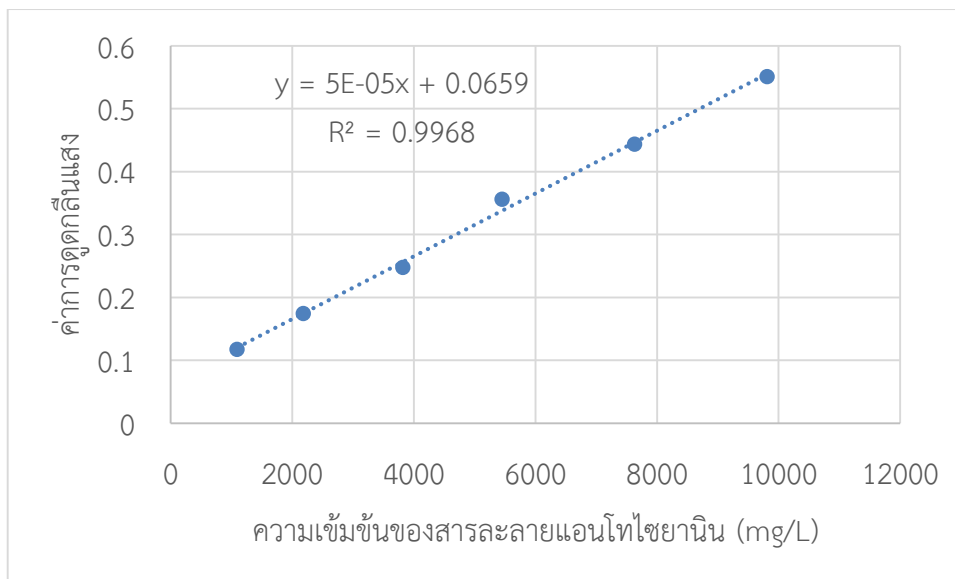
แผ่นตรวจวัด	ความหนาของแผ่นตรวจวัดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
Alg-0	0.19 ± 0.06
Alg-10	0.67 ± 0.24
Alg-C2-0	0.31 ± 0.05
Alg-C2-10	0.56 ± 0.11
Alg-C4-0	0.35 ± 0.03
Alg-C4-10	0.60 ± 0.03

3.3 การตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy

กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 574 และ 621 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของแอนโทไซยานิน แสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินและค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานิน และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 621 นาโนเมตร

เมื่อนำแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ ได้แก่ Alg-0, Alg-10, Alg-C2-0, Alg-C2-10, Alg-C4-0 และ Alg-C4-10 มาตรวจสอบปริมาณของแอนโทไซยานินเทียบกับกราฟมาตรฐานจะได้ปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (% Loading capacity, %LC) และประสิทธิภาพการกักเก็บสาร (%Encapsulation efficiency, %EE) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดและประสิทธิภาพการกักเก็บสารที่ความยาวคลื่น 574 และ 621 นาโนเมตร

แผ่นตรวจวัด	ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร		ความยาวคลื่น 621 นาโนเมตร	
	%LC	%EE	%LC	%EE
Alg-0	17.09 ± 0.12	88.41 ± 0.63	22.64 ± 0.18	117.08 ± 0.94
Alg-10	10.81 ± 0.56	42.80 ± 2.21	12.32 ± 0.59	48.82 ± 2.35
Alg-C2-0	15.66 ± 0.49	102.16 ± 3.21	23.00 ± 0.59	150.03 ± 3.85
Alg-C2-10	2.86 ± 1.52	13.21 ± 6.81	3.59 ± 1.88	16.62 ± 8.44
Alg-C4-0	12.88 ± 0.12	101.95 ± 0.93	19.13 ± 0.12	151.45 ± 0.92
Alg-C4-10	3.41 ± 0.50	20.03 ± 2.50	4.33 ± 0.44	25.53 ± 2.74

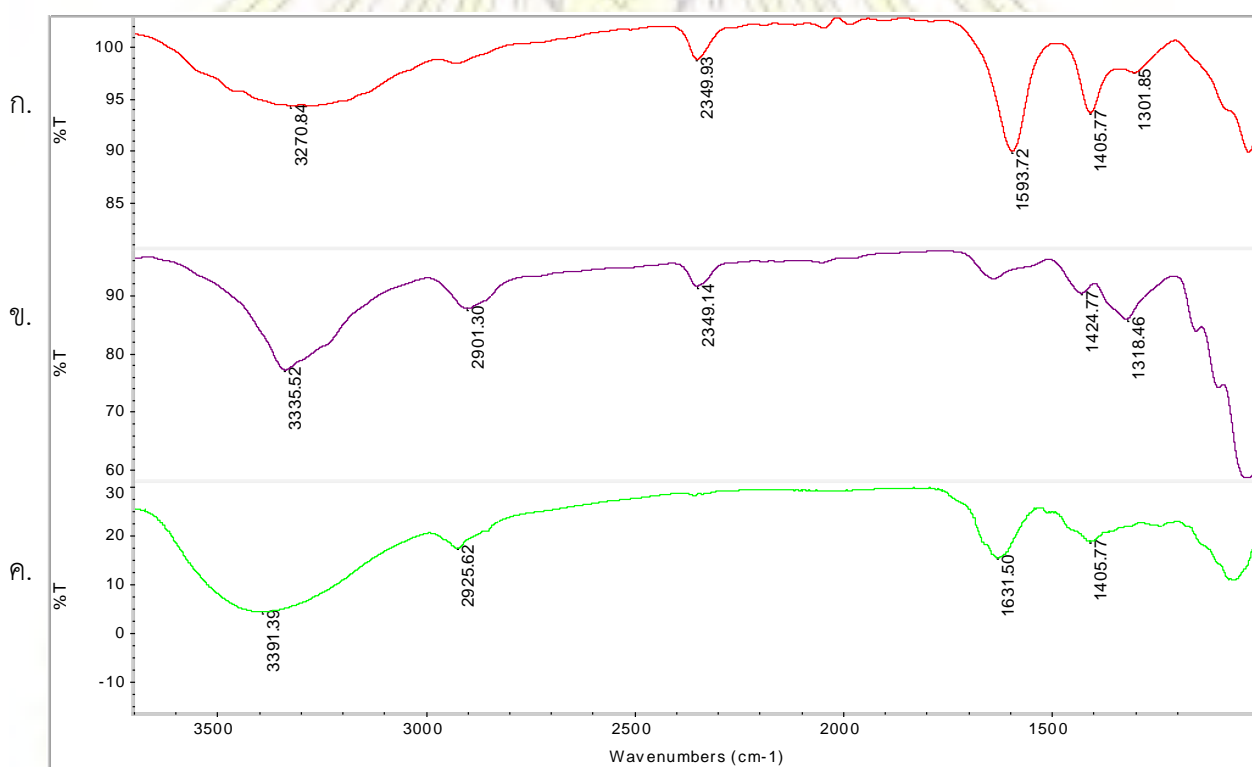
จากปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัด (%LC) และประสิทธิภาพการกักเก็บสาร (%EE) ที่วิเคราะห์ได้ แสดงให้เห็นว่า การเติมแบคทีเรียจากเซลล์ูโลสลงไปแผ่นตรวจวัด Alg-C2-0 และ Alg-C4-0 ไม่มีผลต่อปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินเมื่อเทียบกับแผ่นตรวจวัด Alg-0 และการแช่แผ่นตรวจวัดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ส่งผลให้มีปริมาณสารสกัดแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดน้อยลง สังเกตได้จาก

ในขณะที่แช่แผ่นตรวจวัดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะมีสีของสารสกัดแอนโทไซยานินแพร่ออกมาจากแผ่นตรวจวัด

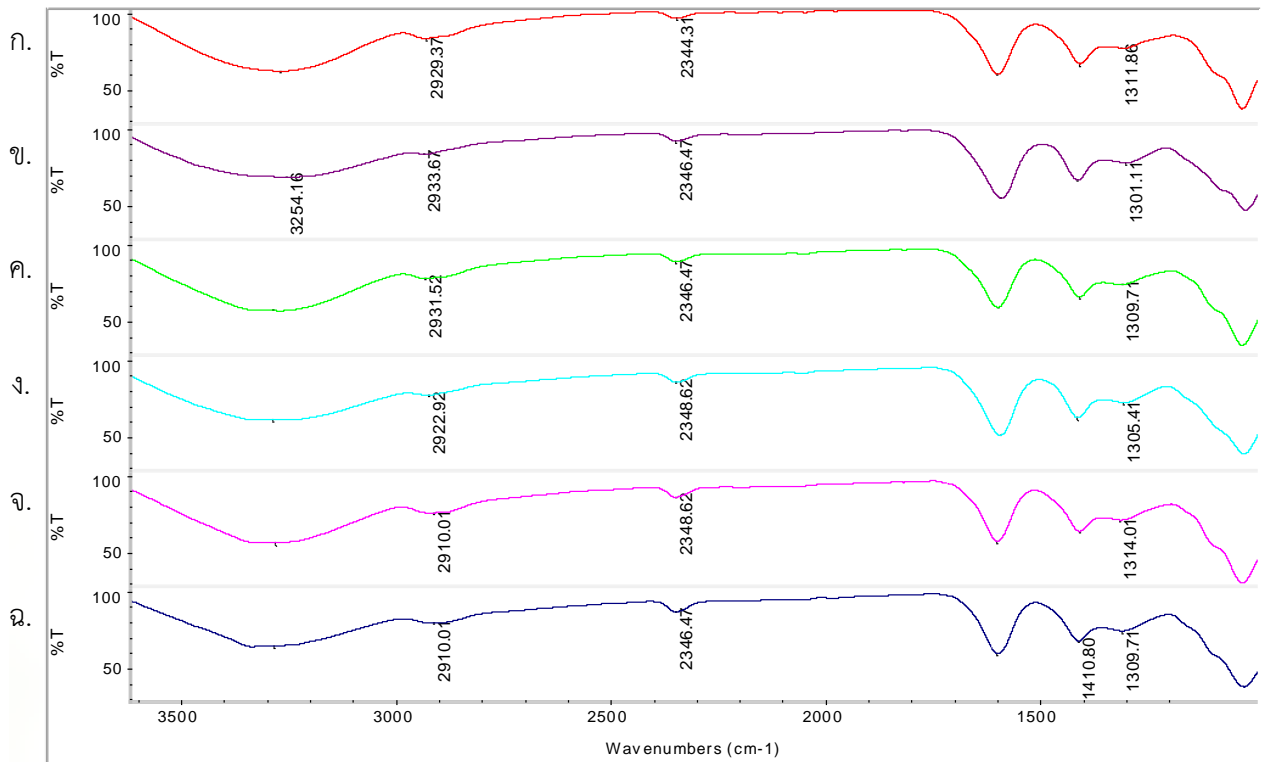
3.4 การตรวจหมู่ฟังก์ชันของแผ่นตรวจวัด ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy

จากสเปกตรัม FT-IR ของผงโซเดียมอัลจิเนต (รูปที่ 3.4ก) พบพีกกว้างของการสั่นแบบยืดของ O-H (หมู่ไฮดรอกซิล) ที่ 3270 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) และพีกของการสั่นแบบยืดของ C=O (หมู่คาร์บอกซิเลต) ที่ 1593 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) แผ่นแบคที่เรียจากเซลลูโลส (รูปที่ 3.4ข) พบพีกกว้างของการสั่นแบบยืดของ O-H (หมู่ไฮดรอกซิล) ที่ 3335 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) สารสกัดแอนโทไซยานิน (รูปที่ 3.4ค) พบพีกการสั่นแบบยืดของ O-H (หมู่ไฮดรอกซิล) ที่ 3391 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) พีกการสั่นแบบยืดของ -CH₂- ที่ 2925 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) และพีกการสั่นแบบยืดของ C=C ที่ 1631 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1})

จากสเปกตรัม FT-IR ของแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ (รูปที่ 3.5) พบพีกกว้างของของ O-H ที่ประมาณ 3200-3300 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) พีกการสั่นของ C=O (หมู่คาร์บอกซิเลต) ที่ประมาณ 1600 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) พีกการสั่นของ -CH₂- ที่ประมาณ 2900 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) จากสเปกตรัม FT-IR ไม่สามารถระบุการมีหรือไม่มีเซลลูโลสในแผ่นตรวจวัดได้



รูปที่ 3.4 สเปกตรัม FT-IR ของ ก. ผงโซเดียมอัลจิเนต ข. แผ่นเซลลูโลส และ ค. สารสกัดแอนโทไซยานิน

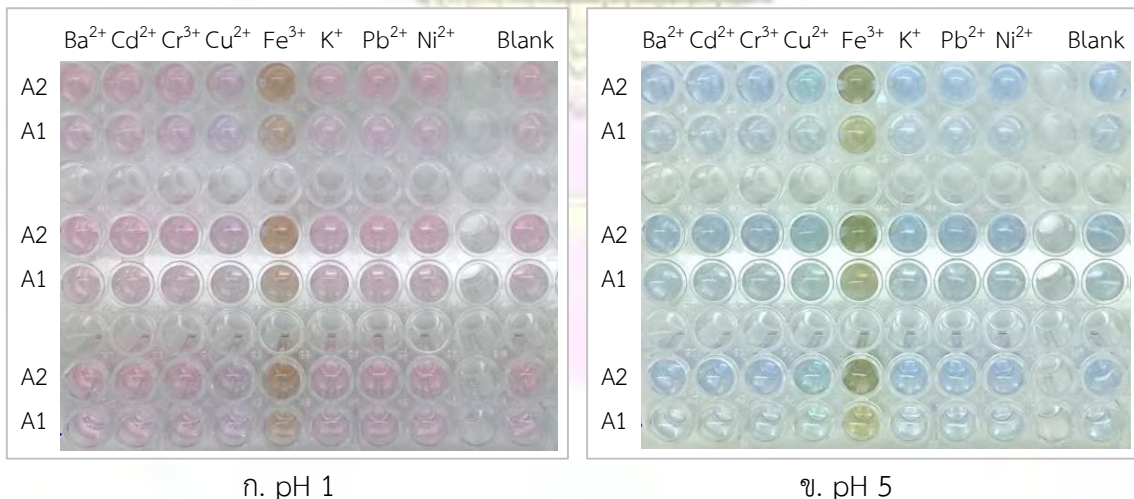


รูปที่ 3.5 สเปกตรัม FT-IR ของแผ่นตรวจวัด

ก. Alg-0 ข. Alg-10 ค. Alg-C2-0 ง. Alg-C2-10 จ. Alg-C4-0 และ ฉ. Alg-C4-10

3.5 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก

เมื่อหยดสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ลงในสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 864 (A1) และ 1,728 (A2) มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.3 พบว่า ที่ pH 1 สารละลายควบคุมจะมีสีชมพู และจะพบว่าสารละลายแอนโทไซยานินจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงและน้ำตาลอมส้ม ในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ตามลำดับ ส่วนที่ pH 5 สารละลายควบคุมจะมีสีฟ้า และสารละลายแอนโทไซยานินจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าอมเขียวและเขียวขี้ม้า ในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ตามลำดับ โดยสารละลายโลหะอื่น ๆ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

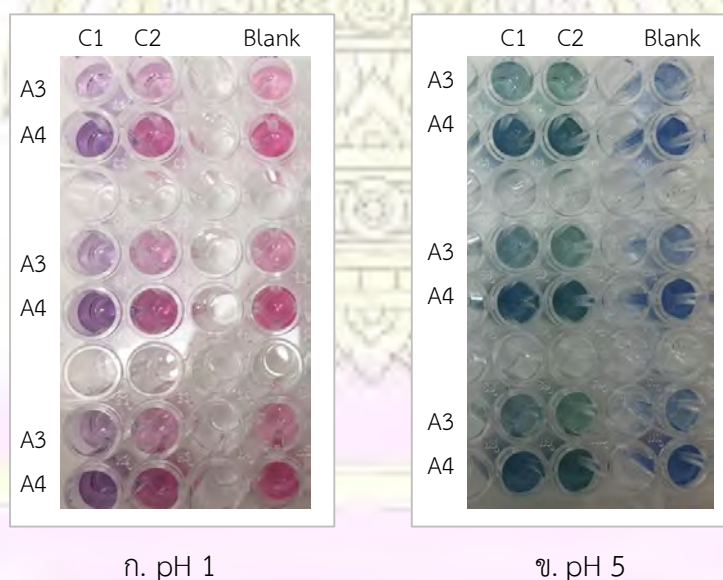


รูปที่ 3.6 สีของสารละลายแอนโทไซยานินเมื่อหยดสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ ที่ pH 1 และ 5

ตารางที่ 3.3 สีของสารละลายแอนโทไซยานินเมื่อหยดสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ ที่ pH 1 และ 5

สารละลาย โลหะหนัก	pH 1		pH 5	
	A1	A2	A1	A2
Ba ²⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
Cd ²⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
Cr ³⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
Cu ²⁺	ม่วง	ม่วง	ฟ้าอมเขียว	ฟ้าอมเขียว
Fe ³⁺	น้ำตาลอมส้ม	น้ำตาลอมส้ม	เขียวขี้ม้า	เขียวขี้ม้า
K ⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
Pb ²⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
Ni ²⁺	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า
ไม่มีโลหะหนัก	ชมพู	ชมพู	ฟ้า	ฟ้า

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายแอนโทไซยานินเมื่อหยดสารละลายโลหะหนัก Cu²⁺ ไม่ชัดเจน จึงได้เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานินเป็น 3,456 (A3) และ 6,912 (A4) มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) และสารละลาย Cu²⁺ เป็น 200 (C1) และ 400 (C2) มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) พบว่าที่ pH 1 สารละลาย Cu²⁺ ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) จะให้สารละลายเป็นสีม่วง แตกต่างจากสีควบคุมชัดเจนมากกว่าที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ส่วนที่ pH 5 สารละลายเป็นสีเขียวอมฟ้า แตกต่างจากสารละลายควบคุมอย่างชัดเจนทุกความเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.7 สีของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานิน และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก Cu²⁺ ที่ pH 1 และ 5

ตารางที่ 3.4 สีของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอนโทไซยานิน และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} ที่ pH 1 และ 5

	pH 1		pH 5	
	C3	C4	C3	C4
A1	ม่วง	ม่วง	เขียวอมฟ้า	เขียวอมฟ้า
A2	ม่วง	ม่วง	เขียวอมฟ้า	เขียวอมฟ้า

3.6 การตรวจสอบสีของแอนโทไซยานินกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 3.8ก และ ข แสดงให้เห็นว่าสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสีแอนโทไซยานินในสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} การทดลองนี้ทำเพื่อยืนยันว่าสามารถใช้แผ่นตรวจวัดที่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ได้ โดยไม่กระทบกับสีที่เกิดจากสีของแอนโทไซยานินและโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+}

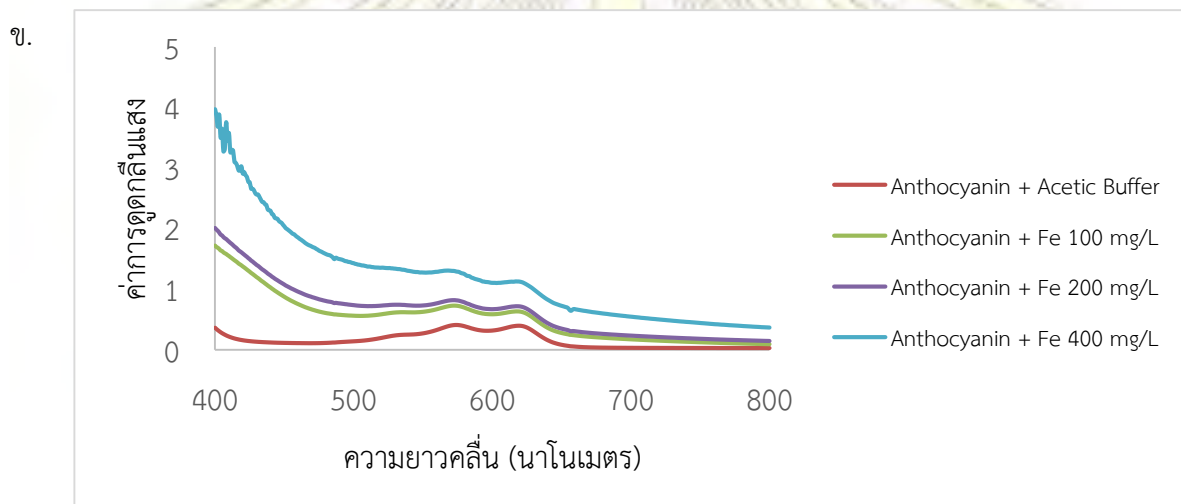
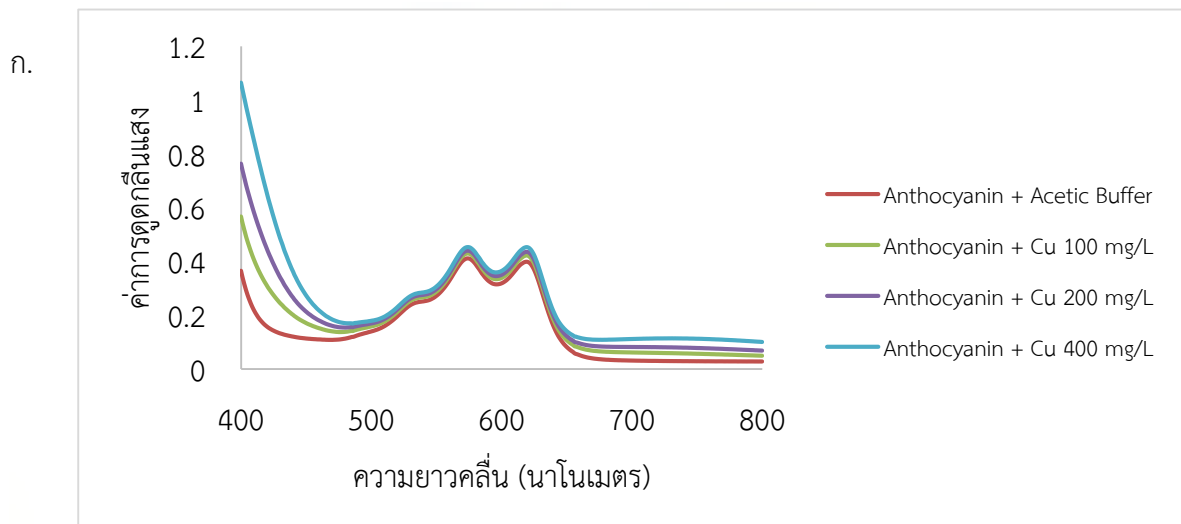


รูปที่ 3.8 การตรวจสอบผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงสีแอนโทไซยานิน ในสารละลายโลหะหนัก ก. Cu^{2+} และ ข. Fe^{3+} ที่ pH 5

3.7 การตรวจสอบการดูดกลืนแสงของสารละลายแอนโทไซยานิน เมื่อผสมกับสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy

นำสารละลายแอนโทไซยานินความเข้มข้น 11,702 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ปริมาตร 500 ไมโครลิตร หยดสารละลายโลหะหนัก Cu^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ตามลำดับ ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy สามารถเขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นที่ pH 5 ได้ ดังรูปที่ 3.9







จากรูปที่ 3.9 พบว่าเมื่อเติมสารละลายโลหะ Cu^{2+} หรือ Fe^{3+} สารละลายแอนโทไซยานินมีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายโลหะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม (ค่าความยาวคลื่นสูงสุดไม่เปลี่ยนแปลง)















รูปที่ 3.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายแอนโทไซยานินกับสารละลายโลหะหนัก
ก. Cu^{2+} และ ข. Fe^{3+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ pH 5







3.8 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีของแผ่นตรวจวัดกับสารละลายโลหะหนัก







นำแผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ จุ่มในสารละลายโลหะหนักที่ความยาวครึ่งหนึ่งของแผ่นตรวจวัด โดยทดสอบในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ที่ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) และ pH 5 เป็นเวลา 10 วินาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าแผ่นตรวจวัดที่มีแต่อัลจิเนต (Alg-0 และ Alg-10) จะอยู่ ไม่คงรูป เมื่อจุ่มในสารละลายถึงแม้จะแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วก็ตาม แผ่นตรวจวัดที่ประกอบด้วยอัลจิเนตและเซลลูโลส จะยังคงสภาพได้ดี โดยการสังเกตสีด้วยตาเปล่าจะพบว่าแผ่นตรวจวัดดังกล่าวที่ไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Alg-C2-0 และ Alg-C4-0) จะให้สีที่แตกต่างจากสีที่ควบคุมชัดเจนกว่าที่แช่ในสารละลายดังกล่าว (Alg-C2-10 และ Alg-C4-10)







Alg-0			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

Alg-10			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

Alg-C2-0			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

Alg-C2-10			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

Alg-C4-0			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

Alg-C4-10			
	100 mg/L	200 mg/L	400 mg/L
Cu^{2+}			
Fe^{3+}			

รูปที่ 3.10 แผ่นตรวจวัดทั้ง 6 แบบ เมื่อจุ่มในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ที่ pH 5

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

สามารถเตรียมแผ่นตรวจวัดโลหะหนักจากอัลจินตผสมเซลลูโลสที่บรรจุแอนโทไซยานินได้ 6 แบบ ได้แก่ แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Alg-0) แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและแซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที (Alg-10) แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและเซลลูโลส 2 กรัม ไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Alg-C2-0) แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและเซลลูโลส 2 กรัม แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที (Alg-C2-10) แผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและเซลลูโลส 4 กรัม ไม่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Alg-C4-0) และแผ่นตรวจวัดที่มีอัลจินตและเซลลูโลส 4 กรัม แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 นาที (Alg-C4-10) พบว่าการใส่เซลลูโลสช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสีแอนโทไซยานิน และคงรูปแผ่นตรวจวัดเมื่อจุ่มในสารละลายโลหะได้ดี การแช่แผ่นตรวจวัดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ทำให้มีปริมาณแอนโทไซยานินในแผ่นตรวจวัดลดลงเนื่องจากการละลายหลุดออกจากแผ่นขณะแช่ และแผ่นตรวจวัดที่แซในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะให้สีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อจุ่มในสารละลายโลหะหนักสังเกตด้วยตาเปล่าได้ยากกว่าไม่แซ

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายแอนโทไซยานินกับสารละลายโลหะหนักต่าง ๆ พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนในสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} และจากการตรวจสอบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy พบว่ามีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นสูงสุด

4.2 ข้อเสนอแนะ

- ตรวจสอบการดูดกลืนแสงของสารละลายโลหะ Cu^{2+} และ Fe^{3+} ที่ไม่ได้ผสมแอนโทไซยานิน เพื่อให้แน่ใจว่าสีที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้เกิดจากสารละลายโลหะ

บรรณานุกรม

- (1) Gumpu, M. B.; Sethuraman, S.; Krishnan, U. M.; Rayappan, J. B. B. A Review on Detection of Heavy Metal Ions in Water – An Electrochemical Approach. *Sensors and Actuators B: Chemical*. **2015**, *213*, 515-533.
- (2) Vijayalakshmi, K.; Gomathi, T.; Latha, S.; Hajeeth, T.; Sudha, P.N. Removal of Copper(II) from Aqueous Solution Using Nanochitosan/Sodium Alginate/Microcrystalline Cellulose Beads. *International Journal of Biological Macromolecules*. **2016**, *82*, 440-452.
- (3) An, B.; Lee, H.; Lee, S.; Lee, S.; Choi, J. Determining the Selectivity of Divalent Metal Cations for the Carboxyl Group of Alginate Hydrogel Beads During Competitive Sorption. *Journal of Hazardous Materials*. **2015**, *298*, 11-18.
- (4) Karkeh-abadi, F.; Saber-Samandari, S.; Saber-Samandari, S. The Impact of Functionalized CNT in the Network of Sodium Alginate-based Nanocomposite Beads on the Removal of Co(II) Ions from Aqueous Solutions. *Journal of Hazardous Materials*. **2016**, *312*, 224-233.
- (5) Santos, D. T.; Albarelli, J. Q.; Beppu, M. M.; Meireles, M. Stabilization of Anthocyanin Extract from Jaboticaba Skins by Encapsulation Using Supercritical CO₂ as Solvent. *Food Research International*. **2013**, *50*, 617-624. Fertah, M.; Belfkira, A.; Dahmane, E.; Taourirte, M.; Brouillette F. Extraction and Characterization of Sodium Alginate from Moroccan *Laminaria Digitata* Brown Seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*. [Online early access]. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.05.003. Published Online: May 17, 2014. <http://www.sciencedirect.com> (accessed Feb 13, 2017)
- (6) Fertah, M.; Belfkira, A.; Dahmane, E.; Taourirte, M.; Brouillette F. Extraction and Characterization of Sodium Alginate from Moroccan *Laminaria Digitata* Brown Seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*. [Online early access]. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.05.003. Published Online: May 17, 2014. <http://www.sciencedirect.com> (accessed Feb 13, 2017)
- (7) <http://cuisinemoleculaire2012.e-monsite.com/medias/images/alginate-de-sodium.gif> (accessed Mar 17, 2017)
- (8) Zhang, Z.; Zhang, R.; Zou, L.; McClements, D. J. Protein Encapsulation in Alginate Hydrogel Beads: Effect of pH on Microgel Stability, Protein Retention and Protein Release. *Food Hydrocolloids*, **2016**, *58*, 308-315.

- (9) Chen, K.; Ling, Y.; Cao, C.; Li, X.; Chen, X.; Wang, X. Chitosan Derivatives/Reduced Graphene Oxide/Alginate Beads for Small-molecule Drug Delivery. *Materials Science and Engineering C*. **2016**, *69*, 1222-1228.
- (10) Cerciello, A.; Del Gaudio, P.; Granata, V.; Sala, M.; Aquino, R. P.; Russo, P. Synergistic Effect of Divalent Cations in Improving Technological Properties of Cross-linked Alginate Beads. *International Journal of Biological Macromolecules*. **2017**, *101*, 100-106.
- (11) https://www.intechopen.com/source/html/37702/media/image2_w.jpg (accessed March 17, 2017)
- (12) Papageorgiou, S.; Kouvelos, E.; Katsaros F. Calcium Alginate Beads from *Laminaria digitata* for the Removal of Cu^{+2} and Cd^{+2} from Dilute Aqueous Metal Solutions. *Desalination*. **2008**, *224*, 293–306.
- (13) de Oliveira, E.F.; Paula, H.C.B.; de Paula, R.C.M. Alginate/Cashew Gum Nanoparticles for Essential Oil Encapsulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. **2014**, *113*, 146-151.
- (14) Wang, L.; Shankar, S.; Rhim, J. Properties of Alginate-based Films Reinforced with Cellulose Fibers and Cellulose Nanowhiskers Isolated from Mulberry Pulp. *Food Hydrocolloids*. **2017**, *63*, 201-208.
- (15) Cheng, Z.; Yang, Rendang.; Liu, X.; Liu, X.; Chen, H. Green Synthesis of Bacterial Cellulose via Acetic Acid Pre-hydrolysis Liquor of Agricultural Corn Stalk Used as Carbon Source. *Bioresource Technology*. **2017**, *234*, 8-14.
- (16) Esa, F.; Tasirin, S. M.; Rahman, N. A. Overview of Bacterial Cellulose Production and Application. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. **2014**, *2*, 113–119.
- (17) Svensson, A.; Nicklasson, E.; Harraha, T.; Panilaitisa, B.; D.L. Kaplana, D.L.; Brittberg, M.; Gatenholmb, P. Bacterial Cellulose as a Potential Scaffold for Tissue Engineering of Cartilage. *Biomaterials*. **2005**, *26*, 419–431.
- (18) Chen, S.; Zou, Y.; Yan, Z.; Shen, W.; Shi, S.; Zhang, X.; Wang, H. Carboxymethylated-bacterial Cellulose for Copper and Lead Ion Removal. *Journal of Hazardous Materials*. **2009**, *161*, 1355–1359.
- (19) Pourjavaher, S.; Almasi H.; Meshkinia, S.; Pirsab, S.; Parandica E. Development of a Colorimetric pH Indicator Based on Bacterial Cellulose Nanofibers and Red Cabbage (*Brassica oleraceae*) Extract. *Carbohydrate Polymers*. **2017**, *56*, 193–201.
- (20) Konczak, I.; & Zhang, W. Anthocyanins-more than Natures Colours. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. **2004**, *5*, 239-240.

- (21) อรุษา เขาวนลิขิต. การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, **2554**.
- (22) Cavalcant, R. N., Santos, D. T. and Meireles, M. A. 2011. Non-thermal Stabilization Mechanisms of Anthocyanins in Model and Food Systems- an Overview. *Food Research International*. **2011**, *44*, 499–509.
- (23) Rein, M. J. Copigmentation Reactions and Color Stability of Berry Anthocyanins. Dissertation. Department of Applied Chemistry and Microbiology. University of Helsinki. **2015**.
- (24) <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9527/6/Chapter2.pdf> (accessed Apr 10, 2017)
- (25) Mazza, G.J.; Brouillard, R. Color Stability and Structural Transformations of Cyanidin 3,5-diglycoside and Four 3-deoxyanthocyanins in Aqueous Solutions. *J. Agric. food Chem.* **1987**, *35*, 422–426.
- (26) Khaodee, W.; Aeungmaitrepirom, W.; Tuntulani, T. Effectively Simultaneous Naked-eye Detection of Cu(II), Pb(II), Al(III) and Fe(III) Using Cyanidin Extracted from Red Cabbage as Chelating Agent. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. **2014**, *126*, 98-104.
- (27) Fedenko, V. S.; Shemet S. A.; Landi, M. UV–vis Spectroscopy and Colorimetric Models for Detecting Anthocyanin-metal Complexes in Plants: An Overview of in Vitro and in Vivo Techniques Volodymyr S. Fedenko, Sergi. *Journal of Plant Physiology*. **2017**, *212*, 13-28.
- (28) Patras, A.; Brunton, N. P.; Donnell, C. O.; Tiwari, B.K. Effect of Thermal Processing on Anthocyanin Stability in Foods; Mechanisms and Kinetics of Degradation. *Journal of Trends in Food Science & Technology*. **2010**, *21*, 3–11.
- (29) Song, B. J.; Sapper, T. N.; Burtch, C. E.; Brimmer, K.; Goldschmidt, M.; Ferruzzi, M. G. Photo- and Thermodegradation of Anthocyanins from Grape and Purple Sweet Potato in Model Beverage Systems. *Journal Agricultural Food Chemistry*. **2013**, *61*, 1364–1372.
- (30) Chu, B.; Wilkin, J. D.; House, M.; Roleska, M.; Lemos, A. M. Effect of Sucrose on Thermal and pH Stability of *Clitoria ternatea* Extract. *International Journal of Food Processing Technology*. **2016**, *3*, 11–17.
- (31) Terahara, N.; Matsui, T.; Osajima, T.; Saito, N.; Toki, K.; Honda, T. Five New Anthocyanins Ternatin A3 B4 B3 B2 and D2 from *Clitoria ternatea* Flowers. *National production*. **1996**, *59*, 139–144.
- (32) Kungsuwan, K.; Singh, K.; Phetkao, S.; Utama-ang, N. Effects of pH and Anthocyanin Concentration on Color and Antioxidant Activity of *Clitoria ternatea* Extract. *Food and Applied Bioscience*. **2014**, *2(1)*, 31–46.

- (33) Terahara, N.; Saito, N.; Honda, T.; Toki, K.; Osajima, Y. Aclated Anthocyanins of *Clitoria ternatea* Flowers and Their Acyl Moieties. *Phytochemistry*. **1990**, *29*, 949–953.
- (34) Chaovanalikit, A.; Apichayaluk, S.; Kongtong, S.; Chuprathum, S. Effect of pH and Temperature on the Stability and Visual Color of Roselle and Butterfly Pea Extracts. *Journal of Agricultural Science*. **2009**, *40*(3), 5–8.
- (35) Abdullah, R.; Lee P. M.; Hung L. K. Multiple Color and pH Stability of Floral Anthocyanin Extract: *Clitoria Ternatea*. In *Science and Social Research*, Proceedings of the International conference on Science and Social Research, Kuala Lumpur, Malaysia, December 5-7, 2010.
- (36) Saptarini, M. N.; Suryasaputra, D.; Nurmalia, H. Application of Butterfly Pea (*Clitoria ternatea* Linn) Extract as an Indicator of Acid-base Titration. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. **2015**, *7*(2), 275–280.



ภาคผนวก

จากตารางที่ 3.2 การหาค่าความหนาของแผ่นตรวจวัด หาได้จากข้อมูลดิบ ดังตารางนี้

ตารางที่ 1 ค่าความหนาของแผ่นตรวจวัดที่วัดได้จริงด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) โดยวัดความหนาของแผ่นตรวจวัดบริเวณต่างๆ จำนวน 10 ครั้ง

แผ่นตรวจวัด	หมายเลข แผ่นตรวจวัด	ความหนาของแผ่นตรวจวัด (มิลลิเมตร)									
Alg-0	1	0.15	0.17	0.13	0.24	0.26	0.14	0.33	0.15	0.18	0.17
	2	0.16	0.24	0.17	0.23	0.13	0.34	0.16	0.10	0.18	0.12
	3	0.14	0.22	0.19	0.33	0.11	0.19	0.25	0.15	0.22	0.18
Alg-10	1	0.39	0.36	0.72	0.75	1.05	1.09	1.15	0.65	0.80	0.61
	2	0.41	0.60	0.51	0.44	0.39	1.12	0.53	0.74	0.47	0.76
	3	0.43	0.36	0.68	0.51	1.05	0.84	0.95	0.67	0.57	0.63
Alg-C2-0	1	0.34	0.34	0.32	0.31	0.34	0.34	0.29	0.30	0.30	0.33
	2	0.23	0.22	0.26	0.22	0.25	0.24	0.25	0.28	0.26	0.25
	3	0.34	0.36	0.35	0.35	0.33	0.36	0.38	0.35	0.34	0.38
Alg-C2-10	1	0.42	0.34	0.43	0.51	0.53	0.62	0.63	0.69	0.65	0.63
	2	0.52	0.67	0.70	0.44	0.62	0.38	0.63	0.49	0.66	0.62
	3	0.63	0.47	0.62	0.65	0.68	0.65	0.55	0.64	0.46	0.35
Alg-C4-0	1	0.37	0.34	0.32	0.31	0.31	0.35	0.33	0.32	0.33	0.33
	2	0.38	0.38	0.35	0.37	0.35	0.40	0.39	0.39	0.35	0.37
	3	0.34	0.37	0.37	0.38	0.42	0.30	0.35	0.43	0.32	0.31
Alg-C4-10	1	0.59	0.64	0.58	0.62	0.63	0.62	0.57	0.60	0.57	0.62
	2	0.65	0.60	0.63	0.57	0.58	0.64	0.59	0.62	0.55	0.58
	3	0.62	0.63	0.56	0.58	0.61	0.60	0.54	0.57	0.68	0.59

ประวัติผู้วิจัย

นายเมธา ชวนประสิทธิ์กุล เกิดวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายสายสามัญ แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ บดินทรเดชา เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังจบการศึกษา
ปริญญาดรี 198 ถนน โชคชัย 4 แขวง สะพานสอง เขต วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร 10310 อีเมล m_meatra_good@hotmail.com



