

การพัฒนาตัวรับรู้เชิงสีเม็ดบีสองชั้นของเคอร์คูมินสำหรับวิเคราะห์
ไพริดอกซีน (วิตามินบี6) ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมวิตามินโดยใช้ร่วมกับการ
วิเคราะห์ด้วยการประมวลผลภาพถ่าย

DEVELOPMENT OF CURCUMIN DOUBLE-WALLED BEADS
COLORIMETRIC SENSOR FOR DETERMINATION OF PYRIDOXINE
(VITAMIN B6) IN FUNCTIONAL DRINKS WITH DETECTION
BY IMAGE PROCESSING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2568

KMITL-2025-SC-M-012-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF CURCUMIN DOUBLE-WALLED BEADS
COLORIMETRIC SENSOR FOR DETERMINATION OF PYRIDOXINE
(VITAMIN B6) IN FUNCTIONAL DRINKS WITH DETECTION
BY IMAGE PROCESSING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2025

KMITL-2025-SC-M-012-046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตัวรับรู้เชิงสีเม็ดบิทสองชั้นของเคอร์คูมินสำหรับวิเคราะห์ไพรดอกซิน (วิตามินบี6) ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมวิตามินโดยใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยการประมวลผลภาพถ่าย
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสิรินยากรณ์ ชินวัฒน์
รหัสประจำตัว	66056082
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อาจณรงค์ เมธาวิสรรเสริญ

บทคัดย่อ

วิธีการวิเคราะห์เชิงสีโดยการใช้โทรศัพท์มือถือสำหรับการตรวจวัดเชิงปริมาณของไพรดอกซิน (วิตามินบี6, VB-6) ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน ได้รับการพัฒนาโดยการใช้เม็ดบิทไฮโดรเจล 2 ชั้น Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs เม็ดบิทที่ภายในบรรจุสารละลายเคอร์คูมิน (CUR_{Hydrogel}) เป็นตัวตรวจวัด CUR_{Hydrogel} สามารถขึ้นรูปได้อย่างง่ายโดยวิธีรีเวิร์สเฟสเพียรีฟิเคชัน โดยการบรรจุอิมัลชันเคอร์คูมินภายในเม็ดบิทชั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจิเนต และเคลือบชั้นที่ 2 ด้วย ZnONPs/PDADMAC การขึ้นรูป CUR_{Hydrogel} จะอาศัยการยึดเกาะกันการผ่านแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดบิท โดยมีความแข็งแรงสูงถึง 6.45×10^4 N/m และมีความยืดหยุ่น 1.01×10^6 N/m² อีกทั้งสามารถป้องกันการสลายตัวจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต ได้นานถึง 28 วัน CUR_{Hydrogel} ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือ การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยาสองขั้นตอน โดยขั้นแรกกรดบอริกจะทำปฏิกิริยากับวิตามินบี6 เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไพรดอกซิน-โบรอนที่ไม่มีสี จากนั้นบอเรตไอออนที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมินสร้างสารประกอบโรโซไซยานินที่มีสีส้มแดง สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเหลืองเมื่อปริมาณวิตามินบี6 มากขึ้น ซึ่งสามารถใช้วัดปริมาณวิตามินบี6 ได้โดยการถ่ายภาพ และวัดค่าความเข้มสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) ผลการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 อยู่ในช่วง 10-125 มิลลิกรัมต่อลิตร ($R^2 = 0.9984$) มีขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOQ) เท่ากับ 2.93 และ 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงว่าการสร้าง CUR_{Hydrogel} มีความแม่นยำสูงในการตรวจวัดปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยมีร้อยละการคืนกลับ 99.84% ถึง 103.03% นอกจากนี้ผลการตรวจวัดที่ได้จากวิธีนี้ได้ทดสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน HPLC และ UV-Vis Spectrophotometry ซึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดเชิงสีโดยอาศัยโทรศัพท์มือถือแสดงประสิทธิภาพที่ดี ในการตรวจวัดวิตามินบี6 ในเครื่องต้ม
เสริมวิตามิน

คำสำคัญ : เครื่องต้มเสริมวิตามิน โรโซไซยานิน รีเวิร์สสเฟียร์รีเฟคชัน วิตามินบี6 อนุภาคนาโนซิงค์
ออกไซด์ ไฮโดรเจล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Curcumin Double-Walled Beads Colorimetric Sensor for Determination of Pyridoxine (Vitamin B6) In Functional Drinks with Detection by Image Processing
Student Name	Miss Sirinyakorn Chinnawat
Student ID	66056082
Degree	Master of Science (Applied Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Arjnarong Mathaweasansurn

Abstract

A smartphone-based colorimetric method for quantitative detection of pyridoxine (Vitamin B6, VB-6) in functional drinks has been realized by developing a double-layer spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin (CUR_{Hydrogel}) probe. The CUR_{Hydrogel} was readily fabricated by a molecular self-assembly reverse spherification method, which loaded curcumin emulsions in the 1st layer of Ca (II)-alginate and the 2nd layer of ZnONPs/PDADMAC. Electrostatic interaction initiates cross-linking and produces CUR_{Hydrogel} that displays high stiffness of 6.45×10^4 N/m, strength of 1.01×10^6 N/m², and effectiveness in blocking ultraviolet light of 28 days. The CUR_{Hydrogel} probe was applied for detecting VB-6 via a smartphone-based sensing platform. The colorimetric assay was based on a two-step strategy involving initially the formation of the colorless pyridoxine-boron complex by VB-6 and boric acid. Then, unreacted boric acid complexed with curcumin emulsion to form a reddish orange rosocyanine. The color changes from orange to yellowish of the rosocyanine depending on the VB-6 concentration. The RGB values were assessed via a smartphone application, providing the linearity of VB-6 detection of 10-125 mg L⁻¹ with a LOD and LOQ of 2.93 mg L⁻¹ and 9.77 mg L⁻¹. ($R^2 = 0.9984$) The fabricated CUR_{Hydrogel} performed effectively in VB-6 determination in functional drinks, with recoveries ranging from 99.84% to 103.03%. Particularly, the results of this method were also validated by comparing with HPLC and UV-Vis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spectrophotometry to improve assay accuracy and dependability. The smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel} has great potential application prospects for detecting VB-6 in functional drink samples.

Keywords: Functional drinks, Rosocyanine, Reverse spherification, Vitamin B6, Zinc oxide nanoparticles, Hydrogel



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.อาจนรงค์ เมธาวิสรเสริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด และให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัยรวมถึงให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการจัดทำรูปเล่มโครงงานพิเศษ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณ ดร.ฐิติรัตน์ แม้นทิม และ รศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเคมีประยุกต์เชิงบูรณาการ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณนักศึกษาปริญญาโท-เอกทุกท่านในหน่วยวิจัยเคมีประยุกต์เชิงบูรณาการ รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆใน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำช่วยเหลือแนวทางต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษาตลอดจนคอยเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนให้ กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันในการทำโครงงานพิเศษที่ให้ความร่วมเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อยและหากมีข้อผิดพลาดประการใดคณะผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวสิรินยากรณ์ ชินวัฒน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไพรดอกซิน (วิตามินบี6).....	4
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของไพรดอกซิน.....	4
2.1.2 ประโยชน์ของวิตามินบี6.....	5
2.1.3 แหล่งอาหารที่พบวิตามินบี6.....	5
2.1.4 วิตามินบี6 ชนิดให้เสริม.....	6
2.1.5 ปริมาณวิตามินบี6 ที่ร่างกายต้องการ.....	6
2.1.6 การขาดวิตามินบี6.....	7

2.1.7 การรับวิตามินบี6 มากเกินไป..... 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.8	วิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6 ในปัจจุบัน.....	10
2.2	เคอร์คูมิน.....	16
2.2.1	ข้อมูลทั่วไปของเคอร์คูมิน.....	16
2.2.2	คุณลักษณะของเคอร์คูมิน.....	17
2.2.3	วิธีการวิเคราะห์เชิงสีโดยใช้เคอร์คูมิน.....	20
2.3	กรดบอริก.....	22
2.3.1	ข้อมูลทั่วไปของกรดบอริก.....	22
2.3.2	การแตกตัวของกรดบอริก.....	23
2.4	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	23
2.4.1	ข้อมูลทั่วไปของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	23
2.4.2	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์.....	24
2.4.3	ประโยชน์ของซิงค์ออกไซด์.....	25
2.4.4	กลไกการป้องกันแสง.....	27
2.4.5	การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	28
2.4.6	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	32
2.5	เม็ดบีด.....	40
2.5.1	ประเภทของเม็ดบีด.....	41
2.5.2	กระบวนการขึ้นรูปเม็ดบีด.....	42
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
2.6.1	การเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างบอริกกับไทอามีน (วิตามินบี1) และ ไพริดอกซีน (วิตามินบี6) Boric acid complexes with Thiamine (vitamin B1) and Pyridoxine (Vitamin B6).....	54
2.6.2	การประยุกต์ใช้เม็ดบีดในการวิเคราะห์ทางเคมี.....	56
2.6.3	การวิเคราะห์ภาพสีจากสมาร์ตโฟนโดยเทคนิค RGB.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	71
3.1 เคมีภัณฑ์และอุปกรณ์	71
3.1.1 สารเคมี	71
3.1.2 อุปกรณ์	72
3.2 การทดลอง.....	73
3.2.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน.....	73
3.3 ศึกษาการขึ้นรูปเม็ดบีท	73
3.3.1 ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีท.....	73
3.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีทขั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต.....	74
3.3.3 ศึกษาการสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีทขั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR _{Hydrogel}).....	75
3.3.4 ศึกษาความเสถียรของ CUR _{Hydrogel}	76
3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel}	78
3.4.1 ศึกษา pH ของบอริกที่เหมาะสม	78
3.4.2 ศึกษาปริมาตรตัวอย่างวิตามินบี6 ที่เหมาะสม	78
3.4.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนและวิตามินบี6	78
3.4.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือ และ CUR _{Hydrogel}	78
3.5 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR _{Hydrogel}	79
3.5.1 ศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity).....	79
3.5.2 ศึกษาความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel}	79
3.5.3 ศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ)	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ศึกษาความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel} (Interferences study).....	80
3.5.5 ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ด้วยวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC	80
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปรายผล	82
4.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน	84
4.1.1 ศึกษาความเข้มข้นTween80 ที่เหมาะสมในการทดลอง.....	84
4.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสม.....	84
4.1.3 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายเคอร์คูมิน	84
4.1.4 ศึกษาระยะเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม	85
4.2 การขึ้นรูปเม็ดบีท (Bead Formation).....	87
4.2.1 ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีท.....	87
4.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีทขั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจิเนต.....	89
4.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีทขั้นที่ 2 ของ Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR _{Hydrogel}).....	93
4.2.4 ศึกษาความเสถียรของ CUR _{Hydrogel}	99
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel}	103
4.3.1 ศึกษา pH ของกรดบอริกที่เหมาะสม.....	103
4.3.2 ศึกษาปริมาณวิตามินบี6 ที่เหมาะสมในการตรวจวัด.....	105
4.3.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6.....	106
4.3.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและ CUR _{Hydrogel}	107
4.4 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องต้มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR _{Hydrogel}	109
4.4.1 ศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity).....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2	ศึกษาความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel}	111
4.4.3	ศึกษาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ).....	111
4.4.4	ศึกษาความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR _{Hydrogel} (Interferences study).....	112
4.4.5	ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ด้วยวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC	113
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	118
	บรรณานุกรม.....	119
	ภาคผนวก ก	127
	ภาคผนวก ข	131
	ภาคผนวก ค	140
	ภาคผนวก ง.....	147
	ประวัติผู้เขียน.....	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แหล่งอาหารที่พบวิตามินบี6.....	6
ตารางที่ 2.2 ปริมาณวิตามินบี6 ที่ร่างกายควรได้รับต่อวัน.....	7
ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย HPLC.....	11
ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย LC-MS/MS.....	12
ตารางที่ 2.5 ข้อมูลและสมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	24
ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์.....	36
ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างของการขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคต่าง ๆ.....	53
ตารางที่ 2.8 การศึกษาการขึ้นเจลระหว่างอัลจินตและโอออนต่าง ๆ ที่มีประจุบวก.....	63
ตารางที่ 2.9 ค่าความเข้มสี RGB เฉลี่ยของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	66
ตารางที่ 2.10 ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการ.....	69
ตารางที่ 3.1 สารเคมี.....	71
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่สูงชันเอกลักษณ์.....	75
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย HPLC.....	81
ตารางที่ 4.1 การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟเคชัน.....	88
ตารางที่ 4.2 การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟเคชัน.....	89
ตารางที่ 4.3 ภาพ TEM และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	94
ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6โดยการใช้ CUR _{Hydrogel}	108
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6.....	111
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามินโดยการใช้ CUR _{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและวัดความเข้มของสีเขียวเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC.....	114
ตารางที่ 4.7 Anova test ของการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR _{Hydrogel} เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานวิธี UV-Vis Spectrophotometry และHPLC.....	116
ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR _{Hydrogel} กับงานวิจัยอื่นๆ.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของไพริดอกซีนหรือวิตามินบี6..... 4
รูปที่ 2.2	ความเข้มข้นของกระแสเทียบกับวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 4 ถึง 500 ไมโครโมลาร์..... 13
รูปที่ 2.3	กราฟเส้นตรงแสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลูออเรสเซนซ์ที่ความเข้มข้น AOT ที่แตกต่างกัน..... 14
รูปที่ 2.4	สเปกตรัม Synchronous Fluorescence ของวิตามินบีที่ [AOT]=3 x 10 ⁻⁴ ... 14
รูปที่ 2.5	การเกิดปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบี6 กับ Diazotized p-nitroaniline..... 15
รูปที่ 2.6	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง วิตามินบี6 กับ Diazotized p-nitroaniline..... 15
รูปที่ 2.7	สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของวิตามินบี6ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 16
รูปที่ 2.8	โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน..... 17
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของเคอร์คูมินที่ pH ต่าง ๆ..... 18
รูปที่ 2.10	ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของเคอร์คูมิน (A) Vnillin, (B) Ferulic acid, (C) Feruloyl methane, (D) Vanillic acid, (E) Ferulic aldehyde, (F) 4-Vinyl guaiaicol, (G) P-hydroxybenzaldehyde, (H) P-hydroxybenzoic acid.... 19
รูปที่ 2.11	การวิเคราะห์ Fe(III) โดยการใช้ฟิล์มเคอร์คูมิน..... 21
รูปที่ 2.12	(A) ฟิล์มเคอร์คูมินบนชั้นพลาสติก (B) ผลิตภัณฑ์สีที่ได้จากการทดสอบฟิล์มเคอร์คูมินในตัวอย่างที่เป็นสารละลายเคอร์คูมินและสารละลายโบรอน (C) ฟิล์มเคอร์คูมินในสภาวะปกติและเมื่อใช้ในการวิเคราะห์โบรอน (D) สีของฟิล์มเคอร์คูมินที่เปลี่ยนไปในการวิเคราะห์โบรอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (E) ผลของการแช่ฟิล์มเคอร์คูมินลงในสารละลายโบรอนที่เวลาแตกต่างกัน..... 22
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของกรดบอริก..... 23
รูปที่ 2.14	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบ Wurtzite..... 24
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบ Zinc Blend..... 25
รูปที่ 2.16	กลไกการป้องกันแสงของซิงค์ออกไซด์..... 28
รูปที่ 2.17	(A) กลไกการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (B) สเปกตรัม FIIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์..... 29
รูปที่ 2.18	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES..... 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.19	กลไกการปรับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย VTES.....	31
รูปที่ 2.20	สเปกตรัม FTIR แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย VTES.....	32
รูปที่ 2.21	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน.....	33
รูปที่ 2.22	ภาพ SEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล..	35
รูปที่ 2.23	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	38
รูปที่ 2.24	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแสดงระนาบผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล.....	39
รูปที่ 2.25	ภาพ TEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่กำลังขยาย (A) 75,000x (B) 160,000x (C) ภาพSEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	39
รูปที่ 2.26	กราฟ TGA-DSC แสดงการสลายตัวทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม.....	40
รูปที่ 2.27	การขึ้นรูปเม็ดปืทด้วยเทคนิคพ่นฝอยแบบบอบแห้ง.....	43
รูปที่ 2.28	ภาพ SEM แสดงเม็ดปืทที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคพ่นฝอยแบบบอบแห้ง.....	44
รูปที่ 2.29	การขึ้นรูปเม็ดปืทด้วยเทคนิคโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน.....	46
รูปที่ 2.30	การขึ้นรูปเม็ดปืทด้วยเทคนิคอิมัลชัน.....	48
รูปที่ 2.31	ประเภทของปืทอิมัลชัน.....	49
รูปที่ 2.32	โครงสร้างแบบกล่องไข่ของแคลเซียมคลอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมอัลจิเนต.....	50
รูปที่ 2.33	การขึ้นรูปเม็ดปืทด้วยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน.....	51
รูปที่ 2.34	เม็ดปืทที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชันและนำมาใช้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ไบโอจินิกเอมีนในเนื้อเน่า.....	52
รูปที่ 2.35	การขึ้นรูปเม็ดปืทด้วยเทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน.....	53
รูปที่ 2.36	กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6.....	54
รูปที่ 2.37	สเปกตรัม FTIR ของ (a) H ₃ P HCl, (b) Na[B(HP)(OH) ₂] และ (c) Na[B(HP) ₂]....	55
รูปที่ 2.38	(a) TGA (b) DTA curves of Pyridoxine (-), Na[B(HP)(OH) ₂](-) and Na[B(HP) ₂](-).....	56
รูปที่ 2.39	กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกและไทอามีน (วิตามินบี1).....	56
รูปที่ 2.40	(A) การสังเคราะห์เม็ดปืท SA-NED (B) ภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเม็ดปืท SA-NED ที่สร้างขึ้น (C) การกระจายขนาดของไมโครสเฟียร์ SA-NED (D)	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	สเปกตรัมการส่งผ่านของแผ่นไฮโดรเจล SA และ SA-NED ไฮโดรเจล (E) ภาพ SEM ของไมโครสเฟียร์ SA-NED.....	
รูปที่ 2.41	(A) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ SA-NED และสีย้อม azo หลังจากปฏิกิริยาระหว่าง SA-NED และ NO_2^- (B) ภาพประกอบอุปกรณ์พกพาที่ใช้สมาร์ตโฟนสำหรับบันทึกความเข้มข้นของสี (C) โครงสร้างของอุปกรณ์พกพาที่ใช้สมาร์ตโฟน (D) รูปถ่ายของไมโครสเฟียร์ SA-NED หลังจากทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ NO_2^- (E) ค่า G และ NO_2^- ความเข้มข้นแสดงกราฟการเปรียบเทียบในช่วง 0 – 1.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (n = 3) ภาพแทรกถูกถ่ายจากอุปกรณ์พกพา (F) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G ของไมโครสเฟียร์ SA-NED และการดูดซับรังสียูวีโดยการวิเคราะห์สีในสารละลายที่เป็นน้ำ.....	58
รูปที่ 2.42	กระบวนการขึ้นรูปเม็ดบีด.....	60
รูปที่ 2.43	ความสามารถในการอมน้ำเม็ดบีด ในระหว่างเก็บภายใต้ความร้อน (a) 90 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส.....	60
รูปที่ 2.44	ความแข็งแรงของเม็ดบีดในระหว่างเก็บเม็ดบีดในความร้อน (a) 90 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส.....	61
รูปที่ 2.45	โครงสร้างของเม็ดบีดในการเก็บในความร้อน (a) ก่อนเก็บในความร้อน (b) 90 องศาเซลเซียส (c) 100 องศาเซลเซียส.....	62
รูปที่ 2.46	(A) ตัวอย่างสี RGB (B) การกำหนดค่า RGB ผ่านซอฟต์แวร์ (C) สีของสารละลายที่มีปริมาณกลูโคสแตกต่างกัน.....	64
รูปที่ 2.47	การนำสมาร์ตโฟนไปใช้ในการถ่ายภาพและการวิเคราะห์ค่าสีโดย RGB สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของกลูโคสในปัสสาวะ.....	65
รูปที่ 2.48	การเลือกพื้นที่ภาพเพื่อวิเคราะห์ค่า RGB โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image J 1.52a.....	66
รูปที่ 2.49	(a) ภาพดิจิทัลของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (b) สมการเส้นตรงเปรียบเทียบความเข้มข้นของสีแดง เขียว และน้ำเงิน โดยใช้วิธีมาตรฐานภายนอก.....	67
รูปที่ 2.50	(A) ภาพดิจิทัลของตัวอย่างในการเติมมาตรฐานเมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัมต่อลิตร (B) การถดถอยเชิงเส้นสำหรับการตอบสนองสีแดง.....	68
รูปที่ 2.51	(a) สเปกตรัมของเมทิลีนบลู (b) กราฟการเปรียบเทียบของวิธีมาตรฐานภายนอก (c) เส้นตรงการถดถอยของการเติมมาตรฐานสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	69
รูปที่ 3.1	วิธีการทดสอบความสามารถในการกันแสงของเม็ดบีด.....	76
รูปที่ 4.1	แผนภาพการสร้างเม็ดบีดเคอร์คูมินสองชั้น (Ca (II))-อัลจิเนต/ZnONPs ที่ภายในบรรจุสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและกราฟแสดงค่าการละลายของอิมัลชันเคอร์คูมิน ที่ 425 นาโนเมตร (A1-A2) ความเข้มข้นของ Tween80 (B1-B2) ความเข้มข้นของเคอร์คูมิน (C1-C2) อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย (D1-D2) เวลาในการปั่นกวน.....	86
รูปที่ 4.3	ปริมาตรเคอร์คูมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด.....	90
รูปที่ 4.4	ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด ชั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจิเนต.....	91
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายของการขึ้นรูปเม็ดบีดชั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจิเนต โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ (A1-7) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, และ 5.0 % w/v และ (B1-7) อัลจิเนตที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, และ 5.0 % w/v.....	92
รูปที่ 4.6	TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (A1) ภาพ TEM แสดงรูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาค พร้อมกราฟแสดงขนาดอนุภาค (A2) ภาพ HRTEM แสดงระยะระนาบผลึก (A3) ภาพ SAED แสดงลำดับการจัดเรียงผลึกของซิงค์ออกไซด์ (A4) ภาพ Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุสังกะสี (A5) สเปกตรัม EDS แสดงองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง (A6) ภาพ XRD แสดงค่าระนาบผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	96
รูปที่ 4.7	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและกราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ PDADMAC-ZnONPs.....	97
รูปที่ 4.8	ค่าศักย์ไฟฟ้าของ PDADMAC-ZnONPs ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลาย PDADMAC.....	98
รูปที่ 4.9	การขึ้นรูป CUR _{Hydrogel} (A) การเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของ CUR _{Hydrogel} (B-C) ภาพ FESEM และสเปกตรัม EDS ของ CUR _{Hydrogel} (D) ภาพ FESEM ของเจลไฮโดรเจลทรงกลมชั้นที่หนึ่ง.....	99
รูปที่ 4.10	โครงสร้างและองค์ประกอบของเคอร์คูมิน.....	100
รูปที่ 4.11	ความเสถียรของ CUR _{Hydrogel} ในสภาวะต่าง ๆ (A) ความสามารถของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมิน (B) เปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่ใช้ในการจัดเก็บ CUR _{Hydrogel} ที่อุณหภูมิต่างกัน (C) เปอร์เซ็นต์การอมน้ำของ CUR _{Hydrogel} ที่จัดเก็บในอุณหภูมิต่างกัน (D) ความแข็งแรงและค่าการดูดกลืนแสงของ CUR _{Hydrogel} ที่นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	102
รูปที่ 4.12	กลไกการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้สารละลายวิตามินบี6 กรดบอริก และเคอร์คูมิน.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13	สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินและกรดบอริกที่ pH แตกต่างกัน.....	104
รูปที่ 4.14	กราฟเส้นตรงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินและกรดบอริกที่ pH แตกต่างกัน โดยใช้กรดบอริกเข้มข้น 0-90 มิลลิกรัมต่อลิตร	105
รูปที่ 4.15	กราฟเส้นตรงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้ปริมาตรวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน.....	106
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบี6 และกรดบอริกที่เหมาะสมในช่วง 0.25, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 นาที.....	107
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเคอร์คูมินและกรดบอริกที่เหมาะสมในช่วง 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 และ 15.0 นาที.....	108
รูปที่ 4.18	กราฟเส้นตรงมาตรฐาน (Calibration curve) แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่เข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร (A1) ค่าความเข้มข้นของสีเขียว (A2) ค่าความเข้มข้นของสีแดงและสีน้ำเงิน (B1-B2) สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงและกราฟเส้นตรงมาตรฐานของโรโซไซยานินในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ UV-Vis Spectrophotometry.....	110
รูปที่ 4.19	ความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR _{Hydrogel}	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพการทำงานและการใช้ชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน ที่มีความกดดัน เคร่งเครียด ต้องทำงานแข่งกับเวลา ส่งผลให้ผู้คนเริ่มมีปัญหาสุขภาพกันมากขึ้น เนื่องจากขาดการดูแลตัวเองที่ดี การอดอาหาร ตลอดจนการรับประทานอาหารที่ไม่ถูกต้องโภชนาการ เพื่อตอบสนองต่อสังคมที่เร่งรีบ จึงทำให้ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้ถูกผลิตขึ้นมาในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นอาหารเสริมในรูปแบบเม็ด หรือเครื่องดื่มที่มีการเสริมวิตามิน ซึ่งผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเหล่านี้ มีจำหน่ายอย่างแพร่หลาย หาซื้อได้ง่ายตามร้านขายยา และร้านสะดวกซื้อต่าง ๆ จึงทำให้ผู้คนเริ่มให้ความนิยมในการรับประทานผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเหล่านี้ หนึ่งในนั้นก็คือ ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีการเสริมวิตามินบี6

วิตามินบี6 เป็นวิตามินที่สามารถละลายได้ในน้ำ มีความจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ มีความสำคัญต่อการพัฒนาสมอง และทำให้ระบบประสาทและระบบภูมิคุ้มกันแข็งแรง ในธรรมชาติพบในรูป Pyridoxol (ในรูปของแอลกอฮอล์) Pyridoxamine (ในรูปของเอมีน) และ Pyridoxal (ในรูปของอัลดีไฮด์) สำหรับการใช้งานในทางยาหรือผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร นิยมใช้วิตามินบี6 ในรูปของไพริดอกซิน ไฮโดรคลอไรด์ (Pyridoxine hydrochloride) และ ไพริดอกซอล 5-ฟอสเฟต (Pyridoxal 5-phosphate) [1] เมื่อรับประทานวิตามินบี6 เข้าไป ร่างกายจะสามารถขับออกมาได้เองตามธรรมชาติภายใน 8 ชั่วโมง จึงเป็นวิตามินที่ไม่ตกค้างอยู่ในร่างกาย อย่างไรก็ตามหากได้รับวิตามินบี6 มากเกินไป จะก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย โดยเป็นอันตรายต่อประสาทส่วนปลาย ที่มีหรือเท้า ทำให้รู้สึกเสียวแปลบ แสบร้อน และมีอาการชาร่วมด้วย นอกจากนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อเส้นประสาทที่ควบคุมการทำงานของอวัยวะอื่น ๆ เช่น กระเพาะปัสสาวะ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการขับถ่าย [2, 3] องค์การ The European Food Safety Authority (EFSA) [4] ได้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดในการได้รับวิตามินบี6 สำหรับคนปกติอยู่ที่ 25 มิลลิกรัมต่อวัน ในขณะที่องค์การ The US-based Food and Nutrition Board แนะนำให้ได้รับได้ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อวัน [5]

จากประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 448 พุทธศักราช 2566 [6] ได้กำหนดปริมาณวิตามินและแร่ธาตุที่อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ซึ่งปริมาณของวิตามินบี6 กำหนดให้มีปริมาณต่ำสุดที่ 0.195 มิลลิกรัมต่อวัน และปริมาณสูงสุดไม่เกินที่ 2 มิลลิกรัมต่อวัน อย่างไรก็ตามยังพบว่าผู้ประกอบการบางรายเติมวิตามินหรือสารอาหารในปริมาณที่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ระบุไว้บนฉลาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการวิเคราะห์หาสารจำพวกวิตามินในผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐาน และปลอดภัยต่อผู้บริโภค การตรวจหาวิตามินบี6 ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี [7, 8] และการใช้โครมาโตกราฟี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถสูง (HPLC) ที่มาพร้อมกับเครื่องตรวจจับหลากหลายประเภท เช่น โฟโตไดโอดแอรีย์ (PDA) [9], แมสสเปกโตรมิเตอร์ [10], และเครื่องตรวจจับฟลูออเรสเซนซ์ [11] ซึ่งให้ความไวสูง ความจำเพาะที่ดี และผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถทำซ้ำได้ อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้มีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากเครื่องมือมีราคาสูง ซับซ้อน และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการดำเนินการ จึงทำให้วิธีการวิเคราะห์เชิงสีที่ง่ายและประหยัดต้นทุนได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีข้อดีในด้านต้นทุนต่ำ เวลาในการวิเคราะห์เร็ว และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างสะดวก อีกทั้งยังมีความไวสูง ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยในการพัฒนาการตรวจวัดเชิงสีโดยใช้อนุภาคนาโนทอง (AuNPs) [12] ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากความเสถียรและความไวต่อสิ่งแวดล้อมของอนุภาคนาโนทองค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีในสารละลายและทำให้ความแม่นยำในการวัดลดลง

จากเหตุผลข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้เม็ดบีดที่ห่อหุ้มอิมัลชันเคอร์คูมินไว้ภายใน (CUR_{Hydrogel}) ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และสามารถใช้ในการวิเคราะห์ภาคสนามได้ โดยกลไกในการตรวจวัดจะอาศัยปฏิกิริยาสองขั้นตอนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างบอเรตไอออนและวิตามินบี6 ในสภาวะเบส จากนั้นบอเรตไอออนที่เหลือจะไปทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมิน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินซึ่งจะมีสีส้ม การเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีส้มเป็นสีเหลืองนี้สามารถใช้บ่งบอกถึงปริมาณวิตามินบี6 ได้ และเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในภาคสนาม เนื่องจากเคอร์คูมินสามารถสลายตัวได้เมื่อสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงทำการห่อหุ้มอิมัลชันเคอร์คูมินไว้ภายใน ด้วยชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต และชั้นที่ 2 ของ Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR_{Hydrogel}) โดยวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีดสองชั้นนี้นอกจากช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดบีดแล้ว การเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ยังสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของอิมัลชันเคอร์คูมินจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้อีกด้วย ซึ่งการพัฒนา CUR_{Hydrogel} นี้ สามารถใช้ในการตรวจหาวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามินได้อย่างง่าย แม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยใช้เม็ดบีดเคอร์คูมินในการวิเคราะห์ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือ
- 2) เพื่อสร้างเม็ดบีดเคอร์คูมินที่มีคุณสมบัติห่อหุ้มอิมัลชันเคอร์คูมินที่มีความแข็งแรง ยึดหยุ่นสูง และสามารถป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมินภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เพื่อทดสอบความถูกต้องของวิธีในการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน เช่น High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) และ UV-Vis Spectrophotometry

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) การเตรียมอิมัลชันเคอร์คูมินที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีเวิร์สเฟสเพอร์ริฟิเคชัน โดยชั้นที่ 1 ที่ใช้ในการห่อหุ้มอิมัลชันเคอร์คูมิน ถูกขึ้นรูปด้วย Ca(II)-อัลจิเนต และชั้นที่ 2 ห่อหุ้มด้วย Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs

2) การสังเคราะห์และตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnONPs)

3) เสถียรภาพของ CUR_{Hydrogel}

3.1 ความสามารถของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน CUR_{Hydrogel} ในการป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมินภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต

3.2 สภาพที่เหมาะสมในการจกเก็บ CUR_{Hydrogel} โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่แพร่เข้าสู่ CUR_{Hydrogel} และเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของ CUR_{Hydrogel}

3.3 ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของ CUR_{Hydrogel}

4) ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาในการวิเคราะห์เชิงสีและสภาพที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}

4.1 pH ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

4.2 ปริมาตรตัวอย่างวิตามินบี6 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

4.3 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรนไอออนและวิตามินบี6

4.4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรนไอออนที่เหลืออยู่และ CUR_{Hydrogel}

5) การพัฒนาชุดทดสอบภาคสนามสำหรับวิเคราะห์วิตามินบี6 ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ โดยการเปรียบเทียบกับวิธีการหาปริมาณวิตามินบี6 มาตรฐานได้แก่ High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) และ UV-Vis Spectrophotometry

6) วิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ CUR_{Hydrogel} ที่สร้างขึ้นโดยชั้นที่ 1 เป็น Ca(II)-อัลจิเนต และชั้นที่ 2 เป็น Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs ที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นสูงและสามารถป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมินภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตได้

2) ได้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB)

3) สามารถนำ CUR_{Hydrogel} ไปใช้ทดสอบในภาคสนาม สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6

ตัวอย่างในเครื่องดื่มเสริมวิตามินได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

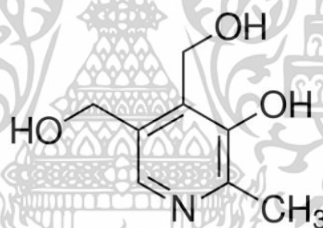
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไพริดอกซีน (วิตามินบี6)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของไพริดอกซีน [13]

ไพริดอกซีน (Pyridoxine) หรือวิตามินบี6 จัดเป็นวิตามินกลุ่มที่ละลายได้ในน้ำ ซึ่งจัดเป็นสารประกอบไพริดีน ที่มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ชนิด ที่มีคุณสมบัติทางชีววิทยาคล้ายกัน คือ ไพริดอกซีน (Pyridoxine) ไพริดอกซาล (Pyridoxal) และไพริดอกซามีน (Pyridoxamine) เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้นจึงเรียกรวมๆว่า ไพริดอกซีน Pyridoxine โดยไพริดอกซีนมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ละลายน้ำได้ดี มีรสเค็ม ไม่มีกลิ่น ทนต่อความร้อน ทนต่อสภาวะที่เป็นกรด แต่สลายตัวในสภาวะที่เป็นด่าง (pH มากกว่า 9) สภาวะที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและการออกซิเดชัน ไพริดอกซีนมีสูตรโมเลกุลคือ $C_8H_{11}NO_3$ มวลโมเลกุล 169.18 กรัมต่อโมล และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 159-162 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไพริดอกซีนหรือวิตามินบี6 [4]

วิตามินบี6 เป็นสารอาหารชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารสื่อประสาท 2 ชนิดที่สำคัญต่อการทำงานของร่างกาย ได้แก่ สารเซโรโทนิน (Serotonin) สารเคมีที่จำเป็นต่อสมองและระบบประสาท มีผลต่อกระบวนการคิด พฤติกรรม และอารมณ์ หากร่างกายของเรามีสารเซโรโทนินในปริมาณที่เหมาะสมก็จะช่วยให้สุขภาพจิตดี อารมณ์คงที่ และมีสมาธิที่จะทำสิ่งต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนสารสื่อประสาทอีกชนิดก็คือ นอร์อิพิเนฟริน (Norepinephrine) ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของกล้ามเนื้อหลอดเลือดหัวใจและควบคุมความดันโลหิต [14, 15] นอกจากนี้วิตามินบี6 ยังมีประโยชน์ต่อร่างกายในการสร้างแอนติบอดีและเม็ดเลือดแดง รวมถึงการสร้างน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงได้มีการผลิตอาหารเสริมวิตามินบี6 เพื่อป้องกันโรคที่เกิดจากการขาดวิตามินชนิดนี้ ไม่ว่าจะเป็นโรคโลหิตจาง โรคผิวหนังหนังอักเสบ โรคที่เกี่ยวข้องกับทางเดินอาหาร และยังส่งผลให้เซลล์ต่างๆ ในร่างกายเสื่อมสภาพ [16] ร่างกายของคนเราสามารถดูดซึมวิตามินบี6 ได้ดีที่สุดในบริเวณลำไส้เล็ก

ตอนต้น โดยจะเข้าไปเปลี่ยนเป็นโคเอนไซม์ในรูปของไพริดอกซาลฟอสเฟต ส่วนวิตามินบี6 ที่เหลือก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกขับออกมาทางปัสสาวะภายใน 8 ชั่วโมง โดยจะไม่มีเก็บไว้ที่ตับเหมือนกับวิตามินตัวอื่น ๆ ดังนั้นในปัสสาวะจึงมักจะมี วิตามินบี6 อยู่เสมอ และวิตามินบี6 ยังเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โคเคนไซม์ Pyridoxal phosphate (PLP) และ Pyridoxamine phosphate ซึ่งทั้งสองชนิดมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังช่วยในการสังเคราะห์ฮีม (Heme) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเฮโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และยังเกี่ยวข้องในการเปลี่ยนกรดอะมิโนทริปโทเฟนไปเป็น Nicotinic acid (วิตามินบี3) ดังนั้นถ้าขาดวิตามินบี6 อาจทำให้เกิดการขาดวิตามินบี3 ด้วย

วิตามินบี6 (Pyridoxine) ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีอยู่ในแหล่งอาหาร (ทั้งในพืช และสัตว์) ทั่วไปที่มนุษย์รับประทานเข้าไปแล้วร่างกายจะสังเคราะห์ และดูดซึมนำไปใช้สู่กระบวนการต่าง ๆ ของร่างกาย ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือประเภทที่สกัดจากแหล่งอาหารในธรรมชาติที่มีวิตามินบี6 อยู่ซึ่งจะได้ออกมาในรูปแบบผลิตภัณฑ์เสริมอาหารทั้งแบบชนิดเม็ด หรือแคปซูล ทั้งในรูปแบบวิตามินแบบแยกเดี่ยว วิตามินรวม รวมถึงในรูปแบบวิตามินบีรวม เป็นต้น

2.1.2 ประโยชน์ของวิตามินบี6 [13-15]

- 1) วิตามินบี6 มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์และการเผาผลาญกรดอะมิโน ซึ่งช่วยให้ร่างกายสามารถดูดซึมและนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยในการสังเคราะห์ฮีม ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ส่งผลดีต่อการบำรุงเลือดและปรับสภาพเนื้อเยื่อ รวมถึงป้องกันโรคทางผิวหนังต่าง ๆ
- 2) วิตามินบี6 ทำหน้าที่สังเคราะห์สารสื่อประสาทสำคัญ เช่น เซโรโทนิน ซึ่งมีส่วนช่วยลดความเครียด ความวิตกกังวล และช่วยพัฒนาระบบความจำ นอกจากนี้ยังช่วยในการผลิตนอร์อิพิเนเฟริน ซึ่งช่วยกระตุ้นการทำงานของหลอดเลือดและกล้ามเนื้อหัวใจ รวมถึงช่วยควบคุมความดันโลหิต
- 3) วิตามินบี6 มีส่วนสำคัญในการเสริมสร้างแอนติบอดีและระบบภูมิคุ้มกัน ช่วยให้ร่างกายแข็งแรงและป้องกันการเจ็บป่วยง่าย ลดอาการแพ้ท้อง คลื่นไส้ อาเจียน รวมถึงป้องกันโรคทางระบบประสาท เช่น อาการกล้ามเนื้อหดเกร็ง มือเท้าชา และตะคริว
- 4) เป็นยาขับปัสสาวะตามธรรมชาติ ช่วยป้องกันการเกิดนิ่วในไต ช่วยลดอาการง่วงซึม อ่อนเพลีย และอาการปากแห้ง อีกทั้งยังช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ในร่างกายและเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของร่างกายให้แข็งแรง

2.1.3 แหล่งอาหารที่พบวิตามินบี6 [13-17]

วิตามินบี6 เป็นวิตามินที่มีความจำเป็นต่อร่างกายทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารสื่อประสาท มีผลต่อกระบวนการคิด พฤติกรรม และอารมณ์ โดยร่างกายของมนุษย์สามารถสังเคราะห์วิตามินบี6 ได้เองจากแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ แต่ปริมาณที่ร่างกายสังเคราะห์ได้ในแต่ละวันก็ยังไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ดังนั้นร่างกายจึงต้องการวิตามินบี6 เพิ่มจากแหล่งอาหาร ซึ่งแหล่งอาหารที่มีวิตามินบี6 นั้นจะมาจากทั้งพืช และสัตว์ โดยส่วนมากวิตามินบี6 จะพบได้มากใน

ตารางที่ 2.1 แหล่งอาหารที่พบวิตามินบี6

แหล่งอาหารที่พบวิตามินบี6	ปริมาณวิตามินบี6ที่พบต่อ น้ำหนัก100กรัม (ไมโครกรัม)	ร้อยละของปริมาณที่ได้รับ (%DV)
ปลาแซลมอน	0.9	54
อกไก่/ตับไก่	0.9	54
เนื้อวัว	0.5	28
กล้วย	0.4	22
อะโวคาโด	0.3	15
มันเทศ	0.2	14

2.1.4 วิตามินบี6 ชนิดให้เสริม

ปัจจุบันคนรุ่นใหม่หันมาสนใจสุขภาพกันมากขึ้น โดยเฉพาะวัยทำงานเนื่องจากใช้ร่างกายในการทำกิจกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น การทำงาน การเรียน การใช้ชีวิตประจำวันตามปกติส่งผลให้ร่างกายเกิดความอ่อน ล้า เครียดสะสม รวมไปถึงการรับประทานอาหารไม่ครบ 5 หมู่ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนทำให้ร่างกายเข้าสู่ภาวะขาดวิตามิน และแร่ธาตุจำเป็นต่อร่างกาย แม้ว่าวิตามินและแร่ธาตุจะถูกจัดให้อยู่ในหมวดของสารอาหารรอง แต่ยังคงเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายช่วยให้ร่างกายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้ถูกผลิตขึ้นมาในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นอาหารเสริมในรูปแบบเม็ด หรือเครื่องดื่มที่มีการเสริมวิตามิน ซึ่งผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเหล่านี้ มีจำหน่ายอย่างแพร่หลาย หาซื้อได้ง่ายตามร้านขายยา และร้านสะดวกซื้อต่าง ๆ จึงทำให้ผู้คนเริ่มให้ความสนใจในการรับประทานผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเหล่านี้ โดยนิยมใส่ปริมาณวิตามินบี6 ชนิดเม็ด 50-100 มิลลิกรัม เครื่องดื่มเสริมวิตามินบี6 ประมาณ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องดื่มชูกำลังมีปริมาณวิตามินบี6 ประมาณ 3-5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.1.5 ปริมาณวิตามินบี6 ที่ร่างกายต้องการ [18]

วิตามินบี6 เป็นวิตามินที่มีความจำเป็นต่อร่างกายทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารสื่อประสาท มีผลต่อกระบวนการคิด พฤติกรรม และอารมณ์ ทำให้ร่างกายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากร่างกายได้รับวิตามินไม่เพียงพอก็จะส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ทำให้ร่างกายทำงานผิดปกติได้ โดยแต่ละช่วงวัยจะมีความต้องการวิตามินบี6 ในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจากร่างกายในแต่ละวัยมีการใช้งานวิตามินบี6 ในกระบวนการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป ในวัยทารกและเด็กเล็กที่ร่างกายกำลัง

เจริญเติบโตและพัฒนา วิตามินบี6 จะช่วยในการพัฒนาระบบประสาทและการทำงานของสมอง ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัยผู้ใหญ่ ร่างกายยังคงต้องการวิตามินบี6 ในการควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึม การผลิตสารสื่อประสาท และการสร้างพลังงานให้แก่เซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย ส่วนผู้สูงอายุที่มีการเสื่อมสภาพของเซลล์เนื่องจากอายุ การได้รับวิตามินบี6 เพียงพอจะช่วยให้การซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่เสื่อมสภาพและรักษาระบบภูมิคุ้มกันให้ทำงานได้ดีขึ้น ดังนั้นแต่ละช่วงวัยจึงมีความต้องการวิตามินบี6 ที่แตกต่างกันตามการทำงานของร่างกายในแต่ละช่วงชีวิตดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณวิตามินบี6 ที่ร่างกายควรได้รับต่อวัน

ช่วงอายุ (ปี)	ปริมาณวิตามินบี6 ที่ควรได้รับต่อวัน (มิลลิกรัมต่อวัน)
6-11 เดือน	0.3
1-3	0.5
4-8	0.6
9-12	1.0-1.2
13-18	1.3
19-51	1.5
51 ปีขึ้นไป	1.7
เฉลี่ย	1.0-1.7

2.1.6 การขาดวิตามินบี6 [19]

2.1.6.1 สาเหตุที่ทำให้ร่างกายขาดวิตามินบี6

1) การดื่มสุราเรื้อรัง การดื่มสุราเรื้อรังมีผลกระทบต่อการทำงานของวิตามินบี6 โดยแอลกอฮอล์จะยับยั้งการทำงานของฮอร์โมนแอนตี้ไดยูเรติก (ADH) [20] ซึ่งมีบทบาทในการควบคุมการดูดซึมน้ำกลับจากไต เมื่อ ADH ถูกยับยั้ง การดูดซึมน้ำกลับลดลง ส่งผลให้ปริมาณปัสสาวะเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ร่างกายขับวิตามินออกทางปัสสาวะ รวมถึงวิตามินบี6 ที่ละลายในน้ำ นอกจากนี้ แอลกอฮอล์ยังลดการดูดซึมวิตามินในลำไส้เล็กโดยการลดการขับน้ำดีจากตับ ซึ่งน้ำดีมีบทบาทสำคัญในการช่วยดูดซึมไขมันและวิตามินที่ละลายในไขมัน เช่น วิตามิน A, D, E และ K เมื่อขาดน้ำดี วิตามินบี6 และวิตามินที่ละลายในไขมันอื่น ๆ จะไม่สามารถดูดซึมได้ดี นอกจากนี้ แอลกอฮอล์ยังทำลายเซลล์ตับและลดการสะสมวิตามินในตับ ซึ่งเป็นแหล่งเก็บวิตามินสำคัญของร่างกาย ทำให้การขาดวิตามินเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น

2) การได้รับยาบางชนิด ยาบางประเภทสามารถลดประสิทธิภาพในการดูดซึมวิตามินบี6 ในร่างกาย ตัวอย่างเช่น ยารักษาวัณโรคและยากุมกำเนิดสามารถลดความสามารถในการดูดซึมวิตามินบี6 และวิตามินบี12 นอกจากนี้ ยาบำรุงโลหิตที่เสริมธาตุเหล็กประเภทเฟอร์รัส ซัลเฟต ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำลายวิตามินอีได้ ในขณะที่ยาแอสไพรินอาจทำให้วิตามินซีถูกขับออกจากร่างกายเร็วขึ้น 3 เท่า การขับวิตามินออกจากร่างกายเร็วขึ้นหรือการลดการดูดซึมวิตามินบี6 นั้นทำให้ร่างกายขาดวิตามินบี6 ได้

3) การรับประทานอาหารซ้ำๆ ไม่หลากหลาย การทานอาหารที่ขาดความหลากหลาย ทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารไม่ครบถ้วน เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีคุณค่าทางโภชนาการและวิตามินที่แตกต่างกัน การขาดอาหารที่มีวิตามินบี6 เช่น เนื้อสัตว์ ธัญพืช และผักบางชนิด ทำให้ร่างกายไม่ได้รับวิตามินบี6 ตามที่ต้องการ ส่งผลให้เกิดภาวะขาดวิตามินบี6

4) การที่ร่างกายต้องการวิตามินบี6 มากขึ้น ผู้หญิงตั้งครรภ์และให้นมบุตร รวมถึงนักกีฬาหรือผู้ที่ออกกำลังกายหนัก ต้องการวิตามินบี6 ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากวิตามินบี6 มีบทบาทในการสังเคราะห์สารสื่อประสาทและการเผาผลาญพลังงาน [21] เมื่อร่างกายใช้พลังงานมาก วิตามินบี6 ก็จะถูกใช้ไปมากขึ้น หากไม่ได้รับการเสริมวิตามินบี6 ที่เพียงพอ อาจทำให้เกิดการขาดวิตามินบี6 ได้ นอกจากนี้ ผู้ที่มีอาการท้องเสียหรือโรคที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมอาหาร เช่น โรคตับหรือลำไส้เล็กเสกก็มีความเสี่ยงต่อการขาดวิตามินบี6 เพราะกระบวนการดูดซึมวิตามินบี6 ในลำไส้จะถูกขัดขวาง ทำให้ไม่สามารถดูดซึมวิตามินบี6 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.6.2 อาการเมื่อร่างกายขาดวิตามินบี6 [16]

1) การอักเสบในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ การขาดวิตามินบี6 อาจทำให้เกิดการอักเสบในหลายส่วนของร่างกาย เช่น แผลที่มุมปาก ลิ้นอักเสบ หรือเยื่อตาอักเสบ ซึ่งอาจส่งผลให้มีอาการเจ็บปวดและไม่สบายบริเวณเหล่านั้น และอาจทำให้การรักษาหรือการฟื้นตัวช้าลงเนื่องจากการขาดวิตามินที่ช่วยในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ

2) อาการที่เกี่ยวข้องกับระบบประสาท วิตามินบี6 เป็นวิตามินที่มีบทบาทสำคัญในการทำงานของระบบประสาท ขาดวิตามินบี6 อาจทำให้เกิดอาการที่เกี่ยวข้องกับระบบประสาท เช่น ง่วงซึม นอนไม่หลับ หรืออาจรุนแรงถึงขั้นมีอาการชัก ซึ่งเกิดจากการขาดสารสื่อประสาทที่วิตามินบี6 ช่วยในการสังเคราะห์ ทำให้ระบบประสาททำงานไม่ปกติ

3) เส้นประสาทอักเสบ วิตามินบี6 มีบทบาทในการรักษาสุขภาพของเส้นประสาท การขาดวิตามินบี6 อาจทำให้เกิดอาการเส้นประสาทอักเสบ เช่น กล้ามเนื้ออ่อนแรง ชาตามมือและเท้า ซึ่งอาจส่งผลให้การเคลื่อนไหวและการทำกิจวัตรประจำวันเป็นไปได้ยากขึ้นและทำให้เกิดอาการเจ็บปวด

4) อาการเหนื่อยง่ายและหมดสติ การขาดวิตามินบี6 อาจทำให้รู้สึกเหนื่อยง่ายกว่าปกติและบางครั้งอาจเกิดอาการหมดสติร่วมด้วย ซึ่งเกิดจากการที่วิตามินบี6 มีบทบาทในการสร้างพลังงานให้กับร่างกายและช่วยในการเผาผลาญอาหาร ขาดวิตามินบี6 จึงทำให้ร่างกายไม่มีพลังงานเพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ภาวะซีดหรือโลหิตจาง วิตามินบี6 มีบทบาทในการผลิตฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ซึ่งช่วยในการขนส่งออกซิเจนไปยังเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย การขาดวิตามินบี6 อาจทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง ซึ่งสังเกตได้จากผิวหนังที่ซีดเหลืองและความอ่อนแรงเนื่องจากการขาดออกซิเจนในเซลล์

6) อารมณ์แปรปรวนและมึนงง การขาดวิตามินบี6 อาจส่งผลกระทบต่ออารมณ์ ทำให้เกิดอาการหงุดหงิดง่าย และมีอาการมึนงง วิตามินบี6 มีบทบาทสำคัญในการผลิตสารสื่อประสาท เช่น เซโรโทนิน ซึ่งมีผลต่ออารมณ์และความรู้สึก การขาดวิตามินบี6 นี้จึงทำให้เกิดความผิดปกติทางอารมณ์และความรู้สึก

2.1.7 การรับวิตามินบี6 มากเกินไป

2.1.7.1 สาเหตุของการรับวิตามินมากเกินไป [2]

1) การบริโภควิตามินเสริม จัดเป็นสาเหตุสำคัญของการบริโภควิตามินมากเกินไปพบในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีจำหน่ายในหลายรูปแบบและหาซื้อได้ตามร้านสะดวกซื้อ การบริโภควิตามินเสริมที่ทำให้เกิดการบริโภควิตามินที่มากเกินไปอาจมาจาก ชื่อวิตามินที่ระบุไว้ต่างกัน แต่อาจเป็นวิตามินชนิดเดียวกัน หรือแสดงฤทธิ์เหมือนกัน ทำให้เกิดบริโภควิตามินซ้ำซ้อนและอาจได้รับวิตามินมากเกินไปที่ร่างกายต้องการ

2) วิตามินที่ใช้เป็นยา เป็นสาเหตุของการบริโภควิตามินมากเกินไปเนื่องจากมีการบริโภคติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการสะสมในร่างกาย และเมื่อทานอาหาร หรือวิตามินเสริมเพิ่ม อาจทำให้ร่างกายได้รับวิตามินเกินได้

3) อาหารที่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการโดยการเติมสารอาหาร เป็นอาหารจำพวกที่มีการเพิ่มสารอาหารที่และวิตามินหลายชนิดเข้าไป เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทนม โยเกิร์ต เครื่องดื่มชูกำลัง รวมถึงผลิตภัณฑ์ประเภทธัญพืชที่รับประทานเป็นอาหารเช้า เป็นต้น การบริโภคอาหารประเภทนี้เป็นปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการบริโภควิตามินมากเกินไปหากรับประทานร่วมกับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นที่มีวิตามิน

2.1.7.2 อันตรายจากการรับวิตามินบี6 มากเกินไป [2-4, 13]

วิตามินบี6 เป็นวิตามินที่สำคัญในการทำงานของระบบประสาท การสังเคราะห์สารสื่อประสาท และการเผาผลาญพลังงานในร่างกาย โดยปกติแล้วผู้ใหญ่ต้องการวิตามินบี6 ประมาณ 1.0-1.7 มิลลิกรัมต่อวัน แต่หากได้รับวิตามินบี6 ในปริมาณที่เกินกว่า 200 มิลลิกรัมต่อวันเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดผลข้างเคียงที่อันตรายต่อร่างกายได้ โดยวิตามินบี6 ทำงานเป็นโคเอนไซม์ในการสังเคราะห์สารสื่อประสาทที่สำคัญ รวมถึงมีบทบาทในการเมตาบอลิซึมของกรดอะมิโนและสารเคมีในร่างกาย การสะสมวิตามินบี6 ในปริมาณที่เกินความจำเป็นทำให้เกิดการสะสมของสารที่ไม่สามารถถูกใช้งานได้อย่างเต็มที่ หรือเกิดการขับออกจากร่างกายมากเกินไป ซึ่งทำให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์ในร่างกาย

1) ผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนปลาย วิตามินบี6 มีบทบาทสำคัญในการทำงานของระบบประสาท โดยเฉพาะในกระบวนการสังเคราะห์สารสื่อประสาท เช่น เซโรโทนินและโดปามีน

การขาดวิตามินบี6 จะทำให้การส่งสัญญาณประสาทไม่สมบูรณ์และเกิดอาการเสียวแปลบ แสบร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือชา ซึ่งมักเกิดขึ้นที่มือและเท้า เพราะระบบประสาทส่วนปลายจะได้รับผลกระทบจากการขาดสารสื่อประสาทที่จำเป็น หากได้รับวิตามินบี6 ในปริมาณที่มากเกินไป กลไกในการสะสมวิตามินบี6 ในร่างกายจะทำให้เซลล์ประสาทเสียหาย เนื่องจากการที่วิตามินบี6 ในร่างกายเกินความต้องการจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่ไม่สมดุล ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเส้นประสาทในส่วนต่าง ๆ เช่น การทำให้เกิดปัญหาการขยับถ่ายและการเคลื่อนไหว

2) ผลกระทบต่อระบบประสาท เมื่อรับวิตามินบี6 ในปริมาณที่มากเกินไป จะมีการสะสมวิตามินในร่างกายมากเกินความต้องการ ส่งผลให้วิตามินบี6 ไปยับยั้งการทำงานของเซลล์ประสาทที่ทำหน้าที่ควบคุมการนอนหลับและการกระตุ้นการทำงานของสมอง การขาดสมดุลของวิตามินบี6 ในระบบประสาททำให้เกิดอาการง่วงซึม นอนไม่หลับ หรืออาจถึงขั้นชัก เนื่องจากวิตามินบี6 ในปริมาณสูงทำให้สารสื่อประสาทถูกยับยั้งหรือไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ การสะสมของวิตามินบี6 ที่เกินไปจะกระทบต่อสมดุลของสารเคมีในสมองและระบบประสาท

3) การทำลายเซลล์ประสาท การรับวิตามินบี6 มากเกินไป (มากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อวัน) จะทำให้วิตามินบี6 เกินขีดจำกัดที่ร่างกายสามารถใช้งานได้ เซลล์ประสาทในร่างกายจะเริ่มเกิดความเสียหาย เนื่องจากวิตามินบี6 ในปริมาณสูงทำให้เกิดอันตรายต่อเซลล์ประสาทส่วนปลาย โดยกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับกรณีที่เซลล์ไม่สามารถขับเคลื่อนพลังงานที่จำเป็นสำหรับการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบประสาทส่วนปลายทำงานผิดปกติ ส่งผลให้เกิดอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงและอาการชาตามมือหรือเท้า และอาจทำให้เกิดปัญหาที่ยืดเยื้อเกี่ยวกับการเคลื่อนไหว

4) ปัญหาการขยับถ่าย วิตามินบี6 ในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อกระเพาะปัสสาวะ โดยการที่ร่างกายมีวิตามินบี6 มากเกินไปสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองและทำให้กระเพาะปัสสาวะทำงานผิดปกติ ปัญหาการขยับถ่ายเกิดจากการที่วิตามินบี6 มีผลต่อการทำงานของกล้ามเนื้อที่ควบคุมการขับปัสสาวะ รวมถึงการที่วิตามินบี6 เกินไปอาจทำให้การทำงานของกล้ามเนื้อของกระเพาะปัสสาวะไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดปัสสาวะบ่อยหรือเกิดอาการปัสสาวะเจ็บปวด

2.1.8 วิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6 ในปัจจุบัน

ปัจจุบันการใช้วิตามินบี6 ในอุตสาหกรรมอาหารเสริมมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว การเสริมวิตามินบี6 ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องดื่มเสริมวิตามิน เครื่องดื่มชูกำลังและอาหารเสริมรูปแบบต่าง ๆ กลายเป็นที่นิยมมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านสุขภาพของผู้บริโภค การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เหล่านี้ให้มีปริมาณวิตามินบี6 ตามที่ระบุในฉลากจึงเป็นสิ่งสำคัญ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.8.1 วิธีมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์วิตามินบี6

1) การวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ปัจจุบันเทคนิค HPLC ยังคงเป็นวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์วิตามินบี6 อีกทั้งยังได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ จากงานวิจัยของ C.K. Markopoulou และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์วิตามินบี1 วิตามินบี6 และวิตามินบี12 ในยาเสริมวิตามินโดยใช้ High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย HPLC

Parameters	Condition
Column	Reversed-phase C-18
Column temperature	30 °C
Flow rate	1.5 mL/min
Injection volume	20 µL
Retention time	0.997 min
Mobile phase	Solvent A: 0.015% triethylamine adjusted to pH 2.7 with sulfuric acid Solvent B: Acetonitrile
Detector	UV detector
Wavelength	280 nm

ในการศึกษานี้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินบี6 ด้วยวิธี HPLC โดยได้ช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วง 50-300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ($y = 92229402x + 659983$) และขีดจำกัดในการวิเคราะห์ (LOD) เท่ากับ 0.005 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และขีดจำกัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.017 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยมีค่า Coefficient of Determination ($R^2 = 0.9998$) นอกจากนี้ วิธีการนี้ให้ค่าร้อยละการฟื้นตัวของวิตามินบี6 อยู่ในช่วง 97.6% - 102.8% ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง

2) การวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย Liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) [10]

T. Bachmann และคณะทำการศึกษากการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ด้วย Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS/MS) โดยทั่วไปการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 นิยมวิเคราะห์ด้วย HPLC ร่วมกับการวิเคราะห์การเรืองแสง แต่การใช้งานประสบปัญหาหลายประการ ในการศึกษาคั้งนี้จึงพัฒนาวิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ LC-MS/MS สำหรับการตรวจปริมาณวิตามินบี6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย LC-MS/MS

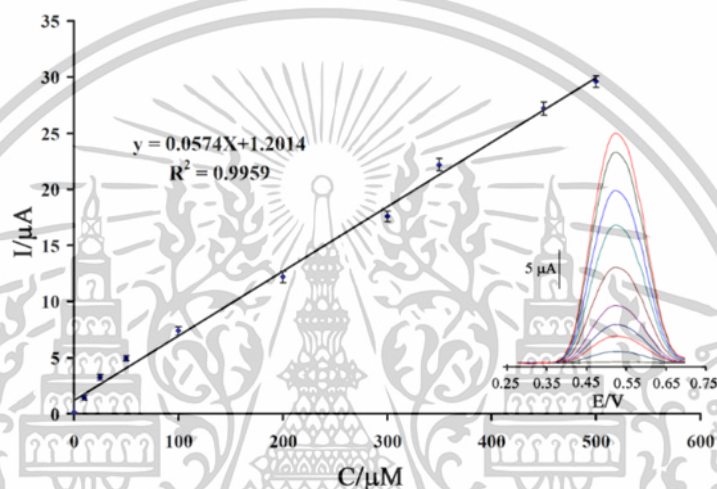
Parameters	Condition
Column	Shim-pack Velox PFPP (2.1x100 mm.)
Stationary Phase Temperature	30 °C
Flow Rate	0.3 mL/min
Binary Gradient System	0.1% Formic acid in Water (Solvent A) and Methanol
Injection Volume	1 μ L
Nebulizing Gas Flow	3 L/min
Heating Gas Flow	10 L/min
Drying Gas Flow	10 L/min
Heat Block Temperature	400 °C
Interface Temperature	300 °C
Desolvation Line Temperature	250 °C
Interface Voltage	4 kV
Collision-Induced Dissociation	270 kPa. MS/ MS
Gas Pressure	
Retention Time	2 min

โดยงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินบี6 ชีตจำกัดของการวิเคราะห์ วิเคราะห์ไพเรตอกซีน (Limit of Detection, LOD) คือ 0.018 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ ชีตจำกัดของ การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ) 0.054 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ร้อยละการคืน กลับ 92 ถึง 111% ความแม่นยำในการฉีดยาระหว่างวันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 9% ความแม่นยำระหว่างวัน ตั้งแต่ 4 ถึง 10% และความแม่นยำในการฉีดยาระหว่างวันตั้งแต่ 4 ถึง 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วยเคมีไฟฟ้า [7]

H. Sadeghi และคณะทำการศึกษาการสร้างเซ็นเซอร์วิเคราะห์วิตามินบี6 ตัวอย่างน้ำและน้ำผลไม้ ในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าโดยขยาย Carbon Paste Electrode (CPE) ซึ่งใช้ NiO-CNTs/MOHFPE/CPE เพิ่มกระแสออกซิเดชันและเป็นตัวเร่งในการวิเคราะห์วิตามินบี6 รูปที่ 2.2 แสดงโวลแทมโมแกรมของวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 4 นาโนโมลาร์ ถึง 500 ไมโครโมลาร์ เมื่อนำกระแสออกซิเดชันและความเข้มข้นของวิตามินบี6 มาแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น จะได้ $y = 0.0574x + 1.2014$ ($R^2 = 0.9956$) ซึ่งมีขีดจำกัดการวิเคราะห์วิตามินบี6 เท่ากับ 0.9 นาโนโมลาร์ โดยการใช้ NiO-CNTs/MOHFPE/CPE เป็นเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ด้วยเคมีไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ความเข้มข้นของกระแสเทียบกับวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 4 ถึง 500 ไมโครโมลาร์ [7]

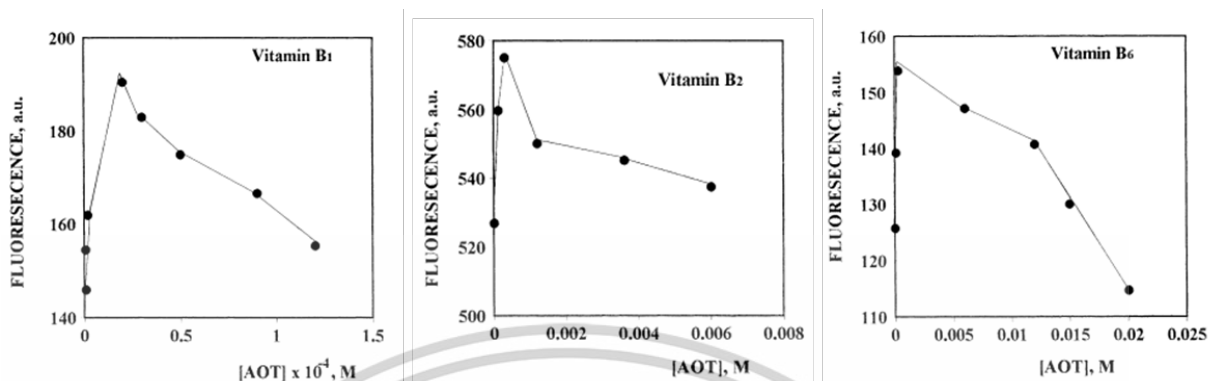
การสร้างเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในตัวอย่างน้ำและน้ำผลไม้ ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า โดยการใช้ NiO-CNTs/MOHFPE/CPE จากการศึกษาพบว่า NiO-CNTs/MOHFPE/CPE สามารถเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์และยังช่วยเพิ่มกระแสออกซิเดชันของวิตามินบี6 ได้สูงถึงประมาณ 2.5 เท่า ขีดจำกัดในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.9 นาโนโมลาร์ และร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 97.33-103.86% ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสามารถตรวจวัดปริมาณวิตามินบี6 ได้จริง

4) การวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย Fluorescence Spectroscopy [22]

L. Garcia และคณะ ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการเรืองแสงแบบ Synchronous fluorescence สำหรับการวิเคราะห์วิตามินที่ละลายน้ำได้ 3 ชนิด ได้แก่ ไทอามีน ไพริดอกซี และโรโบฟลาวิน โดยใช้ Bis-2-ethylhexylsulfosuccinate sodium salt (AOT) เป็นรีเอเจนต์ รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลูออเรสเซนซ์ที่ความเข้มข้น AOT ที่แตกต่างกันสำหรับวิเคราะห์วิตามินทั้งสามชนิด จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ AOT เพิ่มขึ้น ฟลูออเรสเซนซ์ของวิตามิน

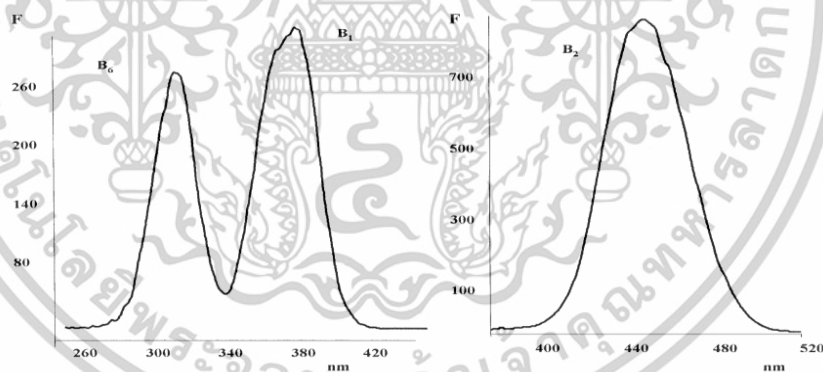
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสามชนิดจะลดลง โดยที่ความเข้มข้น 3×10^{-4} สามารถเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้สูงที่สุดในวิตามินทั้งสามชนิด



รูปที่ 2.3 กราฟเส้นตรงแสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลูออเรสเซนซ์ที่ความเข้มข้น AOT ที่แตกต่างกัน [22]

ในการวิเคราะห์การเรืองแสงของโทอามีนอยู่ในช่วง 60–95 นาโนเมตร และไรโบฟลาวินอยู่ในช่วง 62–74 นาโนเมตร รูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมของวิตามินแบบ Synchronous Fluorescence ซึ่งมีการถูกรบกวนการวิเคราะห์ที่น้อย ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จึงเลือกการวิเคราะห์แบบ Synchronous Fluorescence



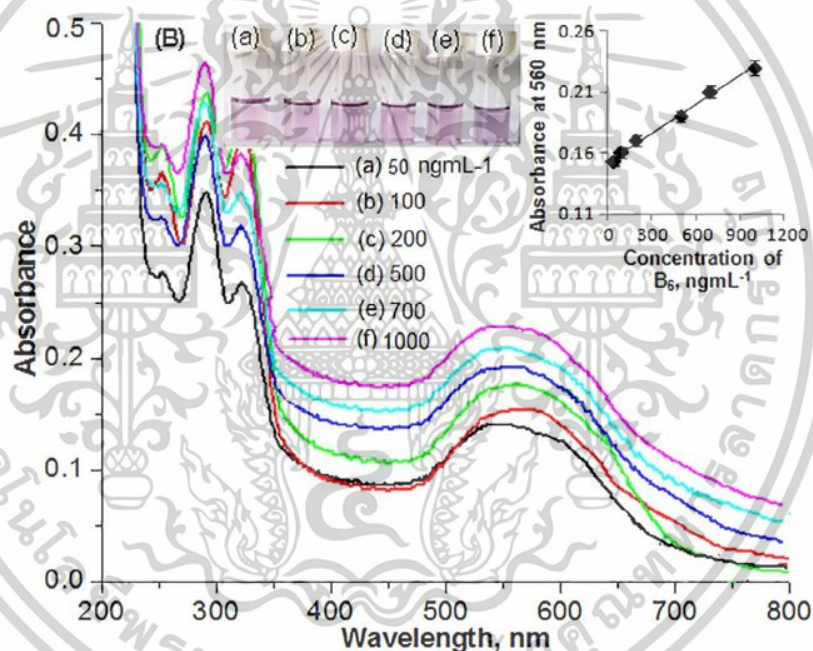
รูปที่ 2.4 สเปกตรัม Synchronous Fluorescence ของวิตามินบีที่ [AOT] = 3×10^{-4} [22]

จากการศึกษาพบว่าการใช้ Synchronous Fluorescence โดยใช้ Bis-2-ethylhexy sulfosuccinate sodium salt (AOT) เป็นรีเอเจนต์ มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์วิตามินชนิดละลายน้ำได้เป็นอย่างดี โดยถือเป็นวิธีที่มีความง่ายและรวดเร็วยิ่งกว่าการใช้ HPLC มีขีดจำกัดในการวิเคราะห์ของโทอามีน (วิตามินบี1) ไพริดอกซิน (วิตามินบี6) และไรโบฟลาวิน (วิตามินบี2) เท่ากับ 12, 10 และ 9 ไมโครกรัมต่อลิตร และสามารถวิเคราะห์ได้หลายความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ออนุภาคนาโนทอง [12]

การวิเคราะห์เชิงสีสำหรับการวิเคราะห์วิตามินบี6 ล่าสุดได้มีการวิเคราะห์โดยใช้ออนุภาคนาโนทอง K. Shrivastava และคณะ [152] ได้ศึกษาการใช้ทองคำอนุภาคนาโนที่เคลือบด้วยซูโครส (Sucrose-capped AuNPs) เพื่อเป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีแบบสี (Colorimetric Sensor) สำหรับการตรวจหาวิตามินบี6 และวิตามินบี1 ในตัวอย่างข้าว โดยการใช้คุณสมบัติ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ของ AuNPs ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากชมพูไปเป็นสีน้ำเงินเมื่อวิตามินบี6 ถูกเติมลงไปในการละลาย AuNPs เทคนิคนี้ให้ความไวและความแม่นยำในการวิเคราะห์ โดยมีช่วงความเข้มข้นเชิงเส้นตั้งแต่ 50–1000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ดังรูปที่ 2.7 และขีดจำกัดการตรวจจับ (LOD) ที่ 15 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับวิตามินบี6 เทคนิคนี้มีความง่าย รวดเร็ว และเหมาะสมสำหรับการใช้ในตัวอย่างอาหาร ด้วยความสามารถในการตรวจสอบวิตามินที่ละเอียดและแม่นยำ



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ [12]

2.2 เคอร์คูมิน

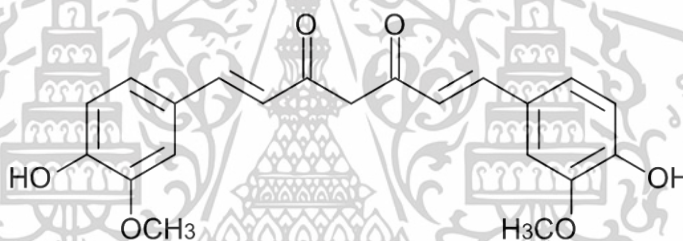
2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของเคอร์คูมิน [24]

ขมิ้นชัน (Turmeric) มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Curcuma longa* L. ซึ่งเป็นไม้ล้มลุกที่มีดอกสีเหลืองและใบกว้าง ซึ่งอยู่ในตระกูลขิง และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในอากาศร้อนชื้น โดยขมิ้นชันมีการใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์สำหรับรักษาโรคต่าง ๆ เป็นเวลากว่า 2,500 ปี ในประเทศแถบทวีปเอเชีย และมีประโยชน์สำหรับป้องกันและรักษาโรคจำนวนมาก สารสำคัญของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขมิ้นชันที่มีฤทธิ์ในการรักษาส่วนใหญ่เกิดจากสารที่มีสีส้มเหลืองที่มีชื่อว่าเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งเป็นสาร Lipophilic polyphenol โดยมีปริมาณ 2-5% ของสารทั้งหมดในผงขมิ้นชัน

สารเคอร์คูมิน หรือ Diferuloyl Methane มีชื่อเรียกตามโครงสร้างทางเคมีว่า 1,7-Bis(4-hydroxyl-3-methoxyphenyl) 1,6-Heptadiene-3, 5 Dione มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 368.28 กรัมต่อโมล และมีสูตรโมเลกุลคือ $C_{21}H_{20}O_6$ เคอร์คูมินนี้เป็นสารกลุ่มโพลีฟีนอล และเป็นองค์ประกอบหลักในสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ มีลักษณะเป็นผง หรือ ผลึกขนาดเล็ก สีเหลืองอมส้ม ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ อะซีโตน โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol) กรดน้ำส้มเข้มข้น และเบนซิน โดยจะมีสีน้ำตาลแดงในช่วง pH ที่เป็นเบส และมีสีเหลืองในช่วง pH ที่เป็นกรด ช่วงที่เปลี่ยนแปลงสีคือช่วงที่ค่า pH ประมาณ 8-9 มีจุดหลอมเหลวประมาณ 183 องศาเซลเซียส และสารเคอร์คูมิน ยังเป็นสารที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพอีกมากมาย เมื่อสารเคอร์คูมินไปรวมกับสารอนุพันธ์อีก 2 ชนิด คือ Monodesmethoxycumin หรือ Desmethoxy curcumin และ Didesmethoxycurcumin หรือ Bis-desmethoxy curcumin จะได้สารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน

2.2.2 คุณลักษณะของเคอร์คูมิน

2.2.2.1 ความเสถียรของเคอร์คูมินในสารละลาย

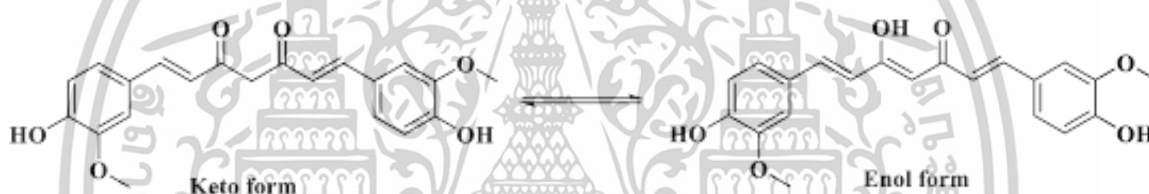
เคอร์คูมินสามารถอยู่ในรูปแบบของทิวโทเมอร์ริก (Tautomeric Form) ได้ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย คือ โครงสร้างของโมเลกุลในรูปแบบคีโต (Keto Form) และอินอล (Enol Form) โดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปมาระหว่างสารทั้งสองรูปแบบได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยพบว่าในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและกลาง เคอร์คูมินจะอยู่ในรูปของคีโตและในสารละลายที่มีสภาพเป็นเบส เคอร์คูมินจะอยู่ในรูปของอินอล [25] ความเสถียรของเคอร์คูมินจะขึ้นอยู่กับค่า pH ซึ่งพิสูจน์ได้จากการเปลี่ยนสีของสารละลายเคอร์คูมิน ในช่วง pH ต่าง ๆ โดยที่ pH 1-7 สารละลายเคอร์คูมินจะแสดงสีเป็นสีเหลืองและมีโมเลกุลส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบที่เป็นกลาง ที่ค่า pH มากกว่า 8 สารละลายเคอร์คูมินจะเปลี่ยนสีเป็นสีส้มแดง [26] เคอร์คูมินมีโครงสร้างที่ไม่ชอบน้ำซึ่งประกอบด้วยสายอะลิฟาติกที่มีวงแหวนอะโรมาติกติดอยู่ทั้งสองด้าน อย่างไรก็ตาม ทั้งสายอะลิฟาติก

(แคโรบอนิล) และวงแหวนอะโรมาติก (ไฮดรอกซิลและเมทอกซี) มีกลุ่มขั้วติดอยู่ซึ่งทำให้โมเลกุลมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะแอมพิฟิลิก โมเลกุลของเคอร์คูมินจะดูดซับกับส่วนต่อประสานของน้ำมันและน้ำ เช่น พื้นผิวของหยดน้ำมัน ในอิมัลชันอัลคาไลน์ ปฏิบัติการย่อยสลายทั้งออกซิเดชันและไฮโดรไลติกอาจเกิดขึ้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างน้ำมันกับน้ำ ซึ่งนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยา เช่น ไบไซโคลเพนตาไดโอน กรดเฟอร์รูลิก และเฟรุโลอิลมีเอน ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายเหล่านี้มีสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นเคอร์คูมินจึงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนเข้าสู่สถานะที่เป็นน้ำ เพื่อคืนความสมดุล โมเลกุลของเคอร์คูมินก็จะย้ายจากเฟสน้ำมันไปยังส่วนต่อประสานมากขึ้นที่ pH ที่เป็นกรด เคอร์คูมินจะมีอยู่ในโครงสร้างอินอลิกเป็นหลัก ดังนั้นกลไกการย่อยสลายที่สำคัญจึงเป็นออกซิเดชันมากกว่าไฮโดรไลติก เป็นผลให้เคอร์คูมินอาจมีความเสถียรมากขึ้นในอิมัลชันภายใต้สภาวะ pH ที่เป็นกรด นอกจากนี้เคอร์คูมินมีแนวโน้มที่จะตกผลึกในอิมัลชันน้อยกว่าในสารละลายที่เป็นน้ำ เนื่องจากเคอร์คูมินมีความสามารถในการละลายในน้ำมันได้สูงกว่าในน้ำมาก [27] นอกจากนี้สารละลายบัฟเฟอร์เคอร์คูมินสามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับ กรดบอริก ซิเตรต และ พาทาเลท แต่จะเฉื่อยต่อ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) และ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) [28]

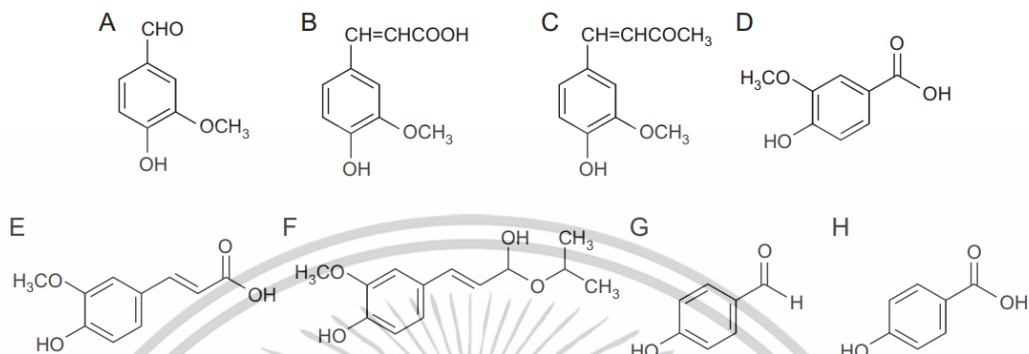


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเคอร์คูมินที่ pH ต่าง ๆ [26]

2.2.2.2 ความเสถียรของเคอร์คูมินต่อแสงและความร้อน

การย่อยสลายด้วยแสงของเคอร์คูมินจากการทดลองในตัวกลางไอโซโพรพานอล โดยเคอร์คูมินจะถูกละลายในไอโซโพรพานอลและสัมผัสกับแสง ที่ความยาวคลื่น 400-510 นาโนเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการย่อยสลายจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thin-Layer Chromatography (TLC), High Resolution Mass Spectrometry (MS) และ Nuclear Magnetic Resonance (NMR) ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายพบว่ามีองค์ประกอบหลัก คือ $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_6$ โดยมี Mass Spectrum แสดงค่าของโมเลกุลไอออนที่ $m/z = 366$ (แสดงว่าอะตอมของไฮโดรเจนสองโมเลกุลถูกลบออกจากโครงสร้าง) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้นี้เป็นผลมาจากการกระบวนการไซโคลเซชัน จากการฉายรังสีด้วยแสงและสามารถตรวจจับได้หลังจากการฉายรังสีน้อยกว่า 15 นาที นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายอื่น ๆ เช่น Vanillin, Vanillic acid (VA), Ferulic aldehyde, Ferulic acid (FA), และ 4-Vinylguaiacol และยังมีสารที่ไม่สามารถระบุได้ซึ่งมีสูตรเคมีคือ $\text{C}_{13}\text{H}_{18}\text{O}_4$ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่นที่พบว่าสารเคอร์คูมินที่ละลายในเมทานอลหรือเอทานอลที่ถูกตั้งไว้ในที่ที่มีแสงแดดเป็นเวลา 120 ชั่วโมง พบว่าเกิดการสลายตัวของเคอร์คูมินและ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายได้แก่ Vanillin, P-hydroxybenzaldehyde, Ferulic aldehyde, P-hydroxybenzoic acid, Vanillic acid, และ Ferulic acid นอกจากนี้ยังพบว่าเคอร์คูมินในรูปแบบแห้งมีความเสถียรต่อการได้รับแสงแดดมากกว่าสารละลาย (รูปที่ 2.10) [29, 30]



รูปที่ 2.10 ผลึกภัณฑ์จากการสลายตัวของเคอร์คูมิน (A) Vanillin, (B) Ferulic acid, (C) Feruloyl methane, (D) Vanillic acid, (E) Ferulic aldehyde, (F) 4-Vinyl guaiacol, (G) P-hydroxybenzaldehyde, (H) P-hydroxybenzoic acid [29]

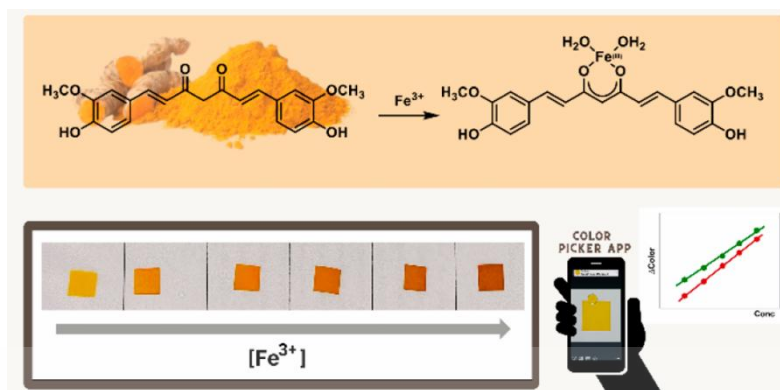
จากการทดสอบความเสถียรของเคอร์คูมินในตัวทำละลายอินทรีย์ 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล, เอทิลอะซิเตท, คลอโรฟอร์ม, และอะซีโตนไตรเล่ ในช่วงความยาวคลื่น 400-750 นาโนเมตร และ 240-600 นาโนเมตร พบว่าเคอร์คูมินมีการสลายตัวตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของเคอร์คูมินในสารละลายเรียงตามลำดับความเสถียรจากมากไปหาน้อยคือ เมทานอล, เอทิลอะซิเตท, คลอโรฟอร์ม, และอะซีโตนไตรเล่ ผลึกภัณฑ์จากการเกิด Cyclization ของเคอร์คูมินถูกตรวจพบเฉพาะในสารละลายเมทานอลและคลอโรฟอร์มเท่านั้น เมื่อสารละลายเคอร์คูมินในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิดถูกทำให้แห้งเป็นแผ่นฟิล์มบาง พบว่าเมื่อเคอร์คูมินแห้งแล้ว ค่าครึ่งชีวิตจะเปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง โดยเรียงตามลำดับความเสถียรจากมากไปหาน้อยคือ อะซีโตนไตรเล่, คลอโรฟอร์ม, เอทิลอะซิเตท และเมทานอล ดังนั้นการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ เพื่อป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมิน โดยแนะนำให้ใช้บรรจุภัณฑ์ที่เป็นแก้วสีชา เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้สามารถกรองแสงที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า 500 นาโนเมตรได้ ซึ่งจะช่วยป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมิน และจากการทดสอบความเสถียรที่อุณหภูมิ พบว่าเคอร์คูมินมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที โดยยังคงความเสถียรได้ดี แต่หากอุณหภูมิสูงขึ้น เคอร์คูมินเริ่มสลายตัวและที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การสลายตัวของเคอร์คูมินจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของค่าการดูดกลืนแสง นอกจากนี้ การให้ความร้อนกับเคอร์คูมินเป็นเวลา 10 หรือ 20 นาที จะทำให้เกิดการสูญเสียเคอร์คูมินเพิ่มขึ้น 27% และ 32% ตามลำดับ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 วิธีการวิเคราะห์เชิงสีโดยใช้เคอร์คูมิน

เคอร์คูมินเป็นสารธรรมชาติที่มีสีเหลืองสดใสและเด่นชัด ซึ่งถือเป็นเอกลักษณ์ที่ทำให้มันมีความน่าสนใจในการใช้งานในหลายสาขา โดยเฉพาะในด้านการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่าย เนื่องจากความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณสารเคมีหรือปริมาณวิตามินที่ต้องการวิเคราะห์ โดยไม่ต้องใช้เทคนิคที่ซับซ้อนหรือเครื่องมือที่มีราคาแพง การนำเคอร์คูมินมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ และสามารถให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วและแม่นยำในการวิเคราะห์ได้อย่างดีอาทิ

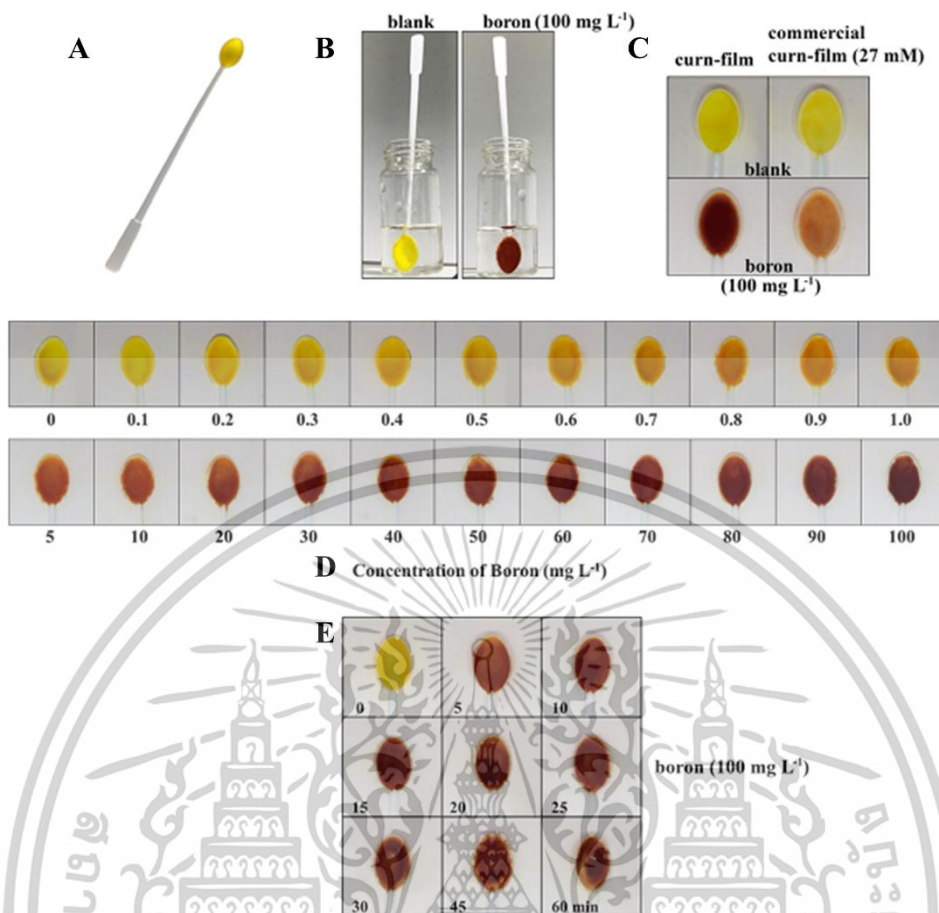
งานวิจัยของ S. Wirojsaengthong และคณะ [31] ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่าย โดยใช้การประมวลผลภาพถ่ายในการวิเคราะห์ปริมาณ Fe(III) ในตัวอย่างต่าง ๆ โดยใช้เคอร์คูมินเป็นสารตัวกลางในการวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเคอร์คูมินที่เกิดจากปฏิกิริยากับ Fe(III) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดง-น้ำตาล ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (รูปที่ 2.11) สีของฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีแดงเมื่อมี Fe(III) ในตัวอย่างปริมาณมาก โดยกลไกการวิเคราะห์เกิดจากการที่ Fe(III) จะทำปฏิกิริยากับกลุ่มอะมิโนในเคอร์คูมิน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของเคอร์คูมินและทำให้สีของฟิล์มเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองที่เกิดจากเคอร์คูมินเป็นสีแดงที่เกิดจากสารเชิงซ้อนใหม่ที่มีสีแดง-น้ำตาล ปฏิกิริยานี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงสัญญาณที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนและสามารถตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า เทคนิคนี้สามารถตรวจจับ Fe(III) ได้ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำมาก โดยให้ขีดจำกัดการวิเคราะห์ที่ต่ำถึง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำให้มีความไวสูงในการตรวจจับเมื่อเทียบกับวิธีการที่ใช้เครื่องมือทางเคมีแบบดั้งเดิม เช่น การใช้สเปกโตรมิเตอร์หรือการทดสอบด้วยวิธีที่ซับซ้อน โดยสามารถรับผลได้ทันทีและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูงหรือการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อน นอกจากนี้ วิธีนี้ยังสามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้อย่างสะดวกและเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการได้



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์ Fe(III) โดยการใช้ฟิล์มเคอร์คูมิน [31]

งานวิจัยของ C. Boonkanon และคณะ [32] ได้พัฒนาเซ็นเซอร์เชิงสีที่ทำจากฟิล์มแข็งที่ผสมอนุภาคนาโนเคอร์คูมิน ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การมีอยู่ของโบรอนในตัวอย่างโดยใช้การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเป็นตัวบ่งชี้ (รูปที่ 2.12) เทคนิคนี้ใช้การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดจากปฏิกิริยาของโบรอนกับเคอร์คูมิน ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินหรือสารที่มีสีส้มแดง เมื่อโบรอนมีปริมาณมากในตัวอย่างสีของฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดงโดยสีที่เกิดขึ้นสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การเปลี่ยนแปลงสีนี้เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการตรวจจับปริมาณโบรอนในตัวอย่างเทคนิคนี้มีความไวสูงในการตรวจจับโบรอนในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางเคมีแบบดั้งเดิม โดยให้ขีดจำกัดการวิเคราะห์คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยข้อดีในเรื่องของความง่ายในการใช้งาน มีความเร็วในการวิเคราะห์สูง ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้ในภาคสนามได้อย่างง่ายดาย จึงสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำหรือการตรวจสอบสารเคมีในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 (A) फिल्मเคอร์คูมินบนชิ้นพลาสติก (B) ผลิตภัณฑ์สีที่ได้จากการทดสอบ फिल्मเคอร์คูมินในตัวอย่างที่เป็นสารละลายเคอร์คูมินและสารละลายโบรอน (C) फिल्मเคอร์คูมินในสภาวะปกติและเมื่อใช้ในการวิเคราะห์โบรอน (D) สีของ फिल्मเคอร์คูมินที่เปลี่ยนไปในการวิเคราะห์โบรอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (E) ผลของการแช่ फिल्मเคอร์คูมินลงในสารละลายโบรอนที่เวลาแตกต่างกัน [32]

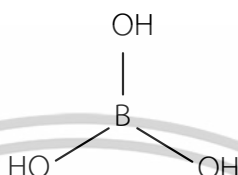
2.3 กรดบอริก

2.3.1 ข้อมูลทั่วไปของกรดบอริก [33]

กรดบอริกเป็นกรดอ่อน ซึ่งมีค่า $pK_a = 9.20$ [34] เป็นสารใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มวลโมเลกุล 61.83 กรัมต่อโมล สูตรโมเลกุล H_3BO_3 จุดเดือด 300 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 170 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีขาว บางครั้งเป็นเงาคลายไข่มุก ละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ จะละลายได้ดียิ่งขึ้นในน้ำร้อนและกลีเซอรอล กรดบอริกจะระเหยในไอน้ำเมื่อให้ความร้อนถึง 100 องศาเซลเซียส จะสูญเสียน้ำและค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเมตาบอริกแอซิด อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นเตตราบอริกแอซิด และที่อุณหภูมิสูงๆ จะเปลี่ยนเป็นโบรอนไดรอกไซด์ (Boron Trioxide, BO_3) กรดบอริก (Boric Acid) ใช้เป็นสารต้านจุลชีพ (Antiseptic) เป็นวัตถุกันเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Preservative) และใช้เป็นตัวยุติยั้งการเจริญของเชื้อราในแป้งท้าว ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 151 (พ.ศ. 2536) เรื่องวัตถุที่ห้ามใช้ในอาหารกรดบอริกเป็นวัตถุที่ห้ามใช้ในอาหาร (Prohibit Substances) เป็นอันตรายในอาหาร (Food Hazard) ประเภทอันตรายทางเคมี (Chemical Hazard) ทั้งบอแรกซ์และกรดบอริกมีคุณสมบัติการดูดซึ่ม การขับถ่ายและพิษที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกัน กรดบอริกช่วยในการเคลื่อนย้ายน้ำตาลไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช ถ้าขาดสารกลุ่มนี้ พืชจะโตผิดปกติ หรือหยุดการเจริญเติบโต



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของกรดบอริก [33]

2.3.2 การแตกตัวของกรดบอริก [34]

กรดบอริกเป็นกรดที่มีลักษณะการแตกตัวแตกต่างจากกรดทั่วไปในลักษณะการทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาวะที่มี pH ต่างกัน โดยสามารถแสดงสมการการแตกตัวได้ดังนี้

1) ในสภาวะกรด (pH ต่ำ): กรดบอริกจะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อปล่อย ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ ไฮโดรโบเรตไอออน (H_2BO_3^-) ซึ่งจะเกิดการแตกตัวในรูปแบบนี้ $\text{H}_3\text{BO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{H}_2\text{BO}_3^-$ การแตกตัวนี้หมายถึงการปล่อยโปรตอน (H^+) ซึ่งจะเพิ่มความเป็นกรดในน้ำ

2) ในสภาวะเบส (pH สูง): เมื่อกรดบอริกอยู่ในสภาวะเบสหรือในระบบที่มี OH^- มาก มักจะทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และเกิดการสร้าง โบเรตไอออน (BO_3^{2-}) และน้ำ (H_2O) ตามสมการนี้ $\text{H}_3\text{BO}_3 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{BO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$

3) การแตกตัวนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างโมเลกุลของกรดบอริก เมื่อกรดบอริกถูกทำให้กลายเป็นไอออน BO_3^{2-} ซึ่งทำให้ความเป็นเบสในสารละลายสูงขึ้น

2.4 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [35]

ซิงค์ออกไซด์เป็นที่รู้จักในนาม คาลาไมล์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิธโซไนต์ (Smithsonite) มนุษย์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในการรักษาโรคตั้งแต่ในยุคอียิปต์ โบราณ ซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาวเป็นสารที่ไ้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) ไม้มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย ด้วยเหตุผลนี้ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกัน

รังสี UVA และ UVB. รังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่เพียงประสงค์ ซิงค์ออกไซด์นาโน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า

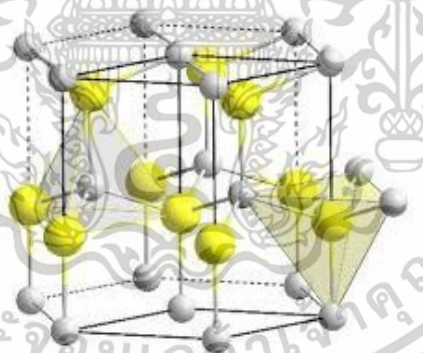
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับอนุภาคนาโนเมตร มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตร มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาว อีกทั้งซิงค์ออกไซด์สามารถป้องกันรังสี UVA และ UVB ต้านทานแบคทีเรีย (Anti-bacteria) สามารถนำไปใช้ใช้อุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Synthesis of ZnO Nanoparticles) สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ Coprecipitation, Sol-Gel, Hydrothermal และ Flame spray pyrolysis เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลและสมบัติของซิงค์ออกไซด์ [36]

สมบัติทางกายภาพ	ข้อมูล
สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.4084 g/mol
ลักษณะ	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	5.606 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	1975 °C
จุดเดือด	2360 °C
ช่องว่างพลังงาน	3.37 eV

2.4.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์



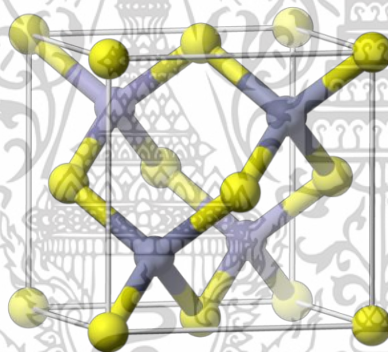
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบ Wurtzite [35]

โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แบบ Wurtzite เป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเป็นแบบเฮกซาโกนอล (Hexagonal) ซึ่งในโครงสร้างนี้ ไอออนออกไซด์ (O^{2-}) จะจัดเรียงตัวในลักษณะเฮกซาโกนอลซิมเมตริก โดยมีครึ่งหนึ่งของช่องเตตระฮีดรอล (Tetrahedral Sites) ที่ถูกเติมเต็มด้วยไอออนซิงค์ (Zn^{2+}) การจัดเรียงตัวนี้ทำให้ Zn^{2+} อยู่ห่างกันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนรัศมีระหว่าง Zn^{2+} กับ O^{2-} ที่ 0.25 ทำให้ไอออน Zn^{2+} ถูกล้อมรอบด้วย O^{2-} จำนวน 4 ตัวในตำแหน่งเตตระฮีดรอล ซึ่งทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรงในโครงสร้างนี้ นอกจากนี้ เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination Number) ของโครงสร้าง ZnO แบบ Wurtzite คือ 4:4 ซึ่งหมายความว่าแต่ละ Zn^{2+} จะเชื่อมโยงกับ O^{2-} จำนวน 4 ตัว และในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับกัน O^{2-} ก็จะเชื่อมโยงกับ Zn^{2+} จำนวน 4 ตัวเช่นกัน [37] ดังรูปที่ 2.14 โครงสร้างนี้ทำให้ ZnO มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ต่าง ๆ

โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เรียกว่า Zinc Blende Structure เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกลูกบาศก์ (Cubic) ซึ่งไอออนออกไซด์ (O^{2-}) จัดเรียงตัวในรูปแบบของโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ชนิดหน้าสัมผัส (Face-Centered Cubic, FCC) โดยไอออน O^{2-} จะอยู่ในตำแหน่งที่เป็นลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นศูนย์กลาง (FCC) ส่วนไอออนซิงค์ (Zn^{2+}) จะครอบคลุมช่องที่ว่างในรูปแบบของโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงในแบบเตตระดรอ (Tetrahedral Coordination) โดยในโครงสร้างนี้ Zn^{2+} จะถูกล้อมรอบด้วย O^{2-} จำนวน 4 ตัวในลักษณะการเชื่อมพันธะ ซึ่งการเชื่อมโยงนี้ทำให้มีเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination Number) ที่ 4:4 หมายถึง แต่ละ Zn^{2+} จะเชื่อมโยงกับ O^{2-} จำนวน 4 ตัวและในทางกลับกัน O^{2-} ก็จะเชื่อมโยงกับ Zn^{2+} จำนวน 4 ตัวเช่นกัน [37] ดังรูปที่ 2.15 โครงสร้างแบบ Zinc Blende นี้มีความเสถียรสูงและถูกใช้ในหลายอุปกรณ์ เช่น เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงที่เหมาะสม.



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบ Zinc Blend [35]

2.4.3 ประโยชน์ของซิงค์ออกไซด์ [36, 38-40]

2.4.3.1 ด้านไฟฟ้า

ซิงค์ออกไซด์มีช่องว่างพลังงานโดยตรง (3.37 eV) มีค่ามวลยังผลพาหะ (Carrier Effective Mass) ของโฮลกับอิเล็กตรอน คือ $0.59 m_0$ และ $0.24 m_0$ ตามลำดับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) ที่ผลึกซิงค์ออกไซด์เชิงเดี่ยว (ZnO Single Crystal) ระหว่าง 100 ถึง $200 \text{ cm}^2/\text{V}$ และมีค่าสภาพคล่องของการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole mobility) ประมาณ $180 \text{ cm}^2/\text{V}$ มีการนำไปประยุกต์การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเลเซอร์ (Laser Diodes) และเซ็นเซอร์ (Sensor) ข้อดีคือมีช่องว่างระหว่างพลังงานขนาดใหญ่รวมถึงค่าของเบรกดาวนที่สูงสามารถลดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.2 ด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดด

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UVA และ UVB นอกจากนี้ยังมีอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง และปลอดภัย เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิวเพื่อปกป้องรังสี UV อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกาย โดยได้รับการยืนยันจากสถาบัน Food and Drug Administration (FDA) ว่าเป็น 1 ใน 2 ชนิดของสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิวซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และ UVB

อนุภาคปกติของซิงค์ออกไซด์จะมีสีขาวเมื่อนำมาทาลงบนผิว ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเป็นครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิว อย่างไรก็ตาม นาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการทดสอบโดย Australian Commonwealth Scientific & Industrial Research organization CSIRO พบว่าซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมหรือโลชั่นกันแดดจะให้สัมผัส นุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง

2.4.3.3 ด้านแสง

วัสดุโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์มีสมบัติทางแสงที่ดีเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่แสดงสมบัติเรืองแสงใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่สามารถมองเห็นได้ มีสมบัติการดูดกลืนแสง หรือการเรืองแสงในย่านความยาวคลื่นสั้น เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงทำให้เปล่งแสงสีน้ำเงิน อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จึงนิยมนำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน (Light Emitting Diodes ; LED) และตัววิเคราะห์แสงย่านอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Photodetector) มีประโยชน์มากในการทำเลเซอร์พลังงานสูงหรือไปประยุกต์ใช้กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องทางพื้นผิว

2.4.3.4 ด้านอุตสาหกรรมสี

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ ทั้งยังสามารถผลิตสี ป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ นอกจากนี้ปกติในอุตสาหกรรมเซรามิกจะใช้ซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาว จากการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยหลังการเผาพบว่าผิวของเซรามิกที่ได้มีความมันวาวราวกับกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

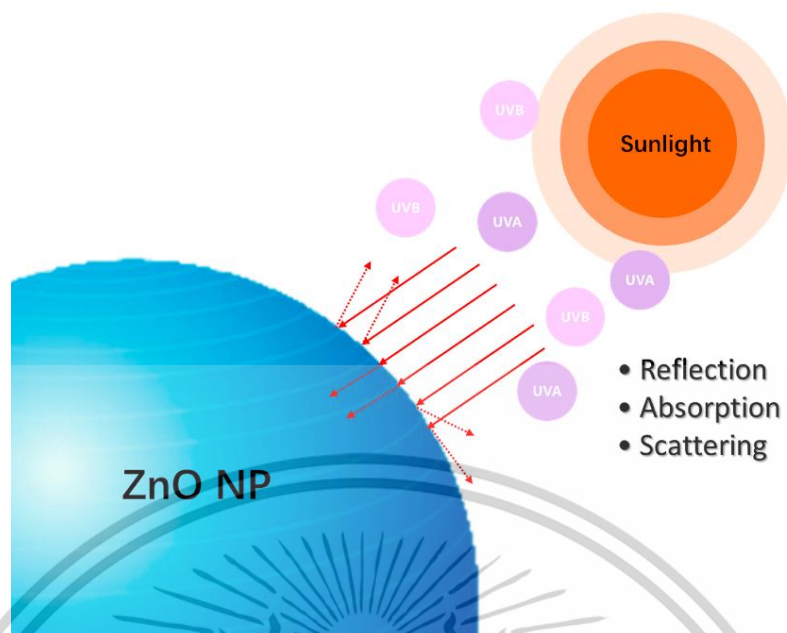
2.4.3.5 ด้านเภสัชกรรม

นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้โดยมีความปลอดภัยสูงสามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและอาหารสัตว์ เนื่องจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 มิลลิกรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิกรัม ในสตรีที่ให้นมบุตร ซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบ และช่วยยับยั้งแบคทีเรียได้ดี โดยนำมาใช้เป็นยาสมานผิว และรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนกวาง โรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรีย โรคกลากเกลื้อน อาการคันตามผิวหนังและผิวหนังระคายเคือง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตร จากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี

2.4.4 กลไกการป้องกันแสง

สารป้องกันแสงในปัจจุบันได้ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ สารป้องกันแสงทางกายภาพ หรือ Physical Sunscreens กลุ่มที่ 2 คือ สารป้องกันแสงทางเคมีหรือ Chemical Sunscreens โดยมีกลไกการทำงาน 2 กลไก ได้แก่ การดูดซับ (Absorption) การสะท้อนและกระเจิง (Reflection and Scattering) โดยซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารป้องกันแสงทางกายภาพ ซึ่งทำงานโดยการสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยมีประสิทธิภาพป้องกันทั้งรังสี UVA (320-400 นาโนเมตร) และ UVB (290-320 นาโนเมตร) ปัจจุบันมีการลดขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ให้อยู่ในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแสง [41, 42] อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีศักยภาพในการดูดซับ การสะท้อน และการกระเจิงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในแสงแดด เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถเกิดการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นจากชั้นวาเลนซ์และไปขึ้นคอนดักชัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถป้องกันแสงแดดได้เมื่อรังสี UV ตกกระทบบนอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พลังงานจากแสงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์ (Valence Band) ให้กระโดดไปยังชั้นคอนดักชัน (Conduction Band) ทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์ การกระตุ้นนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ไปยังชั้นคอนดักชัน ส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการกระเจิงของแสง ซึ่งทำให้อิเล็กตรอน UV ถูกกระจายออกไปแทนที่จะเข้าสู่พื้นผิวด้านใน [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กลไกการป้องกันแสงของซิงค์ออกไซด์ [43]

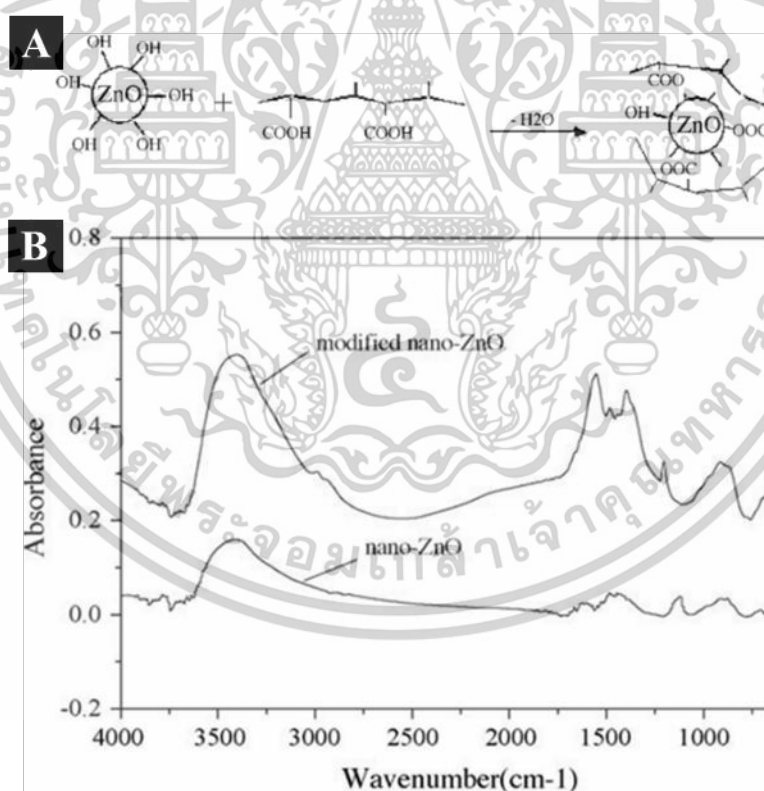
2.4.5 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

จากคุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ อีกทั้งพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังแสดงประจุเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในหลายด้าน ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติที่สามารถจับกับโมเลกุลชีวภาพได้ดีขึ้น ปรับปรุงการกระจายตัวในน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานในหลากหลายสาขา เช่น การใช้งานในระบบชีวการแพทย์และเซ็นเซอร์ชีวภาพ โดยการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีการนำหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ มายึดเกาะบนผิวจำนวนมากเพื่อปรับปรุงให้เข้ากับการใช้งาน อาทิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.1 หมู่คาร์บอกซิล (-COOH)

จากงานวิจัยของ E. Tang และคณะ [44] ได้ทำการปรับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วย PMAA (Poly methacrylic acid) ซึ่งช่วยให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) สามารถจับกับโมเลกุลที่มีประจุบวก เช่น คอลลาเจน หรือ โปรตีนต่าง ๆ การยืนยันผลการปรับพื้นผิวทำได้โดยการทดสอบการกระจายตัวในน้ำ ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้รับการปรับพื้นผิวด้วย PMAA มีการกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ปรับพื้นผิว และยืนยันการปรับปรุงพื้นผิวได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วย FTIR โดยการปรากฏของพีคที่ความยาวคลื่น 3410 cm^{-1} แสดงถึงการมีอยู่ของ -OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ในสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับพื้นผิวด้วย PMAA (รูปที่ 2.17B) จะเห็นพีคเกิดขึ้นในช่วง $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงจากหมู่ CH_2 และ CH_3 ใน PMAA และพีคที่ 1550 cm^{-1} และ 1390 cm^{-1} สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการสั่นของโมเลกุล C-O ซึ่งช่วยให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีความสามารถในการจับตัวกับโปรตีนได้ดีกว่า โดยเฉพาะการจับกับโมเลกุลที่มีประจุบวก

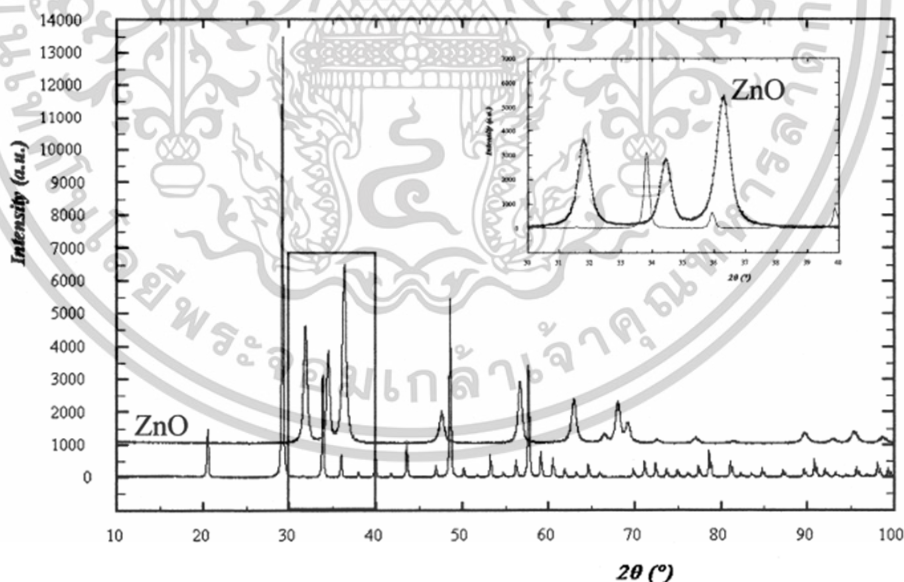


รูปที่ 2.17 (A) กลไกการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (B) สเปกตรัม FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.2 หมู่เอมีน (-NH₂)

จากงานวิจัยของ F. Grasset และคณะ [45] ได้ทำการปรับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วย APTES (Aminopropyltriethoxysilane) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน (-NH₂) การปรับพื้นผิวนี้ทำให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชัน เอมีน (-NH₂) ที่สามารถจับกับโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดหรือโมเลกุลที่มีประจุลบได้ดีขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวนี้สามารถยืนยันได้โดยการใช้ XRD (X-ray diffraction) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หลังการปรับพื้นผิว โดยจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัม XRD ซึ่งยืนยันว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีหมู่เอมีน (-NH₂) เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่า XRD ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับพื้นผิวด้วย APTES แสดงพีกการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับการมีหมู่ฟังก์ชัน -NH₂ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เกิดจากการมีหมู่ฟังก์ชันนี้อยู่บนพื้นผิวอนุภาค นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันการปรับพื้นผิวได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีกที่เกิดขึ้นใน 2θ บางตำแหน่ง ซึ่งแสดงถึงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเอมีนและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ทำให้โครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไป การปรับพื้นผิวด้วย APTES ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจับตัวกับโมเลกุลชีวภาพ เช่น กรดนิวคลีอิกหรือโปรตีน ซึ่งทำให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านชีวการแพทย์ เช่น การขนส่งยาและการใช้ในเซ็นเซอร์ชีวภาพ

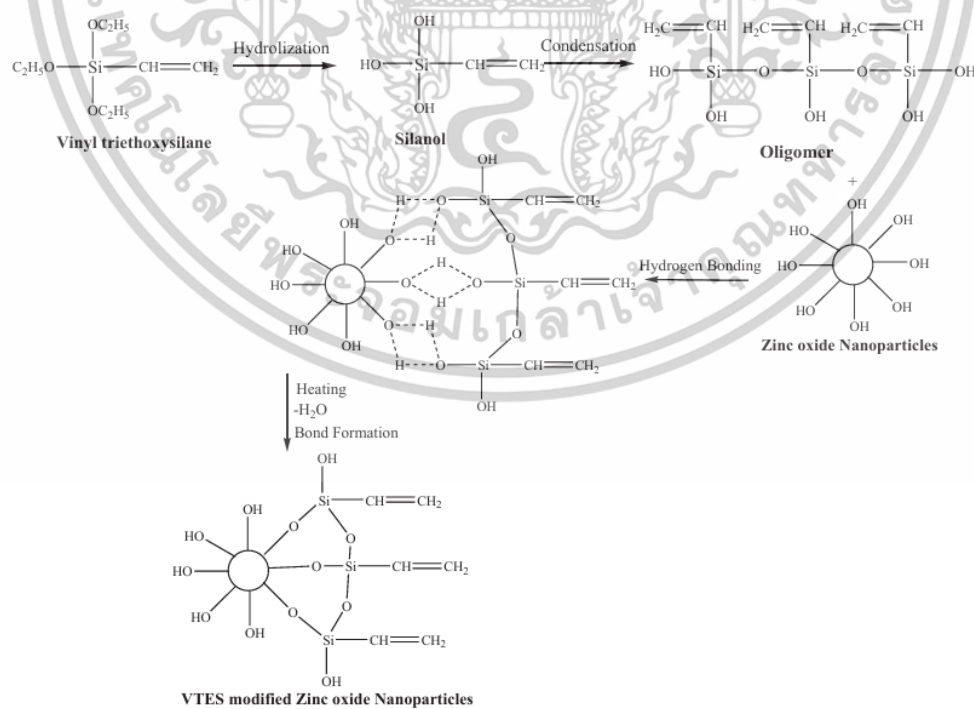


รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.3 หมู่ไวนิล (-C=CH₂)

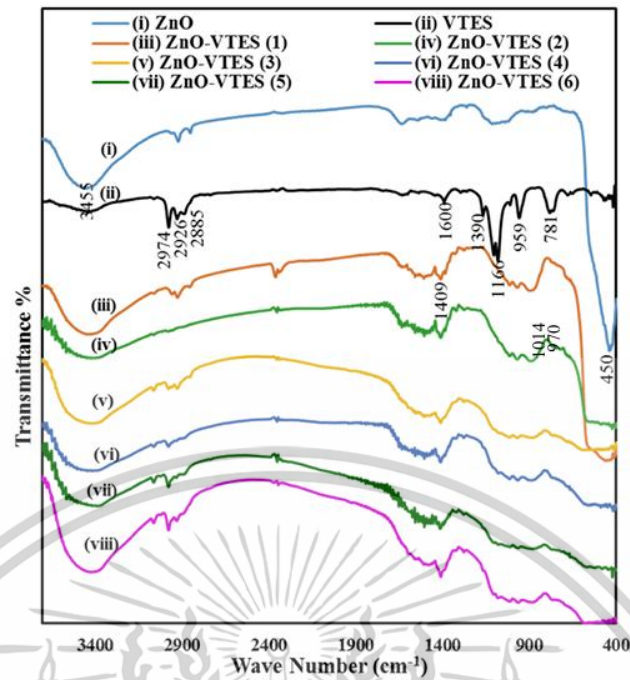
จากงานวิจัยของ N. Khurana และคณะ [46] ได้ทำการปรับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย Vinyltriethoxy silane (VTES) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชัน ไวนิล (-C=CH₂) ดังรูปที่ 2.19 ที่ทำให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถจับกับโมเลกุล เช่น กรดนิวคลีอิก หรือโปรตีนได้ดีขึ้น โดยการปรับพื้นผิวด้วย VTES ช่วยให้การจับตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กับโมเลกุลชีวภาพต่าง ๆ โดยยืนยันการปรับพื้นผิวนี้อาจทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วย FTIR ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพีกในตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจับตัวของ VTES บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ รูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นสเปกตรัม FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ VTES และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับพื้นผิวด้วย VTES โดยมีพีกที่ 2974, 2926, และ 2885 cm⁻¹ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นของหมู่ CH₃ และ CH₂ ใน VTES. นอกจากนี้ยังพบพีกที่ 1600 cm⁻¹, 1390 cm⁻¹, 1166 cm⁻¹, 1105 cm⁻¹, 959 cm⁻¹, และ 781 cm⁻¹ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการสั่นของหมู่ -C=CH₂, CH₃ Bending, -C-O-C Asymmetric group และพันธะของ Si-O-CH₃ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัม FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับพื้นผิวพบว่าในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปรับพื้นผิวด้วย VTES พีกที่ 2885 cm⁻¹ และ 1166 cm⁻¹ จะหายไป เนื่องจากการเกิดพันธะของ VTES กับกลุ่ม -OH ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ การปรับพื้นผิวด้วย VTES ยังทำให้เกิดพีกใหม่ที่ 1409 cm⁻¹ และ 970 cm⁻¹ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการสั่นของ CH₂ Bending และ Zn-O-Si Stretching ตามลำดับ จากการทดสอบ FTIR จึงสามารถยืนยันได้ว่า VTES สามารถพันธะกับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สำเร็จ



รูปที่ 2.19 กลไกการปรับพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย VTES [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 สเปกตรัม FTIR แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย VTES [46]

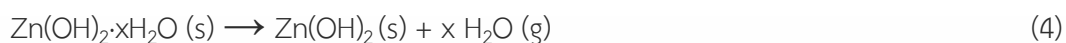
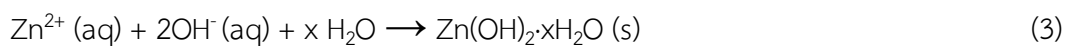
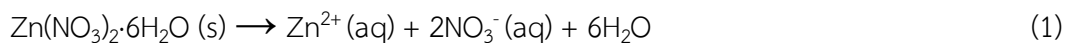
2.4.6 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

2.4.6.1 วิธีการตกตะกอน (Precipitation Method)

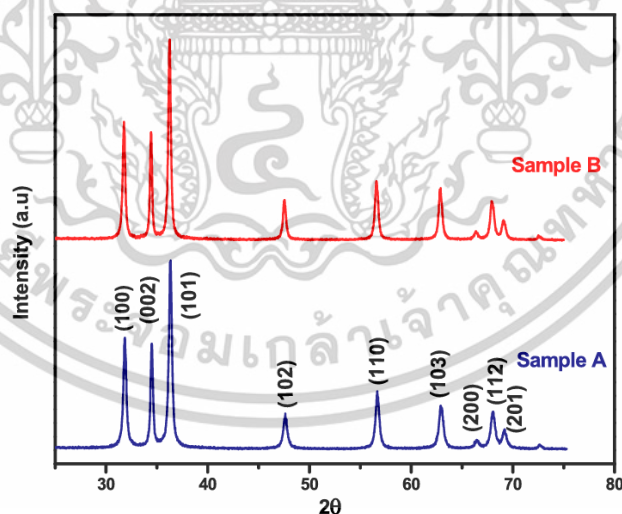
วิธีการตกตะกอน คือกระบวนการแยกสารโดยทำให้สารตกตะกอนออกมาจากสารละลาย เมื่อมีการเพิ่มสารที่กระตุ้นให้เกิดการตกตะกอน กระบวนการนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมี เช่น การเพิ่มสารเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH หรือการเพิ่มสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งช่วยกระตุ้นให้สารละลายที่มีซิงค์อยู่เกิดการตกตะกอนไปอยู่ในรูปของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ กระบวนการนี้เกิดจากการปรับสภาพของสารละลายซึ่งทำให้อนุภาคของซิงค์มีขนาดเล็กและสามารถควบคุมได้ตามการปรับอุณหภูมิและความเข้มข้น

จากวิจัยของ M.G. Kotresh และคณะ [47] ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน โดยใช้ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc nitrate hexahydrate) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) การสังเคราะห์เริ่มต้นโดยการละลายซิงค์ไนเตรตในน้ำซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (1) และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของซิงค์ในรูปของซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ดังสมการ (2) จากนั้นซิงค์ไฮดรอกไซด์จะถูกกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ $160^\circ C$ เพื่อให้ได้ซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (3) จากนั้นจะนำอนุภาคซิงค์ไฮดรอกไซด์ไปเผาโดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อทำการแปรสภาพอนุภาคเป็นซิงค์ออกไซด์ ดังสมการ (4) และ (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีขนาด 1,794 ถึง 1,994 ไมโครเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย เท่ากับ 1,907 ไมโครเมตร และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของขนาด (CV) คือ 2.09% ผลการสังเคราะห์ที่ได้ถูก ยืนยันด้วยการวิเคราะห์ XRD (ตามรูปที่ 2.21) กราฟแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ แสดงให้เห็นพีก XRD ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) และ (201) ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีการจัดเรียงผลึกในลักษณะ Hexagonal structure พิกเหล่านี้มีความแหลมและแคบซึ่งยืนยันว่า ตัวอย่างที่ได้มีคุณภาพสูง มี ผลึกดี และ ขนาดอนุภาคที่ละเอียด



รูปที่ 2.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน [47]

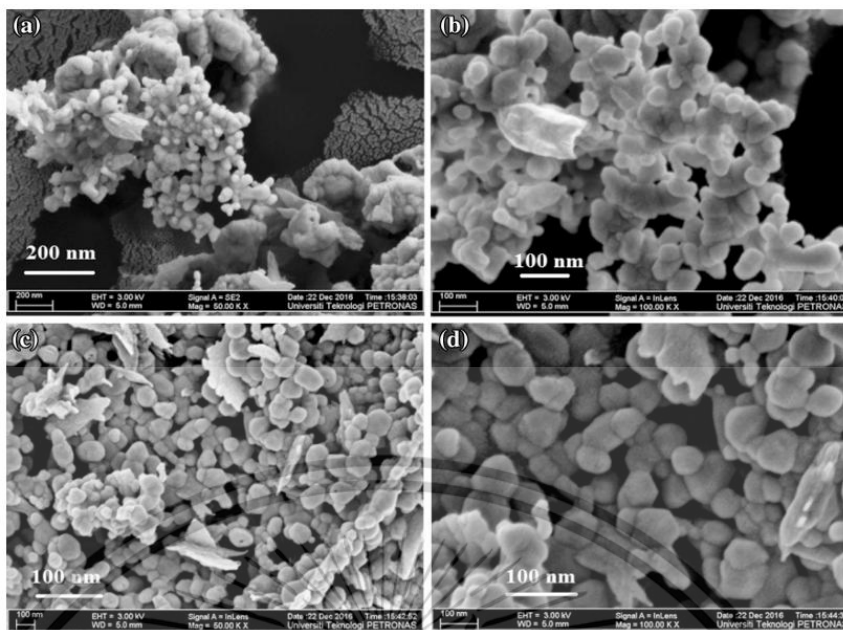
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6.2 วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method)

วิธีการไฮโดรเทอร์มอล คือ การใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในสารละลายซิงค์ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนหรือการเจริญเติบโตของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ กระบวนการนี้ใช้หลักการอุณหภูมิสูงและความดันสูงภายในภาชนะที่ทนต่อความดัน เช่น หม้อไฮโดรเทอร์มอล การใช้ความดันและอุณหภูมิสูงจะช่วยให้ซิงค์ที่ละลายอยู่ในสารละลายทำปฏิกิริยากันและตกตะกอนมาเป็นอนุภาคที่มีขนาดนาโน และในขณะเดียวกันจะทำให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีความเสถียรสูง และมีขนาดที่คงที่ ในสภาวะปกติซิงค์หรือสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์จะละลายในสารละลายได้ แต่เมื่อเพิ่มความร้อนและความดันลงในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะเกิดการกระตุ้นการตกตะกอนของซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กและมีความเสถียร โดยที่สามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคได้ตามต้องการ การควบคุมอุณหภูมิและความดันในกระบวนการนี้จะมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของอนุภาค และ คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ขนาด และความเสถียรของอนุภาคที่ได้ ซึ่งกระบวนการนี้ไม่เพียงแต่ช่วยในการสร้างอนุภาคนาโน แต่ยังช่วยในการจัดระเบียบโครงสร้างของอนุภาคให้มีลักษณะที่ต้องการ เช่น รูปร่างของอนุภาค ขนาดอนุภาค หรือ ความเสถียรในการใช้งาน ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น เซ็นเซอร์ การส่งมอบยา พลังงาน หรือ การบำบัดน้ำเสีย

จากงานวิจัยของ H. Soleimani และคณะ [48] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) โดยเริ่มจากการละลายซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate, $Zn(NO_3)_2$) ในสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จากนั้นบรรจุสารละลายนี้ลงในหม้อไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Autoclave) เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงในช่วง 160-180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง กระบวนการนี้ทำให้เกิดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ซึ่งสามารถควบคุมขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคได้โดยการปรับอุณหภูมิและความดันในกระบวนการ จากการวิเคราะห์ SEM (รูปที่ 2.22) พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาโนเมตร โดยแสดงให้เห็นถึงความเป็นระเบียบและการกระจายตัวที่มีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ XRD ยังสามารถยืนยันโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้ โดยพบว่า มีสเปกตรัมแสดงระนาบผลึก XRD ที่ชัดเจนและสม่ำเสมอ ซึ่งบ่งชี้ถึงการจัดเรียงผลึกในรูปแบบที่มีความสมบูรณ์ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ มีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับแสง และเสถียรภาพทางเคมีที่สูง ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การกรองน้ำ หรือการใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



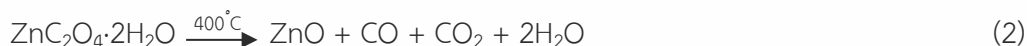
รูปที่ 2.22 ภาพ SEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [48]

2.4.6.3 วิธีโซล-เจล (Sol-Gel Method)

กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการผลิตวัสดุนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านความบริสุทธิ์และการควบคุมขนาดอนุภาคได้อย่างแม่นยำ โดยกระบวนการนี้อาศัยการเตรียมสารละลายโลหะในรูปของซิงค์ไนเตรตหรือซิงค์ซัลเฟต ซึ่งละลายในตัวทำละลาย จากนั้นมีการเติมสารกระตุ้น เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแอมโมเนีย เพื่อกระตุ้นการเกิด Cross-linking ระหว่างโมเลกุลซิงค์ไนเตรตละลาย ทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างภายในและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวใส (sol) ไปสู่กึ่งของแข็ง (Gel) ที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติ การเกิด Cross-linking นี้มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเกิดโครงสร้างของอนุภาคในระดับนาโน [49] โดยปัจจัยอย่างอุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จะมีผลต่อการเติบโตและความเสถียรของเจลที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ในขั้นสุดท้าย กระบวนการโซล-เจลจึงเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์วัสดุนาโนที่ต้องการคุณลักษณะเฉพาะ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยา อาหาร และเทคโนโลยีชีวภาพ

Y.T. Chung และคณะ [50] ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้ ซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรตและกรดออกซาลิกเป็นตัวรีดิวซ์ สังเคราะห์โดยซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรต 0.1 โมลาร์ ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และกรดออกซาลิก 0.1, 0.15 และ 0.2 โมลาร์ ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหยดสารละลายกรดออกซาลิกลงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรต ในขณะที่ปั่นกวอย่างต่อเนื่อง ในอัตราส่วนซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรตต่อกรดออกซาลิก 60/40, 50/50 และ 40/60 จากนั้นปั่นกวต่ออีก 90 นาที จนได้สารละลายสีขาวขุ่น เนื้อคล้ายเจล กรองเจลที่ได้ในเครื่องกรองลดความดัน อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และนำเข้าเครื่องเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์

	Process factors	Levels		
		1	2	3
A	Ratio of iZnc acetate to Oxalic acid Solution (mL)	60/40	50/50	40/60
B	Concentration of Oxalic acid (M)	0.1	0.15	0.2
C	Calcination Temperature ($^\circ\text{C}$)	400	500	600

ในงานนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในรูปที่ 2.26 มีทั้งหมด 9 กราฟ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบระหว่างแต่ละปัจจัยตาม 3 ประเภทหลัก ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรตต่อกรดออกซาลิก ความเข้มข้นของกรดออกซาลิก และอุณหภูมิในการเผา.

รูปที่ 2.23 (a), (b) และ (c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิในการเผาในอัตราส่วนคงที่ พบว่าเมื่ออัตราส่วนเป็น 40 ขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 0.15 โมลาร์ และลดลงเล็กน้อยที่ 0.2 โมลาร์ สาเหตุหลักมาจากปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์เมื่อความเข้มข้นของกรดออกซาลิกไม่เพียงพอหรือมากเกินไป นอกจากนี้ขนาดอนุภาคยังเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นจาก 400 เป็น 600 องศาเซลเซียส แม้ว่าแนวโน้มของแต่ละอัตราส่วนจะเท่ากัน แต่ที่อัตราส่วน 50 พบว่ามีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนมีบทบาทสำคัญในการกำหนดขนาดอนุภาค

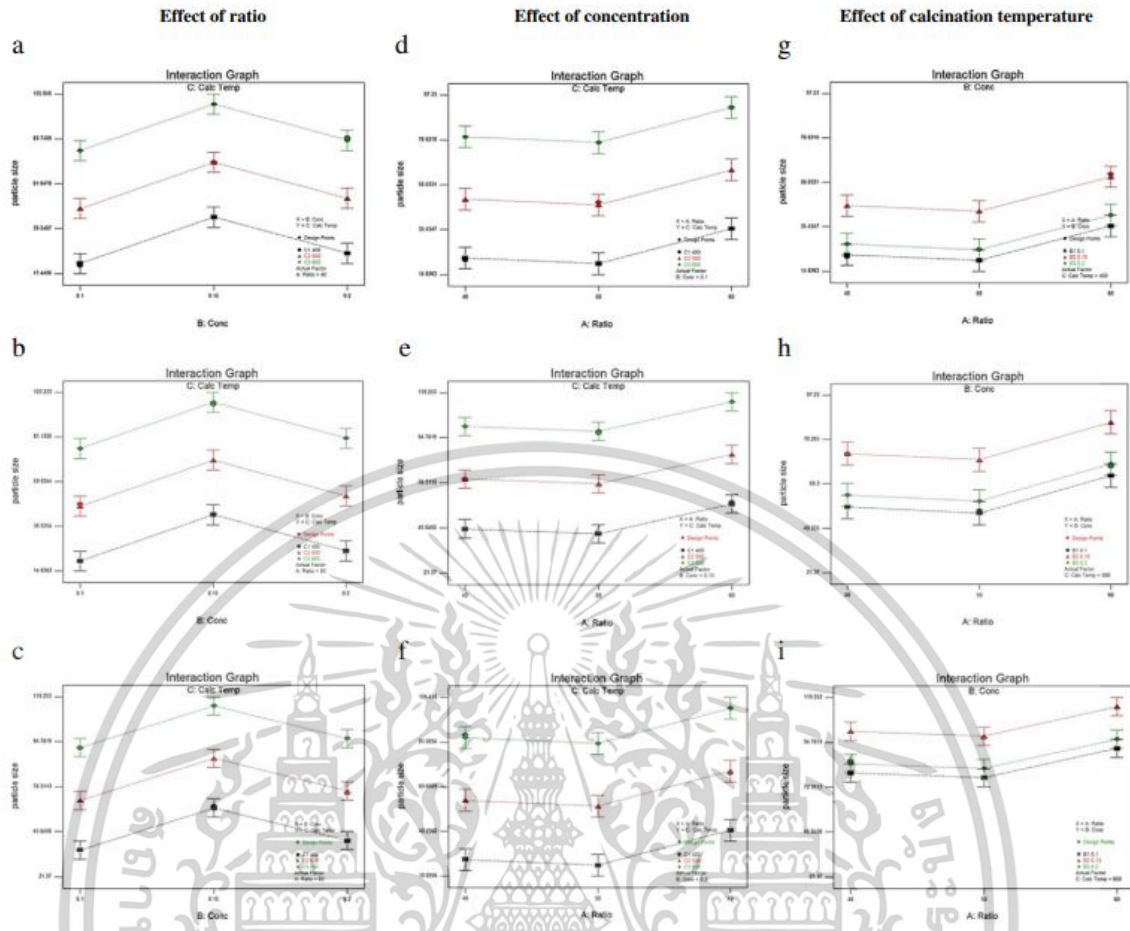
นอกจากนี้รูปที่ 2.23 (d), (e) และ (f) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนและอุณหภูมิในการเผาที่ความเข้มข้นของกรดออกซาลิก 0.1, 0.15 และ 0.2 โมลาร์ ตามลำดับ จากรูปที่ 2.23 (d) ขนาดอนุภาคมีการลดลงที่อัตราส่วน 40 ถึง 50 แต่เพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นในอัตราส่วน 60 และเพิ่มอุณหภูมิการเผา พบว่าขนาดของอนุภาคนาโนยังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ 0.15 และ 0.2 ในรูปที่ 2.23 (e) และ (f) จะเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดออกซาลิก 0.1 โมลาร์ สาเหตุหลักมาจากความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่เหมาะสม ทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิงค์อะซิเตทอย่างสมบูรณ์ ป้องกันไม่ให้อนุภาคจับตัวเป็นก้อน

นอกจากนี้ผลกระทบของอัตราส่วนและความเข้มข้นกรดออกซาลิกที่อุณหภูมิการเผา 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.23 (g), (h) และ (i) จากรูปที่ 2.23 (g) อุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดของอนุภาคจะค่อยๆลดลงที่อัตราส่วน 40 ถึง 50 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อัตราส่วน 60 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 50 มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และที่ความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ 0.15 โมลาร์ มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลาร์ นอกจากนี้จากแผนภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อมีอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นจาก 400 เป็น 600 องศาเซลเซียส อนุภาคจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าของอุณหภูมิแต่ละระดับความเข้มข้น ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของการหลอมละลายของอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างเล็กเป็นผลึกที่ใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น TGA ยังพิสูจน์ว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาระหว่างซิงค์อะซิเตทและกรดออกซาลิกคือ 400 องศาเซลเซียส

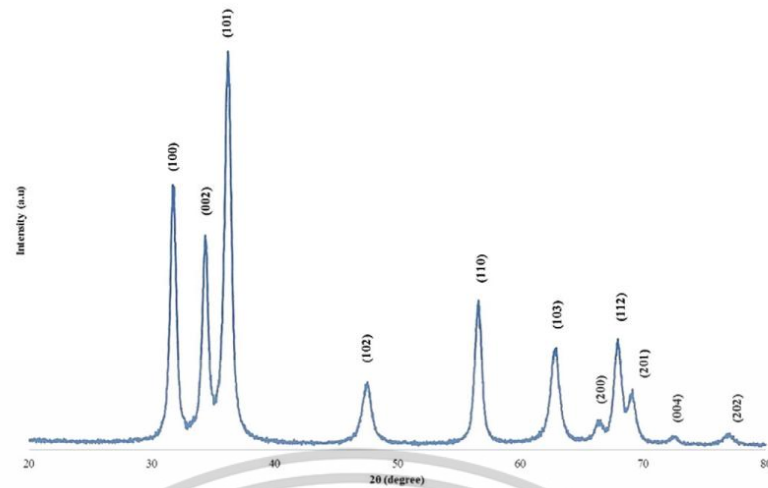
จากการศึกษาพบว่าแต่ละปัจจัยส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ การทำแผนภาพสามารถตรวจสอบสถานะที่การเตรียมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุตั้งต้นได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 50/50 ความเข้มข้นกรดออกซาลิก 0.1 โมลาร์ และอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมคือ 400 องศาเซลเซียส



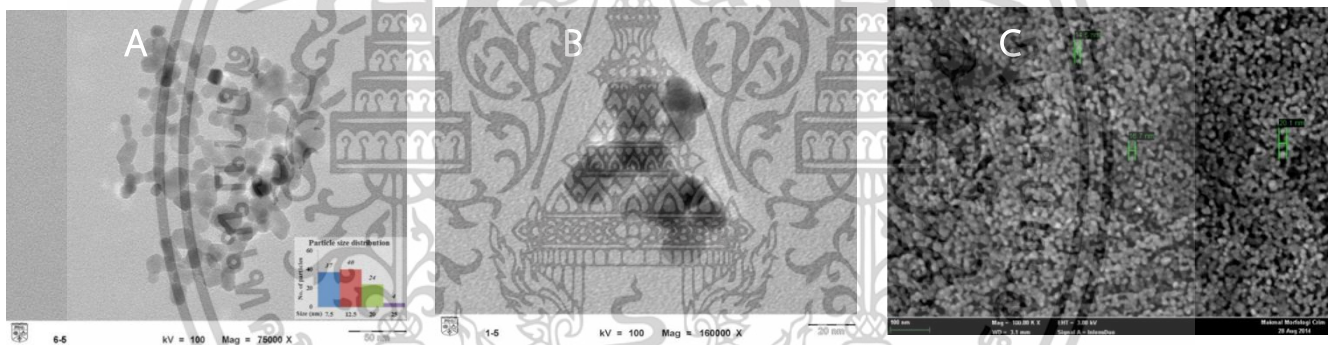
รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [49]

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ รูปที่ 2.24 แสดงฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับสภาวะการทดลองที่เหมาะสม โดยที่ยอดทั้งหมดบ่งชี้ถึงโครงสร้างเวอริตไฮต์หกเหลี่ยมของซิงค์ออกไซด์ ผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าอยู่ที่ 20 ± 2 นาโนเมตรภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด ภาพ TEM ดังแสดงในรูปที่ 2.25 a,b ภาพเผยให้เห็นว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นใกล้เคียงกับขนาดผลึก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 13 ± 5 นาโนเมตร จากผลลัพธ์ที่กล่าวมาได้มีการยืนยันเพิ่มเติมอีกครั้งดังภาพ SEM แสดงในรูปที่ 2.25 c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แสดงระนาบผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล [49]

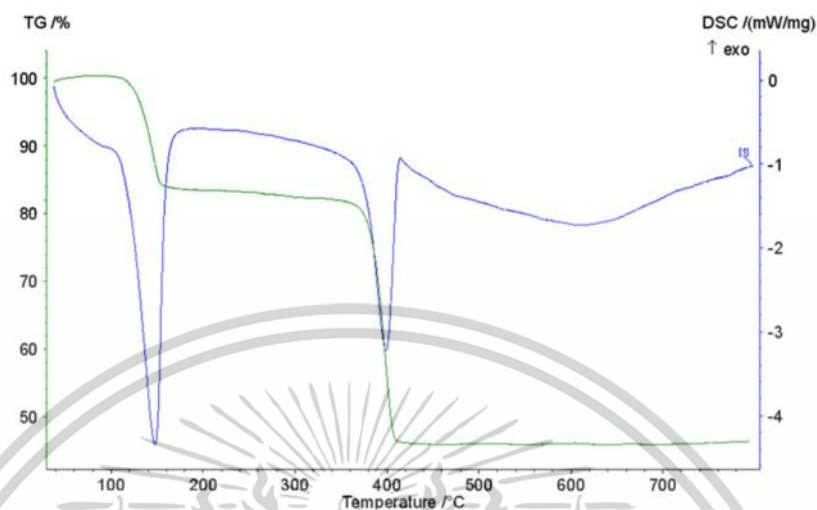


รูปที่ 2.25 ภาพ TEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่กำลังขยาย (A) 75,000x (B) 160,000x (C) ภาพ SEM แสดงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [49]

การวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของซิงค์ออกไซด์ที่สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วน 50:50, กรดออกซาลิก 0.1 โมลาร์ และอุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.26 ในการวิเคราะห์นี้ แสดงให้เห็นว่ามีฟีกของการดูดความร้อนสองจุด อาจเกิดจากการระเหยของน้ำและเอทานอลตลอดจนการสลายตัวด้วยความร้อนของสารตั้งต้นของซิงค์ออกไซด์ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ สอดคล้องกับการสลายตัวของวัสดุ ตัวอย่างเช่น ประมาณ 2% ของการสูญเสียน้ำหนักเป็นการระเหยเอทานอลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่ 17% สูญเสียไปที่อุณหภูมิ 100–180 องศาเซลเซียส สำหรับการนำน้ำออก และสุดท้าย 36% ของการสูญเสียน้ำหนักบ่งชี้ถึงการสลายตัวของ สารตั้งต้นของซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียน้ำหนักเกิน 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของซิงค์ออกซาลेटโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมที่สุดคือ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.26 กราฟ TGA-DSC แสดงการสลายตัวทางความร้อนของซิงค์ออกซาลेट ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม [49]

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ อัตราส่วนโมลาร์ระหว่างซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรตต่อกรดออกซาลิก 50:50 ความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่เหมาะสมคือ 0.1 โมลาร์ และอุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 20 ± 2 นาโนเมตร ยืนยันโดยการวิเคราะห์ XRD ซึ่งใกล้เคียงกับผลลัพท์ที่คาดการณ์ไว้ที่ 19.8 นาโนเมตร นอกจากนี้ภาพจาก TEM ยังแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยตามจริงอยู่ที่ประมาณ 13 ± 5 นาโนเมตร

2.5 เม็ดบิช

เม็ดบิช คือ เม็ดเจลที่มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยทั่วไปแล้วมีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรจนถึงเซนติเมตรหรือขนาดใหญ่ตามที่ต้องการ เม็ดบิชถูกนำไปใช้ประโยชน์มากมายหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร ทำเป็นขนม คุกกี้บิสกิต นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์ เช่น การนำเม็ดบิชมาพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ไบโอจินิกเอมีนในเนื้อเน่า [51] หรือใช้ในการวิเคราะห์ไนโตรตีในอาหาร [52] โดยที่นิยมใช้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์จะสังเคราะห์จากโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น โซเดียมอัลจิเนต คาราจีแนน และอะคริลามิด ซึ่งเป็นสารระบบคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยสายพอลิเมอร์เชิงเส้นหรือแบบกิ่งที่สามารถเกี่ยวข่องกันทั้งทาง

กายภาพและทางเคมี โดยมีน้ำหรือของเหลวปริมาณมากเป็นองค์ประกอบหลักไฮโดรเจลที่ใช้ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำเม็ดปืทสามารถสังเคราะห์ได้จากสารชนิดเดียวกันหรือสารชนิดต่างกันได้ และยังสามารถปรับคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ เม็ดปืทไฮโดรเจลนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถดูดซึมน้ำหรือของเหลวได้ดี นอกจากนี้เม็ดปืทยังสามารถใช้ในการปรับพื้นผิว การห่อหุ้มสารต่าง ๆ หรือการขนส่งยาเข้าสู่ร่างกายได้ โดยเม็ดปืทมีหลากหลายชนิดและเทคนิคในการผลิต ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการห่อหุ้ม ลักษณะของเม็ดปืทที่ต้องการ และรูปแบบการใช้งานต่าง ๆ [53]

2.5.1 ประเภทของเม็ดปืท [53]

เม็ดปืทสามารถจำแนกตามโครงสร้าง คุณสมบัติ และการใช้งาน โดยมีขนาดตั้งแต่ไมโครเมตร ไปจนถึงมิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน เม็ดปืทสามารถแบ่งออกโครงสร้างต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1.1 เม็ดปืทแบบแข็ง (Hard Beads)

เม็ดปืทแบบแข็งเป็นเม็ดปืททรงกลมตัน มีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรถึงเซนติเมตร พื้นผิวเรียบและแข็ง มีความทนทานสูงและไม่ยืดหยุ่น ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ต่อแรงกระแทกหรือการทำลาย เม็ดปืทประเภทนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ เม็ดปืทพลาสติกและเม็ดปืทไฮโดรเจล

1) เม็ดปืทพลาสติก เม็ดปืทพลาสติกมักทำจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอธิลีน (Polyethylene) หรือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและไม่สามารถดูดซึมน้ำได้ เม็ดปืทพลาสติกนิยมใช้ในการทำลูกปิดเครื่องประดับหรือวัสดุในภาคอุตสาหกรรม เช่น เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการผลิตตัวสุหรือการห่อหุ้มสารบางชนิดที่ต้องการป้องกันจากการทำลายหรือการถูกดูดซึม

2) เม็ดปืทไฮโดรเจล เม็ดปืทไฮโดรเจลแตกต่างจากเม็ดปืทพลาสติกตรงที่มันสามารถดูดซึมน้ำและมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นสูง เม็ดปืทไฮโดรเจลมักถูกขึ้นรูปจากโพลีเมอร์เชิงเส้นหรือแบบกิ่ง เช่น ไฮเดียมอัลจินต หรือพอลิอะคริลาไมด์ ซึ่งสามารถสร้างการจับตัวของสารละลายให้คงอยู่ภายในเจล โดยไม่ถูกปลดปล่อยออกมาเร็วเกินไป เม็ดปืทไฮโดรเจลได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยสารที่ห่อหุ้มอยู่ในอย่างช้า ๆ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น การห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหรือสารเคมีต่าง ๆ เพื่อการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ เช่น ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรมหรือการบำบัดของเสีย เม็ดปืทประเภทนี้ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดผลข้างเคียงจากการปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็วที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้

2.5.1.2 เม็ดปืทที่มีแกนกลางเป็นของเหลว (Liquid Core Beads)

เม็ดปืทที่มีแกนกลางเป็นของเหลว จะมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีผิวเรียบเนียนและมีลักษณะคล้ายเยลลี่ ซึ่งสามารถยืดหยุ่นได้ดีเมื่อสัมผัสจะรู้สึกเหมือนแผ่นเมมเบรนที่บางและยืดหยุ่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอก ตัวเม็ดบีทจะบรรจุน้ำหรือของเหลวไว้ภายในซึ่งเมื่อมีการเจาะที่เม็ดบีทจะทำให้ของเหลวที่ถูกห่อหุ้มไว้ออกมา เม็ดบีทประเภทนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำไข่มุกบ๊อบ เม็ดบีทที่มีแกนกลางเป็นน้ำจะถูกขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า รีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน (Reverse Spherification) เป็นการใช้โซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ ในการสร้างชั้นหุ้มสารที่อยู่ภายใน โดยมีกระบวนการคือเมื่อหยดสารละลายโซเดียมอัลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีประจุบวก จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Cross-link ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไอออนจับกับประจุลบบนหมู่คาร์บอกซิลิกของอัลจิเนต และเกิดชั้นเมมเบรนที่ห่อหุ้มสารละลายหรือของเหลวไว้

2.5.1.3 เม็ดบีทอิมัลชัน (Emulsion Beads)

เม็ดบีทอิมัลชันมีลักษณะคล้ายกับเม็ดบีทที่มีแกนกลางเป็นของเหลว แต่มีความแตกต่างตรงที่เม็ดบีทชนิดนี้มีลักษณะเป็นไมเซลล์ของของเหลวสองชนิดที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่น น้ำและน้ำมัน โดยจะใช้กระบวนการอิมัลชัน (Emulsification) เพื่อสร้างการกระจายของเหลวหนึ่งในอีกชนิดหนึ่ง เม็ดบีทอิมัลชันชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะในการผลิตเครื่องดื่มหรืออาหารหรือในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น การผลิตครีมหรือโลชั่น

2.5.2 กระบวนการขึ้นรูปเม็ดบีท

2.5.2.1 การพ่นฝอยอบแห้ง (Spray Drying)

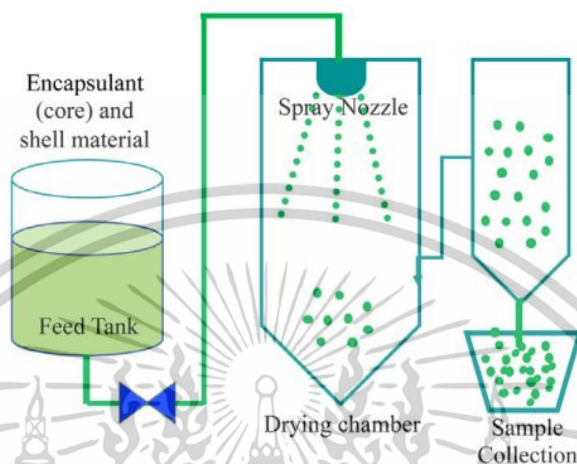
วิธีการพ่นฝอยอบแห้ง (Spray Drying) เป็นวิธีการแปรรูปในรูปแบบหนึ่ง หลักการใช้ความร้อนดึงน้ำออก ทำให้อาหารกลายเป็นผง นิยมใช้สำหรับสารประกอบที่ต้องการกักเก็บกลิ่นและรสชาติอาหาร โดยส่วนมากมักนิยมสร้างเม็ดบีทตั้งแต่อุณหภูมิไมโครเมตรไปจนถึงนาโนเมตร [53] เครื่องพ่นฝอยอบแห้งประกอบด้วย ตัวกรองอากาศ พัดลมเป่า ตัวให้ความร้อน บีม หัวสเปรย์ เครื่องแยกแบบลมหมุน และตู้ทำแห้ง โดยขั้นตอนการขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิคนี้คือ

- 1) พัดลมจะดูดอากาศผ่านตัวกรองเข้าไปในเครื่องพ่นฝอยอบแห้ง โดยตัวกรองจะทำหน้าที่กรองไม่ให้วัตถุอื่นปนเปื้อนเข้ามา จากนั้นอากาศที่ดูดเข้ามาจะถูกทำให้ร้อน ในเวลาเดียวกัน ที่อีกฝั่งของเครื่อง ถังเก็บวัตถุดิบก็จะมีทำให้ความร้อนกับวัตถุดิบเช่นกันเพื่อให้มันมีความหนืดลดลงจนบีมสามารถดูดเข้าเครื่องพ่นฝอยอบแห้งได้สะดวก

- 2) เมื่อวัตถุดิบมาถึงหัวสเปรย์แล้ว มันก็จะถูกพ่นเป็นละอองฝอยขนาดเล็ก ซึ่งหัวสเปรย์มี 2 ประเภทหลัก ได้แก่ หัวฉีดแบบ Rotary และ Nozzle การเลือกใช้งานหัวแบบไหนก็ต้องดูจากลักษณะวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่อยากจะได้ด้วย ทั้งรูปร่าง โครงสร้าง และขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การเจอกันระหว่างลมร้อนกับวัตถุดิบจะเกิดขึ้นในตู้อบแห้ง ซึ่งขนาดของผลิตภัณฑ์ก็ขึ้นอยู่กับเวลาในการให้ความร้อน เมื่อของเหลวกลายเป็นผงแห้งแล้วมันก็จะตกลงข้างล่างและเก็บเข้าถุงกรอง ส่วนวัตถุดิบที่ยังเป็นของเหลวอยู่ก็จะถูกแยกลอยขึ้นไปเจอกับลมร้อนในตู้อกอีกที [54]



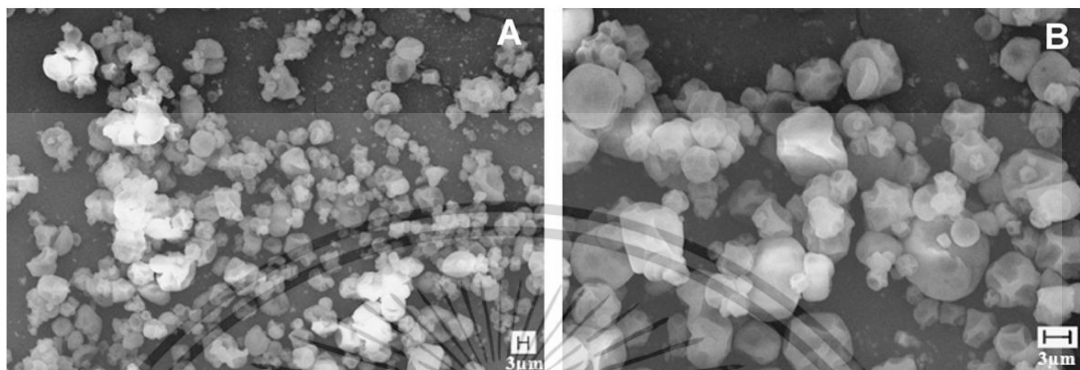
รูปที่ 2.27 การขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิคพ่นฝอยแบบอบแห้ง [53]

จากงานวิจัยของ C. Encina และคณะ [55] ได้ขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคพ่นฝอยอบแห้ง (Spray Drying) เพื่อการไมโครเอนแคปซูลชันของน้ำมันปลา โดยกระบวนการนี้ช่วยปกป้องน้ำมันปลาให้ทนทานต่อการออกซิเดชันและช่วยยืดอายุการเก็บรักษา พร้อมทั้งควบคุมการปลดปล่อยน้ำมันให้ช้าลง โดยการเตรียมอิมัลชันของน้ำมันปลาในน้ำ ซึ่งใช้สารเพิ่มความเสถียรอิมัลชัน เช่น โปรตีนจากนมหรือกัมอาราบิก เพื่อช่วยในการสร้างอิมัลชันที่มีขนาดหยดน้ำมันเล็กและเสถียร จากนั้นจะนำไปพ่นฝอยในกระบวนการอบแห้งเพื่อให้ได้เม็ดบีทที่มีลักษณะแข็งและสามารถเก็บรักษาได้ดี เม็ดบีทที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดบีททรงกลมตันแข็งและมีขนาดเล็ก มีผิวเรียบและทนทานต่อการแตกหัก เม็ดบีทเหล่านี้สามารถควบคุมการปลดปล่อยน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหรือผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้อย่างดี

จากงานวิจัยของ E.C. Frascareli และคณะ [56] ได้ขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคพ่นฝอยอบแห้ง (Spray Drying) เพื่อการไมโครเอนแคปซูลชันของน้ำมันกาแฟโดยกระบวนการนี้ช่วยปกป้องน้ำมันกาแฟจากการเกิดออกซิเดชันและช่วยยืดอายุการเก็บรักษา พร้อมทั้งควบคุมการปลดปล่อยน้ำมันให้ช้าลง โดยการเตรียมอิมัลชันของน้ำมันกาแฟในน้ำจะใช้กัมอาราบิกเป็นสารหล่อหุ้ม โดยกระบวนการนี้ช่วยให้สามารถสร้างอิมัลชันที่มีความเสถียรและมีขนาดหยดน้ำมันเล็ก เมื่อทำการพ่นฝอยในกระบวนการอบแห้งจะได้เม็ดบีทที่มีลักษณะแข็งและสามารถเก็บรักษาได้ดี โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพเร็วในระหว่างการเก็บรักษา ในการศึกษาผลของการทำงานในกระบวนการพ่นฝอยอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังพบว่า การตรวจสอบด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) ดังรูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นว่า เม็ดบีทที่ได้มีรูปร่างกลมและพื้นผิวหยาบเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการเกิดรูหรือรอยแตกบนผิวของเม็ดบีท จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการห่อหุ้มของกัมอาราบิกที่ใช้เป็นสารห่อหุ้มซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรในการเก็บรักษาเม็ดบีทให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.28 ภาพ SEM แสดงเม็ดบีทที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคพ่นฝอยแบบอบแห้ง [56]

ข้อดีของการพ่นฝอยอบแห้ง [53]

1) สามารถทำแห้งสำหรับวัตถุดิบที่เป็นของเหลวได้ดี กระบวนการพ่นฝอยอบแห้งสามารถเปลี่ยนวัตถุดิบที่เป็นของเหลว เช่น น้ำผลไม้ กาแฟ หรือเครื่องดื่มต่าง ๆ ให้เป็นผงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้กระบวนการระเหยที่รวดเร็ว ทำให้สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์เหล่านั้นให้เป็นผงที่มีความสะดวกในการเก็บรักษาและขนส่ง นอกจากนี้ยังสามารถรักษาคุณสมบัติทางโภชนาการและสารอาหารที่สำคัญในวัตถุดิบต้นฉบับได้ดีขึ้น เนื่องจากการระเหยทำได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้น

2) เหมาะสำหรับการทำผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องดื่ม น้ำผลไม้ กาแฟสำเร็จรูป กระบวนการนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตผงเครื่องดื่มต่าง ๆ เช่น น้ำผลไม้ผง กาแฟสำเร็จรูป หรือเครื่องดื่มประเภทอื่น ๆ ที่ต้องการการเก็บรักษาในรูปแบบผงแห้ง ซึ่งสามารถชงและดื่มได้ทันทีเมื่อละลายในน้ำ โดยที่ไม่ต้องกังวลเรื่องการสูญเสียคุณค่าโภชนาการในระหว่างกระบวนการผลิต

3) สามารถเติมน้ำร้อนหรือเย็นทานได้ทันที เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการพ่นฝอยอบแห้งเป็นผงแห้ง สามารถเติมน้ำร้อนหรือน้ำเย็นเพื่อดื่มได้ทันที การใช้งานจึงสะดวกและรวดเร็ว ทำให้เหมาะสำหรับการผลิตสินค้าที่ผู้บริโภคสามารถใช้ได้ทันทีหลังจากเติมน้ำโดยไม่ต้องเตรียมส่วนผสมหรือขั้นตอนเพิ่มเติม

4) การผลิตมีประสิทธิภาพสูง อัตราการผลิตคงที่ กระบวนการพ่นฝอยอบแห้งสามารถผลิตได้ในปริมาณมากและมีอัตราการผลิตที่คงที่ ทำให้สามารถผลิตสินค้าได้ในปริมาณมากภายในเวลาที่สั้น ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เช่น การผลิตอาหารหรือเครื่องดื่มบรรจุภัณฑ์ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของการพ่นฝอยอบแห้ง [53]

1) การเตรียมวัตถุดิบที่ค่อนข้างยุ่งยาก ทั้งปริมาณและความเข้มข้น การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการพ่นฝอยอบแห้งอาจเป็นเรื่องท้าทาย เพราะต้องมีการคำนวณปริมาณและความเข้มข้นของวัตถุดิบให้เหมาะสมกับกระบวนการอบแห้ง การปรับอัตราส่วนของวัตถุดิบให้เหมาะสมและการเตรียมความเข้มข้นที่ต้องการนั้นจะต้องใช้เวลาและมีความยุ่งยากในการควบคุมผลลัพธ์ที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน

2) เนื่องจากเป็นการทำระเหยอย่างรวดเร็วต้องโดนความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้คุณค่าทางสารอาหารเสียไป กระบวนการพ่นฝอยอบแห้งใช้ความร้อนสูงในการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารที่มีความไวต่อความร้อน เช่น วิตามินบางประเภท หรือสารต้านอนุมูลอิสระที่มีในอาหารบางชนิด การสัมผัสกับความร้อนในระยะเวลาอันสั้นก็สามารถทำให้สารอาหารเหล่านี้เสื่อมสภาพหรือสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงานได้

3) ต้องใช้สารบางชนิดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นและยึดเกาะของวัตถุดิบ ทำให้ได้วัตถุดิบผง 100% ในกระบวนการพ่นฝอยอบแห้ง การใช้ สารเติมเต็ม หรือสารที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นหรือยึดเกาะของวัตถุดิบมักเป็นสิ่งที่จำเป็น เช่น แป้ง หรือ สารให้ความหนืด เพื่อช่วยในการจับตัวของสารในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้ทำให้ ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ไม่สามารถเป็น 100% ของวัตถุดิบ ที่ต้องการได้ ซึ่งอาจทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น และอาจไม่ตอบโจทย์บางกรณีที่ต้องการรักษาความบริสุทธิ์หรือคุณสมบัติของวัตถุดิบอย่างครบถ้วน

2.5.2.2 โคอะเซอเวชันเชิงซ้อน (Complex Coacervation) [53, 57]

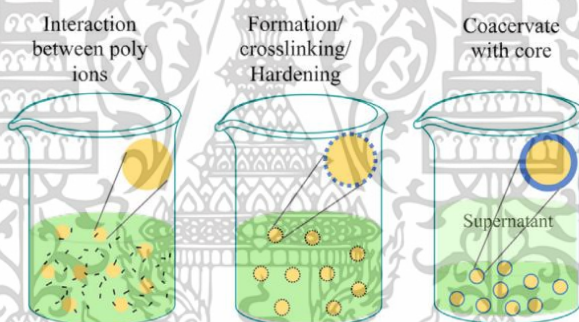
วิธีโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน (Complex Coacervation) เป็นวิธีการผลิตเม็ดบีดที่ใช้ในการกักเก็บสารสำคัญ โดยจะได้อนุภาคในขนาดไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ซึ่งเม็ดบีดที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมตันและแข็ง โดยมีการเคลือบผิวที่เรียบเนียนและมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ซึ่งเหมาะสมกับการเก็บสาระสำคัญต่าง ๆ เช่น น้ำมัน วิตามิน หรือสารอาหาร ให้ปลดปล่อยในเวลาที่ต้องการ เทคนิคนี้เป็นทางเลือกที่นิยมในอุตสาหกรรมยาและอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารที่ห่อหุ้มไว้ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีผลช่วยในด้านการยืดอายุการเก็บรักษาและการควบคุมอัตราการปลดปล่อยสารสำคัญตามความต้องการ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ถือเป็น วิธีที่มีต้นทุนในการผลิตสูง และการขึ้นรูปเม็ดบีดต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น pH และความแรงของไอออน ซึ่งมีผลต่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของเม็ดบีด นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ยากในการควบคุมขนาดของเม็ดบีดและป้องกันการรวมตัวของอนุภาค กระบวนการ Complex Coacervation จะเกิดขึ้นใน 3 ส่วนหลักที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ได้แก่ เฟสต่อเนื่อง (Continuous Phase), สารที่จะนำมาเอ็นแคปซูล (Core Material) และ เฟสของสารเคลือบ (Coating Material Phase) โดยหลักการของกระบวนการนี้จะใช้แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าตรงข้ามของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงซ้อนนี้จะไปดูดซับที่ผิวหรือห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายในเมตบิท และคุณสมบัติของเมตบิทในกระบวนการนี้สามารถปรับให้เหมาะสมได้ตามประเภทของสารเคลือบและสารแกนกลางที่ใช้ เพื่อให้ได้เมตบิทที่มีลักษณะตรงตามความต้องการในการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรม โดยขั้นตอนการทำ Complex Coacervation คือ

1) ควบคุมการผสมสารเคลือบ เพื่อให้สารเคลือบที่ใช้ (เช่น เจลาติน) เคลือบสารแกนกลาง (Core Material) ได้อย่างสม่ำเสมอ สารเคลือบจะดูดซับน้ำที่บริเวณผิวของสารแกนกลาง ทำให้เกิดการเคลือบที่แข็งแรงและมีความเสถียร

2) เติมสารอิเล็กโทรไลต์ การเติมสารอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในระบบจะทำให้เกิดการตกตะกอนของคอลลอยด์ที่เติมลงไป ซึ่งสารอิเล็กโทรไลต์จะจับกับสารเคลือบทำให้เกิดประจุเป็นกลาง ซึ่งช่วยให้ เกิดการเคลือบที่ผิวของสารแกนกลางอย่างมีประสิทธิภาพ

3) การเกิดไมโครแคปซูล กระบวนการนี้จะทำให้เกิดไมโครแคปซูลหรือเมตบิทขนาดเล็กที่มีลักษณะแข็งและตัน ซึ่งเป็นผลจากการเคลือบสารแกนกลางด้วยสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มและปกป้องสารสำคัญจากภายนอก



รูปที่ 2.29 การขึ้นรูปเมตบิทด้วยเทคนิคโคอะเซอเวชันเชิงซ้อน [53]

วิธี Complex Coacervation เป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร จากงานวิจัยของ J.K. Rutz และคณะ [58] ได้ทำการสังเคราะห์เมตบิทขนาดไมโครเมตรเพื่อกักเก็บน้ำมันปาล์ม โดยใช้วิธี Complex Coacervation ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการห่อหุ้มสารสำคัญเพื่อเพิ่มความเสถียร และควบคุมการปลดปล่อยสารในสภาวะต่าง ๆ โดยในการศึกษานี้ใช้ไคโตซาน (Chitosan) ร่วมกับแซนแทนกัม (Xanthan Gum) หรือเพกติน (Pectin) เป็นวัสดุในการห่อหุ้มน้ำมันปาล์ม

2.5.2.3 อิมัลซิฟิเคชัน (Emulsification)

เมตบิทอิมัลชันสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามลักษณะการกระจายของของเหลวที่ไม่สามารถผสมเข้าด้วยกัน ซึ่งทั้งนี้สามารถแบ่งได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil-in-Water หรือ O/W) ในระบบนี้หยดน้ำมันจะกระจายตัวในน้ำ ซึ่งน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Continuous Phase) ของระบบ โดยน้ำมันที่อยู่ในระบบนี้จะเป็นส่วนที่กระจายตัว (Dispersed Phase) ที่มีขนาดหยดเล็ก ๆ อยู่ในน้ำ

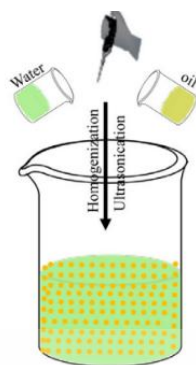
2) อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (Water-in-Oil หรือ W/O) ในระบบนี้หยดน้ำจะกระจายตัวในน้ำมัน ซึ่งน้ำมันจะเป็นตัวกลาง (Continuous Phase) โดยน้ำจะเป็นส่วนที่กระจายตัว (Dispersed Phase) ที่มีขนาดหยดเล็ก ๆ อยู่ในน้ำมัน

3) อิมัลชันแบบน้ำในน้ำ (Water-in-Water: W/W) ในระบบอิมัลชันแบบน้ำในน้ำ หยดน้ำจะกระจายตัวในน้ำ โดยที่ทั้งสองวัฏภาคเป็นน้ำ ซึ่งไม่สามารถผสมเข้าด้วยกันได้เนื่องจากการกระจายตัวของน้ำในน้ำมีการใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นโพลิเมอร์ หรือสารคอลลอยด์ที่สามารถทำให้เกิดการกระจายของของเหลวหนึ่งในอีกชนิดหนึ่ง ระบบนี้มักใช้ในกรณีที่ต้องการแยกหรือคุมส่วนผสมที่เป็นน้ำให้ไม่รวมตัวกัน โดยทั่วไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหรือยา เช่น ในการผลิต เจลหรือเจลาติน ที่ต้องการควบคุมความสามารถในการปลดปล่อยสารสำคัญภายใน

4) อิมัลชันแบบสองชั้น (Double Emulsion) อิมัลชันแบบสองชั้นเป็นระบบที่ประกอบด้วย สองชั้นตอนของการอิมัลชัน โดยมีการสร้าง อิมัลชันชนิดหนึ่ง ที่เป็น น้ำมันในน้ำ (O/W) หรือ น้ำในน้ำมัน (W/O) แล้วนำไปอิมัลชันอีกครั้งเพื่อให้ได้ สองชั้น ในเมดบิท ซึ่งตัวกลางจะเป็น น้ำ หรือ น้ำมัน ตามลำดับ อิมัลชันสองชั้นนี้มักใช้ในกรณีที่ต้องการ ควบคุมการปลดปล่อยสารในสองระยะ หรือ รักษาความเสถียรของสารที่มีความไวสูง เช่น สารอาหาร, ยา หรือ วิตามิน ที่ต้องการการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ การทำอิมัลชันสองชั้นจะช่วยให้สารที่อยู่ในแกนกลางของการอิมัลชันแรกถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ในระยะเวลาอันยาวนานขึ้น

5) อิมัลชันแบบผสม (Mixed Emulsion) อิมัลชันแบบผสมคือการใช้การผสมระหว่าง อิมัลชันชนิดต่าง ๆ เช่น O/W และ W/O ในการสร้างระบบที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่พบในอิมัลชันชนิดเดียว อิมัลชันแบบผสมนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการอิมัลชันสองชนิดถูกผสมเข้าด้วยกันในกระบวนการเดียว หรือใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การควบคุม pH หรือ การใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ที่หลากหลาย ระบบนี้เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น การควบคุมการปลดปล่อยสารในรูปแบบที่มีหลายขั้นตอนหรือการ ป้องกันการเสื่อมสภาพของสารที่ไวต่ออุณหภูมิ อิมัลชันแบบผสมมักใช้ใน การผลิต เครื่องสำอาง หรือ ผลิตภัณฑ์ยา ที่ต้องการความเสถียรในหลายสถานะของของเหลวภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 การขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิคอิมัลชัน [53]

ประเภทของเม็ดบีทอิมัลชัน [59]

1) การแยกชั้น (Sedimentation หรือ Creaming) การแยกชั้นเกิดขึ้นจากการที่แรงโน้มถ่วง ทำให้อนุภาคภายในและภายนอกของระบบอิมัลชันแยกตัวจากกัน ซึ่งมีลักษณะเป็นการตกตะกอน (Sedimentation) และการเกิดครีม (Creaming) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุภาคต่างๆ ในระบบอิมัลชัน

1.1 หากวัสดุภาคภายใน (เช่น น้ำมัน) มีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุภาคภายนอก (เช่น น้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้) จะทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ขึ้นไปข้างบน ซึ่งเรียกว่าการเกิดครีม (Creaming) ซึ่งมักพบในระบบอิมัลชันที่มีน้ำมันเป็นวัสดุภาคภายใน

1.2 แต่หากอนุภาคน้ำมันมีความหนาแน่นมากกว่าวัสดุภาคภายนอก เช่น ระบบที่น้ำมันมีความหนาแน่นสูงกว่า การตกตะกอน (Sedimentation) จะเกิดขึ้นโดยอนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ลงไปที่ด้านล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

2) การเกาะกลุ่มของอนุภาค (Flocculation) การเกาะกลุ่มของอนุภาคเกิดจากการชนกันและ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของอนุภาคในวัสดุภาคภายใน ซึ่งทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกัน เกิดเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การเกาะกลุ่มนี้อาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนหรือการแยกตัวตามแรงโน้มถ่วง เนื่องจากอนุภาคที่รวมตัวกันสามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของแรงโน้มถ่วงหรือแรงเชิงกลที่กระทำต่ออนุภาคการเกิดการเกาะกลุ่มอาจส่งผลให้เกิดการ รวมตัวเป็นกลุ่มใหญ่ ที่ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคในระบบอิมัลชันลดลง

3) ออสวาร์ดริพเพนนิ่ง (Ostwald Ripening) เป็นกระบวนการที่อนุภาคขนาดเล็กแพร่ไปยังอนุภาคขนาดใหญ่กว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 วิกฤตภายใน (เช่น น้ำมัน) มักมีความดันออสโมซิสซึ่งทำให้อนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

3.2 วิกฤตภายนอก (เช่น น้ำ) มีความดันของลาปลาซ ซึ่งทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ขยายตัว และอนุภาคขนาดเล็กหายไปโดยกลายเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

กระบวนการนี้จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กลดขนาดลง และอนุภาคขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในรูปร่างและขนาดของเม็ดบีดในระบบอิมัลชัน

4) การรวมตัวเกิดจากการที่อนุภาคคอลลอยด์ เช่น หยดน้ำมัน สองหยดมารวมกัน โดยการเกิด พลังงานเฉื่อยระหว่างหยดทั้งสองทำให้เกิดการรวมตัวกันและกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้มีลักษณะเมื่อหยดน้ำมัน 2 หยดมาเจอกันจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มที่ล้อมรอบวิกฤตภายนอก ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันเป็นหยดใหญ่ขึ้น การรวมตัวของหยดน้ำมันสามารถทำให้ การกระจายตัวของสารในระบบอิมัลชันลดลง และอาจทำให้เกิดการแยกตัวของสารในระบบอิมัลชัน หากกระบวนการนี้เกิดขึ้นมากเกินไป



รูปที่ 2.31 ประเภทของบีดอิมัลชัน [59]

2.5.2.4 สเฟียร์ริฟิเคชัน (Spherification)

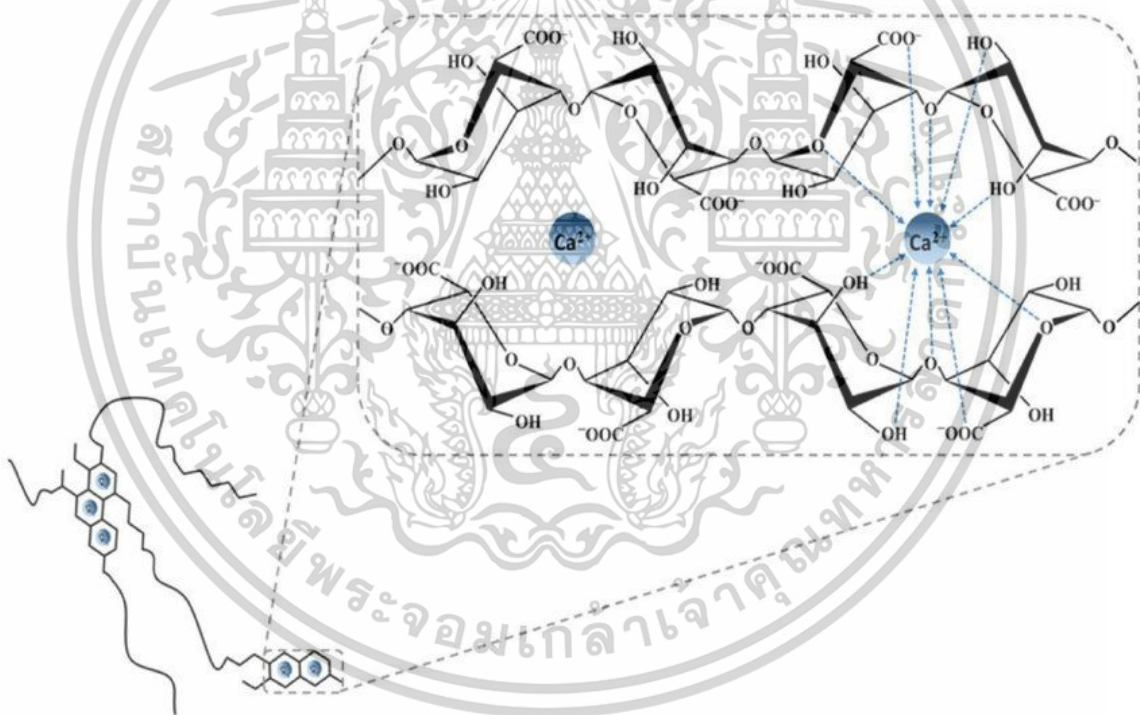
การขึ้นรูปเม็ดบีดโดยเทคนิคสเฟียร์ริฟิเคชันเป็นเทคนิคที่นิยมมาจากอุตสาหกรรม

อาหารและยา การขึ้นรูปเม็ดบีดโดยเทคนิคนี้จะได้เม็ดบีดที่มีรูปร่างเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดหยุ่น โดยบรรจุสารไว้ภายใน และห่อหุ้มด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจล ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์โดยการเกิด Cross-linking เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะความแข็งแรง เนื่องจากการเกิด Cross-linking ระหว่าง Ca^{2+} และหมู่คาร์บอกซิลิกของโซเดียมอัลจิเนต อัลจิเนตโพลีเมอร์ประกอบด้วยบล็อกที่ประกอบด้วยกรดยูโรนิค 2 ตัว และเฮเทอโรโพลีแซ็กคาไรด์ที่สร้างสายโซ่ 2 ตัวที่ประกอบด้วย 1,4-Linked- β -D-mannuronic (M) และ α -L-guluronic acid (G) ที่ต่อกันแบบ Homopolymer blocks (G-blocks หรือ M-blocks) และ Heteropolymer blocks (MG-blocks) โดย G-blocks [60, 61] สามารถจับกับประจุบวกของสารชนิดอื่นโดยเรียงความแรงในการจับจากมากไปน้อย ดังนี้ $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Ca} > \text{Co} = \text{Ni} = \text{Zn} > \text{Mn}$ [62] ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิลิก เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายเรียกว่า Egg Box Model หรือโครงสร้างแบบกล่องไข่ ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งเทคนิคนี้สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชันและรีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน [60]



รูปที่ 2.32 โครงสร้างแบบกล่องไข่ของแคลเซียมคลอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมอัลจิเนต [60]

1. การขึ้นรูปเม็ดปืทโดยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน (Basic Spherification)

เทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชันเป็นเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปเจลที่ภายในมีลักษณะเป็นเจลแข็งทั้งหมด ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เม็ดปืทที่ได้มีความยืดหยุ่นคล้ายเจลและมีรูปร่างทรงกลมตัน โดยขั้นตอนการขึ้นรูปจะเริ่มจากการผสมสารละลายโซเดียมอัลจิเนตลงในสารละลายที่เป็นเฟสน้ำที่

ต้องการห่อหุ้มหรือใช้เป็นเซ็นเซอร์ เช่น พอลิไดอะเซทิลีน เคอร์คูมิน หรืออาจเป็นน้ำหรือน้ำผลไม้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

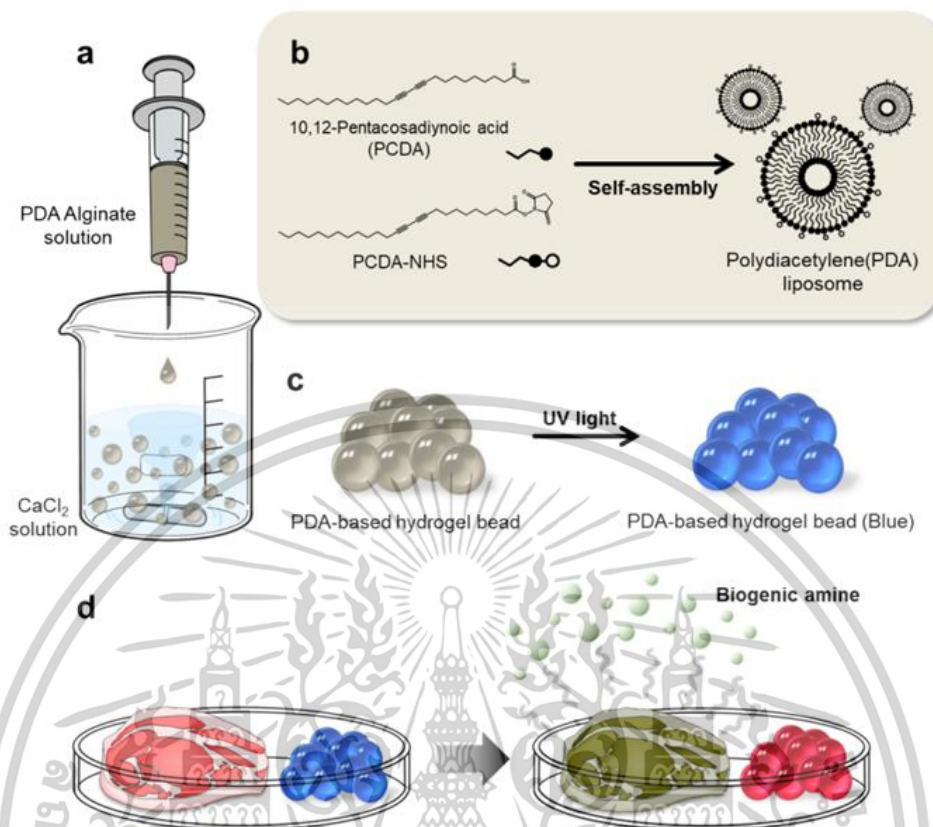
หรือสารที่ต้องการบรรจุในเม็ดบีด จากนั้นจะหยดสารผสมลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยให้ปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง การที่สารละลายโซเดียมอัลจินเตตกลงไปในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาข้ามพันธะ (Cross-linking) ระหว่าง ประจุบวกของแคลเซียม และ ประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลิก ในโครงสร้างของอัลจินเตเกิดขึ้น ทำให้เม็ดบีดที่ได้มีลักษณะเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งเม็ดบีดที่ได้ในตอนแรกจะยังเป็นสารละลายอยู่ภายใน แต่เมื่อทิ้งไว้ในน้ำที่ปราศจากไอออนหรือสารละลายที่ไม่มีแคลเซียม เม็ดบีดจะเกิดการแข็งตัวเป็นเจลโดยแคลเซียมจะซึมเข้าไปในเม็ดบีดทำให้เกิดการเกาะตัวของอัลจินเตจนได้เม็ดบีดที่แข็งทั้งภายในและภายนอกและมีรูปทรงกลม



รูปที่ 2.33 การขึ้นรูปเม็ดบีดด้วยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน

จากงานวิจัยของ S. Jang และคณะ [51] ได้ทำการขึ้นรูปเม็ดบีดโดยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน โดยภายในบรรจุพอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไบโอจีนิกเอมีน (Biogenic amines) ในเนื้อเน่าโดยเม็ดบีดที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นเม็ดบีดทรงกลมและภายในเม็ดบีดจะมีลักษณะเป็นเจลแข็งทั้งหมด ในการทดลองนี้เม็ดบีดที่บรรจุพอลิไดอะเซทิลีนถูกนำไปวางไว้กับเนื้อสัตว์ ซึ่งเมื่อเนื้อสัตว์เริ่มเน่าเสียจะมีการปลดปล่อยไบโอจีนิกเอมีน ซึ่งเมื่อไบโอจีนิกเอมีนเข้าสู่เม็ดบีดจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง ดังรูปที่ 2.34 โดยการเปลี่ยนสีนี้เกิดจากการตอบสนองของพอลิไดอะเซทิลีนกับไบโอจีนิกเอมีนเม็ดบีดนี้ถือเป็นเซ็นเซอร์สีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเน่าเสียของเนื้อสัตว์ โดยสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อตรวจสอบความสดของเนื้อสัตว์และช่วยในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ในการจัดเก็บและกระจายสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

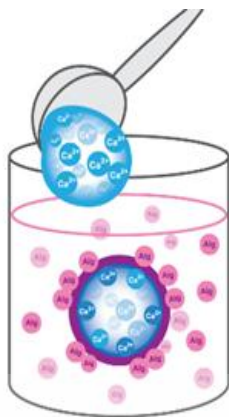


รูปที่ 2.34 เม็ดบีทที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชันและนำมาใช้ในการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ไบโอจินิกเอมีนในเนื้อเน่า [51]

2. การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน (Reverse Spherification)

เทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดบีทที่มีของเหลวบรรจุอยู่ภายใน โดยการควบคุมให้ของเหลวในแกนกลางยังคงสถานะเป็นของเหลว ซึ่งกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการห่อหุ้มน้ำผลไม้หรือสารที่ไวต่อการสัมผัสกับความร้อน เพื่อให้สามารถเก็บรักษาความสดและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ หรือที่เรียกว่าไข่มุกบีทขึ้นรูป ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากการผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ลงในสารละลายที่เป็นเฟสของน้ำที่ต้องการบรรจุในเม็ดบีทไม่ว่าจะเป็นสารที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์หรือรวมไปถึงน้ำผลไม้ต่าง ๆ หลังจากนั้นสารละลายนี้จะถูกหยดลงในสารละลายโซเดียมอัลจินेटโดยการปั่นกววนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ เพื่อให้เกิดการห่อหุ้มตัวกลางที่ต้องการเก็บภายในเม็ดบีทซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้จะเกิดแผ่นเมมเบรนที่ห่อหุ้มสารที่เป็นของเหลวภายในไว้ ผลที่ได้จากกระบวนการนี้คือเม็ดบีทที่ภายนอกขึ้นรูปเป็นทรงกลม มีผิวแข็งแต่สามารถยืดหยุ่นและภายในยังคงเป็นของเหลวซึ่งเม็ดบีทจะมีความเปราะบางและไม่สามารถสัมผัสหรือหยิบขึ้นมาได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 การขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิครีเวิร์สเฟอริฟิเคชัน

จากงานวิจัยของ F.H. Tsai และคณะ [63] ได้ทำการขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิครีเวิร์สเฟอริฟิเคชันโดยภายในบรรจุสารสกัดจากใบบุก (Burdock Leaf Extract) ซึ่งมีกรดคลอโรจินิก (Chlorogenic acid) เพื่อใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยสารโดยเม็ดบีทที่มีลักษณะเป็นเม็ดบีททรงกลมภายในมีสารที่ยังคงสถานะเป็นของเหลวในการทดลองนี้เม็ดบีทที่บรรจุสารสกัดจากใบบุกถูกนำไปวางไว้ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดการแข็งตัวของเม็ดบีททั้งนี้เม็ดบีทมีลักษณะเปราะบางด้านนอกแต่ภายในยังคงเป็นของเหลว เม็ดบีทเหล่านี้สามารถใช้ในการตรวจสอบการปลดปล่อยกรดคลอโรจินิก ซึ่งกรดคลอโรจินิกจะถูกปลดปล่อยออกมาจากเม็ดบีทเมื่ออยู่สารละลายที่จำลองเป็นน้ำย่อยในการย่อยในทางเดินอาหารโดยมีการสร้างเม็ดบีทถึง 2 ชั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดการบวมตัวของเม็ดบีทเพื่อให้เม็ดบีทมีความเสถียรและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างของการขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคต่าง ๆ

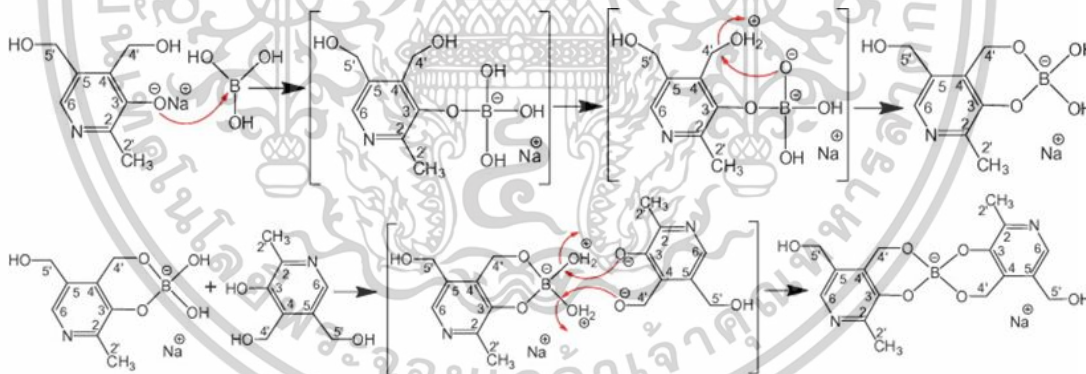
เทคนิคการขึ้นรูป	ประเภทของเม็ดบีท
1. การพ่นฝอยอบแห้ง	เม็ดบีทแบบแข็ง
2. โคอะเซเวชันเชิงซ้อน	เม็ดบีทแบบแข็ง
3. อิมัลซิฟิเคชัน	เม็ดบีทอิมัลชัน
4. สเฟอริฟิเคชัน	
4.1 เบล็กเฟอริฟิเคชัน	เม็ดบีทแบบแข็ง
4.2 รีเวิร์สเฟอริฟิเคชัน	เม็ดบีทที่มีแกนกลางเป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

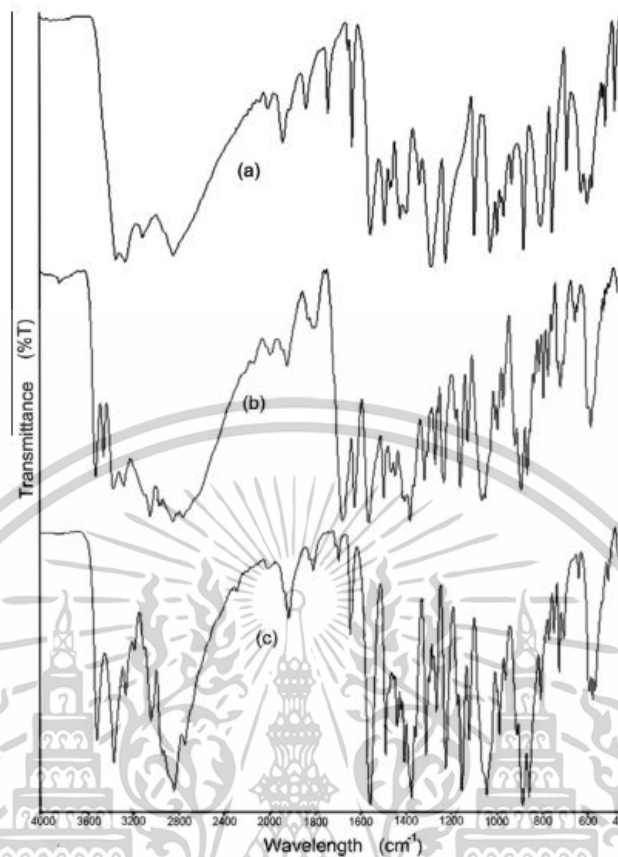
2.6.1 การเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกกับไทอามีน (วิตามินบี1) และ ไพริดอกซีน (วิตามินบี6) Boric acid complexes with Thiamine (vitamin B1) and Pyridoxine (Vitamin B6) [64]

จากงานวิจัยของ D.A. Kose และคณะได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกกับไทอามีน (วิตามินบี1) และ ไพริดอกซีน (วิตามินบี6) โดยยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FTIR และ Thermal methods กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 โดยเกิด Mono-chelate $\text{Na}[\text{B}(\text{HP})(\text{OH})_2]$ และ Bis-chelate $\text{Na}[\text{B}(\text{HP})_2]$ กับไพริดอกซีน แสดงดังรูปที่ 2.36 ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ยืนยันโดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) แสดงดังรูปที่ 2.37 จากรูปแสดงสเปกตรัม FTIR ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ H_3P อิสระ จากสเปกตรัมการสั่นที่ $3600\text{--}2600\text{ cm}^{-1}$ เกิดความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดย FTIR ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไพริดอกซีนและกรดบอริก ไม่ปรากฏแถบยืดของ O-H จากหมู่ฟังก์ชันของฟีนอลิก และแอลกอฮอล์ ($3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$) อีกทั้งการสั่นแบบยืดของ C-H ในอะโรมาติก ($3100\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) และอะลิฟาติก ($2960\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$) ก็มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเช่นกัน ไพริดอกซีนปรากฏพิทการสั่นของ C=C/C=N ที่ย่านประมาณ $1,545\text{ cm}^{-1}$ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อน



รูปที่ 2.36 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 [64]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

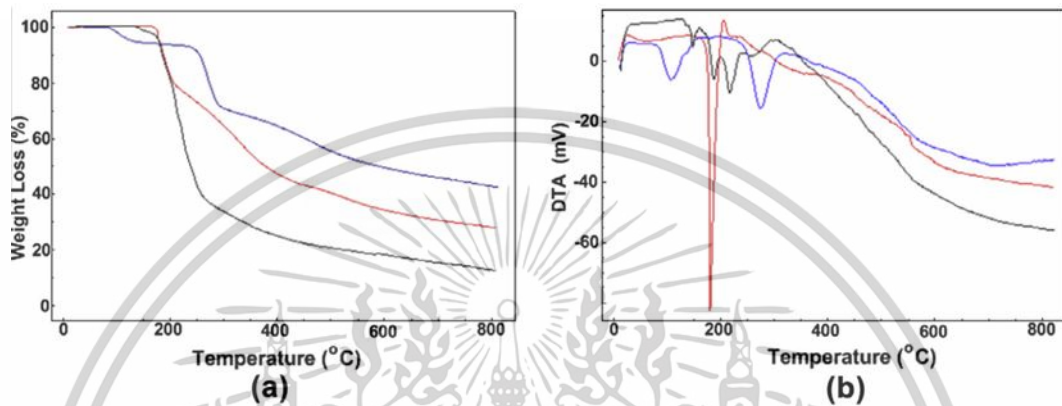


รูปที่ 2.37 สเปกตรัม FTIR ของ (a) $H_3P HCl$, (b) $Na[B(HP)(OH)_2]$ และ (c) $Na[B(HP)_2]$ [64]

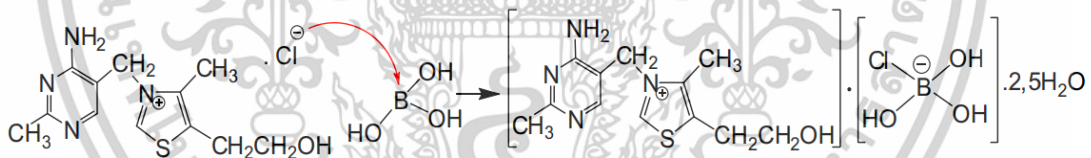
ตรวจสอบความคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA) และเทคนิค Double Tax Agreement (DTA) ดังรูปที่ 2.38 ตำแหน่งการสลายตัวขั้นตอนเดียวที่สังเกตได้สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนโมโน-คีเลตที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 130 องศาเซลเซียส) เกิดจากการกำจัดน้ำออกจากทรงกลมประสานงานของมอยอิตีเตตราฮีดรอลบอเรต (การสูญเสียมวลที่สังเกตได้: 6.9%; คำนวณ: 7.6%) จากนั้นการเสื่อมสลายของลิแกนด์เริ่มต้นที่ประมาณ 225 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยค่าพีคของ DTA ดูดความร้อนที่ 280 องศาเซลเซียส คอมเพล็กซ์ Bis-chelate แสดงการสลายตัวหลายขั้นตอนในช่วง 170–300 องศาเซลเซียส เส้นโค้ง TGA ของสารประกอบเชิงซ้อนทั้งสองแสดงการสูญเสียมวลอย่างรวดเร็วอย่างต่อเนื่องจนถึง 600 องศาเซลเซียส โดยเหลือคาร์บอนไฟโรไลติกสีเทาอมดำในถ้วยใส่ตัวอย่างที่สะสมอยู่บนผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของบอเรตที่เป็นโลหะ/โบรอนออกไซด์ ตามที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของกรดบอริกที่คล้ายกัน จากจุดเริ่มต้นของการสูญเสียมวลในกราฟ TGA สามารถอนุมานได้ว่าความเสถียรทางความร้อนของ $Na[B(HP)(OH)_2]$ น้อยกว่าของ $Na[B(HP)_2]$ ซึ่งสอดคล้องกับบางงานวิจัยที่ว่า Bis-chelate ของโบรอนมีความเสถียรมากกว่าอย่างไรก็ตาม การตรวจสอบ TGA สามารถบ่งชี้ได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของ $Na[B(HP)_2]$ อยู่ที่ประมาณ ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ H_3P ความคงตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าของสารประกอบเชิงซ้อน Mono-chelate อาจเกิดจากการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงในผลึกไพริดอกซิน ไฮโดรคลอไรด์ บนสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดบอริก นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางเคมีและสเปกตรัมระบุให้เห็นว่าระหว่างไทอามีน (วิตามินบี1) และโบรอนไม่เกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.39 ในขณะที่โบรอนเกิด Mono และ Bis-chelate กับไพริดอกซิน (วิตามินบี6)



รูปที่ 2.38 (a) TGA (b) DTA curves of Pyridoxine (-), $Na[B(HP)(OH)_2]$ (-) and $Na[B(HP)_2]$ (-). [64]



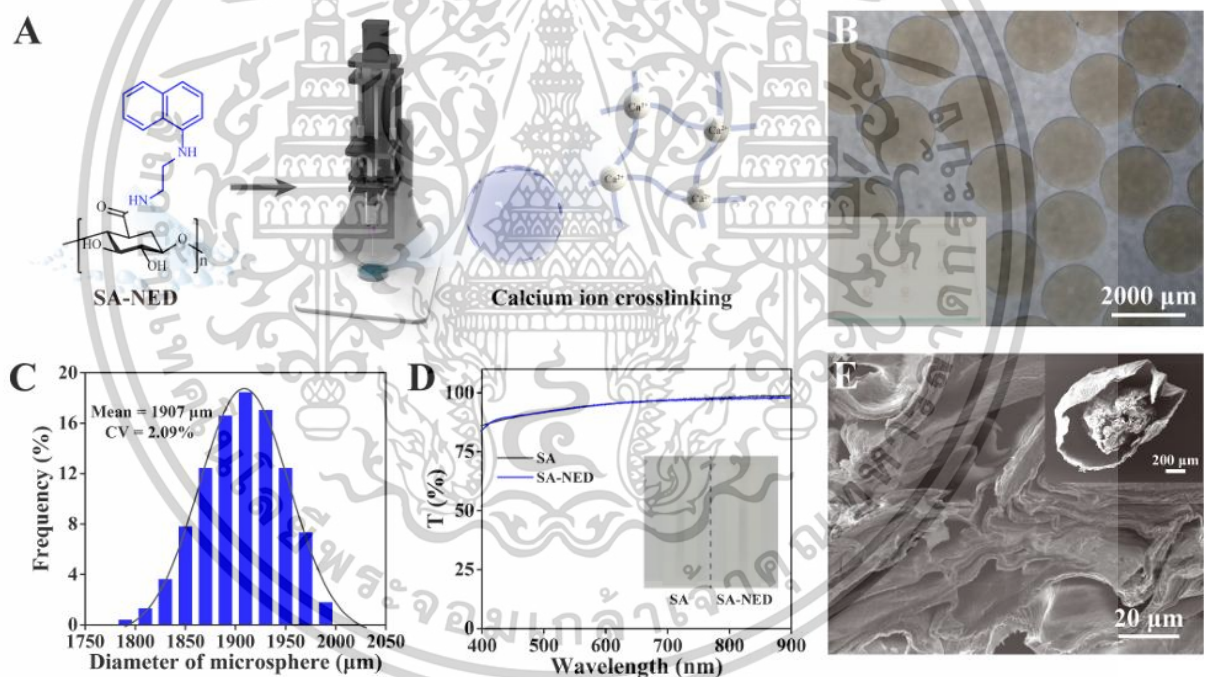
รูปที่ 2.39 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างกรดบอริกและไทอามีน (วิตามินบี1) [64]

2.6.2 การประยุกต์ใช้เม็ดบีดในการวิเคราะห์ทางเคมี

2.8.2.1 เซ็นเซอร์แบบพกพาที่ใช้ไฮโดรเจลไมโครสเฟียร์สำหรับการตรวจจับสีไนไตรต์ในอาหารที่มีผลก่่าจัดอิทธิพลของเมทริกซ์ Hydrogel Microsphere-Based Portable Sensor for Colorimetric Detection of Nitrite in Food with Matrix Influence-Eliminated Effect [52]

จากงานวิจัยของ Shuai Liu และคณะ ทำการสังเคราะห์เม็ดบีดโดยใช้ไฮเดินมอลลิเนต (SA) และ N-(1 Naphthyl)-ethylenediamine-dihydrochloride (NED) หรือเรียกว่าเม็ดบีด SA-NED โดยเม็ดบีดจะทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคสเฟกสเฟียร์ลิเทชัน โดยเริ่มจากการผสมสาร SA-NED เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นสารผสมดังกล่าวจะถูกหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (รูปที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.47) เม็ดบิที่ที่ได้จะมีลักษณะเป็น เม็ดทรงกลมตัน โดยมีพื้นผิวเรียบและเกิดการแข็งตัวเป็นเจลทั้งเม็ด (รูปที่ 2.40) เม็ดบิที่สังเคราะห์นี้จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ไนโตรเจนในอาหาร ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่าย จากผลการศึกษาพบว่าเม็ดบิที่ได้มีการกระจายตัวอย่างดีและสามารถรักษาความสมบูรณ์ของรูปร่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเม็ดบิ SA-NED มีขนาดที่สม่ำเสมอและมีการกระจายขนาดของเม็ดบิที่ดี จากรูปที่ 2.40C ผลการศึกษาแสดงว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดบิอยู่ในช่วง 1794 ถึง 1994 ไมโครเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1907 ไมโครเมตรและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของขนาด (CV) เท่ากับ 2.09% รูปที่ 2.40D แสดงค่าการดูดกลืนแสงของ SA-NED และ SA จากกราฟจะพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของเม็ดบิ SA-NED และ SA ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในรูปที่ 2.47E แสดงโครงสร้างของผนังเม็ดบิที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการใช้ภาพ SEM จากภาพแสดงให้เห็นว่าเม็ดบิที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างแผ่นซ้อนกันหลายชั้น ซึ่งลักษณะนี้บ่งชี้ถึงความสำเร็จในการ เตรียมเม็ดบิ SA-NED อย่างมีประสิทธิภาพ

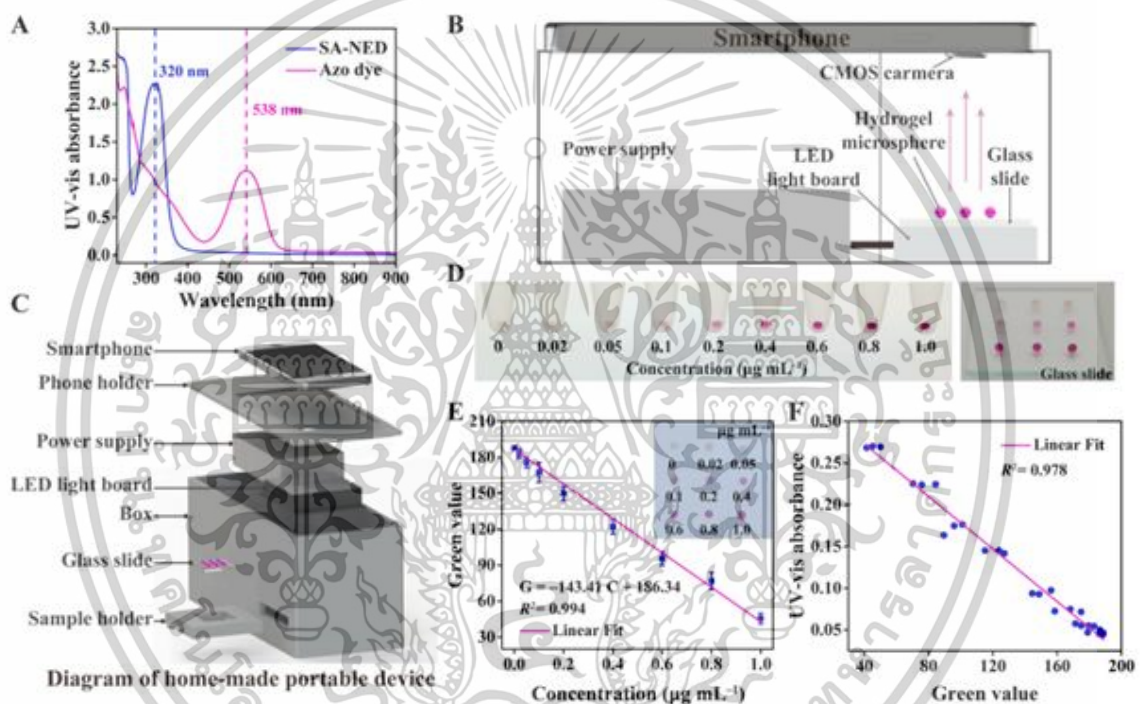


รูปที่ 2.40 (A) การสังเคราะห์เม็ดบิ SA-NED (B) ภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเม็ดบิ SA-NED ที่สร้างขึ้น (C) การกระจายขนาดของไมโครสเฟียร์ SA-NED (D) สเปกตรัมการส่งผ่านของแผ่นไฮโดรเจล SA และ SA-NED ไฮโดรเจล (E) ภาพ SEM ของไมโครสเฟียร์ SA-NED [52]

ความสามารถของไมโครสเฟียร์ SA-NED ในวิเคราะห์ปริมาณ NO_2^- โดยดูจากสีที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.41A จากกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาว 538 นาโนเมตร สามารถใช้หาปริมาณ NO_2^- ได้ นอกจากนี้ยังสามารถวัดปริมาณ NO_2^- ได้จากแอปพลิเคชันวิเคราะห์สี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโทรศัพท์ ซึ่งสามารถวัดอย่างรวดเร็ว พกพาง่าย ความสะดวกในการใช้งาน และต้นทุนต่ำ ใน การศึกษานี้ทำการประดิษฐ์อุปกรณ์พกพาเพื่อบันทึกภาพของไมโครสเฟียร์ โดยการออกแบบอุปกรณ์ พกพาจะแสดงในรูปที่ 2.41B อุปกรณ์ประกอบด้วยสมาร์ตโฟน กระดานสีขา และหลอดไฟLED (รูป ที่ 2.41C) วางไมโครสเฟียร์และเปิดไฟ LED จากนั้นใช้ สมาร์ตโฟนถ่ายภาพวิเคราะห์สีของไมโครสเฟียร์ ซึ่งวิธีนี้ถือเป็นวิธีที่ง่ายในการวิเคราะห์ NO_2^-

จากรูปที่ 2.41D แสดงความเข้มของสีของไมโครสเฟียร์ SA-NED จากรูปแสดงให้เห็นว่ามี ความเข้มขึ้นตามความเข้มข้นของ NO_2^- ตั้งแต่ 0 ถึง 1.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร กราฟฐานแสดงในรูปที่ 2.40E โดยที่ค่าสีเขียวของภาพไมโครสเฟียร์แสดงความเป็นเส้นตรงที่ดี ($R^2 = 0.9940$) และ ขีดจำกัดการ วิเคราะห์ (LOD) คือ 0.02 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร



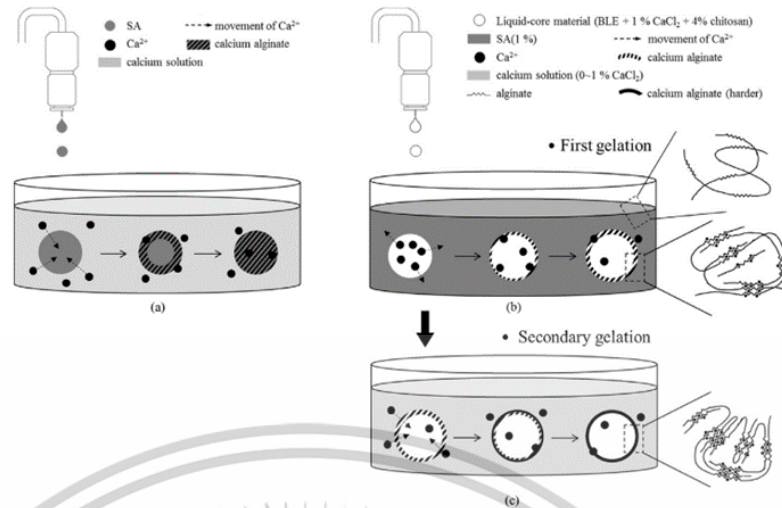
รูปที่ 2.41 (A) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ SA-NED และสีย้อม azo หลังจากปฏิกิริยาระหว่าง SA-NED และ NO_2^- (B) ภาพประกอบอุปกรณ์พกพาที่ใช้สมาร์ตโฟนสำหรับบันทึกความเข้มของสี (C) โครงสร้างของอุปกรณ์พกพาที่ใช้สมาร์ตโฟน (D) รูปถ่ายของไมโครสเฟียร์ SA-NED หลังจากทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ NO_2^- (E) ค่า G และ NO_2^- ความเข้มขึ้นแสดงกราฟการเปรียบเทียบในช่วง 0 – 1.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$ ($n = 3$) ภาพแทรกถูกถ่ายจากอุปกรณ์พกพา (F) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G ของไมโครสเฟียร์ SA-NED และการดูดซับรังสียูวีโดยการวิเคราะห์สีในสารละลายที่เป็นน้ำ [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.2 การผลิตเม็ดบีทไฮโดรเจลแกนเหลวโดยรีเวิร์สสเฟียร์ฟิเคชัน: ผลกระทบของการเกิดเจลทุติยภูมิต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการปลดปล่อยลักษณะเฉพาะ Producing Liquid-Core Hydrogel Beads by Reverse Spherification: Effect of Secondary Gelation on Physical Properties and Release Characteristics [63]

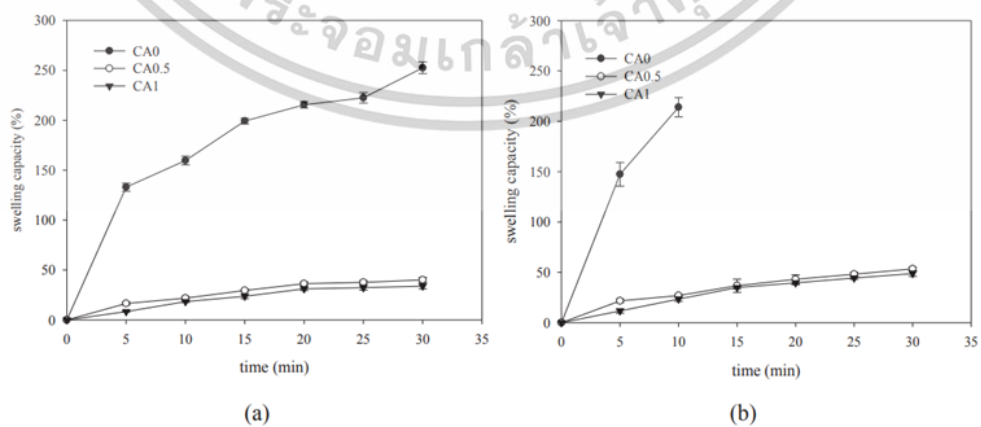
ในงานวิจัยของ F.H. Tsai และคณะ ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเม็ดบีทแกนเหลวจากสารสกัดจากใบหญ้าเจ้าชู้โดยใช้เทคนิค Reverse Spherification ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างเม็ดไฮโดรเจลที่มีสารภายในเป็นของเหลว เม็ดบีทที่ได้จะถูกใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยสารสำคัญในระบบทางเดินอาหาร ในการศึกษาที่สารสกัดจากใบหญ้าเจ้าชู้จะถูกผสมกับแคลเซียมไอออน จากแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แล้วนำไปทิ้งลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate) เพื่อสร้างเม็ดบีทไฮโดรเจลแกนของเหลว (LHB) โดยในขั้นตอนแรก การขึ้นรูปเม็ดบีทเริ่มจากการเตรียมสารสกัดจากใบหญ้าเจ้าชู้ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ในความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0, 0.5 และ 1.0 กรัม/100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปหยดลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1 กรัม/100 มิลลิลิตร แล้วใช้เครื่องกำเนิดบีทโคแอกเซียล (Unit-Varj1, Nisco Engineering AG, Switzerland) ปั่นกวนที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเม็ดบีทจะถูกกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% ตามลำดับ และทิ้งไว้ให้เจลเซตตัวเป็นเวลา 5 นาที ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการสร้าง เมมเบรนชั้นที่ 2 เพื่อหุ้มเม็ดบีท โดยการนำเม็ดบีทที่ได้จากขั้นตอนแรกไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ เช่นเดียวกับขั้นตอนแรก (0, 0.5 และ 1.0 กรัม/100 มล.) เม็ดบีทที่ได้จะถูกกรองและล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล 95% ตามลำดับ (รูปที่ 2.42) และเตรียมเม็ดบีทให้พร้อมใช้งานในการทดลองต่าง ๆ การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมในกระบวนการขึ้นรูปเม็ดบีทในด้านต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการอมน้ำ ความแข็งแรงของโครงสร้าง จลนศาสตร์ และกลไกการปลดปล่อยสารจากเม็ดบีทในระหว่างการจำลองการย่อยในทางเดินอาหารที่มีการใช้ความร้อน โดยใช้หลอดทดลองในการศึกษาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 กระบวนการขึ้นรูปเม็ดบีด [63]

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติการอมน้ำของเม็ดบีด (Swelling capacity, SC) รูปที่ 2.43 a และ b แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ เม็ดบีดจะมีสมบัติในการอมน้ำลดลง ซึ่งคุณสมบัติการอมน้ำของเม็ดบีดบ่งบอกถึงความแข็งแรงของผนังหุ้มบีด และมีความเกี่ยวข้องกับการมีแรงดันออสโมติกระหว่างเม็ดบีดและสิ่งแวดล้อม เม็ดบีดที่มีค่าความอมน้ำมากคือสามารถดูดซับน้ำได้มากส่งผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลเปราะบางลง ความแข็งแรงของเม็ดบีดก็จะลดลงตามไปด้วย ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารละลายออกมาจากเม็ดบีดได้ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ายังมีค่าความอมน้ำมากผนังของเม็ดบีดจะยังมีความแข็งแรงน้อย อย่างไรก็ตามตามความร้อนก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความอมน้ำของเม็ดบีด จากรูป 2.43 a และ b จะเห็นว่าที่ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เม็ดบีดมีความอมน้ำน้อยกว่าที่ 100 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความร้อนก็จะเป็นการเพิ่มความอมน้ำของเม็ดบีด ทำให้ผนังหุ้มของเม็ดบีดมีความแข็งแรงลดลงตามไปด้วย

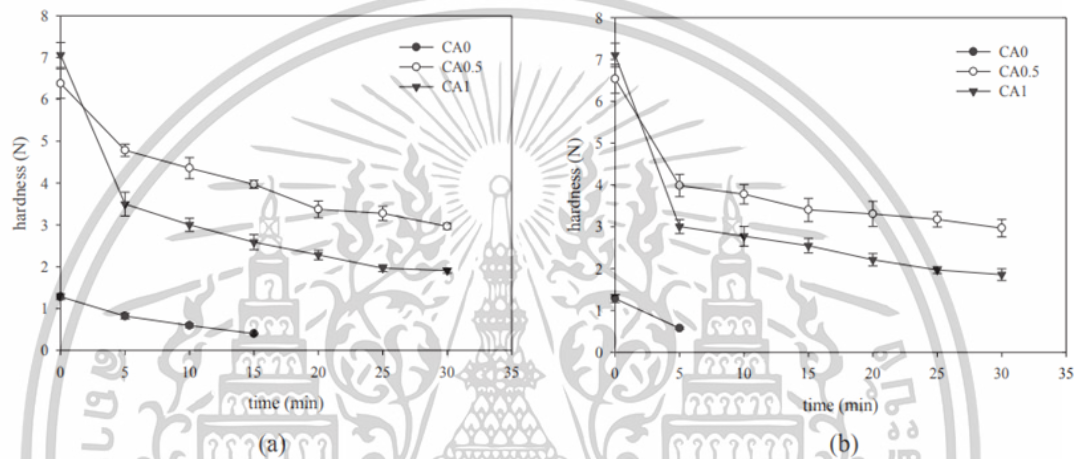


รูปที่ 2.43 ความสามารถในการอมน้ำเม็ดบีด ในระหว่างเก็บภายใต้ความร้อน (a) 90 องศาเซลเซียส

(b) 100 องศาเซลเซียส [63]

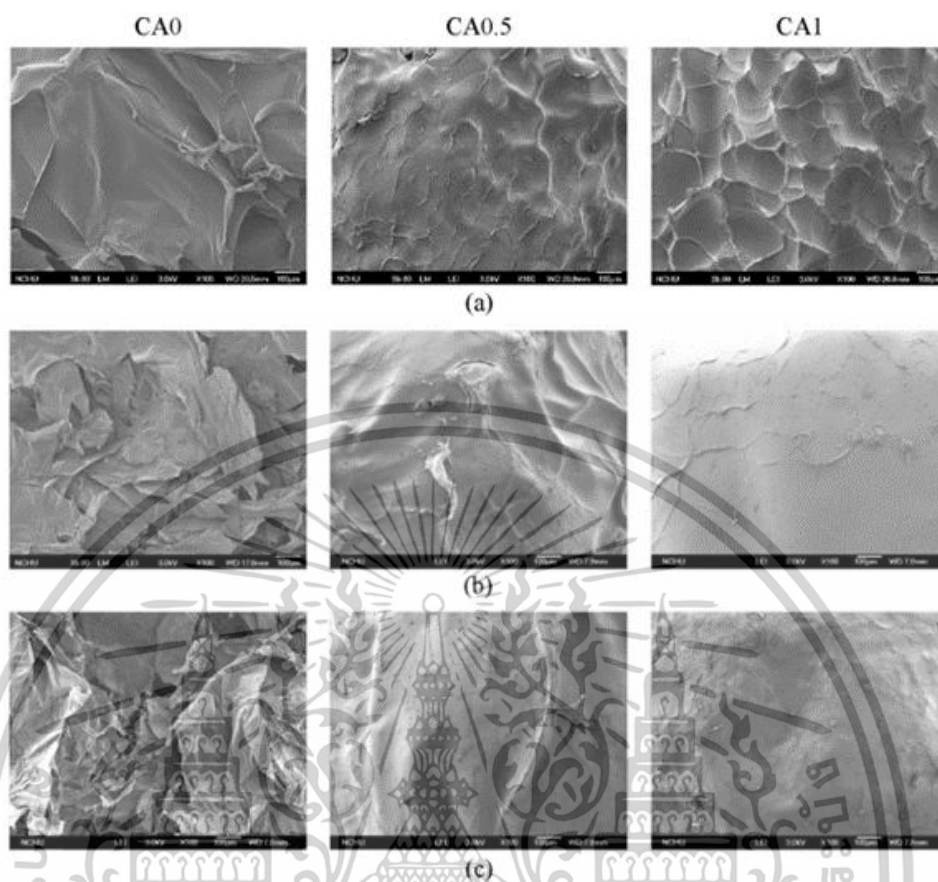
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งของเม็ดบีด เมื่อมีค่าความแข็งต่ำจะทำให้เม็ดบีดแตกง่ายในระหว่างนั้น การประมวลผลและการเก็บรักษา ดังรูปที่ 2.44 แสดงความแข็งของเม็ดบีด ในระหว่างถูกเก็บในความร้อน จากรูปที่ 2.43a จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส CA0 สลายตัวไม่สามารถตรวจจับได้หลังจากผ่านไป 15 นาที CA0.5 และ CA1 มีความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก จากนั้นความแข็งจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ในรูปที่ 2.44b คือการเก็บเม็ดบีดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากกราฟแสดงให้เห็นว่าความแข็งของเม็ดบีด ลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1.28 นิวตัน เป็น 0.58 นิวตัน ใน 5 นาทีแรก และมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของการรักษาความร้อนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งของเม็ดบีดลดลง



รูปที่ 2.44 ความแข็งแรงของเม็ดบีดในระหว่างเก็บเม็ดบีดในความร้อน (a) 90 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส [63]

การศึกษาพื้นผิวของเม็ดบีด ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ของพื้นผิวของเม็ดบีดก่อนเก็บภายใต้ความร้อน (รูปที่ 2.45a) CA0 แสดงโครงสร้างเป็นเกล็ดที่มีความบางเป็นแผ่น สำหรับพื้นผิว CA0.5 และ CA1 มีลักษณะขรุขระเกิดขึ้น โดยโครงสร้าง CA1 ลักษณะที่มีความขรุขระชัดเจนมากกว่า CA0.5 หลังจากการเก็บภายใต้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที (รูปที่ 2.48b และ c) พบการขาดของพื้นผิวของชิ้นงาน ในตัวอย่าง CA0 ซึ่งเห็นว่าชิ้นงานถูกทำลายด้วยความร้อนอย่างชัดเจน แต่ที่ CA0.5 และ CA1 พื้นผิวมีลักษณะเรียบเนียนขึ้นหลังการเก็บในความร้อน ส่งผลให้เห็นว่าเม็ดบีดเกิดการอมน้ำหรือการดูดซับน้ำมากขึ้นซึ่งทำให้พื้นผิวมีความเรียบเนียนมากขึ้น



รูปที่ 2.45 โครงสร้างของเม็ดพีทในการเก็บในความร้อน (a) ก่อนเก็บในความร้อน (b) 90 องศาเซลเซียส (c) 100 องศาเซลเซียส [63]

2.6.2.3 การเกิดเจลระหว่างอัลจินตและไอออน Ions-Induced Gelation of Alginate: Mechanisms and Applications [65]

C. Hu และคณะ ทำการศึกษาการขึ้นเจลโดยอัลจินตและไอออนต่าง ๆ ที่มีประจุบวก โดยอัลจินตสามารถเกิดเจลร่วมกับไอออนที่มีประจุบวกทั้งแบบ Monovalent Divalent และ Trivalent cations ซึ่งอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากไอออนที่มีประจุบวกแต่ละชนิดจะมี คุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ H^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Cu^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} (ตารางที่ 2.8) และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน เช่น อัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ Ca^{2+} (Ca-Alginate Gels) เหมาะสมที่จะนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตผลไม้ขึ้นรูป เนื้อสัตว์ขึ้นรูป โยเกิร์ต เยลลี่ และน้ำสลัด เป็นต้น ส่วนอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ Ba^{2+} (Ba-alginate gels) นั้น มีความปลอดภัยในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา และอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ Sr^{2+} (Sr-Alginate Gels) เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวัสดุชีวภาพในการสร้างกระดูก การเพิ่มจำนวนหรือปลูกถ่ายเซลล์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 การศึกษาการขึ้นเจลระหว่างอัลจินตและไอออนต่าง ๆ ที่มีประจุบวก

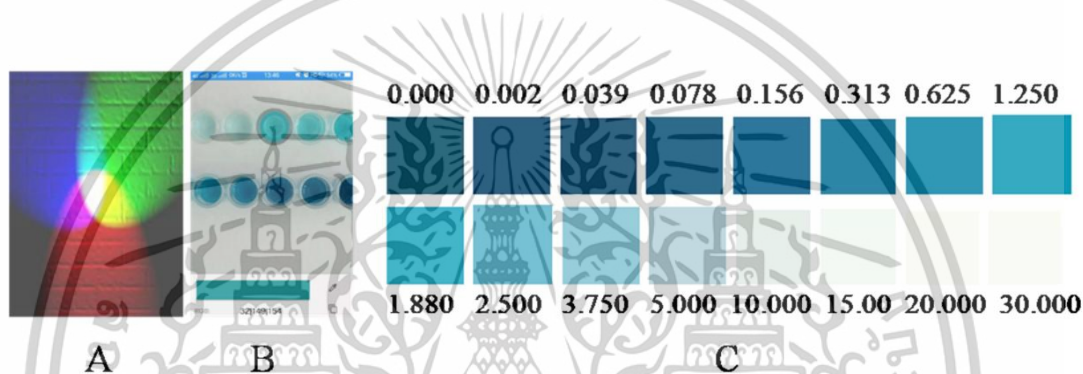
ไอออน	รูปแบบการเชื่อมต่อ	คุณลักษณะ (Characteristics)
H ⁺	Carboxyl Protonation	การเกิดเจลควบคุมได้ยาก และอัลจินตไฮโดรเจลเป็นแบบ Inhomogeneous gel
Ca ²⁺	Egg-Box Model	เตรียมง่าย มีความปลอดภัย และได้เป็นเจลแบบ Non-toxic gel
Ba ²⁺	Egg-Box Model	มีเสถียรภาพทั้งสภาวะที่ pH เป็นกรดและเป็นกลาง
Cu ²⁺	Egg-Box Model	เป็นไอออนที่มีแรง Affinity กับ สายอัลจินตได้มากกว่า Ca ²⁺ ถึง 10 เท่า
Sr ²⁺	Egg-Box Model	เป็น Non-toxic gel ที่มีเสถียรภาพ ต่อสารเคมีได้สูง และเป็นเจลที่มี
Zn ²⁺	Egg-Box Model	เป็นเจลแบบอ่อน ไม่แข็งแรง และไม่เหนียวเกินไป
Fe ²⁺	Egg-Box Model	เจลไม่มีเสถียรภาพ เกิดออกซิเดชันได้ง่าย
Mn ²⁺	Egg-Box Model	เจลไม่มีเสถียรภาพ
Al ³⁺	Three-Dimensional Valent binding Structure	เป็นเจลที่มีเสถียรภาพแต่เป็นอันตราย
Fe ³⁺	Three-Dimensional Interconnected Structure	เป็นเจลที่มีเสถียรภาพแต่เสื่อมสลายได้ด้วยแสง

2.6.3 การวิเคราะห์ภาพสีจากสมาร์ตโฟนโดยเทคนิค RGB

2.6.3.1 การทดสอบการวัดสีด้วยภาพถ่ายโดยใช้การวัดจาก RGB ในสมาร์ตโฟนสำหรับการตรวจติดตามโรคเบาหวาน A Feasible Image-based Colorimetric Assay Using a Smartphone RGB Camera for Point of Care Monitoring of Diabetes [66]

T.T Wang และคณะศึกษาการวิเคราะห์ระดับน้ำตาลในปัสสาวะโดยใช้แถบทดสอบกลูโคสอย่างง่ายในการวิเคราะห์และติดตามโรคเบาหวาน อย่างไรก็ตามผู้ป่วยโรคเบาหวานมักแสดงอาการการมองเห็นสีบกพร่อง ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถแยกแยะเฉดสีได้ ซึ่งไม่ใช่เรื่องง่ายสำหรับผู้ป่วยเหล่านี้ที่จะอ่านผลระดับน้ำตาลกลูโคสในปัสสาวะด้วยตาเปล่า ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของกลูโคสในปัสสาวะ โดยใช้ Horseradish peroxidase-hydrogen peroxide-3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (HRP-H₂O₂-TMB) ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสเนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีสีจาง โดยศึกษาผ่านการเร่งปฏิกิริยา ออกซิเดชันของปฏิกิริยาของกลูโคสออกซิเดส ซึ่งทำการพัฒนาการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายโดยแอปพลิเคชันวิเคราะห์สีในสมาร์ตโฟน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

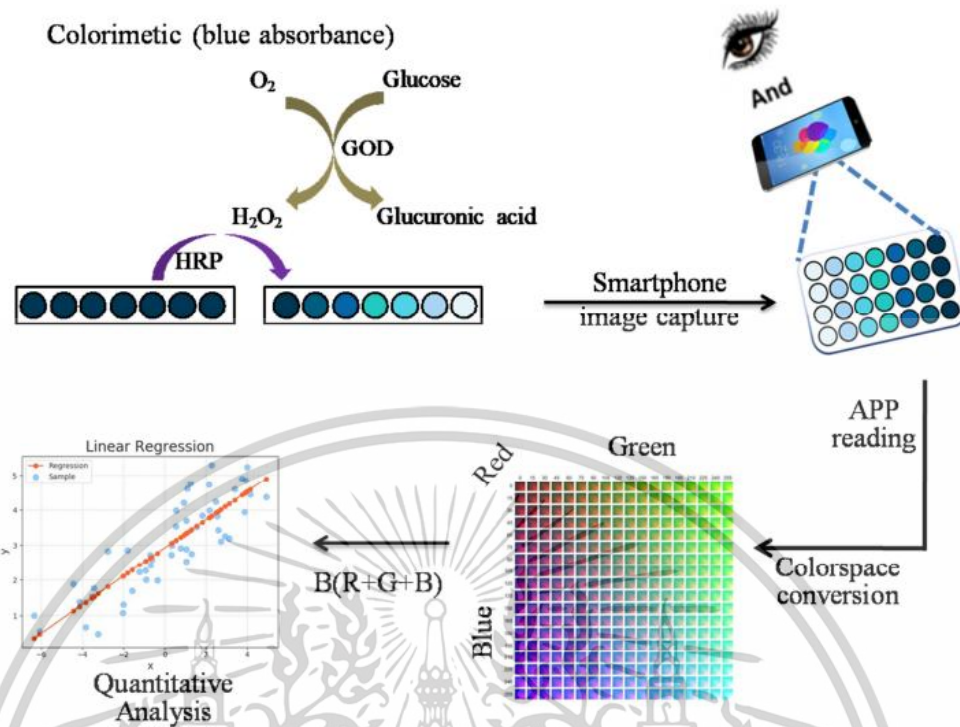
โพน ซึ่งตรวจจับความเข้มของสีแดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) รูปที่ 2.46A น้ำหนักของความเข้มสี RGB ของแต่ละพิกเซลอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 และการผสมน้ำหนักที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดสีที่ต่างกัน เช่น สีดำ (0, 0, 0), สีขาว (255, 255, 255) และสีน้ำเงิน (0, 0, 255) เป็นต้น ค่า RGB ในภาพสามารถกำหนดได้ผ่านซอฟต์แวร์และแสดงออกมาข้อมูล (รูปที่ 2.46B) ในงานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณกลูโคสในสารละลาย ซึ่งสารละลายแสดงค่าเป็นสีน้ำเงิน ดังนั้นจึงใช้ค่า B เป็นพื้นฐานในการคำนวณในสีหลักสามสีของ RGB ผ่านการวิเคราะห์สารละลายกลูโคส 16 ความเข้มข้น คือ 0.000, 0.002, 0.039, 0.078, 0.156, 0.313, 0.625, 1.250, 1.880, 2.500, 3.750, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000 และ 30.000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าปริมาณกลูโคสมีความสัมพันธ์กับสีของสารละลาย ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของกลูโคสมากยิ่งขึ้นสีจะมีความเข้มน้อยลง ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.46c



รูปที่ 2.46 (A) ตัวอย่างสี RGB (B) การกำหนดค่า RGB ผ่านซอฟต์แวร์ (C) สีของสารละลายที่มีปริมาณกลูโคสแตกต่างกัน [66]

กลูโคสในปัสสาวะสามารถออกซิไดซ์เป็นกรดกลูโคโรนิกโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดส และสร้าง H_2O_2 ได้ จากนั้นเอนไซม์ Horseradish peroxidase (HRP) จะเร่งปฏิกิริยา H_2O_2 เพื่อออกซิไดซ์ 3,3',5,5'-Tetramethylbenzidine (TMB) กลายเป็นผลิตภัณฑ์สีน้ำเงิน (TMB_{ox}) จากการทดลองพบว่าปริมาณกลูโคสมีความสัมพันธ์กับสีของสารละลาย เมื่อปริมาณกลูโคสมากขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของกลูโคสมากยิ่งขึ้นสีจะมีความเข้มน้อยลง จากสีน้ำเงินเข้มจนถึงใสไม่มีสี โดยพัฒนาการนำสมาร์ทโฟนถูกนำไปใช้ในการถ่ายภาพและการวิเคราะห์ค่าสีโดย RGB สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของกลูโคสในปัสสาวะ โดยขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.47 วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสในปัสสาวะได้ในช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 0.039 ถึง 10.000 มิลลิกรัมต่อลิตร ชัดจำกัดการวิเคราะห์ 0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีการนี้ถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานที่มีการมองเห็นสีบกพร่อง มีความแม่นยำสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างง่ายดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.47 การนำสมาร์ทโฟนไปใช้ในการถ่ายภาพและการวิเคราะห์ค่าสีโดย RGB สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของกลูโคสในปัสสาวะ [66]

2.6.3.2 การวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายในการหาปริมาณเมทิลีนบลู โดยการวิเคราะห์ภาพสีจากสมาร์ทโฟน A Simple Methods for Determination of Methylene Blue using Smartphone-Based as Digital Image Colorimetry [67]

M.D. Permana และคณะ ทำการศึกษาการพัฒนาการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายในการหาปริมาณเมทิลีนบลู โดยการวิเคราะห์ภาพสีจากสมาร์ทโฟน ผ่านโปรแกรม Image J ซอฟต์แวร์ 1.52a โดยวิเคราะห์ความเข้มของสีแดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 งานวิจัยนี้ใช้วิธีการมาตรฐาน 2 วิธี คือวิธีมาตรฐานภายนอกและการเพิ่มเติมสารมาตรฐาน การวิเคราะห์ค่าสีเฉลี่ยของ R, G และ B โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image J 1.52a ทำโดยการเลือกพื้นที่สีที่ต้องการเก็บข้อมูลความเข้มสี และกดแสดงค่า R, G และ B (รูปที่ 2.48) โดยพื้นที่ของภาพที่ทำการเลือก 1 ภาพ จะประกอบไปด้วยหลายพิกเซล ค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นค่าเฉลี่ย ตารางที่ 2.9 แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสี R, G และ B ของเมทิลีนบลูในเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มสี RGB ได้ โดยใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตเบียร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$l_{(R,G,B)} = \text{Log} \left(\frac{A_{0(R,G,B)}}{A_{s(R,G,B)}} \right)$$

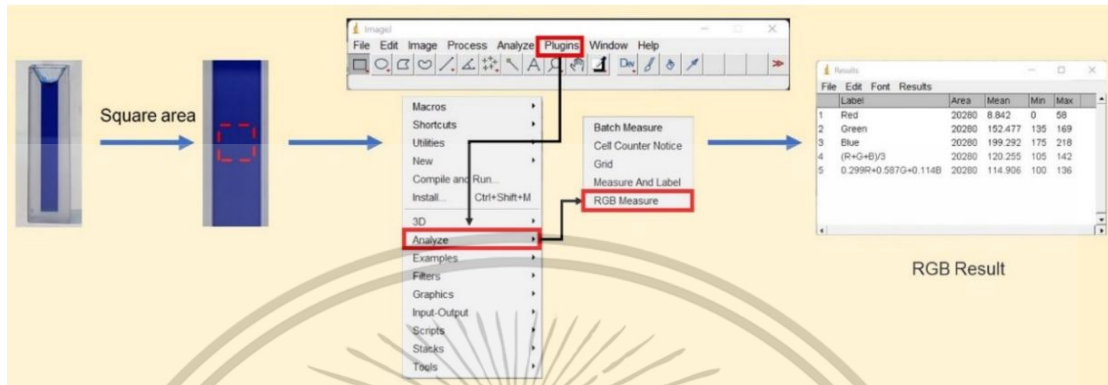
$$l_{(R,G,B)} = \text{Log} (A_{0(R,G,B)}/A_{s(R,G,B)}) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{(R,G,B)}$ คือสัมประสิทธิ์ความเข้มของสีที่เกี่ยวข้อง

$A_{0(R,G,B)}$ คือค่าเฉลี่ยสีของแบล็ค

$A_{s(R,G,B)}$ คือค่าเฉลี่ยสีของตัวอย่าง



รูปที่ 2.48 การเลือกพื้นที่ภาพเพื่อวิเคราะห์ค่า RGB โดยใช้ซอฟต์แวร์ Image J 1.52a [66]

ตารางที่ 2.9 ค่าความเข้มสี RGB เฉลี่ยของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

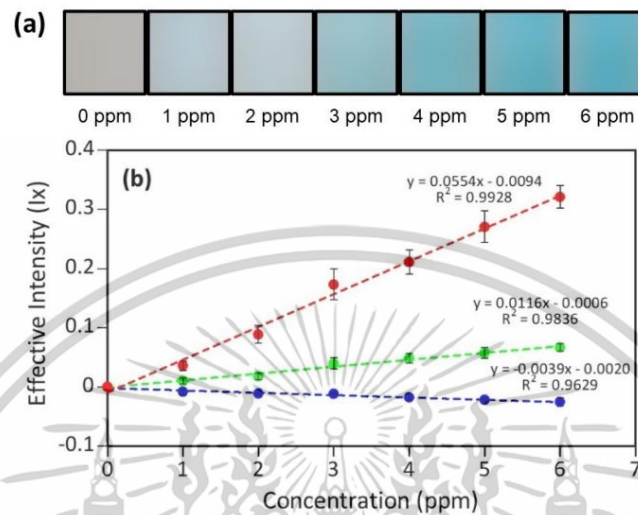
Concentration of methylene blue (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Average color value			Effective intensity		
	A_R	A_G	A_B	I_R	I_G	I_B
0	154.5	156.5	149.3	0	0	0
1	142.2	153.0	152.2	0.0359	0.0099	-0.0084
2	126.0	150.2	153.3	0.0884	0.0179	-0.0115
3	103.9	142.9	153.4	0.1725	0.0394	-0.0118
4	95.2	140.1	155.6	0.2103	0.0482	-0.0178
5	83.0	137.1	157.1	0.2700	0.0574	-0.0219
6	73.9	134.3	158.4	0.3205	0.0666	-0.0256

การประเมินความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์

1. วิธีการมาตรฐานภายนอก (External standard method)

จากรูปที่ 2.49A แสดงสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 1.0-6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจะสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มสี RGB กับความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ซึ่งจะได้กราฟการเปรียบเทียบผลลัพธ์ $y = ax + b$ โดยที่ y แสดงถึงความเข้มของสีแดง เขียว และน้ำเงิน ค่า x คือความเข้มข้นของเมทิลีนบลู (รูปที่ 2.49b) โดยกราฟสีแดง เขียว และน้ำเงินแสดงค่าความชันที่ 0.0554; 0.0116 และ -0.0039 แสดงให้เห็นว่าค่า R, G และ B มีความเป็นเส้นตรงที่สูงโดยมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงกว่า 0.9 และสีแดงมีค่า $R^2=0.9928$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสีแดงมีความไวในการวิเคราะห์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสีเขียวและสีน้ำเงิน ดังนั้นสำหรับการคำนวณแบบตัวแปรเดียว สีแดงจะถูกใช้เป็นตัวกำหนดระดับตัวอย่าง



รูปที่ 2.49 (a) ภาพดิจิทัลของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (b) สมการเส้นตรงเปรียบเทียบความเข้มของสีแดง เขียว และน้ำเงิน โดยใช้วิธีมาตรฐานภายนอก [66]

นอกจากการคำนวณแบบไม่แปรผันแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ การคำนวณความเข้มข้นจะถูกทดสอบโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนด้วย ในกรณีนี้ได้ทำการคำนวณเพื่อหาผลกระทบของตัวแปร 3 ตัว R, G และ B ต่อความเข้มข้นของเมทิลีนบลู การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายคำนวณด้วย Excel 2019 และสร้างสมการเส้นตรงในการเปรียบเทียบมาตรฐานโดยใช้ผลลัพธ์จากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometry ในทางกลับกัน กำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนที่คำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab 19 เป็นวิธีการคำนวณที่ดีกว่า โดยถือว่าข้อมูล RGB เป็นแบบหลายตัวแปร ซึ่งส่งผลให้เกิดการถดถอยเชิงเส้นใหม่ ซึ่งแสดงในสมการ (2)

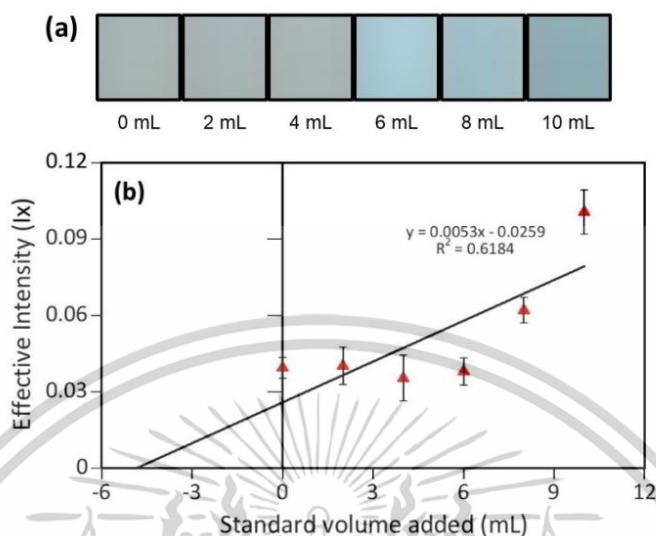
$$[\text{Methylene Blue}] = 0.14 + 26.00 I_R - 65.00 I_G - 23.00 I_B \quad (2)$$

2. วิธีการเพิ่มสารมาตรฐาน

โดยปกติแล้ววิธีการบวกค่ามาตรฐานจะใช้เพื่อกำจัดตัวรบกวน ในการศึกษาครั้งนี้ทำการเพิ่มสารมาตรฐานลงไปในการวิเคราะห์และเจือจางให้มีปริมาตรเท่ากัน จากนั้นจะทำการเก็บผลลัพธ์ของข้อมูล RGB และนำผลที่ได้ไปสร้างเส้นการถดถอย โดยแกน y คือการตอบสนองของสี และแกน x จะแสดงในรูปของปริมาตรสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่เติมเข้าไป (รูปที่ 2.50a) แสดงภาพดิจิทัลของตัวอย่างในการเพิ่มสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 2.50b) วิธีการนี้จะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของสีแดงเพื่อตอบสนองต่อการเพิ่มของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของวิธีการเติมสารมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าวิธีมาตรฐานภายนอก



รูปที่ 2.50 (A) ภาพดิจิทัลของตัวอย่างในการเติมมาตรฐานเมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัมต่อลิตร (B) การถดถอยเชิงเส้นสำหรับการตอบสนองสีแดง [66]

ค่าความแม่นยำที่วัดได้จะต้องเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่าง ค่าของปริมาณที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง การศึกษาความแม่นยำหมายถึงการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของการวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอ ในการศึกษาที่ดำเนินการทดลองการคืนกลับของตัวอย่างจริง โดยใช้วิธีมาตรฐานภายนอกและวิธีการเติมสารมาตรฐาน ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูถูกกำหนดจากความเข้มของสีแดงจากสมการเส้นตรงมาตรฐานภายนอก (รูปที่ 2.49) สำหรับตัวแปรเดี่ยวและสมการ(2) การใช้ความเข้มของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน สำหรับหลายตัวแปรโดยวิธีการเติมสารมาตรฐาน

เมื่อใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometry พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูอยู่ที่ 665 นาโนเมตร (รูปที่ 2.51a) จากนั้นนำข้อมูลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มต่างกัน มาสร้างกราฟมาตรฐานภายนอก (รูปที่ 2.51b) สำหรับวิธีการเติมสารมาตรฐาน พล็อตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและปริมาตรสารมาตรฐาน (รูปที่ 2.51c) โดยผลการทดสอบความแม่นยำแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.10 ค่าความแม่นยำคำนวณโดยใช้สมการ (3) และ (4) เพื่อคำนวณเป็นค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) และค่าความแม่นยำ ซึ่ง RE คือหน่วยวัดความแม่นยำที่ใช้อธิบายความแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของการวิเคราะห์เทียบกับมูลค่าที่แท้จริง

$$RE (\%) = (C_{true} - C_{obs}) / C_{true} \times 100 \% \quad (3)$$

$$Precision (\%) = C_{obs} / C_{true} \times 100 \% \quad (4)$$

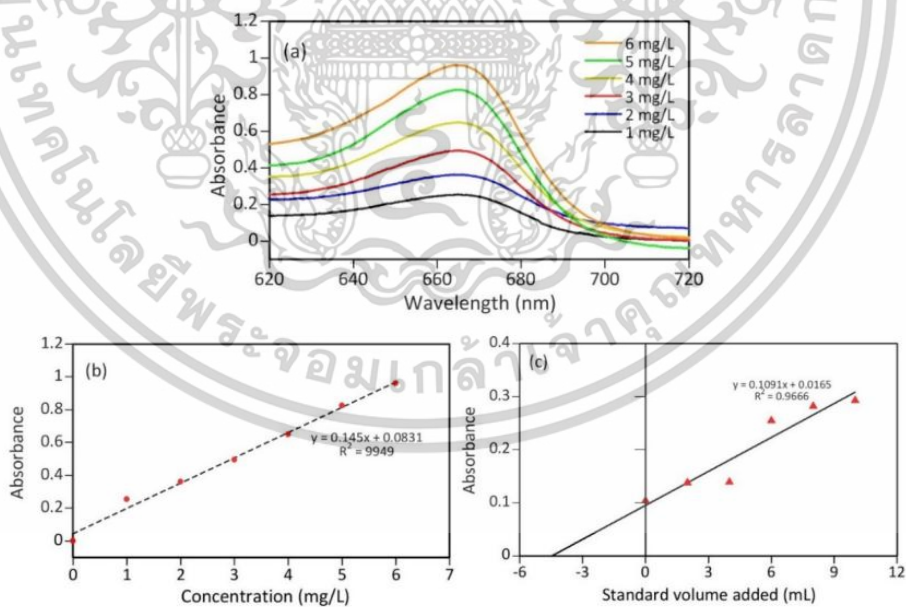
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_{true} คือความเข้มข้นของเมทิลีนบลูซึ่งคำนวณจากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometry และ C_{obs} คือความเข้มข้นของเมทิลีนบลูคำนวณโดยใช้ภาพดิจิทัล

ตารางที่ 2.10 ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการ

Method	C_{DIC} Smartphone (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_{UV-Vis} Spectrophotometry (มิลลิกรัมต่อลิตร)	RE (%)	Precision (%)
Univariate = Red				
External standard	84.1 ± 1.2	92.1	8.8	91.2
Standard addition	95.3 ± 2.5	87.2	9.3	109.3
Multivariate				
External standard	91.2 ± 0.5	92.1	1.0	99.0

จากวิธีการวัดสีโดยใช้ภาพดิจิทัลที่เสนอ วิธี Univariate วิธีมาตรฐานภายนอกมีความแม่นยำ 91 % และวิธีการเติมสารมาตรฐานให้ความแม่นยำถึง 109 % ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงว่าภาพดิจิทัลจากทั้ง 2 วิธีไม่มีความแตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ผลลัพธ์หลายตัวแปรให้ความแม่นยำ 99 % ดังนั้นวิธีนี้จึงมีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.51 (a) สเปกตรัมของเมทิลีนบลู (b) กราฟการปรับเทียบของวิธีมาตรฐานภายนอก (c) เส้นตรงการถดถอยของการเติมมาตรฐานละลายฐานเมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัมต่อลิตร [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่าย ในการหารปริมาณเมทิลีนบลูโดยใช้สมาร์ทโฟนถือเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว ราคาไม่แพง เครื่องมือไม่มีความซับซ้อน มีความแม่นยำสูง โดยมีความแม่นยำถึง 90% ในการวิเคราะห์จากตัวอย่าง และการวิเคราะห์จากแบบจำลองหลายตัวแปรสำหรับวิธีมาตรฐาน ภายนอกมีความแม่นยำถึง 99 % เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometry



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอิมัลชันเคอร์คูมิน โดยใช้ Tween 80 ซึ่งเป็นสารช่วยลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพของเคอร์คูมิน
2. ศึกษาวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิพด้วยเทคนิคสเฟียร์ริฟิเคชัน รวมถึงความเสถียรของเม็ดบิพ CUR_{Hydrogel} เช่น ความสามารถในการป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมินภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต อุณหภูมิและสารละลายที่ใช้ในการเก็บรักษา และความแข็งแรงของเม็ดบิพ
3. ศึกษากลไกและสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}
4. ศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง ความไวในการวิเคราะห์ ความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ และขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด
5. ประยุกต์การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือ ในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามิน และศึกษาความถูกต้องของวิธี โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC

3.1 เคมีภัณฑ์และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมี

สารเคมี	สูตรโมเลกุล/ชื่อย่อ	บริษัทผู้ผลิต
Curcumin	C ₂₁ H ₂₀ O ₆	ACROS
Tween80	C ₆₄ H ₁₂ O ₂₆	Thermo Scientific
Boric acid	H ₃ BO ₃	Fisher Scientific
Sodium hydroxide	NaOH	Carlo Erba
Alginic acid sodium salt	C ₆ H ₈ O ₆	Sigma-Aldrich
Calcium chloride	CaCl ₂	Carlo Erba
Zinc acetate dihydrate	C ₄ H ₆ O ₄ Zn•2H ₂ O	Loba Chemie
Oxalic acid	H ₂ C ₂ O ₄	J.T.Baker
Ethanol	C ₂ H ₆ O	Merck

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี	สูตรโมเลกุล/ชื่อย่อ	บริษัทผู้ผลิต
Poly diallyl dimethyl ammonium chloride (PDADMAC)	$C_8H_{16}NCl$	Sigma-Aldrich
Pyridoxine (Vitamin B6)	$C_8H_{11}NO_3$	Germany
Thiamine (Vitamin B1)	$C_{12}H_{17}N_4OS$	Sigma-Aldrich
Riboflavin (Vitamin B2)	$C_{17}H_{20}N_4O_6$	ACROS
Niacinamide (Vitamin B3)	$C_6H_6N_2O$	My Skin Recipes
Pantothenate (Vitamin B5)	$C_9H_{17}NO_5$	My Skin Recipes
Biotin (Vitamin B7)	$C_{10}H_{16}N_2O_3S$	My Skin Recipes
Cobalamin (Vitamin B12)	$C_{63}H_{88}CoN_{14}O_{14}P$	My Skin Recipes
Ascorbic acid (Vitamin C)	$C_6H_8O_6$	Sigma-Aldrich
Glucose	$C_6H_{12}O_6$	Sigma-Aldrich
Sodium chloride	NaCl	Carlo Erba
Potassium chloride	KCl	Carlo Erba
Magnesium sulfate	$MgSO_4$	Carlo Erba

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) ขวดปรับปริมาตร
- 2) ปีกเกอร์
- 3) หลอดทดลอง
- 4) ไมโครปิเปต
- 5) ซ็อนต์กาสาร
- 6) แม่พิมพ์ทรงกลม
- 7) กระดาษฟรอย
- 8) พีเอซีเตอร์ -Toledo AG 8603 Switzerland
- 9) UV-Vis Spectrophotometry - SHIMADZU UV-1900i, JAPAN
- 10) น้ำปราศจากไอออน - ZENEER UP 900, Human
- 11) ตู้แช่แข็ง อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส
- 12) ตู้อบ
- 13) เตาเผาอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลอง

3.2.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน

3.2.1.1 ศึกษาความเข้มข้น Tween80 ที่เหมาะสมในการทดลอง

ชั่งเคอร์คูมิน 10 มิลลิกรัม จากนั้นเทสารละลาย Tween80 เข้มข้น 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 และ 3.00%v/v ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวน 650 รอบ/นาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometer

3.2.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสม

ชั่งเคอร์คูมิน 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม จากนั้นเทสารละลาย Tween80 เข้มข้น 2.00%v/v ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวน 650 รอบ/นาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.2.1.3 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายเคอร์คูมิน

ชั่งเคอร์คูมิน 10 มิลลิกรัม จากนั้นเทสารละลาย Tween80 เข้มข้น 2.00%v/v ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวน 650 รอบ/นาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25, 45, 60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.2.1.4 ศึกษาระยะเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม

ชั่งเคอร์คูมิน 10 มิลลิกรัม จากนั้นเทสารละลาย Tween80 เข้มข้น 2.00%v/v ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวน 650 รอบ/นาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.3 ศึกษาการขึ้นรูปเม็ดบีด

3.3.1 ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีด

3.3.1.1 การขึ้นรูปเม็ดบีดโดยวิธีเบสิกสเฟียร์ฟิเคชัน

ผสมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต 3.00%w/v ลงในสารละลายเคอร์คูมิน 100 มิลลิลิตร ปั่นกวน 450 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเปิดสารละลายเคอร์คูมิน-โซเดียมอัลจิเนตที่เตรียมได้ 1 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ทรงกลมขนาด 1.50 มิลลิลิตร นำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นในอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นแกะเม็ดสารละลายออกจากแม่พิมพ์ นำสารละลายไปลอยในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 2.00%w/v จนเกิดเป็นเม็ดปืที่มีลักษณะคงตัวและนำเม็ดปืที่ได้ไปเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน

3.3.1.2 การขึ้นรูปเม็ดปืโดยวิธีเวิร์สสเฟียร์รีฟิเคชัน

ปีเปตสารละลายเคอร์คูมิน 1.00 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ทรงกลมขนาด 1.50 มิลลิลิตร นำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นในอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปีเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.00%w/v ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร ลงไปในแม่พิมพ์และแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที จากนั้นนำเม็ดสารละลายที่ได้ไปแช่ลงในสารละลายโซเดียมอัลจินตเข้มข้น 3.00%w/v จนเกิดเป็นเม็ดปืที่มีลักษณะคงตัวและนำเม็ดปืที่ได้ไปเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน

3.3.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดปืชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจินต

3.3.2.1 ศึกษาปริมาณเคอร์คูมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดปื

ปีเปตสารละลายเคอร์คูมิน 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ทรงกลม นำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นในอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปีเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3.00%w/v ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร ลงไปในแม่พิมพ์และแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที จากนั้นนำเม็ดสารละลายที่ได้ไปแช่ลงในสารละลายโซเดียมอัลจินตเข้มข้น 3.00%w/v จนเกิดเป็นเม็ดปืที่มีลักษณะคงตัว นำเม็ดปืที่ได้ไปเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นปีเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90, 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตรและเจาะเม็ดปืเคอร์คูมินให้สารละลายลงไปในหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องผสมสารละลายเป็นเวลา 10 วินาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.3.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดปื

ปีเปตสารละลายเคอร์คูมิน 1.00 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ทรงกลมขนาด 1.50 มิลลิลิตร นำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นในอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปีเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00%w/v ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร ลงไปในแม่พิมพ์และแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที จากนั้นนำเม็ดสารละลายที่ได้ไปแช่ลงในสารละลายโซเดียมอัลจินต เข้มข้น 2.00%w/v จนเกิดเป็นเม็ดปืที่มีลักษณะคงตัวและนำเม็ดปืที่ได้ไปเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออนและวัดความแข็งแรงของเม็ดปืด้วย Texture Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด

ปิเปตสารละลายเคอร์คูมิน 1.00 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ทรงกลมขนาด 1.50 มิลลิลิตร นำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นในอุณหภูมิต่ำ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปิเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3.0%w/v ปริมาตร 0.50 มิลลิลิตร ลงไปในแม่พิมพ์และแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำ -40 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที จากนั้นนำเม็ดสารละลายที่ได้ไปแช่ลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตเข้มข้น 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00%w/v จนเกิดเป็นเม็ดบีดที่มีลักษณะคงตัว และนำเม็ดบีดที่ได้ไปเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออนและวัดความแข็งแรงของเม็ดบีดด้วย Texture Analyzer

3.3.3 ศึกษาการสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีดขั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR_{Hydrogel})

3.3.3.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

เติมสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.10, 0.50, 1.00, 2.50 และ 5.00 โมลาร์ ลงในบิวเรต และทำการหยดสารละลายกรดออกซาลิกลงในสารละลายซิงค์อะซิเตท ไดไฮเดรต โดยยังทำการปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง หลังจากหยดสารละลายกรดออกซาลิกลงในสารละลายซิงค์อะซิเตท ไดไฮเดรตจนหมดแล้ว จะได้สารละลายสีขาวขุ่นลักษณะคล้ายเจล ปั่นกวนต่ออีก 90 นาที จากนั้นกรองเจลที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและอบที่อุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิต่ำ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แล้ว จะทำการศึกษาคูณลักษณะดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือพิสูจน์เอกลักษณ์

เครื่องมือ	การพิสูจน์เอกลักษณ์
UV-Vis Spectrophotometry	ตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง
Transmission Electron Microscope, TEM	ตรวจสอบรูปร่าง ขนาดของอนุภาค การกระจายตัว
X-Ray Diffraction, XRD	ตรวจสอบผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

3.3.3.2 ศึกษาความเข้มข้น PDADMAC ที่เหมาะสมในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ซังอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.50 กรัม และปิเปตสารละลายพอลิไดเอทิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในบีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกอร์ จากนั้นนำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 5 นาที วัดค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 367 นาโนเมตร โดย Zeta Potential และ UV-Vis Spectrophotometry ตามลำดับ

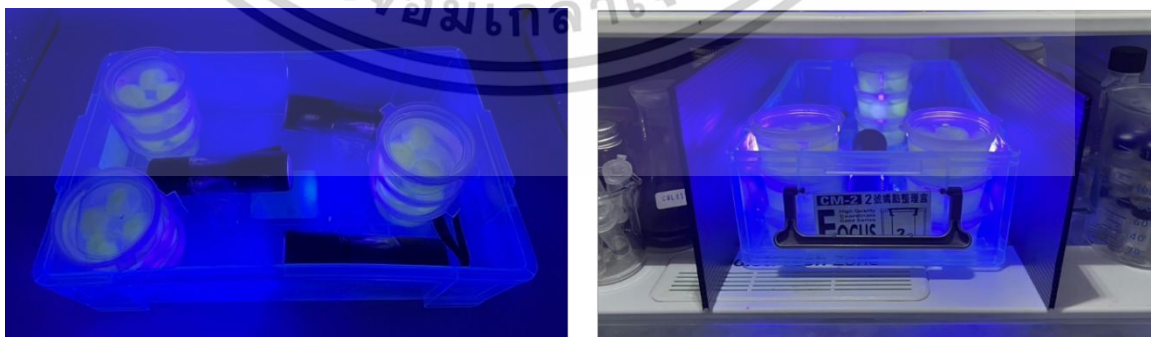
3.3.3.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่เม็ดบีดในสารละลาย PDADMAC-ZnONPs

ปีเปตสารละลายเคอร์คูมินปริมาตร 1.0 มิลลิลิตรลงในแม่พิมพ์ทรงกลมขนาด 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ต่อมาปีเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3.00% w/v ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตรลงในแม่พิมพ์ และแช่เย็นที่อุณหภูมิเดิมอีก 45 นาที หลังจากนั้นนำเม็ดสารละลายที่ได้แช่ในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตเข้มข้น 3.00% w/v จนกระทั่งเม็ดบีดมีโครงสร้างที่คงตัว ต่อมานำเม็ดบีดไปเก็บในน้ำปราศจากไอออน และแช่ในสารละลาย PDADMAC-ZnONPs เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 และ 90 วินาที ตามลำดับ จากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตอีกครั้ง เม็ดบีดที่ได้จะถูกเจาะเพื่อแยกเปลือกออกมา นำเปลือกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำเปลือกที่ผ่านการอบมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น สกัดท้ายวัดปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของเม็ดบีดโดยใช้เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma)

3.3.4 ศึกษาความเสถียรของ CUR_{Hydrogel}

3.3.4.1 ศึกษาความสามารถในการป้องกันแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของเม็ดบีด

นำเม็ดบีดเคอร์คูมินที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แล้ว แบ่งใส่ลงในถ้วยพลาสติกที่มีฝาปิด จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน แล้วจัดเรียงในกล่องสำหรับจัดเก็บ นำกล่องดังกล่าวเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พร้อมฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตวันละ 8 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดบีดมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร เพื่อศึกษาการสลายตัวของเคอร์คูมิน โดยทำการวัดในทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 49 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบความสามารถในการกันแสงของเม็ดบีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 ศึกษาสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเม็ดบีดที่เหมาะสม

ได้ศึกษาการเก็บเม็ดบีดในน้ำปราศจากไอออนและในสารละลายบอเรตไอออน โดยนำเม็ดบีดเคอร์คูมินมาเก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน และสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร pH9 นอกจากนี้ทำการศึกษาการเก็บเม็ดบีดไว้ในอุณหภูมิต่าง ๆ คือ -20, 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำเม็ดบีดมาเจาะและวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่ใช้เก็บในการแพร่เข้าสู่เม็ดบีด โดยใช้สมการที่ 1 และทำการวิเคราะห์ทุก 7 วัน

$$\% \text{การซึมผ่าน} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

โดย A_0 แทนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตรของเม็ดบีดก่อนทำการเก็บ

A_t แทนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตรของเม็ดบีด ณ วันที่ทำการวัด

3.3.4.3 ศึกษาการอมน้ำของเม็ดบีด (Swelling Capacity)

นำเม็ดบีดเคอร์คูมินมาเก็บไว้ในขวดแก้วที่ทำการติดหมายเลขขวดละ 1 ลูก และเก็บเม็ดบีดไว้ในน้ำปราศจากไอออน และสารละลายบอเรตไอออนเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร pH9 จากนั้นนำเม็ดบีดที่แช่ในปราศจากไอออน นอกจากนี้ทำการศึกษาการเก็บเม็ดบีดไว้ในอุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเม็ดบีดและคำนวณเปอร์เซ็นต์การอมน้ำของเม็ดบีดดังสมการที่ 2 โดยจะทำการเก็บวิเคราะห์ทุก 7 วัน

$$\% \text{SC} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย W_0 คือ น้ำหนักของเม็ดบีดก่อนทำการจัดเก็บ

W_t คือ น้ำหนักของเม็ดบีด ณ วันที่ทำการวิเคราะห์

3.3.4.4 ศึกษาความแข็งแรงของเม็ดบีด

นำเม็ดบีดเคอร์คูมินมาใส่ในหลอดเซนต์ปีฟัสหลอดละ 1 ลูก จากนั้นเปิดน้ำปราศจากไอออนลงไป 10 มิลลิตร และทำการปั่นเหวี่ยงที่ 500, 1000, 5000, 10000 และ 15000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สูดถ่ายวัดความแข็งแรงและค่าการดูดกลืนแสงของเม็ดบีดด้วยเครื่อง Texture analyzer และ UV-Vis Spectrophotometry ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี 6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

3.4.1 ศึกษา pH ของบอริกที่เหมาะสม

ทำการศึกษาค่า pH ของสารละลายบอเรตไอออนในช่วง pH 7 ถึง 10 โดยเตรียมสารละลายบอเรตไอออนความเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่า pH ให้ได้ตามที่ต้องการด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นปิเปตสารละลายบอเรตไอออนที่ pH ต่าง ๆ เข้มข้น 10 ถึง 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเจาะเม็ดบีดเคอร์คูมินเพื่อปล่อยสารละลายเคอร์คูมินลงในกรดบอริก ทำการเขย่าส่วนผสมให้เข้ากัน และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตรโดย UV-Vis Spectrophotometry

3.4.2 ศึกษาปริมาตรตัวอย่างวิตามินบี 6 ที่เหมาะสม

ปิเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายมาตรฐานวิตามินบี 6 เข้มข้น 10 ถึง 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 และ 3.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีดเคอร์คูมินให้สารละลายลงไปหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.4.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนและวิตามินบี 6

ปิเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายมาตรฐานวิตามินบี 6 เข้มข้น 10 ถึง 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 0.25, 0.50, 1.00, 3.00, และ 5.00 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีดเคอร์คูมินให้สารละลายลงไปหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 1.00 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.4.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือ และ CUR_{Hydrogel}

ปิเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายมาตรฐานวิตามินบี 6 เข้มข้น 10 ถึง 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีดเคอร์คูมินให้สารละลายลงไปหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 1, 3, 5, 10 และ 15 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}

3.5.1 ศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity)

ปีเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และปีเปตสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีดคอร์คูมินให้สารละลายลงไปหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันและทิ้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการถ่ายรูปสีของสารละลายในสตูดิโอและทำการวิเคราะห์ค่าสีแดง-เขียว-น้ำเงิน (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดย UV-Vis Spectrophotometry

3.5.2 ศึกษาความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

ความเที่ยงของการวิเคราะห์เป็นวิธีการในการแสดงถึงความสามารถในการทวนซ้ำของวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในการวัดที่แสดงถึงระดับความใกล้เคียงกันของผลการวัดที่ได้จากการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยการวัดทั้งหมดอยู่ภายใต้วิธีการวัด เครื่องมือวัด ผู้ทำการวัด และสภาพแวดล้อมเดียวกัน ซึ่งการตรวจสอบความสามารถในการวัดซ้ำของวิธีที่คิดค้นขึ้นวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 10 ครั้ง และประเมินค่าการวัดซ้ำได้จากค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์หรือค่าความแม่นยำในการทดลอง (Relative Standard Deviation; %RSD) โดยระดับของความแม่นยำขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ โดยคำนวณดังสมการ

$$RSD (\%) = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ RSD = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล

SD = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล

3.5.3 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (Limit of Quantitation, LOQ)

ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบล็กจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นคำนวณหา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสง และนำไปคำนวณหาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารละลายแบบลงจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงและนำไปหาค่าศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) โดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope of calibration}}$$

2. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบโดยตรวจสอบขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (Limit of Quantitative, LOQ) ค่า LOQ มีค่าประมาณ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หากตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มีปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่าค่า LOQ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะไม่รายงานค่าเชิงปริมาณโดยจะใช้สัญลักษณ์ (-) หรือ “ไม่สามารถตรวจพบ” แทน โดยใช้สูตร

$$\text{LOQ} = \frac{10 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope of calibration}}$$

3.5.4 ศึกษาความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel} (Interferences Study)

ปีเปิดสารละลายมาตรฐานโทอามีน (วิตามินบี1), ไรบโพลาวิน (วิตามินบี2), แพนโทเทนิคแอซิด (วิตามินบี5), โคบาลามีน (วิตามินบี12), กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี), กลูโคส โซเดียมคลอไรด์, โฟสเฟตซีเอ็มคลอไรด์, แคลเซียมคลอไรด์, แมกนีเซียมซัลเฟต และเหล็ก เข้มข้น 12,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 100 เท่า ของความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์วิตามินบี6ได้ และไนอะซินาไมด์ (วิตามินบี3), ไบโอดิน (วิตามินบี7) และ ซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรต เข้มข้น 6,250 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือ 50 เท่า ของความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์วิตามินบี6ได้ ลงในกรดบอริก ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีดเคอร์คูมินให้สารละลายเคอร์คูมินไหลลงไปในหลอดทดลอง ผสมสารละลายให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ 5 นาที ทำการวิเคราะห์เชิงสีร่วมการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและวัดความเข้มของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

3.5.5 ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ด้วยวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC

ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6 ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายผ่านการวัดค่าสีเขียว (Green Intensity) ด้วยโปรแกรม Image J เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน 2 วิธี ได้แก่ การวัดความเข้มข้นของวิตามินบี6 ด้วยเครื่อง High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) ภายใต้เงื่อนไขที่ระบุในตารางที่ 3.3 [9] และการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectrophotometry ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร การวิเคราะห์ดำเนินการโดยการนำตัวอย่าง เครื่องดื่มเสริมวิตามิน 4 ชนิด มาทำการเติมสารละลายมาตรฐานของวิตามินบี6 ในปริมาณ 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการคำนวณ %Recovery และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีมาตรฐานเพื่อ ประเมินความแม่นยำของวิธีการที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการวิเคราะห์วิตามินบี6 ด้วย HPLC [9]

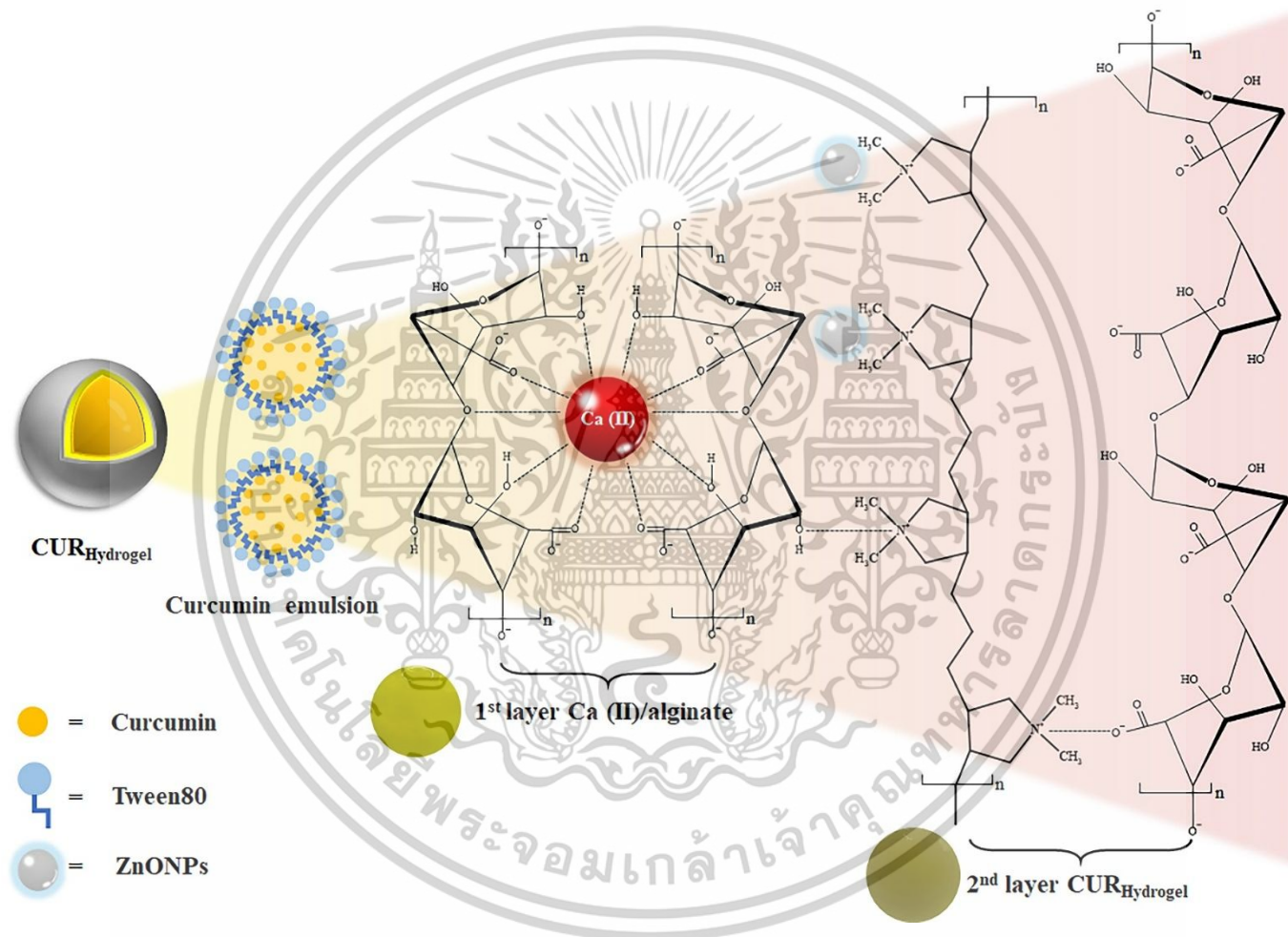
Parameters	Condition
Column	Reversed-phase C-18
Column Temperature	30 °C
Flow Rate	1.5 mL/min
Injection Volume	20 µL
Retention Time	0.997 min
Mobile Phase	Solvent A: 0.015% Triethylamine adjusted to pH 2.7 with Sulfuric acid Solvent B: Acetonitrile
Detector	UV Detector
Wavelength	280 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้พัฒนาเม็ดบิพสองชั้นที่ภายในบรรจุสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน โดยสร้างเม็ดบิพชั้นที่ 1 ด้วย Ca(II)-อัลจิเนต เพื่อกักเก็บอิมัลชันเคอร์คูมินภายในอย่างมีประสิทธิภาพและมีความคงแข็งแรงป้องกันการรั่วซึมของอิมัลชันเคอร์คูมิน และเคลือบพื้นผิวของเม็ดบิพชั้นที่ 2 ด้วย Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs หรือเรียกว่า CUR_{Hydrogel} เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมิน ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) งานวิจัยเริ่มจากการเตรียมสารละลายเคอร์คูมินผ่านกระบวนการอิมัลชันด้วย Tween80 เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและเพิ่มความเสถียร จากนั้นใช้วิธีเวิร์สตีฟิเคชันในการสร้างเม็ดบิพชั้นที่ 1 Ca(II)/อัลจิเนต โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งจะก่อให้เกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแรงและสามารถกักเก็บสารละลายเคอร์คูมินได้อย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างพันธะระหว่างแคลเซียม (Ca (II)) และอัลจิเนต เกิดขึ้นตามแบบจำลองแบบกล่องไข่ (Egg-box model) ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแรงและมีความคงทนในการห่อหุ้มสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน (รูปที่ 4.1) โซเดียมอัลจิเนตเป็นไบโอพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกรด β -D-mannuronic acid (M) และกรด α -L-guluronic acid (G) ซึ่งเชื่อมต่อกันผ่านพันธะไกลโคซิดิก (1, 4) เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนต แคลเซียม (Ca (II)) จะจับกับกลุ่มคาร์บอกซิล (-COO⁻) ที่ตำแหน่ง C1 และ C4 ของกรดกลูคูโรนิก (G-blocks) ทำให้เกิดการ Cross-linking ระหว่างสายอัลจิเนตที่อยู่ใกล้กัน นอกจากนี้เนื่องจากเคอร์คูมินมีแนวโน้มสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงทำการสร้างเม็ดบิพชั้นที่ 2 ด้วย Ca (II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR_{Hydrogel}) โดยเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer By Layer)



รูปที่ 4.1 แผนภาพการสร้งเม็ดบิทเคอร์คูมินสองชั้น (Ca (II))-อัลจินต/ZnONPs ที่ภายในบรรจุสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน

4.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน

การพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์เชิงสีอย่างง่ายโดยใช้ CUR_{Hydrogel} ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์วิตามินบี6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมอิมัลชันเคอร์คูมินถือเป็นสิ่งที่จำเป็นเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของเคอร์คูมินต่ำ (Solubility = 0.6 ไมโครกรัมต่อลิตร) เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของเคอร์คูมิน จึงนำเคอร์คูมินมาทำให้เกิดอิมัลชันด้วย Tween80

4.1.1 ศึกษาความเข้มข้น Tween80 ที่เหมาะสมในการทดลอง

ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลายเคอร์คูมิน 0.3 มิลลิโมลาร์ และผสมกับ Tween80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 %v/v จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.2A พบว่าความสามารถในการละลายของเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Tween80 เพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.5 % v/v และคงที่เมื่อถึง 2.0 % v/v การเพิ่มความเข้มข้น Tween80 ช่วยเพิ่มจำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งทำให้เคอร์คูมินเกิดเป็นไมเซลล์ได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดสารอิมัลชันได้ดีขึ้น โดยส่วนไฮโดรโฟบิก ของ Tween80 จะยึดเกาะกับเคอร์คูมินผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ และหันส่วนไฮโดรฟิลิกออกมา ทำให้แต่ละโมเลกุลของ Tween80 มีแรงไฮโดรฟิลิกและแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ช่วยให้เคอร์คูมินกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอภายในระบบอิมัลชันและช่วยป้องกันไม่ให้เคอร์คูมินตกตะกอน ดังนั้นความเข้มข้นของ Tween80 ที่ 2.0 %v/v จึงถูกเลือกใช้ในการเตรียมสารอิมัลชันเคอร์คูมินต่อไป

4.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสม

การศึกษาจากการศึกษาความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสม ตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.50 มิลลิโมลาร์ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเคอร์คูมินส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตรเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการละลายของเคอร์คูมินดีขึ้น เนื่องจากปริมาณโมเลกุลของเคอร์คูมินในสารละลายเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเคอร์คูมินถึง 0.30 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเริ่มคงที่ แสดงถึงจุดอิ่มตัวของเคอร์คูมินในสภาวะดังกล่าว และปริมาณที่เพิ่มขึ้นหลังจากนี้จะไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2B ดังนั้นความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.30 มิลลิโมลาร์

4.1.3 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายเคอร์คูมิน

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการละลายของเคอร์คูมิน โดยผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิช่วยเพิ่มการละลายของเคอร์คูมิน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของ Tween80 ในน้ำ ทำให้สารละลายมีความหนืดลดลงซึ่งส่งผลให้

การเกิดอิมัลชันของ Tween80 และเคอร์คูมินเกิดได้ดีขึ้น จากการศึกษาการเตรียมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

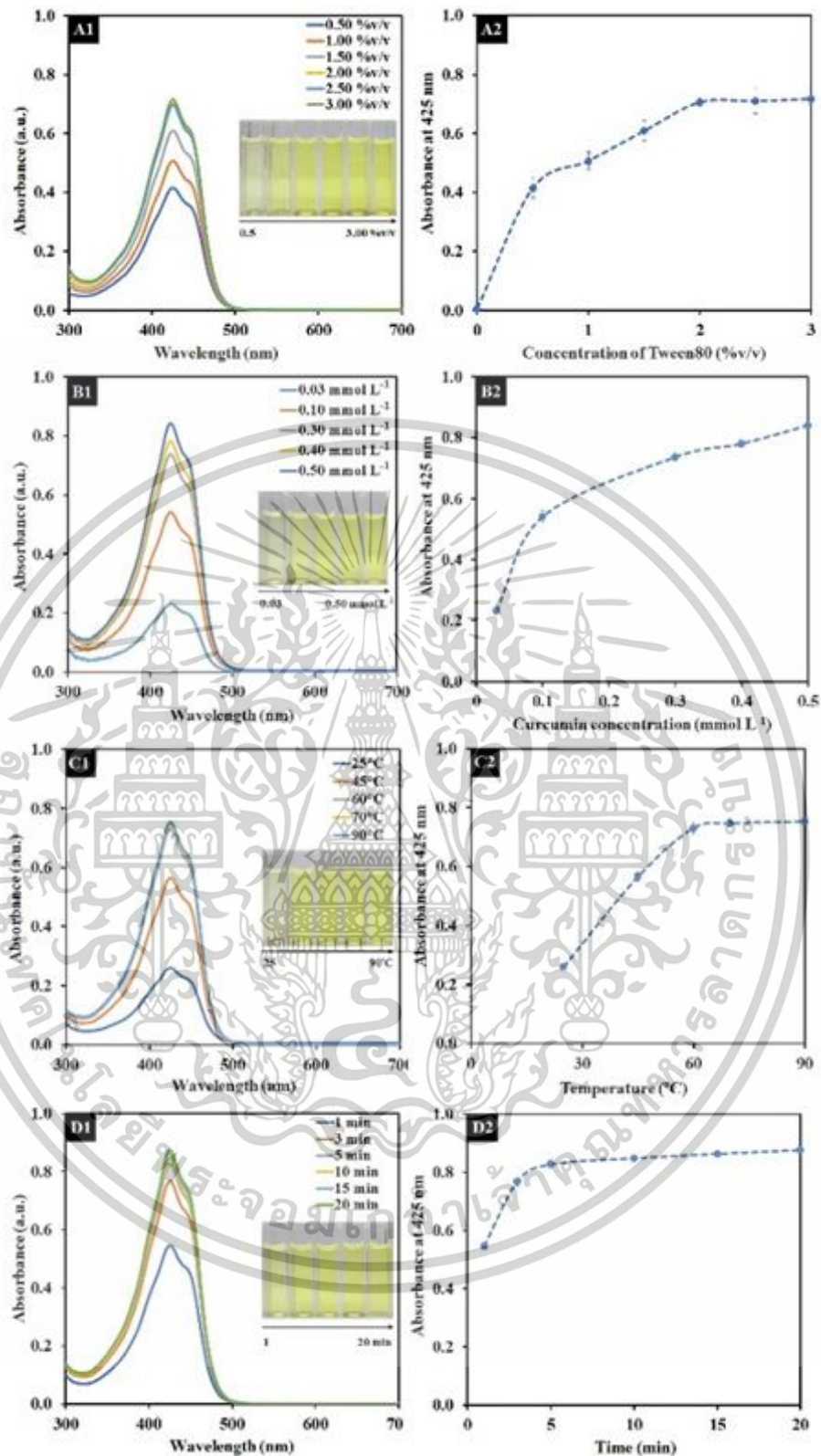
สารละลายเคอร์คูมินที่อุณหภูมิ 25, 45, 60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส การเกิดอิมัลชันของเคอร์คูมินจะเริ่มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2C ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม

4.1.4 ศึกษาระยะเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม

การปั่นกวนเป็นอีกปัจจัยที่ช่วยเพิ่มการละลายของเคอร์คูมิน เนื่องจากช่วยลดการรวมตัวของโมเลกุลและทำให้สารละลายเกิดการผสมที่สม่ำเสมอ ผลการศึกษาพบว่าการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงคงที่ ซึ่งแสดงถึงการเข้าสู่สมดุลและการปั่นกวนสารละลายเพิ่มเติมหลังจากนี้จะไม่ช่วยเพิ่มการละลายอีกต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2D ดังนั้นระยะเวลาในการกวนที่เหมาะสมคือ 5 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและกราฟแสดงค่าการละลายของอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร (A1-A2) ความเข้มข้นของ Tween80 (B1-B2) ความเข้มข้นของเคอร์คูมิน (C1-C2) อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย (D1-D2) เวลาในการปั่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การขึ้นรูปเม็ดบีท (Bead Formation)



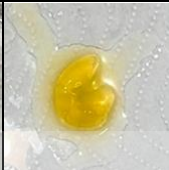
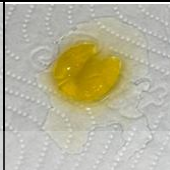
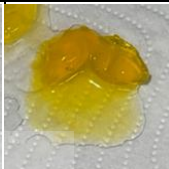
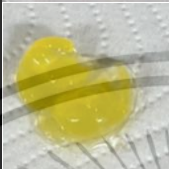


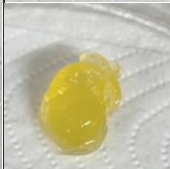

4.2.1 ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีท

การขึ้นรูปเม็ดบีท (Bead Formation) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในงานวิจัยนี้ โดยจะทำการขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิค Spherification ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการสร้างเม็ดเจลที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate) และแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) โดยการสร้างพันธะระหว่างแคลเซียม (Ca (II)) และอัลจิเนต เกิดขึ้นตามแบบจำลองแบบกล่องไข่ (Egg-box model) ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแรงและมีความคงทนในการห่อหุ้มสารละลายอิมัลชันคอร์คูมิน โซเดียมอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นชนิดหนึ่งประกอบด้วยกรด β -D-mannuronic acid (M) และกรด α -L-guluronic acid (G) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (1, 4) เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ลงในสารละลายของโซเดียมอัลจิเนต แคลเซียม (Ca (II)) จะสร้างพันธะกับกลุ่มคาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) ที่ตำแหน่ง C1 และ C4 ของกรดกูลูโรนิก ส่งผลให้เกิด Cross-linking ระหว่างสายอัลจิเนตที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของเจล (Gelation) ที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง เทคนิคนี้มีข้อดีในการขึ้นรูปเม็ดที่มีโครงสร้างชัดเจน สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติต่าง ๆ ของเม็ดบีทได้ เช่น ความแข็งแรง ความสามารถในการกักเก็บสาร และการปลดปล่อยสารในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

4.2.1.1 การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยวิธีเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน (Basic Spherification)

การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยวิธีเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน โดยการใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ 2%w/v และโซเดียมอัลจิเนต 0.5 ถึง 3.0%w/v การศึกษาเบื้องต้นพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่ 0.5 และ 1%w/v ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดบีทได้ เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถจับตัวและขึ้นรูปเป็นเม็ดบีทได้ ในขณะที่เม็ดบีทที่ถูกขึ้นรูปด้วยความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่ 1.5, 2.0 และ 3.0%w/v สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดบีททรงกลมได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางแสดงให้เห็นว่าเม็ดบีทหลังสร้างเสร็จทันที หากทำการเจาะเม็ดบีทจะพบว่าภายในเม็ดบีทยังคงสถานะเป็นของเหลวอยู่ แต่หากทิ้งไว้ถึง 24 ชั่วโมง Ca(II) จะซึมเข้าไปด้านในของเม็ดบีทและจับกับประจุบนหมู่คาร์บอกซิลิกของอัลจิเนตอย่างต่อเนื่อง ทำให้เม็ดบีทที่เกิดขึ้นได้เกิดเป็นเจลทั้งเม็ด ซึ่งไม่เหมาะสมต่องานวิจัยนี้ที่ต้องการให้ภายในเม็ดบีทยังคงเป็นสารละลายอยู่ จึงได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเม็ดบีทด้วยเทคนิคอื่นต่อไป

ตารางที่ 4.1 การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยเทคนิคเบสิกสเฟียร์ริฟิเคชัน











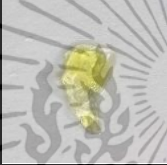

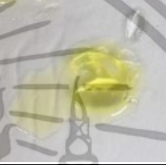
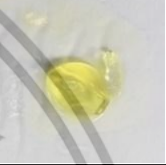

ลักษณะเม็ดบีท โซเดียมอัลจิเนต	0.5%w/v	1.0%w/v	1.5%w/v	2.0%w/v	3.0%w/v
การเจาะเม็ดบีทหลังทำ					
การเจาะเม็ดบีทหลังทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง					

4.2.1.2 การขึ้นรูปเม็ดบีทโดยวิธีรีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน (Reverse Spherification)

การศึกษาการขึ้นรูปด้วยเทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชัน จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 และ 1.0 %w/v ผนังของเม็ดบีทมีความเปราะบางมาก จึงไม่สามารถขึ้นรูปเม็ดบีทได้ ส่วนที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ 1.5, 2.0 และ 3.0 %w/v สามารถขึ้นรูปเม็ดบีทได้ และภายในเม็ดบีทยังคงเป็นของเหลวแม้เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชันในการขึ้นรูปเม็ดบีทเคอร์คูมิน อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคนี้ต้องผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ลงในสารละลายเคอร์คูมิน ทำให้สารละลายเคอร์คูมินเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคลเซียมได้สารละลายสีส้ม ซึ่งรบกวนปฏิกิริยาการวิเคราะห์วิตามินบี6 จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการขึ้นรูปเม็ดบีทโดยใช้เทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชันที่ไม่ทำให้เกิดการรบกวนปฏิกิริยา วิธีที่พัฒนาคือการนำสารละลายเคอร์คูมินไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อทำให้แข็งก่อน จากนั้นเป็ดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ลงในแม่พิมพ์เพื่อเคลือบเม็ดสารละลายเคอร์คูมิน และแช่เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสอีกครั้ง ต่อจากนั้นนำเม็ดบีทที่ได้ไปลอยในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตเพื่อให้ได้เม็ดบีทเคอร์คูมินที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม วิธีนี้ทำให้ในระหว่างขั้นตอนการทำเม็ดบีทไม่เกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายเคอร์คูมิน และสามารถคงคุณสมบัติของการขึ้นรูปเม็ดบีทได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้เทคนิครีเวิร์สสเฟียร์ริฟิเคชันในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การขึ้นรูปเม็ดบิทยโดยเทคนิครีเวิร์สเฟิรริฟิเคชัน

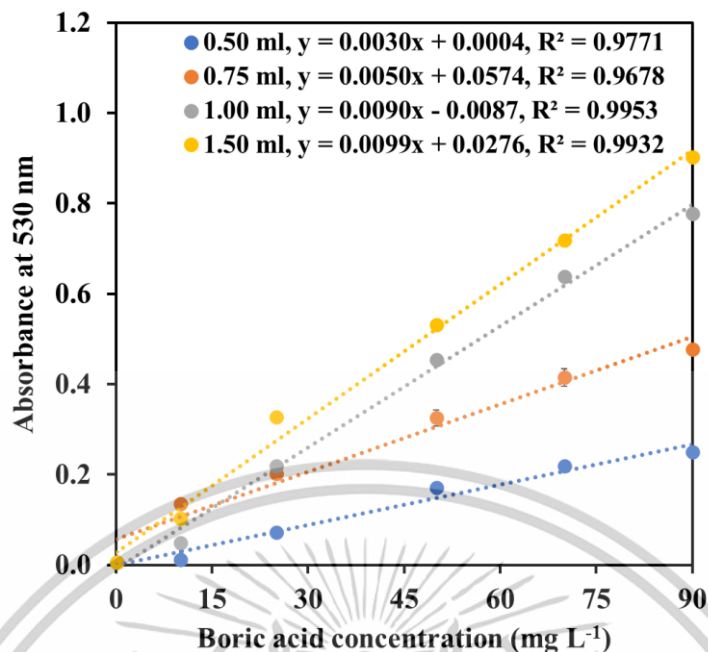
ลักษณะเม็ดบิทย แคลเซียมคลอไรด์	0.5%w/v	1.0%w/v	1.5%w/v	2.0%w/v	3.0%w/v
ลักษณะเม็ดบิทย					
การเจาะเม็ดบิทยหลังทำ					
การเจาะเม็ดบิทยหลังทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง					

4.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิทยชั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจินเต

4.2.2.1 ศึกษาปริมาณเคอร์คูมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิทย

การใช้ปริมาณที่เหมาะสมของอิมัลชันเคอร์คูมินในการสร้าง CUR_{Hydrogel} จะส่งผลต่อความเข้มข้นในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยศึกษาปริมาณอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.50 มิลลิลิตร ในการขึ้นรูป CUR_{Hydrogel} โดยควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจินเตที่ 2.0%w/v ในการศึกษาจะติดตามการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิมัลชันเคอร์คูมินและบอเรตไอออนที่ความเข้มข้น 10, 25, 50, 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของบอเรตไอออนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าค่าความชันของกราฟเส้นตรงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเคอร์คูมินเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อใช้ปริมาณอิมัลชันเคอร์คูมิน 1.50 มิลลิลิตร ให้ค่าความชันสูงที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินได้ดี อย่างไรก็ตามที่ปริมาณนี้ส่งผลให้เม็ดบิทยที่ได้มีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ขึ้นรูปและเก็บรักษาได้ยาก ดังนั้นจึงเลือกใช้อิมัลชันเคอร์คูมินที่ 1.00 มิลลิลิตรในการขึ้นรูป CUR_{Hydrogel}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



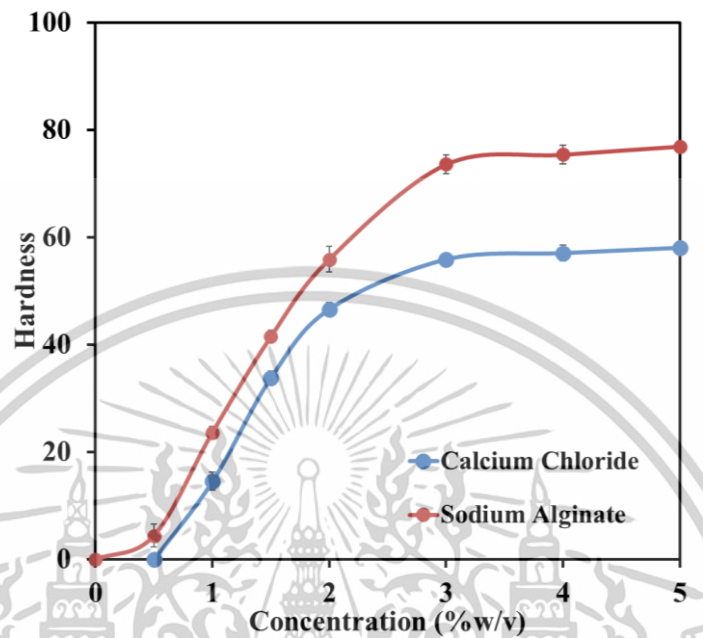
รูปที่ 4.3 ปริมาตรคอร์คิวมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิท

4.2.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสม

ความเข้มข้นของ Ca(II) และอัลจิเนตที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดบิทในชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนตส่งผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของเม็ดบิท ในการศึกษาความเข้มข้นของ Ca(II) ที่ใช้ในการขึ้นรูป จะศึกษาที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 %w/v โดยควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่ 2.0 %w/v จากผลในรูปที่ 4.4 พบว่าความแข็งแรงของ CUR_{Hydrogel} เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเข้มข้นของ Ca(II) ถึง 3.0 %w/v โดยให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 55.86 นิวตัน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 3.0 %w/v พบความค่าความแข็งแรงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Ca(II) เกิด Cross-linking ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.4 A1-A2 เป็นการใช้ Ca(II) ที่ความเข้มข้นที่ 0.5 ถึง 1.0 %w/v พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเม็ดบิทได้ และจากรูปที่ 4.4 A3-A4 เป็นการใช้ Ca(II) ที่ความเข้มข้นที่ 1.5 ถึง 2.0 %w/v พบว่าอิมัลชันคอร์คิวมินยังมีการซึมออกมานอกเม็ดบิทอยู่แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นตั้งแต่ 3.0 ถึง 5.0 %w/v ไม่พบการซึมของสารละลายอิมัลชันคอร์คิวมิน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ Ca(II) คือ 3.0 %w/v จากนั้นทำการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสม โดยทำการขึ้นรูป CUR_{Hydrogel} โดยใช้ Ca(II) เข้มข้น 3.0 %w/v และโซเดียมอัลจิเนต 0.5 ถึง 5.0 %w/v จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงของ CUR_{Hydrogel} เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต โดยที่ความเข้มข้น 3.0 %w/v ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดเท่ากับ 73.57 นิวตัน ซึ่งเป็นผลมาจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถสร้างพันธะกับ

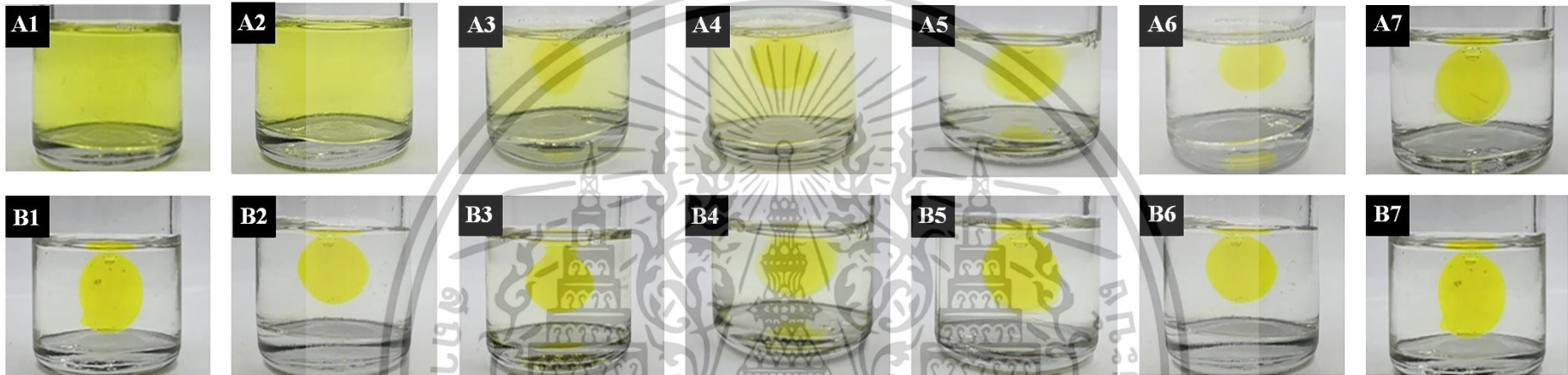
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ca(II) ได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณารูปถ่าย CUR_{Hydrogel} (รูปที่ 4.5 B1-B7) แสดงให้เห็นว่าสามารถขึ้นรูปเม็ดบิ๊ทได้ ดังนั้นความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสมคือ 3.0 %w/v



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจิเนตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิ๊ท ชั้นที่ 1 ของ Ca(II)-อัลจิเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของการขึ้นรูปเม็ดบีทชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ (A1-7) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, และ 5.0 % w/v และ (B1-7) อัลจิเนตที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, และ 5.0 % w/v

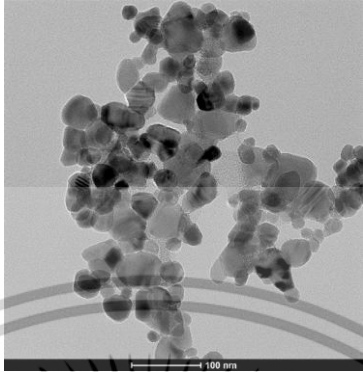
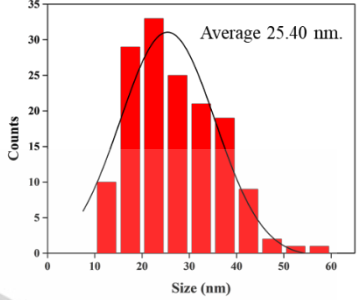

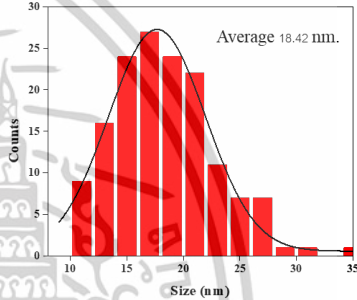
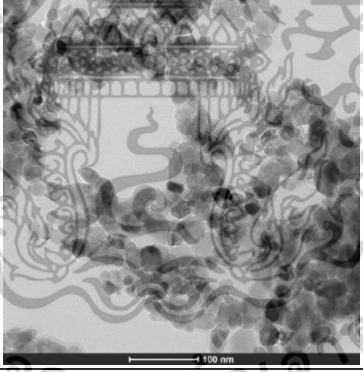
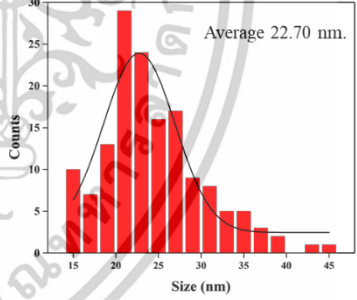
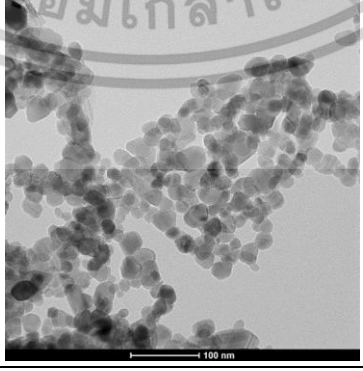
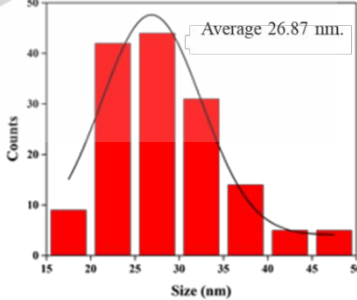
4.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิพท์ชั้นที่ 2 ของ Ca(II)-อัลจินต/ZnONPs (CUR_{Hydrogel})

4.2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

1) ศึกษาความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

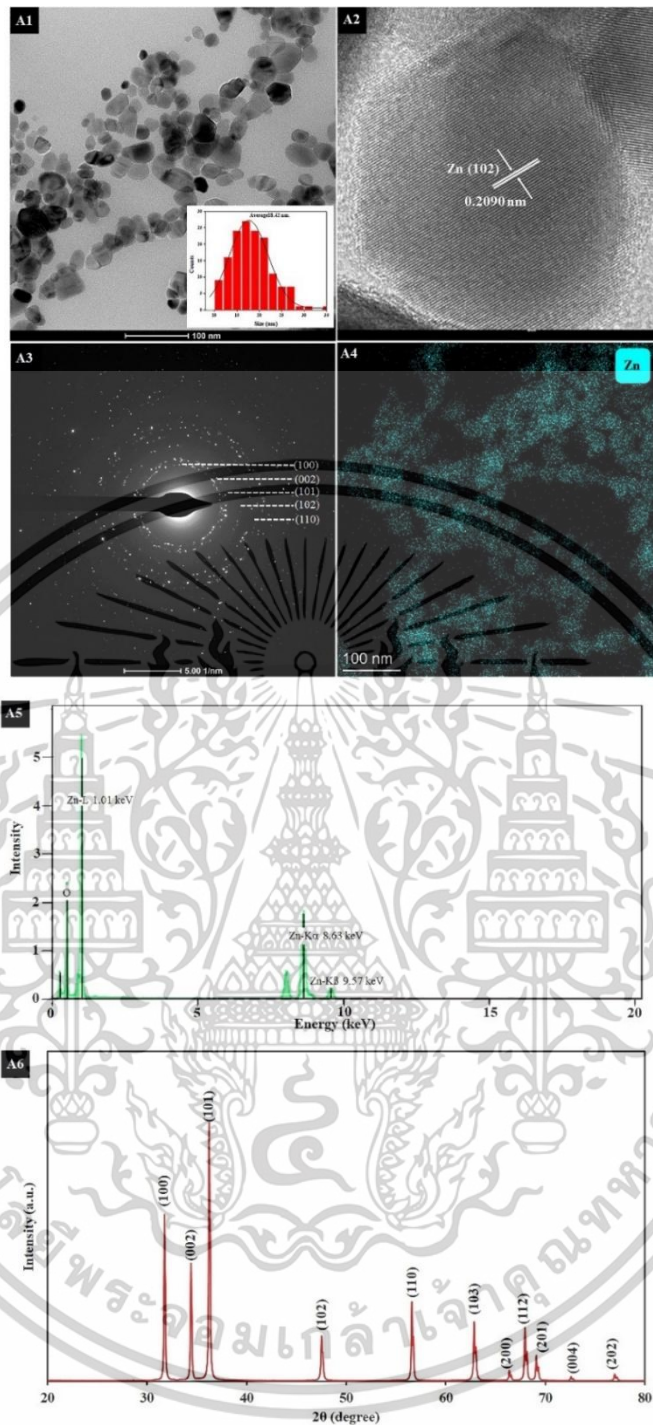
ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้กรดออกซาลิกในความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.5 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่า ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะขึ้นความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ใช้ ซึ่งกรดออกซาลิกจะทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ เกิดเป็นซิงค์ออกไซด์และเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ โดยที่ความเข้มข้นของกรดออกซาลิกต่ำที่ 0.1 โมลาร์ จะได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่เฉลี่ย 25.40 นาโนเมตร เนื่องจากมีกรดออกซาลิก ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการช่วยตกตะกอนน้อย ส่งผลให้อัตราการรวมตัวและการตกตะกอนของสารซิงค์ออกไซด์ต่ำ ส่งผลให้อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าสภาวะอื่น ในขณะที่ใช้ความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ 0.5 โมลาร์ จะได้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 18.42 นาโนเมตร เนื่องจากสารละลายกรดออกซาลิกที่ 0.5 โมลาร์มีลักษณะเป็นของเหลวใส ความหนืดต่ำ ส่งผลให้กรดออกซาลิกสามารถทำปฏิกิริยากับซิงค์อะซิเตรทได้ดี จึงได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และเมื่อใช้สารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้นสูงขึ้นที่ 1 และ 2.5 โมลาร์ จะได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเป็น 22.70 และ 26.87 นาโนเมตร เนื่องจากสารละลายกรดออกซาลิกจะมีความหนืดที่ค่อนข้างสูง เมื่อทำปฏิกิริยากับซิงค์อะซิเตรทแล้วเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ผลึกของซิงค์อะซิเตรทที่เกิดขึ้น จะมีความสามารถในการกระจายตัวที่ต่ำในสารละลายออกซาลิก ส่งผลให้อนุภาคที่เกิดขึ้นเกิดการรวมตัวได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของกรดออกซาลิกส่งผลโดยตรงต่อขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์คือ 0.5 โมลาร์ ซึ่งให้อนุภาคนาโนเฉลี่ยเล็กที่สุดที่ 18.42 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.3 ภาพ TEM และขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ความเข้มข้นของกรดออกซาลิก(M)	ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (nm)
0.1 M		
0.5 M		
1.0 M		
2.5 M		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) (รูปที่ 4.6) จากรูปที่ 4.6 (A1) พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กและมีการกระจายของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10.00 – 34.86 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ HRTEM (รูปที่ 4.6 (A2)) พบว่าระยะระหว่างระนาบ (Interplanar Distances) พบว่ามีค่าประมาณ 0.29 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับระนาบผลึกที่ (102) ของซิงค์ออกไซด์ การวิเคราะห์ในโหมด SAED (รูปที่ 4.6 (A3)) แสดงให้เห็นถึงการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (100), (002), (101), (102), และ (110) ซึ่งเป็นโครงสร้าง Wurtzite ที่เป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ ในส่วนของสเปกตรัม EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) แสดงพีคของซิงค์ที่ 1.01 keV, 8.63 keV, และ 9.57 keV (รูปที่ 4.6 (A4-A5)) ซึ่งยืนยันการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้สำเร็จ และการวิเคราะห์ XRD (X-Ray Diffraction) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (รูปที่ 4.6 (A6)) พบว่ามีพีคการสะท้อนที่ 2θ ได้แก่ 31.77° (100), 34.42° (002), 36.25° (101), 47.54° (102), 56.60° (110), 62.86° (103), และ 66.38° (112) ซึ่งตรงกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS ของซิงค์ออกไซด์ การสะท้อนพีคเหล่านี้แสดงถึงลักษณะผลึกที่ชัดเจนของโครงสร้างแบบ Wurtzite ของซิงค์ออกไซด์และยืนยันว่าอนุภาคที่ได้มีคุณภาพและความบริสุทธิ์สูง

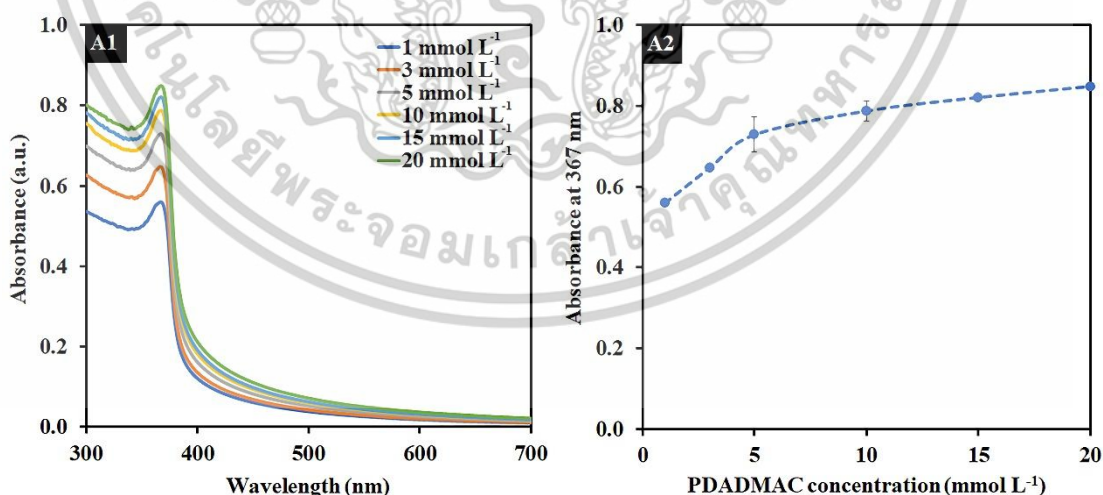


รูปที่ 4.6 TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (A1) ภาพ TEM แสดงรูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาค พร้อมกราฟแสดงขนาดอนุภาค (A2) ภาพ HRTEM แสดงระยะระนาบผลึก (A3) ภาพ SAED แสดงลำดับการจัดเรียงผลึกของซิงค์ออกไซด์ (A4) ภาพ Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุสังกะสี (A5) สเปกตรัม EDS แสดงองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง (A6) ภาพ XRD แสดงค่าระนาบผลึกของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

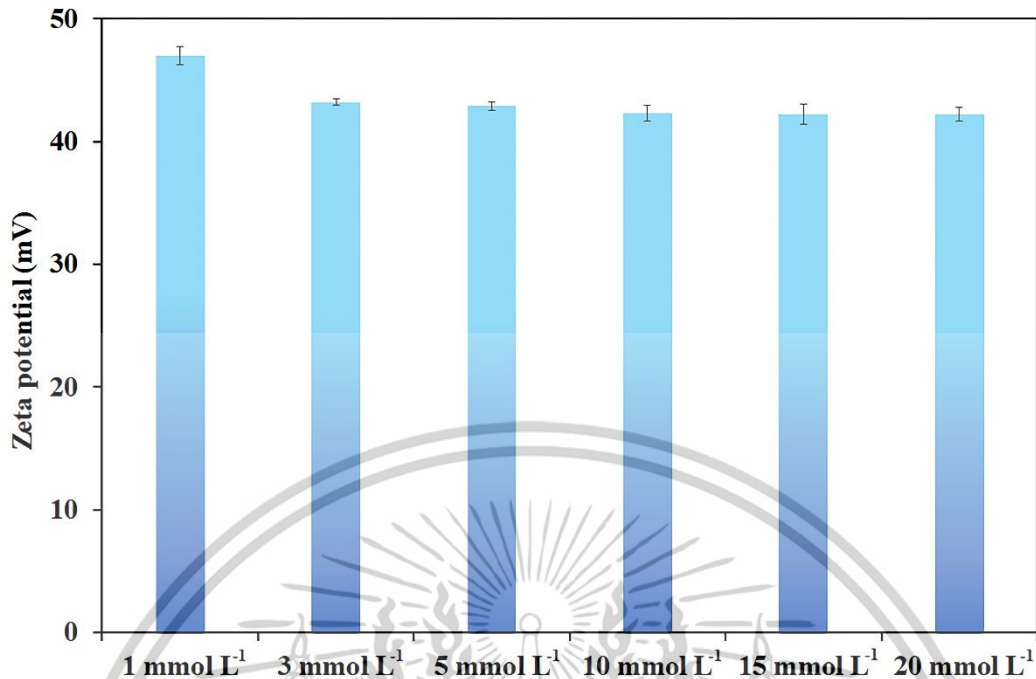
4.2.3.2 ศึกษาความเข้มข้น PDADMAC ที่เหมาะสมสำหรับการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

เม็ดบีดที่ชั้นที่ 1 Ca (II)-อัลจิเนต ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อป้องกันการสลายของอิมัลชันเคอร์คูมิน เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไม่มีประจุทำให้ไม่สามารถนำมาขึ้นรูปเม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วย PDADMAC (Poly-Diallyl-Dimethyl-Ammonium-Chloride) ซึ่งมีประจุบวก เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์กับชั้นที่ 1 ของ Ca (II)-อัลจิเนต ที่มีประจุลบ จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมแสดงของการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่กระจายตัวในสารละลาย PDADMAC จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีมากขึ้น PDADMAC เป็นสารที่มีประจุบวก สามารถจับกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีประจุลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการยึดเกาะกันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ เมื่อ PDADMAC มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถกระจายตัวในสารละลายได้ดีขึ้นและมีความเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งช่วยลดการรวมตัวของอนุภาคและเพิ่มการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของ PDADMAC เท่ากับ 10 มิลลิโมลาร์ และเมื่อทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า Zeta potential พบว่าทุกสภาวะการทดลองให้ค่าอยู่ในช่วง +42.2 ถึง +47.0 มิลลิโวล (รูปที่ 4.8) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ มีความเสถียรสามารถกระจายตัวอยู่ในสารละลายได้ ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่า PDADMAC ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ มีความเหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารละลายแขวนลอย PDADMAC-ZnONPs



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและกราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ PDADMAC-ZnONPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

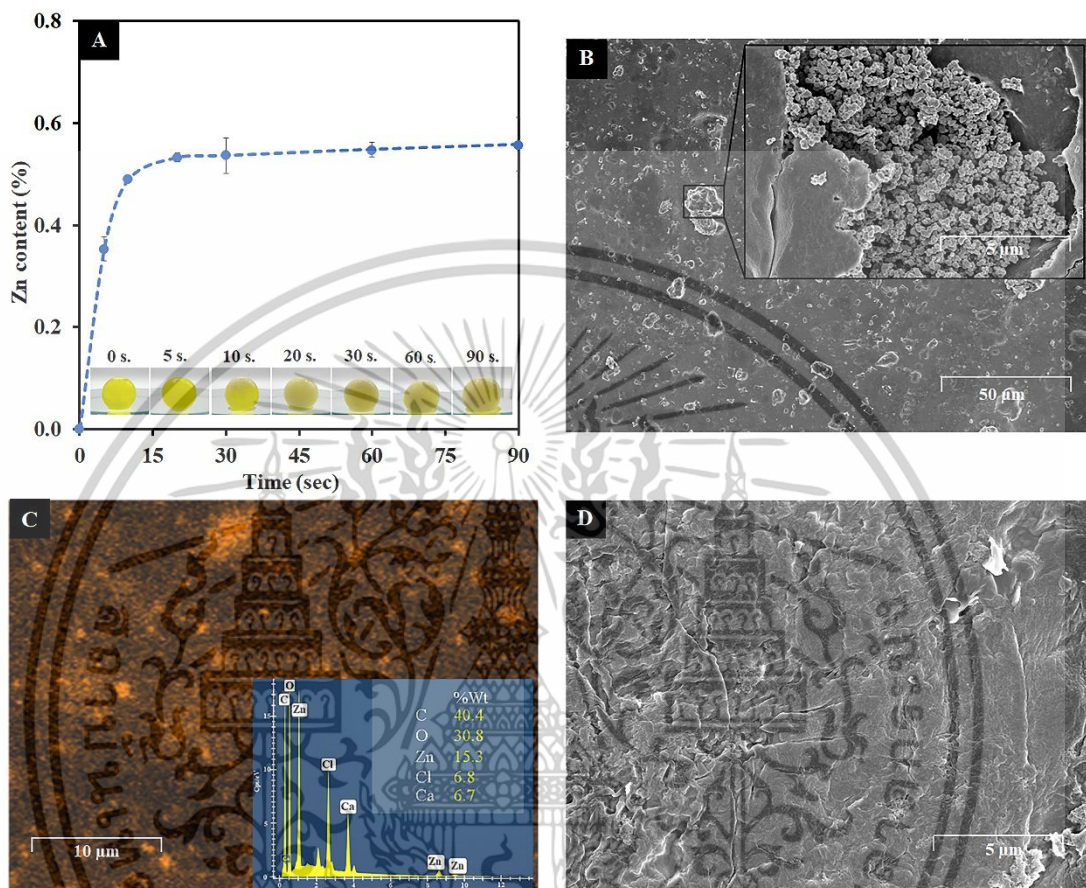


รูปที่ 4.8 ค่าศักย์ไฟฟ้าของ PDADMAC-ZnONPs ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลาย PDADMAC

4.2.3.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบเม็ดบีดด้วย PDADMAC-ZnONPs

การขึ้นรูปเม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ชั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs เพื่อป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมิน การเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของ CUR_{Hydrogel} ทำโดยการนำเม็ดบีด 1 ชั้น Ca(II)-อัลจิเนต มาแช่ในสารละลาย PDADMAC-ZnONPs จากนั้นเคลือบด้วยอัลจิเนตอีกครั้ง ระยะเวลาในการเคลือบเม็ดบีดชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต ด้วยสารละลาย PDADMAC-ZnONPs ส่งผลต่อปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวของเม็ดบีด จากการศึกษารูปที่ 4.9A พบว่าระยะเวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของเม็ดบีดชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต ส่งผลให้ปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแช่เม็ดบีดเพิ่มขึ้นจาก 5-20 วินาที และหลังจากการแช่เป็นเวลา 20 วินาทีขึ้นไป ปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของเม็ดบีดเริ่มคงที่ โดยความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.59 เป็น 0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์พบว่าหลังจากการแช่เม็ดบีดเป็นเวลา 20 วินาทีขึ้นไป ปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์คงที่ จากนั้นทำการยืนยันการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของเม็ดบีดด้วย ด้วยเทคนิค FESEM จากรูปที่ 4.9B แสดงการเคลือบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของเม็ดบีดชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต และยืนยันอนุภาคที่มีการเคลือบด้วย FESEM-EDS Mapping (รูปที่ 4.9C) ซึ่งพบว่ามีปริมาณ Zn 15.3% บนชั้นเคลือบ และเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นที่ 1 ของ Ca(II)/อัลจิเนต ภาพ FESEM (รูปที่ 4.9D) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของผิวพื้นผิวของเม็ดบีด ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาที่ 20 วินาที ในการขึ้นรูปเม็ดบีดชั้นที่ 2 หลังจากเม็ดบีดของอิมัลชันเคอร์คูมินนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูมินชั้นที่ 2 ถูกเคลือบด้วยไฮเดียมอัลจิเนตที่มีประจุลบ ส่งผลให้ความแข็งของ CUR_{Hydrogel} เพิ่มขึ้นเป็น 138.49 นิวตัน ความแข็งแรงและความต้านทานของ CUR_{Hydrogel} พบว่าอยู่ที่ 6.45×10^4 นิวตันต่อเมตร และ 1.01×10^6 นิวตันต่อตารางเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.9 การขึ้นรูป CUR_{Hydrogel} (A) การเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของ CUR_{Hydrogel} (B-C) ภาพ FESEM และสเปกตรัม EDS ของ CUR_{Hydrogel} (D) ภาพ FESEM ของเจลไฮโดรเจลทรงกลมชั้นที่หนึ่ง

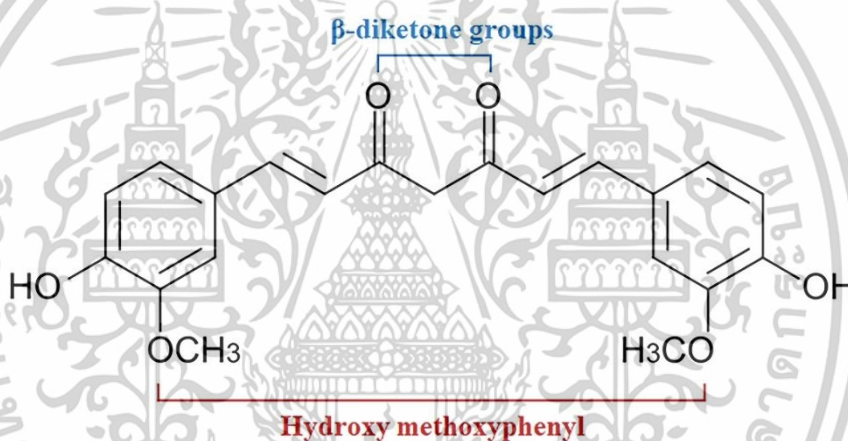
4.2.4 ศึกษาความเสถียรของ CUR_{Hydrogel}

4.2.4.1 ศึกษาความสามารถในการป้องกันแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของเม็ดบีด

โดยทั่วไปคอร์คูมินสามารถสลายตัวภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากโครงสร้างของมันประกอบด้วยวงแหวนไฮดรอกซีเมธอกซีฟีนิลที่เชื่อมโยงด้วยหมู่ β -diketone สองกลุ่ม (รูปที่ 4.10) ซึ่งพันธะ C-H ในโครงสร้างนี้มีความอ่อนแอ เนื่องจากการกระจายของอิเล็กตรอนที่ไม่สมดุลไปยังอะตอมออกซิเจนทั้งสองที่อยู่ข้างเคียง ตำแหน่งที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาลึกลับอยู่ที่ไฮโดรเจน

ในส่วนกลางของกลุ่ม β -diketone ซึ่งมีไฮโดรเจนที่สามารถหลุดออกได้ง่ายสองตัว [68] รูปที่ 4.11A เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงความเสถียรของอิมัลชันเคอร์คูมินภายในเม็ดบิทที่เตรียมแบบเม็ดบิท 1 ชั้น Ca(II)-อัลจิเนต และเม็ดบิท 2 ชั้น CUR_{Hydrogel} ที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิว จากกราฟแสดงให้เห็นว่าอิมัลชันเคอร์คูมินภายในเม็ดบิท 2 ชั้น CUR_{Hydrogel} มีความเสถียรภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ดีสามารถเก็บรักษานานถึง 28 วัน โดยค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับอิมัลชันเคอร์คูมินที่ถูกหุ้ม 1 ชั้น Ca(II)-อัลจิเนต ซึ่งอิมัลชันเคอร์คูมินจะสลายตัวภายใน 1 วัน โดยกลไกการป้องกันการสลายตัวของเคอร์คูมินมีสองกลไกที่เกี่ยวข้อง คือ การดูดซับและการสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเมื่ออนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้ พลังงานที่ดูดซับจะถูกแปลงไปเป็นแสงอินฟราเรดที่ไม่เป็นอันตราย และในขณะเดียวกันอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกไปอีกด้วย ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ช่วยให้เคอร์คูมินลดการสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ส่งผลให้มีความเสถียรและสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต [69]



รูปที่ 4.10 โครงสร้างและองค์ประกอบของเคอร์คูมิน

4.2.4.2 ศึกษาการละลายและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเม็ดบิทที่เหมาะสม

CUR_{Hydrogel} เป็นโครงข่ายสามมิติที่มีลักษณะเป็นแมคโครสโคปิกประกอบด้วยอิมัลชันเคอร์คูมินที่หุ้มด้วยชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจิเนต และชั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs โดยปกติแล้วไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บน้ำปริมาณมากเนื่องจากการมีหมู่ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic group) ในสายโพลีเมอร์ การจัดเก็บ CUR_{Hydrogel} ให้มีคงประสิทธิภาพในการใช้งานจำเป็นต้องเก็บรักษาแบบเปียก และเพื่อเพิ่มความสะดวกต่อการใช้ CUR_{Hydrogel} จึงได้ศึกษาการจัดเก็บ CUR_{Hydrogel} ในน้ำปราศจากไอออนและในสารละลายบอเรตเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิต่างๆ รูปที่ 4.11B แสดงผลของเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่ใช้ในการเก็บรักษาแพร่ผ่านเข้าสู่ CUR_{Hydrogel} โดยได้ศึกษาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18, 4 และ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างของค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเก็บ CUR_{Hydrogel} ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ -18 และ 4 องศาเซลเซียส มีการซึมผ่านของสารละลายเข้าสู่เม็ดบีดต่ำเมื่อเทียบกับการเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่เก็บไว้ในสารละลายบอเรตไอออน อย่างไรก็ตามการเก็บ CUR_{Hydrogel} ในสารละลายบอเรตไอออนให้ค่าเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านที่สูงกว่าเล็กน้อย และเม็ดบีดมีการเปลี่ยนสีของอิมัลชันเคอร์คูมิน เนื่องจากสารละลายบอเรตไอออนซึมผ่านเข้าไปในเม็ดบีดและทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมิน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานิน ซึ่งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ส่งผลให้เกิดการรบกวนการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ดังนั้น การเก็บรักษา CUR_{Hydrogel} ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออนจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเก็บรักษา CUR_{Hydrogel}

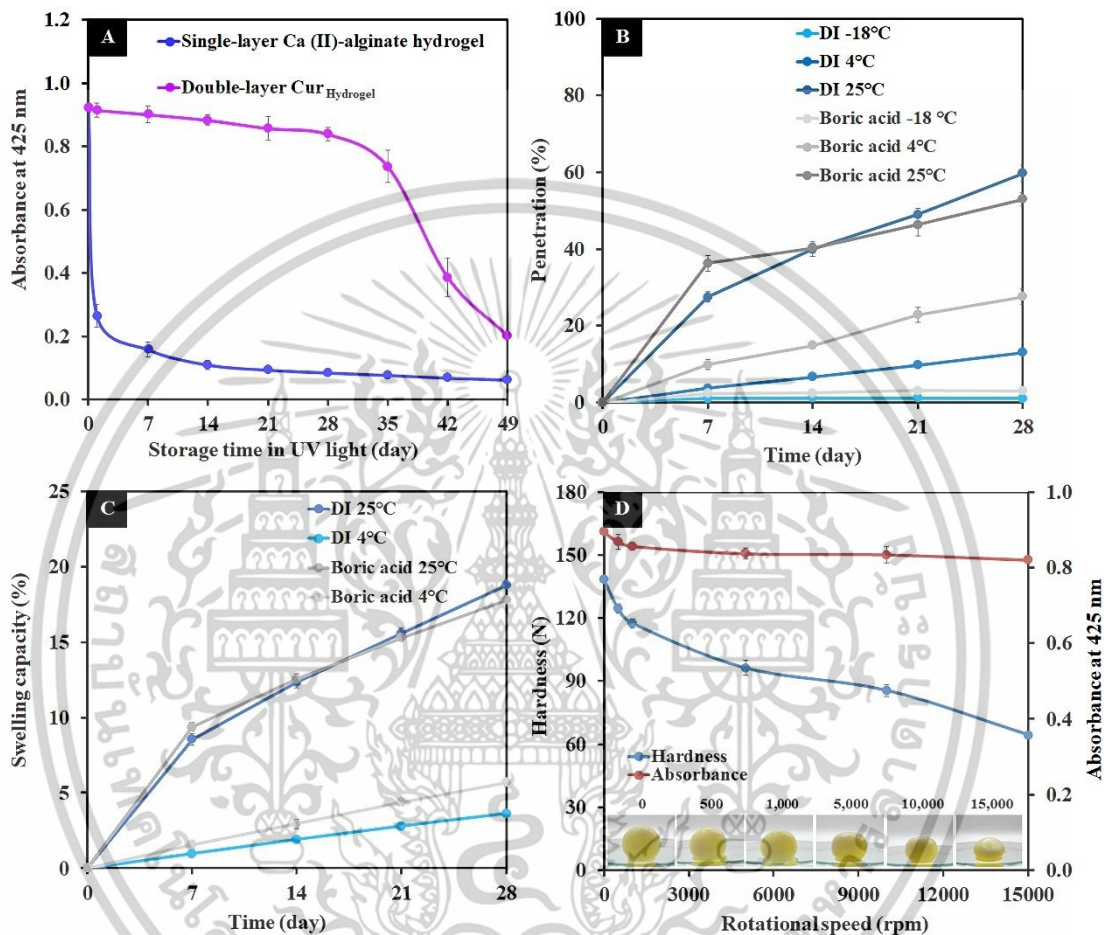
4.2.4.3 ศึกษาการอมน้ำของเม็ดบีด (Swelling capacity)

เปอร์เซ็นต์การอมน้ำของ CUR_{Hydrogel} คำนวณจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของ CUR_{Hydrogel} ที่เก็บรักษาในน้ำปราศจากไอออนและในกรดบอริกเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 9 ที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.11C พบว่า CUR_{Hydrogel} มีเปอร์เซ็นต์การอมน้ำเพิ่มขึ้นทั้งในน้ำปราศจากไอออนและกรดบอริกเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ pH 9 ที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่าการเก็บ CUR_{Hydrogel} ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การอมน้ำที่น้อยกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลช้าลง ส่งผลให้การดูดซับน้ำลดลง อย่างไรก็ตาม การเก็บ CUR_{Hydrogel} ในกรดบอริกทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของอิมัลชันเคอร์คูมิน เนื่องจากสารละลายบอเรตไอออนซึมผ่านเข้าไปในเม็ดบีดและทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมินเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานิน ซึ่งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ส่งผลให้เกิดการรบกวนในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การอมน้ำของ CUR_{Hydrogel} สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า CUR_{Hydrogel} ควรเก็บรักษาในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อให้มีความเสถียรสูงสุด

4.2.4.4 ศึกษาความแข็งแรงของเม็ดบีด

การทดสอบความแข็งแรงของ CUR_{Hydrogel} ทำการทดสอบโดยการด้วยการนำ CUR_{Hydrogel} ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 500 ถึง 15,000 รอบต่อนาที หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer จากภาพถ่ายภายในรูปที่ 4.11D แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของ CUR_{Hydrogel} มีการเปลี่ยนแปลง โดยจากเดิมที่มีลักษณะทรงกลม จะเริ่มมีการเปลี่ยนรูปร่างเป็นทรงรีมากขึ้นตามความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยงที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer จากกราฟรูปที่ 4.11D แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ความแข็งแรงของ CUR_{Hydrogel} จะลดลงตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันเมื่อนำ CUR_{Hydrogel} มาวัดค่าการดูดกลืนเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงของอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร พบว่าค่าการดูดกลืนแสงไม่มีเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CUR_{Hydrogel} มีความแข็งแรงสูง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า CUR_{Hydrogel} ความแข็งแรงสูงสามารถทนต่อการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบได้มากถึง 15,000 รอบต่อนาที โดยไม่เกิดการแตกและไม่มีการเปลี่ยนแปลงในค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมิน

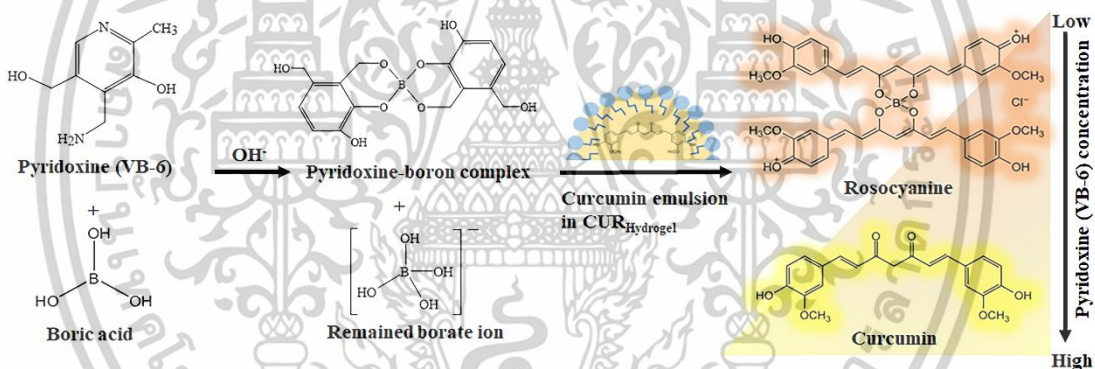


รูปที่ 4.11 ความเสถียรของ CUR_{Hydrogel} ในสภาวะต่าง ๆ (A) ความสามารถของอนุภาคนาโนซึ่งคือ ออกไซด์ในการป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมิน (B) เปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของสารละลายที่ใช้ ในการจัดเก็บ CUR_{Hydrogel} ที่อุณหภูมิต่างกัน (C) เปอร์เซ็นต์การอมน้ำของ CUR_{Hydrogel} ที่จัดเก็บใน อุณหภูมิต่างกัน (D) ความแข็งแรงและค่าการดูดกลืนแสงของ CUR_{Hydrogel} ที่นำไปปั่นเหวี่ยงที่ ความเร็วรอบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี 6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 โดยการใช CUR_{Hydrogel} (รูปที่ 4.12) ทำโดยการผสมสารละลายบอเรตไอออนกับวิตามินบี 6 ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเจาะเม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ให้สารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินไหลลงไปผสมกับสารผสมก่อนหน้า ผสมสารละลายให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการถ่ายรูประบายที่ได้และวัดค่าความเข้มของสีเขียว กลไกของการวิเคราะห์นี้อาศัยปฏิกิริยาสองขั้นตอน โดยในขั้นแรกบอเรตไอออนจะทำปฏิกิริยากับวิตามินบี 6 ภายใต้สภาวะเบส จนเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไพริดอกซิน-โบรอน ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีสี จากนั้นบอเรตไอออนที่เหลืออยู่จะทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมิน ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่าโรโซไซยานินซึ่งมีสีส้มแดง การเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายจากสีเหลืองไปเป็นสีส้ม สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากปริมาณบอเรตไอออนที่เหลืออยู่จะลดลงเมื่อมีวิตามินบี 6 มากขึ้น ส่งผลให้เกิดโรโซไซยานินลดลง และสีของสารละลายจะเกิดเป็นสีเหลือง

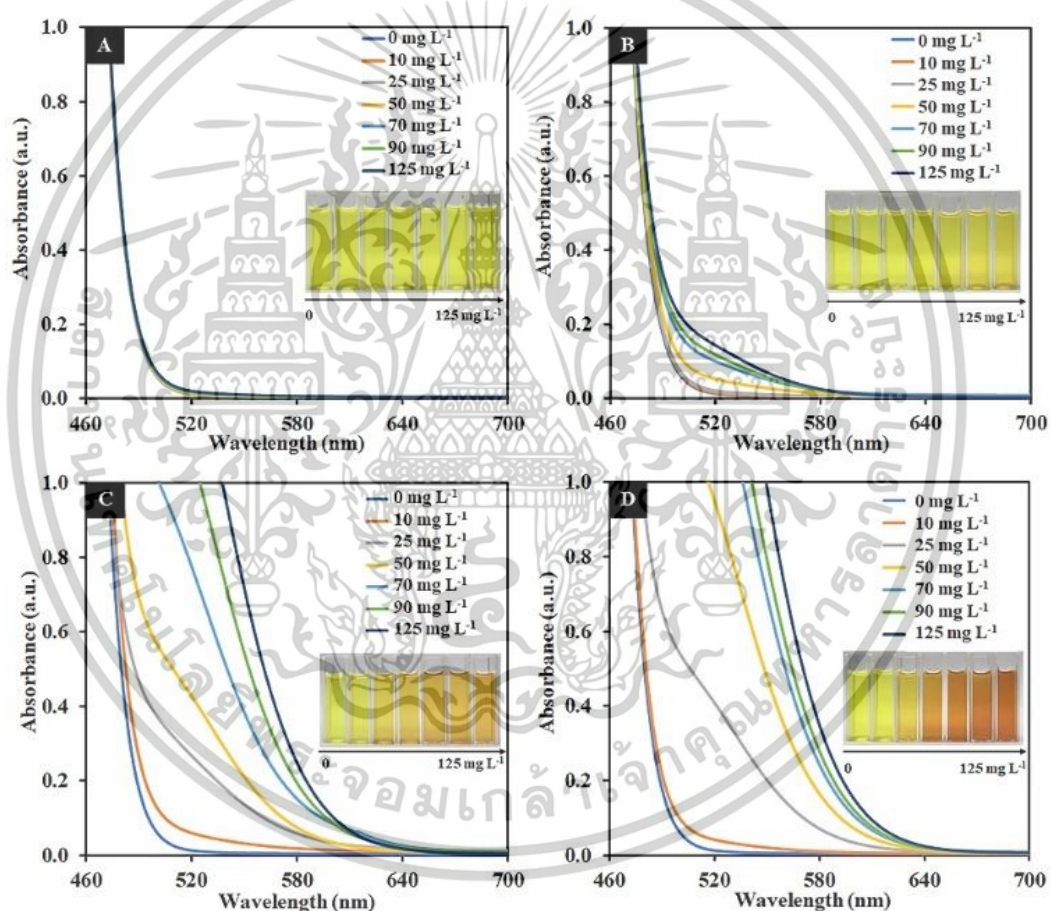


รูปที่ 4.12 กลไกการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 โดยใช้สารละลายวิตามินบี 6 กรดบอริก และเคอร์คูมิน

4.3.1 ศึกษา pH ของกรดบอริกที่เหมาะสม

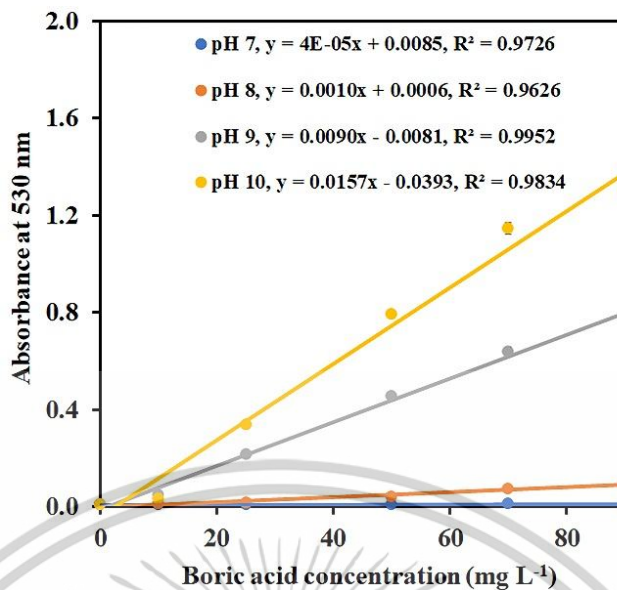
การศึกษา pH ของกรดบอริกที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ถือเป็นเรื่องสำคัญอย่างมาก เนื่องจากการใช้กรดบอริกที่ pH ต่างกันจะส่งผลต่อสีของสารละลายสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษา pH ของกรดบอริกที่ pH 7 ถึง 10 จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่า pH ของกรดบอริกต่ำกว่า 9 สารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินหรือสารที่มีสีส้มแดงที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกกับเคอร์คูมินยังไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากกรดบอริกมีค่า pK_a เท่ากับ 9.2 [34] ซึ่งยังคงอยู่ในรูปแบบที่ไม่แตกตัว (H_3BO_3) ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเคอร์คูมินได้ ส่งผลให้ความชันของกราฟเส้นตรงในการเกิดโรโซไซยานินของปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและเคอร์คูมิน ที่กรดบอริก pH 7 และ 8 ต่ำมาก และไม่พบการเกิดสีส้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดงของโรโซไซยานิน (รูปที่ 4.13 (A-B)) แต่เมื่อค่า pH ของกรดบอริกเท่ากับ 9 และ 10 กรดบอริกจะเปลี่ยนเป็นรูปที่เกิดการแตกตัวเป็นบอเรตไอออน ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเคอร์คูมินและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินได้ ทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม (รูปที่ 4.13 (C-D)) จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าความไวของการตรวจวัดซึ่งดูจากความชันของกราฟเส้นตรงที่ pH ของกรดบอริกเท่ากับ 9 และ 10 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามที่กรดบอริก pH10 ให้ค่าความเป็นเส้นตรงที่ต่ำกว่าที่ pH 9 เนื่องจากเคอร์คูมินมีการสลายตัวที่ pH มากกว่า 10 [70] ซึ่งทำให้หลังจากกรดบอริกทำปฏิกิริยากับเคอร์คูมินและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินแล้ว สีที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสลายตัวของเคอร์คูมิน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า pH ของกรดบอริกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาเซ็นเซอร์วิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 คือ pH9



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินและกรดบอริกที่ pH แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

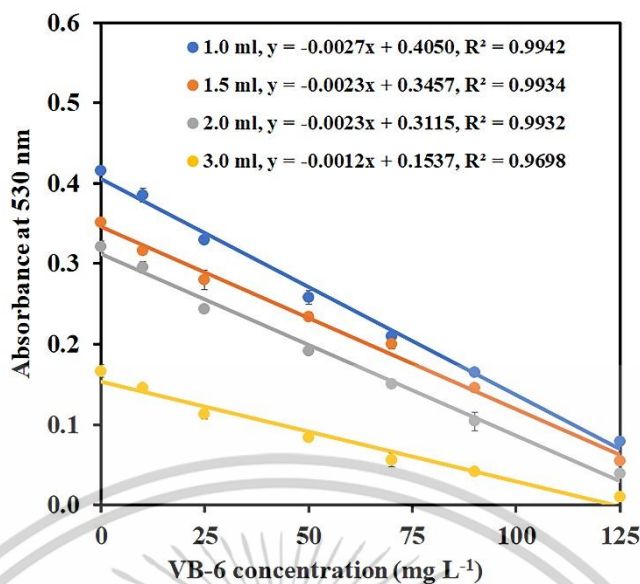


รูปที่ 4.14 กราฟเส้นตรงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินและกรดบอริกที่ pH ต่างกัน โดยใช้กรดบอริกเข้มข้น 0-90 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 ศึกษาปริมาณวิตามินบี6 ที่เหมาะสมในการตรวจวัด

จากการศึกษาปริมาณวิตามินบี6 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาสำหรับวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ปริมาณวิตามินบี6 ที่ใช้ในการตรวจวัดส่งผลต่อความไวในการตรวจวัด เนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 จะต้องทำการผสมสารละลายวิตามินบี6 กับกรดบอริก pH 9 ให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไพริดอกซิน-โบรอนก่อน จากนั้นบอเรตไอออนที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมินที่ถูกบรรจุไว้ใน CUR_{Hydrogel} เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานิน ปริมาณวิตามินบี6 ที่ใช้จะส่งผลต่อความเข้มสีของสารละลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.15 แสดงกราฟเส้นตรงพล็อตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร กับ ความเข้มข้นของวิตามินบี6 โดยการใช้ปริมาณวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน คือ 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิกรัม จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของวิตามินบี6 ความชันของกราฟเส้นตรงจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารละลายวิตามินบี6 เทียบได้กับการเพิ่มความเข้มข้นของวิตามินบี6 เมื่อเปรียบเทียบความไวของการตรวจวัดโดยดูจากความชันและเปรียบเทียบความเป็นเส้นตรงจะเห็นได้ว่า การใช้วิตามินบี6 ปริมาตร 1 มิลลิกรัม ให้ความไวและความเป็นเส้นตรงที่มากที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้วิตามินบี6 ปริมาตร 1 มิลลิกรัม มีความเหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

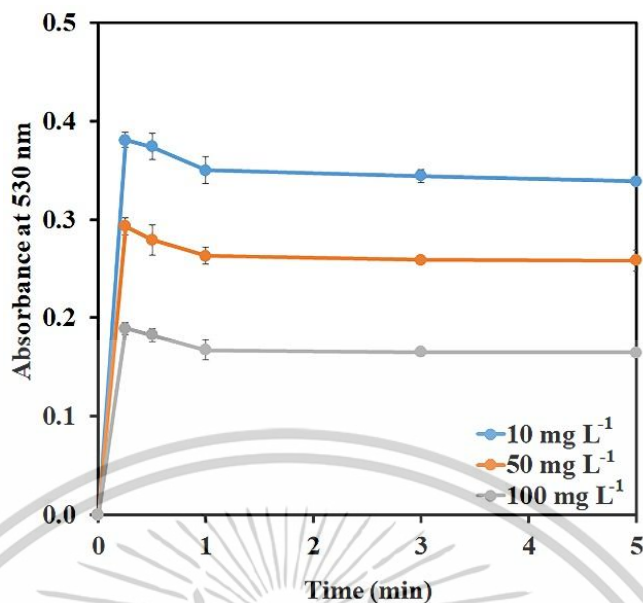


รูปที่ 4.15 กราฟเส้นตรงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้ปริมาตรวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน

4.3.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6

การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและ CUR_{Hydrogel} เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหากกรดบอริกยังทำปฏิกิริยากับวิตามินบี6 และเกิดสารประกอบเชิงไพริดอกซิน-โบรอนไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินที่มากเกินไป และทำให้การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 เกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการวิเคราะห์ต้องใช้บอเรตไอออนที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับอิมัลชันเคอร์คูมินเพื่อดูสีของสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ที่เหมาะสมโดยใช้วิตามินบี6 ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับกรดบอริก pH 9 เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0.25, 0.50, 1.00, 3.00, และ 5.00 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ได้ผลดังรูปที่ 4.16 จากการศึกษาพบว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ที่ระยะเวลา 0.25 และ 0.50 นาที ค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินมีค่าที่สูง เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไพริดอกซิน-โบรอนยังไม่สมบูรณ์ ทำให้กรดบอริกเกิดปฏิกิริยากับเคอร์คูมินมากกว่าความเป็นจริง แต่เมื่อให้วิตามินบี6 ทำปฏิกิริยากับกรดบอริกในระยะเวลาที่นานขึ้น พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินจะลดลงและเริ่มคงที่ที่ 1 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลา 1 นาทีเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

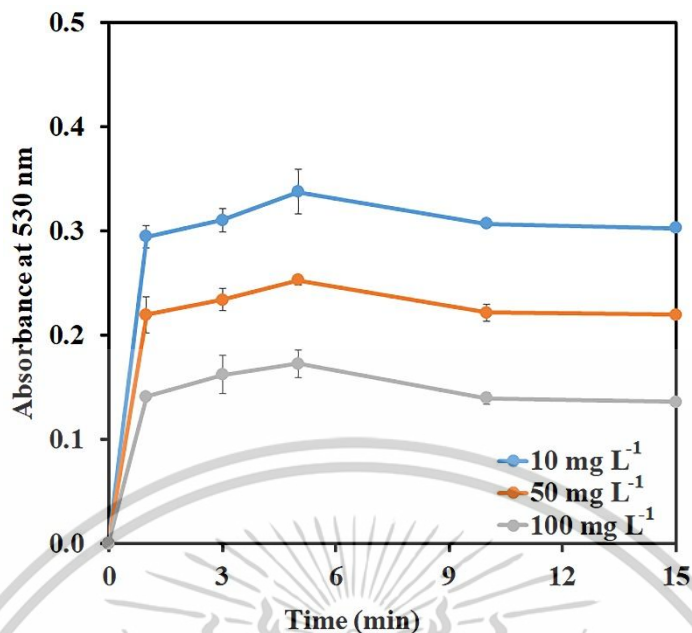


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบี6 และกรดบอริกที่เหมาะสม ในช่วง 0.25, 0.50, 1.00, 3.00 และ 5.00 นาที

4.3.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและ CUR_{Hydrogel}

การศึกษเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือ และ CUR_{Hydrogel} เป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 เนื่องจากหากระยะเวลาในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินน้อยเกินไปอาจทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเนื่องจากยังเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ในทางกลับกันหากทิ้งสารละลายไว้นานเกินไป ก็อาจทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเช่นกันเนื่องจากโดยปกติแล้ว อิมัลชันเคอร์คูมินสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและอิมัลชันเคอร์คูมิน จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดยใช้วิตามินบี6 เข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 1 นาที และศึกษาระยะเวลากการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือกับอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 1, 3, 5, 10 และ 15 นาที จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือกับอิมัลชันเคอร์คูมินคือ 5 นาที โดยจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในระยะเวลา 5 นาที สารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และยังไม่มี การสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเคอร์คูมินและกรดบอริกที่เหมาะสมในช่วง 1, 3, 5, 10 และ 15 นาที

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}

ตัวแปรที่ศึกษา	สถานะที่เลือก
ศึกษา pH ของกรดบอริก	pH 9
ศึกษาปริมาณของวิตามินบี6	1 มิลลิลิตร
ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6	1 นาที
ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและ CUR _{Hydrogel}	5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

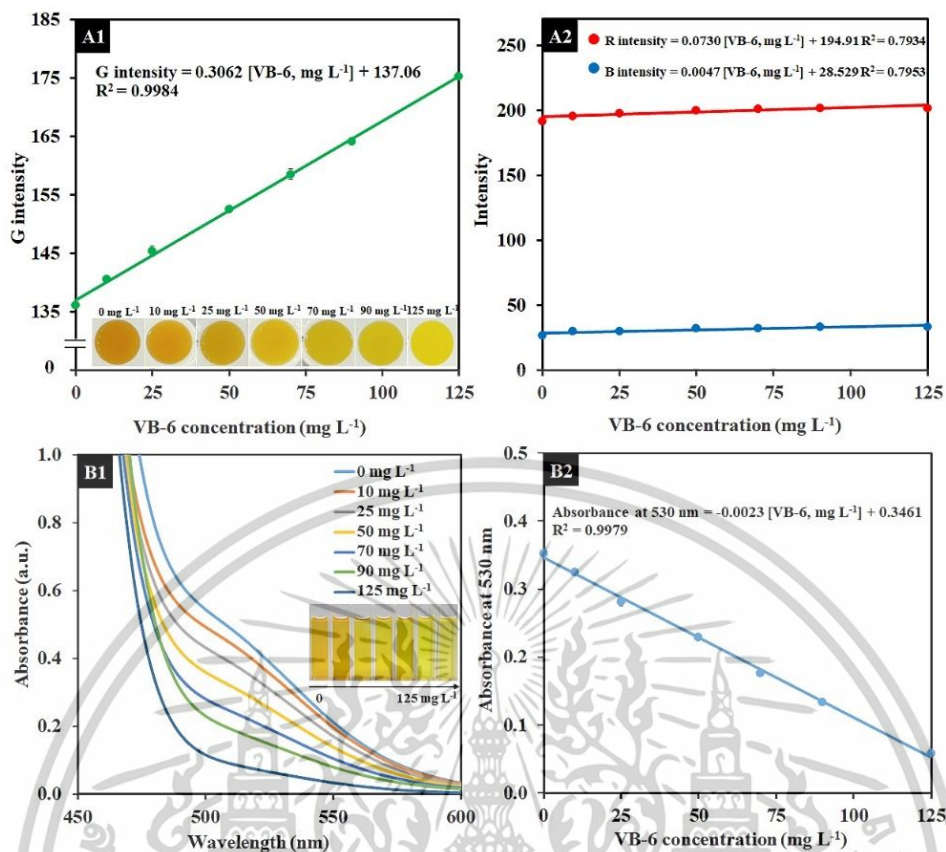
4.4 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}

4.4.1 ศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity)

จากการศึกษาการพัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ปฏิกิริยาระหว่างวิตามินบี6 กรดบอริก และ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือที่แสดงความเข้มสีของสารละลายที่เกิดขึ้นในสามสีหลัก ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) โดยการศึกษาการเลือกวิเคราะห์ค่าสี RGB ที่เหมาะสม จะทำการศึกษาวิตามินบี6 ในช่วงความเข้มข้น 10-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการถ่ายภาพและหาค่าสี RGB แต่ละสีโดยใช้โปรแกรม Image J และนำค่าที่ได้ไปพลอตกราฟเส้นตรงระหว่างความเข้มสีและความเข้มข้นของวิตามินบี6 จากรูปที่ 4.18A แสดงกราฟเส้นตรงมาตรฐาน (Calibration curve) ของค่าความเข้มสีแดง เขียว และสีน้ำเงิน ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่ จากกราฟความเข้มของสีเขียว (รูปที่ 4.18(A1)) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเข้มของสีแดงและสีน้ำเงิน (รูปที่ 4.18(A2)) พบว่าความเข้มของสีเขียว (G Intensity) มีความชันและมีความเป็นเส้นตรงสูงที่สุด โดยได้สมการเส้นตรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 คือ $G \text{ intensity} = 0.3062 [\text{VB-6, mg L}^{-1}] + 137.06$ ($R^2 = 0.9984$) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 จากกราฟวิเคราะห์ค่าความเข้มสีเขียว

นอกจากการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและวัดความเข้มของสีเขียวแล้ว ยังทำการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ด้วย UV-Vis Spectrophotometry จากรูปที่ 4.18B แสดงสเปกตรัมและกราฟเส้นตรงมาตรฐานของสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานิน ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์วิตามินบี6 ในช่วงความเข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเหลืองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของวิตามินบี6 ซึ่งได้สมการเส้นตรง คือ $\text{Absorbance at 530 nm} = -0.0023 [\text{VB-6, mg L}^{-1}] + 0.3461$ ($R^2 = 0.9979$) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีและความเข้มข้นของวิตามินบี6 อย่างชัดเจน โดยสมการเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตรนี้สามารถใช้ในการวัดปริมาณวิตามินบี6 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและวัดความเข้มของสีเขียว นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการวัดความเข้มของสีเขียวและการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันและเป็นที่น่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยทั้งสองเทคนิคนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมคุณภาพและตรวจสอบความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีวิตามินบี6 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟเส้นตรงมาตรฐาน (Calibration curve) แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ที่เข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร (A1) ค่าความเข้มของสีเขียว (A2) ค่าความเข้มของสีแดงและสีน้ำเงิน (B1-B2) สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงและกราฟเส้นตรงมาตรฐานของโรโซไซยานินในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ที่ความเข้มข้น 0-125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ UV-Vis Spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ศึกษาความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

การศึกษาค่าความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) โดยทำการวิเคราะห์วิตามินบี6 เข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มชนละ 10 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.5 จากการศึกษาวิธีการวิเคราะห์วิตามินบี6 ที่ได้พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการวิเคราะห์ซ้ำได้ดี โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่ความเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากับ 0.20%, 0.27% และ 0.24% ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าร้อยละการคืนกลับซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของวิธีการตรวจวัดพบอยู่ในช่วง 100.52-102.82% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้มีความถูกต้องและแม่นยำที่สูง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6

Methods	Standard added (mg L ⁻¹)	Found value (Mean±SD, mg L ⁻¹)	Accuracy (%)	Precision (%RSD)
Colorimetric	10	10.21 ±0.29	102.10	0.20
Sensor	50	50.26 ±0.41	100.52	0.27
	100	102.84 ±0.40	102.84	0.24

4.4.3 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (Limit of Quantitation, LOQ)

ในการศึกษาหาขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOQ) ได้ทำการตรวจวัดสารละลายแบบलगค์ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า LOD และ LOQ โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope of calibration (G Intensity)}}$$

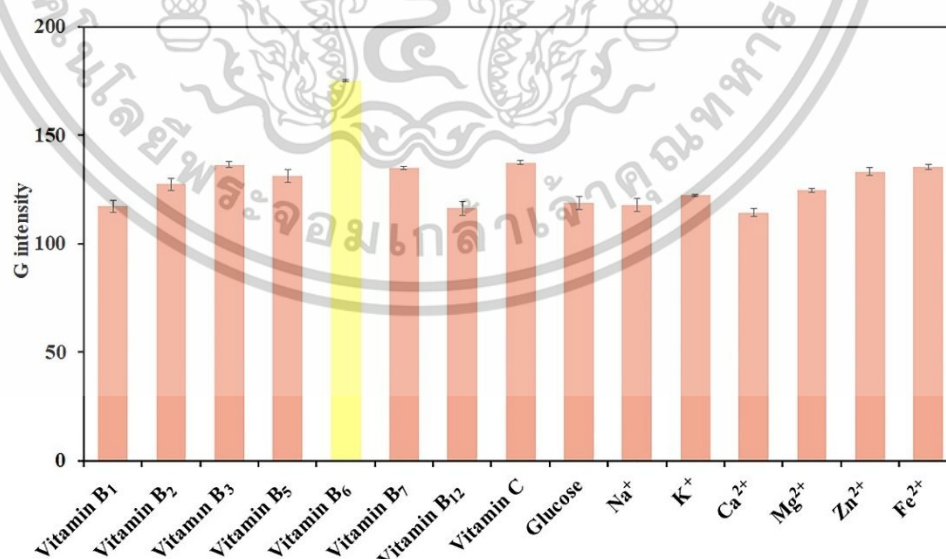
$$\text{LOQ} = \frac{10 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope of calibration (G Intensity)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือ และวัดความเข้มของสีเขียว (G Intensity) จากการศึกษาพบว่าค่า LOD และ LOQ เท่ากับ 2.93 และ 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

4.4.4 ศึกษาความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} (Interferences study)

การศึกษาความจำเพาะของเซ็นเซอร์ที่พัฒนาในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 (รูปที่ 4.19) โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) ได้ทำการศึกษาวิตามินละลายน้ำชนิดต่าง ๆ ที่พบในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน อาทิ สารละลายมาตรฐานโทอามีน (วิตามินบี1), ไรโบฟลาวิน (วิตามินบี2), ไนอะซินาไมด์ (วิตามินบี3), แพนโทเทนิคแอซิด (วิตามินบี5), ไบโอดีน (วิตามินบี7), โคบาลามิน (วิตามินบี12), กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) รวมถึงอนุภาคแอนไอออนและแคทไอออนต่าง ๆ ที่พบในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน อาทิเช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} และ Fe^{2+} และน้ำตาลกลูโคส โดยนำสารรบกวนต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้มาทำการวิเคราะห์ที่เชิงสีด้วย CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือ และวัดความเข้มของสีเขียว (G Intensity) โดยใช้ไนอะซินาไมด์ (วิตามินบี3), ไบโอดีน (วิตามินบี7) และ Zn^{2+} เข้มข้น 6,250 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือ 50 เท่า ของความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์วิตามินบี6 ได้ และใช้โทอามีน (วิตามินบี1), ไรโบฟลาวิน (วิตามินบี2), แพนโทเทนิคแอซิด (วิตามินบี5), โคบาลามิน (วิตามินบี12), กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี), กลูโคส, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Fe^{2+} เข้มข้น 12,500 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือ 100 เท่า ของความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์วิตามินบี6ได้



รูปที่ 4.19 ความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาความจำเพาะของวิธีการวิเคราะห์ (รูปที่ 4.19) พบว่าการวิเคราะห์สารรบกวนที่พบในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสีส้มเป็นสีเหลือง แม้จะทำการตรวจวัดที่ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ได้ถึง 50 และ 100 เท่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) เหมาะสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามิน

4.4.5 ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ด้วยวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC

การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) โดยการใช้ตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามินทั้งหมด 4 ยี่ห้อ ทดสอบโดยทำการเติมสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 ลงในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามินเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการวิเคราะห์และเปอร์เซ็นต์การคืนกลับแสดงดังตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ยังตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานโดยใช้ UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC และทำการเติมสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 ลงในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามินเข้มข้น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับของวิธี UV-Vis Spectrophotometry อยู่ในช่วง 98.62-104.80% วิธี HPLC อยู่ในช่วง 95.25-103.60% และวิธีวิเคราะห์เชิงสีที่พัฒนาขึ้น อยู่ในช่วง 99.84-103.03% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 0.06-1.22% นอกจากนี้ยังนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ของทั้ง 3 วิธีการไปยืนยันความแตกต่างโดยการทดสอบ ANOVA test ดังตารางที่ 4.7 จากการศึกษาพบว่า $F_{stat} = 1.56 \times 10^{-4}$ ซึ่งน้อยกว่า $F_{crit} = 3.20$ แสดงให้เห็นว่าทั้งสามวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามิน โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือมีความถูกต้อง แม่นยำและสามารถวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือกับงานวิจัยอื่น ๆ สรุปผลดังตารางที่ 4.8 วิธีการวิเคราะห์เชิงสีที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงความแปลกใหม่อย่างชัดเจน และมีความแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 อื่น ๆ โดยมีช่วงการตรวจสอบที่กว้างกว่า และสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม แม้ว่าความไวของวิธีการนี้สำหรับการหาปริมาณวิตามินบี6 จะต่ำกว่าการศึกษาผลงานอื่น ๆ แต่ก็ถือว่ายอมรับได้และเหมาะสมสำหรับการหา

ปริมาณวิตามินบี6 ในตัวอย่างเครื่องดื่มเสริมวิตามิน

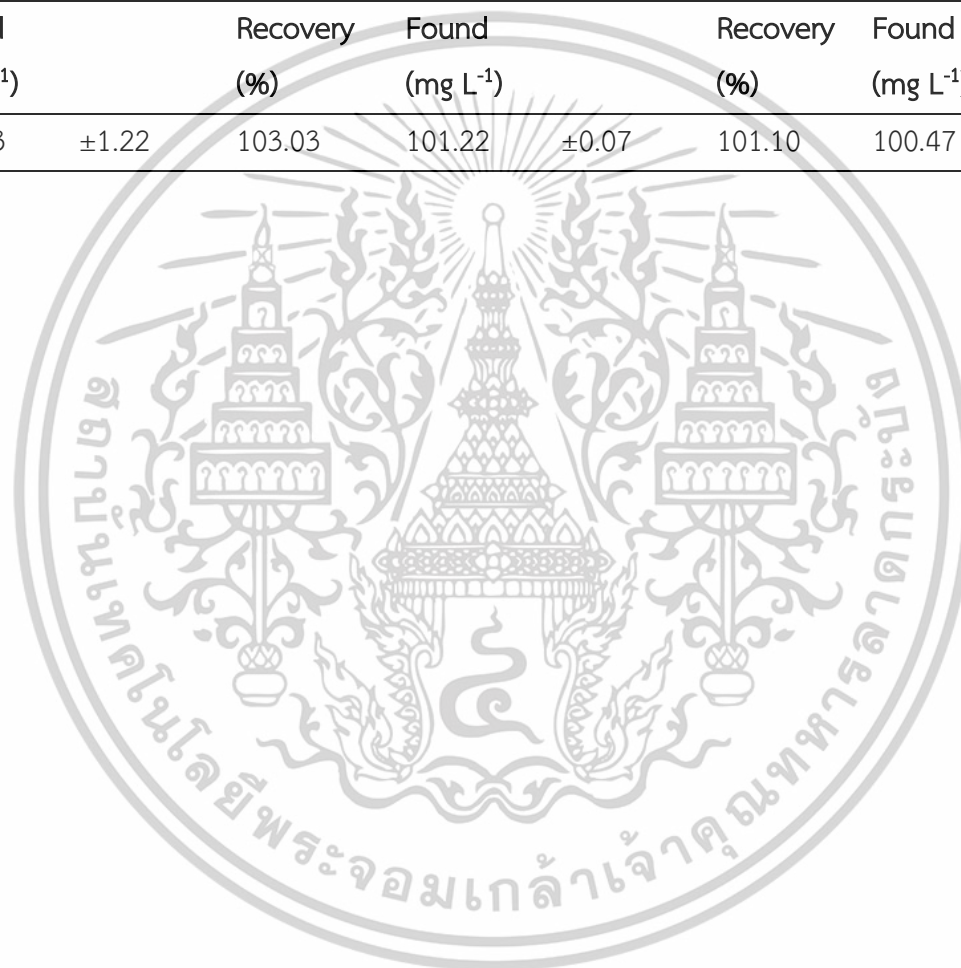
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ในเครื่องดื่มเสริมวิตามินโดยใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและวัดความเข้มของสีเขียว เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC

Functional Drink Sample	Added	Smartphone RGB Camera-Based			UV-Vis Spectrophotometry		HPLC			
		Colorimetric Sensor of CUR _{Hydrogel}			Found	Recovery	Found	Recovery		
		Found (mg L ⁻¹)	±	Recovery (%)	Found (mg L ⁻¹)	±	Found (mg L ⁻¹)	±	Recovery (%)	
Brand 1	0	4.29	±0.30	-	4.37	±2.45	-	4.79	±0.61	-
	10	14.28	±0.06	99.90	14.82	±0.50	104.50	15.15	±2.13	103.60
	50	54.30	±0.47	100.02	55.89	±1.09	103.04	54.08	±3.78	98.58
	100	104.27	±0.59	99.98	106.37	±0.31	101.97	100.22	±0.93	95.25
Brand 2	0	0.84	±0.76	-	0.94	±0.06	-	0.96	±0.10	-
	10	11.06	±1.05	102.20	10.85	±0.86	99.10	11.24	±1.52	102.80
	50	50.95	±0.16	100.22	51.38	±2.60	100.88	52.75	±2.06	103.58
	100	101.05	±0.69	100.21	101.08	±0.13	100.14	97.83	±3.63	96.87
Brand 3	0	3.42	±0.52	-	1.87	±0.79	-	2.57	±0.53	-
	10	13.65	±0.59	102.30	12.35	±1.06	104.80	12.88	±0.42	103.10
	50	53.41	±1.10	99.98	51.18	±2.26	98.62	52.62	±4.45	100.10
	100	103.26	±0.47	99.84	103.1	±2.98	101.23	102.35	±3.79	99.87
Brand 4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	10.24	±1.19	100.40	10.45	±1.25	103.30	10.35	±0.52	103.50
	50	50.15	±0.72	99.90	50.85	±2.62	101.46	54.04	±0.53	99.68

Functional Drink Sample	Added	Smartphone RGB Camera-Based Colorimetric Sensor of CUR _{Hydrogel}		UV-Vis Spectrophotometry		HPLC				
		Found	Recovery	Found	Recovery	Found	Recovery			
		(mg L ⁻¹)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)			
	100	100.23	±1.22	103.03	101.22	±0.07	101.10	100.47	±2.02	100.47



ตารางที่ 4.7 Anova test ของการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานวิธี UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
HPLC	16	32.92	2.0575	3.56318
UV-Vis Spectrophotometry	16	32.287	2.017938	3.293995
Smartphone RGB Camera- Based Colorimetric Sensor of Double-Layer Spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs Hydrogel Liquid-Core Curcumin Emulsion	16	31.615	1.975938	3.103464

Source of Variation	SS	df	MS	F _{stat}	P _{value}	F _{crit}
Between Groups	0.05324	2	0.026618	0.008017	0.992017	3.20431
Within Groups	149.41	45	3.320213			
Total	149.462					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} กับงานวิจัยอื่น ๆ

Materials / Method	Samples	Linear Range (mg L ⁻¹)	Detection Limit (mg L ⁻¹)	Analysis Time (min)	Testing Site		Ref.
					Onsite	In-lab	
NiO-CNTs-MOHFPE-CPE/Electrochemical Method	Water and Juice	0.00068-85.2	0.00015	-	No	Yes	[7]
Sucrose Functionalized AuNPs/Colorimetric Method	Brown and White Rice Food	0.02-81.3	0.006	-	No	Yes	[71]
Graphite-AgNPs-PLA Electrode/Electrochemical Method	Pharmaceutical Formulations	0.017-67.68	5.1×10^{-3}	5	Yes	Yes	[12]
Boron-Doped Diamond (BDD) Electrode/Electrochemical Method	Pharmaceutical Tablets	1.16-7.81	0.63	-	No	Yes	[72]
Zinc-Based Metal-Organic Framework/Fluorescence Spectrometry	Biological Samples	0.14-17	0.106	-	No	Yes	[73]
Poly(2-aminothiazole) Decorated with Platinum Nanoparticles/ Electrochemical Method	Vitamin B6 Tablets	0.00085 - 13.62	0.0092	-	No	Yes	[74]
Double-Layer Spherical Ca (II)-Alginate-ZnONPs Hydrogel Liquid-Core Curcumin Emulsion/ Colorimetric Method	Functional Drinks	10-125	2.93	6	Yes	Yes	This work

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ในเครื่องต้มเสริมวิตามินโดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือโดยการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำและความเที่ยงสูง และมีความจำเพาะในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 CUR_{Hydrogel} หรือเม็ดบีดสองชั้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ทำการสร้างเม็ดบีดด้วยเทคนิค Reverse Spherification โดยภายในของเม็ดบีดจะทำการบรรจุสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน จากนั้นทำการขึ้นรูปเม็ดบีดชั้นที่ 1 ด้วย Ca(II)-อัลจิเนต และทำการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมิน เป็นชั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs เม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้ในการวิเคราะห์วิตามินบี 6 โดยการผสมตัวอย่างเครื่องต้มเสริมวิตามินกับกรดบอริกเข้าด้วยกัน จากนั้นเจาะเม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ให้สารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินผสมกับบอเรตไอออนที่เหลืออยู่ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโรโซไซยานินหรือสารที่มีสีส้มแดง สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเหลืองเมื่อความเข้มข้นของวิตามินบี 6 เพิ่มขึ้น จากนั้นทำการถ่ายรูปและหาค่าความเข้มของสีเขียวโดยใช้โปรแกรม Image J วิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้ให้ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 2.93 และ 9.77 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และทำการตรวจสอบความถูกต้องกับวิธีการวิเคราะห์มาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometry และ HPLC พบว่าผลวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังศึกษาความเสถียรของ CUR_{Hydrogel} ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยพบว่า (1) สามารถป้องกันการสลายตัวของอิมัลชันเคอร์คูมินจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต ได้ถึง 28 วันโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 และ (2) CUR_{Hydrogel} มีความแข็งแรงและความทนทานสูง ซึ่งสามารถทนทานต่อแรงบั่นเหวี่ยงถึง 15,000 รอบต่อนาที โดยเม็ดบีด CUR_{Hydrogel} ไม่เกิดการแตก อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเซ็นเซอร์โดยการใช้ CUR_{Hydrogel} ร่วมกับการประมวลผลภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและการวิเคราะห์ความเข้มของสีเขียว (G Intensity) มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี 6 ในเครื่องต้มเสริมวิตามิน และสามารถใช้งานได้อย่างง่ายดายในให้ห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Hadtstein, F., et al., Vitamin B-6-Induced Neuropathy: Exploring the Mechanisms of Pyridoxine Toxicity. *Adv Nutr*, 2021. 12(5): p. 1911-1929.
2. Van den Broeck, T., et al., Neurogenic voiding dysfunction induced by vitamin B6 overdose. *Continence Reports*, 2022. 1.
3. Vrolijk, M.F., et al., The vitamin B6 paradox: Supplementation with high concentrations of pyridoxine leads to decreased vitamin B6 function. *Toxicol In Vitro*, 2017. 44: p. 206-212.
4. Food, S.C.o., TOLERABLE UPPER INTAKE LEVELS FOR VITAMINS AND MINERALS. 2006.
4. Food, E.S.C.o., Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies; Tolerable Upper Intake Levels for vitamins and minerals. *EFSA J.* . 2006.
6. สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. (2566). ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 448) พ.ศ. 2566 เรื่อง กำหนดปริมาณวิตามินและแร่ธาตุที่ผสมในผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร. *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 141 ตอนพิเศษ 3 ง, 34 (4 มกราคม 2567).
7. Sadeghi, H., et al., Electrochemical determination of vitamin B6 in water and juice samples using an electrochemical sensor amplified with NiO/CNTs and Ionic liquid. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020. 15(10): p. 10488-10498.
8. Gang Chen, X.D., Zhiguang Cao, Jiannong Ye, Determination of melatonin and pyridoxine in pharmaceutical preparations for health-caring purposes by capillary electrophoresis with electrochemical detection. *Analytica Chimica Acta* 2000. 408.
9. C.K. Markopoulou, K.A.K., J.E. Koundourellis, An optimized method for the simultaneous determination of vitamins B1, B6, B12, in multivitamin tablets by high performance liquid chromatography. *Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Bachmann, T., et al., Development of a LC-MS/MS method using stable isotope dilution for the quantification of individual B(6) vitamers in fruits, vegetables, and cereals. *Anal Bioanal Chem*, 2020. 412(26): p. 7237-7252.
11. Marti-Andrés, P., et al., Simultaneous Determination of Pyridoxine and Riboflavin in Energy Drinks by High-Performance Liquid Chromatography with Fluorescence Detection. *Journal of Chemical Education*, 2015. 92(5): p. 903-906.
12. Caldas, N.M., et al., Graphite and silver nanoparticles-loaded polylactic acid matrix: A pioneering tailor-lab-made filament for manufacturing eco-friendly and robust electrochemical sensors towards pyridoxine detection. *Electrochimica Acta*, 2024. 504.
13. คณะกรรมการและคณะทำงานปรับปรุงข้อกำหนดสารอาหารที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย, ปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวัน สำหรับคนไทย สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2563.
14. Almeida, M.R., et al., Maternal vitamin B6 deficient or supplemented diets on expression of genes related to GABAergic, serotonergic, or glutamatergic pathways in hippocampus of rat dams and their offspring. *Mol Nutr Food Res*, 2016. 60(7): p. 1615-24.
15. Calderon-Ospina, C.A. and M.O. Nava-Mesa, B Vitamins in the nervous system: Current knowledge of the biochemical modes of action and synergies of thiamine, pyridoxine, and cobalamin. *CNS Neurosci Ther*, 2020. 26(1): p. 5-13.
16. Richard W. Vilter, M.D.J.F.M., M.D. • Helen S. Glazer, Ph.D. • Thomas Jarrold, M.D. • Joseph Abraham, M.D. • Carl Thompson, M.D. • Virginia R. Hawkins, R.N., The effect of vitamin B6 deficiency induced by desoxypyridoxine in human beings. *Translational research*, 1953. 2(3): p. 335-357.
17. pomypom. 6 อาหารมีวิตามินบี6 เสริมสร้างภูมิคุ้มกัน ปรับสมดุลฮอร์โมน ลดเสี่ยงโรคหัวใจ. 2565 [cited 2567 20 เมษายน]; Available from: <https://women.trueid.net/detail/J2woj07GVkb2>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก, 2544.
19. Lindsay, H., et al., Dietary Reference Intakes for Thiamin, Riboflavin, Niacin, Vitamin B6, Folate, Vitamin B12, Pantothenic Acid, Biotin, and Choline. 1998. p. 150-165.
20. Gibson, A., et al., Alcohol increases homocysteine and reduces B vitamin concentration in healthy male volunteers--a randomized, crossover intervention study. *QJM*, 2008. 101(11): p. 881-7.
21. Morris, M.S., The role of B vitamins in preventing and treating cognitive impairment and decline. *Adv Nutr*, 2012. 3(6): p. 801-12.
22. L. García, S., et al., Determination of thiamine, riboflavin and pyridoxine in pharmaceuticals by synchronous fluorescence spectrometry in organized media. *Analytica Chimica Acta* 2000: p. 193-199.
23. Kadir, A.N.A., Spectrophotometric Determination of Vitamin B6 by Coupling with Diazotized p-Nitroaniline. *Journal of Science*, 2010. 21.
24. Nagpal, M., et al., Role of curcumin in systemic and oral health: An overview. *J Nat Sci Biol Med*, 2013. 4(1): p. 3-7.
25. Preetha Anand., e.a., Bioavailability of Curcumin: Problems and Promises. *molecular pharmaceuticals*, 2007.
26. Rodrigues, C., et al., Bio-Based Sensors for Smart Food Packaging-Current Applications and Future Trends. *Sensors (Basel)*, 2021. 21(6).
27. Kharat, M., et al., Physical and Chemical Stability of Curcumin in Aqueous Solutions and Emulsions: Impact of pH, Temperature, and Molecular Environment. *J Agric Food Chem*, 2017. 65(8): p. 1525-1532.
28. Lestari, M., et al., Curcumin. *Profiles Drug Subst Excip Relat Methodol*, 2014. 39: p. 113-204.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. Hanne Hjorth Tennesen., e.a., Studies on curcumin and curcuminoids. European Food Research and Technology, 1986. 183: p. 116-122.

30. Hanne Hjorth Tennesen., e.a., Studies on curcumin and curcuminoids VIII. Photochemical stability of curcumin. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1986. 183: p. 166-122.

31. Wirojsaengthong, S., et al., Portable Quantitative Chemical Analysis: Digital Image Colorimetric Detection of Fe(III) with Curcumin Paper. Journal of Chemical Education, 2023. 100(9): p. 3604-3611.

32. Boonkanon, C., et al., Curcumin nanoparticle doped starch thin film as a green colorimetric sensor for detection of boron. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2020. 224: p. 117351.

33. Dr G.M. Buck., e.a., Environmental Health Criteria 204 BORON. 1998, the joint sponsorship of the United Nations Environment Programme, the International Labour Organisation, and the World Health Organization, and produced within the framework of the Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals: Ohio, USA. p. 1.

34. Kabay, N., E. Güler, and M. Bryjak, Boron in seawater and methods for its separation — A review. Desalination, 2010. 261(3): p. 212-217.

35. Natthawut Neamjan., e.a., Effect of various shapes of ZnO nanoparticles on cotton fabric viaelectrospinning for Anti-UV and Anti-Bacterial properties. 2010.

36. Phanthadaporn, T., Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanostructure from Zinc Film by Thermal Oxidation Method. 2021.

37. Oktyabrsky, S., Defects Related to Zinc Blende and Wurtzite Phases in III-Nitride Heterostructures. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition), 2001.

38. Kumar, M., et al., Zinc Oxide Nanostructures Synthesized by Oxidization of Zinc. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39. Herzog, B., et al., *In vivo* and *in vitro* assessment of UVA protection by sunscreen formulations containing either butyl methoxy dibenzoyl methane, methylene bis-benzotriazolyl tetramethylbutylphenol, or microfine ZnO. *International Journal of Cosmetic Science*, 2002.
40. D.C. Look., et al., Electrical properties of bulk ZnO. *Solid State Communications*, 1997. 105(6): p. 399-401.
41. Lademann, J., et al., Synergy effects between organic and inorganic UV filters in sunscreens. *J Biomed Opt*, 2005. 10(1): p. 14008.
42. Vergou, T., et al., Transfer of ultraviolet photon energy into fluorescent light in the visible path represents a new and efficient protection mechanism of sunscreens. *J Biomed Opt*, 2011. 16(10): p. 105001.
43. Xie, J., et al., Recent Advances in ZnO Nanomaterial-Mediated Biological Applications and Action Mechanisms. *Nanomaterials (Basel)*, 2023. 13(9).
44. Tang, E., et al., Surface modification of zinc oxide nanoparticle by PMAA and its dispersion in aqueous system. *Applied Surface Science*, 2006. 252(14): p. 5227-5232.
45. Grasset, F., et al., Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003. 360(1-2): p. 298-311.
46. Khurana, N., et al., Surface modification of zinc oxide nanoparticles by vinyltriethoxy silane (VTES). *Inorganic Chemistry Communications*, 2021. 124.
47. Kotresh, M.G., M.K. Patil, and S.R. Inamdar, Reaction temperature based synthesis of ZnO nanoparticles using co-precipitation method: Detailed structural and optical characterization. *Optik*, 2021. 243.
48. Soleimani, H., et al., Synthesis of ZnO nanoparticles for oil-water interfacial tension reduction in enhanced oil recovery. *Applied Physics A*, 2018. 124(2).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49. Sánchez, C., et al. Applications of advanced hybrid organic–inorganic nanomaterials: From laboratory to market. *Chem. Soc. Rev.*, 2011. 40(2): p. 696–753.
50. Chung, Y.T., et al., Synthesis of minimal-size ZnO nanoparticles through sol–gel method: Taguchi design optimisation. *Materials & Design*, 2015. 87: p. 780-787.
51. Jang, S., et al., Polydiacetylene-based hydrogel beads as colorimetric sensors for the detection of biogenic amines in spoiled meat. *Food Chem*, 2023. 403: p. 134317.
52. Liu, S., et al., Hydrogel microsphere-based portable sensor for colorimetric detection of nitrite in food with matrix influence-eliminated effect. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023. 397.
53. Saqib, M.N., et al., Hydrogel beads for designing future foods: Structures, mechanisms, applications, and challenges. *Food Hydrocolloids for Health*, 2022. 2.
54. Admin. Spray Dried คืออะไร เหมาะสำหรับวัตถุดิบอะไร มีข้อจำกัดอะไรที่ควรรู้. 2021 [cited 2024 22 april]; Available from: <https://www.spfpowder.com>.
55. Encina, C., et al., Conventional spray-drying and future trends for the microencapsulation of fish oil. *Trends in Food Science & Technology*, 2016. 56: p. 46-60.
56. Frascareli, E.C., et al., Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. *Food and Bioproducts Processing*, 2012. 90(3): p. 413-424.
57. Kruif, D., et al., Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2004. 9(5): p. 340-349.
58. Rutz, J.K., et al., Microencapsulation of palm oil by complex coacervation for application in food systems. *Food Chem*, 2017. 220: p. 59-66.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

59. Silva, C.E.P., et al., Fundamentals of emulsion formation and stability, in Clay Minerals and Synthetic Analogous as Emulsifiers of Pickering Emulsions. 2022. p. 37-59.
60. Lu, H., et al., Natural Antimicrobial Nano Composite Fibres Manufactured from a Combination of Alginate and Oregano Essential Oil. *Nanomaterials (Basel)*, 2021. 11(8).
61. Cao, L., et al., Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 2020. 242.
62. Malektaj, H., et al., Mechanical Properties of Alginate Hydrogels Cross-Linked with Multivalent Cations. *Polymers (Basel)*, 2023. 15(14).
63. Tsai, F.-H., et al., Producing liquid-core hydrogel beads by reverse spherification: Effect of secondary gelation on physical properties and release characteristics. *Food Hydrocolloids*, 2017. 62: p. 140-148.
64. Köse, D.A., et al., Boric acid complexes with thiamine (vitamin B1) and pyridoxine (vitamin B6). *Inorganica Chimica Acta*, 2014. 413: p. 77-83.
65. Hu, C., et al., Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications. *Int J Biol Macromol*, 2021. 177: p. 578-588.
66. Wang, T.T., et al., A feasible image-based colorimetric assay using a smartphone RGB camera for point-of-care monitoring of diabetes. *Talanta*, 2020. 206: p. 120211.
67. Permana, M.D., et al., A Simple Methods for Determination of Methylene Blue using Smartphone-Based as Digital Image Colorimetry. *Trends in Sciences*, 2023. 20(4).
68. Iurciuc Tincu, C.E., et al., Polysaccharides-Based Complex Particles' Protective Role on the Stability and Bioactivity of Immobilized Curcumin. *Int J Mol Sci*, 2021. 22(6).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

69. Liu, Y.R., et al., Impacts of ultraviolet absorption by zinc oxide nanoparticle modifiers on asphalt aging. *Sci Rep*, 2024. 14(1): p. 19918.
70. Martínez-Guerra, J., et al., New insights on the Chemical Stability of Curcumin in Aqueous Media at Different pH: Influence of the Experimental Conditions. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019. 14(6): p. 5373-5385.
71. Shrivastava, K., et al., Sucrose capped gold nanoparticles as a plasmonic chemical sensor based on non-covalent interactions: Application for selective detection of vitamins B(1) and B(6) in brown and white rice food samples. *Food Chem*, 2018. 250: p. 14-21.
72. Kuzmanović, D., et al., Determination of pyridoxine (vitamin B6) in pharmaceuticals and urine samples using unmodified boron-doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials*, 2016. 64: p. 184-189.
73. Yue, D., et al., Zinc-based metal-organic frameworks as fluorescent probes for the detection of Vitamin B6. *Dyes and Pigments*, 2024. 222.
74. Megha, A., et al., Electrochemical sensing of vitamin B6 using platinum nanoparticles decorated poly(2-aminothiazole). *Microchemical Journal*, 2024. 206.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายสำหรับการศึกษา

สารละลายทุกชนิดเป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) และเตรียมโดยการใช้น้ำปราศจากไอออนที่ได้จากเครื่อง ZENEER UP 900 (ยี่ห้อ human corporation, ประเทศเกาหลี)

1. การเตรียมสารละลายTween80 เข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 %v/v

ปีเปตสารละลายTween80 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 มิลลิลิตร ลงในปิ๊กเกอร์จากนั้นละลายTween80 ด้วยน้ำปราศจากไอออนเล็กน้อย แล้วเทสารละลายTween80 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2. การเตรียมสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

ละลายกรดบอริก 0.015 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

3. การเตรียมสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90, 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปีเปตสารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 1.6, 4.16, 8.3, 11.6, 15, 16.6 และ 20.83 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร อย่างละขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 25 มิลลิลิตร จะได้สารละลายบอเรตไอออน เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90, 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลาร์

ละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

5. การเตรียมสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ละลายสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 0.02 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การเตรียมสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90, 100, 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 1.25, 3.13, 6.25, 8.75, 11.25, 12.5, 15.63 และ 18.75 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร อย่างละขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 25 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานวิตามินบี6 เข้มข้น 10, 25, 50, 70, 90, 100, 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

7. การเตรียมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต เข้มข้น 3%w/v

ละลายโซเดียมอัลจิเนต 12.5 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 250 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

8. การเตรียมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต เข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0%w/v

ปิเปตสารละลายโซเดียมอัลจิเนต เข้มข้น 5.0%w/v มา 10, 20, 30, 40, 60 และ 80 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร อย่างละขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0%w/v ตามลำดับ

9. การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 5%w/v

ละลายแคลเซียมคลอไรด์ 12.5 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 250 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

10. การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0%w/v

ปิเปตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 5.0%w/v มา 10, 20, 30, 40, 60 และ 80 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร อย่างละขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0%w/v ตามลำดับ

11. การเตรียมสารละลายซิงค์ซิงค์อะซิเตท ไตไฮเดรต ในเอทานอล 0.1 โมลาร์

ละลายซิงค์ซิงค์อะซิเตท ไตไฮเดรต 2.19 กรัม ในเอทานอล 100 มิลลิลิตร จากนั้น ปั่นกวน 350 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. การเตรียมสารละลายกรดออกซาลิก เข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2.5 และ 5 โมลาร์

ละลายกรดออกซาลิก 1.26, 6.30, 12.60, 31.52, 63.04 กรัม ด้วยน้ำเอทานอลจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทานอล จะได้สารละลายกรดออกซาลิก เข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2.5 และ 5 โมลาร์ตามลำดับ จากนั้นเทสารละลายที่เตรียมได้ลงในปิเกตอร์ ปั่นกวน 350 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

13. การเตรียมสารละลายพอลิไดเอซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 15 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายพอลิไดเอซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.6 มิลลิลิตร กับน้ำปราศจากไอออนจำนวนเล็กน้อย แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

14. การเตรียมสารละลายพอลิไดเอซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายพอลิไดเอซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 15 มิลลิโมลาร์ มา 0.83, 1.6, 4.16, 8.3 และ 16.6 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร อย่างละขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 25 มิลลิลิตร จะได้สารละลายพอลิไดเอซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5, 1, 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลองในการศึกษาและสภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ

1. ศึกษาการเตรียมสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมิน

1.1 ศึกษาความเข้มข้นTween80 ที่เหมาะสมในการทดลอง

ตาราง ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินโดยใช้Tween80ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้นของTween80 (%v/v)	A425
0.50	0.035680
1.00	0.030250
1.50	0.034452
2.00	0.014600
2.50	0.045200
3.00	0.022200

1.2 ศึกษาความเข้มข้นของเคอร์คูมินที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินโดยใช้เคอร์คูมินที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้นของเคอร์คูมิน (%w/v)	A425
0.03	0.231903
0.10	0.541931
0.30	0.738007
0.40	0.782028
0.50	0.842102

1.3 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายเคอร์คูมิน

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินโดยใช้อุณหภูมิในการเตรียมต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	A425
25	0.260239
45	0.565247
60	0.730179
70	0.746750
90	0.753571

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ศึกษาระยะเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม

ตาราง ข.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินโดยใช้ระยะเวลาในการปั่นกวนต่างกัน

ระยะเวลาในการปั่นกวน (min)	A425
1	0.545410
3	0.768036
5	0.826813
10	0.847488
15	0.863007
20	0.876205

2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีดชั้นที่ 1 Ca(II)-อัลจินต

2.1 ศึกษาปริมาณเคอร์คูมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรของปริมาณอิมัลชันเคอร์คูมินแตกต่างกัน

ความเข้มข้นของกรตบอริก (mg L ⁻¹)	ปริมาณของอิมัลชันเคอร์คูมิน (mL)			
	0.50	0.75	1.00	1.50
0	0.006195	0.005951	0.005951	0.005951
10	0.012100	0.136414	0.048477	0.103531
25	0.071747	0.202011	0.219910	0.328064
50	0.171616	0.325760	0.454346	0.532196
70	0.218658	0.415024	0.639008	0.718582
90	0.250336	0.478073	0.776947	0.902206

2.2 ศึกษาความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจินตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด

ตารางที่ ข.4 แสดงความแข็งแรงของเม็ดบีดที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมอัลจินตแตกต่างกัน

สารละลาย	ความแข็งแรงของเม็ดบีด (N)						
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
แคลเซียมคลอไรด์	0.00	14.52	33.81	46.58	55.86	57.02	58.02
โซเดียมอัลจินต	4.38	23.59	41.45	55.88	73.57	75.38	76.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบิที่ชั้นที่ 2 Ca(II)-อัลจิเนต/ZnONPs (CUR_{Hydrogel})

3.1 ศึกษาปริมาณ PDADMAC ที่เหมาะสมในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ตาราง ข.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของซิงค์ออกไซด์โดยใช้ความเข้มข้นของ PDADMAC ต่างกัน

ความเข้มข้นของ PDADMAC (mmol L ⁻¹)	A376
1	0.559601
3	0.646988
5	0.728745
10	0.787567
15	0.820923
20	0.848251

3.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่เม็ดบิที่ในสารละลาย PDADMAC-ZnONPs

ตาราง ข.6 การคำนวณปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ยุบบนพื้นผิวของเม็ดบิที่วิเคราะห์โดย ICP

นาที่	น้ำหนักหลัง อบ (mg)	ค่าที่ได้ เจือ จาง 10 เท่า (mg/L)	x10 (mg/L)	ย่อยในกรด 20 mL	ZnO ต่อมวล ในเม็ดบิที่ (%)
0	23.1	0	0	0	0
5	41.7	0.59099	5.9099	0.118198	0.14712379
10	45.1	0.88696	8.8696	0.177392	0.22080393
20	32.5	0.69537	6.9537	0.139074	0.17310863
30	31.4	0.6768	6.768	0.13536	0.16848573
60	30.98	0.6828	6.828	0.13656	0.16997939
90	30.03	0.67362	6.7362	0.134724	0.16769408

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ศึกษาความเสถียรของ CUR_{Hydrogel}

4.1 ศึกษาความสามารถในการป้องกันแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของเม็ดบิท

ตาราง ข.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินโดยใช้เม็ดบิทที่ทำการเคลือบอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไม่ทำการเคลือบ โดยการเก็บเม็ดบิท 49 วัน

ระยะเวลา (วัน)	A425	
	เม็ดบิทที่เคลือบZnONPs	เม็ดบิทที่ไม่เคลือบZnONPs
0	0.921814	0.921814
1	0.91513	0.264841
7	0.901299	0.158264
14	0.883140	0.109746
21	0.857480	0.094135
28	0.839157	0.084961
35	0.736597	0.077362
42	0.386597	0.068771
49	0.201126	0.062363

4.2 ศึกษาสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเม็ดบิทที่เหมาะสม

ตาราง ข.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร โดยการเก็บเม็ดบิทในสารละลายและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ระยะเวลา (วัน)	เก็บเม็ดบิท					
	น้ำปราศจากไอออน (°C)			กรตบอริก (°C)		
	-18	4	25	-18	4	25
0	0.911000	0.911000	0.911000	0.911000	0.911000	0.911000
7	0.901276	0.877228	0.660583	0.888611	0.820724	0.580215
14	0.900543	0.849991	0.546524	0.888168	0.775406	0.543900
21	0.900284	0.822083	0.464417	0.882584	0.702393	0.488861
28	0.901245	0.792114	0.367050	0.883530	0.659317	0.427933

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ศึกษาค่าการรอน้ำของเม็ดบิธ (Swelling capacity)

ตาราง ข.9 แสดงน้ำหนักของเม็ดบิธ โดยการเก็บเม็ดบิธในสารละลายและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ระยะเวลา (วัน)	น้ำหนักของเม็ดบิธ (g) ที่การเก็บเม็ดบิธ			
	น้ำปราศจากไอออน (°C)		กรดบอริก (°C)	
	4	25	4	25
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	8.5596	0.9620	9.3683	1.5804
14	12.3274	1.9162	12.5511	2.9453
21	15.5627	2.8003	15.2753	4.3875
28	18.7705	3.6337	17.7725	5.6805

4.4 ศึกษาความแข็งแรงของเม็ดบิธ

ตาราง ข.10 แสดงความแข็งแรงและค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมินที่ 425 นาโนเมตร โดยนำเม็ดบิธปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบต่างกัน

ความเร็วรอบ (rpm)	ความแข็งแรงของเม็ดบิธ (N)	A425
0	138.49	0.895691
500	124.62	0.868546
1,000	117.59	0.857376
5,000	96.30	0.837845
10,000	85.61	0.834793
15,000	64.49	0.820831

5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

5.1 ศึกษา pH ของบอริกที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรโดยใช้กรดบอริกที่ pH ต่างกัน

ความเข้มข้นของกรดบอริก (mg L ⁻¹)	pH ของกรดบอริก			
	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10
0	0.008484	0.008484	0.008484	0.008484
10	0.009003	0.011642	0.048477	0.031464
25	0.009903	0.01738	0.217972	0.337646
50	0.010315	0.041748	0.454346	0.793915
70	0.011429	0.075287	0.639008	1.146027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของกรดบอริก (mg L ⁻¹)	pH ของกรดบอริก			
	pH 7	pH 8	pH 9	pH 10
90	0.012726	0.093719	0.776947	1.295227
125	0.01532	0.116974	0.803131	1.606323

5.2 ศึกษาปริมาตรวิตามินบี6 ที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.12 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรโดยใช้ปริมาตรวิตามินบี6 ต่างกัน

ความเข้มข้นของกรดบอริก (mg L ⁻¹)	ปริมาตรวิตามินบี6 (mL)			
	1.0	1.5	2.0	3.0
0	0.415024	0.351547	0.320892	0.166687
10	0.385300	0.316406	0.295761	0.145981
25	0.330093	0.279770	0.244095	0.112790
50	0.258255	0.234100	0.191971	0.083771
70	0.209686	0.200302	0.149887	0.055695
90	0.164337	0.145416	0.103790	0.041367
125	0.078812	0.054367	0.039200	0.009384

5.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6

ตารางที่ ข.13 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน

ระยะเวลา (min)	ความเข้มข้นของวิตามินบี6 (mg L ⁻¹)		
	10	50	100
0.00	0.000000	0.000000	0.000000
0.25	0.380859	0.29314	0.18926
0.50	0.374252	0.27919	0.18266
1.00	0.349991	0.26308	0.16736
3.00	0.344254	0.25905	0.16519
5.00	0.338638	0.25836	0.16469

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและ CUR_{Hydrogel} ตารางที่ ข.14 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน

ระยะเวลา (min)	ความเข้มข้นของวิตามินบี6 (mg L ⁻¹)		
	10	50	100
0.0	0.000000	0.000000	0.000000
1.0	0.294220	0.219330	0.140762
3.0	0.310013	0.233871	0.161911
5.0	0.337250	0.252331	0.172394
10.0	0.306625	0.221558	0.139450
15.0	0.302368	0.219452	0.135605

6. ศึกษาความเป็นเส้นตรง

ตารางที่ ข.15 แสดงค่าความเข้มของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน (RGB) ของการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นของวิตามินบี6 (mg L ⁻¹)	ค่าความเข้มสี		
	สีแดง	สีเขียว	สีน้ำเงิน
0	192.151	136.13	26.622
10	195.785	140.521	29.706
25	197.995	145.44	30.068
50	200.211	152.578	31.978
70	201.31	158.534	32.298
90	201.755	164.118	33.082
125	202.2	175.429	33.324

ตารางที่ ข.16 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินที่ 530 นาโนเมตรโดยการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินบี6 ที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นของวิตามินบี6 (mg L ⁻¹)	A530
0	0.352142
10	0.324570
25	0.280731
50	0.231812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของวิตามินบี6 (mg L ⁻¹)	A530
70	0.173386
90	0.130890
125	0.058029



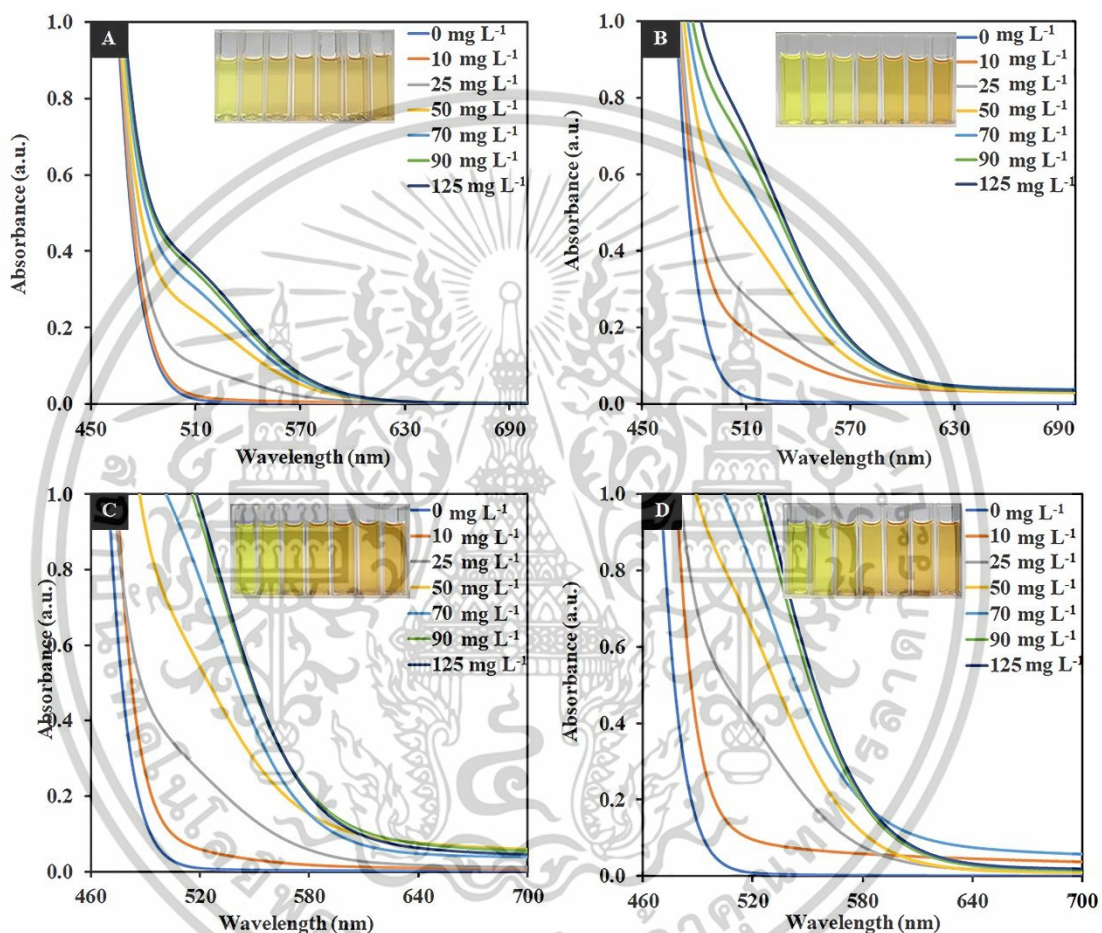
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
สเปกตรัมผลการทดลองในการพัฒนาการวิเคราะห์ปริมาณ
วิตามินบี6

1. ศึกษาปริมาณคอรัคูมินที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดบีด

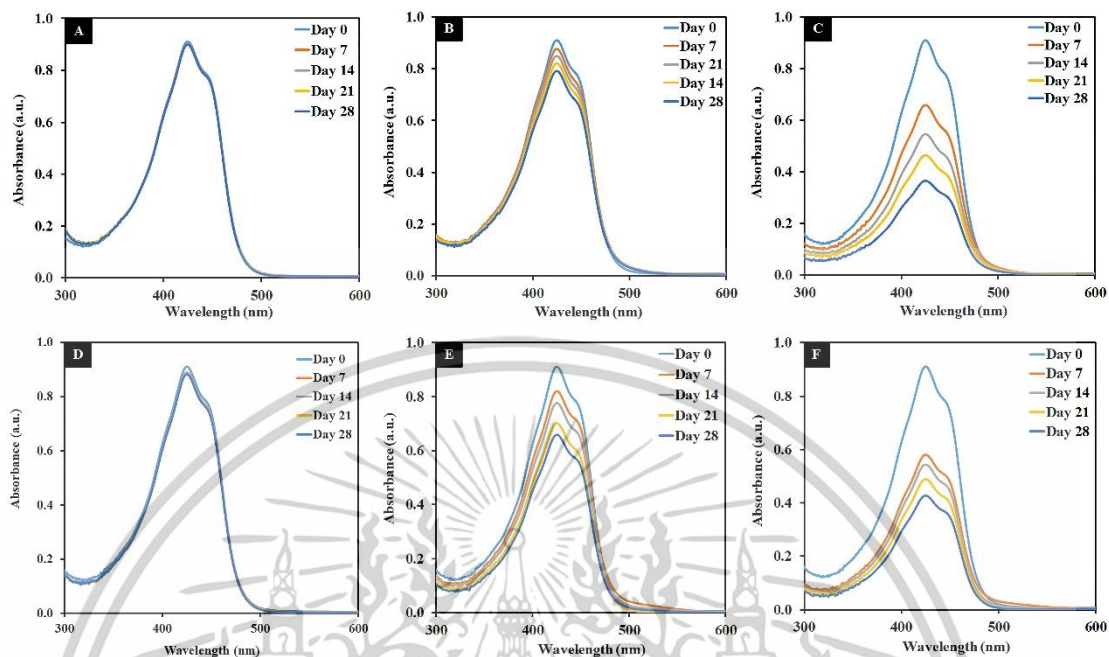


รูปที่ ค.1 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินโดยใช้ปริมาณอิมัลชันคอรัคูมินต่างกัน (A) 0.50 มิลลิลิตร (B) 0.75 มิลลิลิตร (C) 1.00 มิลลิลิตร (D) 1.50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ศึกษาความเสถียรของ CUR_{Hydrogel}

2.1 ศึกษาสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเม็ดบีดที่เหมาะสม

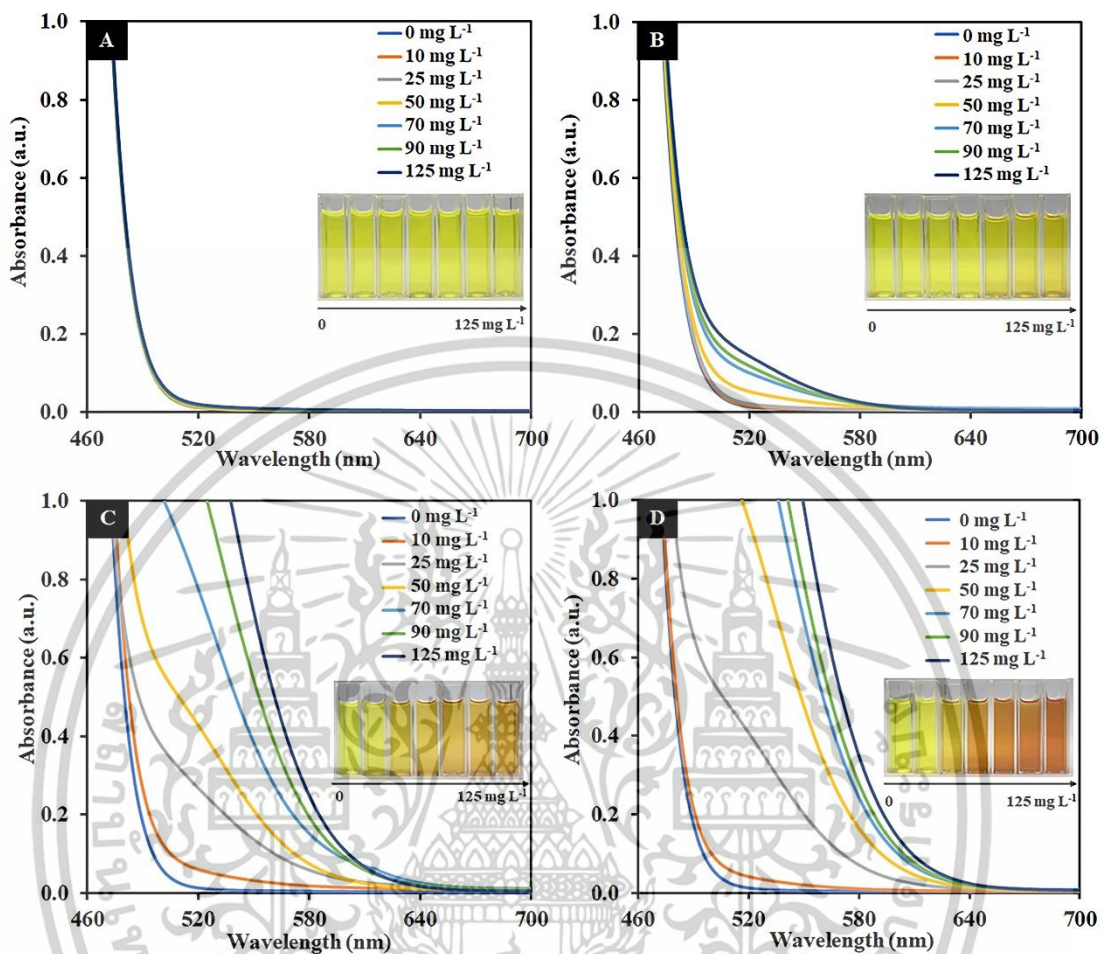


รูปที่ ค.2 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของอิมัลชันเคอร์คูมิน โดยเก็บในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (A) -18 องศาเซลเซียส (B) 4 องศาเซลเซียส (C) 25 องศาเซลเซียส และเก็บในกรดบอริก pH 9 เข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (D) -18 องศาเซลเซียส (E) 4 องศาเซลเซียส (F) 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินบี6 โดยใช้ CUR_{Hydrogel}

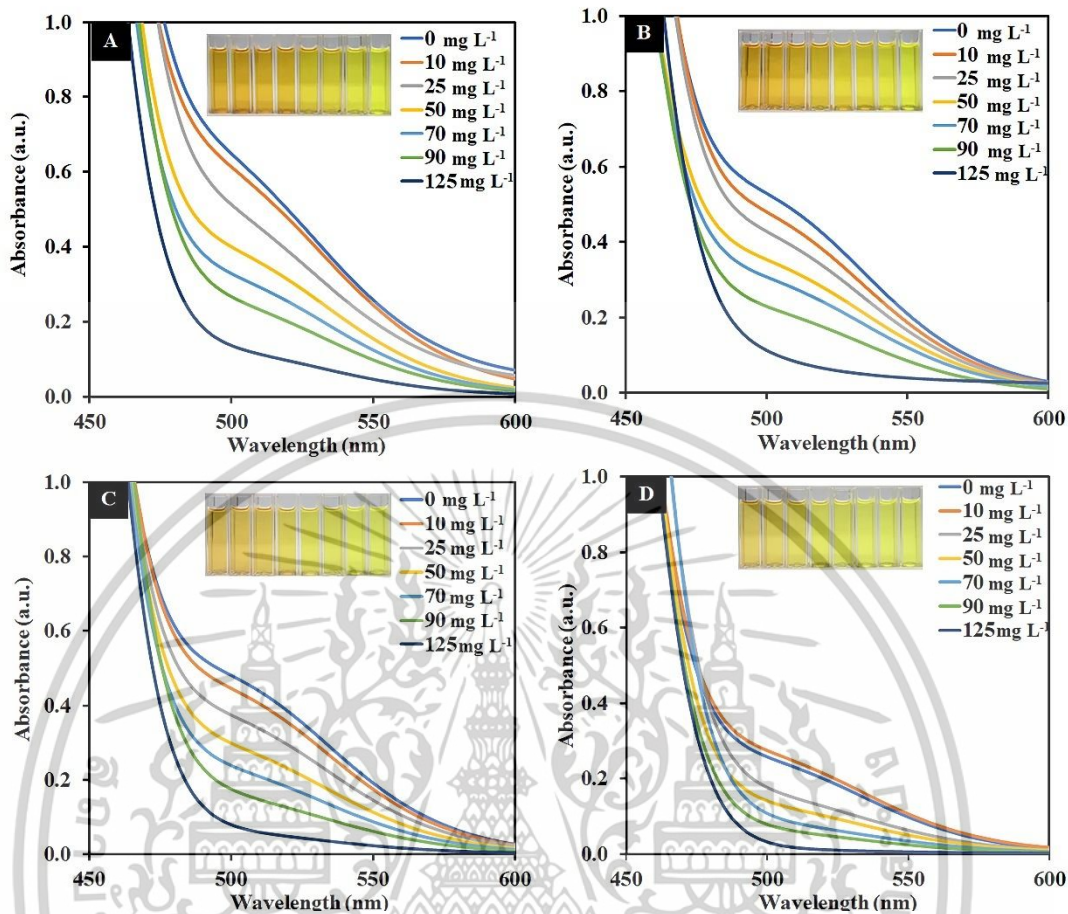
3.1 ศึกษา pH ของบอริกที่เหมาะสม



รูปที่ ๓.3 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอิมัลชันเคอร์คูมินและกรดบอริกที่ pH แตกต่างกัน(A) pH7 (B) pH8 (C) pH9 (D) pH10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

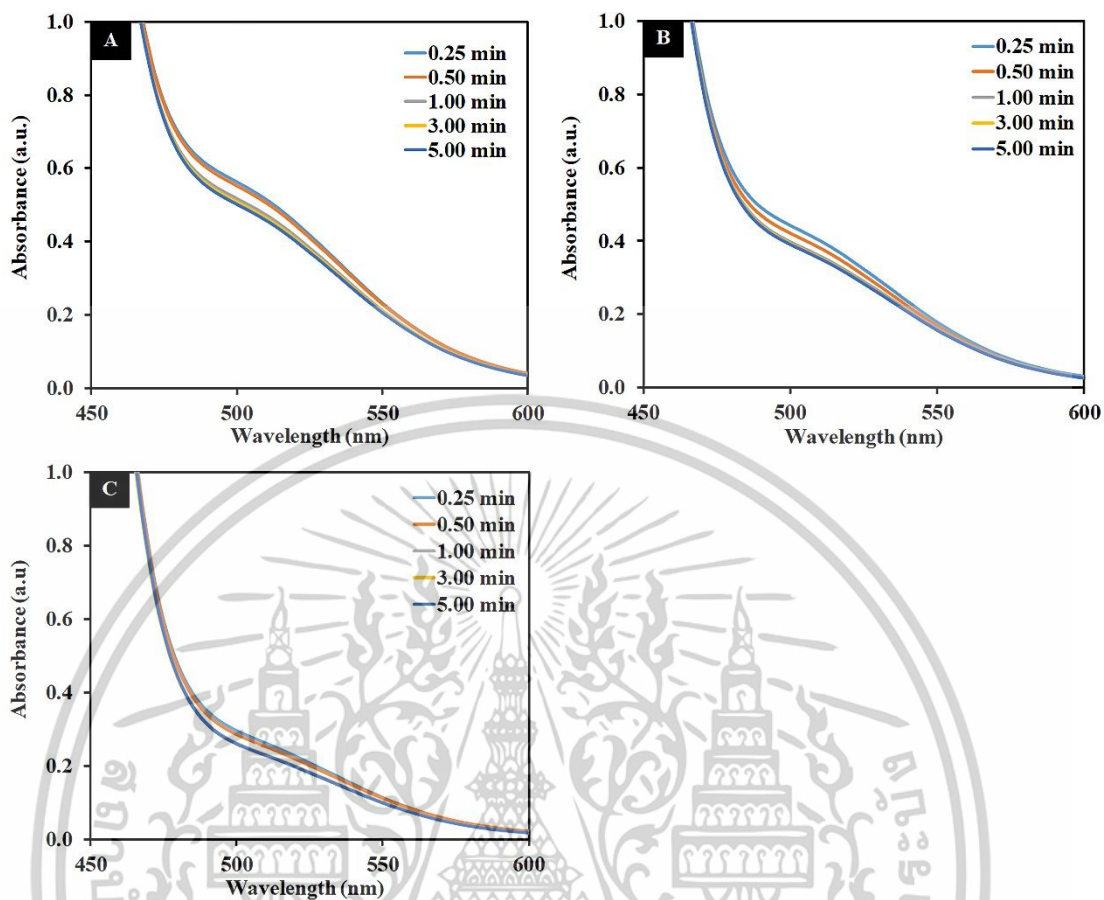
3.2 ศึกษาปริมาณวิตามินบี6 ที่เหมาะสม



รูปที่ ค.4 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินโดยใช้ปริมาณวิตามินบี6 ต่างกัน (A) 1 มิลลิลิตร (B) 1.5 มิลลิลิตร (C) 2 มิลลิลิตร (D) 3 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

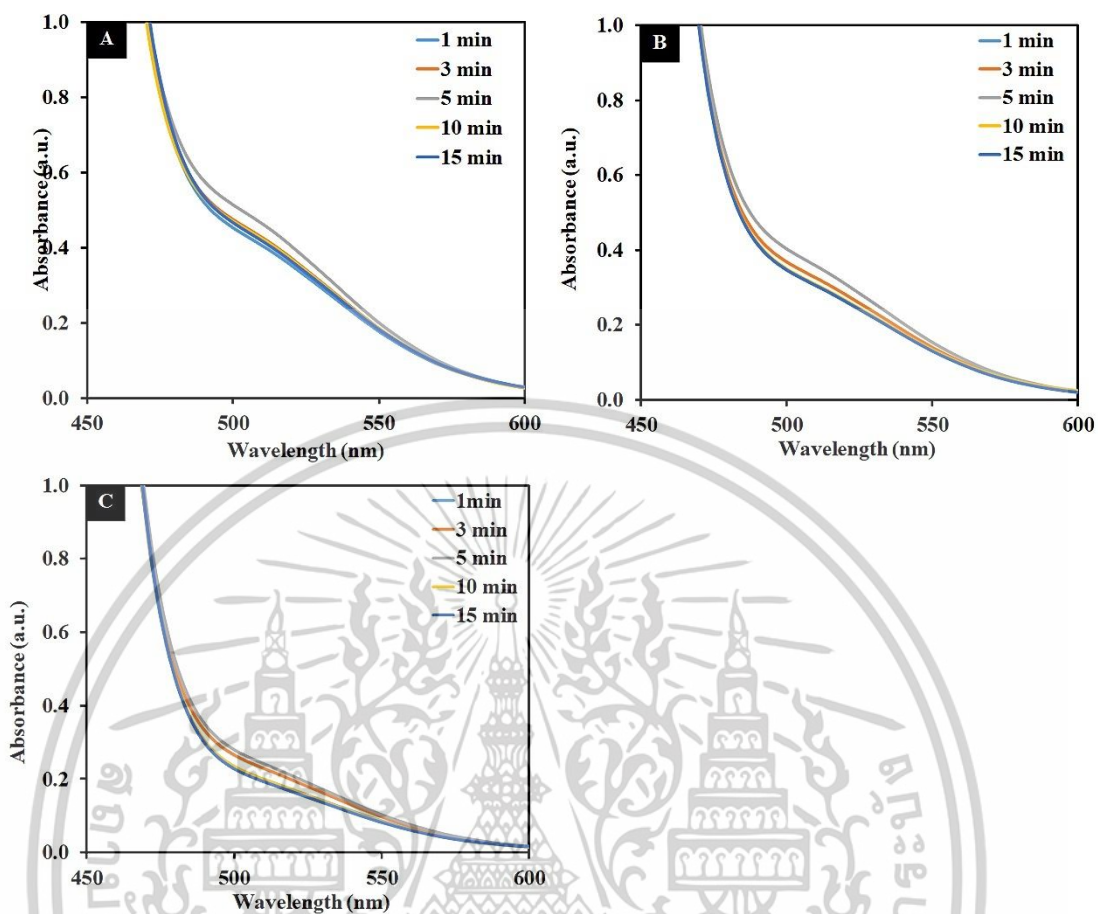
3.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6



รูปที่ ค.5 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินโดยใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดบอริกและวิตามินบี6 ที่แตกต่างกันโดยใช้วิตามินบี6 เข้มข้น (A) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (B) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (C) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างบอเรตไอออนที่เหลือและ CUR_{Hydrogel}



รูปที่ ๓.๖ สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของโรโซไซยานินโดยใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างบอเรตที่เหลืออยู่และเคอร์คูมิน ที่แตกต่างกันโดยใช้วิตามินบี6 เข้มข้น (A) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (B) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (C) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลงานวิชาการระดับนานาชาติ

Chinnawat S., Detsri E., Lerdpiyaskulkij N., Teerasong S., Mathaweensurn A., Smartphone RGB camera-based colorimetric platform with double-layer spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion for rapid and selective detection of pyridoxine (Vitamin B6) in functional beverages. *Microchemical.*, 2025. 215: p.114204. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114204>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Smartphone RGB camera-based colorimetric platform with double-layer spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion for rapid and selective detection of pyridoxine (Vitamin B6) in functional beverages

Sirinyakorn Chinnawat^a, Ekarat Detsri^{a,b,*}, Natee Lerdpiriyaskulkij^a,
Saowapak Teerasong^{a,c}, Arjnarong Mathaweensurn^{a,c}

^a Department of Chemistry, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^b Integrated Applied Chemistry Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^c Applied Analytical Chemistry Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Reverse spherification
Hydrogel
Colorimetric detection
Vitamin B6
Zinc oxide nanoparticles
Functional beverages

ABSTRACT

A portable smartphone-based RGB colorimetric sensor was developed for the quantitative detection of pyridoxine (vitamin B6, VB-6) in functional beverages, employing a novel core-shell hydrogel probe (CUR_{Hydrogel}), engineered with a calcium alginate matrix encapsulating a liquid-phase curcumin emulsion and externally layered by poly(diallyl dimethyl ammonium chloride)-functionalized ZnO nanoparticles (ZnONPs/PDADMAC). The CUR_{Hydrogel} spheres were fabricated via a molecular self-assembly reverse spherification and demonstrated high mechanical stability (stiffness: 6.45×10^4 N/m, compressive strength: 1.01×10^6 N/m²) along with excellent UV-blocking photostability for up to 28 days. The CUR_{Hydrogel} probe was applied for detecting VB-6 via a smartphone-based sensing platform. The colorimetric assay was based on a two-step strategy involving initially the formation of the colorless pyridoxine-boron complex by VB-6 and boric acid, after which the remaining boric acid binds with curcumin to produce a red rosocyanine dye. A higher VB-6 concentration yields less rosocyanine and a discernible color shift from orange to yellow, which is quantified via smartphone RGB analysis. The RGB values were assessed via a smartphone application, providing the linearity of VB-6 detection of 10–125 mg L⁻¹ with LOD and LOQ of 2.93 mg L⁻¹ and 9.77 mg L⁻¹. The CUR_{Hydrogel} exhibited excellent precision with relative standard deviations (RSDs) ranging from 0.20 to 0.27 %, while recoveries ranged from 99.84 % to 103.03 %. Particularly, the results of this method were also validated by comparing with HPLC and UV-vis spectrophotometry. The smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel} has great potential application prospects for detecting VB-6 in functional beverage samples.

1. Introduction

The essentiality of pyridoxine, or vitamin B6 (VB-6), for human health, has been established nearly a century ago [1], and there is now considerable evidence that VB-6 may also be essential for the release of neurotransmitters serotonin and norepinephrine [2–4], which are important for controlling mood, thoughts, behavior, and cardiac vascular stimulation. Many people have therefore increasingly seen the importance of consuming VB-6, either directly consuming macronutrients containing VB-6, such as salmon, avocado, and banana, or

indirectly by taking micronutrients in the form of tablets or functional beverages. The European Food Safety Authority (EFSA) regulation has prescribed a tolerable upper intake level of VB-6 at 25 mg/day [5]. Nevertheless, VB-6 intakes over 200 mg/day are not considered safe due to being the cause of nerve damage, loss of coordination, and gastrointestinal issues [6–8].

VB-6 supplements are widely formulated as tablets or incorporated into functional beverages, which are increasingly popular due to their convenience, palatability, and health-focused appeal. These vitamin-fortified drinks have become a common source of micronutrients,

* Corresponding author at: Department of Chemistry, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

E-mail addresses: 66056082@kmitl.ac.th (S. Chinnawat), Ekarat.de@kmitl.ac.th (E. Detsri), 64605054@kmitl.ac.th (N. Lerdpiriyaskulkij), Saowapak.te@kmitl.ac.th (S. Teerasong), Arjnarong.ma@kmitl.ac.th (A. Mathaweensurn).

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114204>

Received 24 April 2025; Received in revised form 23 May 2025; Accepted 4 June 2025

Available online 6 June 2025

0026-265X/© 2025 Elsevier B.V. All rights reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

particularly among consumers seeking accessible nutritional support in daily life. As VB-6 intake must be carefully regulated to avoid both deficiency and excessive exposure, the ability to rapidly and accurately quantify VB-6 in these commercial products is crucial. Reliable detection methods are essential not only to ensure labeling compliance and maintain product quality but also to safeguard consumer health by preventing under- or over-supplementation. Among analytical methods, electrochemical analysis has been extensively used for the determination of VB-6. H. Sadeghi et al. [9] established a carbon paste electrode amplified with NiO-CNTs nanocomposite and 1-methyl-3-octylimidazolium hexafluorophosphate (MOHFPE) for detecting VB-6 in water and juice samples. The electrochemical sensor provided high linearity in the range of $0.04 \mu\text{mol L}^{-1}$ – $500 \mu\text{mol L}^{-1}$. G. Chen et al. [10] used capillary electrophoresis with electrochemical detection for the separation and determination of melatonin and pyridoxine in pharmaceutical preparations. The method showed good linearity in the range of 2.5 – $1000 \mu\text{mol L}^{-1}$ for melatonin and 5.0 – $1000 \mu\text{mol L}^{-1}$ for pyridoxine. Despite their high specificity, these approaches are complex and necessitate specialized knowledge. Given the limitations of these techniques, High-performance liquid chromatography (HPLC) equipped with various detectors such as photodiode array (PDA) [11–15], mass spectrometer [16,17], and fluorescence detector [18–21] have drawn interest for detecting VB-6. These provide excellent sensitivity, selectivity, accuracy, and reproducibility results. However, their application is generally confined to laboratory settings due to their reliance on expensive, sophisticated, and often delicate instrumentation, which limits their feasibility for on-site or field testing. Recently, spectrophotometric-based colorimetric sensor strategies showed more advantages compared to other instrumentations, due to their low cost, rapid response time, high sensitivity, and ease of detection. To maximize the potential of spectrophotometric-based colorimetric sensors, researchers have investigated various strategies for improving colorimetric performances, such as color intensity and uniformity. More recently, functionalized gold nanoparticles (AuNPs) have shown potential for colorimetric responses. The sensing is based on the color change followed by a bathochromic shift in localized surface plasmon resonance (LSPR) of NPs in the visible region (380 nm to 780 nm). K. Shrivastava et al. [22] synthesized the sucrose stabilized AuNPs as a colorimetric sensor for detecting VB-1 and VB-6. The detection mechanism was based on the aggregation of AuNPs. When VB-1 or VB-6 were present, the color of solution changed from red to blue due to the aggregation of AuNPs. However, the major drawbacks of NPs-based colorimetric detection are selectivity, stability and environmental sensitivity of NPs, as they tend to aggregate easily, leading to color changes in the solution and potentially affecting measurement accuracy. Moreover, among those methods amenable to the development of portable field test kits are even more sparse.

To address these challenges, this work proposes a novel, smartphone-assisted colorimetric method for the quantitative detection of VB-6 in functional drinks. The method is based on the borate-mediated formation of a rosocyanine complex with curcumin emulsion, where the degree of color change (from orange to yellow) corresponds to the VB-6 concentration. VB-6 is first reacted with boric acid to form pyridoxine-boron complexes. The remaining borate ions are subsequently reacted with curcumin emulsion to form a rosocyanine complex. This colorimetric shift is captured using a smartphone RGB camera, enabling field-deployable analysis without the need for complex instrumentation. To enhance stability, zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) have been considered effective UV-blocking agents due to their excellent ultraviolet shielding properties. Incorporating ZnONPs into coatings has been shown to significantly inhibit UV-induced chemical degradation. Therefore, curcumin emulsion is encapsulated within a double-layer calcium (II)-alginate/ZnO nanoparticle (ZnONPs) hydrogel (CUR_{Hydrogel}). This encapsulation not only improves mechanical robustness but also prevents premature curcumin degradation by UV light. Compared to existing methods, this approach combines the portability and

simplicity of visual detection, making it a compelling alternative for the determination of VB-6 in commercial functional drinks.

2. Experimental

2.1. Chemicals, reagents, and apparatus

Curcumin ($\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{O}_6$), Tween80 ($\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$), boric acid (H_3BO_3), poly(diallyl dimethyl ammonium chloride) (PDADMAC, $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{NCl}$), oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), sodium alginate ($\text{C}_6\text{H}_7\text{NaO}_6$), thiamine (VB-1, $\text{C}_{12}\text{H}_{17}\text{N}_4\text{OS}$), niacinamide (VB-3, $\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_2\text{O}$), pantothenate (VB-5, $\text{C}_9\text{H}_{17}\text{NO}_5$), Pyridoxine (VB-6, $\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}_3$), biotin (VB-7, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3\text{S}$), and cobalamin (VB-12, $\text{C}_{63}\text{H}_{88}\text{CoN}_{14}\text{O}_{14}\text{P}$), ascorbic acid (Vitamin C, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), and glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) were purchased from Sigma-Aldrich, USA. Zinc acetate dihydrate ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) was obtained from Loba Chem, India. Riboflavin (VB-2, $\text{C}_{17}\text{H}_{20}\text{N}_4\text{O}_6$) was acquired from ACROS. Sodium hydroxide (NaOH), calcium chloride (CaCl_2), sodium chloride (NaCl), potassium chloride (KCl), and magnesium sulfate (MgSO_4) were obtained from Carlo Erba, USA. All chemicals used were of analytical reagent grade (AR grade). Deionized distilled water (DI water), with a resistivity of $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ at 25°C , was prepared using a Milli-Q® system (Millipore) and was used throughout all experimental procedures.

The colorimetric responses of VB-6 with CUR_{Hydrogel} were measured by a smartphone RGB camera-based colorimetric platform and UV-visible spectrophotometer (UV-1800, Shimadzu, Japan). The digital images were acquired using an iPhone 16 Pro Max (Apple Inc., USA) equipped with a 48-megapixel rear camera (24 mm, f/1.78 aperture). These parameters were selected to ensure uniform image quality, minimize chromatic noise, and reduce fluctuations in exposure. For consistent lighting and to eliminate ambient interference, the sensing platform was placed inside a custom-fabricated imaging box ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$) equipped with fixed-position natural indoor light (InGaN LED combined with a phosphor converter, 400–700 nm). All images were captured under identical conditions throughout the experiments to maintain reproducibility in RGB-based colorimetric analysis, and the RGB intensities were subsequently processed using the ImageJ application based on the colors captured by the smartphone camera. The chemical and physical characteristics of the as-synthesized ZnONPs and CUR_{Hydrogel} were identified by Transmission electron microscope (TEM, JEM-2010 model, JEOL, Japan), X-ray diffraction analysis (XRD, Rigaku smart lab, Japan), and inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES, Avio 560 Max, PerkinElmer, USA). Field emission scanning electron microscopy (FESEM, Hitachi SU8030 model, Japan) and texture analyzer (TA-XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., England) were used to observe the topography and hardness of CUR_{Hydrogel}, respectively. To further confirm the successful fabrication of CUR_{Hydrogel}, FT-IR spectroscopy (IRTracer-100, Shimadzu, Japan) was employed to investigate its composition and structural integrity.

2.2. A molecular self-assembly reverse spherification of curcumin emulsion loading in double-layer hydrogel

The curcumin emulsion encapsulated within a double-layer hydrogel was prepared by the reverse spherification method (Fig. S1). Firstly, 10 mg of curcumin was dispersed in 98 mL of DI water containing 2 % v/v of Tween80 at 60°C under continuous stirring for 5 min. 1 mL of curcumin emulsion was loaded in 1.5 mL (I.D. 1.8 mm) of spherical mold, then cooled down in the freezer to -40°C for 45 min. The 1st layer of spherical curcumin emulsions was then constructed by accurately pipetting 0.5 mL of 3 % w/v CaCl_2 into a spherical mold containing frozen curcumin emulsion, followed by cooling down to -40°C for 45 min. The obtained spherical frozen curcumin emulsion was soaked in 3 % w/w sodium alginate solution for 1 min. The result of the 1st layer of Ca (II)/alginate containing a curcumin emulsion was soaked in DI water for 30 s to remove unbonded excess sodium alginate. The 2nd layer of

spherical curcumin emulsion was prepared by coating with ZnONPs. The ZnONPs were prepared according to the previous report with slight modifications [23]. In a typical synthesis, 10.98 g of zinc acetate dihydrate ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$) was dissolved in 100 mL of ethanol under continuous stirring at 60 °C for 30 min. The 100 mL of 0.5 mol L⁻¹ of oxalic acid ($H_2C_2O_4$) was added dropwise to prepare the zinc acetate dihydrate solution. The combined solution underwent continuous stirring at a rate of 500 rpm at 60 °C for 90 min. Eventually, the suspension was filtered using a vacuum pump filter. Finally, the product was dried at 60 °C overnight. Calcination was conducted in an electrical furnace at 600 °C for 3 h under an air atmosphere. The white-colored ZnONPs product was collected and ground into powder for further use. ZnONPs have been deposited on the 1st layer of spherical curcumin emulsion to prevent the degradation of curcumin using the Layer-by-Layer (LbL) technique. The positively charged ZnONPs were prepared by a non-covalent surface modification method. A 0.5 g of ZnONPs was dispersed in 25 mL of 10 mmol L⁻¹ of PDADMAC using a high-power ultrasonicator (VCX 130, Vibra-Cell™, USA) for 5 min. By taking advantage of electrostatic interaction, the negative charge of 1st layer of Ca (II)/alginate containing a curcumin emulsion was loaded in ZnONPs/PDADMAC for 20 sec and washed with DI water to obtain the white spherical curcumin bead. Finally, the white 2nd layer of spherical curcumin bead was soaked in 3 % w/v sodium alginate for 3 min to induce tight adhesion of CUR_{Hydrogel}. The obtained CUR_{Hydrogel} was stored in DI water at 4 °C in the refrigerator.

The physical and mechanical characteristics of CUR_{Hydrogel} were assessed. The hardness, ultraviolet light stability (UV LED lamps, 20 W, 365–395 nm), storage time (7, 14, 21, and 28 day), and swelling capacity (SC) in DI water and 90 mg L⁻¹ of boric acid (pH 9) were also investigated, and the experiment procedures are shown in the [Supporting Information](#) section.

2.3. Procedure for detection of pyridoxine (VB-6) using CUR_{Hydrogel}

The measurement is started from taking an aliquot of 2 mL of 90 mg L⁻¹ boric acid (pH 9) with different target VB-6 concentrations of 10–125 mg L⁻¹ into a 6-well painting palette (3.3 cm I.D. and 7.5 cm depth). The solutions are mixed by softly shaking and incubated for 1 min. Afterward, a double-layer spherical hydrogels liquid-core curcumin are placed in the mixed solutions and punctured with a needle. The 6-well painting palette is gently shaken and kept standing. The colorimetric reaction was carried out for 5 min, during which a distinct color change from yellow to varying intensities of orange was observed, corresponding to the concentration of VB-6. The colorimetric response of the mixed solution was photographed with a mobile phone camera. The obtained smartphone images of the color formed in the colorimetric reaction can be converted to their RGB numerical by ImageJ software. Each experiment was performed in triplicate, and the results were reported as the mean value with the standard deviation (SD).

To enhance the detection sensitivity of VB-6 using the proposed CUR_{Hydrogel} system, several experimental parameters were optimized, including the pH of boric acid (ranging from 7 to 10), the volume of VB-6 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 3.0 mL), the reaction time between boric acid and VB-6 (0.25, 0.5, 1.0, 3.0, and 5.0 min), and the reaction time between the pyridoxine–boron complex and CUR_{Hydrogel} (1, 3, 5, 10, and 15 min). Each condition was optimized by varying one parameter at a time while keeping the others constant. The optimal value for each parameter was determined based on the absorbance measurements obtained using a UV–vis spectrophotometer.

2.4. Method performances and validation

The analytical performance of CUR_{Hydrogel} for VB-6 quantification was investigated in terms of linearity, the limit of detection (LOD), the limit of quantitation (LOQ), precision, and accuracy. The effectiveness and reliability of the proposed method were assessed by comparing the

results obtained from the smartphone-based colorimetric analyzer with CUR_{Hydrogel} for VB-6 quantification to the High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) and UV–vis spectrophotometric standard method. For the sample preparation procedure, each functional drink sample was treated by filtering through a Whatman No. 42 filter paper (CHM™, Barcelona, Spain) and a 0.22 μm nylon membrane filter (CNW Technologies, China), respectively. For the spiked samples, a specific volume of a standard solution of VB-6 concentration of 10, 50, and 100 mg L⁻¹ was added to 10.0 mL of each functional drink sample.

Chromatographic analysis (HPLC) of VB-6 in the spiked functional drink samples was performed using a Shimadzu RF-20A (HPLC-Prominence LC-20 series, Shimadzu, Kyoto, Japan), equipped with a C18 capillary column (4.6 mm × 150 mm × 5 μm particle size, GL Sciences, Japan). A photodiode array detector (PDA, SPD-M20A, Shimadzu Co., Ltd, Kyoto, Japan) operating at a wavelength of 280 nm was used for VB-6 detection. For a conventional separation, the column was eluted using a linear gradient of 0.015 % triethylamine (pH 2.7) for 3 min and 75:25 v/v of 0.015 % triethylamine/acetonitrile for 3 min. The column was equilibrated at 25 °C with a flow rate of 1.0 mL min⁻¹. Data were acquired and processed using LabSolutions software (version 5.92).

UV–vis spectrophotometric analysis was performed using Shimadzu UV-1800a (Kyoto, Japan). A 2 mL of 90 mg L⁻¹ boric acid (pH 9) was mixed with 10 mL of different concentrations of VB-6 (0–125 mg L⁻¹) spiked functional drink samples. Then, 1 mL of curcumin emulsion was added to the mixture under continuous stirring. The absorbance of the mixture solution was measured at 450 to 600 nm intervals.

2.5. Analysis of real functional drink samples

Four different functional drink samples were purchased from a premium supermarket in Bangkok, Thailand. Each functional drink samples were filtered sequentially using Whatman No. 42 filter paper (CHM™, Barcelona, Spain), followed by a 0.22 μm nylon membrane filter (CNW Technologies, China). Varied quantities of VB-6 of 10, 50, and 100 mg L⁻¹ standard solutions were added to each functional drink sample. The colorimetric detection was carried out by using the procedure described in [Section 2.3](#).

3. Results and discussion

3.1. Formation and characterization of the prepared CUR_{Hydrogel}

CUR_{Hydrogel} was prepared by the reverse spherification method. The curcumin emulsion was encapsulated with the 1st layer of Ca (II)/alginate. The cross-linked Ca (II)/alginate was formed through Ca (II) coordination and chelation-binding chain structures (egg-box model of cross-linking), resulting in a strong gel structure for encapsulating curcumin emulsion ([Fig. 1A](#)). Sodium alginate is a linear biopolymer consisting of β-D-mannuronic acid (M) and α-L-guluronic acid (G) residues, which are connected through (1 → 4) glycosidic linkages. When calcium chloride (CaCl₂) is added to a sodium alginate solution, Ca (II) binds with the carboxyl (–COO⁻) groups at the C1 and C4 positions of the guluronic acid (G-blocks). This interaction follows the egg-box model, where divalent Ca (II) coordinates with –COO⁻, facilitating crosslinking between adjacent alginate chains [[24–26](#)]. The structured alignment of guluronic acid residues allows multiple Ca (II) ions to bridge the polymer chains, creating a strong gel network that efficiently entraps the curcumin emulsion. The diameter (I.D.) of the curcumin emulsion encapsulated with the 1st layer of Ca (II)/alginate bead was shown to be between 1.0 and 1.3 cm. Moreover, the surface charges of the curcumin emulsion encapsulated with the 1st layer of Ca (II)/alginate bead were shown to have a negative charge potential due to the carboxylate functional groups of sodium alginate, which partially ionize at neutral pH (pKa of sodium alginate = 3.2–4.4). Subsequently, the 2nd layer of the curcumin emulsion bead was coated with positively charged ZnONPs using the Layer-by-Layer (LbL) technique. By taking advantage

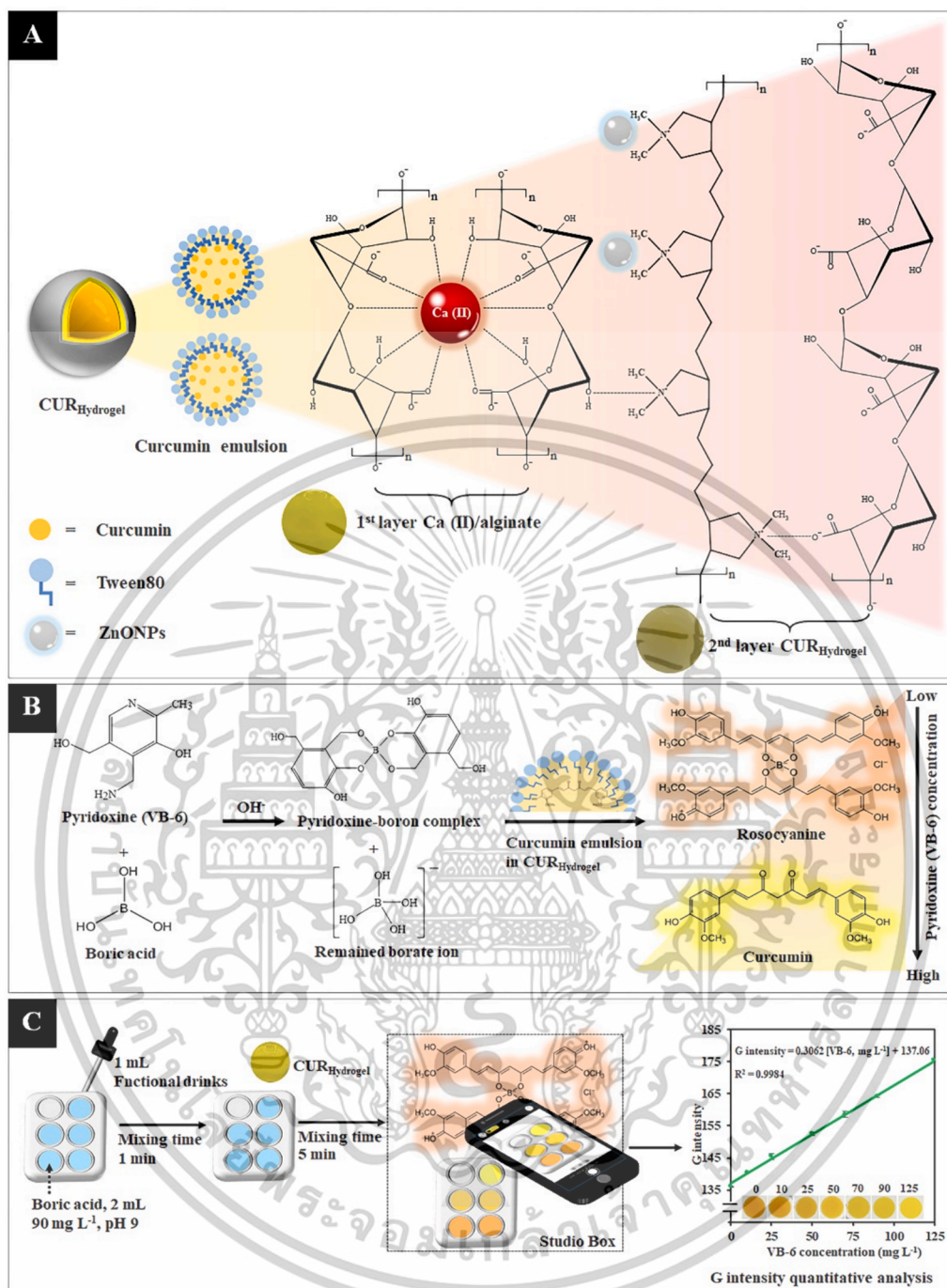


Fig. 1. Schematic illustration of (A) double-layer spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion, (B) colorimetric response mechanism, and (C) determination of VB-6 in actual samples of functional drinks by using the smartphone RGB camera-based colorimetric sensor.

of the electrostatic interaction between positively charged ZnONPs and negatively charged 1st layer of Ca (II)/alginate beads, the CUR_{Hydrogel} was formed. The physical characteristic of the 1st layer of Ca (II)/alginate bead was changed from transparent yellow to cloudy yellow, indicating the successful formation of ZnONPs onto the 1st layer of Ca (II)/alginate bead. The I.D. of the bead after the 2nd layer forming increased to 1.5 cm. Finally, the 2nd layer of the curcumin emulsion bead was coated with negatively charged sodium alginate to strengthen the CUR_{Hydrogel} network.

To obtain an efficient CUR_{Hydrogel} colorimetric sensor for VB-6 detection, it is desirable to investigate the optimal conditions for curcumin emulsion preparation. Low water solubility (0.6 μg mL⁻¹) of

curcumin is one of the major problems for sensing behavior. Therefore, to enhance the solubility of curcumin, a Tween80-based emulsion system was employed for the dispersion of curcumin. Firstly, we explored curcumin emulsion preparation by the component combination of curcumin (0.3 mmol L⁻¹) and varying Tween80 concentrations of 0.5 to 3.0 % v/v. As shown in Fig. S2A, the solubility of curcumin was found to increase when the Tween80 concentration increased from 0.5 to 1.5 % v/v and reached equilibrium at 2.0 % v/v. Increasing the concentration of Tween80 raises the availability of surfactant molecules, facilitating their interaction with curcumin emulsion through hydrophobic and electrostatic forces. This enhances the uniform distribution of curcumin within the emulsion system and inhibits its precipitation. Most curcumin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

adheres to the surface of oil droplets within the emulsion, which are stabilized by the protective layer of Tween80. As a result, 2.0 % v/v of Tween80 was selected for use in the dispersion of curcumin. To enhance the solubility of curcumin, a number of solubility efficiency parameters such as curcumin concentrations (0.03, 0.10, 0.30, 0.40, and 0.50 mmol L⁻¹), heating temperatures of 25, 45, 60, 70, and 90 °C, and homogenization time of 1, 3, 5, 10, 15, and 20 min were tuned to improve the solubility efficiency. The conditions were optimized by varying one parameter while keeping others constant. Following the optimization process (Fig. S2B-D), the optimal curcumin concentrations were found to be 0.3 mmol L⁻¹, with a heating temperature of 60 °C, and a homogenization time of 5 min.

The prepared curcumin emulsion was encapsulated with the 1st layer of Ca (II)/alginate. The factors influencing the encapsulation are the volume of curcumin emulsion, CaCl₂ concentration, and sodium alginate concentration. To attain a high sensing response of VB-6, it was imperative to utilize an appropriate volume of curcumin emulsion to form CUR_{Hydrogel}. The volume of curcumin emulsion of 0.5, 0.75, 1.00, and 1.50 mL were used to investigate the sensing performance. The CUR_{Hydrogel} was fabricated into a spherical shape by controlling the concentrations of both CaCl₂ and sodium alginate to 2 % w/v. Different volumes of curcumin emulsion were evaluated through a reaction with boric acid at concentrations of 10, 25, 50, 70, and 90 mg L⁻¹, while monitoring the formation of rosocyanine complexes. As a result, shown in Fig. 2A, the obtained rosocyanine complexes gradually increased with the enhancement of curcumin emulsion volume. It is seen that 1.50 mL of curcumin emulsion volume allowed the complete formation of rosocyanine complexes. It is noteworthy that 1.00 mL of curcumin emulsion volume does not show significantly different results from 1.50 mL. Thus, 1.00 mL of curcumin emulsion volume was chosen as the appropriate volume for encapsulation with the 1st layer of Ca (II)/alginate. The effect of Ca (II) cross-linking with sodium alginate on the properties and structure of CUR_{Hydrogel} was investigated by varying the concentrations of Ca (II), ranging from 0.5 to 5.0 % w/v, and sodium alginate

concentration of 0.5 to 5.0 % w/v. The conditions were fine-tuned by adjusting one parameter at a time while keeping the others unchanged. The hardness of the 1st layer of Ca (II)/alginate was assessed. Hardness reflects the maximum force required to deform the gel or the strength of the gel network. As shown in Fig. 2B, the hardness of CUR_{Hydrogel} gradually increased with increasing Ca (II) concentration from 0.5 to 3.0 % w/v. The gelation process of the 1st layer of Ca (II)/alginate evolved with the increase of CaCl₂ concentration, which resulted in different crosslinking densities and entanglement of CUR_{Hydrogel}. At equilibrium, at approximately 3.0 % w/v Ca (II) concentration, the plateau hardness of the 1st layer of Ca (II)-alginate was approximately 55.86 N. Additionally, the sodium alginate concentration for gelation was found to be 3.0 % w/v (Fig. 2B), which showed a hardness of 73.57 N. The digital images of the 1st layer of Ca (II)/alginate bead with studied Ca (II) and sodium alginate are shown in Fig. S3.

The 1st layer of Ca (II)/alginate was coated with ZnONPs to prevent the degradation of curcumin emulsion. ZnONPs were synthesized via the sol-gel method using zinc acetate dihydrate (Zn(CH₃COO)₂·2H₂O) as a precursor, and the mixture of ethanol/oxalic acid (C₂H₅OH/C₂H₂O₄) was used as a solvent. A highly crystalline ZnONPs was successfully obtained after calcination of the zinc oxalate product at 600 °C. The chemical properties of ZnONPs are presented and discussed in Fig. S4. Generally, ZnONPs are highly insoluble in water, which will affect the adhesion on the surface of the 1st layer of Ca (II)/alginate. Functionalized ZnONPs with positively charged PDADMAC showed remarkably strong electrostatic interaction with the negatively charged 1st layer of Ca (II)/alginate. The ZnONPs were effectively dispersed in a 10 mmol L⁻¹ PDADMAC solution. (Fig. S5). Zeta potential measurements were performed to evaluate the charge potential and dispersion stability of ZnONPs. Fig. S6 shows zeta potential in the range of (+) 42.2 to (+) 47.0 mV, with different PDADMAC dispersion concentrations of 1–20 mmol L⁻¹. The positive zeta potential indicates the successful functionalization of ZnONPs with PDADMAC. The positively charged ZnONPs were then deposited onto the 1st layer of Ca (II)/alginate.

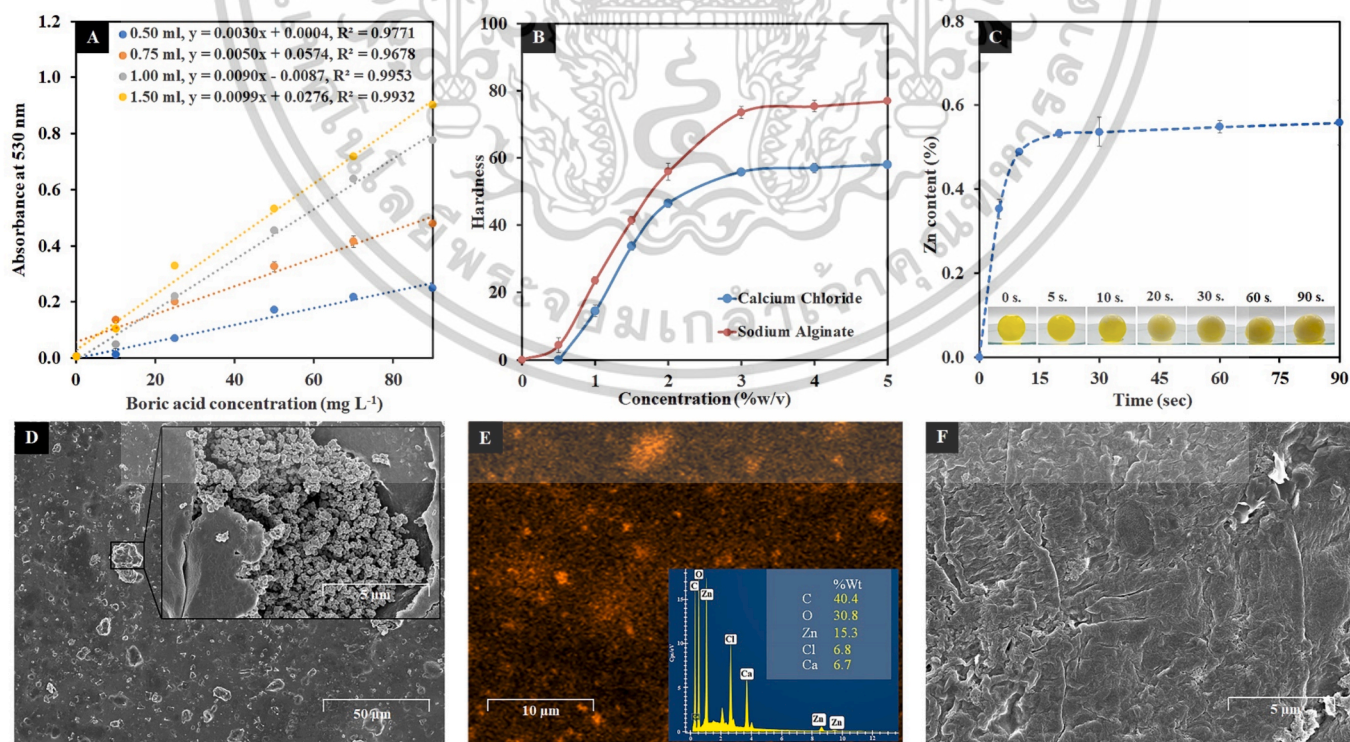


Fig. 2. Formation, optimization, and characterizations of double-layer spherical Ca (II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion (A) Curcumin emulsion volume, (B) calcium chloride and sodium alginate concentration, (C) ZnONPs loading, (D-E) FeSEM image and EDS spectra of 2nd layer spherical hydrogel, (F) FeSEM image 1st layer spherical hydrogel.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 2C shows the deposition efficiency of positively charged ZnONPs on the surfaces of the 1st layer of Ca (II)/alginate. ICP-OES was used to investigate the Zn content on the bead surfaces. Under immersion of the 1st layer of Ca (II)/alginate into positively charged ZnONPs for 20 sec, the 2nd layer CUR_{Hydrogel} was formed. The Zn content increased from 0.59 to 0.67 mg L⁻¹ with prolonged immersion time (5–20 s). After 20 s of immersion, Zn content exhibited a constant significant. The FESEM image (Fig. 2D) confirmed the successful deposition of ZnONPs onto the 1st layer of Ca (II)/alginate, revealing agglomerated spherical formations on the surfaces. As confirmed by FESEM-EDS mapping (Fig. 2E), Zn exists in 15.3%. Compared to the 1st layer of Ca (II)/alginate, FESEM image (Fig. 2F) reveals a rough and irregular surface morphology with an absence of ZnONPs distribution. Finally, the 2nd layer of the curcumin emulsion bead was coated with negatively charged sodium alginate, resulting in an increased hardness of the CUR_{Hydrogel} to 138.49 N. Moreover, the stiffness and strength of CUR_{Hydrogel} were found to be 6.45×10^4 N/m and 1.01×10^6 N/m², respectively.

To further confirm the successful fabrication of CUR_{Hydrogel}, FT-IR spectroscopy was employed to investigate its composition and structural integrity. (Fig. S7). The FT-IR spectrum of the 1st layer of Ca (II)/alginate (Fig. S7A) exhibited a broad O–H stretching band around 3411 cm⁻¹, indicating the presence of hydroxyl groups. Peaks at 1595 cm⁻¹ and 1415 cm⁻¹ were assigned to asymmetric and symmetric stretching of carboxylate groups (COO⁻), respectively, suggesting successful ionic crosslinking between alginate and Ca (II). A distinct peak at 1022 cm⁻¹ corresponds to C–O–C stretching vibrations within the polysaccharide backbone. These features confirm the formation of a stable calcium alginate network. The 2nd layer, composed of ZnONPs incorporated into

a PDADMAC matrix, was successfully coated over the 1st layer of Ca (II)/alginate hydrogel, as shown in Fig. S7B. The presence of positively charged ZnONPs/PDADMAC facilitated electrostatic interactions with the negatively charged 1st layer of Ca (II)/alginate, promoting uniform coating and enhancing the stability of the CUR_{Hydrogel}. The FT-IR spectrum of the ZnONPs/PDADMA coating layer exhibited a broad O–H stretching vibration around 3405–3150 cm⁻¹, indicative of surface hydroxyl groups on ZnONPs. Peaks at 2950 cm⁻¹ were assigned to C–H stretching of aliphatic PDADMAC. A prominent Zn–O stretching vibration appeared around 435–468 cm⁻¹, validating the successful incorporation of ZnONPs. These spectral features collectively support the formation of a stable ZnONPs/PDADMAC layer on the Ca (II)/alginate hydrogel surface.

3.2. Stability studies

Curcumin was significantly less stable under UV radiation due to its structure with two hydroxy methoxyphenyl rings linked by two β -diketone groups (Fig. S8). The C–H bonds are expected to be highly weak due to the delocalization of the unpaired electron across the two neighboring oxygen atoms [27]. The active position in curcumin, therefore, is the central hydrogens in the β -diketone moiety, which have two labile hydrogens. Fig. 3A shows the UV stability of curcumin emulsion in a single layer of Ca (II)/alginate and a double layer of Ca (II)/alginate coated with ZnONPs. The results showed that curcumin emulsion encapsulated with a double-layer of Ca (II)/alginate (II) coated with ZnONPs had good stability during storage for 28 days. Compared to curcumin emulsion encapsulated in a single layer of Ca (II)/alginate,

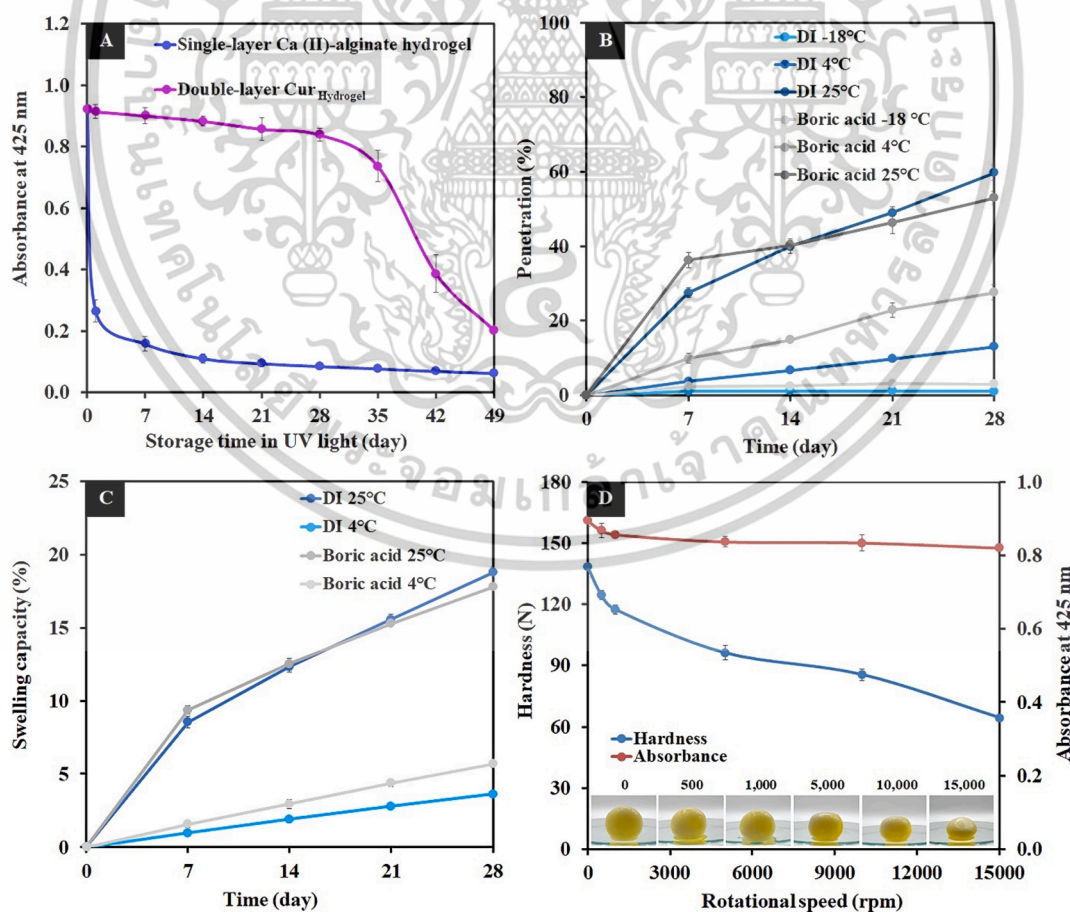


Fig. 3. Stability of spherical hydrogel (A) UV irradiation with the single-layer Ca (II)-alginate hydrogel and double-layer CUR_{Hydrogel}, (B) permeabilities efficiency in deionized water and boric acid in temperature of -18°C , 4°C , and 25°C , (C) swelling efficiency in deionized water and boric acid in temperature of 4°C and 25°C , and (D) shaking efficiency.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

curcumin emulsion was decomposed within 1 day. This strength can be overcome by two main mechanisms of the absorption and reflection of UV light by ZnONPs. By absorbing UV light, ZnONPs convert the energy absorbed into harmless infrared light, while they also reflect UV light [28].

CUR_{Hydrogel} are three-dimensional macroscopic network comprising curcumin emulsion encapsulated in a double-layer of Ca (II)/alginate coated with ZnONPs. Generally, hydrogels can absorb and retain a large volume of water due to the presence of hydrophilic groups in their polymer chains. Keeping CUR_{Hydrogel} stable and safe for storage and transportation is a challenge. Fig. 3B shows the storage conditions of CUR_{Hydrogel} in DI water and 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate for different temperatures of -18, 4, and 25 °C. The % penetration of CUR_{Hydrogel} in different media conditions was calculated by curcumin emulsion quantification in the release medium. Results showed that the % penetration of CUR_{Hydrogel} in DI water storage at -18 and 4 °C exhibited low permeability, while the % penetration of CUR_{Hydrogel} in 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate at 4 and 25 °C showed high permeability, which was affected by the color change of curcumin emulsion in CUR_{Hydrogel}. Therefore, CUR_{Hydrogel} stored at 4 °C and particularly DI water formulations were shown to be more suitable for our purposes.

Moreover, the swelling effect of CUR_{Hydrogel} at different storage media, such as DI water and 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate for different temperatures of 4 and 25 °C was also investigated (Fig. 3C). The CUR_{Hydrogel} was dramatically swelled either by DI water or 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate at 25 °C. The gradual decrease of water absorbency and swelling rate when the CUR_{Hydrogel} is at 4 °C, either in DI water or 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate. Although stored in 90 mg L⁻¹ in pH 9 of borate at 4 °C showed a low permeation, the interaction between curcumin emulsion and borate led to a color change from yellow to red.

The compressive strength of CUR_{Hydrogel} was investigated by high- and low-rotational-speed centrifuge (3,000–15,000 rpm) of CUR_{Hydrogel} in 4 °C of DI water. Centrifugation with an increasing number of revolutions causes the hydrogel beads to shrink and change shape (Fig. 3D), while the hardness of the CUR_{Hydrogel} also decreases. Surprisingly, increasing revolutions of centrifuge rpm did not cause the curcumin emulsion to escape into the media.

3.3. Detection principle

The sensing mechanism is shown in Fig. 1B and is based on a sequential reaction involving borate ions, VB-6, and curcumin emulsion. In the initial step, pyridoxine reacts with borate ions under alkaline conditions (pH 9) to form a colorless pyridoxine-boron complex. This complex results from the combination of one borate ion with two pyridoxine molecules, thereby reducing the concentration of free borate ions in the solution. Subsequently, CUR_{Hydrogel} is added to the system. The unreacted borate ions then interact with the curcumin emulsion to generate a rosocyanine complex. This reaction induces a visible color change from yellowish to orange, which is characteristic of the rosocyanine complex. Crucially, the degree of this color change is inversely proportional to the concentration of VB-6. At higher VB-6 concentrations, a greater proportion of borate ions are complexed with pyridoxine, leaving fewer borate ions available to react with curcumin. Consequently, less rosocyanine is formed, and the observed color gradually shifts from orange to yellowish. This correlation provides a reliable basis for the quantitative detection of VB-6 via smartphone-based RGB analysis.

The proposed sensing mechanism was further supported by FT-IR spectroscopy (Fig. S9), which provided molecular-level evidence for the sequential formation of pyridoxine-boron and rosocyanine complexes. Upon reacting pyridoxine with borate under alkaline conditions (pH 9), the FT-IR spectrum (Fig. S9A) of the resulting pyridoxine-boron complex exhibited broad O-H and N-H stretching bands around 3392 cm⁻¹, consistent with the coordination of these donor groups to boron. An additional absorption band appeared in the region of 1367–1427

cm⁻¹, attributed to B-O asymmetric stretching, along with a shoulder near 1010 cm⁻¹ corresponding to B-O-C vibrations, both confirming the formation of the pyridoxine-boron chelate. Subsequently, the FT-IR spectrum of the CUR_{Hydrogel} after borate addition revealed distinct spectral changes consistent with the formation of a boron-curcumin complex (rosocyanine) (Fig. S9B). Specifically, the C=O stretching vibration of rosocyanine near 1734 cm⁻¹ shifted in intensity, indicating chelation with borate via the β-diketone moiety. Concurrently, new peaks emerged around 1352–1450 cm⁻¹, corresponding to B-O bonds within the rosocyanine complex. The prominent absorption bands were observed at 2922 and 2862 cm⁻¹, which are attributed to the asymmetric and symmetric stretching vibrations of aliphatic C-H bonds, respectively. These bands originate from the methyl (-CH₃) and methylene (-CH₂-) groups present in the curcumin backbone. These spectral features collectively confirm the molecular interactions underlying the stepwise sensing mechanism and highlight the utility of FT-IR in tracking complexation events central to VB-6 detection. Similar trends have been reported in the literature for pyridoxine-boron [29] and rosocyanine complexes [30,31].

3.4. Optimization of working parameters

Having obtained the optimal detection system, some working parameters such as the pH effect of boric acid, the volume of VB-6, reaction time for boric acid and VB-6, and reaction time for boric acid-VB-6 complexes and CUR_{Hydrogel} were investigated to obtain the best test performance of the assay. For the optimization of pH, the boric solution was adjusted pH value in the range of 7–10 (Fig. 4A). At a pH value lower than 9, the reaction between boric acid and curcumin did not occur because the boric acid (pK_a = 9.2) is still in non-dissociated boric acid form (H₃BO₃) [32]. As a result, the slope of linear curves plotting between boric acid concentration and the absorbance at pH 7 and 8 were very low, while the red color of rosocyanine product solutions was not observed (Fig. S10A–B). At pH 9 and 10, boric acid was turned to the dissociated borate form (B(OH)₄⁻). The reaction between borate ion and curcumin to form rosocyanine complex occurred. It resulted in a change of solution color from yellow to orange (Fig. S10C–D). The high sensitivities in terms of slope of calibration curves were also obtained. However, the linearity (R²) of the calibration curve at pH 10 was lower than at pH 9, primarily because the reaction between boric acid and curcumin at pH 10 was rapid and complete, particularly at higher concentrations of boric acid. At these elevated concentrations, the relationship between boric acid and absorbance values became disproportionate. The pH 9 was therefore selected as a suitable pH.

The appropriate volume of VB-6 (1.0, 1.5, 2.0, and 3.0) solution was investigated. According to the reaction in Section 3.3, when the VB-6 solution was added to the borate solution, the borate-VB-6 complex was obtained. This interrupted the reaction between borate and curcumin, leading to a decrease in absorbance at 530 nm as the concentration of VB-6 increased. Because raising the volume of VB-6 solution is comparable to increasing the number of moles of VB-6, this has an impact on the slope of a standard curve. As the results in Fig. 4B, the slope decreased when the volume of VB-6 solution was increased. The 1.0 mL of VB-6 solution provided high sensitivity and linearity. This volume was therefore considered as an appropriate volume.

Fig. 4C shows the optimal incubation time of borate and VB-6, different VB-6 concentrations of 10, 50, and 100 mg L⁻¹, and different incubation times of 0.25, 0.5, 1.0, 3.0, and 5.0 min, by fixing 90 mg L⁻¹ of pH 9 borate, are applied to perform the assay. When adding CUR_{Hydrogel} to the reaction system, the absorbance intensity at 530 nm was evaluated. The absorbance intensity at 530 nm of the test system (borate and VB-6) reached the maximum at 0.25 min, indicating that the borate-VB-6 formation reaction was incomplete. The large amount of borate interacted with curcumin emulsion, resulting in the formation of large rosocyanine. Borate complexation with VB-6 was completed within 1.0 min, and thereafter, the remaining boric acid further reacted with

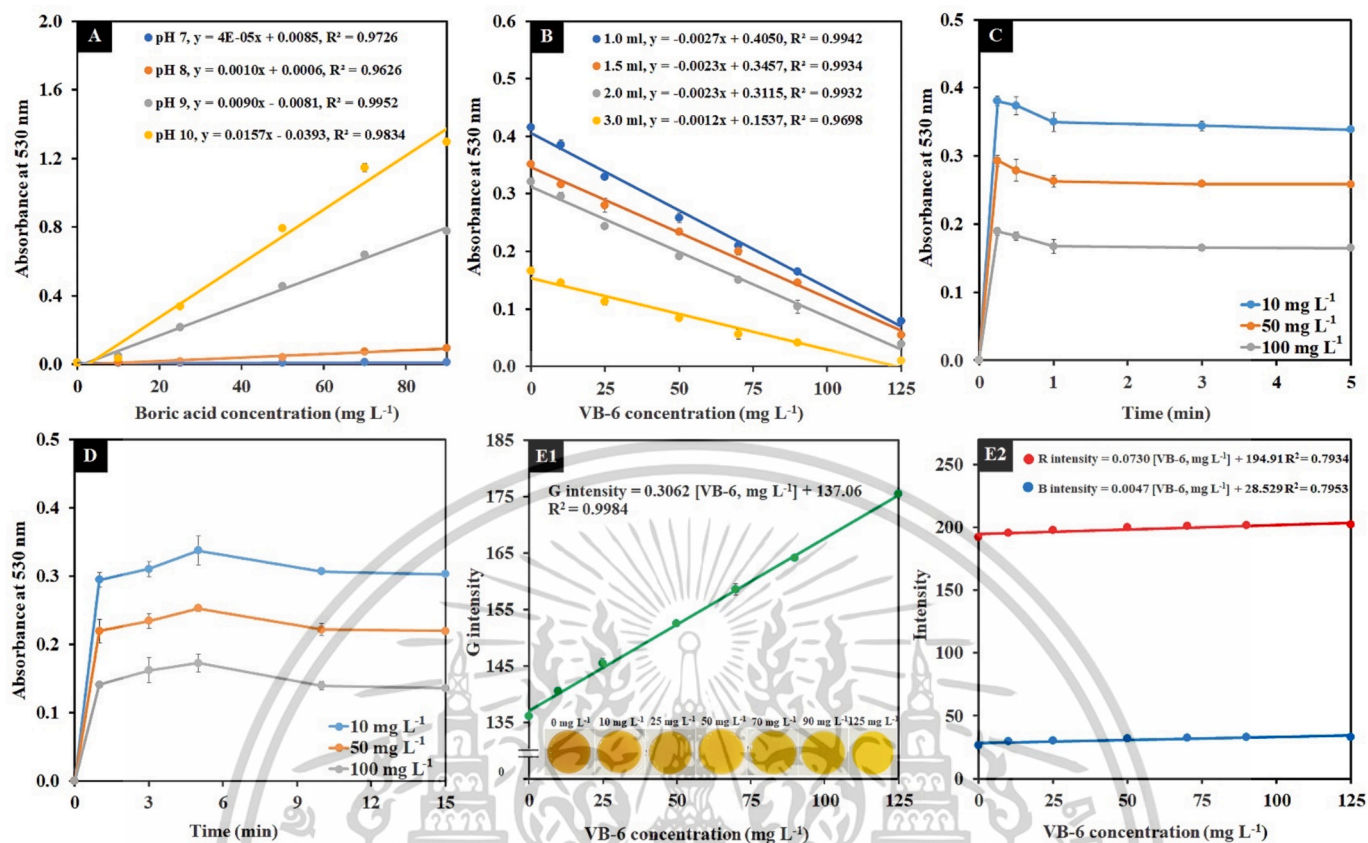


Fig. 4. Optimization of double-layer spherical Ca(II)-alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion on the detection of VB-6 (A) pH of boric acid of 7–10, (B) concentration of VB-6 of 0–125 mg L⁻¹ with the volume of 1.0, 1.5, 2.0, and 3.0 mL, (C) reaction time of VB-6 and boric acid of 0.25, 0.5, 1.0, 3.0, and 5.0 min, (D) reaction time of curcumin and boric acid of 1.0, 3.0, 5.0, 10.0, and 15.0 min, and calibration plot of (E1) G responses, (E2) R and B curve of VB-6 with different VB-6 concentration ranging from 0 to 125 mg L⁻¹.

curcumin.

Similarly, Fig. 4D shows that the optimal incubation time of remaining borate and curcumin emulsion in CUR_{Hydrogel} was 5 min, and there was no significant difference by varying VB-6 concentrations of 10, 50, and 100 mg L⁻¹.

3.5. Smartphone RGB camera-based colorimetric platform of CUR_{Hydrogel} for VB-6 quantification

The strong enrichment effect of CUR_{Hydrogel} on the VB-6 colorimetric response allowed for clear visualization of color changes (red, green, and blue (RGB) intensities), which were recorded using a smartphone RGB camera (Fig. 1C). The value of RGB in the images can be determined through the Image J application and as data output. The VB-6 concentrations ranging from 10 to 125 mg L⁻¹ were used to investigate the colorimetric responses with CUR_{Hydrogel}. As shown in Fig. 4E1, the G intensity of VB-6 with CUR_{Hydrogel} was found to be the most dominant among all B and R values (Fig. 4E2), demonstrating good linearity and a well-defined slope. The linear regression equation was G intensity = 0.3062 [VB-6, mg L⁻¹] + 137.06 (R² = 0.9984). The LOD (3S.D./slope of G intensity calibration) and LOQ (10S.D./slope of G intensity calibration) were found to be 2.93 mg L⁻¹ and 9.77 mg L⁻¹, respectively. The results of accuracy and precision were summarized in Table S1. The CUR_{Hydrogel}-based smartphone RGB camera colorimetric sensor with G intensity responses exhibited good reproducibility with relative standard deviations (RSD) of 0.20 % (10 mg L⁻¹), 0.27 % (50 mg L⁻¹), and 0.24 % (100 mg L⁻¹). Moreover, the accuracy for the present system was found in the range of 100.50–102.82 %.

Having obtained the optimal detection system of the smartphone

RGB camera-based colorimetric platform of CUR_{Hydrogel}, we then evaluated the colorimetric responses of VB-6 using the UV-vis spectrometry approach. As shown in Fig. S11, when VB-6 was raised from 0 to 125 mg L⁻¹, the red color of the solution changed to yellowish, and the UV-vis spectra revealed increasing absorbance intensity with bathochromic shifts. The developed CUR_{Hydrogel}-based sensing probe, when coupled with UV-vis spectrophotometric detection, exhibited a linear detection range of 0–125 mg L⁻¹, with a limit of detection (LOD) and limit of quantification (LOQ) as low as 1.39 mg L⁻¹ and 4.56 mg L⁻¹, respectively. Although the LOD and LOQ of the smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel} were higher, the sensitivity of this approach was still acceptable for VB-6 quantification in functional drink samples.

3.6. Selectivity of CUR_{Hydrogel}

To investigate the selectivity of CUR_{Hydrogel} for VB-6, other VB complexes in functional drinks including thiamine (VB-1), riboflavin (VB-2), niacinamide (VB-3), pantothenate (VB-5), biotin (VB-7), cobalamin (VB-12), ascorbic acid (vitamin C), glucose, as well as various anions and cations potentially present in functional drinks, such as Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Zn²⁺, Mg²⁺, and Fe²⁺ were chosen to introduce into CUR_{Hydrogel} colorimetric system. The G intensity in the RGB system of rosocyanine in the presence of various VB complexes, anions, and cations was vividly shown in Fig. S12. Only VB-3, VB-7, and Zn²⁺ could cause a significant color change at a concentration 50 times (6,250 mg L⁻¹) the maximum detectable VB-6 concentration. Other VB-1, VB-2, VB-5, VB-12, ascorbic acid (vitamin C), glucose, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, and Fe²⁺ almost had no color change at a concentration 100 times (12,500 mg

L⁻¹) than the maximum detectable limit for VB-6. The results indicate that the CUR_{Hydrogel}-based sensor has good selectivity for detecting VB-6, implying its feasibility for use in actual samples.

3.7. Actual sample detection and method validation

Table 1 summarizes the comparative analysis of VB-6 concentrations in four commercial functional beverage samples using three distinct analytical approaches, including a smartphone-based RGB colorimetric sensor utilizing CUR_{Hydrogel}, conventional UV–visible spectrophotometry, and high-performance liquid chromatography (HPLC). Four functional beverage samples, obtained from a premium supermarket in Bangkok, Thailand, were spiked with VB-6 concentrations of 10, 50, and 100 mg L⁻¹ to assess the accuracy and recovery efficiency of the developed analytical techniques. For all examined brands and spiking concentrations (10, 50, and 100 mg L⁻¹), the CUR_{Hydrogel}-based colorimetric sensor exhibited satisfactory recovery values ranging from 95.25 % to 104.27 %, closely aligning with those achieved by UV–visible spectrophotometry (98.62 %–104.80 %) and HPLC (95.25 %–103.60 %). Additionally, the precision (relative standard deviation, %RSD) of the smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel} for VB-6 was calculated to be in the range of 0.06–1.22 %. The precision values obtained for the CUR_{Hydrogel}-based colorimetric sensor were consistent with the acceptable variability thresholds observed across all analytical platforms, thereby highlighting the high reproducibility and operational reliability of the method under varied experimental conditions. Furthermore, a comparison of the VB-6 contents in the eight functional drink bands (16 samples) (Table. S2) obtained through the CUR_{Hydrogel}-based smartphone RGB camera colorimetric sensor and those acquired using the validating standard UV–vis spectrophotometry and HPLC method demonstrated no significant differences based on the ANOVA test ($F_{\text{stat}} = 8.02 \times 10^{-3}$ and $F_{\text{crit}} = 3.20$). Accordingly, the fabricated CUR_{Hydrogel}-based smartphone RGB camera colorimetric sensor exhibited excellent sensitivity and accuracy in detecting VB-6.

The smartphone RGB camera-based colorimetric platform utilizing CUR_{Hydrogel} for VB-6 quantification was compared with conventional analytical techniques, as summarized in Table 2. This method demonstrates clear novelty and differentiates itself from existing VB-6 detection strategies by offering a broader detection range and suitability for both in-field and laboratory-based applications. Although its sensitivity is slightly lower than that of previously reported methods, the platform delivers satisfactory analytical performance for the determination of VB-6 in functional beverage matrices. Notably, colorimetric methods for VB-6 analysis remain limited in the literature. The CUR_{Hydrogel}-based

system offers an alternative approach characterized by operational simplicity, portability, and cost-effectiveness, highlighting its potential as a field-deployable test kit for rapid VB-6 screening.

4. Conclusions

To overcome the limitations of conventional VB-6 detection methods, namely their reliance on costly, non-portable instruments and laborious procedures, we successfully developed a CUR_{Hydrogel}-based smartphone-integrated RGB colorimetric sensor for rapid and selective quantification of VB-6 in functional beverages. The hydrogel platform was fabricated via a molecular self-assembly reverse spherification method and designed with a double-layer structure comprising a Ca (II)-alginate core encapsulating a curcumin emulsion and a ZnONPs-based outer layer. This architecture promoted the stable and efficient formation of rosocyanine complexes with boric acid, enabling colorimetric detection correlated with VB-6 concentration. The sensor achieved a detection limit (LOD) and quantification limit (LOQ) of 2.93 mg L⁻¹ and 9.77 mg L⁻¹, respectively, with excellent precision (RSD: 0.20–0.27 %) and recovery (99.84 %–103.03 %). Validation against HPLC and UV–vis spectrophotometry confirmed the method's accuracy, with no statistically significant differences observed. Furthermore, the CUR_{Hydrogel} demonstrated superior photostability, maintaining curcumin integrity under UV exposure for up to 28 days, and exhibited notable mechanical strength. This work highlights the practical potential of CUR_{Hydrogel}-based smartphone RGB camera colorimetric sensor as a field-deployable, low-cost, and instrument-free platform for real-time monitoring of VB-6 in commercial functional drinks, offering a novel and efficient alternative to current analytical techniques.

Looking forward, the developed CUR_{Hydrogel} platform could be adapted for the detection of other micronutrients such as folic acid, niacin, or riboflavin, or bioactive compounds including polyphenols, flavonoids, or curcuminoids, by tailoring the sensing chemistry to specific analytes. Moreover, with appropriate design adjustments, the system holds potential for integration into portable testing kits aimed at supporting nutritional screening and on-site analysis, particularly in settings where access to centralized laboratories is limited. Such extensions would contribute to the broader applicability of this approach in food quality control, health-related monitoring, and routine testing scenarios, thereby reinforcing its practical value in real-world applications.

Table 1

Determination of VB-6 in functional drink samples using the smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel}, UV–vis spectrophotometry, and HPLC method.

Functional drink sample	Added	Smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR _{Hydrogel}		UV–vis spectrophotometry		HPLC				
		Found (mg L ⁻¹)	Recovery (%)	Found (mg L ⁻¹)	Recovery (%)	Found (mg L ⁻¹)	Recovery (%)			
Brand 1	0	4.29	±0.30	–	4.37	±2.45	–	4.79	±0.61	–
	10	14.28	±0.06	99.90	14.82	±0.50	104.50	15.15	±2.13	103.60
	50	54.30	±0.47	100.02	55.89	±1.09	103.04	54.08	±3.78	98.58
	100	104.27	±0.59	99.98	106.37	±0.31	101.97	100.22	±0.93	95.25
Brand 2	0	0.84	±0.76	–	0.94	±0.06	–	0.96	±0.10	–
	10	11.06	±1.05	102.20	10.85	±0.86	99.10	11.24	±1.52	102.80
	50	50.95	±0.16	100.22	51.38	±2.60	100.88	52.75	±2.06	103.58
	100	101.05	±0.69	100.21	101.08	±0.13	100.14	97.83	±3.63	96.87
Brand 3	0	3.42	±0.52	–	1.87	±0.79	–	2.57	±0.53	–
	10	13.65	±0.59	102.30	12.35	±1.06	104.80	12.88	±0.42	103.10
	50	53.41	±1.10	99.98	51.18	±2.26	98.62	52.62	±4.45	100.10
	100	103.26	±0.47	99.84	103.1	±2.98	101.23	102.35	±3.79	99.87
Brand 4	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	10	10.24	±1.19	100.40	10.45	±1.25	103.30	10.35	±0.52	103.50
	50	50.15	±0.72	99.90	50.85	±2.62	101.46	54.04	±0.53	99.68
	100	100.23	±1.22	103.03	101.22	±0.07	101.10	100.47	±2.02	100.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2

Comparison of detection performances of the recently developed VB-6 assay and smartphone RGB camera-based colorimetric sensor of CUR_{Hydrogel}.

Materials/Method	Samples	Linear range (mg L ⁻¹)	Detection limit (mg L ⁻¹)	Analysis time (min)	Sophistication of the instrumentation	Testing site		Ref.
						Onsite	In-lab	
NiO-CNTs-MOHFPE-CPE/Electrochemical method	Water and juice	0.00068–85.2	0.00015	–	Yes	No	Yes	[9]
Sucrose functionalized AuNPs/Colorimetric method	Brown and white rice food	0.02–81.3	0.006	–	No	No	Yes	[22]
Graphite-AgNPs-PLA electrode/Electrochemical method	Pharmaceutical formulations	0.017–67.68	0.0051	5	Yes	Yes	Yes	[33]
Boron-doped diamond (BDD) electrode/Electrochemical method	Pharmaceutical tablets and urine samples	1.16–7.81	0.63	–	Yes	No	Yes	[34]
Zinc-based metal-organic framework/Fluorescence spectrometry	Biological samples	0.14–17	0.106	–	Yes	No	Yes	[35]
Poly(2-aminothiazole) decorated with platinum nanoparticles/Electrochemical method	Vitamin B6 tablets and dried palm date fruits	0.00085–13.62	0.0092	–	Yes	No	Yes	[36]
Double-layer spherical Ca (II)-alginate-ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion/RGB camera-based colorimetric method	Functional beverages	10–125	2.93	6	No	Yes	Yes	This work

CRedit authorship contribution statement

Sirinyakorn Chinnawat: Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Ekarat Detsri:** Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Methodology, Formal analysis, Conceptualization. **Natee Lerdpriyaskulkij:** Data curation. **Saowapak Teerasong:** Formal analysis. **Arjnarong Mathaweewansurn:** Writing – review & editing, Funding acquisition, Data curation.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Arjnarong Mathaweewansurn reports was provided by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This research was funded by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) (Grant number: 2568-02-05-018), School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand (Grant No. RA/TA-2566-M-006). The authors express their appreciation Scientific Instruments Center, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for supporting the instruments.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114204>.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

References

- [1] I.H. Rosenberg, A history of the isolation and identification of vitamin B(6), *Ann. Nutr. Metab.* 61 (2012) 236–238, <https://doi.org/10.1159/000343113>.
- [2] N. Itoh, S. Matsumura, T. Iwaki, S. Takenaka, H. Kanouchi, Low cellular pyridoxal 5'-phosphate levels decrease neurotransmitter and glutathione concentrations and increase susceptibility to hydrogen peroxide toxicity in SH-SY5Y cells, *Clin. Nutr. Open Sci.* 55 (2024) 123–135, <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2024.03.011>.
- [3] M.R. Almeida, L. Mabasa, C. Crane, C.S. Park, V.P. Venancio, M.L. Bianchi, L. M. Antunes, Maternal vitamin B6 deficient or supplemented diets on expression of genes related to GABAergic, serotonergic, or glutamatergic pathways in hippocampus of rat dams and their offspring, *Mol. Nutr. Food Res.* 60 (2016) 1615–1624, <https://doi.org/10.1002/mnfr.201500950>.
- [4] C.A. Calderon-Ospina, M.O. Nava-Mesa, B vitamins in the nervous system: current knowledge of the biochemical modes of action and synergies of thiamine, pyridoxine, and cobalamin, *CNS Neurosci. Ther.* 26 (2020) 5–13, <https://doi.org/10.1111/ens.13207>.
- [5] European Food Safety Authority, Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals, first ed., EFSA, Parma, 2006.
- [6] T. Van den Broeck, B. Crul, J.P. Heesakkers, Neurogenic voiding dysfunction induced by vitamin B6 overdose, *Contin. Rep.* 1 (2022) 100004, <https://doi.org/10.1016/j.contre.2022.100004>.
- [7] F. van Hunsel, S. van de Koppel, E. van Puijenbroek, A. Kant, Vitamin B(6) in health supplements and neuropathy: case series assessment of spontaneously reported cases, *Drug Saf.* 41 (2018) 859–869, <https://doi.org/10.1007/s40264-018-0664-0>.
- [8] M.F. Vrolijk, A. Opperhuizen, E.H.J.M. Jansen, G.J. Hageman, A. Bast, G.R.M. M. Haenen, The vitamin B6 paradox: supplementation with high concentrations of pyridoxine leads to decreased vitamin B6 function, *Toxicol. In Vitro* 44 (2017) 206–212, <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2017.01.004>.
- [9] H. Sadeghi, S.A. Shahidi, S.N. Raeisi, A. Ghorbani-HasanSarai, F. Karimi, Electrochemical determination of vitamin B6 in water and juice samples using an electrochemical sensor amplified with NiO/CNTs and ionic liquid, *Int. J. Electrochem. Sci.* 15 (2020) 10488–10498, <https://doi.org/10.20964/2020.10.51>.
- [10] X.D. Chen, Z. Cao, J. Ye, Determination of melatonin and pyridoxine in pharmaceutical preparations for health-caring purposes by capillary electrophoresis with electrochemical detection, *Anal. Chim. Acta* 408 (2000) 249–256, [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00809-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00809-0).
- [11] C.K. Markopoulou, J.E. Kountourellis, An optimized method for the simultaneous determination of vitamins B1, B6, B12 in multivitamin tablets by high performance liquid chromatography, *J. Pharm. Biomed. Anal.* 30 (2002) 1403–1410, [https://doi.org/10.1016/S0731-7085\(02\)00456-9](https://doi.org/10.1016/S0731-7085(02)00456-9).
- [12] R. Bartzatt, P. Gajmer, M. Nguyen, A. Tran, Detection and assay of vitamin B6 (pyridoxine hydrochloride) utilizing isocratic high performance liquid chromatography, *J. Sci. Res. Rep.* 12 (2016) 28991, <https://doi.org/10.9734/JSRR/2016/28991>.
- [13] H. Hashem, H.M. El-Sayed, Quality by design approach for development and validation of a RP-HPLC method for simultaneous determination of coadministered levetiracetam and pyridoxine HCl in prepared tablets, *Microchem. J.* 143 (2018) 55–63, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.07.031>.
- [14] H.R.A. El-Hadi, B.M. Eltanany, H.E. Zaazaa, M.S. Eissa, HPLC-DAD approach for determination of pyridoxine HCl and doxylamine succinate in pure and pharmaceutical dosage forms: a green stability-indicating assay method, *Microchem. J.* 172 (2022) 106982, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106982>.
- [15] T.K. Patle, K. Shrivasa, A. Patle, S. Patel, N. Harmukh, A. Kumar, Simultaneous determination of B1, B3, B6 and C vitamins in green leafy vegetables using reverse phase-high performance liquid chromatography, *Microchem. J.* 176 (2022) 107249, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107249>.
- [16] T. Bachmann, A. Maurer, M. Rychlik, Development of a LC-MS/MS method using stable isotope dilution for the quantification of individual B(6) vitamins in fruits, vegetables, and cereals, *Anal. Bioanal. Chem.* 412 (2020) 7237–7252, <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02857-5>.
- [17] A. Gentili, F. Caretti, G. D'Ascenzo, S. Marchese, D. Perret, D. Di Corcia, L. M. Rocca, Simultaneous determination of water-soluble vitamins in selected food matrices by liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass

- spectrometry, *Rapid Communications in Mass Spectrometry: an International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry* 22 (2008) 2029–2043, <https://doi.org/10.1002/rcm.3583>.
- [18] P. Martí-Andrés, L. Escuder-Gilabert, Y. Martín-Biosca, S. Sagrado, M.J. Medina-Hernández, Simultaneous determination of pyridoxine and riboflavin in energy drinks by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection, *J. Chem. Educ.* 92 (2015) 903–906, <https://doi.org/10.1021/ed500544h>.
- [19] M.A. Islam, E. Park, B. Jeong, Y.-J. Gwak, J. Kim, W.-H. Hong, S.J. Park, J. Jung, N. Y. Yoon, Y.K. Kim, J. Chun, Validation of vitamin B5 (pantothenic acid) and B6 (pyridoxine, pyridoxal, and pyridoxamine) analyses in seafood, *J. Food Compos. Anal.* 109 (2022) 104518, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104518>.
- [20] V.L. Nguyen, M. Darman, A. Ireland, M. Fitzpatrick, A high performance liquid chromatography fluorescence method for the analysis of both pyridoxal-5-phosphate and thiamine pyrophosphate in whole blood, *Clin. Chim. Acta* 506 (2020) 129–134, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2020.03.025>.
- [21] P. Viñas, N. Balsalobre, C. López-Erroz, M. Hernández-Córdoba, Determination of vitamin B₆ compounds in foods using liquid chromatography with post-column derivatization fluorescence detection, *Chromatographia* 59 (2004) 381–386, <https://doi.org/10.1365/s10337-004-0022-6>.
- [22] K. Shrivastava, N. Nirmalkar, S.S. Thakur, M.K. Deb, S.S. Shinde, R. Shankar, Sucrose capped gold nanoparticles as a plasmonic chemical sensor based on non-covalent interactions: application for selective detection of vitamins B(1) and B(6) in brown and white rice food samples, *Food Chem.* 250 (2018) 14–21, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.002>.
- [23] Y.T. Chung, M.M. Ba-Abbad, A.W. Mohammad, N.H.H. Hairom, A. Benamor, Synthesis of minimal-size ZnO nanoparticles through sol-gel method: Taguchi design optimisation, *Mater. Des.* 87 (2015) 780–787, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.040>.
- [24] L. Cao, W. Lu, A. Mata, K. Nishinari, Y. Fang, Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: a review, *Carbohydr. Polym.* 242 (2020) 116389, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116389>.
- [25] H. Lu, J.A. Butler, N.S. Britten, P.D. Venkatraman, S.S. Rahatekar, Natural antimicrobial nano composite fibres manufactured from a combination of alginate and oregano essential oil, *Nanomaterials* 11 (2021) 2062, <https://doi.org/10.3390/nano11082062>.
- [26] C. Bennacef, S. Desobry-Banon, L. Probst, S. Desobry, Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules, *Food Hydrocoll.* 118 (2021) 106782, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106782>.
- [27] C.E. Iurciuc (Tincu), L.I. Atanase, C. Jérôme, V. Sol, P. Martin, M. Popa, L. Ochiuz, Polysaccharides-based complex particles' protective role on the stability and bioactivity of immobilized curcumin, *Int. J. Mol. Sci.* 22 (2021) 3075, <https://doi.org/10.3390/ijms22063075>.
- [28] Y.R. Liu, X. Tang, Q. Zeng, J.P. Lai, Impacts of ultraviolet absorption by zinc oxide nanoparticle modifiers on asphalt aging, *Sci. Rep.* 14 (2024) 19918, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70875-9>.
- [29] D.A. Köse, B. Zümreoglu-Karan, O. Sahin, O. Büyükgüngör, Boric acid complexes with thiamine (vitamin B1) and pyridoxine (vitamin B6), *Inorg. Chim. Acta* 413 (2014) 77–83, <https://doi.org/10.1016/j.ica.2013.12.011>.
- [30] D.H. Patlan, B.S. Cruz, J.D. Latorre, J.A. Maguay-Gonzalez, I.C. Huerta, E. Beyssac, G. Garrait, A.V. Durán, R.L. Arellano, A.M. Albores, B.M. Hargis, G.T. Isaias, Evaluation of the antimicrobial activity of a formulation containing ascorbic acid and Eudragit FS 30D microparticles for the controlled release of a curcumin-boric acid solid dispersion in turkey poult infected with *Salmonella enteritidis*: a therapeutic model, *Int. J. Mol. Sci.* 20 (2019) 1261, <https://doi.org/10.3390/ijms20051261>.
- [31] A. Wulandari, T.C. Sunarti, F. Fahma, E. Noor, T. Enomae, Paper strip based on nanoemulsion of curcumin as boric acid detection, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 12 (2) (2022) 694–699, <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.2.15757>.
- [32] N. Kabay, E. Güler, M. Bryjak, Boron in seawater and methods for its separation — a review, *Desalination* 261 (2010) 212–217, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.033>.
- [33] N.M. Caldas, L.V. de Faria, A.G. Batista, A.O. Alves, S.C. Silva, D.A. Peixoto, E. Nossol, D.P. Rocha, F.S. Semaan, W.F. Pacheco, R.M. Dornellas, Graphite and silver nanoparticles-loaded polylactic acid matrix: a pioneering tailor-made filament for manufacturing eco-friendly and robust electrochemical sensors towards pyridoxine detection, *Electrochim. Acta* 504 (2024) 144868, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144868>.
- [34] D. Kuzmanović, M. Khan, E. Mehmeti, R. Nazir, N.R.R. Amaizah, D.M. Stanković, Determination of pyridoxine (vitamin B6) in pharmaceuticals and urine samples using unmodified boron-doped diamond electrode, *Diam. Relat. Mater.* 64 (2016) 184–189, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.02.018>.
- [35] D. Yue, G. Li, F. Li, D. Chen, W. Li, B. Qin, B. Zhang, Y. Zhang, Y. Wang, Z. Wang, Zinc-based metal-organic frameworks as fluorescent probes for the detection of vitamin B6, *Dyes Pigm.* 222 (2024) 111857, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111857>.
- [36] A. Megha, A. George, R. Rajeev, A. Varghese, Electrochemical sensing of vitamin B6 using platinum nanoparticles decorated poly(2-aminothiazole), *Microchem. J.* 206 (2024) 111637, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111637>.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสิรินยากรณ์ ชินวัฒน์
วัน เดือน ปี เกิด	29 พฤศจิกายน 2543
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	(2565) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2567) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ ภาควิชาเคมี
ที่อยู่ปัจจุบัน	อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี
ผลงานตีพิมพ์	Chinnawat S., Detsri E., Lerdpiyaskulkij N., Teerasong S., Mathaweesansurn A., Smartphone RGB camera-based colorimetric platform with double-layer spherical Ca (II)- alginate/ZnONPs hydrogel liquid-core curcumin emulsion for rapid and selective detection of pyridoxine (Vitamin B6) in functional beverages. <i>Microchemical.</i> , 2025. 215: p.114204. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114204
รางวัลที่ได้รับ	รางวัล Bronze Poster Presentation Awards จากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ International Conference on Integrated Science Bioscience and Bioinnovation for Sustainability and Forensic Science 2024 (BBFS2024) ใน ผลงานนำเสนอเรื่อง Development of Curcumin Double- Walled Beads Colorimetric Sensor for Determination of Pyridoxine (Vitamin B6) in Functinal drinks with Detection by Image Processing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้