

การเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีสำหรับการกักเก็บน้ำมันหอม
ระเหย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FORMATION OF TAPIOCA STARCH–GELATIN NANOGELE BY IRRADIATION FOR ESSENTIAL
OIL ENCAPSULATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology
Department of Food Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีสำหรับการกักเก็บน้ำมันหอมระเหย
โดย	น.ส.อภิษฎาดา ขาวสุวรรณ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทรารวรรณ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ธัญชัย พิรุณพันธ์)	

อภิขญาตา ชาวสุวรรณ : การเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีสำหรับการกักเก็บน้ำมันหอมระเหย. (FORMATION OF TAPIOCA STARCH–GELATIN NANOGEL BY IRRADIATION FOR ESSENTIAL OIL ENCAPSULATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อินทาวุธ สรรพพรสถิตย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

นาโนเจลคือพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางภายใน และระหว่างโมเลกุลโดยสามารถเกิดได้จากวิธีการทางกายภาพ เคมี และวิธีการใหม่อย่างการฉายรังสี โดยนาโนเจลสามารถเกิดได้จากพอลิเมอร์หลายชนิด ทั้งพอลิเมอร์จากธรรมชาติและพอลิเมอร์จากการสังเคราะห์ มีการประยุกต์ใช้นาโนเจลในทางอาหาร โดยใช้สมบัติเฉพาะตัวของนาโนเจลทั้งด้านสัณฐานวิทยา สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติการกักเก็บของนาโนเจล ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน โดยหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดนาโนเจลด้วย response surface methodology (RSM) กำหนดตัวแปรเป็นค่าการเชื่อมขวาง (DC) และความคงตัวของความร้อน (TD) โดยแปรอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง-เจลาติน (1:9-9:1) ความเข้มข้นของสารผสม (10-40 mg/ml) และปริมาณรังสีดูดกลืน (10-40 kGy) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินคือที่อัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้นของสารผสมที่ 25 mg/ml และฉายรังสีที่ 25 kGy ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจลที่ได้ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และพบว่าโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินมีการเชื่อมติดกัน อันเนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวาง และขนาดของโมเลกุลมีขนาดเล็กจนถึงระดับนาโนเมตรหลังจากการฉายรังสี วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของนาโนเจลที่ได้ด้วยวิธี Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) และพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน แต่มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ hydroxyl ที่เกิดจากปฏิกิริยา radiolysis และการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมขวาง ต่อมาจึงศึกษาสมบัติของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลที่ได้ โดยการวัดประสิทธิภาพของการกักเก็บ (LE) ผลได้ของการกักเก็บ ความสามารถในการละลาย และปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บในนาโนเจล เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของวิธีการกักเก็บโดยปราศส่วนของ นาโนเจล: น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ พบว่าที่สัดส่วน 2:1 มีสมบัติการกักเก็บดีที่สุด และสามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ได้แก่ geraniol, neral, geraniol, linalool, geranyl acetate และ citronellol ไว้ได้ดีที่สุด นาโนเจลยังสามารถเพิ่มความคงทนต่อความร้อน และยืดอายุการเก็บรักษาของน้ำมันหอมระเหยโดยกักเก็บภายในนาโนเจล พบว่าสามารถรักษาปริมาณของสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยไว้ได้หลังจากผ่านการให้ความร้อน และระหว่างเก็บรักษาเมื่อเทียบกับน้ำมันหอมระเหยปกติ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา มีเพียงลักษณะปรากฏของผงนาโนเจลที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยเท่านั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า สามารถสังเคราะห์นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี และสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมได้ด้วยวิธี RSM และนาโนเจลยังสามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ได้ อีกทั้งยังสามารถปกป้องและยืดอายุสารสำคัญของน้ำมันหอมระเหยจากสิ่งแวดล้อม จึงสามารถนำนาโนเจลนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างหลากหลาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6172170623 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD: nanogel, irradiated nanogel, tapioca starch, gelatin, essential oil encapsulation

Apichayada Kaowsuwan : FORMATION OF TAPIOCA STARCH-GELATIN NANOGEL BY IRRADIATION FOR ESSENTIAL OIL ENCAPSULATION. Advisor: Asst. Prof. INTHAWOOT SUPPAVORASATIT, Ph.D. Co-advisor: Prof. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D.

Nanogels are cross-linked polymeric particles from physical, chemical, and novel processes as irradiation. It can be formed from various natural or synthetic polymers. In food, there is potential to use nanogels due to their unique properties, including morphological characteristics, physicochemical properties, and encapsulation characteristics. This study investigated the formation of nanogel from tapioca starch (TAP) and gelatin (GEL) by electron beam (E-beam) irradiation. The optimum condition can be measured by response surface methodology (RSM) using degree of crosslink (DC) and degradation temperature (TD) as dependent variables, while ratio of TAP:GEL (1:9-9:1), mixture of TAP-GEL concentration (10-40 mg/mL), and irradiation dose (10-40 kGy) were used as independent variables. It was found that nanogels can be formed from the optimum conditions: ratio of TAP:GEL at 1:1, concentration at 25 mg/mL, and irradiation dose at 25 kGy. The nanogels were then investigated in their morphological and chemical properties. The morphology as evidenced by the scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), and the atomic force microscope (AFM) micrographs showed crosslinking between TAP and GEL molecules and the reduction of particle size to nanometer particles after irradiation. The Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) spectra illustrated that the functional groups of TAP and GEL were not changed after irradiation, while the increase of hydroxyl groups and crosslinking bond were observed. The encapsulation efficiency of nanogel with Lemongrass essential oil (LEO) was investigated by measurement of loading efficiency (LE), yield, solubility, and release capacity. The different ratios of nanogel: LEO was compared and found the optimum ratio of encapsulated nanogels is 2:1 which exhibited maximum LE, yield, and solubility and the release of major volatile compounds, including geranial, neral, geraniol, linalool, geranyl acetate and citronellol, was better controlled. Moreover, the volatile compounds released from nanogels were measured while heat treatment and storage and found that the nanogel also improves heat stability prolong the storage time compared to essential oil. The changes during storage only appearance of the encapsulated nanogels. It can be concluded that the optimum condition of nanogel formation from E-beam irradiated TAP and GEL was successfully carried out by RSM. Nanogel could encapsulate LEO to protect the release of volatile compounds and can protect and prolong the essential compounds from environment which can be apply in various food industries.

Field of Study: Food Technology

Academic Year: 2021

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนของทุกฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพพรสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมงานวิจัย ผู้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ทั้งด้านงานวิจัย และให้แนวคิด สั่งสอนและดูแลด้วยความเอาใจใส่ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ สิริภักทราวรรณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ ที่ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำ ทั้งด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์ตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ธนัญชัย พิรุณพันธ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอนุเคราะห์และดูแลด้านการฉายรังสี และเครื่องมือในงานวิจัยต่าง ๆ รวมทั้งให้คำปรึกษาและแนะนำการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวก และการให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การช่วยเหลือ และคำปรึกษาตลอดการทำงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณพ่อ พี่ชาย และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญ และให้การสนับสนุนเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อภิษฎาดา ชาวสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 นาโนเจล.....	3
2.1.1 กระบวนการเตรียมนาโนเจล.....	3
2.1.1.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical cross-linking)	3
2.1.1.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (chemical cross-linking)	4
2.1.1.3 การเชื่อมขวางด้วยการฉายรังสี (radiation cross-linking).....	4
2.1.2 สมบัติของนาโนเจล.....	6
2.1.2.1 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties).....	6
2.1.2.2 ระดับการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking).....	7
2.1.2.3 สมบัติทางความร้อน (thermal properties).....	7
2.1.2.4 สมบัติการละลายน้ำ (solubility).....	8
2.1.2.5 สมบัติการกักเก็บและการปลดปล่อย (encapsulation and release properties)	8
2.1.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการเตรียมนาโนเจล.....	9

2.1.3.2	พอลิเมอร์ธรรมชาติ	9
2.1.3.3	พอลิเมอร์ผสมจากทั้งธรรมชาติและสังเคราะห์	10
2.1.4	การประยุกต์ใช้นาโนเจลในอาหาร	11
2.1.4.1	การให้ความคงตัวของอิมัลชัน.....	11
2.1.4.2	การปกป้องสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....	11
2.1.4.3	การยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร	12
2.1.4.4	การควบคุมการปลดปล่อย.....	12
2.2	แป้งมันสำปะหลัง.....	13
2.3	เจลาติน.....	14
2.4	การหาสภาวะที่เหมาะสม.....	15
2.5	การกักเก็บน้ำมันหอมระเหย.....	17
2.6	น้ำมันหอมระเหยตะไคร้.....	18
2.6.1	ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์	18
2.6.2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้	19
บทที่ 3	อุปกรณ์ และ วิธีดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1	วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์	21
3.1.1	วัตถุดิบ	21
3.1.2	สารเคมี.....	21
3.1.3	วัสดุและอุปกรณ์.....	21
3.2	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2.1	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน ด้วยการฉายรังสี	23
3.2.1.1	การเตรียมนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี	23

3.2.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี.....	23
3.2.2 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจล.....	24
3.2.2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (ภาคผนวก ก.3)	25
3.2.2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) (ภาคผนวก ก.4) .	25
3.2.2.3 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) (ภาคผนวก ก.5).....	25
3.2.4 การศึกษาการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจล.....	25
3.2.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้.....	25
3.2.4.2 การเตรียมน้ำมันหอมระเหยตะไคร้และนาโนเจล และการกักเก็บรักษาน้ำมันหอมระเหยตะไคร้.....	26
3.2.4.3 การหาปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บภายในนาโนเจล.....	28
3.2.4.4 การศึกษาความทนต่อความร้อนของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจล.....	28
3.2.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีระหว่างการเก็บรักษา	29
3.2.4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของผงน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลภายหลังการเก็บรักษา	29
3.2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	30
บทที่ 4 ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	31
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี... ..	31
4.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจล.....	38

4.3 โครงสร้างทางเคมีของนาโนเจล.....	41
4.4 การกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่ สภาวะที่เหมาะสม	43
4.4.1 องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้.....	44
4.4.2 ผลของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและ เจ ลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะที่เหมาะสม ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ (Loading efficiency - LE) ผลได้ของการกักเก็บ (yield) และความสามารถในการละลาย (solubility).....	47
4.4.3 ปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บในนาโนเจลจากแป้งมัน สำปะหลังและเจลาติน	49
4.4.4 สมบัติการทนต่อความร้อนของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมัน สำปะหลังและเจลาติน	51
4.4.5 การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลัง และเจลาตินระหว่างการเก็บรักษา	55
4.4.6 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏของผงน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายใน นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังการเก็บรักษา	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์	76
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม	84
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	86
ประวัติผู้เขียน.....	90

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 สารระเหยให้กลิ่นสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (<i>Cymbopogon citratus</i>) ในประเทศไทย	20
ตารางที่ 3. 1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี	24
ตารางที่ 4. 1 การเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) ของนาโนเจลที่เตรียมจากสภาวะต่างกัน.....	32
ตารางที่ 4. 2 p-value ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD).....	33
ตารางที่ 4. 3 สารระเหยที่พบในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (lemongrass essential oil, LEO)	46
ตารางที่ 4. 4 ประสิทธิภาพของการกักเก็บ (Loading efficiency - LE) ผลได้ของการกักเก็บ (yield) ความสามารถในการละลาย (solubility) ของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะที่เหมาะสม	47
ตารางที่ 4. 5 ปริมาณสารระเหยให้สำคัญในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสม.....	49
ตารางที่ 4. 6 ปริมาณสารระเหยสำคัญในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสมต่อปริมาณของแข็งในสารละลาย.....	51
ตารางที่ 4. 7 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์	58

สารบัญรูป

รูปที่ 2. 1 กลไกการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ด้วยรังสี.....	6
รูปที่ 2. 2 ภาพ scanning electron microscopy (SEM) ของ CS-MA nanogel.....	7
รูปที่ 2. 3 แบบจำลองการแพร่สารสำคัญเข้าสู่โมเลกุลและกักเก็บภายในนาโนเจล.....	9
รูปที่ 2. 4 โครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน.....	14
รูปที่ 2. 5 โครงสร้างของเจลาติน.....	14
รูปที่ 2. 6 ลักษณะกราฟพื้นผิวตอบสนอง (a) และกราฟโครงร่าง (b).....	16
รูปที่ 2. 7 โครงสร้างสารประกอบสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้.....	20
รูปที่ 4. 1 surface plot และ contour plot เมื่อเทียบในแต่ละปัจจัยของความเข้มข้นของสารผสม (concentration, mg/mL) และปริมาณรังสีดูดกลืน (dose, kGy) โดย (a) จากสมการ degree of crosslink (DC) และ (b) จากสมการ degradation temperature (TD).....	35
รูปที่ 4. 2 superimpose contour plot จากสมการ degree of crosslink (DC) และ degradation temperature (TD) เมื่อเทียบในแต่ละปัจจัยของความเข้มข้นของสารผสม (concentration mg/mL) และปริมาณรังสีดูดกลืน (dose, kGy).....	36
รูปที่ 4. 3 ภาพนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) และเจลาติน (gelatin) จากการฉายรังสีจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (a) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) (b) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) (c).....	40
รูปที่ 4. 4 แผนภาพ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง (TAP) เจลาติน (GEL) และนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินก่อน (0 kGy) และหลังฉายรังสีในสภาวะที่เหมาะสม (25 kGy).....	42
รูปที่ 4. 5 แบบจำลองกลไกการเกิด Schiff's base นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังฉายรังสีที่ 25 kGy.....	43
รูปที่ 4. 6 chromatogram ของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (lemongrass essential oil, LEO).....	44
รูปที่ 4. 7 แผนภาพจำลองการจับตัวของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้และนาโนเจล.....	48

รูปที่ 4. 8 การเปลี่ยนแปลงสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ geranial (a), neral (b), geraniol (c), linalool (d), geranyl acetate (e) และ citronellol (f) ต่อความร้อนที่ให้ได้การกักเก็บภายในนาโนเจลโดย ^{a,b...} คือค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละอุณหภูมิ ($p \leq 0.05$).....52

รูปที่ 4. 9 การเกิด derivative ของ Geraniol.....54

รูปที่ 4. 10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (LEO) ที่ระยะเวลาการเก็บ 10 สัปดาห์ และภายใต้การกักเก็บในนาโนเจลที่การเก็บรักษาที่ต่างกัน (Encap คือบรรจุกล่องพลาสติก และ EncapAl คือบรรจุถุงอลูมิเนียมลามิเนต) โดย ^{a,b...} คือค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละสภาวะ ($p \leq 0.05$).....57

รูปที่ 4. 11 การเปลี่ยนแปลงสีของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้การกักเก็บในนาโนเจลหลังจาก encapsulation และที่ระยะเวลาการเก็บ 10 สัปดาห์ (บรรจุกล่องพลาสติก และบรรจุถุงอลูมิเนียมลามิเนต ตามลำดับ)59



บทที่ 1

บทนำ

นาโนเจล (nanogels) คืออนุภาคเจลพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร สายโซ่พอลิเมอร์ขดตัวและเกิดการเชื่อมขวาง (cross-linking) ภายในโมเลกุล ทำให้มีลักษณะคล้ายเจลในสารละลาย นาโนเจลมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่มีขนาดต่าง ๆ จึงมีสมบัติในการรองรับสารได้สูง โดยสามารถเป็นที่ยึดเกาะของโมเลกุลของสารประกอบ หรือดูดซับสารละลายที่อยู่ภายนอกเข้าไปภายในโพรงของโครงสร้างนาโนเจล นอกจากนี้นาโนเจลยังมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัวอีกด้วย จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้มากมายทั้งในด้านการแพทย์ เกษษกรรม เครื่องสำอาง รวมถึงอาหาร การผลิตนาโนเจลสามารถแบ่งตามวิธีการเกิดพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีการใช้รังสี ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การเกิดนาโนเจลด้วยการใช้รังสีสามารถชักนำให้เกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลและเกิดเป็นนาโนเจลได้ นาโนเจลที่เกิดจากการฉายรังสีนี้มีความบริสุทธิ์สูงมาก เนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมีระหว่างการผลิต ขั้นตอนในการผลิตน้อยและรวดเร็ว และยังสามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ได้ทุกชนิดทั้งพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะองค์ประกอบทางเคมีภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ตั้งต้นและกระบวนการที่ทำให้เกิดนาโนเจล ทั้งนี้นาโนเจลที่มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์บางประเภทไม่สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ จึงมีการศึกษาพัฒนานาโนเจลจากวัสดุทางชีวภาพ สารอินทรีย์ และส่วนผสมที่สามารถรับประทานได้ เช่นพอลิแซคคาไรด์ ไขมัน และโปรตีน เพื่อให้สามารถนำนาโนเจลเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในอาหารได้ หากสามารถใช้วัตถุดิบที่มีผลผลิตสูงในประเทศไทยอย่างแป้งมันสำปะหลังผลิตเป็นนาโนเจลจะสามารถเพิ่มมูลค่าและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อีกมาก และเนื่องจากการผลิตนาโนเจลด้วยวิธีฉายรังสีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับพอลิเมอร์ทุกชนิด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการผลิตนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยการฉายรังสี หากแต่คุณสมบัติของแป้งที่เกิดการสลายตัวได้ง่ายเมื่อฉายรังสี จึงมีการศึกษาการใช้พอลิเมอร์มากกว่า 2 ชนิดในการผลิตนาโนเจล ซึ่งเจลาตินมีคุณสมบัติในการเป็นสารเชื่อมขวาง (crosslinker) ได้ดี และเป็นวัตถุดิบที่มีผลผลิตสูงในประเทศไทยเช่นกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยเสริมคุณภาพของนาโนเจล

คุณภาพและประสิทธิภาพของนาโนเจลขึ้นอยู่กับสภาวะในการผลิต โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดนาโนเจลจากการฉายรังสี ได้แก่ ปริมาณรังสีดูดกลืน ประเภท และส่วนผสมของพอลิเมอร์ ความ

เข้มข้น รวมถึงสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตนาโนเจลที่มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ดีที่สุดจึงมีความสำคัญ เทคนิค response surface methodology (RSM) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้เพื่อออกแบบการทดลอง และศึกษาอิทธิพลร่วมของหลายปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลที่ต้องการ ข้อดีที่สำคัญของ RSM คือลดจำนวนชุดทดลองที่ใช้ในการประเมินตัวแปรหลายตัว รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น มีการใช้ RSM เพื่ออธิบายผลของตัวแปรต่อสมบัติการกักเก็บสารสำคัญ และสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร ทั้งชนิดของพอลิเมอร์ อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ หรือปริมาณรังสีดูดกลืนที่ใช้ในการเกิดเป็นนาโนเจลในการศึกษานี้

สมบัติสำคัญของนาโนเจลประการหนึ่ง คือสมบัติการกักเก็บสารสำคัญ (encapsulation) ที่สามารถถูกทำลายหรือสลายตัวได้ง่าย เช่น กรดอะมิโน วิตามิน แร่ธาตุ สารต้านอนุมูลอิสระ สารให้สี สารปรุงแต่งกลิ่นรส เอนไซม์ และน้ำมันหอมระเหย โดยการกักเก็บสามารถเกิดได้ในลักษณะการเคลือบ (coated) หรือ ยึดจับ (entrapped) สารสำคัญนั้นไว้ สามารถลดการสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิต และการเก็บรักษาอาหารได้ จากข้อมูลข้างต้น หากสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดนาโนเจลจากการฉายรังสีลงบนวัสดุธรรมชาติเพื่อประโยชน์ในการรักษาน้ำมันหอมระเหยไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะเป็นตัวเลือกของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยเพื่อใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ยืดอายุการเก็บรักษา และเป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรสของอาหาร เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดโครงสร้างนาโนเจลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี และเพื่อศึกษาผลของนาโนเจลต่อการกักเก็บน้ำมันหอมระเหย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 นาโนเจล

นาโนเจล (nanogel) คือเจลที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm โดยโครงสร้างเจลเกิดจากการที่ โมเลกุลพอลิเมอร์ (polymer) ผ่านกระบวนการทางเคมีหรือกายภาพ แล้วเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายถาวรจากการเชื่อมขวาง (cross-linking) ระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลาย (solvent) เข้าแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของโครงร่างตาข่ายและมีลักษณะเป็นเจล (European Food Safety, 2018; Ulanski และ Rosiak, 1999) นาโนเจลสามารถเกิดได้ทั้งจากวัสดุสังเคราะห์และธรรมชาติ โดยโครงสร้างนาโนเจลจะมีลักษณะจำเพาะซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมในรูปแบบต่าง ๆ ได้มากขึ้น เช่น ด้านเภสัชกรรมที่ใช้นาโนเจลในการผลิตยาและวัคซีน หรือนำส่งยาหรือวัคซีนเข้าสู่ร่างกาย นอกจากนี้มีการพัฒนานาโนเจลในอุตสาหกรรมด้านอื่น ๆ เช่น เครื่องสำอาง น้ำหอม รวมถึงอุตสาหกรรมอาหารด้วย

2.1.1 กระบวนการเตรียมนาโนเจล

กระบวนการเตรียมนาโนเจลมีหลายวิธี เช่น การจับตัวกันทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ การเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ที่มีความแตกต่างกัน หรือการเกิดพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent crosslink) (Kabanov และ Vinogradov, 2009; Sasaki และ Akiyoshi, 2010) โดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันที่พันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของนาโนเจล สามารถแบ่งตามวิธีการเกิดพันธะเชื่อมขวางได้ดังนี้

2.1.1.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical cross-linking)

นาโนเจลที่เกิดจากการเชื่อมขวางทางกายภาพ คือกระบวนการที่ทำให้นาโนเจลจับตัวกันด้วยการใช้แรงกล อุณหภูมิ หรือแรงไอออนิกของโมเลกุลเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง จึงมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเชื่อมขวางทางกายภาพ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความแรงประจุ และอุณหภูมิ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะเหนี่ยวนำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ข้อดีของกระบวนการ

เตรียมนาโนเจลด้วยวิธีนี้คือ ขั้นตอนกระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยาก สามารถกำหนดขนาดอนุภาคที่ต้องการได้ แต่ต้องควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเกิดนาโนเจล เพื่อให้ได้ขนาดของอนุภาคที่ต้องการ (Zhang และคณะ, 2016) ข้อเสียคือ นาโนเจลที่เตรียมได้มีเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากโมเลกุลภายในโครงสร้างของนาโนเจลจะยึดเหนี่ยวกันด้วยความแรงพันธะแบบอ่อน ตัวอย่างกระบวนการเชื่อมขวางทางกายภาพ เช่น ionic interaction, hydrophobic interaction หรือ hydrogen bond interaction (Rattanawongwiboon และคณะ, 2018) และ self-assembly polymerization (Sultana และคณะ, 2013) เป็นต้น

2.1.1.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (chemical cross-linking)

นาโนเจลที่เกิดจากการเชื่อมขวางทางเคมีอาศัยกระบวนการทางเคมีในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งสายโซ่ของพอลิเมอร์แต่ละสายภายในโครงสร้างของนาโนเจลจะเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งจะมีความแข็งแรงสูงกว่าพันธะที่เกิดจากการเชื่อมขวางทางกายภาพ แต่กระบวนการเตรียมนาโนเจลโดยการเชื่อมขวางทางเคมีจำเป็นต้องใช้สารช่วยในการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (cross-linker) หรือสารช่วยลดแรงตึงผิว (surfactant) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ทำให้ต้องเพิ่มขั้นตอนในการทำให้บริสุทธิ์ (purification) ซึ่งเป็นการเพิ่มขั้นตอนในการผลิตนาโนเจล (Sultana และคณะ, 2013)

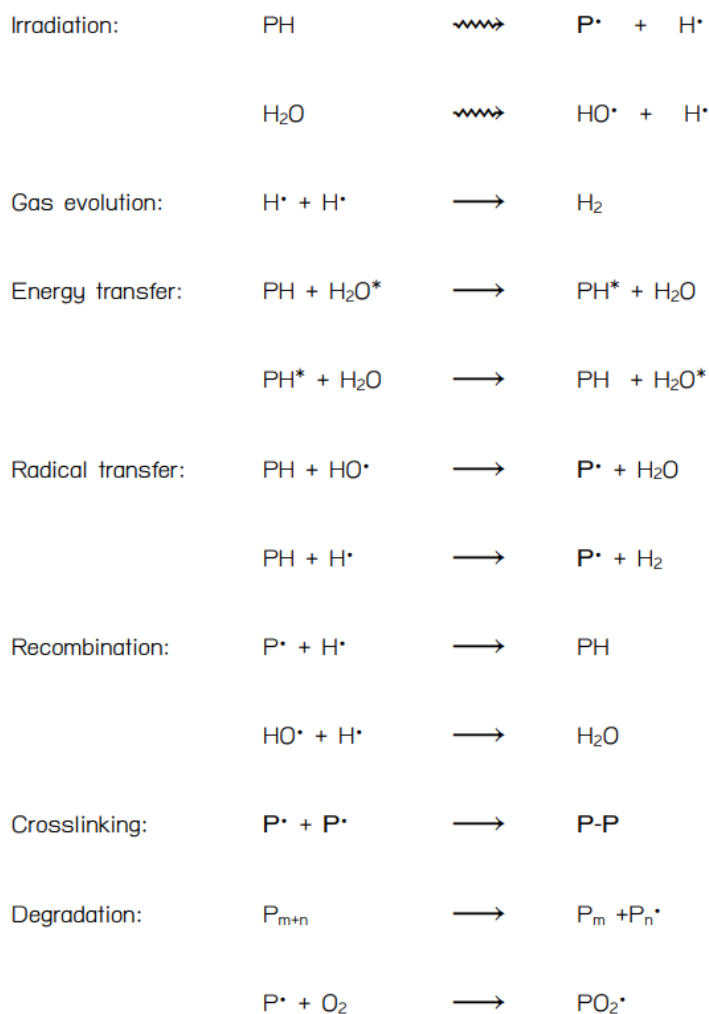
2.1.1.3 การเชื่อมขวางด้วยการฉายรังสี (radiation cross-linking)

นาโนเจลที่เกิดจากการเชื่อมขวางด้วยการฉายรังสี เกิดจากการใช้วิธีฉายรังสี ซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนเพื่อชักนำให้เกิดการเชื่อมขวางทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล การฉายรังสีเป็นวิธีที่ทำให้เกิดนาโนเจลที่มีความบริสุทธิ์สูง ลดการปนเปื้อน และลดขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (purification) ได้ กระบวนการเกิดนาโนเจลด้วยวิธีการฉายรังสี เริ่มจากมีการกระตุ้นอนุมูลอิสระ (free radical) ในสายโซ่พอลิเมอร์ หลังจากดูดกลืนรังสี หรือมีการแตกตัวของน้ำด้วยรังสี (radiolysis of water) จึงเกิดการกระตุ้นที่โมเลกุลของน้ำ (excitation of water) และเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization of water) ตามกลไกที่แสดงในรูปที่ 2.1 ที่โดยที่ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้กับพอลิเมอร์ (PH) เมื่อพอลิเมอร์ดูดกลืนรังสี จะเกิดการกระตุ้น

อนุมูลอิสระหรือการแตกตัวของน้ำด้วยรังสีเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งทำให้เกิดสิ่งต่างๆไม่ว่าจะเป็นการเกิดเป็นแก๊ซไฮโดรเจน (H_2) การถ่ายโอนพลังงาน (energy transfer) การถ่ายโอนอนุมูล (radical transfer) ของพอลิเมอร์และน้ำ การรวมตัวกันของโมเลกุล (recombination) การเชื่อมขวาง (crosslinking) และการสลายตัว (degradation) ของพอลิเมอร์ ซึ่งทั้งหมดเป็นทั้งการสร้างและทำลายพันธะเคมีของโมเลกุล และการทำลายพันธะเคมีดังกล่าวทำให้เกิดการแตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ด้วย (Singh และคณะ, 2011) แต่หากมีการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์มากกว่าการสลายตัวจากการทำลายพันธะเคมี จะทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ขึ้นกลายเป็นเจล (Pasanphan, 2018) รังสีที่ใช้ในการเตรียมนาโนเจลมีหลายชนิด ได้แก่

1. รังสีจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ได้แก่ รังสีแกมมา (gamma-rays)
2. รังสีประเภทอนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค ได้แก่ ลำอิเล็กตรอน (electron beam)

ชนิดของรังสีตามที่กล่าวข้างต้น สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน และปฏิกิริยาทางเคมีได้ในลักษณะเดียวกัน ตามรูปที่ 2.1 อย่างไรก็ตาม รังสีที่นิยมใช้สำหรับการเตรียมนาโนเจล มี 2 ชนิด ได้แก่ รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 (Co-60) และซีเซียม-137 (Cs-137) และลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอน (electron beam accelerator) ซึ่งมีการพัฒนาระบบให้สามารถรองรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 กลไกการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ด้วยรังสี

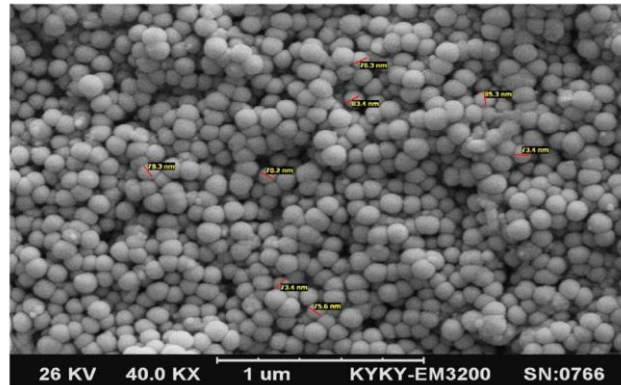
ที่มา: Pasanphan (2018)

2.1.2 สมบัติของนาโนเจล

2.1.2.1 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

สมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจลมักมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม ขนาด 10 – 100 nm (รูปที่ 2.2) ภายในโมเลกุลมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดต่าง ๆ และมีพื้นที่ผิวมากขึ้นจากความเป็นรูพรุนภายใน วิธีการเกิดเป็นโครงสร้างนาโนเจลนั้นมีผลโดยตรงต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา และลักษณะอื่น เช่น การกระจายตัวของอนุภาค รูปร่าง และขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาค (Rajaei และคณะ, 2017)

ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของนาโนเจล เช่น ลักษณะปรากฏ คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ลักษณะทางด้านประสาทสัมผัส รสชาติ เนื้อสัมผัส เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ภาพ scanning electron microscopy (SEM) ของ CS-MA nanogel
ที่มา : Rajaei และคณะ (2017)

2.1.2.2 ระดับการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking)

การเกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลและทำให้เกิดนาโนเจลนั้นจะทำให้ระดับการเชื่อมขวางของสายพอลิเมอร์นั้นๆเพิ่มขึ้น โดยระดับของการเชื่อมขวางนั้นมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางความร้อนเชิงกล และความคงตัวต่อความร้อนที่จะเพิ่มขึ้นตามระดับการเชื่อมขวางที่มากขึ้นด้วย (Ding และคณะ, 2020) ระดับของการเชื่อมขวางมักจะส่งผลมาจากลักษณะโครงสร้างของนาโนเจล เช่น องค์ประกอบทางเคมี ความชอบน้ำของตัวเชื่อมขวาง และระดับการเชื่อมขวางของโครงร่างตาข่ายของนาโนเจลก็สามารถควบคุมความสามารถในการเคลื่อนที่ การกระจายตัวของนาโนเจลได้ และเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนต่อแรงกลได้

2.1.2.3 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

นาโนเจลที่เกิดจากพอลิเมอร์เชื่อมขวางนั้น จะทำให้เกิดการปรับปรุงให้มีเสถียรภาพของขนาดและรูปร่างภายใต้การให้ความร้อนดีขึ้น มีความคงทนต่อการเสียรูปอันเนื่องมาจากความร้อนและแรงดัน และเพิ่มความต้านทานต่อการกลายสภาพจากความร้อน (Pasanphan, 2018) โดยคุณสมบัติทางความร้อนของนาโนเจลยังคงขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่ใช้ วิธีการเตรียม และปัจจัยต่าง ๆ ของนาโนเจล โดยเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ จะสามารถรักษา

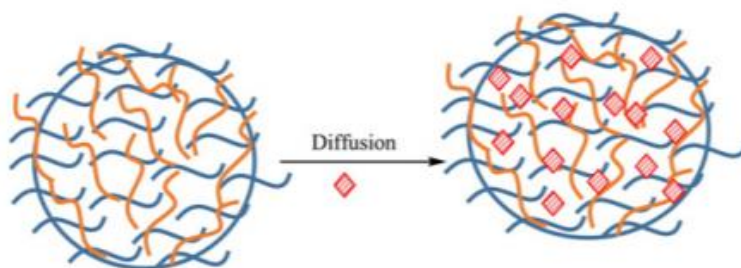
คุณสมบัติของนาโนเจล เช่น ความแข็งแรง หรือความสามารถในการไหลที่อุณหภูมิต่ำของกระบวนการผลิตที่กำหนด จึงเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของการเตรียมสถานะที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้ของนาโนเจล

2.1.2.4 สมบัติการละลายน้ำ (solubility)

นาโนเจลที่เกิดจากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีขั้วและไม่มีขั้วภายในโมเลกุลทำให้การละลายน้ำของนาโนเจลดีขึ้น โดยเป็นการเพิ่มความมีขั้วให้กับพอลิเมอร์ไม่มีขั้ว (Sultana และคณะ, 2013) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอาหารได้มากขึ้น โดยเฉพาะสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ หรือน้ำมันหอมระเหยที่มักเป็นสารที่ไม่มีขั้วและไม่ละลายในน้ำ เมื่อสารนั้นถูกดูดซึมอยู่ภายในโมเลกุลของนาโนเจลจากคุณสมบัติด้านความมีขั้วและไม่มีขั้วของนาโนเจล ทำให้สารสำคัญที่ไม่มีขั้วสามารถจับตัวเข้ากับนาโนเจลไว้ได้และทำให้ละลายในน้ำได้ดีขึ้น (Rajaei และคณะ, 2017; de Carvalho และคณะ, 2021)

2.1.2.5 สมบัติการกักเก็บและการปลดปล่อย (encapsulation and release properties)

โครงสร้างของนาโนเจลสามารถเพิ่มสมบัติอีกหลายด้าน เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิว การลดความหนืดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนาโนเจล และการเพิ่มการดักจับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ทำให้มีการใช้ประโยชน์โดยกักเก็บสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพไว้ในนาโนเจล และนำไปใช้ทางอาหารเพื่อสุขภาพ รูปที่ 2.3 แสดงถึงกลไกของการแพร่สารสำคัญเข้าสู่โมเลกุลของนาโนเจล โดยที่สารสำคัญนั้นจะแทรกตัวเข้าไปภายในโครงสร้างร่างแหของนาโนเจล (Rezaei และคณะ, 2019) และมีการศึกษาว่าการห่อหุ้มหรือการกักเก็บนี้มีความสำคัญต่อการแก้ไขปัญหาด้านรสชาติที่ไม่พึงประสงค์หรือรสชาติของสารพอลิฟินอล นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการใช้นาโนเจลในฐานะตัวนำส่งระดับนาโน (nanocarrier) และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่าง ๆ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการกักเก็บ กำหนดลักษณะการปลดปล่อยของอนุภาค และรักษากิจกรรมทางชีวภาพของสารสำคัญไว้ได้อย่างดีอีกด้วย (Rajaei และคณะ, 2017; Zhavah และคณะ, 2015; de Carvalho และคณะ, 2021)



รูปที่ 2. 3 แบบจำลองการแพร่สารสำคัญเข้าสู่โมเลกุลและกักเก็บภายในนาโนเจล

ที่มา: Rezaei และคณะ (2019)

2.1.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการเตรียมนาโนเจล

นาโนเจลสามารถเกิดได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือสารประกอบจากทั้งธรรมชาติและสังเคราะห์ โดยองค์ประกอบทางเคมีภายในโมเลกุลที่แตกต่างกันจากทั้งพอลิเมอร์ตั้งต้นและกระบวนการที่ทำให้เกิดนาโนเจล สามารถส่งผลต่อคุณลักษณะของนาโนเจลได้ เช่น ขนาด ประจุ สภาพขี้ว ความอ่อนตัว และความคงทนต่อสภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.1.3.1 พอลิเมอร์สังเคราะห์

มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนานาโนเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นจำนวนมาก โดยมักจะนำพอลิเมอร์สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม วัสดุศาสตร์ หรือการแพทย์และเภสัชกรรม เช่น การพัฒนานาโนเจลจาก poly(n-vinyl pyrrolidone) (Duygu Sütekin และ Güven, 2019) เพื่อศึกษาขนาดและสมบัติของนาโนเจล การพัฒนานาโนเจลจาก Au-PAm hybrid nanogels (Sultana และคณะ, 2013) เพื่อใช้ทางการแพทย์ และ acrylamide -acrylic acid N,N'-Methylenebisacrylamide (Ding และคณะ, 2020) เพื่อใช้ในด้านอุตสาหกรรมน้ำมัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับนาโนเจลที่สร้างมาจากหลายองค์ประกอบ หากแต่การสร้างนาโนเจลด้วยสารประกอบที่มาจากสารสังเคราะห์นั้นมีข้อจำกัดในด้านการนำไปใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารเนื่องจากความปลอดภัยทางอาหารที่อาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

2.1.3.2 พอลิเมอร์ธรรมชาติ

ตัวอย่างการศึกษาการเตรียมนาโนเจลจากวัสดุธรรมชาติ เช่น นาโนเจลจากแป้งอย่าง High-viscosity α -starch (Liang และคณะ, 2020) นาโนเจลจากแป้ง

ดีดแปร (carboxymethyl cellulose) (Binh และคณะ, 2012) นาโนเจลจากโคโคซาน (Mohsenabadi และคณะ, 2018) นาโนเจลจากเวย์โปรตีน (whey protein) (Araiza-Calahorra และ Sarkar, 2019) นาโนเจลจากเจลาติน (Gandhi และคณะ, 2014) นาโนเจลจากพอลิเมอร์สองชนิดอย่าง lipoprotein และ sodium carboxymethyl cellulose (He และคณะ, 2015) นาโนเจลจาก Dextrin (Gonçalves, 2012) นาโนเจลจาก lipoprotein/pectin complex (Zhou และคณะ, 2016) เป็นต้น ซึ่งการศึกษาดังกล่าวเป็นการพัฒนานาโนเจลจากวัสดุทางชีวภาพ สารอินทรีย์ และส่วนผสมที่สามารถรับประทานได้ เช่น พอลิแซคคาไรด์ ไขมัน และโปรตีน ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารได้ และวัสดุธรรมชาติเองก็เป็นที่ยอมรับในการนำไปเป็นวัตถุดิบในการเตรียมนาโนเจลมากกว่าวัสดุสังเคราะห์ เนื่องจากหาได้ง่าย ไม่มีความเป็นพิษ และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ โดยพบว่า นาโนเจลจากทั้งพอลิแซคคาไรด์ โปรตีน และไขมัน และการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์มากกว่า 2 ชนิด ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของนาโนเจลที่ต้องการและการนำไปใช้ รวมถึงการใช้พอลิเมอร์ผสมกันเพื่อเตรียมนาโนเจลนั้นยังสามารถเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ของพอลิเมอร์นั้น

2.1.3.3 พอลิเมอร์ผสมจากทั้งธรรมชาติและสังเคราะห์

นาโนเจลที่ใช้พอลิเมอร์ทั้งจากธรรมชาติและสังเคราะห์นั้นมักนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมทางวัสดุศาสตร์ ทางการแพทย์ และการเภสัชกรรม เช่นเดียวกับที่ใช้ พอลิเมอร์สังเคราะห์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้การพัฒนาพอลิเมอร์จากธรรมชาติมาใช้ร่วมด้วยนั้นเป็นการลดต้นทุนในการผลิตนาโนเจล และเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ของพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังเป็นการลดข้อจำกัดของพอลิเมอร์บางประเภทที่ไม่สามารถเกิดโครงสร้างนาโนเจลด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียว โดยมีการศึกษาการเตรียมนาโนเจลจาก Cholesterol-modified pullulan (CHP) และนาโนเจลจาก polysaccharide-poly(ethylene glycol) (PEG) hybrid ที่นำไปใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางด้านเคมีและชีวภาพ (Li และ Liu, 2010; Sultana และคณะ, 2013) ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์จากธรรมชาติอย่าง cholesterol และ polysaccharide และลดความเป็นพิษของนาโนเจล เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ อย่างปลอดภัย ทั้งนี้คุณสมบัติของนาโนเจลที่เกิดจากการใช้พอลิเมอร์แบบผสมนั้น

เป็นผลมาจากหลายปัจจัย เช่น ชนิดของพอลิเมอร์ อัตราส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ความเข้มข้น และการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของแต่ละพอลิเมอร์ จึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมในการเตรียมนาโนเจลที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

2.1.4 การประยุกต์ใช้นาโนเจลในอาหาร

นาโนเจลมีความสำคัญอย่างมากต่อการใช้งานทางด้านอาหาร เนื่องจากคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของนาโนเจล โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับนาโนเจลและการใช้งานในด้านอาหารได้ เช่น เป็นที่ยึดเกาะสารให้กลิ่นรสในอาหาร เป็นวัตถุเจือปนอาหาร ตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนในอาหาร ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารด้วยน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจล เพิ่มความคงตัวของอิมัลชัน เป็นตัวพาวิตามิน ช่วยกักเก็บสารพอลิฟีนอล เป็นต้น (Tari และคณะ, 2003; Le Corre และคณะ, 2010; Paul และคณะ, 2017; Rajaei และคณะ, 2017; Ge และคณะ, 2017; Jasim และคณะ, 2019; Li และคณะ, 2021)

2.1.4.1 การให้ความคงตัวของอิมัลชัน

จากสมบัติของความมีขั้วและไม่มีขั้วของนาโนเจลนั้น ทำให้สามารถนำนาโนเจลมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดเป็นอิมัลชัน เนื่องจากอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่มีความเป็นอิมัลชัน มีการศึกษา Pickering emulsion ที่บรรจุสาร beta-carotene ในนาโนเจลจาก chitosan hydrochloride /carboxymethyl starch complex (CHC-CMS) โดยนาโนเจลได้มีการพัฒนาให้เป็นสารที่เพิ่มความคงตัวของอิมัลชัน ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและปลอดภัย โดยจากสมบัติการละลายของนาโนเจลที่สามารถกระจายตัวได้ทั้งในสารละลายที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ทำให้นาโนเจลสามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความคงตัวของอิมัลชันได้ (Li และคณะ., 2020)

2.1.4.2 การปกป้องสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

มีการใช้สารต้านอนุมูลอิสระต่าง ๆ ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการเกิดสารไม่พึงประสงค์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากระสชาติจำเพาะและสีเฉพาะตัวของสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดทำให้มีข้อจำกัดการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร Rajaei และคณะ (2017) ได้

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอนุโมลิสระของน้ำมันหอมระเหยกานพลู (clove essential oils, CEOs) และนาโนเจลจากไคโตซาน (chitosan, CS) และกรดไมริสติก (myristic acid, MA) และพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุโมลิสระของน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจลด้อยกว่าน้ำมันหอมระเหยอิสระ ดังนั้นนาโนเจลจึงสามารถนำไปใช้ปกป้องสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้

2.1.4.3 การยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

อายุการเก็บรักษา คือระยะเวลาที่อาหารจะถูกนับได้ว่าอาหารได้เสื่อมเสียหรือไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคอีกต่อไป อายุการเก็บรักษามีอิทธิพลอย่างมากต่อการควบคุมของเสียและควรมีตัวชี้วัดที่จะเป็นการควบคุมอายุการเก็บรักษาให้มีประสิทธิภาพ การป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารถือเป็นการเพิ่มอายุการเก็บรักษาอาหารด้วยโดยถ้าอ้างอิงจากสมบัติการกักเก็บของนาโนเจลและการปกป้องสารสำคัญ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ นาโนเจลที่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ได้อย่าง นาโนเจลจากไคโตซานและกรดไมริสติก ที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยกานพลู ที่ศึกษาโดยRajaei และคณะ (2017) พบว่านาโนเจสนี้ ยังมีคุณสมบัติต้านจุลชีพของ *Salmonella enteritidis* ในตัวอย่างเนื้อ และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของเนื้อไว้ได้นานขึ้นด้วย

2.1.4.4 การควบคุมการปลดปล่อย

นาโนเจลที่สามารถกักเก็บและปกป้องสารสำคัญไว้ได้อย่างที่กล่าวมา คุณสมบัติอีกประการหนึ่งคือด้านความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิ ในการประยุกต์ใช้ทางอาหาร จึงมีการศึกษาการปลดปล่อยสารสำคัญเมื่อรับประทานและเข้าสู่ภายในระบบทางเดินอาหาร โดย Zhou และคณะ (2016) พบว่า curcumin ที่กักเก็บไว้ในนาโนเจลจาก Low density lipid (LDL) และ pectin สามารถปลดปล่อยได้ในสภาวะที่มีเอนไซม์ที่คล้ายกับสภาพของกระเพาะอาหารและลำไส้ ลำไส้ได้ จะเห็นได้ว่านาโนเจลที่สามารถในการปกป้องสารสำคัญไว้ได้ยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารสำคัญได้อีกด้วย

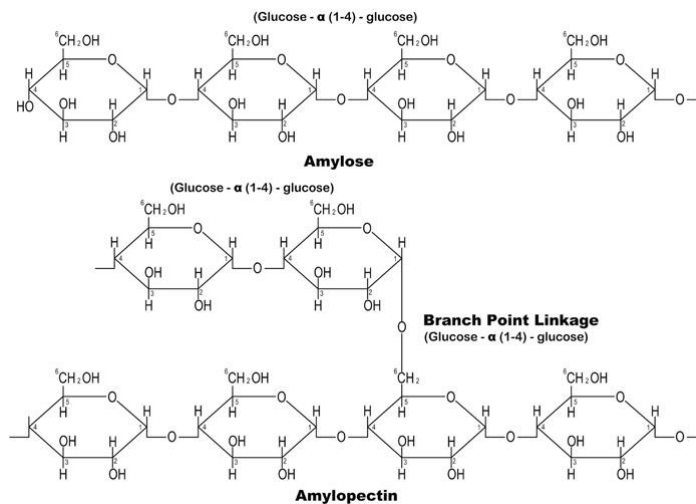
2.2 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) คือแป้งที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* (L.) Crantz) ที่ผ่านกระบวนการทำสตาร์ช โดยหลักการในการผลิตที่สำคัญคือ การสกัดแป้งออกจากหัวมันสำปะหลังโดยใช้น้ำ และใช้หลักการเหวี่ยงแยกเพื่อแยกแป้งออกจากโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมอื่น โดยหลักความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล แป้งมันสำปะหลังนั้นสามารถใช้ได้ในอาหารในหลากหลายรูปแบบ เช่น แป้งดัดแปร (modified starch) น้ำเชื่อมกลูโคส (glucose syrup) มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) หรือเม็ดสาคู (cassava pearl) เป็นต้น โดยปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย โดยมีมูลค่าถึง 36,103 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดิบ (native starch) ที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยตรง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (modified tapioca starch) ที่นำแป้งมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการดัดแปรเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งเพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ

องค์ประกอบหลักของแป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของแอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) โดยที่แป้งมันสำปะหลังจะมีสัดส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินประมาณ 19-22% และ 28-81% ตามลำดับ (Zakaria และคณะ, 2017) จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงแอมิโลส และอะมิโลเพกทินที่ประกอบจากโมเลกุลของกลูโคส (glucose) เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ด้วยพันธะ 1,4 และมีส่วนของสายโซ่กิ่งที่เชื่อมต่อกับพันธะ 1,6 โดยสายโซ่ของกลูโคสเส้นตรงที่ประกอบด้วยพันธะ 1,4 เท่านั้นจะเรียกว่า แอมิโลส ส่วนสายโซ่ที่มีทั้งพันธะ 1,4 และสายกิ่งที่มีพันธะ 1,6 จะเรียกว่าแอมิโลเพกทิน

โครงสร้างที่แตกต่างกันของแป้งทำให้เกิดความแตกต่างในการเกิดโครงสร้างของนาโนเจลจากการศึกษาพบว่าแป้งและอนุพันธ์ของแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่สามารถเกิดนาโนเจลได้ และมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย โดย Lamanna และคณะ (2013) พบว่าเมื่อฉายรังสีแกมมา ความเข้ม 20 kGy ที่อัตราการฉายรังสี (irradiation rate) 14 kGy/h ลงบนโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวจะทำให้ขนาดของแป้งลดลงจนมีขนาด 20 และ 30 nm ตามลำดับ และผลึกของแป้งที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาจะมีลักษณะเป็นอสัณฐาน และถูกทำลายจากความร้อนได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ในทางกลับกัน สารละลายพอลิเมอร์เจือจางจะสามารถเกิดกระบวนการ crosslink ภายในโมเลกุลเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมา โดยพบว่านาโนเจลของแป้งคาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl starch nanogel) ที่มี

ขนาดเล็กกว่า 50 nm จะเกิดการ crosslink เมื่อผ่านการฉายด้วยลำอิเล็กตรอน ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 16 kGy (Binh และคณะ, 2012)

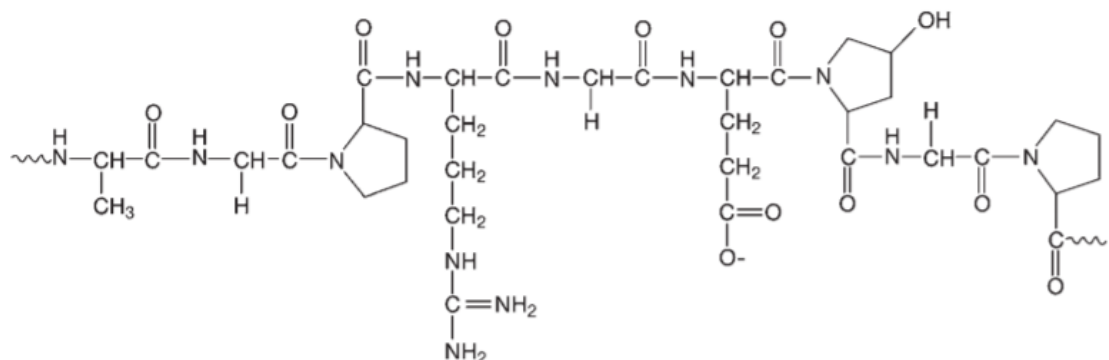


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเอมิโลส และเอมิโลเพกทิน

ที่มา: Oni และคณะ (2020)

2.3 เจลาติน

เจลาตินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง เกิดจากการเสียสภาพหรือการแตกสลายของคอลลาเจน โดยสามารถเกิดได้จากคอลลาเจนในสัตว์ เช่น ปลา หมู หรือวัว เป็นต้น เจลาตินสามารถเกิดเจลรวมกับน้ำ เกิดเป็นเจลที่ผันกลับได้ด้วยความร้อน (thermally reversible gel) องค์ประกอบของเจลาตินเหมือนกับกรดอะมิโนที่พบในคอลลาเจน คือมีไกลซีน (glycine) ประมาณ 1 ใน 3 ของกรดอะมิโนทั้งหมด มีโครงสร้างที่สำคัญคือมีหมู่อะมิโนอิสระของโปรตีนอยู่มาก ดังโครงสร้างรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเจลาติน

ที่มา: Kommareddy และคณะ (2007)

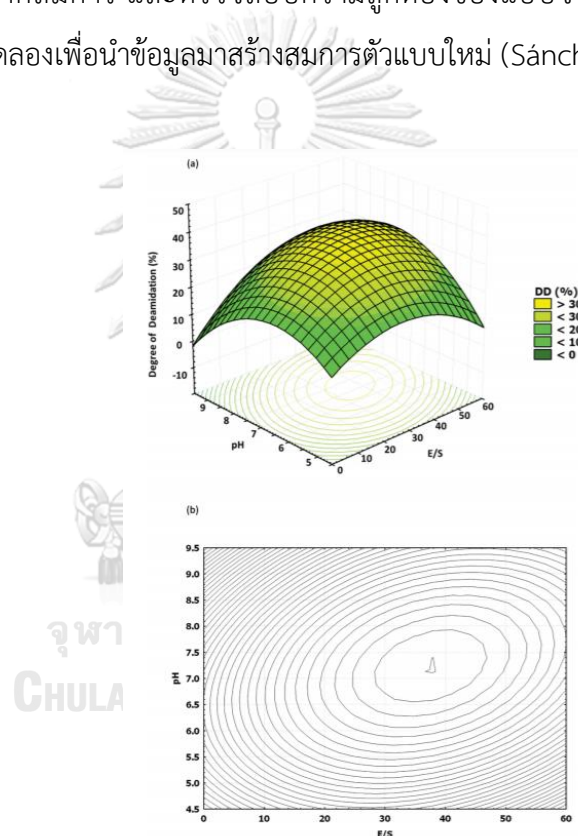
เจลาตินเป็นโปรตีนที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบธรรมชาติในการผลิตนาโนเจล เนื่องจากมีสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ การเกิดเจล และมีการเชื่อมขวางที่ตีมาก (Thies, 2007) เจลาตินผลิตจากการนำคอลลาเจนที่ได้จากหนัง เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน หรือกระดูกของสัตว์ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Haug และ Draget, 2011) เจลาตินสามารถผลิตด้วยกระบวนการที่ใช้กรดเพื่อย่อยคอลลาเจนให้เป็นเจลาติน โดยค่า pI ของเจลาตินมีค่าเท่ากับ 4.8-9.0 (Haug และ Draget, 2011; Meng และ Cloutier, 2014) เจลาตินในอุตสาหกรรมประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ alpha-chain ซึ่งเป็นสายโซ่เดี่ยว beta-chain ประกอบขึ้นด้วย alpha-chain 2 สายมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ และ gamma-chain ซึ่งประกอบขึ้นจาก alpha-chain จำนวน 3 สายมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้มีความแข็งแรงของโครงสร้างโปรตีนในเจลาติน (Papon และคณะ, 2007)

เจลาตินเป็นโปรตีนในธรรมชาติมีสมบัติในการเป็นสารเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุล (cross-linker) ในการเกิดนาโนเจลที่ดี มีความปลอดภัย ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และทางด้านชีวการแพทย์ และมีการนำเจลาตินไปใช้เป็นสารเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลกับพอลิเมอร์ตัวอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเกิดโครงสร้างนาโนเจล (Kuijpers และคณะ, 2000; Lee และ Mooney, 2001) โดยนาโนเจลที่ผ่านการฉายรังสีจะมีสมบัติในการทนแรงดึงเพิ่มขึ้น หลังจากถูกฉายด้วยลำอิเล็กตรอนที่ 60 kGy รวมทั้งยังเกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลของเจลาตินที่มีความแข็งแรงสูง และสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นของการเกิดฟิล์ม และเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มจากนาโนเจลจากเจลาตินได้ (Benbettaïeb และคณะ, 2016)

2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม

การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางสถิติที่ใช้เพื่อออกแบบการทดลอง และศึกษาอิทธิพลร่วม (interaction effect) ของหลายปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตาม ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือภาวะที่เหมาะสม (optimum conditions) ต่อการเกิดผลที่ต้องการ ข้อดีของ RSM คือสามารถลดจำนวนชุดทดลองที่ใช้ในการประเมินตัวแปรหลายตัว รวมทั้งความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น นอกจากนี้วิธีพื้นผิวตอบสนองยังเป็นเทคนิคที่ช่วยให้กระบวนการที่มีความซับซ้อนมีความง่ายในการจัดการข้อมูลและอธิบายผลมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ รวมถึงช่วยลดจำนวนชุดทดลองในการประเมินตัวแปรหลายตัว ทำให้สามารถลดต้นทุน และเวลาในการทดลองได้ (Stroescu และคณะ, 2013)

การทำนายสภาวะที่เหมาะสมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามแผนการทดลองเพื่อแสดงค่าการตอบสนองสูงสุด ต่ำสุด หรือการตอบสนองตามระดับที่ต้องการ สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทำนายผลการทดลองจริง จากการประมวลผลทางสถิติจะแสดงผลการตอบสนองในลักษณะกราฟโครงร่าง (contour plot) และภาพ 3 มิติของกราฟพื้นผิวตอบสนอง (surface plot) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยแบบจำลองที่สร้างได้และยังสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (validation) โดยทำการทดลองซ้ำกับตัวแปรอิสระที่อยู่ในจุดที่สภาวะที่เหมาะสม แล้ววัดค่าตัวแปรตามเพื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรผลที่ทำนายได้จากสมการ และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง หากแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการตัวแบบใหม่ (Sánchez และคณะ, 2016)



รูปที่ 2.6 ลักษณะกราฟพื้นผิวตอบสนอง (a) และกราฟโครงร่าง (b)

ที่มา: Suppavorasatit และคณะ (2011)

การออกแบบแผนการทดลอง (design of experiment, DOE) มีหลายรูปแบบ แต่ในทางปฏิบัติมักไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระว่าจะเป็นแบบใด ซึ่งโดยทั่วไปมักนิยมใช้ตัวแบบกำลังสอง (second-order model) เนื่องจากมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวแบบอื่น ๆ (Stroescu และคณะ, 2013) ตัวแบบกำลังสองหรือ

บางครั้งอาจเรียกว่าสมการกำลังสอง (quadratic model) เป็นตัวแบบที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) กล่าวคือ เมื่อตัวแปรอิสระตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลง ผลการตอบสนอง อาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแทน ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ full factorial design (FFD) เป็นเทคนิคการออกแบบที่ครอบคลุมทุกตัวแปร โดยมีปัจจัยที่ศึกษาหรือตัวแปรอิสระอย่างน้อย 2 ตัวแปร และตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวแปร การออกแบบการทดลองที่มีระดับของตัวแปรอิสระ 3 ระดับ นิยมกำหนดแบบ 3^k factorial เมื่อ k คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ ยกตัวอย่างเช่น หากมีตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร หรือ 4 ตัวแปร นั้นหมายความว่า จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 33 และ 34 หรือเท่ากับ 27 และ 81 การทดลองตามลำดับ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปการทดลองจำนวนมากนี้ไม่เหมาะสมในงานอุตสาหกรรม หรืองานที่มีขอบเขตของเวลา ทรัพยากรและต้นทุนในการทดลอง จึงมีการพัฒนาการออกแบบแผนการทดลองที่ลดจำนวนการทดลองและสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยวิธีพหุคูณตอบสนองได้ เช่น Box-Behnken design (BBD), central composite design (CCD) และ Doehler matrix (DM) เป็นต้น (Bezerra และคณะ 2008)

มีการใช้การทดลองโดยใช้ RSM เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกักเก็บสารสำคัญ เช่น การใช้ RSM เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยอบเชย (Pongsumpun และคณะ, 2020) และน้ำมันกะเพรา (Sutaphanit และ Chitprasert, 2014) โดย RSM สามารถอธิบายผลต่อตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของการกักเก็บสารสำคัญได้อย่างละเอียด และสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรได้ รวมถึงในการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมนาโนเจลเพื่อกักเก็บน้ำมันจากต้นทิวารี (Sinha และคณะ, 2016) ซึ่งสามารถอธิบายการหาสภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมนาโนเจลเพื่อไปประยุกต์ใช้ต่อได้ดี

2.5 การกักเก็บน้ำมันหอมระเหย

การกักเก็บ (encapsulation) คือ กระบวนการห่อหุ้มหรือกักเก็บสารชนิดหนึ่งไว้ด้วยสารอีกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปรูปแบบของการกักเก็บ มี 2 ประเภท คือ สารที่ถูกกักเก็บกระจายตัวอยู่ในสารกักเก็บ (matrix encapsulation) และสารที่ถูกกักเก็บทั้งหมดถูกกักเก็บไว้ด้วยสารกักเก็บ (core shell encapsulation) ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้เทคนิคนี้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถกักเก็บสี กลิ่น หรือรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ อีกทั้งปกป้องสารสำคัญจากสิ่งแวดล้อมที่สามารถทำลายสารสำคัญได้ เช่น แสง ความร้อน ออกซิเจน และความชื้น ลดหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือการระเหยของสารสำคัญในอาหาร เช่น กลิ่นรส สารต้านอนุมูลอิสระ วิตามิน

แร่ธาตุ และโพรไบโอติก เป็นต้น ทำให้สารประกอบเหล่านี้มีความคงตัวระหว่างกระบวนการผลิตและเก็บรักษา ควบคุมการปลดปล่อยสาร รวมถึงยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มได้ การที่นาโนเจลกักเก็บสารละลายไว้ภายในรูพรุน ทำให้สามารถกักเก็บสารสำคัญที่มีความไวต่อการถูกทำลายด้วยสภาวะต่าง ๆ ได้ เช่น น้ำมันหอมระเหย ซึ่งมีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและปริมาณได้ง่ายระหว่างกระบวนการผลิตและเก็บรักษา จากการศึกษาพบว่า การกักเก็บน้ำมันหอมระเหยสามารถป้องกันการเสื่อมสลายของสารระเหยให้กลับ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ นอกจากนั้นยังทำให้ละลายน้ำได้ดียิ่งขึ้น (Nandi และคณะ, 2003)

2.6 น้ำมันหอมระเหยตะไคร้

2.6.1 ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์

อนุกรมวิธานของตะไคร้ (taxonomy of lemongrass) มีข้อมูล ดังนี้

Domain:	Eukaryota
Kingdom:	Plantae
Phylum:	Spermatophyta
Subphylum:	Angiospermae
Class:	Monocotyledonae
Order:	Cyperales
Family:	Poaceae
Genus:	<i>Cymbopogon</i>
Species:	<i>Cymbopogon citratus</i>
Scientific Names:	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf

ตะไคร้ เป็นพืชสมุนไพรที่นิยมปลูกในประเทศไทย มีถิ่นกำเนิดจากประเทศศรีลังกาและอินเดีย มีกลิ่นหอมเฉพาะตัวโดยมีกลิ่นคล้ายผลไม้ตระกูลส้ม (citrus-like) นิยมใช้ประกอบอาหารเป็นส่วนผสมในอาหารไทย (Khonsung, 2012) นอกจากนั้นยังนิยมนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น เครื่องสำอาง หรือยา เป็นต้น โดยคุณสมบัติหลักของตะไคร้คือสามารถต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและรา มีฤทธิ์ต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสามารถไล่แมลงได้ ส่วนมากนิยมสกัดและนำไปใช้ในรูปของน้ำมันหอมระเหย

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้

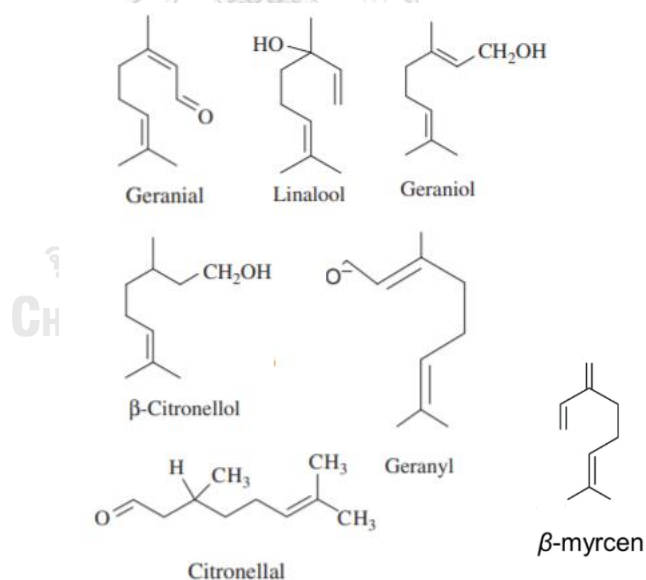
องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสายพันธุ์ วิธีการเพาะปลูก สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ระยะการเจริญเติบโต การเก็บเกี่ยว และสภาวะหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งมีผลต่อปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ Khonsung (2012) ได้รายงานว่ ตะไคร้ประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 80 สารระเหยประมาณ 0.2-0.4 % ขึ้นอยู่กับวิธีสกัดและแหล่งที่ปลูก และเป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ระเหย รวมถึงแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียมและโพแทสเซียม สารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่พบส่วนใหญ่ ได้แก่ alpha-citral หรือ geranial, beta-citral หรือ neral และยังประกอบด้วย alpha-pinene, beta-pinene, delta-3-carene, myrcene, dipenten, beta-phellandrene, beta-cymene, methyl heptanene, citronellal, beta-elemene, beta-caryophyllene, citronellyl acetate, geranyl acetate, geraniol, elemol และ beta-caryophyllene oxide แต่เมื่อสกัดเป็นน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ จะทำให้สารระเหยบางชนิดมีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสารระเหยบางประเภทไม่ใช่สารระเหยให้กลิ่น โดย Satthanakul และคณะ (2015) ได้รายงานถึงสารระเหยให้กลิ่นสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และสารระเหยให้กลิ่นสำคัญดังกล่าวมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.7 ซึ่งพบว่าสารทั้ง 6 ชนิดนั้นเป็นสารประกอบประเภท monoterpene ที่มักจะเป็นสารให้กลิ่นสำคัญให้พืชหลากหลายชนิด (Moreno และ Peinado, 2012) น้ำมันหอมระเหยตะไคร้เป็นน้ำมันหอมระเหยที่ประกอบด้วย citral (alpha-citral (geranial) และ beta-citral (neral)) เป็นจำนวนมาก จึงมักจะนำตะไคร้มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการสกัดสารระเหย citral เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นสารให้กลิ่นรส เครื่องสำอาง และน้ำหอม รวมทั้งมีการพัฒนาร่วมกับผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม หรือนำไปผสมกับน้ำมันหอมระเหยอื่น ๆ เพื่อให้กลิ่นเฉพาะตัวมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาว่าน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ยังสามารถยับยั้ง cytotoxic activity ต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว (leukemia cells) เพื่อใช้ทางการแพทย์ เป็นสารยับยั้งการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร และยังมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์อีกด้วย (Joy และคณะ, 2006)

ตารางที่ 2.1 สารระเหยให้กลิ่นสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) ในประเทศไทย

Retention time (min)	Components	RI _{polar}	Percent area%	Identification methods*
4.187	Linalool	NI	9.73	MS
5.661	Beta-Myrcene	NI	5.54	MS, AC
7.008	Beta-Citral (Neral)	1238	0.03	MS, RI, AC
7.177	Geraniol	1250	34.80	MS, RI, AC
7.684	Alpha-Citral (Geranial)	1268	0.57	MS, RI, AC
9.669	Geranyl acetate	1378	30.72	MS, RI

*MS, mass spectra; RI, retention index data generated from a series of n-alkanes (C₁₀₋₂₃), retention time compared with reference compounds (AC); NI, not identified

ที่มา: Satthanakul และคณะ (2015)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสารประกอบสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้

ดัดแปลงจาก: Moreno และ Peinado (2012)

บทที่ 3

อุปกรณ์ และ วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบ

แป้งมันสำปะหลัง (บริษัท อินกริดิออน (ประเทศไทย) จำกัด)

เจลาตินผง (บริษัท เจอาร์ เอฟ แอนด์ ซี จำกัด)

น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (บริษัทอุตสาหกรรมเครื่องหอมไทย-จีน จำกัด)

3.1.2 สารเคมี

2,4,6-trinitrobenzene sulphonic acid (Sigma-Aldrich, USA) (A.R.)

2,4,6-trimethylpyridine (Sigma-Aldrich, Switzerland) (G.C.)

acetone (QRëC, New Zealand) (A.R.)

C₁₂ – C₂₀ saturated alkanes standard (Sigma-Aldrich, Switzerland) (G.C.)

ethanol (99.95%) (QRëC, New Zealand) (G.C.)

glycine (Kemaus, Australia) (A.R.)

hexane (Duksan Pure Chemicals, Korea) (G.C.)

hydrochloric acid (QRëC, New Zealand) (A.R.)

methanol (99.8%) (Fisher Scientific UK, UK) (G.C.)

sodium hydrogen carbonate (Carlo Erba ReagenTD S.A.S., France) (A.R.)

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์

เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น MS1602S/01, Switzerland)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น MS304S/01, Switzerland)

10 µL syringe (SGE Analytical Science, Australia)

20 mL vials/Teflon-lined headspace caps (National Scientific, USA)

300 µL µ-vials (Gerstel, Germany)

atomic force microscope (Park systems รุ่น NX10, South Korea)

- Multimode NanoScope IV system (Veeco, USA)

- Femtoscan software (ATC, Russia)
- biomedical freezer (Sanyo, Japan)
- centrifuge (Hettich รุ่น D-78532, Germany)
- colorimeter (Konica Minolta รุ่น CR-400, Japan)
- electron beam accelerator (Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Thailand)
- freeze dryer (Labconco รุ่น Dry Ice Benchtop Freeze Dryers, USA)
- Fourier transform infrared spectrometer (BRUKER รุ่น VERTEX 70v, Germany)
- hot air oven (Gen Lab รุ่น PRIME, UK)
- laboratory blender (Waring Commercial รุ่น 8010BU, USA)
- magnetic stirrer with heating plate (IKA รุ่น C-MAG HS7, Germany)
- micropipette (Mettler Toledo, USA)
- pH meter (Mettler Toledo รุ่น Seven compact, Switzerland)
- refrigerator (Sanyo รุ่น SF-C95, Japan)
- scanning electron microscope (JEOL รุ่น JSM-IT300, Japan)
- single quadrupole gas chromatography mass spectrometer (GC-MS)
 - GC column (DB-WAX, Agilent Technologies, USA)
 - GC system (Agilent Technologies รุ่น 7890B GC system, USA)
 - MS (Agilent Technologies รุ่น 5977B GC-MSD Single Quad, USA)
 - multipurpose sampler (MPS; Gerstel, Germany)
 - temperature-programmable vaporization inlet (Gerstel CIS 4 PTV, Germany)
 - Tenax®-packed liner (Gerstel glass liners, TenaxTA, Gerstel, Germany)
 - thermal desorption unit (TDU) (Gerstel, Germany)
 - auto sampler (Agilent Technologies รุ่น 7633 ALS, USA)
- shaking water bath (GFL รุ่น 1082, Germany)
- sonicator (Elma รุ่น Elmasoniv E70H, Germany)
- thermogravimetric analyzer (Mettler Toledo รุ่น SF-2, Switzerland)
- thermometer (Ebro รุ่น TFX410, Germany)
- transmission electron microscope (JEOL รุ่น 2100, Japan)
- UV-visible spectrophotometer (Thermo Spectronic รุ่น Genesys 10UV, USA)

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

3.2.1.1 การเตรียมนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

ผสมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินผงในอัตราส่วน และความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา ละลายในน้ำให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 40 °C โดยกวนผสมเป็นเวลา 5 นาที pH ของสารละลายขณะเตรียมเท่ากับ 7.0 ± 0.2 จากนั้นนำไปฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C) ตามปริมาณรังสีดูดกลืนที่ต้องการศึกษา ที่ความเข้มของรังสี (dose rate) เท่ากับ 83.80 kGy/min เหยียงแยก (centrifuge) ที่ 14,000 xg เพื่อแยกส่วนใสออก ส่วนที่ตกตะกอนได้เป็นนาโนเจล (Rattanawongwiboon และคณะ, 2018)

3.2.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

ศึกษาปัจจัยในการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายลำอิเล็กตรอน โดยแปรอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง-เจลาติน (TAP:GEL Ratio; 1:9 – 9:1) ที่คำนวณอัตราส่วนเป็นร้อยละของแป้งมันสำปะหลังในสารผสมทั้งหมดเป็นค่าในการวิเคราะห์ข้อมูล (10% - 90%) และความเข้มข้นของสารผสม (mixture concentration; 10-40 mg/mL) หาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดนาโนเจลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ response surface methodology (RSM) โดยใช้แผนการทดลองสำหรับการเตรียมนาโนเจลแบบ central composite design (CCD) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 สำหรับตัวแปรตาม (dependent variables) ได้แก่ ค่าการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี TNBS (TNBS assay) ซึ่งดัดแปลงจาก Balakrishnan และ Jayakrishnan (2005) (ภาคผนวก ก.1) และค่าความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี thermogravimetric analysis (TGA) (ภาคผนวก ก.2) ทั้งนี้กำหนดให้ปัจจัยอื่นในการฉายรังสีคงที่สำหรับการทดลอง (ขนาดภาชนะบรรจุ ปริมาตรของสารละลาย การจัดเรียงภาชนะ) วิเคราะห์ผลและทำนายค่าตัวแปรโดยคำนวณเป็นสมการ

ถดถอยเชิงเส้นโค้ง (quadratic regression equation) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 20.0 และแสดงผลตอบสนองโดยนำเสนอในรูปแบบ surface plot และ contour plot ด้วยโปรแกรม Statistica® software (Version 12.0, Stat Soft Inc., Oklahoma, USA) สำหรับการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมนั้น เลือกจากค่าการเชื่อมขวาง และความคงตัวต่อความร้อนสูงสุด ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (validation) ด้วยการเตรียมนาโนเจลที่สภาวะที่ได้จากการคำนวณ แล้ววิเคราะห์ค่า DC และ TD ของตัวอย่าง ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้คำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายจากสมการเพื่อหาร้อยละความแตกต่าง ดังสมการที่ 3.1 (Sánchez และคณะ, 2016)

$$\text{ร้อยละความแตกต่าง} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้จริง} - \text{ค่าเฉลี่ยจากการทำนาย}}{\text{ค่าเฉลี่ยจากการทำนาย}} \times 100 \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ				
		-1	0	1	-1.68	1.68
อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:เจลาติน (ร้อยละของแป้งมันสำปะหลังในสารผสม)	-	1:2 (33%)	1:1 (50%)	2:1 (67%)	1:9 (10%)	9:1 (90%)
ความเข้มข้นของสารผสม	mg/mL	15	25	35	10	40
ปริมาณรังสีดูดกลืน	kGy	15	25	35	10	40

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจล

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีตามรายละเอียดในข้อ 3.2.1 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตนาโนเจล จากนั้นนำนาโนเจลที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา โดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่สามารถแสดงโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ดังนี้

3.2.2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (ภาคผนวก ก.3)

3.2.2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) (ภาคผนวก ก.4)

3.2.2.3 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของนาโนเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) (ภาคผนวก ก.5)

3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของนาโนเจล

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของนาโนเจลด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) โดยนำตัวอย่างนาโนเจลในรูปแบบสารละลายวิเคราะห์ โดยใช้ FT-IR spectrometer แบบ Single Reflection ATR mode วิเคราะห์หา % transmittance โดยตั้งค่าที่ช่วงความยาวคลื่น $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ และ resolution ที่ 4.0 cm^{-1}

3.2.4 การศึกษาการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจล

เมื่อได้นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสมแล้ว นำมาศึกษาสมบัติการกักเก็บของนาโนเจล โดยใช้ น้ำมันหอมระเหยตะไคร้เป็นสารที่ใช้ในการศึกษาการกักเก็บ วิธีการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจล โดยวิธีของ de Carvalho และคณะ (2021) จากนั้นทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer) โดยปรับความดันที่ 0.05 mbar อุณหภูมิ $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บรรจุผงแห้งที่ได้ในถุงอลูมิเนียมลามิเนต ปิดผนึกแบบสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อการวิเคราะห์สมบัติต่อไป

3.2.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้

วิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยด้วยเทคนิค Headspace Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) (Kfoury และคณะ, 2015) โดยวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันหอม

ระเหยตะไคร้ ดัดแปลงจากวิธีของ Kerdchoechuen และคณะ (2010) โดยปีเปตน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ปริมาตร 500 μL ลงในหลอดแก้ว $\mu\text{-vial}$ ขนาด 300 μL จากนั้นเติม 2,4,6-trimethylpyridine (internal standard) ที่มีความเข้มข้น 1,000 ppm (ภาคผนวก ก.6) ปริมาตร 2 μL ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture ที่ความเร็วระดับ 5 เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ตัวอย่างและ internal standard ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างใน $\mu\text{-vial}$ ไปให้ความร้อนภายใน thermal desorption unit (TDU) เพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิ 40 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 40 $^{\circ}\text{C}$ ไปจนถึง 280 $^{\circ}\text{C}$ ภายในเวลา 5 นาที ที่อัตราเร็ว 12 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เพื่อปลดปล่อยสารระเหยเข้าสู่ระบบของ gas chromatography ด้วย split mode (split ratio, 1:20 v/v) โดยใช้ capillary คอลัมน์ชนิด DB-WAX (30 m x 0.25 μm i.d. x 0.25 μm film thickness; J&W, Agilent, USA) ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิ oven ให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40 $^{\circ}\text{C}$ คงไว้ 5 นาทีแล้วเพิ่มขึ้นในอัตราเร็ว 7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึง 250 $^{\circ}\text{C}$ และคงไว้ 5 นาที ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา โดยมีอัตราการไหล 1 mL/min และ ionize voltage 70 eV ใช้ mass range ตั้งแต่ 40-350 m/z โดยตั้งอุณหภูมิของ detector เป็น 280 $^{\circ}\text{C}$ วิเคราะห์ชนิดของสารระเหยโดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (NIST version 17) ร่วมกับการคำนวณค่า linear retention index (LRI) โดยเปรียบเทียบจากสารมาตรฐานอัลเคน ($\text{C}_{10}\text{-C}_{20}$) (ภาคผนวก ก.7) คำนวณปริมาณของสารระเหยโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารนั้น ๆ กับ 2,4,6-trimethylpyridine ที่ใช้เป็น internal standard และรายงานเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารระเหยชนิดนั้นต่อน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในตัวอย่าง (ppm) (ภาคผนวก ก.8)

3.2.4.2 การเตรียมน้ำมันหอมระเหยตะไคร้และนาโนเจล และการกักเก็บรักษา น้ำมันหอมระเหยตะไคร้

การศึกษาการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจล ดัดแปลงจากวิธีของ de Carvalho และคณะ (2021) ด้วยการทำละลายน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในเอทานอลความเข้มข้น 99.8% (1:1, v/v) จากนั้นนำนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่ได้จากการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสมจากข้อ 3.1.1 ผสมน้ำมันหอม

ระเหยตะไคร้ที่ละลายในเอทานอลในอัตราส่วนของนาโนเจลต่อน้ำมันหอมระเหย เป็น 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยคำนวณจากอัตราส่วนความเข้มข้นของนาโนเจล ที่ใช้ ความเข้มข้นสารผสม (mg/mL) ต่อความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ ละลายในเอทานอล (mg/mL) จากนั้นนำไปวางใน ultrasonic bath ที่ความถี่ 70 Hz เป็นเวลา 10 นาทีที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นบรรจุผงที่ได้ในถุงอลูมิเนียมลามิ เนต (ค่าการซึมผ่านของน้ำ(WVTR); 0.110 g/m²/day และค่าการซึมผ่านของ ออกซิเจน; 0.864 g/m²/day)ที่ปิดสนิทแบบสุญญากาศ เก็บรักษาไว้ในกล่องทึบ แสงบรรจุซิลิกาดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ -40 °C เพื่อเก็บรักษาไว้สำหรับการวิเคราะห์ ขั้นตอนถัดไปโดยสามารถศึกษาผลของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้ดังต่อไปนี้

I. ประสิทธิภาพของการกักเก็บ (loading efficiency - LE)

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการกักเก็บ (loading efficiency - LE) ตามวิธีของ Zhavah และคณะ (2015) (ภาคผนวก ก.9) โดย คำนวณค่าประสิทธิภาพของการกักเก็บได้ตามสมการที่ 3.2

$$\text{Loading efficiency (\%)} = \frac{(\text{OD}_R - \text{OD}_S) \times 100}{\text{OD}_R} \quad (3.2)$$

เมื่อ OD_R และ OD_S คือ optical density (390 nm) ของน้ำมัน หอมระเหย และของตัวอย่างตามลำดับ

II. ความสามารถในการละลาย (solubility index)

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายของผงแห้งน้ำมันหอม ระเหย ตามวิธีของ Chew และคณะ (2018) (ภาคผนวก ก.10)

III. ปริมาณผลผลิตในการห่อหุ้ม (encapsulation yield; EY)

วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตในการห่อหุ้มโดยคำนวณตามสมการที่ 3.3

$$\text{EY (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักผงหลังทำแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักของนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยที่ใช้}} \quad (3.3)$$

3.2.4.3 การหาปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บภายในนาโนเจล

วิเคราะห์ปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในการกักเก็บในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินทำตามวิธีการในข้อ 3.2.4.1 โดยวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยเป็น 1:1 1:2 และ 2:1 เพื่อเลือกตัวอย่างที่อัตราส่วนที่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจลที่เหมาะสมที่สุด โดยวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้หลังการกักเก็บด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry โดยซังผงแห้งของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บในนาโนเจล ในแต่ละอัตราส่วน ปริมาณ 500 mg ละลายในน้ำ 1 mL จากนั้นเติม 2,4,6-trimethylpyridine (internal standard) ที่มีความเข้มข้น 1,000 ppm (ภาคผนวก ก.6) ปริมาตร 2 μ L ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture ที่ความเร็วระดับ 5 เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ตัวอย่างและ internal standard ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ปิเปตปริมาตร 500 μ L มาวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยสำคัญด้วยเทคนิค GC-MS ตามวิธีวิเคราะห์ในข้อ 3.2.4.1

3.2.4.4 การศึกษาความทนต่อความร้อนของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจล

เลือกตัวอย่างที่อัตราส่วนที่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาสมบัติของการกักเก็บจากข้อ 3.2.4.2 และ 3.2.4.3 เพื่อนำมาวิเคราะห์ความทนต่อความร้อนของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจล โดยบรรจุผงแห้งของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจล 100 mg ในขวดแก้วขนาด 20 mL ปิดฝาและอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C เป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ปิดฝาและเก็บตัวอย่างที่อบตามเวลาดังกล่าวใน desiccator จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยให้กลิ่น โดยดัดแปลงจากวิธีของ Enciso และคณะ (2018) ซังน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ และน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บในนาโนเจลที่ผ่านการให้ความร้อนในอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ 100 mg สกัดด้วย hexane และน้ำ (ภาคผนวก ก.11) เก็บส่วน organic phase

ปริมาตรประมาณ 200 μL และนำมาวิเคราะห์ด้วย gas chromatography โดยตั้งอุณหภูมิ injector เป็น 230 $^{\circ}\text{C}$ ฉีดสารเข้าสู่คอลัมน์ โดยใช้ capillary คอลัมน์ชนิด DB-WAX (30 m x 0.25 μm i.d. x 0.25 μm film thickness; J&W, Agilent, USA) ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิ oven ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 $^{\circ}\text{C}$ คงไว้ 5 นาทีแล้วเพิ่มขึ้นในอัตราเร็ว 7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึง 250 $^{\circ}\text{C}$ และคงไว้ 5 นาที ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา โดยมีอัตราการไหล 1 mL/min และ ionize voltage 70 eV ใช้ mass range ตั้งแต่ 40-350 m/z โดยมีอุณหภูมิ detector 280 $^{\circ}\text{C}$ แปรผลโดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (NIST version 17) ร่วมกับการคำนวณค่า linear retention index โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานอัลเคน (C_{10} - C_{20}) (ภาคผนวก ก.7) คำนวณปริมาณของสารระเหยโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารนั้น ๆ กับ 2,4,6-trimethylpyridine ที่ใช้เป็น internal standard และรายงานเป็นความเข้มข้นของสารระเหยสำคัญ (ภาคผนวก ก.8)

3.2.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีระหว่างการเก็บรักษา นำผงแห้งของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนตปิดสนิทและกล่องพลาสติกใส เก็บรักษาภายใน desiccator ที่อุณหภูมิห้อง 25 $^{\circ}\text{C}$ ความเข้มของแสงประมาณ 102 lux เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์ทุก 2 สัปดาห์ โดยนำตัวอย่างผงแห้งที่เก็บรักษาทั้งสองสภาวะมาวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยให้กลิ่นสำคัญ ด้วยเทคนิค GC-MS ตามวิธีวิเคราะห์ตามข้อ 3.2.4.1

3.2.4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของผงน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลภายหลังการเก็บรักษา

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างจากการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงจากลักษณะปรากฏ และค่าสีของผงน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลหลังจาก encapsulation ที่บรรจุกล่องพลาสติกใสและถุงอลูมิเนียมลามิเนต ปิดสนิท

แบบสุญญากาศ โดยวัดค่าสีของตัวอย่างด้วยเครื่อง chroma meter ระบบ CIE และบันทึกค่า L^* , a^* และ b^* โดยปรับมาตรฐานเครื่องก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้ง (ภาคผนวก ก.12)

3.2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ของความต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22.0 และการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (response surface methodology, RSM) และการทำนายผลต่อตัวแปรตาม นำเสนอในรูปแบบ surface และ contour plot ด้วยโปรแกรม Statistica® Software Version 12.0 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

บทที่ 4

ผล และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน โดยแปรอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:เจลาติน (TAP:GEL Ratio; 1:9-9:1) ความเข้มข้นของสารผสม (mixture concentration; 10-40 mg/ml) และปริมาณรังสีดูดกลืน (irradiation dose; 10.0-40.0 kGy) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ response surface methodology (RSM) ใช้การออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) โดยกำหนดสภาวะอื่น ในการฉายรังสี ให้คงที่สำหรับการทดลอง พบว่ามีค่าการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) ตามวิธีของ TNBS (TNBS assay) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) ด้วยวิธี Thermogravimetric analysis (TGA) ในตารางที่ 4.1

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าค่า DC อยู่ในช่วง 59.82-88.65% และค่า TD อยู่ในช่วง 94.3-122.8 °C เมื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (quadratic regression equation) โดยใช้ค่าจริง (actual value) ได้สมการทำนายค่า DC และ TD ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$DC (\%) = -39.6 + 0.200x_1 + 4.260x_2 + 4.977x_3 - 0.00266x_1^2 - 0.0890x_2^2 - 0.0884x_3^2 + 0.00685x_1x_2 - 0.00526x_1x_3 + 0.0027x_2x_3 \quad (4.1)$$

$$TD (^\circ C) = -15.5 + 0.461x_1 + 5.14x_2 + 4.91x_3 - 0.00673x_1^2 - 0.1064x_2^2 - 0.0961x_3^2 + 0.0045x_1x_2 - 0.0021x_1x_3 + 0.0041x_2x_3 \quad (4.2)$$

เมื่อ x_1 คือ อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง-เจลาติน

x_2 คือ ความเข้มข้นของสารผสม (mg/mL)

x_3 คือ ปริมาณรังสีดูดกลืน (kGy)

ตารางที่ 4.1 การเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) ของนาโนเจลที่เตรียมจากสภาวะต่างกัน

treatment (point)	independent variables						dependent variables	
	code			actual values			degree of crosslink (DC, %)	degradation temperature (TD, °C)
	x ₁	x ₂	x ₃	TAP:GEL ratio	conc. (mg/mL)	dose (kGy)		
1	-1	-1	-1	1:2	15	15	63.46	96.3
2	1	-1	-1	2:1	15	15	61.66	94.3
3	-1	1	-1	1:2	35	15	59.82	92.7
4	1	1	-1	2:1	35	15	68.74	97.7
5	-1	-1	1	1:2	15	35	69.60	96.8
6	1	-1	1	2:1	15	35	70.44	97.4
7	-1	1	1	1:2	35	35	73.19	98.9
8	1	1	1	2:1	35	35	72.45	98.5
9	-1.68	0	0	1:9	25	25	87.54	122.8
10	1.68	0	0	9:1	25	25	80.95	101.0
11	0	-1.68	0	1:1	10	25	63.89	96.1
12	0	1.68	0	1:1	40	25	76.40	106.4
13	0	0	-1.68	1:1	25	10	65.96	102.6
14	0	0	1.68	1:1	25	40	74.56	104.3
15	0	0	0	1:1	25	25	86.65	121.7
16	0	0	0	1:1	25	25	86.23	120.3
17	0	0	0	1:1	25	25	88.65	119.9

ตารางที่ 4.2 p-value ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD)

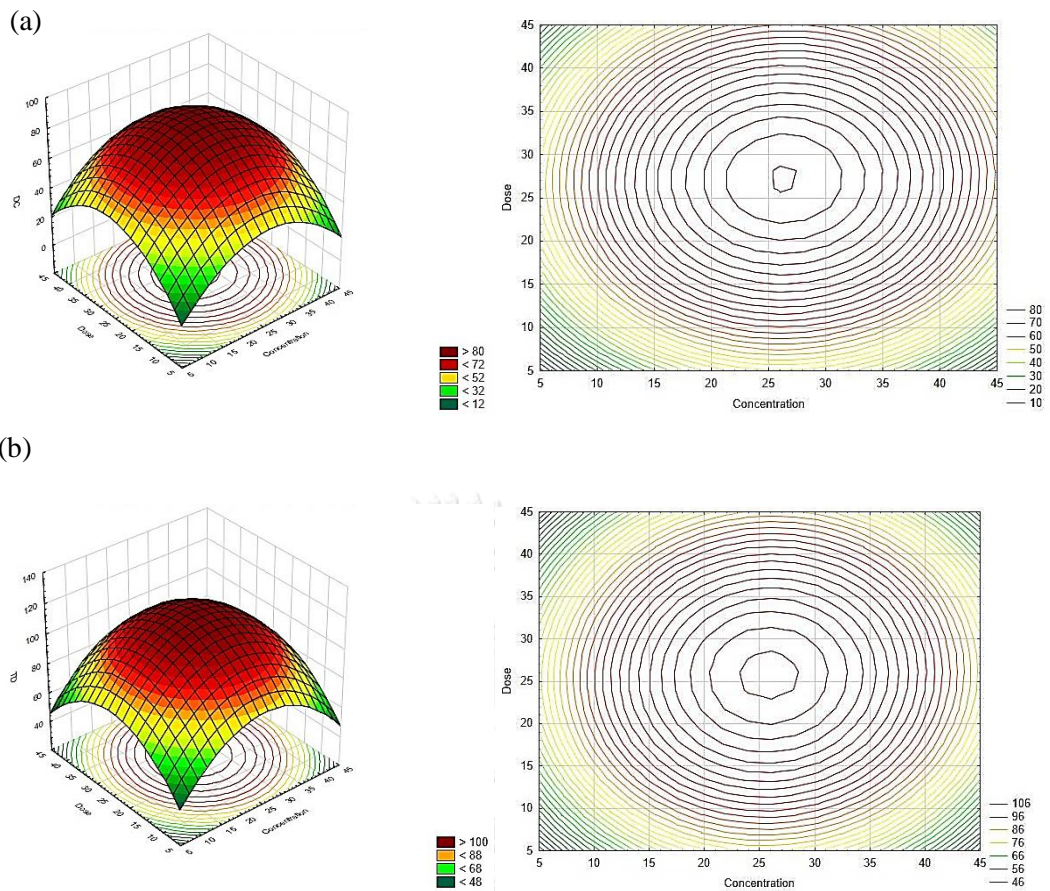
p-value	DC	TD
model	0.006*	0.036*
x_1 - ratio	0.636	0.461
x_2 - concentration	0.003*	0.009*
x_3 - dose	0.001*	0.011*
x_1^2	0.303	0.095
x_2^2	0.001*	0.002*
x_3^2	0.001*	0.004*
x_1x_2	0.475	0.743
x_1x_3	0.580	0.880
x_2x_3	0.863	0.859
lack of fit	0.064	0.051

*significant

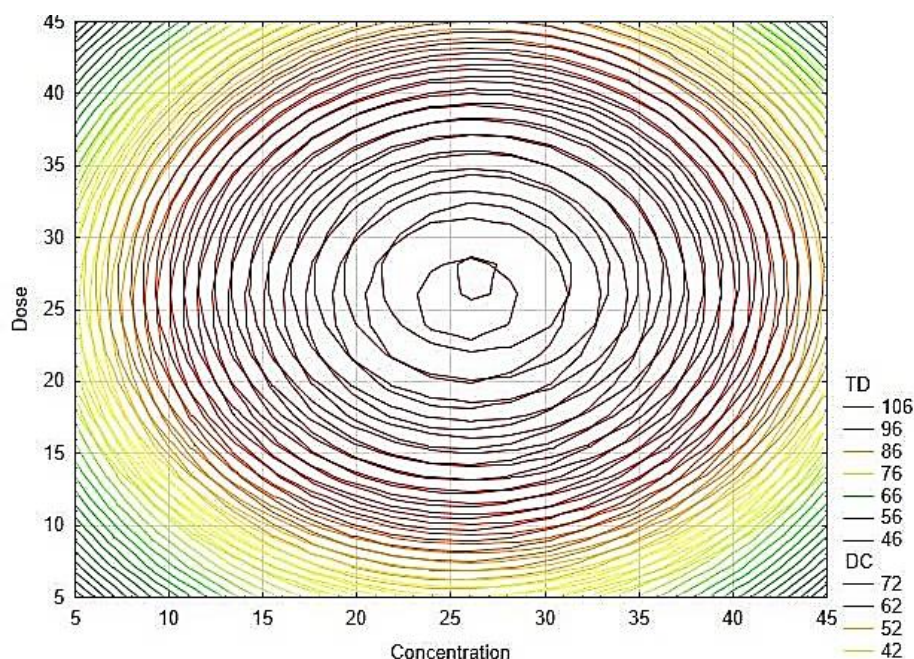
สมการที่ 4.1 ของ DC มีค่า coefficient of determination (R^2) เท่ากับ 0.912 ส่วนสมการที่ 4.2 ของ TD มีค่า R^2 เท่ากับ 0.843 ซึ่งหมายความว่าสมการทั้งสองสามารถทำนายค่า DC และ TD ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของสมการจากค่า lack of fit ควบคู่ไปด้วย ทั้งนี้ค่าที่เหมาะสมจะต้องมากกว่า 0.05 จากตารางที่ 4.2 พบว่าสมการ DC มีค่า lack of fit = 0.064 และสมการ TD มีค่า lack of fit = 0.051 อีกทั้งค่า p-value ของ model ทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการทั้งสองมีความเหมาะสมในการอธิบายสถานะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลจากการฉายรังสี ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยทั้งสามปัจจัยที่นำมาศึกษาไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่า DC และ TD เท่ากันหมดทุกปัจจัย เนื่องจากมีบางปัจจัยที่มี ค่า p-value มากกว่า 0.05 จึงต้องพิจารณาปัจจัยหลักแต่ละชนิดที่มีอิทธิพลต่อค่า DC และ TD ร่วมด้วย พบว่าความเข้มข้นของสารผสม (concentration, x_2) และปริมาณรังสีดูดกลืน (dose, x_3) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง-เจลาติน (TAP:GEL ratio, x_1) ถือเป็นปัจจัยที่ไม่ส่งผล ต่อค่า DC และ TD อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จึงกำหนด x_1 ให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่า DC และ

TD มีแนวโน้มสูงที่สุด และเมื่อพิจารณา interaction ได้แก่ค่า p-value ที่มีนัยสำคัญได้แก่ x_2^2 และ x_3^2 ซึ่งเป็นตัวแปรอันหมายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบกำลังสองเช่นกัน และไม่พบว่า interaction ระหว่างตัวแปรทั้งสามตัวแปรมีความสัมพันธ์แบบมีนัยสำคัญต่อกัน

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อวิเคราะห์ผลของแต่ละตัวแปรต่อการเกิดนาโนเจลของแป้งมันสำปะหลัง และเจลาติน ด้วยการฉายรังสี จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งแสดงถึงกราฟพื้นผิวตอบสนอง (surface plot) และกราฟโครงร่าง (contour plot) จากสมการ 4.1 และ 4.2 ของ degree of crosslink (DC) และ degradation temperature (TD) ตามลำดับ จะเห็นผลของปัจจัยที่ทำให้ค่า DC และ TD ของนาโนเจลมีค่าสูงที่สุด และสามารถระบุจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อ DC และ TD ที่ผ่านการฉายรังสีในสภาวะต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารผสมและปริมาณรังสีดูดกลืน ส่งผลต่อ DC และ TD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยได้จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างในรูปที่ 4.1 (a) และ (b) ที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน (Ratio) คงที่ที่ 1:1 จะเห็นได้ว่าผลของความเข้มข้นของสารผสม โดยความเข้มข้นของสารผสมที่ 25.00 mg/mL ทำให้นาโนเจลที่ได้จากการฉายรังสีนี้มีค่า DC และ TD สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาการฉายรังสีในแป้งมันสำปะหลัง (Ben Bettaïeb และคณะ, 2014) และในสารประกอบเจลาตินและฟิล์มพอลิคาโพรล็กโทน (Zaman และ Beg, 2015) พบว่ามีการเกิดการแตกตัวของโครงสร้างภายในโมเลกุลของแป้ง เจลาติน และน้ำภายในโมเลกุลจากการฉายรังสี หรือ radiolysis ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลและอนุมูลของไฮโดรเจน โดยเฉพาะภายใน double-helix ของเจลาติน เกิดเป็นพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลภายในสารผสม อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของเจลาตินในสารผสมทำให้มีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมขวาง และทนต่อความร้อนและแรงดึงมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ผลของปริมาณรังสีดูดกลืนร่วมด้วย พบว่าปริมาณรังสีดูดกลืน หรือลำอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ DC เพิ่มขึ้นจนถึงช่วง 25 kGy และลดลงหลังเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน และทำให้ TD เพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับด้วย โดย Bee และคณะ (2018) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของลำอิเล็กตรอนในการฉายบนแป้งข้าวโพดในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เร่งให้เกิดโครงสร้างสามมิติภายในโมเลกุล เป็นการเสริมความแข็งแรงเชิงกลและเพิ่มความทนต่อความร้อน แต่เมื่อความเข้มข้นของลำอิเล็กตรอนสูงมากขึ้นกลับทำให้เกิดการแตกสลาย (degradation) ของพันธะและโครงสร้างภายในโมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลและความคงทนต่อความร้อนลดลง



รูปที่ 4.1 surface plot และ contour plot เมื่อเทียบในแต่ละปัจจัยของความเข้มข้นของสารผสม (concentration, mg/mL) และปริมาณรังสีดูดกลืน (dose, kGy) โดย (a) จากสมการ degree of crosslink (DC) และ (b) จากสมการ degradation temperature (TD)



รูปที่ 4.2 superimpose contour plot จากสมการ degree of crosslink (DC) และ degradation temperature (TD) เมื่อเทียบในแต่ละปัจจัยของความเข้มข้นของสารผสม (concentration, mg/mL) และปริมาณรังสีดูดกลืน (dose, kGy)

เมื่อได้กราฟโครงร่างของสมการ degree of crosslink (DC) และสมการ degradation temperature (TD) ในรูปที่ 4.1 (a) และ (b) ตามลำดับแล้ว นำกราฟโครงร่างของทั้งสองสมการมาซ้อนกัน (superimpose) จะได้จุดสูงสุดของค่า DC และ TD โดยจุดสูงสุดอยู่ในช่วงความเข้มข้นของสารผสม (mixture concentration) ที่ 23-28 mg/mL และปริมาณรังสีดูดกลืนที่ 23-28 kGy ซึ่งถือเป็นช่วงของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินจากการฉายรังสี

การหาสภาวะที่เหมาะสมสามารถหาได้จากวิธี partial derivatives เช่นกันโดยจากสมการที่ 4.1 สามารถทำนายสภาวะในการเกิดนาโนเจลที่ทำให้ค่า DC ของนาโนเจลมากที่สุด โดยใช้วิธี partial derivatives differentiate ค่า Y ในสมการที่ 4.1 โดยแทนค่า x_1 เป็นค่าคงที่ที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อเจลาตินที่ 1:1 หรือร้อยละของแป้งมันสำปะหลังในสารผสมที่ 50 ($x_1 = 50$) และเปรียบเทียบ x_2 และ x_3 ตามลำดับ แสดงผลการ differentiate ได้ดังนี้

$$dy/dx_2 = 4.6025 - 0.178x_2 + 0.0027x_3 \quad (4.3)$$

$$dy/dx_3 = 4.714 + 0.0027x_2 - 0.1768x_3 \quad (4.4)$$

จากนั้นกำหนดให้ dy/dx_2 dy/dx_3 มีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วจึงแก้สมการได้ว่า สภาวะที่ทำให้ DC มากที่สุด คือความเข้มข้นของสารผสม 26.27 mg/mL และผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 27.06 kGy ซึ่งอยู่ในช่วงของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินจากการฉายรังสีจาก superimpose contour plot โดยนาโนเจลจะมีปริมาณ DC เท่ากับ 87.99%

ในทางเดียวกันกับสมการที่ 4.2 สามารถทำนายสภาวะในการเกิดนาโนเจลที่ทำให้ค่า TD ของนาโนเจลสูงที่สุด โดยใช้วิธี partial derivatives differentiate ค่า Y ในสมการที่ 4.2 โดยแทนค่า x_1 เป็นค่าคงที่ที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อเจลาตินที่ 1:1 หรือ 50:50 ($x_1 = 50$) และเทียบกับ x_2 และ x_3 ตามลำดับ แสดงผลการ differentiate ได้ดังนี้

$$dy/dx_2 = 5.365 - 0.2128x_2 + 0.0041x_3 \quad (4.5)$$

$$dy/dx_3 = 4.805 + 0.0041x_2 - 0.1922x_3 \quad (4.6)$$

จากนั้นกำหนดให้ dy/dx_2 dy/dx_3 มีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วจึงแก้สมการได้ว่า สภาวะที่ทำให้ TD ที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือความเข้มข้นของสารผสม 25.70 mg/mL และผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 25.54 kGy ซึ่งอยู่ในช่วงของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินจากการฉายรังสีจาก superimpose contour plot เช่นกัน โดยนาโนเจลจะมี TD เท่ากับ 121.06 °C

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมกัน รวมถึงการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น superimpose contour plot และค่าจากการ Partial differentiate สามารถนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า DC และ TD สูงที่สุด ประมาณค่าเพื่อความเหมาะสมในการทำได้จริง ได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดนาโนเจลโดยการฉายรังสีคือ อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่ 1:1 ความเข้มข้นของสารผสมที่ 25.00 mg/mL และฉายด้วยปริมาณรังสีดูดกลืนที่ 25.00 kGy

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (validation) สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า DC และค่า TD ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทำนายด้วยสมการที่ 4.1 และ 4.2 โดยใช้สภาวะของการเกิดนาโนเจลจากการฉายรังสีตามที่ทดลองได้จริงคือ สารผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่ 1:1 ความเข้มข้นของสารผสมที่ 25.00 mg/mL และฉายด้วยความเข้มรังสีที่ 25.00 kGy ได้ค่าเฉลี่ยของ DC และ TD เท่ากับ 87.17% และ 120.6 °C และเมื่อเทียบจากการแทนค่าในสมการซึ่งได้ค่าเท่ากับ 87.48% และ 121.0 °C ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแบบของร้อยละความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการแทนค่าในสมการพบว่าค่า

DC และ TD มีความแตกต่างเท่ากับ 0.34 และ 0.33 ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดลองจริงไม่ควรเกิน 10% แสดงว่าสมการมีความถูกต้องเหมาะสมและสามารถอธิบายผลของตัวแปรทั้งสามตัวแปรได้อย่างดี (Sánchez และคณะ, 2016)

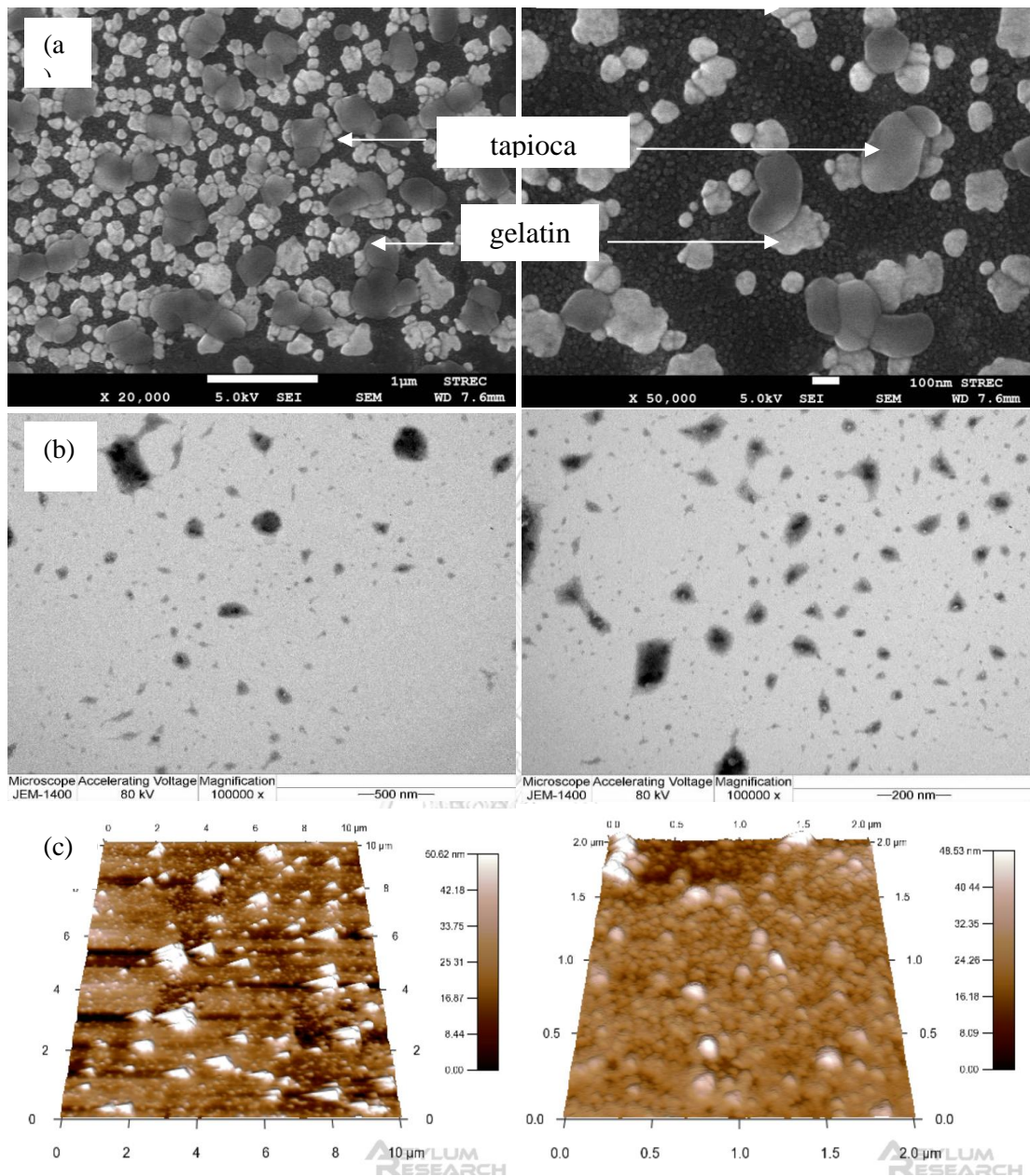
4.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจล

นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่เกิดจากการฉายรังสี เกิดจากการสร้างพันธะเชื่อมขวางทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของแป้งและเจลาติน โดยเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้งและเจลาติน และเชื่อมต่อจนกลายเป็นโครงสร้างของเจลที่มีขนาดระดับนาโนเมตร นอกจากนี้การฉายรังสีจะทำให้โมเลกุลของแป้งและเจลาตินมีขนาดเล็กลง ดังรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) ดังรูปที่ 4.3 (a) – (c) ตามลำดับ

สมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินโดยการฉายรังสี จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยลักษณะของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังการฉายรังสี ในรูป (a) ที่จะเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นเม็ดกลมรูปหมวก (Szymońska และคณะ, 2009) และเจลาตินจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Xia และคณะ, 2019) และจากภาพ SEM จะเห็นแป้งและเจลาตินเชื่อมติดกัน รวมไปถึงโมเลกุลระหว่างแป้ง และระหว่างเจลาติน ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ค่าการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking, DC) จากการศึกษาในข้อที่ 4.1 เป็นผลให้โมเลกุลมีการเชื่อมติดกัน ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับนาโนเจลจากโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ สังเกตได้จากโมเลกุลเป็นทรงกลมขนาดเล็กระดับนาโนเมตร และโมเลกุลมีการเชื่อมติดกันด้วยพันธะเชื่อมขวาง ภายใต้อภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Zhou และคณะ, 2016) และโมเลกุลนาโนเจลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านในรูปที่ 4.3 (a) แสดงให้เห็นถึงโมเลกุลของนาโนเจลเดี่ยว มีลักษณะกลมเช่นเดียวกัน และยังพบความโปร่งแสงภายในโมเลกุลของนาโนเจล แสดงให้เห็นความเป็นโพรงที่เกิดจาก intra-molecular crosslink ภายในโมเลกุล โดย Teng และคณะ (2018) ได้ศึกษาการจับตัวของนาโนเจลที่มีลักษณะเป็นโพรง (hollow nanogel) สังเกตได้จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และมีลักษณะโปร่งแสงภายในเช่นกันดังภาพ 4.3 (b) ทั้งนี้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านสามารถแสดงลักษณะของโมเลกุลนาโนเจลได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อส่องผ่านผิวหน้าของเจล โดย

สามารถคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของโมเลกุลนาโนเจล โดยวัดจากโมเลกุลในภาพจำนวน 50 โมเลกุล พบว่าขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของนาโนเจลอยู่ที่ 46 ± 0.3 นาโนเมตร สาเหตุที่ขนาดโมเลกุลของนาโนเจลที่สังเกตได้มีคาลดลง สันนิษฐานว่าเกิดจากการคลายตัวและแตกออกของสายโซ่โมเลกุล สอดคล้องกับการศึกษาในแปงชาวโพต โดย Xue และคณะ (2017) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลของแปงข้าวโพตที่ผ่านการฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน โดยที่โมเลกุลของแปงข้าวโพตที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะมีขนาดใหญ่กว่าและพบปริมาณของแกรนูลขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการคลายตัวและแตกตัวของโมเลกุลแปงหลังจากผ่านการฉายรังสี การแตกตัวนี้ทำให้เกิดโมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น โดยโมเลกุลของเจลาตินเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางเดียวกันกับโมเลกุลของแปงหลังผ่านการฉายรังสี ที่เกิดจากการคลายตัวของสายโซ่พอลิเปปไทด์ของโปรตีนในเจลาตินที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลและเกิดเป็นนาโนเจล

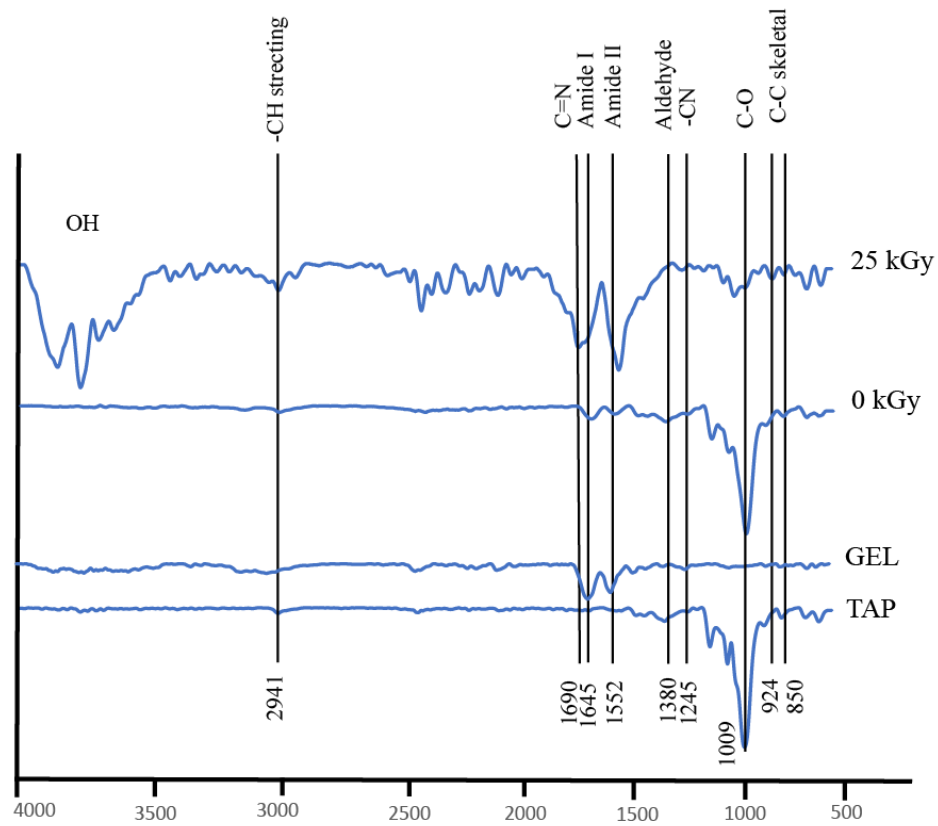
สมบัติทางสัณฐานวิทยาของนาโนเจลจากแปงมันสำปะหลังและเจลาตินโดยการฉายรังสีสามารถยืนยันได้ในภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมในรูปที่ 4.3 (c) ซึ่งสังเกตได้ว่าโมเลกุลของนาโนเจลมีลักษณะเป็นทรงกลม จัดเรียงติดกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่แต่ไม่เกินระดับนาโนเมตร



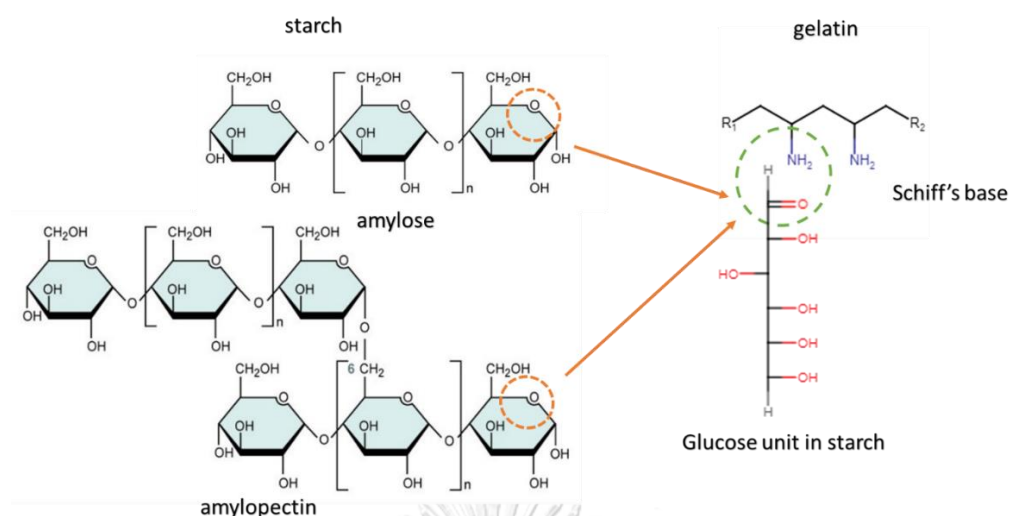
รูปที่ 4.3 ภาพนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) และเจลาติน (gelatin) จากการฉายรังสีจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 20,000x และ 50,000x (a), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ที่กำลังขยาย 100,000x (b) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) ที่พื้นที่ผิวในการส่อง 10 μm และ 2.0 μm (c)

4.3 โครงสร้างทางเคมีของนาโนเจล

โครงสร้างนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี เกิดพันธะเชื่อมขวางทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของแป้งและเจลาติน โดยเกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้งและเจลาติน และเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงสร้างของเจล โดยยังคงหมู่ carbonyl ของแป้งมันสำปะหลัง และหมู่ amide ของเจลาตินในนาโนเจล รวมทั้งเกิดหมู่ hydroxyl เมื่อผ่านการฉายรังสี เนื่องจากปฏิกิริยา radiolysis ของน้ำที่เป็นสารตั้งต้นในการทำให้เกิดพันธะต่างๆ ภายในโมเลกุลนาโนเจล จากรูปที่ 4.4 พบว่าหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลัง (TAP) ได้แก่ C=O ที่ความยาวคลื่น 1009 cm^{-1} และ C-H stretching ที่ ความยาวคลื่น 2941 cm^{-1} ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันของเจลาตินประกอบด้วยพีคของ amide I, II และ -CN ที่ 1645 , 1552 และ 1245 cm^{-1} ตามลำดับ โดยพีคของหมู่ฟังก์ชันที่พบในนาโนเจลจากการฉายรังสีนั้นประกอบด้วยพีคที่ 3309 cm^{-1} (C=O stretching ในแป้งมันสำปะหลัง) และ amide I, II, และ -CN ที่ 1645 , 1552 , และ 1245 cm^{-1} ของเจลาตินตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น มีการพบ -OH stretching broad band ในบริเวณ 3606 cm^{-1} ในนาโนเจลที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งเป็นการเกิดจากปฏิกิริยา radiolysis ของน้ำภายในโมเลกุล มีการศึกษาของนาโนเจลจากแป้งสาคุมผสมกับเจลาติน โดยพบพีค Amide II และ ether group ที่ 997 cm^{-1} ซึ่งอาจไปในทางเดียวกับการเกิดฟิล์มของแป้งและไคโตซานจากการฉายรังสีที่พบว่ามี ether group ที่บริเวณ 993 cm^{-1} และเกิด O-H อีกด้วย จากแผนภาพ FTIR นี้ยังสามารถบอกการเกิดการเชื่อมขวาง (crosslinking) ภายในโมเลกุลของนาโนเจล จาก aldehyde peak ที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้งที่ผ่านการฉายรังสี (Mohd Zain และคณะ, 2019) และ peak ที่ 1645 , 1552 , และ 1960 cm^{-1} ของ amide I, II, และ -CN ของนาโนเจลที่เกิดปฏิกิริยาสร้างพันธะโควาเลนต์เป็น Schiff's base ซึ่งเป็นการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลนาโนเจล (Sarika และคณะ, 2015) ตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.5 และสามารถสรุปได้ว่านาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีนั้นทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล



รูปที่ 4. 4 แผนภาพ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง (TAP) เจลาติน (GEL) และนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินก่อน (0 kGy) และหลังฉายรังสีในสภาวะที่เหมาะสม (25 kGy)



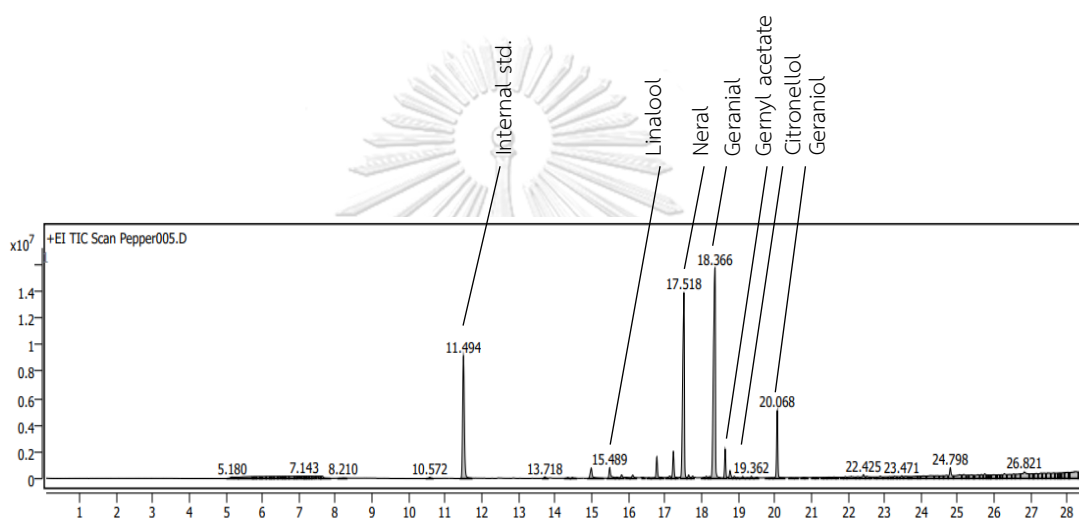
รูปที่ 4.5 แบบจำลองกลไกการเกิด Schiff's base นาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังฉายรังสีที่ 25 kGy

4.4 การกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะที่เหมาะสม

การศึกษาการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน โดยนำนาโนเจลที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่ 1:1 สารผสมความเข้มข้น 25 mg/mL และผ่านการฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอนที่ 25 kGy ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้นาโนเจลมีสมบัติที่ดีนั้น มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร โดยจากสมบัติของนาโนเจลที่สามารถกักเก็บสารไว้ภายในโมเลกุลได้ จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหย โดยใช้ น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในการศึกษาการกักเก็บภายในนาโนเจล ได้ผลดังแสดงต่อไปนี้

4.4.1 องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ด้วยเทคนิค gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) โดยเปรียบเทียบผลของ mass spectrum และค่า retention index (RI) กับแหล่งข้อมูลอ้างอิง คำนวณปริมาณสารระเหยโดยเทียบกับ internal standard (2,4,6-trimethylpyridine) chromatogram ของสารระเหยที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.6 และชนิดและปริมาณสารระเหยที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 chromatogram ของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (lemongrass essential oil, LEO)

จากตาราง 4.3 ซึ่งแสดงสารระเหยที่พบในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้พบว่าสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ 15 ชนิด ได้แก่ beta-pinene, beta-myrcene, trans-beta-ocimene, beta-ocimene, citronellal, linalool, isonerol (beta-citral), beta-bergamotene, caryophyllene, neral (beta-citral), geranial (alpha-citral), geranyl acetate, citronellol, geraniol และ caryophyllene oxide จากองค์ประกอบและปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ทั้ง 15 ชนิดที่กล่าวข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นสัมพัทธ์ (relative concentration) ของสารระเหยที่พบทั้งหมดแล้วจะเห็นได้ว่าสารระเหยที่พบในปริมาณมากที่สุดคือ geranial (alpha-citral) โดยพบที่ความเข้มข้น 150,008 ppm คิดเป็น 41.62% ของปริมาณสารระเหยที่พบทั้งหมดตามด้วย neral (beta-citral) โดยพบที่ความเข้มข้น 124,252 ppm (34.47%) นอกจากนั้น

ยังพบ geraniol ที่ความเข้มข้น 28,820 ppm (8.00%), geranyl acetate 14,132 ppm (3.92%) linalool 9,256 ppm (2.57%) citronellol 7,026 ppm (2.12%) และ สารระเหยอื่น ๆ โดยจะเห็นว่าสารในกลุ่ม citral ที่ประกอบด้วย geraniol (alpha-citral) และ neral (beta-citral) นั้นเป็นสารระเหยให้กลิ่นสำคัญที่พบมากที่สุดในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ และเป็นสารที่พบมากในพืชตระกูลส้ม (citrus) โดยมีลักษณะกลิ่นคล้ายส้ม (citrus-like odor) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ali และคณะ (2008) นอกจากนี้ Chanthai และคณะ (2012) ยังรายงานในแนวโน้มเดียวกันว่าพบสารในกลุ่ม citral มากที่สุดในตะไคร้ และน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารระเหยให้กลิ่นที่พบในตัวอย่างไม่ได้บ่งบอกถึงความสำคัญว่าสารระเหยนั้นจะแสดงลักษณะของกลิ่นนั้นมากหรือน้อยเนื่องจากสารระเหยแต่ละชนิดจะมีค่า threshold value จำเพาะซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สารสามารถแสดงลักษณะของกลิ่นได้ จึงต้องพิจารณา threshold value ดังกล่าวกับความเข้มข้นของสารระเหยที่พบในตัวอย่าง คำนวณเป็นค่า odor activity value (OAV) ของสารระเหยที่แสดงถึงความสามารถในการแสดงลักษณะของกลิ่น ในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ได้ดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่าค่า OAV ของ geraniol (4,687,750), neral (4,141,733), geraniol (501,217), geranyl acetate (1,570,222), linalool (1,542,667) และ citronellol (175,650) มีค่าสูง ทำให้ทราบว่าสารระเหยให้กลิ่นเหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่แสดงลักษณะกลิ่นที่สำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Satthanakul และคณะ (2015) ที่พบสารระเหยให้กลิ่นสำคัญในน้ำมันตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) ได้แก่ geraniol, neral, geraniol, geranyl acetate, linalool และ citronellol เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 สารระเหยที่พบในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (lemongrass essential oil, LEO)

compounds	RI _{exp}	RI _{ref}	relative conc. (ppm)	area %	threshold value in water (ppm)	odor activity value (OAV)	Identification method
beta-pinene	NI	1118 ¹	1,624	0.45	0.15 ³	11,600	MS
beta-myrcene	NI	1158 ¹	1,728	0.48	0.014 ⁴	123,429	MS
trans-beta-ocimene	1227	1234 ²	1,477	1.07	-	-	MS, RI
beta- ocimene	1247	1250 ²	5,517	1.53	0.034 ³	16,226	MS, RI
citronellal	1486	1492 ¹	2,543	0.71	0.025 ⁵	101,720	MS, RI
linalool	1543	1544 ¹	9,256	2.57	0.006 ⁴	1,542,667	MS, RI
isoneral	1578	-	2,580	0.72	-	-	MS
beta-bergamotene	1599	-	51,012	1.40	-	-	MS
caryophyllene	1602	1598 ²	2,460	0.68	0.15 ³	38,438	MS, RI
neral (beta-citral)	1672	1678 ²	124,252	34.47	0.03 ⁴	4,141,733	MS, RI
geranial (alpha-citral)	1720	1725 ²	150,008	41.62	0.032 ⁴	4,687,750	MS, RI
geranyl acetate	1753	1751 ²	14,132	3.92	0.009 ⁶	1,570,222	MS, RI
citronellol	1770	1763 ²	7,026	2.12	0.04 ⁴	175,650	MS, RI
geraniol	1859	1852 ¹	28,820	8.00	0.0575 ⁴	501,217	MS, RI
caryophyllene oxide	1987	1986 ²	964	0.27	0.41 ³	2,351	MS, RI

¹Goodner (2008), ²Babushok และคณะ (2011), ³Tamura และคณะ (2001), ⁴Rychlik และคณะ (1998),

⁵Yamamoto และคณะ (2004), ⁶Buttery และคณะ (1988)

MS - identification based on comparison of the mass spectrum (MS)

NI - Not identified

RI_{exp} - Retention index (RI) จากการคำนวณกับสารละลายมาตรฐาน alkanes (C₁₀-C₂₀)

RI_{ref} - Retention index (RI) จากเอกสารอ้างอิง

RI - identification จากการเปรียบเทียบ retention index (RI) ของ RI_{exp} และ RI_{ref}

4.4.2 ผลของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะที่เหมาะสม ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ (Loading efficiency - LE) ผลได้ของการกักเก็บ (yield) และความสามารถในการละลาย (solubility)

ในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจลนั้น อัตราส่วนของน้ำมันหอมระเหยและนาโนเจลมีผลต่อสมบัติของการกักเก็บ และคุณภาพของสารที่กักเก็บ (Rezaei และคณะ, 2019) จึงศึกษาผลของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน โดยแปรอัตราส่วนระหว่างนาโนเจลต่อน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ 1:1 1:2 และ 2:1 ต่อสมบัติของการกักเก็บ ได้แก่ ประสิทธิภาพของการกักเก็บ (loading efficiency, LE) ผลได้ของการกักเก็บ (yield) ความสามารถในการละลาย (solubility) เมื่อเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

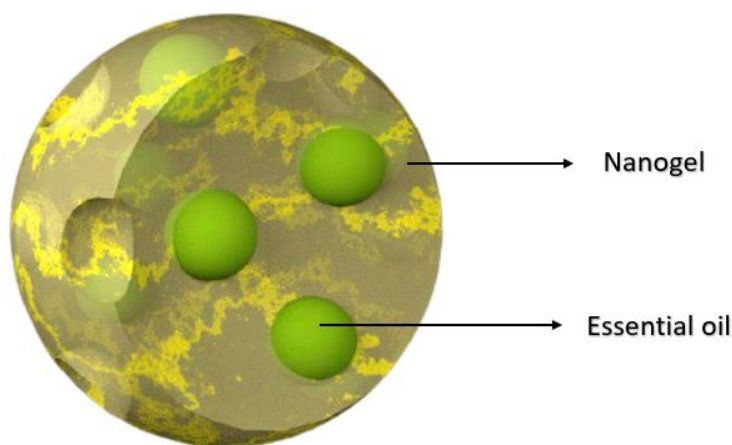
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของการกักเก็บ (Loading efficiency - LE) ผลได้ของการกักเก็บ (yield) ความสามารถในการละลาย (solubility) ของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะที่เหมาะสม

Ratio (Nanogel: LEO)	1:1	1:2	2:1
LE (%)	95.59 ^b ±0.30	93.81 ^c ±0.16	96.32 ^a ±0.20
Yield (%)	89.64 ^b ±7.75	40.31 ^c ±5.50	93.04 ^a ±7.45
Solubility (%)	80.75 ^b ±0.56	55.06 ^c ±1.28	84.50 ^a ±1.32

a,b... ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแนวนอน ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนของนาโนเจลต่อน้ำมันหอมระเหยตะไคร้เป็น 2:1 มีประสิทธิภาพของการกักเก็บ ผลได้ของการกักเก็บ และความสามารถในการละลายสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องด้วยสัดส่วนปริมาณของนาโนเจลที่มากกว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ เมื่อมวลของนาโนเจลที่เป็นสารกักเก็บ (core shell encapsulation) ทำให้สามารถกักเก็บน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rezaei และคณะ, 2019) รูปแบบของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลสามารถแสดงในแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยน้ำมันหอมระเหยจะแทรกตัวอยู่ในบริเวณโพรง หรือติด

อยู่ที่พื้นผิวของนาโนเจล จากขั้นตอนของการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในนาโนเจลที่ต้องใช้คลื่น ultrasonic เพื่อลดขนาดของน้ำมันหอมระเหยให้สามารถแทรกเข้าสู่โพรงของนาโนเจลได้ ทั้งนี้การเพิ่มสัดส่วนของนาโนเจลจึงสามารถเพิ่มทั้งปริมาณ และจำนวนพื้นที่ผิวของนาโนเจลให้สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้ดีขึ้น สัดส่วนปริมาณของนาโนเจลที่มากกว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ยังทำให้ผลได้ของการกักเก็บสูง เนื่องจากมีมวลของนาโนเจลที่เป็นสารกักเก็บมากขึ้น ที่ทำให้มีผลได้ของการกักเก็บมากหลังจากผ่านการทำแห้งด้วยแบบเยือกแข็ง (Zharveh และคณะ, 2015) และจากประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ของนาโนเจลที่สูง ทำให้เพิ่มความสามารถในการละลายของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจล โดยนาโนเจลจะช่วยเพิ่มความมีขั้วของน้ำมันหอมระเหยทำให้สามารถละลายได้ดียิ่งขึ้น (Sultana และคณะ, 2013)



รูปที่ 4.7 แผนภาพจำลองการจับตัวของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้และนาโนเจล

4.4.3 ปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่แปรอัตราส่วนนาโนเจลต่อน้ำมันหอมระเหยเป็น 1:1 1:2 และ 2:1 ด้วยเทคนิค GC-MS โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นสัมพัทธ์ (relative concentration) ของสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ระเหยออกมาได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสารระเหยให้สำคัญในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสม

compounds	relative concentration (ppm) of encapsulated (nanogel: LEO)		
	1:1	1:2	2:1
linalool	50.87 ^a	9.46 ^b	45.91 ^a
neral (beta-citral)	531.63 ^a	150.40 ^b	562.95 ^a
geranial (alpha-citral)	690.03 ^a	189.96 ^b	735.44 ^a
geranyl acetate	50.86 ^a	9.36 ^b	43.93 ^a
citronellol	18.53 ^a	1.61 ^b	10.96 ^a
geraniol	67.17 ^a	15.75 ^b	45.97 ^a

a,b... ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแนวนอน ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาจาก relative concentration ของสารระเหยสำคัญในแต่ละอัตราส่วนของนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหย พบว่าสารระเหยทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ geranial (alpha-citral), neral (beta-citral), geraniol, geranyl acetate, linalool และ citronellol ที่พบในตัวอย่างอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่ามากกว่าอัตราส่วน 1:2 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากวิธีวิเคราะห์ด้วยการสกัดน้ำมันหอมระเหยตะไคร้จากการกักเก็บในนาโนเจลด้วยตัวทำละลาย hexane แล้ววิเคราะห์ปริมาณสารระเหยสำคัญด้วย GC-MS นั้นหมายถึงปริมาณสารระเหยสำคัญ (relative concentration) ที่พบ คือปริมาณน้ำมันหอมระเหยตะไคร้หรือสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่สามารถกักเก็บไว้ได้ในนาโนเจล ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการกักเก็บ และเมื่อ relative concentration ของสารระเหยสำคัญใน

น้ำมันหอมระเหยสูง แสดงว่าประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ได้นั้นสูง จึงหมายถึงการกักเก็บด้วยอัตราส่วนของนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ 1:1 และ 2:1 มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูงกว่า 1:2 อย่างมีนัยสำคัญ หากแต่จากการเตรียมน้ำมันหอมระเหยตะไคร้และนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสมในการกักเก็บได้แปรปัจจัยอัตราส่วนของนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ โดยคำนวณจากปริมาณของนาโนเจลต่อน้ำมันหอมระเหยในสารละลายในรูปแบบของของแข็งในสารละลาย ทำให้ในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณของแข็งในการกักเก็บและการวิเคราะห์แตกต่างกัน จึงคำนวณ relative concentration ต่อปริมาณของแข็งในสารละลายของแต่ละตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพการกักเก็บตามตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าปริมาณสารระเหยสำคัญทั้ง 6 ชนิดของการกักเก็บในอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่ามากกว่าอัตราส่วน 1:2 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน ประสิทธิภาพของการกักเก็บนี้สอดคล้องกับ Enciso และคณะ (2018) ที่กล่าวถึงประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย hexane มาวิเคราะห์ด้วยวิธี GC-MS เปรียบเทียบ relative concentration ของสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง ได้ relative concentration ของสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยสูง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ได้นั้นสูงเช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการกักเก็บเมื่อใช้นาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยที่อัตราส่วน 1:1 และ 2:1 นั้นมีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่สมบัติทางกายภาพ ประสิทธิภาพในการกักเก็บ รวมถึงผลได้ในการกักเก็บจากกระบวนการแช่เยือกแข็ง ดังค่า loading efficiency (LE), yield และ solubility ของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (lemongrass essential oil; LEO) และที่ผ่านการกักเก็บ ในนาโนเจล จะพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างนาโนเจล:น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ 2:1 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการกักเก็บจาก relative concentration ของสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ที่พบว่าในอัตราส่วน 1:2 และ 2:1 สามารถเก็บน้ำมันและสารระเหยสำคัญได้มากที่สุด จึงเลือกอัตราส่วนในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลที่ 2:1 ที่มีทั้งสมบัติและประสิทธิภาพการกักเก็บดังกล่าวสูงนั้นไปทำการศึกษาต่อไป

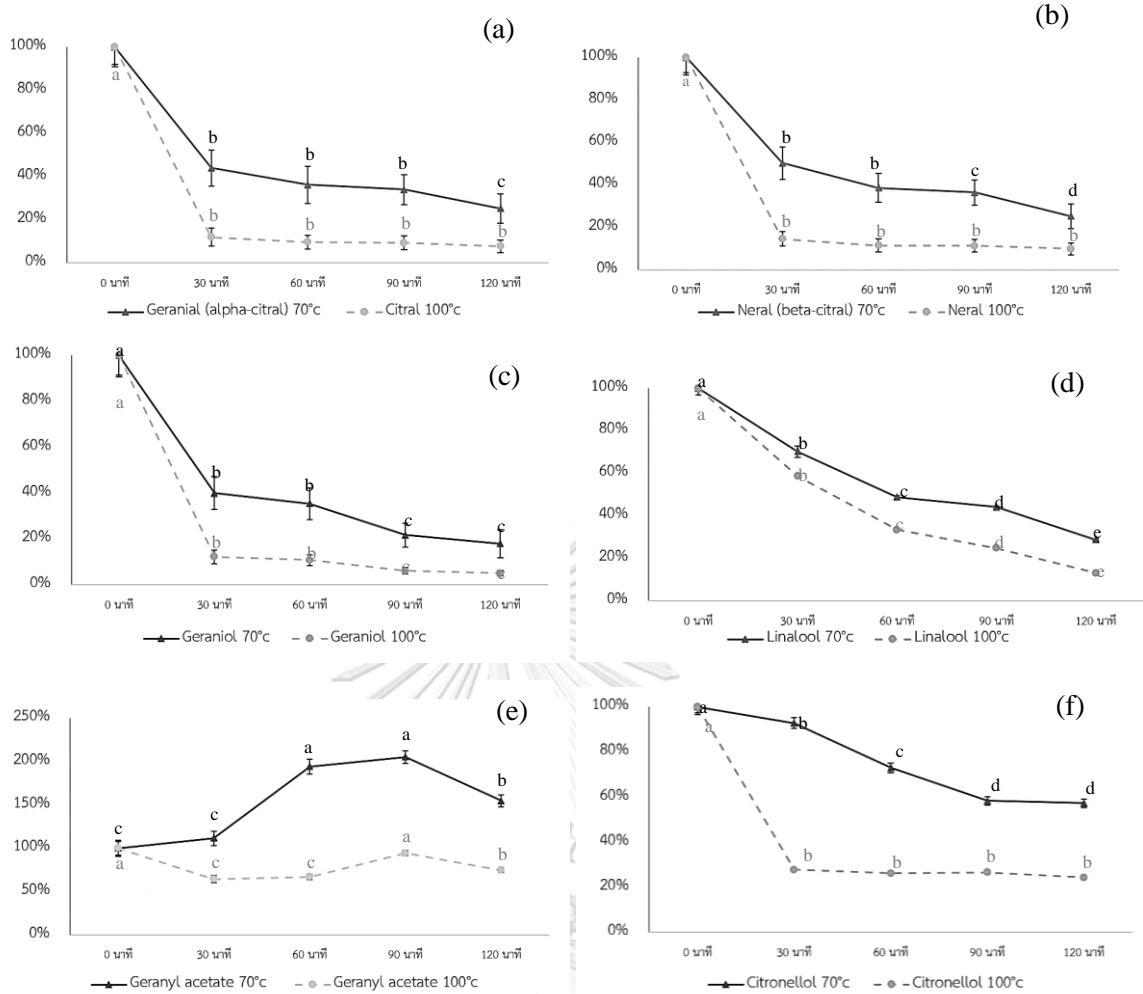
ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารระเหยสำคัญในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีที่สภาวะเหมาะสมต่อปริมาณของแข็งในสารละลาย

compounds	relative concentration per mg of total solid of encapsulated (nanogel: LEO)		
	1:1	1:2	2:1
linalool	30.83 ^a	3.94 ^b	21.86 ^a
neral (beta-citral)	322.20 ^a	62.67 ^c	268.07 ^b
geranial (alpha-citral)	418.20 ^a	79.15 ^c	350.21 ^b
geranyl acetate	30.83 ^a	3.90 ^b	20.92 ^a
citronellol	11.23 ^a	0.67 ^b	5.22 ^a
geraniol	40.71 ^a	6.56 ^b	21.89 ^a

a,b... ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแนวนอน ($p \leq 0.05$)

4.4.4 สมบัติการทนต่อความร้อนของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน

ตามธรรมชาติของน้ำมันหอมระเหยเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเสียดังกล่าว และคุณภาพของน้ำมันหอมระเหย และจากสมบัติของนาโนเจลที่สามารถกักเก็บสารไว้ภายในโครงสร้างได้ ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ และเมื่อศึกษาความคงตัวของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่อัตราส่วนของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ต่อนาโนเจลเป็น 2:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูง มีสมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสม และสามารถป้องกันการปลดปล่อยของสารระเหยสำคัญได้มากที่สุด โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ geranial, neral, geraniol, geranyl acetate, linalool, และ citronellol โดยเลือกอุณหภูมิเริ่มต้นของการระเหยของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ประมาณ 70 °C (Martins และคณะ, 2011) เพื่อพิจารณาการระเหยของน้ำมันหอมระเหยในความร้อน และศึกษาที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอาหารทั่วไป เพื่อเห็นถึงนาโนเจลที่สามารถเพิ่มความคงตัวของความร้อน ลดการสูญเสียปริมาณสารระเหยเมื่อได้รับความร้อนได้

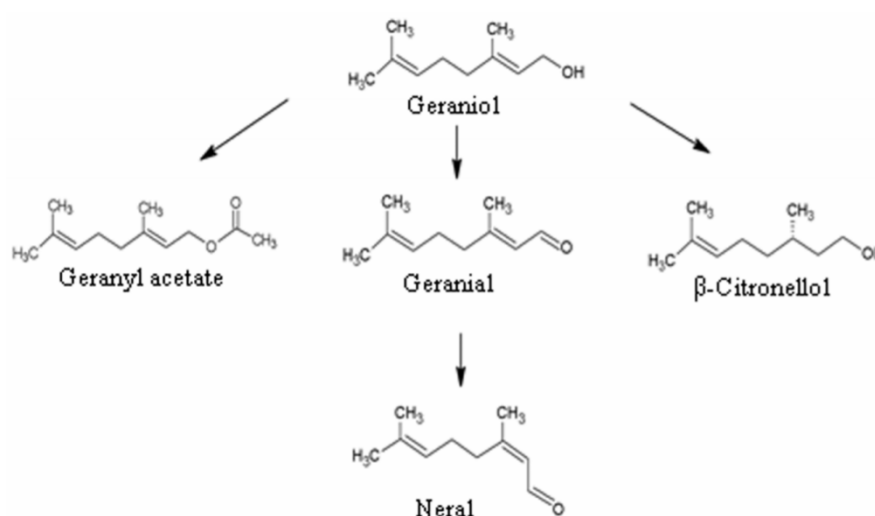


รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ geranial (a), neral (b), geraniol (c), linalool (d), geranyl acetate (e) และ citronellol (f) ต่อความร้อนที่ให้ภายใต้การกักเก็บภายในนาโนเจลโดย ^{a,b...} คือค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละอุณหภูมิ ($p < 0.05$)

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ เมื่อให้ความร้อน นาโนเจลที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C เป็นระยะเวลา 30, 60, 90, และ 120 นาที พบว่าปริมาณสารระเหยส่วนใหญ่ลดลง โดยความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดการออกซิเดชันและการระเหย แต่เมื่อนำนาโนเจลมากักเก็บน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลายพบว่าโมเลกุลของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยจะเข้าไปยึดจับที่บริเวณโพรงภายในของนาโนเจล ทำให้โมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ยากขึ้นและจะทำให้มีความคงตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อ

ผ่านความร้อนที่ 70 °C เกิดการลดลงของ geranial, neral, geraniol, linalool, และ citronellol ตั้งแต่ 30 นาทีแรก ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวทางความร้อนของสารระเหย หากแต่ geranyl acetate ที่มีค่าเพิ่มขึ้นที่ 30-90 นาทีแรก และลดลงในเวลาต่อมา โดยจะเห็นการลดลงของ geranial, neral, geraniol มากที่สุดลดลงร้อยละ 56.01, 40.77 และ 60.06 ตามลำดับเมื่อผ่านความร้อนที่ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที ในขณะที่ linalool, และ citronellol ลดลงเพียงร้อยละ 41.43 และ 7.16 โดยสามารถแสดงให้เห็นถึงความคงตัวของสารประกอบ จากการพิจารณาสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ geranial, neral, geraniol, geranyl acetate, linalool และ citronellol ความเป็นไปได้ที่สารระเหยจะเกิดการปลดปล่อยกลิ่นเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของสารระเหยเหล่านี้เกิดอันตรกิริยากับนาโนเจลอย่างไม่ได้แข็งแรงมากนัก โดยเฉพาะในสภาวะที่นาโนเจลได้รับความร้อนก็จะทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกมามากขึ้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 70 °C ในระยะเวลา 30 นาทีแรก สารระเหยในนาโนเจลมีปริมาณลดลงเล็กน้อย และค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 120 แสดงถึงการสูญเสียปริมาณสารระเหยเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่านาโนเจลเกิดการสูญเสียปริมาณสารระเหยตั้งแต่ 30 นาทีแรก และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 120 นำไปสู่การสูญเสียสารระเหยนี้เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งจากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยของ 2 อุณหภูมิพบว่าความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C จะทำให้สูญเสียสารระเหยสำคัญทั้ง 6 ชนิดของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลนาโนเจลมากกว่าที่อุณหภูมิ 70 °C และยังสามารถอธิบายได้จากการศึกษาความคงตัวของสารประกอบ monoterpene ที่พบว่าสารประกอบประเภทนี้สามารถถูกทำลายได้โดยอุณหภูมิ ออกซิเจน และสารเร่งปฏิกิริยา และสามารถก่อให้เกิดสารประกอบ derivatives หรือทำให้เกิดการลดลงของสารประกอบได้ (Bertolini และคณะ, 2001; Ghosh และคณะ, 2013) และพบว่า geraniol สามารถเกิด derivatives ขึ้นเมื่อเกิดการ oxidation ทำให้เกิดเป็น geranyl acetate, geranial และ citronellol ดังรูปที่ 4.9 ในขณะที่สารเหล่านี้ก็สามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อนเช่นกัน ทำให้เห็นการลดลงของ geraniol ที่มีร้อยละของสารระเหยที่ลดลงปริมาณสูงมาก ในขณะที่การลดลงของ citronellol และ geranial ต่ำกว่ามาก และทำให้ geranyl acetate ที่มีปริมาณเริ่มต้นอยู่น้อยแล้วนั้นมีโอกาสที่จะพบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นได้เมื่อได้รับความร้อน ส่วน linalool ที่จะสามารถเกิดการ oxidation ได้ดีและสามารถเกิด

การ dimerization ได้สูง linalool เป็นสารประกอบประเภท tertiary alcohol โดยโครงสร้างของนาโนเจลที่มีหมู่ hydroxyl มากจึงทำให้เกิดการ degradation จากปฏิกิริยา dehydration และการเกิด subsequent oxidation อาจทำให้เกิดโครงสร้างใหม่อย่าง linalool oxide ขึ้นและทำให้พบปริมาณ linalool เมื่อได้รับความร้อน (Ghosh และคณะ, 2013)



รูปที่ 4. 9 การเกิด derivative ของ Geraniol

ที่มา: Ghosh และคณะ (2013)

ดังนั้นจากการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ geranial (alpha-citral), neral (beta-citral), geraniol, geranyl acetate, linalool และ citronellol พบว่าการระเหยของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ถูกกักเก็บไว้ภายในนาโนเจล เมื่อพิจารณาจากปริมาณของสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่พบเมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าว สารระเหยสำคัญนั้นมีปริมาณที่ลดลงหลังจากผ่านความร้อน โดยเริ่มลดลงเมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ในระยะเวลา 30 นาที และค่อย ๆ มีปริมาณการลดลงมากขึ้นตามลำดับโดยยังคงเหลือปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยจนระยะเวลาผ่านไปเป็น 120 นาที ในขณะที่สารระเหยสำคัญนั้น มีปริมาณลดลงอย่างมากตั้งแต่ระยะเวลา 30 นาทีแรกเมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และปริมาณการลดลงไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และคงเหลือปริมาณสารระเหย

สำคัญไว้ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับจากการศึกษาของ Martins และคณะ (2011) ที่กล่าวถึง อุณหภูมิเริ่มต้นการระเหยของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่สามารถส่งผลถึงปริมาณสารระเหย สำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ลดลงได้มาก จึงเห็นว่าน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายใน นาโนเจล ได้รับการปกป้องจากร้อนได้ดี ทำให้มีความคงตัวมากกว่าน้ำมันหอมระเหย ตามธรรมชาติ แต่เมื่อเกิดการสะสมความร้อนเป็นระยะเวลาสั้น สารประกอบจึงค่อย ๆ ปลดปล่อยสารระเหยออกมาทำให้สูญเสียกลิ่นภายในสารประกอบซึ่งแสดงถึงความคงตัวที่ ลดลง ผลจากการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Almeida และคณะ (2018) ที่ ศึกษาความคงตัวต่อความร้อนของ citral ในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ และพบว่าเกิดการ ปลดปล่อยโมเลกุลของ citral ที่ถูกกักเก็บนั้นออกมาจากสารประกอบช้ากว่า free citral แสดงให้เห็นถึงความคงตัวต่อความร้อนของสารประกอบที่ถูกกักเก็บนั้นดีกว่าสารประกอบที่ ถูกระเหยตามธรรมชาติ

4.4.5 การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินระหว่างการเก็บรักษา

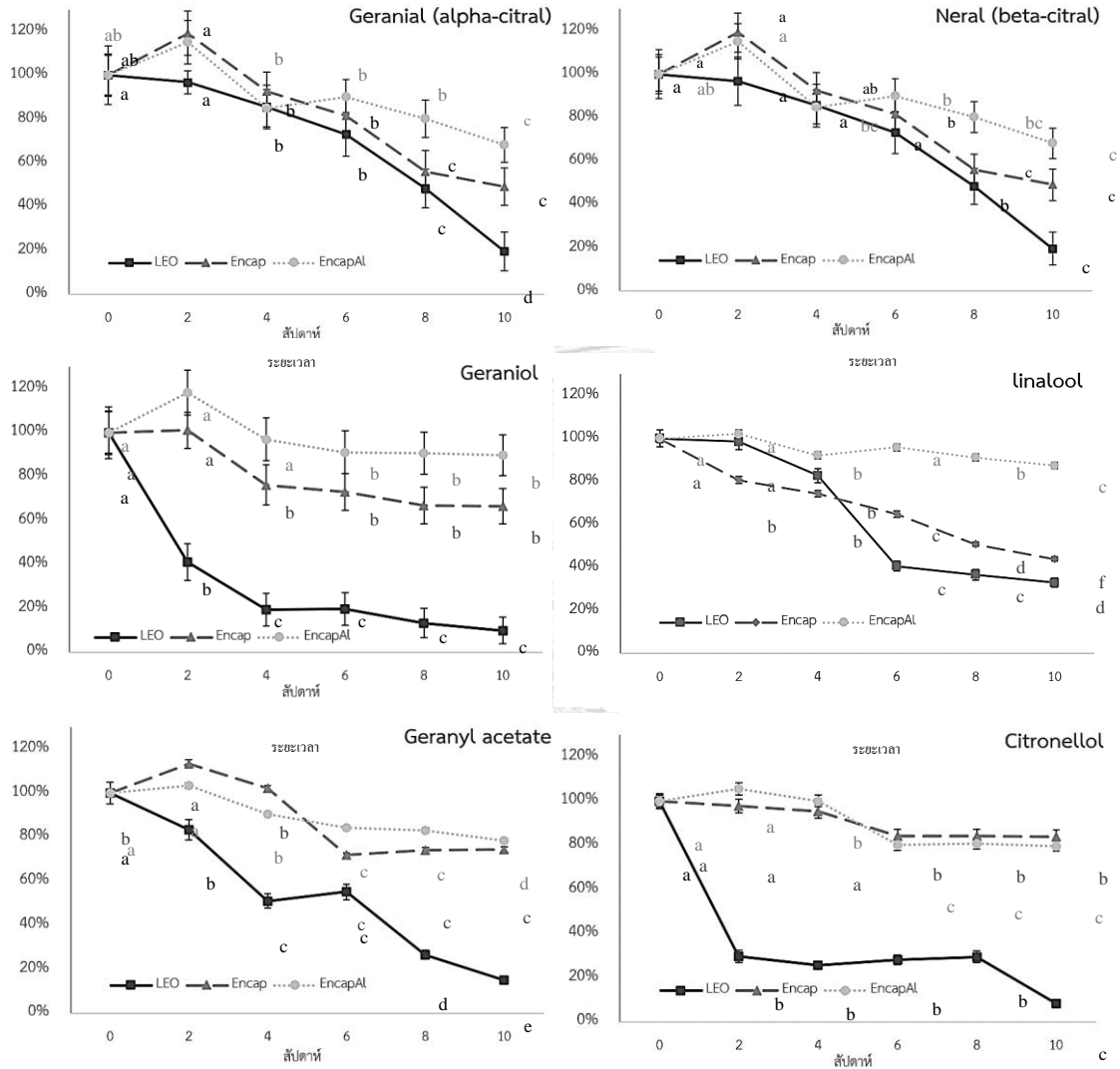
เพื่อศึกษาความคงตัวของสารระเหยสำคัญในนาโนเจล จึงติดตามปริมาณสารระเหย ที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลา 10 สัปดาห์ โดยเก็บตัวอย่างนาโนเจล 2 รูปแบบ ได้แก่ บรรจุ ภายในถุงออลูมิเนียมลามิเนต ปิดผนึกแบบสุญญากาศ และบรรจุภายในกล่องพลาสติกชนิด พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ใส โดยวางตัวอย่างทั้งสองไว้ใน desiccator เพื่อลด ความชื้น เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยสำคัญในน้ำมัน หอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บอยู่ในนาโนเจลและเปรียบเทียบกับน้ำมันหอมระเหยที่เก็บรักษาที่ สภาวะที่มีแสง ที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าสารระเหยสำคัญที่กักเก็บอยู่ในนา โนเจลส่วนใหญ่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาในระยะเวลา 2 สัปดาห์แรก และลดลงในเวลา ต่อมา โดยเมื่อพิจารณาสารระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้พบว่า มีแนวโน้มลดลง สูงกว่าปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลมาก และ ปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลที่เก็บภายในถุง ออลูมิเนียมลามิเนต ปิดผนึกแบบสุญญากาศ มีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าปริมาณสารระเหย สำคัญในน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลที่เก็บในกล่องพลาสติก จากงานวิจัยของ Turek และ Stintzing (2012) อธิบายถึงความคงตัวของน้ำมันหอมระเหย โดยระบุว่าน้ำมัน หอมระเหยที่มักจะถูกประกอบไปด้วยส่วนที่ชอบไขมัน (lipophilic) และสารระเหยได้นั้น

สามารถเกิดการ degradation ได้จาก 3 ปัจจัยได้แก่ แสง ออกซิเจน และความชื้น โดยทั้ง 3 ปัจจัยนี้สามารถเร่งให้เกิด oxidation และทำให้เกิด polymerization ของสารประกอบ ซึ่งจะทำให้สูญเสียคุณภาพและคุณสมบัติของสารไป โดยแสง ซึ่งรวมถึง ultraviolet (UV) หรือ visible light และออกซิเจนสามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยา autooxidation ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ และทำให้สารประเภท monoterpenes มีจำนวนลดลงหลังจากเก็บรักษา โดยการบรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต ปิดผนึกแบบสุญญากาศนั้น เป็นการช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากอากาศ แสง และความชื้นอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่การบรรจุในกล่องพลาสติก และเก็บภายใน desiccator จะเป็นการป้องกันเพียงความชื้นที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น หากแต่การลดลงของปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันแสงและบรรจุในสุญญากาศ กับปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่สามารถป้องกันแสงและอากาศซึมผ่านได้นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเทียบกับปริมาณสารระเหยให้กลิ่นสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้หรือสระที่ไม่ได้ผ่านการกักเก็บนั้น มีความแตกต่างของปริมาณสารระเหยให้กลิ่นสำคัญคงเหลือในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจลอย่างมีนัยสำคัญและมีปริมาณน้อยกว่ามาก แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปกป้องการเสียดสภาพของน้ำมันหอมระเหยด้วยการกักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีระหว่างการเก็บรักษาได้

ดังนั้นการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ด้วยนาโนเจลจึงสามารถชะลอการสูญเสียปริมาณสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยได้ โดยจะช่วยทำให้สารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้มีความคงตัวต่อการเก็บรักษามากกว่าสารระเหยที่อยู่ในน้ำมันปกติ กล่าวคือ เมื่อโมเลกุลของสารระเหยแทรกตัวเข้าไปยึดจับที่บริเวณโพรงภายในของนาโนเจล ทำให้สามารถลดการสูญเสียหรือถูกทำลายจากสภาวะแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhavah และคณะ (2015) ที่ศึกษาความคงตัวของนาโนเจลกับ citral ในน้ำมันหอมระเหยยี่หว่าที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน พบปริมาณ citral ในนาโนเจลลดลงน้อยกว่า citral ในน้ำมันที่ไม่ได้เกิดการกักเก็บด้วยนาโนเจล

จากงานวิจัยนี้พบว่าสารระเหยของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลมีความคงตัวต่อการเก็บรักษาโดยพบว่ามีเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยสำคัญในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจล โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มีแนวโน้มที่ลดลง แต่ก็มีมีความคงตัวต่อ

ความการเก็บรักษาที่ยาวนานมากกว่าน้ำมันหอมระเหยปกติ จึงสามารถนำนาโนเจลกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ไปประยุกต์ใช้อาหารหรือในด้านต่างๆ เพื่อรักษาความเป็นเอกลักษณ์และคุณภาพของน้ำมันหอมระเหยไว้ในผลิตภัณฑ์ได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลง สาระระเหยสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ที่ระยะเวลาการเก็บ 10 สัปดาห์ และภายใต้การกักเก็บในนาโนเจลที่การเก็บรักษาที่ต่างกัน (Encap คือบรรจุกล่องพลาสติก และ EncapAL คือบรรจุถุงอลูมิเนียมลามิเนต) โดย a,b,... คือค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละสภาวะ (p< 0.05)

4.4.6 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏของผงน้ำมันหอมระเหยที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังการเก็บรักษา

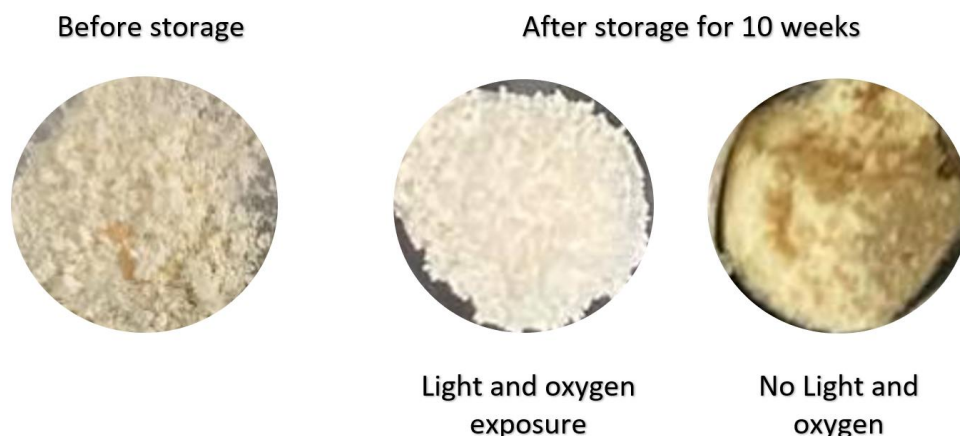
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บรักษาของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บภายในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสีเป็นเวลา 10 สัปดาห์ ได้พบการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บภายในนาโนเจล ดังนี้

ภายหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างกันเป็นเวลา 10 สัปดาห์ พบการเปลี่ยนแปลงของสีของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจลเมื่อเทียบกับสีของผงหลังจากทำ encapsulation แล้ว จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อเก็บในกล่องพลาสติก (Polypropylene, PP) ใส ที่เป็นสภาวะมีแสงและอากาศ สีของผงจะมีความสว่างขึ้นและมีสีเขียวจางลง ในขณะที่ผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต เก็บรักษาที่สภาวะไม่มีแสงและอากาศจะพบว่าสีของผงมีความสว่างลดลงและมีสีเขียวเข้มขึ้น เมื่อนำผงทั้งสามแบบ วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง colorimeter ได้ค่า L^* , a^* และ b^* ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์

Lab	After encapsulation	After storage (10 weeks)	
		Polypropylene (PP) packaging	Vacuum Aluminum laminate packaging
L^*	96.15 ^a ±0.10	96.44 ^a ±0.35	85.17 ^b ±0.91
a^*	-2.69 ^a ±0.23	-2.52 ^a ±0.14	-15.78 ^b ±0.06
b^*	18.15 ^b ±0.10	12.38 ^c ±0.26	61.56 ^a ±0.25

^{a,b...} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกำกับไว้ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแนวนอน ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสีของผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้การกักเก็บในนาโนเจลหลังจาก encapsulation และที่ระยะเวลาการเก็บ 10 สัปดาห์ (บรรจุภัณฑ์ไม่ป้องกันแสงและการซึมผ่านของออกซิเจน และบรรจุภัณฑ์ป้องกันแสงและการซึมผ่านของออกซิเจน ตามลำดับ)

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่า L^* ของผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต และเก็บรักษาที่ 10 สัปดาห์มีค่าลดลง คือมีความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับค่า L^* ของผงหลังจาก encapsulation และผงที่บรรจุกล่องพลาสติก เมื่อพิจารณาที่ค่า a^* จะพบอีกว่าค่า a^* ของผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต และเก็บรักษาที่ 10 สัปดาห์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับค่า a^* ของผงหลังการกักเก็บ และผงที่บรรจุกล่องพลาสติก และเมื่อพิจารณาค่า b^* ของทั้งสามตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยผงที่บรรจุกล่องพลาสติก และเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์นั้นมีค่าลดลงจากเริ่มต้น ในขณะที่ค่า b^* ของผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต และเก็บรักษาที่ 10 สัปดาห์มีค่าเพิ่มขึ้นมากจากเริ่มต้น ค่า a^* ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงสีแดงที่เพิ่มขึ้น และค่า a^* ลดลงหมายถึงสีเขียวที่เพิ่มขึ้น ค่า b^* ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงสีเหลืองที่เพิ่มขึ้น และ b^* ที่ลดลงหมายถึงสีน้ำเงินที่เพิ่มขึ้น ส่วน L^* ที่เพิ่มขึ้นคือค่าความสว่าง (International Commission on Illumination (CIE)) ดังนั้นหมายถึงผงที่บรรจุกล่องพลาสติก และเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์มีความสว่างขึ้น มีสีเขียวและสีเหลืองลดลง ในขณะที่ผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนต และเก็บรักษาที่ 10 สัปดาห์มีความสว่างลดลง มีสีเขียวและสีเหลืองมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของผงหลังการเก็บรักษา โดยสีเขียวและเหลืองที่ลดลงของผงที่บรรจุกล่องพลาสติกและเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์ เกิดจากการเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ

แสงและอากาศระหว่างการเก็บรักษา โดยสารประกอบ chlorophyll เป็นหนึ่งในสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ให้สีเขียว และพบมากในใบของตะไคร้ (Lonkar และคณะ, 2013) เมื่อ chlorophyll เกิดการเสียสภาพด้วยปฏิกิริยา oxidation ทำให้สูญเสียสภาพเป็น chlorophyllide ซึ่งเป็นสารที่มีสีน้ำตาลหรือไม่มีสี (Yilmaz และ Gökmen, 2016) ในขณะที่ผงที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมลามิเนตลามิเนต และเก็บรักษาที่ 10 สัปดาห์มีสีเขียวมากขึ้น ลักษณะสีเขียวที่พบนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัย โดยสารระเหยและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนั้นไม่เกิดการสลายตัวหรือสูญเสียสภาพจากสภาวะแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา ด้วยบรรจุภัณฑ์และการเก็บรักษาที่ไม่มีสภาพแวดล้อมรบกวน และนาโนเจลเองก็สามารถป้องกันการเสียสภาพของสารสำคัญไว้ได้ด้วย อีกปัจจัยอาจเกิดจากการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยออกจากนาโนเจลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากการจับตัวกันที่ไม่แข็งแรงมากนัก ระหว่างนาโนเจลและน้ำมันหอมระเหยตะไคร้จึงเกิดการปลดปล่อยมาที่ผิวหน้าของนาโนเจลได้บางส่วน รวมถึงอาจเกิดจากการบรรจุที่สภาวะสุญญากาศ ซึ่งเป็นการบีบอัดให้น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่จับตัวอยู่กับนาโนเจลหลุดออกมาที่ผิวหน้าของนาโนเจลและผงการกักเก็บนี้ได้ จึงเกิดเป็นสีเขียวที่มากกว่าผงกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลที่บรรจุในกล่องพลาสติกในสภาวะปกติ และผงกักเก็บน้ำในหอมระเหยตะไคร้ในนาโนเจลเริ่มต้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอนลงบนนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินสามารถเกิดนาโนเจลได้ และเมื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง: เจลาติน ความเข้มข้นของสารผสม และปริมาณรังสีดูดกลืน ต่อการเกิดนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินจากการฉายรังสีโดยลำอิเล็กตรอน ที่ทำให้ทั้งค่าการเชื่อมขวาง (degree of crosslink, DC) และความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) ของนาโนเจลที่ค่าสูงที่สุด ด้วยวิธี response surface methodology (RSM) ได้สภาวะที่เหมาะสมคือที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง: เจลาติน 1:1 ที่ความเข้มข้นของสารผสม 25 mg/mL และปริมาณรังสีดูดกลืนที่ 25 kGy ที่ทำให้นาโนเจลมีค่า DC และ TD เท่ากับ 87.17% และ 120.6 °C ตามลำดับ

สมบัติทางอณูฐานวิทยาของนาโนเจลจากภาพของ scanning electron microscopy (SEM) transmission electron microscope (TEM) และ atomic force microscope (AFM) จะพบการเกิด การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน และยังพบว่าขนาดของโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินที่เกิดเป็นนาโนเจลหลังจากการฉายรังสีจะมีขนาดเล็กลงหลังจากการฉายรังสีจนถึงระดับนาโนเมตร และขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของนาโนเจลอยู่ที่ 46 ± 0.3 นาโนเมตร

สมบัติทางเคมีของนาโนเจลแสดงด้วยแผนภาพ Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินหลังจากการฉายรังสี เมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันที่พบของแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินนั้น พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังและเจลาติน แต่มีการเกิด hydroxyl groups ขึ้นหลังจากการฉายรังสี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา radiolysis ของรังสีและน้ำที่เป็นตัวทำละลายและก่อให้เกิด hydroxyl radical และเป็นสารที่เร่งและก่อให้เกิดการเชื่อมขวางทั้งภายในและภายนอกของโมเลกุล และยังพบหมู่ฟังก์ชันของ C=N ซึ่งเกิด Schiff's base อันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่อัลดีไฮด์ของแป้งมันสำปะหลัง และหมู่อะมิโนของเจลาติน แสดงให้เห็นถึงพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นและก่อให้เกิดนาโนเจล

นาโนเจลสามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ได้ และยังสามารถป้องกันการปลดปล่อยของสารระเหยที่เป็นสารสำคัญของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้เอาไว้ได้ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ด้วยเทคนิค Gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) พบว่ามีองค์ประกอบของสารระเหย 15 ชนิด โดยสารระเหยที่พบในปริมาณมากคือ สารในกลุ่ม citral ที่ประกอบด้วย geranial (alpha-citral) และ neral (beta-citral) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า odor activity value (OAV) พบสารระเหยให้กลิ่นสำคัญคือ geranial neral geraniol geranyl acetate linalool และ citronellol ตามลำดับ และเมื่อนำน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจลที่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด (2:1) มาวิเคราะห์และติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจลพบว่า นาโนเจลสามารถทำหน้าที่เป็นสารห่อหุ้มที่ปกป้องสารระเหยต่อความร้อนได้ดี แต่เมื่อเกิดการสะสมความร้อนเป็นระยะเวลานาน น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บใน นาโนเจลมีความคงตัวที่ลดลง นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจลที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ สามารถรักษาความคงตัวและแสดงลักษณะของกลิ่นในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ได้ดีเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค GC-MS ดังนั้นเทคนิคการห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ด้วยนาโนเจลจึงสามารถชะลอการสูญเสียปริมาณสารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันได้ และช่วยให้สารระเหยให้กลิ่นในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้มีความคงตัวต่อความร้อนและการเก็บรักษามากกว่าสารระเหยที่อยู่ในน้ำมันปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเกิดนาโนเจลจากแป้งชนิดอื่น เช่น แป้งตัดแปร เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดนาโนเจล ทำให้นาโนเจลมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
2. ควรศึกษาลักษณะและรูปแบบของการกักเก็บของนาโนเจลในสารประกอบอื่นๆ รวมถึงวิธีการกักเก็บและการทดสอบทางประสาทสัมผัสในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บ

บรรณานุกรม



ภาษาไทย

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2563). มั่นสำปะหลังโรงงาน. *สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2563*, 402, หน้า 14-15.

ภาษาอังกฤษ

Al-Hassan, A. A., Norziah, M. H. (2017). Effect of transglutaminase induced crosslinking on the properties of starch/gelatin films. *Food Packaging and Shelf Life*, 13, 15-19.

Ali, S. S., Kasoju, N., Luthra, A., Singh, A., Sharanabasava, H., Sahu, A., Bora, U. (2008). Indian medicinal herbs as sources of antioxidants. *Food Research International*, 41(1), 1-15.

Almeida, K. B., Araujo, J. L., Cavalcanti, J. F., Romanos, M. T. V., Mourão, S. C., Amaral, A. C. F., Falcão, D. Q. (2018). *In vitro* release and anti-herpetic activity of *Cymbopogon citratus* volatile oil-loaded nanogel. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 28(4), 495-502.

Araiza-Calahorra, A., Sarkar, A. (2019). Pickering emulsion stabilized by protein nanogel particles for delivery of curcumin: Effects of pH and ionic strength on curcumin retention. *Food Structure*, 21, 100113.

Babushok, V. I., Linstrom, P. J., Zenkevich, I. G. (2011). Retention indices for frequently reported compounds of plant essential oils. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 40(4), 043101.

Balakrishnan, B., Jayakrishnan, A. (2005). Self-cross-linking biopolymers as injectable in situ forming biodegradable scaffolds. *Biomaterials*, 26(18), 3941-3951.

Bee, S.-T., Sin, L. T., Ratnam, C. T., Yap, B.-F., Rahmat, A. R. (2018). Effects of electron beam irradiation on properties of corn starch undergone periodate oxidation mechanism blended with polyvinyl alcohol. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 416, 73-88.

- Ben Bettaïeb, N., Jerbi, M. T., Ghorbel, D. (2014). Gamma radiation influences pasting, thermal and structural properties of corn starch. *Radiation Physics and Chemistry*, 103, 1-8.
- Benbettaïeb, N., Karbowiak, T., Brachais, C. H., Debeaufort, F. (2016). Impact of electron beam irradiation on fish gelatin film properties. *Food Chemistry*, 195, 11-18.
- Bertolini, A. C., Siani, A. C., Grosso, C. R. F. (2001). Stability of monoterpenes encapsulated in gum arabic by spray-drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 780-785.
- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965-977.
- Binh, D., Pham Thi Thu, H., Nguyen Ngoc, D., Nguyen Thanh, D., Nguyen Nguyet, D. (2012). A study on size effect of carboxymethyl starch (Ding, Geng, Lu, Zhao, & Bai, 2020) crosslinked by electron beam radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(7), 906-912.
- Buttery, R. G., Turnbaugh, J. G., Ling, L. C. (1988). Contribution of volatiles to rice aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 36(5), 1006-1009.
- Chanthai, S., Prachakoll, S., Ruangviriyachai, C., Luthria, D. L. (2012). Influence of extraction methodologies on the analysis of five major volatile aromatic compounds of citronella grass (*Cymbopogon nardus*) and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) grown in Thailand. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 95(3), 763-772.
- Chew, S. C., Tan, C. P., Nyam, K. L. (2018). Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using β -cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate. *Journal of Food Engineering*, 237, 78-85.
- de Carvalho, S. Y. B., Almeida, R. R., Pinto, N. A. R., de Mayrinck, C., Vieira, S. S., Haddad, J. F., Guimarães, L. G. d. L. (2021). Encapsulation of essential oils

- using cinnamic acid grafted chitosan nanogel: Preparation, characterization and antifungal activity. *International Journal of Biological Macromolecules*. 166, 902-912.
- Ding, H., Geng, J., Lu, Y., Zhao, Y., Bai, B. (2020). Impacts of crosslinker concentration on nanogel properties and enhanced oil recovery capability. *Fuel*, 267, 117098.
- Duygu Sütekin, S., Güven, O. (2019). Application of radiation for the synthesis of poly(n-vinyl pyrrolidone) nanogels with controlled sizes from aqueous solutions. *Applied Radiation and Isotopes*, 145, 161-169.
- Enciso, S., Borrás, A., Ventura-Canseco, L., Gutiérrez-Miceli, F., Dendooven, L., Grajales, A., Abud-Archila, M. (2018). Lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf) essential oil encapsulation by freeze-drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 17, 407-420.
- European Food Safety, A. (2018). Outcome of the public consultation on the draft guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA Supporting Publications*, 15(7), 1430E.
- Gandhi, S. S., Yan, H., Kim, C. (2014). Thermoresponsive gelatin nanogels. *ACS Macro Letters*, 3(11), 1210-1214.
- Ge, J., Zhang, J., Wang, F., Li, Z., Yu, J., Ding, B. (2017). Superhydrophilic and underwater superoleophobic nanofibrous membrane with hierarchical structured skin for effective oil-in-water emulsion separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(2), 497-502.
- Ghosh, S., Singh, U. K., Meli, V. S., Kumar, V., Kumar, A., Irfan, M., Chakraborty, N., Chakraborty, S., and Datta, A. (2013). Induction of senescence and identification of differentially expressed genes in tomato in response to monoterpene. *PLoS One*, 8(9), e76029.

- Gonçalves, C. (2012). Self-Assembled Dextrin Nanogel as Curcumin Delivery System. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 03, 178-184.
- Goodner, K. L. (2008). Practical retention index models of OV-101, DB-1, DB-5, and DB-Wax for flavor and fragrance compounds. *LWT - Food Science and Technology*, 41(6), 951-958.
- Haug, I. J., Draget, K. I. (2011). 5 - Gelatin. In G. O. Phillips and P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Food Proteins* (pp. 92-115): Cambridge: Woodhead Publishing.
- He, L., Liang, H., Lin, L., Shah, B. R., Li, Y., Chen, Y., Li, B. (2015). Green-step assembly of low density lipoprotein/sodium carboxymethyl cellulose nanogels for facile loading and pH-dependent release of doxorubicin. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 126, 288-296.
- Jasim, A., Hasan, H., Al-Awady, M. (2019). Preparation of vorapaxar loaded with vitamin E TPGS and PVA emulsified PLGA nanoparticles In vitro studies. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 12, 4503-4510.
- Joy, P. P., Skaria, B. P., Mathew, S., Mathew, G., Joseph, A. (2006). Lemongrass: The fame of Cochin. *Indian Journal of Arecanut, Spices and Medicinal Plants* 8(2), 55-64.
- Kabanov, A. V., Vinogradov, S. V. (2009). Nanogels as pharmaceutical carriers: finite networks of infinite capabilities. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(30), 5418-5429.
- Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., Singkornard, S., Matta, F. (2010). Essential Oils from Six Herbal Plants for Biocontrol of the Maize Weevil. *HortScience*, 45, 592-598.
- Kfoury, M., Auezova, L., Greige-Gerges, H., Fourmentin, S. (2015). Promising applications of cyclodextrins in food: Improvement of essential oils retention, controlled release and antiradical activity. *Carbohydrate Polymers*, 131, 264-272.

- Khalili, S. T., Mohsenifar, A., Beyki, M., Zhavah, S., Rahmani-Cherati, T., Abdollahi, A., Bayat, M., Tabatabaei, M. (2015). Encapsulation of Thyme essential oils in chitosan-benzoic acid nanogel with enhanced antimicrobial activity against *Aspergillus flavus*. *LWT - Food Science and Technology*, 60(1), 502-508.
- Khonsung, P. (2012). *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf. *Thai Journal of Pharmacology*, 34(2), 31-51.
- Kommareddy, S., Shenoy, D., Amiji, M. (2007). Gelatin Nanoparticles and Their Biofunctionalization. *Nanotechnologies for the Life Sciences*, 330-352.
- Kuijpers, A. J., Engbers, G. H. M., Krijgsveld, J., Zaat, S. A. J., Dankert, J., Feijen, J. (2000). Cross-linking and characterisation of gelatin matrices for biomedical applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 11(3), 225-243.
- Lamanna, M., Morales, N. J., García, N. L., Goyanes, S. (2013). Development and characterization of starch nanoparticles by gamma radiation: Potential application as starch matrix filler. *Carbohydrate Polymers*, 97(1), 90-97.
- Le Corre, D., Bras, J., Dufresne, A. (2010). Starch Nanoparticles: A Review. *Biomacromolecules*, 11(5), 1139-1153.
- Lee, K. Y., Mooney, D. J. (2001). Hydrogels for tissue engineering. *Chemical Reviews*, 101(7), 1869-1880.
- Li, C., Liu, S. (2010). Responsive nanogel-based dual fluorescent sensors for temperature and Hg²⁺ ions with enhanced detection sensitivity. *Journal of Materials Chemistry*, 20(47), 10716-10723.
- Li, Q., Yuan, L., Liu, Y. (2021). Effects of adding sodium nitrite and tea polyphenols on the characterizations and cytotoxicity of carbon nanoparticles from fried pork. *Food Chemistry*, 365, 130464.
- Li, X.-M., Li, X., Wu, Z., Wang, Y., Cheng, J.-S., Wang, T., Zhang, B. (2020). Chitosan hydrochloride/carboxymethyl starch complex nanogels stabilized Pickering emulsions for oral delivery of β -carotene: Protection effect and in vitro digestion study. *Food Chemistry*, 315, 126288.

- Liang, T., Hou, J., Qu, M., Zhao, M., Raj, I. (2020). High-viscosity α -starch nanogel particles to enhance oil recovery. *RSC Advances*, 10(14), 8275-8285.
- Lonkar, P., Chavan, U., Pawar, V. D., Bansode, V., Amarowicz, R. (2013). Studies on preparation and preservation of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud) Wats) powder for tea. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(8), 585-592.
- Martins, P. M., Sbaite, P., Benites, C., Maciel, M. (2011). Thermal characterization of orange, lemongrass, and basil essential oils. In *International Conference on Chemical and Process Engineering* (Vol. 24, pp. 463-468).
- Meng, Y., Cloutier, S. (2014). Gelatin and other proteins for microencapsulation. In *Microencapsulation in the food industry* (pp. 227-239). San Diego: Academic Press.
- Mohd Zain, A. H., Ab Wahab, M. K., Ismail, H. (2019). Influence of electron beam radiation on structural and mechanical performance of thermoplastic cassava starch. *Materials Research Express*, 6(10), 105335.
- Mohsenabadi, N., Rajaei, A., Tabatabaei, M., Mohsenifar, A. (2018). Physical and antimicrobial properties of starch-carboxy methyl cellulose film containing rosemary essential oils encapsulated in chitosan nanogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 148-155.
- Moreno, J., Peinado, R. (2012). Chapter 3 - Must Aromas. In J. Moreno and R. Peinado (Eds.), *Enological Chemistry* (pp. 23-39). San Diego: Academic Press.
- Nandi, I., Bari, M., Joshi, H. (2003). Study of isopropyl myristate microemulsion systems containing cyclodextrins to improve the solubility of 2 model hydrophobic drugs. *AAPS Pharmaceutical Science and Technology*, 4(1), 71-79.
- Oni, D., Mwero, J., Kabubo, C. (2020). The effect of cassava starch on the durability characteristics of concrete. *The Open Civil Engineering Journal*, 14, 289-301.

- Papon, P., Leblond, J., Meijer, P. H. E. (2007). Gelation and Transitions in Biopolymers. The Physics of Phase Transitions. *Advanced Texts in Physics*. (pp. 189-213). Berlin: Springer.
- Pasanphan, W. (2018). *Radiolysis of water*, (Thailand; Kasetsart university), p. 69-77.
- Paul, I. E., Kumar, D. N., Rajeshwari, A., Alex, S. A., Karthiga, D., Raichur, A. M., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A. (2017). Detection of food contaminants by gold and silver nanoparticles. In *Nanobiosensors* (pp. 129-165). San Diego: Academic Press.
- Politeo, O., Jukic, M., Milos, M. (2007). Chemical composition and antioxidant capacity of free volatile aglycones from basil (*Ocimum basilicum* L.) compared with its essential oil. *Food Chemistry*, 101(1), 379-385.
- Pongsumpun, P., Iwamoto, S., Siripatrawan, U. (2020). Response surface methodology for optimization of cinnamon essential oil nanoemulsion with improved stability and antifungal activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104604.
- Rajaei, A., Hadian, M., Mohsenifar, A., Rahmani-Cherati, T., Tabatabaei, M. (2017). A coating based on clove essential oils encapsulated by chitosan-myristic acid nanogel efficiently enhanced the shelf-life of beef cutlets. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 137-145.
- Rattanawongwiboon, T., Ghaffarlou, M., Sütekin, S. D., Pasanphan, W., Güven, O. (2018). Preparation of multifunctional poly(acrylic acid)-poly(ethylene oxide) nanogels from their interpolymer complexes by radiation-induced intramolecular crosslinking. *Colloid and Polymer Science*, 296(9), 1599-1608.
- Rezaei, A., Fathi, M., Jafari, S. M. (2019). Nanoencapsulation of hydrophobic and low-soluble food bioactive compounds within different nanocarriers. *Food Hydrocolloids*, 88, 146-162.
- Rychlik, M., Schieberle, P., Grosch, W. (1998). Compilation of odor thresholds, odor qualities and retention indices of key food odorants. *Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie*. Garching. Germany.

- Sánchez, F. M., García, F., Calvo, P., Bernalte, M. J., González-Gómez, D. (2016). Optimization of broccoli microencapsulation process by complex coacervation using response surface methodology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 243-249.
- Sarabia, L., Ortiz, M. (2010). Response Surface Methodology. *Comprehensive Chemometrics: Chemical and Biochemical Data Analysis*, 1.
- Sarika, P. R., Anil Kumar, P. R., Raj, D. K., James, N. R. (2015). Nanogels based on alginic aldehyde and gelatin by inverse miniemulsion technique: synthesis and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 119, 118-125.
- Sasaki, Y., Akiyoshi, K. (2010). Nanogel engineering for new nanobiomaterials: from chaperoning engineering to biomedical applications. *The Chemical Record*, 10(6), 366-376.
- Satthanakul, P., Taweekaisupapong, S., Paphangkorakit, J., Pesee, M., Timabut, P., Khunkitti, W. (2015). Antimicrobial effect of lemongrass oil against oral malodour micro-organisms and the pilot study of safety and efficacy of lemongrass mouthrinse on oral malodour. *Journal of Applied Microbiology*, 118(1), 11-17.
- Singh, S., Singh, N., Ezekiel, R., Kaur, A. (2011). Effects of gamma-irradiation on the morphological, structural, thermal and rheological properties of potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 83(4), 1521-1528.
- Sinha, P., Srivastava, S., Mishra, N., Singh, D. K., Luqman, S., Chanda, D., Yadav, N. P. (2016). Development, optimization, and characterization of a novel tea tree oil nanogel using response surface methodology. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 42(9), 1434-1445.
- Stroescu, M., Stoica-Guzun, A., Ghergu, S., Chira, N., Jipa, I. (2013). Optimization of fatty acids extraction from *Portulaca oleracea* seed using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 43, 405-411.

- Sultana, F., Manirujjaman, Imran Ul, H., Arafat, Y., Sharmin, S. (2013). An overview of nanogel drug delivery system. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 3, S95-S105.
- Suppavorasatit, I., De Mejia, E. G., Cadwallader, K. R. (2011). Optimization of the enzymatic deamidation of soy protein by protein-glutaminase and its effect on the functional properties of the protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(21), 11621-11628.
- Sutaphanit, P., Chitprasert, P. (2014). Optimisation of microencapsulation of holy basil essential oil in gelatin by response surface methodology. *Food Chemistry*, 150, 313-320.
- Szymońska, J., Targosz-Korecka, M., Krok, F. (2009). Characterization of starch nanoparticles. *Journal of Physics: Conference Series*, 146, 012027.
- Tamura, H., Boonbumrung, S., Yoshizawa, T., Varanyanond, D. W. (2001). The volatile constituents in the peel and pulp of a green Thai mango, Khieo Sawoei cultivar (*Mangifera indica* L.). *Food Science and Technology Research*, 7, 72-77.
- Tari, T. A., Annapure, U. S., Singhal, R. S., Kulkarni, P. R. (2003). Starch-based spherical aggregates: screening of small granule sized starches for entrapment of a model flavouring compound, vanillin. *Carbohydrate Polymers*, 53(1), 45-51.
- Teng, Y., Jin, H., Nan, D., Li, M., Fan, C., Liu, Y., Lv, P., Cui, W., Sun, Y., Hao, H., Qu, X., Yang, Z., Huang, Y. (2018). *In vivo* evaluation of urokinase-loaded hollow nanogels for sonothrombolysis on suture embolization-induced acute ischemic stroke rat model. *Bioactive Materials*, 3(1), 102-109.
- Thies, C. (2007). Microencapsulation of flavors by complex coacervation. In *Encapsulation and controlled release technologies in food systems*, (pp. 149-170). New Jersey: Blackwell Publishing.
- Turek, C., Stintzing, F. C. (2012). Impact of different storage conditions on the quality of selected essential oils. *Food Research International*, 46(1), 341-353.

- Ulanski, P., Rosiak, J. M. (1999). The use of radiation technique in the synthesis of polymeric nanogels. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 151(1), 356-360.
- Wang, H., Qian, J., Ding, F. (2017). Recent advances in engineered chitosan-based nanogels for biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 5(34), 6986-7007.
- Xia, P., Wang, S., Qi, Z., Zhang, W., Sun, Y. (2019). BMP-2-releasing gelatin microspheres/PLGA scaffolds for bone repairment of X-ray-radiated rabbit radius defects. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*, 47(1), 1662-1673.
- Xue, P., Zhao, Y., Wen, C., Cheng, S., Lin, S. (2017). Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties of corn flour and improvement of the gelatinization inhibition. *Food Chemistry*, 233, 467-475.
- Yamamoto, T., Shimada, A., Ohmoto, T., Matsuda, H., Ogura, M., Kanisawa, T. (2004). Olfactory study on optically active citronellyl derivatives. *Flavour and Fragrance Journal*, 19(2), 121-133.
- Yilmaz, C., Gökmen, V. (2016). Chlorophyll. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 37-41). Oxford: Academic Press.
- Zakaria, N. H., Muhammad, N., Abdullah, M. M. A. B. (2017). Potential of Starch Nanocomposites for Biomedical Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 209, 012087.
- Zaman, H. U., Beg, M. D. H. (2015). Improvement of physico-mechanical, thermomechanical, thermal and degradation properties of PCL/gelatin biocomposites: Effect of gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 109, 73-82.
- Zhang, H., Zhai, Y., Wang, J., Zhai, G. (2016). New progress and prospects: The application of nanogel in drug delivery. *Materials Science and Engineering: C*, 60, 560-568.

- Zhaveh, S., Mohsenifar, A., Beiki, M., Khalili, S. T., Abdollahi, A., Rahmani-Cherati, T., Tabatabaei, M. (2015). Encapsulation of *Cuminum cyminum* essential oils in chitosan-caffeic acid nanogel with enhanced antimicrobial activity against *Aspergillus flavus*. *Industrial Crops and Products*, 69, 251-256.
- Zhou, M., Wang, T., Hu, Q., Luo, Y. (2016). Low density lipoprotein/pectin complex nanogels as potential oral delivery vehicles for curcumin. *Food Hydrocolloids*, 57, 20-29.



ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์

ก.1 ค่าการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) ด้วยวิธี TNBS (TNBS assay) (วิธีของ Al-Hassan และ Norziah (2017))

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง UV-visible spectrophotometer (Thermo Spectronic, Genesys 10 UV, USA)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (New Classic, Mettler, Switzerland)
3. micropipette (Mettler Toledo, USA)
4. shaking water bath (GFL รุ่น 1082, Germany)

สารเคมี

1. 2,4,6-trinitrobenzene sulphonic acid (TNBS) (Sigma-Aldrich, USA)
2. sodium hydrogen carbonate (Carlo Erba Reagent S.A.S., France)
3. hydrochloric acid (QRc, New Zealand)
4. glycine standard (Kemaus, Australia)

วิธีการเตรียม

1. เตรียมสารละลาย TNBS เข้มข้น 0.05% w/v โดยใช้ TNBS เข้มข้น 5 %w/v ปริมาตร 0.2 mL ในขวดปรับปริมาตรขนาด 20 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. เตรียมสารละลาย sodium hydrogen carbonate (NaHCO_3 , pH8.5) เข้มข้น 4% w/v โดยชั่ง sodium hydrogen carbonate จำนวน 1 g ในปิเกตอร์ขนาด 10 mL ละลายด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. เตรียมสารละลาย Hydrochloric acid (HCl) เข้มข้น 6 N โดยใช้ HCl เข้มข้น 12 N ปริมาตร 12.5 mL ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
4. ปิเปตตัวอย่างนาโนเจล 1 mL ลงในหลอดทดลองขนาด 15 mL เติม TNBS เข้มข้น 0.05% w/v และ sodium hydrogen carbonate เข้มข้น 4% w/v อย่างละ 0.5 mL ให้ความร้อนในอ่างให้ความร้อนอุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 120 นาที

5. เติม Hydrochloric acid เข้มข้น 6 N ปริมาตร 1.5 mL แล้วให้ความร้อนในอ่างให้ความร้อนอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 90 นาที แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 2.5 mL
6. วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 415 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวอ้างอิง และบันทึกค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างเป็น A_s
7. ชั่ง glycine standard 1 mg แล้วทำขั้นตอนเดียวกับตัวอย่าง บันทึกค่าการดูดกลืนแสงของ glycine standard เป็น A_g
8. คำนวณค่าการเชื่อมขวาง (degree of cross-linking, DC) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Degree of crosslinking (\%)} = \left(1 - \frac{A_s}{A_g}\right) \times 100$$

เมื่อ A_s และ A_g ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เกิดการเชื่อมขวาง (cross-linked sample) และสารมาตรฐานที่ไม่มีการเกิดการเชื่อมขวาง (non-crosslinked solutions) ตามลำดับ

ก.2 ความคงตัวต่อความร้อน (degradation temperature, TD) ด้วยวิธี

Thermogravimetric analysis (TGA)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. thermogravimetric analyzer (Mettler-Toledo รุ่น TGA 2-(SF), Switzerland)
2. aluminum pan

วิธีการเตรียม

1. ปิเปตตัวอย่างนาโนเจล 10 μ L ลงใน aluminum pan ที่อยู่ภายในเครื่อง thermogravimetric analyzer
2. กำหนดความร้อน 30 °C /min ที่ช่วงอุณหภูมิ 30-600 °C ภายใต้แก๊สไนโตรเจน ที่อัตราไหล 20 mL/min

ก.3 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

1. ปิเปตตัวอย่างนาโนเจล 10 μ L ลงบนกระจกใสที่ติดอยู่บน double side carbon บนแท่นอลูมิเนียม
2. ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เคลือบด้วย platinum

3. วางลงบนฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
4. ปรับค่าความต่างศักย์ที่ 20 กิโลโวลต์ เพื่อวิเคราะห์ ขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างนาโนเจล

ก.4 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)

1. ปิเปตตัวอย่างนาโนเจล 10 μ L ลงบนกระจกใส เติม isooctane แล้ววางลงบน copper grids
2. ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
3. วางลงบนฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (JEOL, Japan)
4. ปรับค่าความต่างศักย์ที่ 80 กิโลโวลต์ เพื่อวิเคราะห์ ขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างนาโนเจล

ก.5 การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM)

1. ปิเปตตัวอย่างนาโนเจล 10 μ L ลงบนกระจกใสทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. วางลงบนฐานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
3. ปรับค่า spring constant ที่ 42 N/m ด้วยโปรแกรม NanoScope IV system (Veeco, Santa Barbara, CA) และใช้เทคนิค tapping mode
4. ใช้โปรแกรม Femtoscan software เพื่อวิเคราะห์ ขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างนาโนเจล

ก.6 การเตรียมตัวอย่าง internal standard (วิธีของ Politeo และคณะ, 2007)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น MS304S/01, Switzerland)
2. ขวดวัดปริมาตร 10 mL
3. micropipette (Mettler Toledo, USA)

สารเคมี

1. 2,4,6-trimethylpyridine (Sigma-Aldrich, Switzerland)
2. methanol (QRèC, New Zealand)

วิธีการเตรียม

1. ชั่ง 2,4,6-trimethylpyridine น้ำหนัก 0.01 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตร 10 mL
2. เติม methanol ลงไปจนถึงขีดวัดปริมาตร 10 mL จะได้ internal standard ความเข้มข้น 1000 ppm
3. คำนวณน้ำหนักสาร 2,4,6-trimethylpyridine (internal standard)

$$\text{Internal standard เริ่มต้น} = \frac{0.01}{10000} = 0.001 \text{ mg/uL}$$

$$\text{Internal standard 2 uL ในน้ำมันหอมระเหย 500 uL} = 0.002 \text{ mg}$$

ก.7 การเตรียมสารมาตรฐานอัลเคน (C₁₀-C₂₀)

อุปกรณ์

1. micropipette (Mettler Toledo, USA)
2. µ-vials 300 µL (Gerstel, Germany)

สารเคมี

1. C₁₀ – C₂₀ saturated alkanes standard (Sigma-Aldrich, Switzerland)
2. methanol (QRèC, New Zealand)

วิธีการเตรียม

1. ปิเปต C₁₀ – C₂₀ saturated alkanes standard ความเข้มข้น 500 ppm 1 mL จาก stock solution ลงในขวดวัดปริมาตร 10 mL
2. เติม methanol จนถึงขีดวัดปริมาตรที่ขวด
3. ปิเปตสารละลาย 1 µL ลงใน µ-vials ขนาด 300 µL
4. นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS)

วิธีคำนวณ retention index (RI) สมการคำนวณ RI จาก Kovats (1958)

$$RI = 100N + 100n \frac{t_{Ra} - t_{RN}}{t_{R(N+n)} - t_{RN}}$$

N คือ ตัวเลขของคาร์บอนใน alkanes standard ที่น้อยกว่าตัวอย่าง

n คือ ค่าความต่างของคาร์บอนใน alkanes standard สองตัวที่น้อยกว่าและมากกว่าตัวอย่าง

t_{Ra} , t_{RN} , $t_{R(N+n)}$ คือ retention times ของตัวอย่าง และของ alkane สองตัวที่น้อยกว่าและมากกว่าตัวอย่าง ตามลำดับ

ก.8 การคำนวณปริมาณของสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้เทียบกับ internal standard

ปริมาณสารระเหยในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ (mg) =

$$\frac{\text{พื้นที่ใต้พีคสารระเหย} \times \text{ปริมาณ internal standard ที่เติมลงไป ในน้ำมันหอมระเหย (mg)}}{\text{พื้นที่ใต้พีคของ internal standard}}$$

กำหนด response factor = 1

ก.9 การหา loading efficiency (LE) (ดัดแปลงวิธีจาก Khalili และคณะ (2015))

อุปกรณ์

1. เครื่อง UV-visible spectrophotometer (Thermo Spectronic, Genesys 10 UV, USA)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (New Classic, Mettler, Switzerland)
3. micropipette (Mettler Toledo, USA)

สารเคมี

1. ethanol 95% (QRëC, New Zealand)
2. hexane (QRëC, New Zealand)

วิธีการเตรียม

1. ตั้งค่าเครื่อง UV-visible spectrophotometer เป็นโหมด scanning
2. หาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ในช่วง 360–650 nm

3. ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่ 393 nm บันทึกค่าการดูดกลืนแสงของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้เป็น ODr
4. ตกตะกอนนาโนเจลที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 10,000 × g เป็นเวลา 15 นาที
5. วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 393 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวอ้างอิง และบันทึกค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างเป็น ODs
6. คำนวณหา loading efficiency (LE) ดังสมการ

$$LE (\%) = \frac{ODr - ODs}{ODr} \times 100$$

เมื่อ ODr และ ODs คือค่าการดูดกลืนแสงของน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ และตัวอย่างนาโนเจลที่กักเก็บน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ตามลำดับ

ก.10 การหาความสามารถในการละลาย (solubility index) (ตามวิธีของ Chew และคณะ (2018))

อุปกรณ์

1. หลอด centrifuge ขนาด 250 mL
2. shaking water bath (GFL รุ่น 1082, Germany)
3. เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น MS304S/01, Switzerland)
4. hot air oven (Gen Lab รุ่น PRIME, UK)

วิธีการเตรียม

1. ชั่งนาโนเจล 1 g ในหลอด centrifuge
2. เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิ 25 °C ปริมาตร 25 mL
3. นำไปเขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water baht) ความเร็วรอบ 110 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 30 นาที
4. เมื่อครบกำหนดเวลาจึงนำตัวอย่างปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 rpm อุณหภูมิ 15 °C เป็นเวลา 5 นาที

5. นำสารละลายใส่เหนือตะกอนใส่ถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
6. นำออกจากตู้อบใส่ลงใน desiccator จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะและตัวอย่างเท่ากับ อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำจนกว่าผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้ง 2 ครั้งไม่เกิน 1-3 mg
7. คำนวณหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

$$\text{ความสามารถในการละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักนาโนเจลก่อนอบ} - \text{น้ำหนักนาโนเจลหลังอบ}}{\text{น้ำหนักนาโนเจลก่อนอบ}} \times 100$$

ก.11 การสกัดด้วย Hexane (ตามวิธีของ Enciso และคณะ (2018))

1. ชั่งผงน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ที่กักเก็บในนาโนเจล และน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ 50 mg ลงในหลอด centrifuge
2. เติมน้ำกลั่น และ hexane ปริมาตร 4 mL และ 2 mL ตามลำดับ
3. นำไปเขย่าด้วย vortex mixer เป็นเวลา 1 นาที เพื่อสกัดน้ำมันและสารระเหยเข้าสู่ organic phase solvent
4. เก็บส่วน organic phase solvent ปริมาตร 200 μ L ในขวด vial ขนาด 200 μ L เพื่อเตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography ต่อไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.12 การวัดค่าสี CIE

อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่อง chroma meter (Model CR-400 series, Minolta, Japan)

วิธีวิเคราะห์

วัดค่าสีของตัวอย่างด้วยเครื่อง chroma meter ระบบ CIE และบันทึกค่า L^* , a^* และ b^*

โดยปรับมาตรฐานเครื่องก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้ง และบันทึกค่า L^* , a^* และ b^* ของตัวอย่าง

โดย ค่า L^* แสดงถึง ค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100

0 แสดงถึง สีดำ และ 100 แสดงถึง สีขาว

ค่า a^* แสดงถึง ค่าสีแดงและเขียว (redness/greenness)

+ a^* แสดงถึง สีแดง และ - a^* แสดงถึง สีเขียว

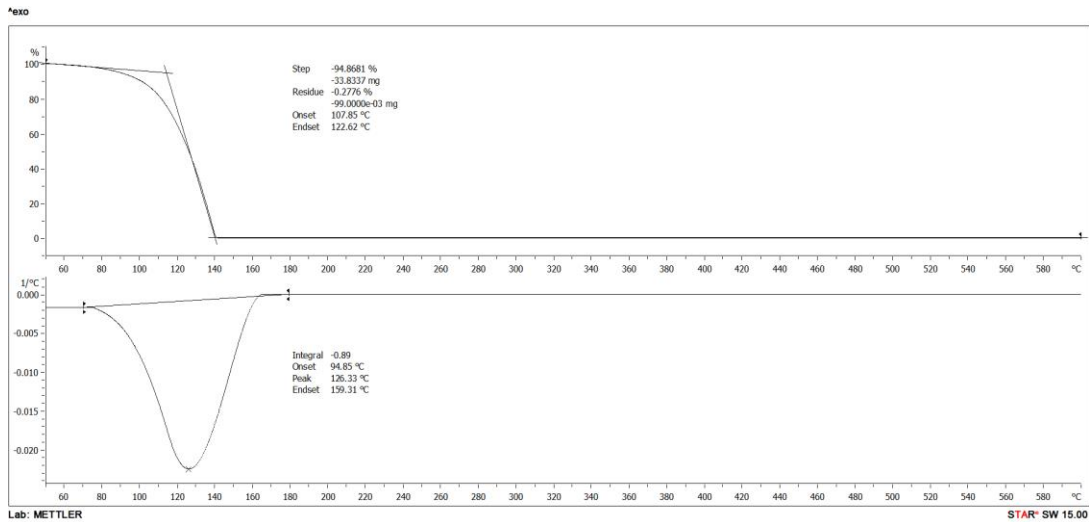
ค่า b^* แสดงถึง ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (yellowness/blueness)

+ b^* แสดงถึง สีเหลือง และ - b^* แสดงถึง สีน้ำเงิน

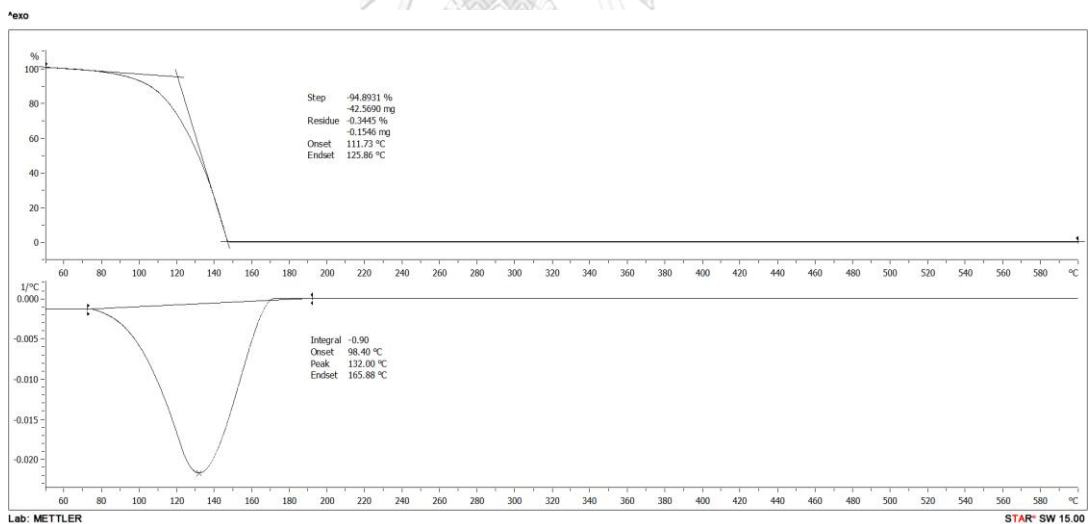


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

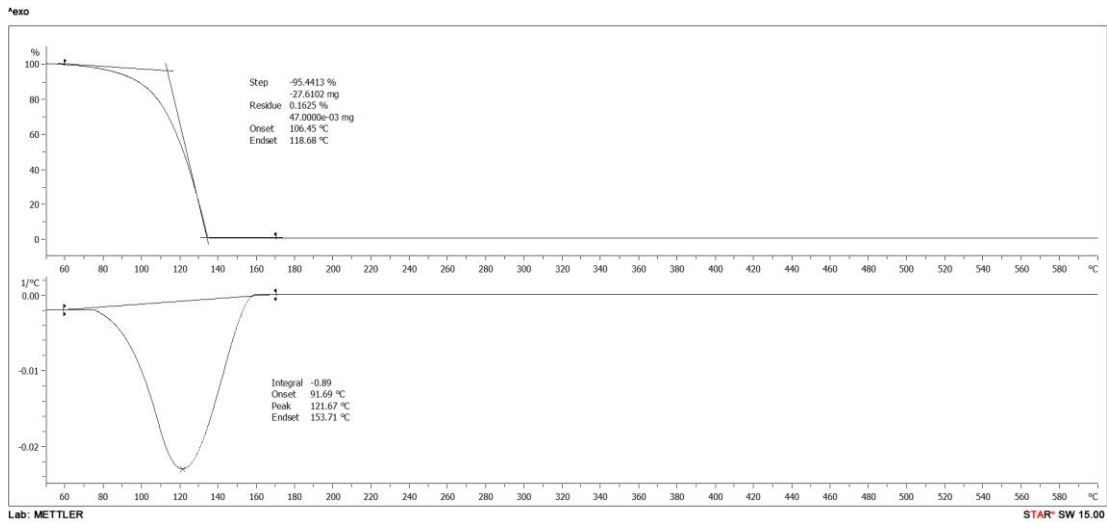
ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม



รูปที่ ข.1 TGA monograph ของแป้งมันสำปะหลัง

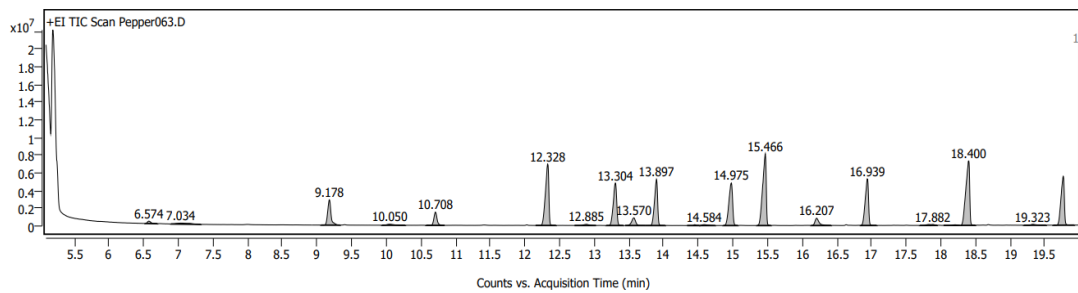


รูปที่ ข.2 TGA monograph ของเจลาติน



รูปที่ ข.3 TGA monograph ของนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

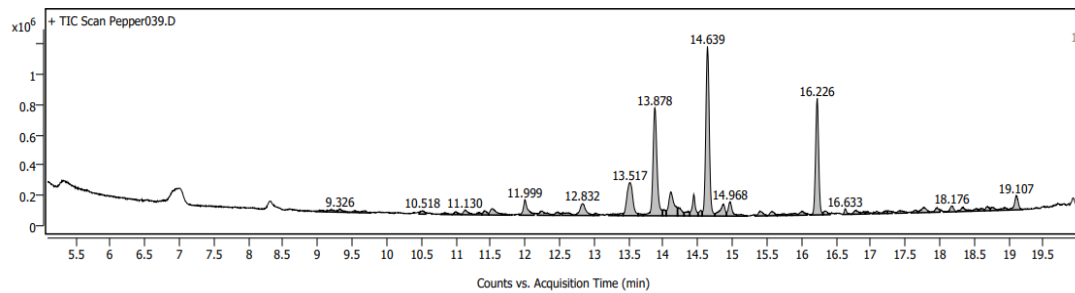
Sample Chromatograms



รูป ข.4 Chromatogram ของ n-alkane

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample Chromatograms



รูป ข.4 Chromatogram ของน้ำมันหอมระเหยกักเก็บในนาโนเจลจากแป้งมันสำปะหลังและเจลาตินด้วยการฉายรังสี

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ response surface regression ของค่า DC

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.955 ^a	.912	.798	4.27722	.912	8.043	9	7	.006

a. Predictors: (Constant), ConcDose, Ratio2, Dose2, Conc2, RatioDose, RatioConc, Ratio, Dose, Conc

b. Dependent Variable: DC



ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1324.328	9	147.148	8.043	.006 ^b
	Residual	128.062	7	18.295		
	Total	1452.391	16			

a. Dependent Variable: DC

b. Predictors: (Constant), ConcDose, Ratio2, Dose2, Conc2, RatioDose, RatioConc, Ratio, Dose, Conc

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-39.633	25.375		-1.562	.162
	Ratio	.200	.404	.386	.494	.636
	Conc	4.260	.979	3.952	4.351	.003
	Dose	4.977	.979	4.617	5.083	.001
	Ratio2	-.003	.002	-.532	-1.112	.303
	Conc2	-.089	.015	-4.185	-5.764	.001
	Dose2	-.088	.015	-4.161	-5.731	.001
	RatioConc	.007	.009	.467	.756	.475
	RatioDose	-.005	.009	-.359	-.580	.580
	ConcDose	.003	.015	.091	.179	.863

a. Dependent Variable: DC

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	62.1448	87.4326	73.5406	9.09783	17
Std. Predicted Value	-1.253	1.527	.000	1.000	17
Standard Error of Predicted Value	2.465	3.760	3.255	.425	17
Adjusted Predicted Value	57.7677	88.0305	73.8343	9.93159	17
Residual	-5.91676	5.64560	.00000	2.82912	17
Std. Residual	-1.383	1.320	.000	.661	17
Stud. Residual	-2.391	1.934	-.023	1.098	17
Deleted Residual	17.66931	14.54205	-.29376	8.03791	17
Stud.Deleted Residual	-5.165	2.624	-.119	1.665	17
Mahal. Distance	4.372	11.423	8.471	2.277	17
Cook's Distance	.000	1.135	.219	.326	17
Centered Leverage Value	.273	.714	.529	.142	17

a. Dependent Variable: DC

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ response surface regression ของค่า TD

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.918 ^a	.843	.641	6.24616	.843	4.174	9	7	.036

a. Predictors: (Constant), ConcDose, Ratio2, Dose2, Conc2, RatioDose, RatioConc, Ratio, Dose, Conc

b. Dependent Variable: TD



ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1465.471	9	162.830	4.174	.036 ^b
	Residual	273.101	7	39.014		
	Total	1738.572	16			

a. Dependent Variable: TD

b. Predictors: (Constant), ConcDose, Ratio2, Dose2, Conc2, RatioDose, RatioConc, Ratio, Dose, Conc

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	-15.546	37.055		-.420	.687
Ratio	.461	.590	.813	.780	.461
Conc	5.139	1.430	4.358	3.594	.009
Dose	4.912	1.430	4.165	3.436	.011
Ratio2	-.007	.003	-1.232	-1.929	.095
Conc2	-.106	.023	-4.574	-4.721	.002
Dose2	-.096	.023	-4.130	-4.262	.004
RatioConc	.005	.013	.281	.341	.743
RatioDose	-.002	.013	-.129	-.156	.880
ConcDose	.004	.022	.125	.185	.859

a. Dependent Variable: TD

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	93.8316	121.0236	103.9912	9.57037	17
Std. Predicted Value	-1.062	1.780	.000	1.000	17
Standard Error of Predicted Value	3.599	5.491	4.753	.620	17
Adjust Predicted Value	88.6249	121.5723	104.4391	11.93476	17
Residual	-7.63018	7.10253	.00000	4.13144	17
Std. Residual	-1.222	1.137	.000	.661	17
Stud. Residual	-2.111	2.184	-.024	1.142	17
Deleted Residual	-22.78611	28.61383	-.44793	12.73334	17
Stud. Deleted Residual	-3.242	3.581	-.005	1.517	17
Mahal. Distance	4.372	11.423	8.471	2.277	17
Cook's Distance	.001	1.622	.269	.420	17
Centered Leverage Value	.273	.714	.529	.142	17

a. Dependent Variable: TD

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อภิษฎาดา ขาวสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	สมุทรปราการ
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	908 หมู่ 1 ถนนเทพารักษ์ ตำบลเทพารักษ์ อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัด สมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	Kaowsuwan, A., Piroonpan, T., Potiyaraj, P., Suppavorasatit, I. (2021). Effects of electron beam irradiation doses on physicochemical characteristics of tapioca starch - gelatin nanogel. In Proceedings of the 23rd Food Innovation Asia Conference 2021 (FIAC 2021); 17-18 June 2021; Bangkok, Thailand. p. 156-164.
รางวัลที่ได้รับ	Graduate Student Oral Competition Award in Food Innovation Asia Conference 2021 (FIAC 2021); 17-18 June 2021; Bangkok, Thailand.