



การศึกษาเสถียรภาพและการคงอยู่ของน้ำหอมในไมโครแคปซูล



ณัชชา แก้วโบราณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาเสถียรภาพและการคงอยู่ของน้ำหอมในไมโครแคปซูล



ณัชชา แก้วโบราณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

STUDY OF STABILITY AND RETENTION OF PERFUME IN MICROCAPSULE



NATCHA KAEWBORAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING
IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY

2022

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ณิชชา แก้วโบราณ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพลิน เกาตระกูลวิวัฒน์)

(ศาสตราจารย์ ดร.วิญญู มีอยู่)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สร้อยพิทธา สร้อยสุวรรณ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพลิน เกาตระกูลวิวัฒน์)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ คุรุกิจโกศล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ของมหาวิทยาลัย
บูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.นุจรี ไชยมงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62910165: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมี; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี)

คำสำคัญ: น้ำหอม/ ไมโครแคปซูล/ พอลิอะคริลาไมด์/ สารลดแรงตึงผิว

นิชชา แก้วโบราณ : การศึกษาเสถียรภาพและการคงอยู่ของน้ำหอมในไมโครแคปซูล.

(STUDY OF STABILITY AND RETENTION OF PERFUME IN MICROCAPSULE)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ไพลีน เกาตระการวิวัฒน์ ปี พ.ศ. 2565.

น้ำหอมในผลิตภัณฑ์ซักล้างมีผลต่อการเลือกซื้อ เนื่องจากสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ใช้ระหว่างการซักและสวมใส่ การควบคุมการปลดปล่อยน้ำหอมทำได้โดยเทคโนโลยีเอ็นแคปซูล งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทางการค้าในสภาวะการซักล้าง (อุณหภูมิ ความกระด้าง และความเป็นกรดด่าง) และในสภาวะการผลิตผงซักฟอก (อุณหภูมิของผงซักฟอกขณะเติมน้ำหอม ปริมาณน้ำหอมในผงซักฟอก) อีกทั้งวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง SEM, FTIR, DSC, TGA และ GC-MS พบว่า ไมโครแคปซูลทำจากพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบหลัก มีลักษณะแบบแกนกลางเดี่ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.90 ไมโครเมตร ซึ่งมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเชิงปริมาตร (Volume phase transition temperature; VPTT) เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และพื้นผิวมีประจุลบที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลหลังการซักล้าง 1 ชั่วโมง ที่ 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 10.8 ของปริมาณน้ำหอมทั้งหมดในไมโครแคปซูล ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการปลดปล่อยที่ 60 และ 80 องศาเซลเซียส คิดเป็น 1.5 และ 3.1 เท่าตามลำดับ เนื่องจากการปลดปล่อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า VPTT จะควบคุมโดยการแพร่ผ่านผนังที่ขม่น้ำ ในขณะที่การปลดปล่อยที่อุณหภูมิสูงกว่า VPTT จะควบคุมโดยการบีบตัวของผนัง อีกทั้ง การปลดปล่อยน้ำหอมในการซักล้างด้วยน้ำกระด้าง (50-350 มิลลิกรัม Ca^{2+} ต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นด่างของน้ำซักล้างที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากสิ่งสกปรก ส่งผลให้การซักล้างในน้ำมีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 3 ยังมีการปลดปล่อยได้ดีกว่าการซักล้างที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประจุของพื้นผิวไมโครแคปซูลจากประจุบวกเป็นประจุลบ อีกทั้ง การเพิ่มปริมาณไมโครแคปซูลในผงซักฟอกในช่วงร้อยละ 0.6-1.2 โดยน้ำหนัก ทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมลดลง อาจเป็นเพราะความสามารถในการละลายของน้ำหอมในน้ำที่จำกัด ยิ่งไปกว่านั้น การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะอากาศที่ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบการปลดปล่อยน้ำหอมที่ 80 องศาเซลเซียส สูงกว่าการปลดปล่อยที่ 60 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากความดันไอของน้ำหอมภายในไมโครแคปซูลที่สูงขึ้น และไมโครแคปซูลน้ำหอมสามารถปลดปล่อยน้ำหอมที่ 80 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 23 วัน



62910165: MAJOR: CHEMICAL ENGINEERING; M.Eng. (CHEMICAL ENGINEERING)

KEYWORDS: PERFUME/ MICROCAPSULE/ POLYACRYLAMIDE/ SURFACTANT
NATCHA KAEWBORAN : STUDY OF STABILITY AND RETENTION OF
PERFUME IN MICROCAPSULE. ADVISORY COMMITTEE: PAILIN
NGAOTRAKANWIWAT, 2022.

Fragrance in laundry detergent is a key factor for decision-making of consumers because of the scent pleasant during washing and wearing. A long-lasting fragrance is controllable via encapsulation technology. Release of commercial encapsulated perfume microcapsule while laundering and during detergent production was investigated in this work. The microcapsule properties were characterized by SEM, FTIR, DSC, TGA, and GC-MS. The results showed that the microcapsule is a single-core polyacrylamide-based microcapsule with 8.9 microns in diameter. The microcapsule has a volume phase transition temperature (VPTT) of 40°C and its surface is negatively charged at pH 7. The release of perfume from microcapsules after 1-hour laundering at 30°C is 10.8 of the total perfume contents in microcapsules which is 1.5 and 3.1 times lower than the release in laundering at 60°C and 80°C, respectively. The release at temperature lower than VPTT is diffusion control due to swollen microcapsule behavior, while the microcapsule was squeezed at higher temperature resulting in abruptly releasing. Hardness of water (50-350 mg of Ca²⁺/L) reduced a behavior of perfume release during laundering at 80°C and 60°C, while no significant change was observed at 30°C. The pH of water during laundering inhibited perfume releasing at 3, while as it was facilitated at pH 7 due to a change of surface charge that was shifted from positive to negative. Moreover, the increase of microcapsules in the range of 0.6-1.2 wt% in detergent caused the reduction of perfume release due to the limitation of perfume solubility in the water. Additionally, perfume release in air at various temperatures of 30°C, 60°C, and 80°C were examined. The significant release at 80°C was observed due to higher vapor pressure in the microcapsule in comparison with that at 60°C and 30°C, respectively. Furthermore, microcapsules can release the perfume continuously for at least 23 days at 80°C.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้อย่างดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.ไพฑิณี เกตระการวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำรวมไปถึงการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนการดำเนินงานจนสำเร็จ ด้วยความกรุณา และการช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพิชชา สร้อยสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้ คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำงานวิจัยนี้ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเงินสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัยและพัฒนา เพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับ หน่วยงานภายนอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (วจร. 1/2562) และ โครงการผู้ช่วยวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา ระยะที่ 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (GRA 3/2562) รวมไปถึง บริษัท ไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับงานวิจัยฉบับนี้

ณัชชา แก้วโบราณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์	5
ขอบเขตการดำเนินงาน	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
น้ำหอม	8
ไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation)	14
กลไกการควบคุมการปลดปล่อยของสารภายในไมโครแคปซูล	18
คุณลักษณะของเครื่องซั๊กผ้า	34
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน	35
อุปกรณ์และสารเคมี	35
แผนผังการทดลอง	37
ตอนที่ 1 ศึกษาพื้นฐานวิทยาและสมบัติของไมโครแคปซูล	38
ตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะในการใช้งานที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ด้วย Gas Chromatography; GC	43

ตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำหอมต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำ ซักล้างที่มีผงซักฟอกสำเร็จรูป	46
ตอนที่ 4 ผลกระทบของจากอุณหภูมิที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	48
ตอนที่ 1 ศึกษาพื้นฐานวิทยาและสมบัติของไมโครแคปซูล	48
ตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะการซักที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลใน น้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC).....	59
ตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณไมโครแคปซูลในผงซักฟอกสำเร็จรูปในการปลดปล่อย น้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC).....	68
ตอนที่ 4 ศึกษาผลกระทบของการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ โดยเทคนิค แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	74
บรรณานุกรม	76
ประวัติย่อของผู้วิจัย	81

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	ตัวอย่างสารหอมที่สังเคราะห์ทางเคมี.....	11
ตารางที่ 2-2	ส่วนผสมที่ควรหลีกเลี่ยงในการผสมผงซักฟอก.....	12
ตารางที่ 2-3	ประเภทน้ำหอมที่เหมาะสมสำหรับผงซักฟอก.....	14
ตารางที่ 2-4	ตัวอย่างผนังไมโครแคปซูลที่ใช้ห่อหุ้มสารภายใน.....	17
ตารางที่ 3-1	การเตรียมน้ำกระด้างชนิดต่างๆ.....	45
ตารางที่ 4-1	ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูล.....	50
ตารางที่ 4-2	ปริมาณไมโครแคปซูลที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหอม.....	51
ตารางที่ 4-3	การกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลด้วยโปรแกรม ImageJ.....	52
ตารางที่ 4-4	หมู่ฟังก์ชันของพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide).....	53
ตารางที่ 4-5	องค์ประกอบของน้ำหอมในไมโครแคปซูล.....	58
ตารางที่ 4-6	ค่าแรงดึงผิวของน้ำซักผ้าและการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง.....	69



สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2-1	ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหอมเป็นองค์ประกอบ.....	8
ภาพที่ 2-2	ความเข้มข้นของน้ำหอมในน้ำหอมชนิดต่างๆ.....	9
ภาพที่ 2-3	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิโมนีน เป็น α -terpineol.....	13
ภาพที่ 2-4	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ Octanal เป็น octanoic acid.....	13
ภาพที่ 2-5	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ δ -Hexalactone เป็น Hydroxy acid.....	13
ภาพที่ 2-6	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ Decanal เป็น Acetal.....	13
ภาพที่ 2-7	โครงสร้างไมโครแคปซูล (ก) แกนกลางเดี่ยว (ข) หลายแกนกลาง และ (ค) เมทริกซ์.....	15
ภาพที่ 2-8	วัสดุที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลในการห่อหุ้มน้ำหอม.....	16
ภาพที่ 2-9	กลไกการปลดปล่อยยาจากอนุภาคพอลิเมอร์.....	20
ภาพที่ 2-10	การเปลี่ยนแปลง VPTT ของสารสังเคราะห์ร่วมกับพอลิอะคริลาไมด์ต่อเกลือในสารละลายบัฟเฟอร์.....	21
ภาพที่ 2-11	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เหลืออยู่บนผ้าขนหนูที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอม (ด้านบน) และซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีน้ำหอมที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูล (ด้านล่าง).....	22
ภาพที่ 2-12	ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยน้ำหอมกลิ่นมะลิจากไมโครแคปซูล PMMA ด้วย UV-Vis spectrophotometer.....	23
ภาพที่ 2-13	SEM ของไมโครแคปซูลน้ำหอมที่บรรจุน้ำหอมในปริมาณที่แตกต่างกัน ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ (a) 100 (b) 75 และ (c) 50.....	23
ภาพที่ 2-14	ผลการวิเคราะห์ไมโครแคปซูลน้ำหอมด้วย FTIR (a) ผงไมโครแคปซูล PBDDMA (b) ไมโครแคปซูล (c) สารภายในไมโครแคปซูล (DPO/GTCC).....	24
ภาพที่ 2-15	กราฟ TGA ของไมโครแคปซูลน้ำหอมทำจากพอลิ(1,4-บิวเทนไดออล ไดมทาคริเลต).....	25
ภาพที่ 2-16	แสดงพฤติกรรมการปลดปล่อยของไมโครแคปซูลและสารภายในที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2-17 อัตราการปลดปล่อยของน้ำหอมในไมโครแคปซูลเปรียบเทียบกับ น้ำหอมที่ไม่ได้ห่อหุ้ม.....	26
ภาพที่ 2-18 การปลดปล่อยวานิลลินจากไมโครแคปซูลพอลิซัลโฟน (o) โดยใช้น้ำ กระด้างเป็นตัวกลาง (•) โดยใช้น้ำอ่อนเป็นตัวกลาง.....	27
ภาพที่ 2-19 ภาพถ่ายจาก SEM ของไมโครแคปซูลพอลิซัลโฟน/วานิลลิน.....	27
ภาพที่ 2-20 ภาพจาก SEM ของไมโครแคปซูลที่ใช้วัสดุห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (a) อัลจิ เนต (b) ไคโตซาน (c) ไคโตซาน/อัลจิเนต (d) ไคโตซาน/อินนูลิน.....	28
ภาพที่ 2-21 การพองตัวของไมโครแคปซูลที่ใช้วัสดุห่อหุ้มแตกต่างกันและในสภาวะ pH ต่างกัน (a) การพองตัวในสภาวะ pH 2.5 (b) การพองตัวในสภาวะ pH 6.5.....	29
ภาพที่ 2-22 เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง TGA (a) PMMA (b) PMMA-co-BMA (c) PMMA-co-LMA.....	30
ภาพที่ 2-23 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทำจาก PMMA-co-BMA ในอากาศ.....	30
ภาพที่ 2-24 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทำจาก PMMA-co-BMA ใน สารลดแรงตึงผิวที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 30 องศาเซลเซียส (b) 40 องศา เซลเซียส และ (c) 50 องศาเซลเซียส.....	31
ภาพที่ 2-25 โครมาโทแกรมของผ้าที่ชุบด้วยไมโครแคปซูลน้ำหอมหลังจากการซัก 1) การซัก 1 รอบ 2) การซัก 2 รอบ 3) การซัก 3 รอบ 4) การซัก 4 รอบ และ 5) การซัก 5 รอบ ด้วย GC.....	32
ภาพที่ 2-26 น้ำหนักสัมพัทธ์ของน้ำหอมลิโมนีนที่เกาะติดบนผ้า.....	32
ภาพที่ 2-27 ภาพถ่ายไมโครแคปซูลน้ำหอมจากกล้องจุลทรรศน์.....	33
ภาพที่ 2-28 ข้อมูลความจุของเครื่องซักผ้าและความเร็วรอบในการปั่น ของเครื่องซักผ้า ที่มีขายในท้องตลาด.....	34
ภาพที่ 3-1 แผนผังการดำเนินงาน.....	37
ภาพที่ 3-2 การหาความหนาแน่นของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วย Hemocytometer.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3-3 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ (การตั้งค่ามาตราส่วน)	39
ภาพที่ 3-4 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ (การตั้งค่าเทรซโฮลด์)	40
ภาพที่ 3-5 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ	41
ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ก) แบบใช้แสงกำลังขยาย 10 เท่า (ข) แบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า (ค) ไมโครแคปซูลแกนกลางเดี่ยวจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
ภาพที่ 4-2 ขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูล.....	50
ภาพที่ 4-3 สเปกตรัม FTIR ของผนังไมโครแคปซูล.....	53
ภาพที่ 4-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของไมโครแคปซูล.....	54
ภาพที่ 4-5 เทอร์โมแกรม DSC ของผนังไมโครแคปซูล.....	56
ภาพที่ 4-6 เทอร์โมแกรม TGA ของน้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแขวนลอยอยู่.....	57
ภาพที่ 4-7 โครมาโทแกรมของน้ำหอมในไมโครแคปซูล.....	57
ภาพที่ 4-8 โครมาโทแกรมการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำ (ก) ก่อนซักล้าง (ข) หลังซักล้าง 1 ชั่วโมง การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ (ค) ก่อนอบ (ง) หลังอบ.....	60
ภาพที่ 4-9 พื้นที่ใต้กราฟของพีคทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแขวนลอยอยู่ 3 มิลลิกรัม.....	61
ภาพที่ 4-10 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสภาวะการซักล้างที่ใช้น้ำที่มีแคลเซียมไอออน ซักที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยมีค่าความเป็นกรดเบสของน้ำซักล้างเท่ากับ 7.....	63
ภาพที่ 4-11 การจำลองการล้อมรอบของประจุบนพื้นผิวไมโครแคปซูลที่มีประจุลบ..	64
ภาพที่ 4-12 การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะซักล้างที่มีค่าความเป็นกรดค่าที่ 7 และ 3 ที่อุณหภูมิ (ก) 30 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส และ (ค) 80 องศาเซลเซียส.....	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-13 การจำลองการล้อมรอบของประจุบนพื้นผิวไมโครแคปซูลที่มีประจุบวก	67
ภาพที่ 4-14 การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะซีกล่างที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 7.5 และ 3 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	67
ภาพที่ 4-15 การปลดปล่อยน้ำหอมในผงซีกฟอกสำเร็จรูปที่มีปริมาณไมโครแคปซูลเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยให้ความร้อนอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	69
ภาพที่ 4-16 การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะอากาศ ให้ความร้อนอุณหภูมิ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	71
ภาพที่ 4-17 ภาพถ่าย SEM ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส และ (ข) 90 องศาเซลเซียส.....	71
ภาพที่ 4-18 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสารละลายที่มี Ca^{2+} เพื่อจำลองสภาวะตากผ้า โดยวิเคราะห์ในสภาวะอากาศ.....	72
ภาพที่ 4-19 อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลต่อเวลา.....	73

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ผงซักฟอกได้รับความนิยมนับตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 (Bajpai, 2007) เพื่อทำความสะอาดเสื้อผ้าโดยส่วนประกอบที่สำคัญของผงซักฟอกคือ สารลดแรงตึงผิว สารลดความกระด้างของน้ำ สารเพิ่มฟอง และสารเพิ่มประสิทธิภาพอื่นๆ (สารเพิ่มความสดใส สารช่วยละลาย สารเร่งการฟอก สารป้องกันการตกตะกอน น้ำหอม สี เป็นต้น) นอกจากวัตถุประสงค์ในการทำความสะอาดแล้ว การเติมน้ำหอมในผงซักฟอก เป็นการเพิ่มความประทับใจให้กับผู้บริโภคในระหว่างการซักผ้าและการสวมใส่ กลิ่นหอมจึงมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก จึงทำให้มูลค่าการซื้อขายสารเพิ่มรสชาติและกลิ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2560 มีมูลค่าเพิ่มขึ้นถึง 28.2 พันล้านเหรียญสหรัฐ (Galbraith, 2018) ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 19.5 ของมูลค่าการซื้อขายในปี 2558 และมีการคาดการณ์ว่าจะมีมูลค่าถึง 36 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2565 โดยมูลค่าการซื้อขายน้ำหอมสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอกมีถึงร้อยละ 33 ของมูลค่าการซื้อขายน้ำหอมทั่วโลก ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 44 ของมูลค่าการซื้อขายสารเพิ่มรสชาติและกลิ่น

น้ำหอมประกอบด้วยส่วนผสมหลายชนิด ซึ่งระดับการส่งกลิ่นของน้ำหอม ขึ้นอยู่กับความสามารถในการระเหยแตกต่างกัน แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ Top notes, Middle notes และ Base notes ซึ่งมีความหอมคงทนอยู่ได้ 10-20 นาที 3-6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ (Rodrigues et al., 2009) การระเหยของน้ำหอมยังขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ความร้อน ค่าความกระด้างของน้ำ เป็นต้น (Tekin, Bac, & Erdogmus, 2013) จึงทำให้น้ำหอมที่เติมแต่งในผงซักฟอกจะเกิดการสูญเสียในระหว่างการซักและการผลิต เพื่อให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยน้ำหอม จึงมีการนำเทคนิคไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำวัสดุห่อหุ้มสารเพื่อป้องกันหรือลดการทำปฏิกิริยาระหว่างสารกับสิ่งแวดล้อม โดยไมโครแคปซูลน้ำหอม (Perfume microcapsules) เป็นน้ำหอมที่ถูกบรรจุในวัสดุห่อหุ้ม เพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เพิ่มปริมาณน้ำหอมในการเกาะติดเสื้อผ้าและยืดระยะเวลาในการปลดปล่อย จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการนำเทคนิคไมโครเอนแคปซูลชันมาห่อหุ้มน้ำหอม เช่น การใช้เมลามีนเรซินในการห่อหุ้มน้ำหอมสำหรับซักผ้า พบการคงอยู่ของน้ำหอมบนผ้าที่มีไมโครแคปซูลมีปริมาณน้ำหอมในช่วง Base note สูงกว่าผ้าที่มีน้ำหอมที่ไม่ได้บรรจุในไมโครแคปซูล คิดเป็นร้อยละ 50-70 (H. Zhao, Fei, Cao, Zhang, & Liu, 2019)

การปลดปล่อยสารจากไมโครแคปซูล แบ่งได้ 4 ลักษณะได้แก่ 1) การควบคุมการปลดปล่อยสารด้วยความสามารถในการละลายของผนังไมโครแคปซูล (Dissolution control system) ซึ่งการปลดปล่อยจะขึ้นกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของวัสดุที่ใช้ทำไมโครแคปซูล ในสถานะแวดล้อม และขึ้นกับความหนาของผนังไมโครแคปซูล (Thickness of coating) 2) การควบคุมการปลดปล่อยสารด้วยการแพร่ผ่านผนังไมโครแคปซูล (Diffusion control system) เกิดขึ้นเมื่อผนังไมโครแคปซูลไม่ละลายในสถานะแวดล้อม และการปลดปล่อยเกิดจากการแพร่ผ่านของสารผ่านรูพรุนของผนังไมโครแคปซูล 3) การควบคุมปลดปล่อยสารด้วยการซึมผ่านของน้ำผ่านผนังไมโครแคปซูล (Water penetration control system) ซึ่งนิยมใช้ในสถานะแวดล้อมที่แห้ง เมื่อไมโครแคปซูลสัมผัสกับน้ำ จะเกิดการดูดซับน้ำและผนังจะเกิดการบวม (Swelling) ทำให้ความดันภายในไมโครแคปซูลผลักดันให้สารเกิดการปลดปล่อย และ 4) การควบคุมการปลดปล่อยสารโดยเคมี (Chemically control system) เป็นการปลดปล่อยเมื่อผนังเกิดการเสื่อมสลายเมื่อสัมผัสกับน้ำ (Degradation) เช่น ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นผนังที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) โดยเมื่อไมโครแคปซูลอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า VPTT ไฮโดรเจลจะมีสมบัติชอบน้ำและเกิดการบวมตัวขึ้น (Swelling) ซึ่งการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลนี้จะเป็นการแพร่ผ่านผนัง (Diffusion) ในทางตรงข้าม เมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่า VPTT ไฮโดรเจลจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำและเกิดการหดตัวเกิดขึ้น (Shrinkage) ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารจำนวนมาก เนื่องจากการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งห่อหุ้มสารไว้ รวมถึงการแตกออกของไฮโดรเจลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันภายในไมโครเจล (Osmotic pressure) เมื่อเกิดการหดตัวของผนังไฮโดรเจล (Jamdade, Chaudhari, & Pondkule, 2021) โดยปัจจัยที่ควบคุมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจล ขึ้นกับ ความสัมพันธ์ของสารภายในกับพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของตัวเชื่อมโครงข่าย (Crosslink density) ความสัมพันธ์ของขนาดรูพรุนและน้ำหนักโมเลกุลของสารภายใน อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเชิงปริมาตร การคลายตัวของของโมเลกุลไฮโดรเจล วิธีการบรรจุสารภายใน ตลอดจนลักษณะความชอบน้ำ (Trongsatitkul & Budhlall, 2013)

ผงซักฟอกที่มีการเติมแต่งด้วยไมโครแคปซูลน้ำหอม จะถูกนำไปใช้ในสถานะต่างๆ ดังนี้ สถานะในการซักล้าง จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำซักล้าง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำซักล้าง ค่าความกระด้างของน้ำซักล้าง เป็นต้น สำหรับสถานะการตากแห้ง จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยข้างต้น ที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ดังนี้

การปลดปล่อยสารจากไมโครแคปซูลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม สำหรับกรณีที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสารด้วยการแพร่ผ่านผนังไมโครแคปซูล (Diffusion control system) พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมวานิลลาจากไมโครแคปซูลที่วางอยู่ในอากาศที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 100 องศาเซลเซียส โดยการปลดปล่อยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากความดันไอของน้ำหอมวานิลลาที่เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสารโดยเคมี (Chemically control system) พบว่า ไมโครแคปซูลประเภทไฮโดรเจลที่ทำจากพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) จะมีการเปลี่ยนแปลงของผนังสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเชิงปริมาตร (Volume phase transition temperature; VPTT) ซึ่งอุณหภูมินี้จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤติล่างที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่รวมตัวกับน้ำ (Lower critical solution temperature; LCST) โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า VPTT ของพอลิอะคริลาไมด์ซึ่งมีค่าประมาณ 32 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยจะถูกควบคุมด้วยการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารภายในไมโครแคปซูลและสิ่งแวดล้อมภายนอก และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็น 37 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นที่อุณหภูมิสูงกว่า VPTT พบว่า อัตราการปลดปล่อยจะมีค่าประมาณร้อยละ 50 และ 72 ซึ่งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อัตราการปลดปล่อยมีค่าประมาณร้อยละ 40) ซึ่งการปลดปล่อยที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เนื่องจากการบีบ (Squeezing) ตัวของผนังและการพังทลายของโครงข่าย (Bulk network collapse) ภายในไมโครแคปซูล รวมถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของสารที่ส่งเสริมให้การแพร่เพิ่มขึ้น (Trongsatitkul & Budhlall, 2013) ยิ่งไปกว่านั้น การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่ทำจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตผสมพาราฟินในน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate; SDS) เข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 40 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของพาราฟินจากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้มีการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลไปสู่ตัวกลางภายนอกได้มากขึ้น และสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำหอมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การปลดปล่อยของน้ำหอมเพิ่มขึ้น (Zhang, Song, & Chen, 2016)

การปลดปล่อยสารจากไมโครแคปซูลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่าง (pH) และอิทธิพลของไอออนในสภาวะแวดล้อม สำหรับกรณีที่มีการควบคุมปลดปล่อยสารด้วยการซึมผ่านของน้ำผ่านผนังไมโครแคปซูล (Water penetration control system) พบว่าการแขวนลอยของไมโครแคปซูลในน้ำที่ pH 2.5 หากผนังไมโครแคปซูลทำจากอัลจินต จะมีการพองตัวต่ำ เนื่องจากอัลจินตสามารถเปลี่ยนเป็นกรดแอลจินิกซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ในทางกลับกัน หาก

ผนังไมโครแคปซูลทำจากไคโตซาน จะมีการพองตัวมาก เนื่องจากไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง เมื่อปรับ pH ให้มีค่า 6.5 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าการแตกตัวของกรด (Constant acidity; pKa) ของสารอัลจินเตต ($pK_{a_{Alg}} = 3.5$) กลุ่มคาร์บอกซิลของกรดยูนิคจะแตกตัวเป็นไอออนอย่างสมบูรณ์ ช่วยให้น้ำซึมผ่านไมโครแคปซูลอัลจินเตตได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าการพองตัวมีค่าสูงขึ้น (Dima, Patrascu, Cantaragiu, Alexe, & Dima, 2016) สำหรับกรณีที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสารด้วยการแพร่ผ่านผนังไมโครแคปซูล (Diffusion control system) พบว่าการปลดปล่อยน้ำหอมวานิลลินจากไมโครแคปซูลทำจากพอลิซัลโฟน (Polysulfone) ในน้ำประปา (pH 8.1) เปรียบเทียบกับน้ำปราศจากไอออน (pH 7.2) พบว่าการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำประปาสูงถึงร้อยละ 90 ของน้ำหอมทั้งหมด และมีค่าสูงกว่าการปลดปล่อยในน้ำปราศจากไอออนประมาณ 2 เท่า เนื่องจาก การเพิ่มความเป็นกรดต่างจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของวานิลลินในน้ำ จึงทำให้การแพร่เกิดได้ดี ยิ่งไปกว่านั้น การมีอยู่ของแคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำทำให้เกิดไบคาร์บอเนตและซัลเฟต ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสูงขึ้นด้วย (Pena, Panisello, Aresté, Garcia-Valls, & Gumí, 2012)

สำหรับกรณีที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสาร โดยเคมี (Chemically control system) พบว่าอิทธิพลของไอออนในน้ำที่มีชนิดและปริมาณไอออนที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง VPTT ของนาโนเจลที่มีอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบ (Acrylamide-based nanogels) เป็นไปตามลำดับฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series: $CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > S_2O_3^{2-} > H_2PO_4^{2-} > F^- > Cl^- > Br^- \approx NO_3^- > I^- > ClO_4^- > SCN^-$) ซึ่งเป็นความสามารถของประจุลบ (Anionic) ในการเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ (Salting-in) และลดความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ (Salting-out) (Hyde et al., 2017) ซึ่งการเพิ่ม/ลดความสามารถการละลายน้ำ ส่งผลโดยตรงต่อค่า VPTT โดยไอออนที่ทำให้เพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ จะทำให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์สูงขึ้น ในทางกลับกัน ไอออน ที่ลดความสามารถในการละลายน้ำ จะทำให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งมีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า VPTT ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากพอลิอะคริลาไมด์ (Poly(acrylamide)) ร่วมกับพอลิอะคริลิกแอซิด (Poly(acrylic acid)) ในน้ำที่มีไอออนลบที่มีความเข้มข้นในช่วง 0-0.4 M พบว่า การมีอยู่ของ I^- และ SCN^- ทำให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์ลดลงจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 25 และ 17 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ การมีอยู่ของ SO_4^{2-} และ Cl^- ทำให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์เพิ่มจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 37 และ 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ (Beaudoin et al., 2021) อีกทั้งยังมีการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยสารจากไฮโดรเจล ที่เกิดจากการสังเคราะห์พอลิอะคริลาไมด์ (Poly(acrylamide)) ร่วมกับพอลิอะคริลิกแอซิด (Poly(acrylic acid)) ซึ่งสารทั้งสองเป็นผู้ให้โปรตอน (H-donor) และผู้รับโปรตอน (H-acceptor) ตามลำดับ ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่เอไมด์ ($-CONH_2$) กับหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ในสารทั้งสอง (“Zipper-like” hydrogen bond)

เกิดการห่อหุ้มสารภายในไฮโดรเจล โดยการปลดปล่อยสารจะเกิดขึ้นจากการทำลายพันธะไฮโดรเจน (Beaudoin et al., 2021) ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด่างของสารที่ไฮโดรเจลแขวนลอยอยู่ อีกทั้งยังพบว่า การลด pH ในช่วง 7.4 ถึง 5.2 ในน้ำ ที่ไฮโดรเจลแขวนลอยอยู่ที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจน ระหว่างสารในไฮโดรเจลกับหมู่คาร์บอกซิลิก (NBA-COOH) (Salinas, Castilla, & Resmini, 2018) รวมถึงการทำลายพันธะไฮโดรเจนด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า VPTT (Beaudoin et al., 2021) ทำให้การปลดปล่อยสารจากไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นสภาพแวดล้อมที่ไมโครแคปซูลแขวนลอยอยู่นั้น มีผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมในไมโครแคปซูลเป็นอย่างมาก ได้แก่ อุณหภูมิ ความกระด้างของน้ำ ความเป็นกรด่าง รวมไปถึงตัวกลางที่ไมโครแคปซูลอยู่ อีกทั้ง ในขั้นตอนการสเปรย์น้ำหอมผสมกับผงซักฟอกในกระบวนการผลิตนั้น มีอุณหภูมิสูงถึง 50 - 60 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่ใช้สำหรับผงซักฟอก ในสภาวะการใช้งานสำหรับผู้บริโภค (การซัก ตาก อบ) และการสเปรย์น้ำหอมลงบนผงซักฟอกในกระบวนการผลิต เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงสูตรผงซักฟอกและกระบวนการผลิต

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลกระทบของสภาวะการใช้งานสำหรับผู้บริโภค (ซัก ตาก อบ) ได้แก่ อุณหภูมิ ความกระด้างของน้ำ ปริมาณน้ำหอมที่เติมลงผงซักฟอก และ อุณหภูมิการสเปรย์น้ำหอมในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล

ขอบเขตการดำเนินงาน

ตัวแปรควบคุม

1. ไมโครแคปซูลน้ำหอมทางการค้า สารลดแรงตึงผิว และผงซักฟอก ได้จากบริษัท ไลอ้ออน (ประเทศไทย) จำกัด
2. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยอยู่ในสารตัวกลาง
 - 2.1 ศึกษาขนาดและรูปร่าง โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)
 - 2.2 ศึกษาการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)
3. การวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูล

3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำหอมในไมโครแคปซูล โดยเครื่อง

Gas Chromatograph-mass spectrometer; GCMS

3.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผนังไมโครแคปซูล โดยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR

3.3 วิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของผนังไมโครแคปซูล ด้วยเครื่อง Zetasizer

3.4 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย Differential scanning calorimetry DSC และ Thermogravimetric Analysis; TGA

4. การวิเคราะห์การปลดปล่อยน้ำหอมในไมโครแคปซูล วิเคราะห์ได้โดย

วิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค Headspace gas Chromatograph-flame ionization detector; GC-FID โดยควบคุมอุณหภูมิเตาให้ความร้อน (Oven temperature) 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิตรวจจับ (Detector temperature) 230 องศาเซลเซียส อุณหภูมิฉีดสารตัวอย่าง (Injector temperature) 150 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สตัวพาเป็นฮีเลียม อัตราการไหล 0.5 มิลลิตรต่อนาที

5. การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ขนาด 20 มิลลิตร

5.1 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในตุ๊กกลางเป็นอากาศ ที่มีให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในตุ๊กกลางเป็นของเหลว โดยบรรจุสารละลายลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนตร้อยละ (Active ingredients; AI) เท่ากับ 21 กับไมโครแคปซูลปริมาณต่างๆ ปั่นด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ตามมาตรฐานการชั่ง BS EN 20105-C01 : 1993 (STANDARD & ISO, 2002)

ตัวแปรต้น

1. อุณหภูมิ

1.1 สภาวะการผลิตผงซักฟอก

ตุ๊กกลางเป็นอากาศ 60 องศาเซลเซียส (จำลองขั้นตอนการสเปรย์น้ำหอมบนผงซักฟอก 50-60 องศาเซลเซียส)

1.2 สภาวะการใช้งานสำหรับผู้บริโภค

1.2.1 ตุ๊กกลางเป็นอากาศ 30 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะขณะตากผ้าจาก 30-40 องศาเซลเซียส) 80 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะขณะอบผ้า 60-80 องศาเซลเซียส)

1.2.2 ตุ๊กกลางเป็นของเหลว 30 องศาเซลเซียส (จำลองขณะซักผ้าในน้ำเย็น) 60 องศาเซลเซียส (จำลองขณะซักผ้าในน้ำอุ่น) และ 80 องศาเซลเซียส (จำลองขณะซักผ้าในน้ำร้อน)

2. ค่าความกระด้างของน้ำ ได้แก่ CaCO_3 50, 150, 250 และ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเป็นการจำลองการซักในน้ำอ่อน (0-75 มิลลิกรัมต่อลิตร) น้ำอ่อนข้างกระด้าง (75-150 มิลลิกรัมต่อลิตร) น้ำกระด้าง (150-300 มิลลิกรัมต่อลิตร) และน้ำกระด้างมาก (300 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป) ตามลำดับ

3. ปริมาณน้ำหอมที่เติมลงผงซักฟอกความเข้มข้นร้อยละ 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนักตัวแปรตาม
ปริมาณน้ำหอมที่ปลดปล่อยจากไมโครแคปซูล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

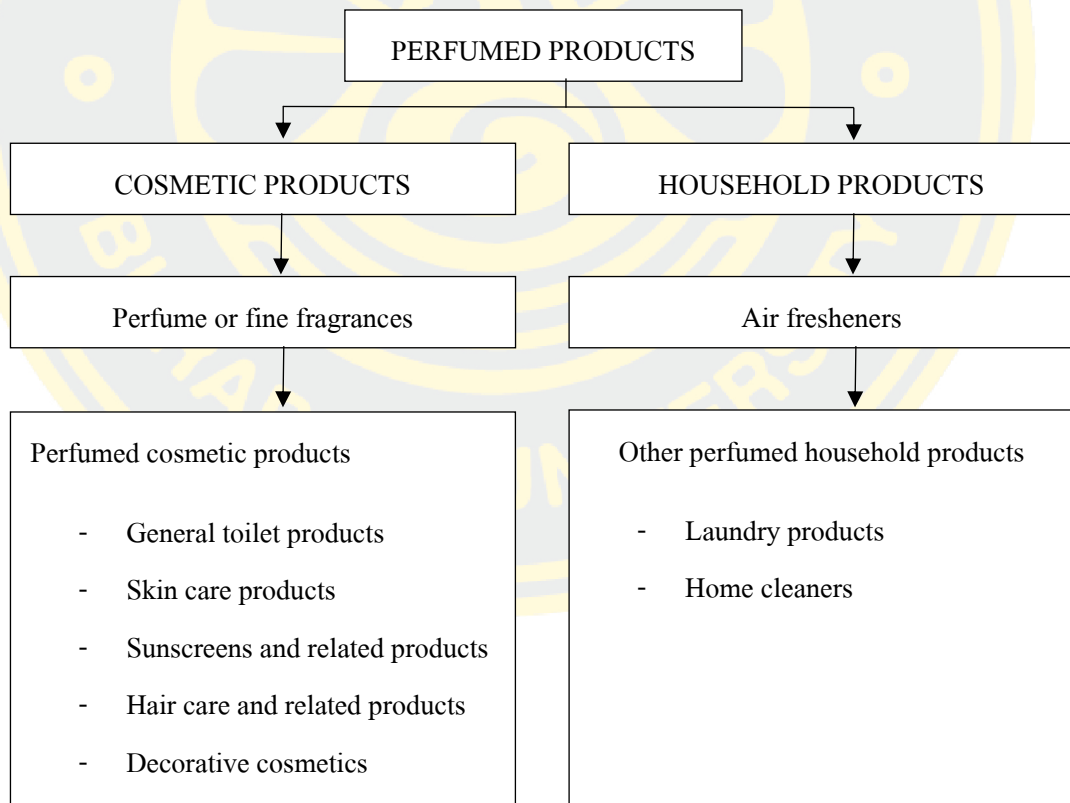
1. ทราบถึงผลกระทบของสภาวะการใช้งานผงซักฟอกที่มีไมโครแคปซูลที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล
2. เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำไปพัฒนาสูตรการผลิตผงซักฟอกและปรับปรุงกระบวนการผลิตผงซักฟอก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำหอม

ปัจจุบันมีการใช้น้ำหอมมากกว่า 2,500 กลิ่นในผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนดังภาพที่ 2-1 น้ำหอม (Perfumes) ที่ใช้ในเครื่องสำอางจะมีส่วนผสมที่ซับซ้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ เรียกว่า น้ำหอมชั้นดี (Fine fragrances) ยิ่งไปกว่านั้นยังมีการใช้น้ำหอมชั้นดีกับผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีกลิ่นหอมอื่นๆ เช่น เจลอาบน้ำ สบู่ ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหน้าและผิวกาย ผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม และผลิตภัณฑ์แต่งหน้า (Chisvert, López-Nogueroles, & Salvador, 2018)



ภาพที่ 2-1 ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหอมเป็นองค์ประกอบ (Chisvert et al., 2018)

น้ำหอมชั้นดี คือสารละลายไฮโดรทานอลิก (Hydroethanolic) โดยเตรียมจากสารเคมีอะโรมาติก (Aromatic chemicals) และน้ำมันหอมระเหย (Essential oils) โดยแบ่งประเภทน้ำหอมตามความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยได้ดังนี้ พาร์ฟุ่ม (Parfum) โอเดอพาร์ฟุ่ม (Eau de Parfum; EDP) โอเดอตัวเลตต์ (Eau de Toilette; EDT) โอเฟรช (Eau Fraiche) โอเดอโคโลญจน์ (Eau de Cologne; EDC) โคโลญจน์ (Cologne) และเบบี้โคโลญจน์ (Baby Cologne) ดังภาพที่ 2-2 แสดงความเข้มข้นของน้ำหอมโดยปริมาณน้ำหอมชนิดต่างๆ (Chisvert et al., 2018)

ผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนจะใช้น้ำหอมเป็นองค์ประกอบเพื่อปรับกลิ่นของสารเคมี เช่น น้ำหอมที่ใช้ในเพื่อปรับอากาศ หรือใช้น้ำหอมกับสิ่งทำความสะอาด เช่น น้ำยาปรับผ้านุ่ม น้ำยาซักผ้า ผงซักฟอก น้ำยาทำความสะอาดห้องน้ำ เป็นต้น (Chisvert et al., 2018)

Parfum	20-40%
Eau de Parfum	15-20%
Eau de Toilet	5-15%
Eau Fraiche	4-5%
Eau de Cologne	3-4%
Cologne	2-3%
Baby cologne	1-2%

ภาพที่ 2-2 ความเข้มข้นของน้ำหอมในน้ำหอมชนิดต่างๆ (Chisvert et al., 2018)

แหล่งที่มาของสารหอม

สารหอมสามารถสกัดได้จากแหล่งธรรมชาติและสังเคราะห์ทางเคมี (Buccellato, 2007; Chisvert et al., 2018; Fahlbusch et al., 2000) ดังนี้

ส่วนผสมที่ได้จากพืช เช่น ดอกไม้ (มะลิ กุหลาบ พุด) ผลไม้ (มะนาว ส้ม) ราก (หญ้าแฝก ชิตรัต) ใบ (พืชมเสน ไวโอเลต) ไม้ (หญ้าแฝก ไม้จันทน์ ไม้ซีดาร์ ไม้กฤษณา ไม้ไผ่) เปลือก (อบเชย ลูกจันทน์เทศ) เรซิน (กำยาน สน) เมล็ด (ดั่งกฤษ โทโก้ ผักชี) หรือพืชบางชนิดสามารถใช้ได้ทุกส่วนของพืช (ลาเวนเดอร์ เจอเรเนียม) โดยส่วนผสมจากพืชเหล่านี้ได้มาจากกระบวนการที่แตกต่างกัน

1. การต้มกลั่น (Hydrodistillation) โดยการนำพืช (ลาเวนเดอร์ กุหลาบ) แช่น้ำแล้วต้มจนเดือด ทำให้เกิดการแตกของเซลล์พืชและน้ำมันหอมระเหยจะแยกลอยตัวขึ้นมา

2. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นวิธีที่ใช้กับดอกไม้ที่มีองค์ประกอบที่ละลายตัวได้ด้วยความร้อน เช่น มะลิ ช่อนกลิ่น เนื่องจากเป็นวิธีที่หลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ได้น้ำมันดอกไม้ที่มีความเข้มข้นสูง หลังจากการสกัดต้องระเหยตัวทำละลายออกให้หมด

3. Soxhlet extraction เป็นวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำ ทำการให้ความร้อนจนตัวทำละลายระเหยแล้วกลั่นตัวลงมา วิธีนี้อาจทำให้สารบางชนิดละลายตัวได้เนื่องจากความร้อน

4. Supercritical fluid extraction เป็นวิธีที่ช่วยให้กระบวนการสกัดเกิดเร็วขึ้น หลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

5. การสกัดด้วยไขมัน (Enfleurage) เป็นการนำดอกไม้โรยบนไขมันสัตว์ เก็บที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลา 1 -3 วัน เพื่อให้ไขมันดูดซับน้ำมันหอมจากดอกไม้ จากนั้นเติมแอลกอฮอล์เพื่อละลายไขมันที่ไม่ต้องการ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายสูง ไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน

6. การหมัก (Maceration) ดอกไม้จะถูกแช่น้ำมันจนส่วนที่มีกลิ่นหอมละลาย วิธีนี้จะใช้เวลานาน มักมีการให้ความร้อนเพื่อเร่งกระบวนการ

ส่วนผสมที่ได้จากสัตว์ สัตว์บางชนิดมีสารคัดหลั่งที่มีกลิ่นช่วยเพิ่มการแพร่ของน้ำหอม หรือสามารถป้องกันการระเหยของสารระเหยในน้ำหอมได้ เช่น อำพันทะเล (Ambergris) เป็นผลิตภัณฑ์จากวาฬหัวทุย กลิ่นมัสค์ (มัสก์) ได้จากต่อมของกวางชะมดเพศผู้ กลิ่นซีเวต (Civet) ได้จากต่อมเมวชะมด คาสโตเรียม (Castoreum) เป็นกลิ่นที่ได้จากบีเวอร์ Hyraceum ได้จากต่อมของหนูตะเภา Honeycomb เป็นกลิ่นที่สกัดได้จากรังผึ้ง ส่วนผสมจากธรรมชาติที่ผลิตมาจากสัตว์ส่วนมากจะสกัดโดยใช้กระบวนการหมักแอลกอฮอล์

ส่วนผสมที่สังเคราะห์ทางเคมีนั้นมีหลายชนิด สังเคราะห์ขึ้นเพื่อเลียนแบบกลิ่นน้ำหอมธรรมชาติและสังเคราะห์เพื่อสร้างน้ำหอมกลิ่นใหม่ โดยส่วนผสมสังเคราะห์สามารถแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้ ตารางที่ 2-1 โดยส่วนผสมสังเคราะห์ทางเคมีนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสกัดจากธรรมชาติ ง่ายและสะดวกต่อการทำซ้ำ การใช้ส่วนผสมทางธรรมชาติอาจพบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของพืช และปัญหาจากการใช้สารจากสัตว์ จึงทำให้สารสังเคราะห์มีราคาถูกและมีความผันแปรต่ำ อย่างไรก็ตามการเลือกวัตถุดิบขึ้นอยู่กับกลิ่นที่ต้องการของกลุ่มเป้าหมาย ประเภทของการใช้งาน และราคาของผลิตภัณฑ์

ตลาดโลกสำหรับรสชาติและกลิ่น (THE GLOBAL FLAVOURS & FRAGRANCES MARKET) มูลค่าถึง 28.2 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2560 เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.6 จากปี 2559 และคาดว่าจะเติบโตในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.9 ต่อปี และในปี 2565 จะมีมูลค่าถึง 36 พันล้านเหรียญสหรัฐ

ซึ่งแบ่งเป็นตลาดของรสชาติร้อยละ 55 และตลาดน้ำหอมร้อยละ 44 จากตลาดโลกทั้งหมด ยิ่งไปกว่านั้นอุตสาหกรรมสบู่และผงซักฟอกมีการใช้น้ำหอมมากที่สุดในโลกถึงร้อยละ 33 ตามด้วยเครื่องสำอางและอุปกรณ์อาบน้ำอีกร้อยละ 29 (Galbraith, 2018)

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างสารหอมที่สังเคราะห์ทางเคมี (Chisvert et al., 2018)

โครงสร้างทางเคมี	สารประกอบ
แอลกอฮอล์ (Alcohol)	β -Citronellol, eugenol, geraniol, linalool, menthol
แอลดีไฮด์ (Aldehyde)	Benzaldehyde, citral, hexyl cinnamal, anisaldehyde, วานิลลิน
ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)	Nonane, tetradecane, camphene
เทอร์พีน (Terpene)	Limonene, myrcene, α -pinene
เซสควิเทอร์พีน (Sesquiterpenes)	Bisabolol, Humulene, Caryophyllene
เอสเตอร์ (Ester)	Methyl salicylate, menthyl lactate, terpineol acetate
อีเทอร์ (Ether)	Anethole, eucalyptol
คีโตน (Ketone)	Cyclohexanone, campho
แล็กโทน (Lactone)	Coumarin, 6-methyl-coumarin, γ -undecalactone

ระดับของกลิ่น (Perfume notes)

ในการผลิตน้ำหอมจะมีส่วนผสมของสารหอมชนิดต่างๆ เนื่องจากกลิ่นและอัตราการระเหยของน้ำหอมที่เวลาแตกต่างกัน สารประกอบที่ระเหยง่ายจะส่งกลิ่นในช่วงแรก ขณะที่สารประกอบที่ระเหยได้ยากกว่าจะส่งกลิ่นในภายหลัง จึงแบ่งระดับของกลิ่นได้ 3 ระดับ (Rodrigues et al., 2009)

1. Top notes: กลิ่นที่สัมผัสได้ทันที โดยจะส่งกลิ่นได้นาน 10 - 20 นาทีแรกหลังจากใช้น้ำหอม เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมีการระเหยอย่างรวดเร็ว ให้กลิ่นที่สดชื่น

2. Middle notes: กลิ่นที่เกิดขึ้นหลังจาก Top notes กลิ่นในช่วงนี้จะส่งกลิ่นช่วง 3 - 6 ชั่วโมงหลังจากการใช้น้ำหอม ให้กลิ่นที่นุ่มนวล เป็นกลิ่นหลักของน้ำหอม โดยส่วนมากจะเป็นกลิ่นดอกไม้

3. Base notes: กลิ่นที่รับรู้ได้หลังจาก Middle notes เป็นกลิ่นที่สามารถส่งกลิ่นได้ถึง 24 ชั่วโมง เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนโมเลกุลใหญ่ ระเหยได้ช้า เช่น กลิ่นไม้และมัสค์

น้ำหอมสำหรับเครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์อาบน้ำ และผลิตภัณฑ์ครัวเรือน

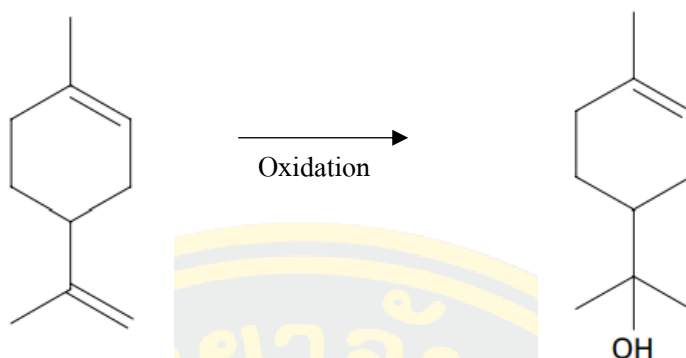
สำหรับเครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์อาบน้ำ และผลิตภัณฑ์ครัวเรือน น้ำหอมมักจะมี ความสำคัญรองจากประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ แต่กลิ่นหอมยังคงมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค การนำน้ำหอมมาเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ครัวเรือนจะต้องคำนึงถึงหลัก ทางด้านเคมีและฟิสิกส์ด้วยเช่นกัน เช่น น้ำมันหอมจะต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีสำหรับครีมและ สบู่สีขาว น้ำมันหอมสำหรับโลชั่นที่ใช้หลังโกนหนวดต้องละลายในแอลกอฮอล์ได้ร้อยละ 50-60 น้ำหอมสำหรับผงซักฟอกจะต้องทนต่อความเป็นด่าง กล่าวคือน้ำหอมที่ใช้จะต้องให้กลิ่นที่พึง พอใจและไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ (Fernandez-Gonzalez, 2012)

การใช้น้ำหอมในผงซักฟอกและน้ำยาปรับผ้านุ่มต้องคำนึงถึงการอยู่ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารซักล้าง สารลดแรงตึงผิวมีส่วนประกอบที่มีขี้และไม่มีขี้ ซึ่ง ส่วนที่มีขี้จะสามารถละลายน้ำมันที่ติดอยู่บนเสื้อผ้าลงสู่น้ำเพื่อกำจัดคราบสกปรก ใน ขณะเดียวกันสารลดแรงตึงผิวสามารถละลายน้ำหอมได้อีกด้วย จึงทำให้น้ำหอมถูกทิ้งไปกับน้ำซัก ผักระหว่างการซัก อีกทั้งน้ำหอมสามารถระเหยระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นน้ำหอมที่ใช้จะต้องมี ความเสถียร และไม่เสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงควรหลีกเลี่ยงส่วนผสมของน้ำหอมที่มี การระเหยได้ง่ายในการผสมลงในผงซักฟอกแสดงดังตารางที่ 2-2 โดยกลิ่นหอมจะต้องมีความเสถียร อย่างน้อย 1 ปีหลังจากการวางขายในท้องตลาด ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันของน้ำหอมและไม่ควร ทิ้งคราบตกค้างบนเสื้อผ้า (Buccellato, 2007)

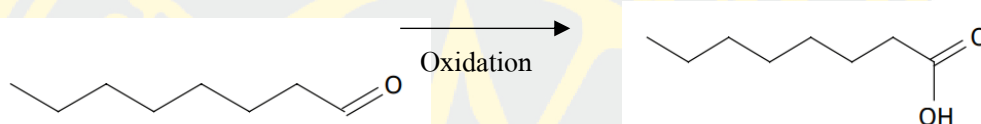
ตารางที่ 2-2 ส่วนผสมที่ควรหลีกเลี่ยงในการผสมผงซักฟอก (Buccellato, 2007)

ส่วนผสม	เหตุผล
สารให้กลิ่นตระกูลส้ม	ลิโมนีน (ลิโมนีน) เป็นสารระเหยและเกิดการออกซิไดซ์ได้ง่าย เป็นสารประกอบแอลดีไฮด์
สารองค์ประกอบโมเลกุลต่ำหรือแอลดีไฮด์	ระเหยง่าย เกิดการออกซิไดซ์กับกรดได้ง่าย

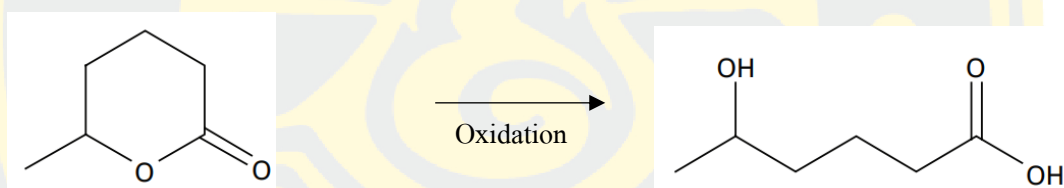
โครงสร้างของสารให้กลิ่นตระกูลส้ม กลุ่มแอลดีไฮด์มีส่วนประกอบของคาร์บอนในช่วง C8 – C12 สารประกอบแอลดีไฮด์ทั้งหมดมีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน และสามารถสร้างกรดที่ อาจส่งกลิ่นไม่พึงประสงค์ ได้แก่ α -terpineol, Octanoic acid และ Hydroxy acid แสดงดังภาพ ที่ 2-3 ถึง 2-5 หากมีแอลกอฮอล์หรือกลีเซอรอลอยู่แอลดีไฮด์จะเปลี่ยนภาพเป็นอะเซทัล (Acetals) หรือเฮมิอะเซทัล (Hemiacetals) ดังภาพที่ 2-6 เนื่องจากอะเซทัลมีความเสถียรภาพมากและเป็น สารเคมีที่ดีในผงซักฟอก



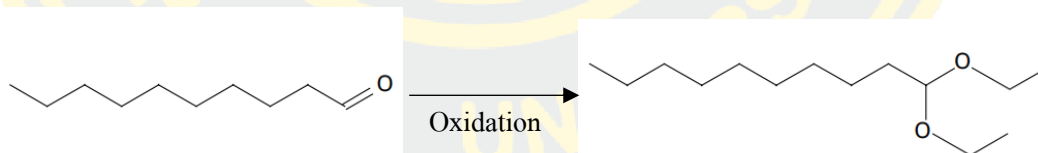
ภาพที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิโมนีน เป็น α -terpineol (Buccellato, 2007)



ภาพที่ 2-3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ Octanal เป็น octanoic acid (Buccellato, 2007)



ภาพที่ 2-5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ δ -Hexalactone เป็น Hydroxy acid (Buccellato, 2007)



ภาพที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ Decanal เป็น Acetal (Buccellato, 2007)

น้ำหอมในผงซักฟอกที่มีประสิทธิภาพมักจะให้กลิ่นที่สดชื่นและกลิ่นที่สะอาดในทุกขั้นตอนของการใช้งาน ซึ่งหมายถึงความประทับใจของผู้บริโภคจากการรับรู้กลิ่น ในขณะที่เดียวกันควรได้รับกลิ่นหอมสดชื่นและสะอาดบนเสื้อผ้า ไม่ว่าจะเป็นผ้าที่ตากแห้งบนราวตากผ้า หรือผ้าที่แห้งจากเครื่องอบผ้า โดยอุณหภูมิของเครื่องอบผ้าสูงถึง 90 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรใช้ส่วนผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 150 เนื่องจากระเหยได้ยากระหว่างการซักและปั่นแห้ง ยิ่งไปกว่านั้นยังมีน้ำหอมที่สามารถเกาะติดผ้าได้ดีแสดงดัง ตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ประเภทน้ำหอมที่เหมาะสมสำหรับผงซักฟอก (Buccellato, 2007)

ประเภทสารเคมี	น้ำหนักโมเลกุล	กลิ่น
มัสค์ (มัสค์)	236-284	มัสค์ เกาะติดเสื้อผ้าได้ดีมาก
ซาลิไซเลต (Salicylates)	150-250	แป้งดอกไม้
แอนทรานิลเลต (Anthranilates)	153-273	ดอกไม้ กลิ่นติดทน
คีโตน (Ketones)	130-280	ผสมระหว่างผลไม้และดอกไม้
ไนไตรท์ (Nitriles)	150-220	กลิ่นส้มที่มีลักษณะกลิ่นสะอาด เป็นการปรับปรุงเสถียรภาพของแอลคิลไฮโดรไทม์ ความเสถียรและติดทน

จากปัญหาข้างต้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำหอมให้คงอยู่บนเสื้อผ้าในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะต้องทำให้น้ำหอมมีความเสถียร และคงกลิ่นอยู่บนเสื้อผ้าเป็นเวลานาน ทนต่อสิ่งแวดล้อมและแรงทางกล และไม่เกิดการออกซิไดซ์ของน้ำหอม เทคโนโลยีที่นำมาใช้พัฒนาน้ำหอมคือ เทคนิคไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation)

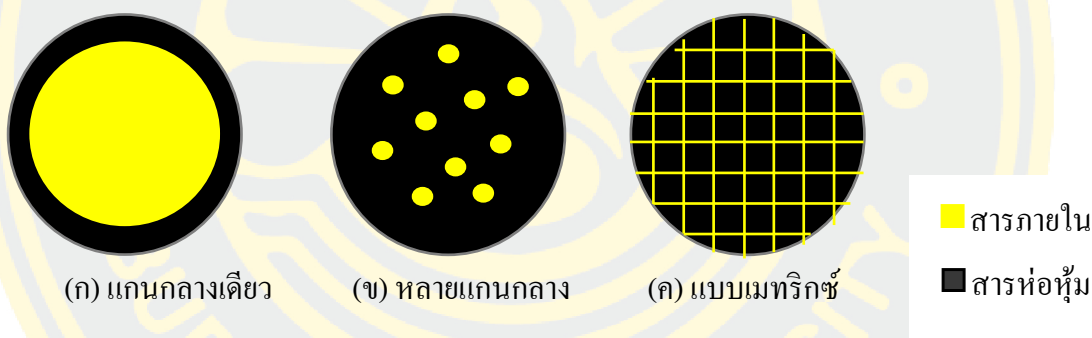
ไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation)

ไมโครเอนแคปซูลชัน เป็นเทคนิคการห่อหุ้มสารภายในวัสดุชนิดหนึ่ง เพื่อป้องกันองค์ประกอบของสารภายในจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ความร้อน ความชื้น อากาศ และแสง โดยทั่วไปไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นทรงกลม สารที่ถูกห่อหุ้มเรียกว่า สารออกฤทธิ์ (Active ingredient) หรือสารแกนกลาง (Internal phase or Core material) วัสดุที่นำมาห่อหุ้มเรียกว่า วัสดุเคลือบผิว (Coating) เมมเบรน (Membrane) เปลือก (Shell) หรือผนัง (Wall material) ปัจจุบันมีการใช้ไมโครแคปซูลกันอย่างแพร่หลายเพื่อห่อหุ้ม หมัก สารเคมีทางการเกษตร รสชาติ ยา กาว และวัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase change materials) (Tekin et al., 2013)

ประเภทของไมโครแคปซูล

โครงสร้างของไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับวัสดุและวิธีการในการเตรียม ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างไมโครแคปซูล 3 ประเภทหลักได้แก่ ไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว (Mononuclear) ไมโครแคปซูลแบบหลายแกนกลาง (Polynuclear) และไมโครแคปซูลแบบเมทริกซ์ (Matrix) (Jamdade et al., 2021; Nesterenko, Alric, Silvestre, & Durrieu, 2013; Tolve et al., 2016)

ไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว (Mononuclear) โดยไมโครแคปซูลจะประกอบด้วย ส่วนของแกนกลาง และ เปลือก (Core-Shell) สารภายในจะมีเพียงแกนกลางเดี่ยวเท่านั้นและ ถูกล้อมรอบด้วยเปลือก เมื่อผนังถูกทำลายสาร ภายในก็จะถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมด ในขณะที่ ไมโครแคปซูลแบบหลายแกนกลาง (Polynuclear) สารภายในจะมีมากกว่าหนึ่งแกนกลางในเปลือก ทำให้เกิดการปลดปล่อยที่ยาวนานมากกว่าไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว และแบบเมทริกซ์ (Matrix) สารภายในจะกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวอยู่ในเปลือก

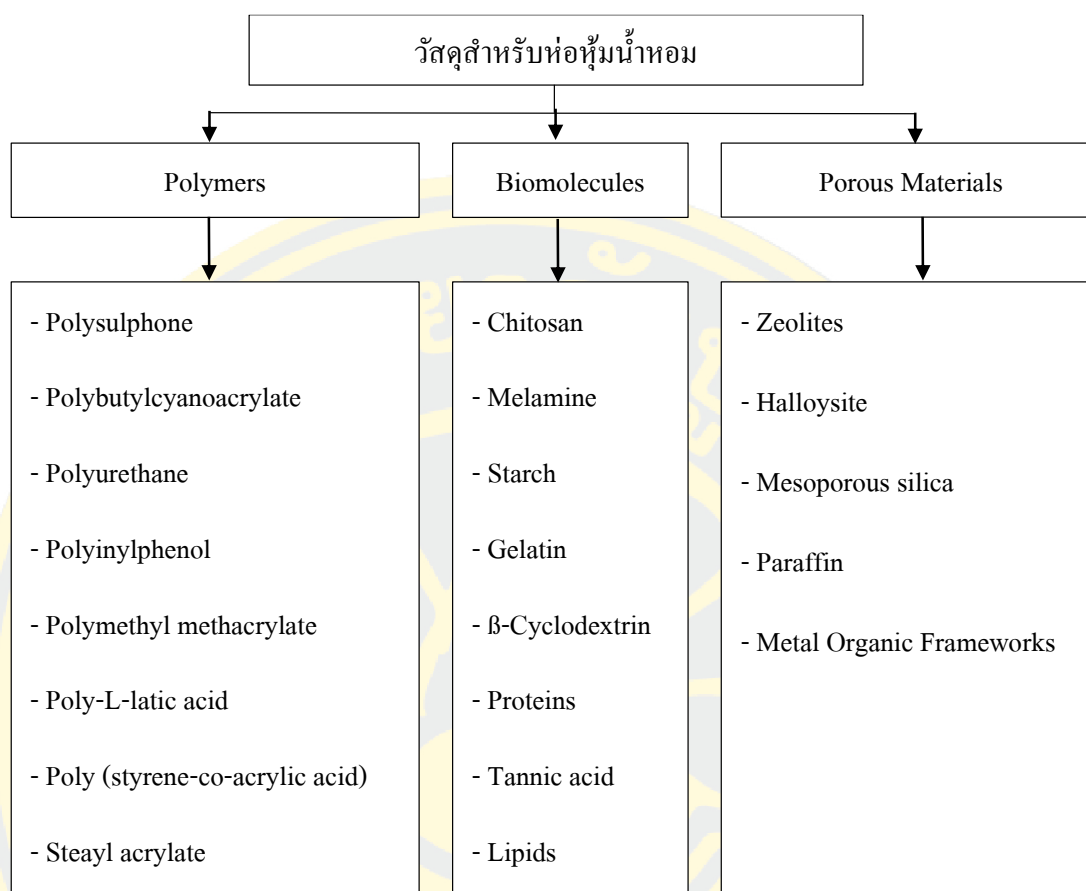


ภาพที่ 2-5 โครงสร้างไมโครแคปซูล (ก) แกนกลางเดี่ยว (ข) หลายแกนกลาง และ (ค) เมทริกซ์

วัสดุที่ใช้เป็นผนังไมโครแคปซูล

การเลือกใช้วัสดุสังเคราะห์ไมโครแคปซูล จะต้องมีความยืดหยุ่นและแข็งแรง ทนต่อการเคลื่อนย้ายหรือการเก็บรักษา และแตกออกภายใต้สภาวะที่กำหนด โดยการปลดปล่อยสารผ่านผนังไมโครแคปซูลจะส่งผลต่ออายุการเก็บรักษา อีกทั้งจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของผนัง มีผลต่อกระบวนการผลิต และการเสื่อมของผนัง

วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลสำหรับการบรรจุน้ำหอมแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ พอลิเมอร์ (Polymers) ไบโอมอลิวคูล (Biomolecules) และวัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials) ดังภาพที่ 2-8 โดยการเลือกวัสดุห่อหุ้มนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานไมโครแคปซูล (Kaur, Kukkar, Bhardwaj, Kim, & Deep, 2018) โดยตัวอย่างวัสดุที่เลือกใช้ทำไมโครแคปซูลที่เหมาะสมในสภาวะการใช้งานต่างๆ ดังตารางที่ 2-4



ภาพที่ 2-6 วัสดุที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลในการห่อหุ้มน้ำหอม (Kaur et al., 2018)

1. พอลิเมอร์ (Polymers)

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการห่อหุ้มสารหอม และมักใช้ในผลิตภัณฑ์น้ำหอม น้ำยาปรับผ้านุ่ม น้ำยาปรับอากาศ เนื่องจากพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่ดี เช่น ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารภายใน เก็บรักษาได้ง่าย มีการกระจายตัวของโมเลกุลอย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติข้างต้นแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์สามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารได้ (Kaur et al., 2018)

2. สารชีวโมเลกุล (Biomolecules)

สารชีวโมเลกุลสำหรับห่อหุ้มน้ำหอม เช่น โปรตีนและไขมัน ซึ่งเป็นมิตรสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการห่อหุ้มโดยใช้วัสดุอื่นๆ เช่น พอลิเมอร์ และวัสดุที่มีรูพรุนแล้วการใช้สารชีวโมเลกุล เช่น เรซิน ไขมัน และโปรตีน มีความเสถียรต่ำกว่า (Kaur et al., 2018)

3. วัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials)

วัสดุรูพรุนเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เช่นซีโอไลต์ (Zeolite) หรือวัสดุที่มีลักษณะคล้ายซีโอไลต์ ถูกใช้เป็นตัวพ่นน้ำหอมและใช้สำหรับโมเลกุลน้ำหอมที่มีการคัดขนาด (Molecular sieve-fragrance) ซึ่งมีการปลดปล่อยซ้ำในสภาวะอุณหภูมิสูง อีกทั้งโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเสถียรภาพทางความร้อนของน้ำหอมจึงเป็นสิ่งสำคัญ (Kasperkowiak, Strzemiecka, & Voelkel, 2016)

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างพนักไมโครแคปซูลที่ใช้ห่อหุ้มสารภายใน (Lengyel, Kállai-Szabó, Antal, Laki, & Antal, 2019)

สารเคมี	คุณสมบัติทางกายภาพ	ข้อจำกัด
Chitosan	ละลายในกรดอ่อน ทำปฏิกิริยากับผิวที่มีประจุลบ	ไม่ละลายที่ pH > 6.5 เป็นสารที่ดูดความชื้น (Hygroscopic)
Sodium hyaluronate	มีประจุลบ ละลายน้ำได้ ความหนืดสูงที่ความเข้มข้นต่ำ	จะดูดความชื้นมากเมื่อได้รับความร้อนและคาย Na ₂ O
Sodium alginate	ละลายน้ำได้ พอลิแคตไอออน (polycation)	ไม่ละลายในกรด ไวต่อความร้อน (ไฮโดรไลซิส)
Gum arabic/ Acacia gummi	ละลายน้ำได้ มีลิสที่ pH 4.5 ป้องกันคอลลอยด์	ความหนืดสูงที่ pH 6-7
Polymethacrylates	ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้เป็นสารยึดเกาะ สารควบคุมการปลดปล่อย	ความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับ pH ไม่ละลายน้ำ
Poly(N-isopropylacrylamide)	การละลายน้ำขึ้นกับอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติของสารละลายต่ำสุด 35-40 องศาเซลเซียส จะสามารถละลายน้ำได้	ไม่สามารถย่อยสลายได้
Polyethylene glycols	มีความชอบน้ำสูง	ไม่สามารถย่อยสลายได้

กลไกการควบคุมการปลดปล่อยของสารภายในไมโครแคปซูล

พฤติกรรมของการปลดปล่อยผ่านผนังสามารถแบ่งได้ 4 ลักษณะได้แก่ ระบบที่ควบคุมการปลดปล่อยด้วยความสามารถในการละลาย ระบบที่ควบคุมด้วยการแพร่ ระบบที่ควบคุมด้วยการซึมผ่านของน้ำ และระบบที่ควบคุมการปลดปล่อยโดยเคมี

1. ระบบที่ควบคุมการปลดปล่อยด้วยความสามารถในการละลาย (Dissolution control system) การปลดปล่อยจะขึ้นกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของวัสดุที่ใช้ทำ ไมโครแคปซูลในสภาวะแวดล้อม และขึ้นกับความหนาของผนังไมโครแคปซูล (Thickness of coating)

2. ระบบที่ควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่ผ่าน (Diffusion control system) เป็นการปลดปล่อยอย่างช้าๆ ความเข้มข้นขององค์ประกอบของสารภายในเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแพร่ เกิดขึ้นเมื่อผนังไมโครแคปซูลไม่ละลายในสภาวะแวดล้อม และการปลดปล่อยเกิดจากการแพร่ผ่านของสารผ่านรูพรุนของผนังไมโครแคปซูล

3. ระบบที่ควบคุมการปลดปล่อยโดยการซึมผ่านของน้ำ (Water penetration control system) การควบคุมการปลดปล่อยโดยอัตราการซึมผ่านของน้ำแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

3.1 การบวม (Swelling)

เมื่อไมโครแคปซูลสัมผัสกับน้ำ จะเกิดการดูดซับน้ำและผนังจะเกิดการบวม (Swelling) ทำให้ความดันภายในไมโครแคปซูลผลักดันให้สารเกิดการปลดปล่อย

3.2 ความดันออสโมติก (Osmotically)

เป็นการปลดปล่อยเมื่อความดันภายในเพิ่มมากขึ้นคล้ายๆ เมมเบรน (Membrane)

4. ระบบที่ควบคุมโดยเคมี (Chemically control system)

การควบคุมการปลดปล่อยโดยโครงสร้างทางเคมีแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

4.1 โข่ห้อยของพอลิเมอร์ (Pendent)

จะเกิดการปลดปล่อยเมื่อเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Degradation) เช่น การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ การย่อยสลายขึ้นกับอัตราการซึมผ่านของน้ำ และอัตราการแยกของ Hydrolytic

4.2 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

การปลดปล่อยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของอนุภาค กล่าวคือ การแพร่ การบวมตัวของอนุภาค และการเหี่ยวหรือหดตัว โดยส่วนมากจะพบในอนุภาคที่มีผนังเป็นไฮโดรเจล มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพอลิอะคริลาไมด์ กล่าวว่า ไมโครแคปซูลพอลิอะคริลาไมด์สามารถระเบิดได้ เมื่อความดันภายในเพิ่มขึ้น ในขณะที่เกิดการหดตัวของผนังแคปซูลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งค่าที่สำคัญใน

การบวมและหดตัวคืออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเชิงปริมาตร (Volume phase transition temperature; VPTT) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤติล่างที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่รวมตัวกับน้ำ (Lower critical solution temperature; LCST) โดยเมื่อไมโครแคปซูลอยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า VPTT ไฮโดรเจลดังกล่าวจะมีสมบัติชอบน้ำและเกิดการบวมตัวขึ้น การปลดปล่อยสารภายในไมโครแคปซูลเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่สูงกว่า VPTT จะมีสมบัติไม่ชอบน้ำและเกิดการหดตัวเกิดขึ้น ซึ่งการหดตัวของไฮโดรเจนนี้อาจทำให้สารภายในไมโครแคปซูลเกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว

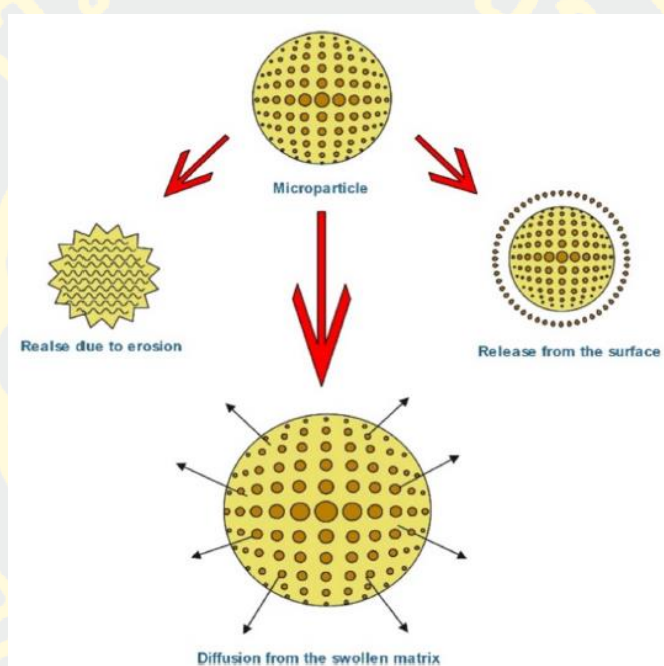
มีงานวิจัยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจลพอลิอะคริลาไมด์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่า VTTP ของพอลิอะคริลาไมด์มีค่าประมาณ 32 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่า VPTT ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารภายในไมโครแคปซูลและสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยจะปลดปล่อยอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เนื่องจากแรงต้านของพื้นผิวไมโครแคปซูลและอัตราการปลดปล่อยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุด VPTT เป็น 37 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส อัตราการปลดปล่อยจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 60 เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการปลดปล่อยจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการบีบ (Squeezing) เนื่องจากการพังทลายของโครงข่ายภายในไมโครแคปซูล และการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ในการแพร่

ทั้งนี้การบีบตัวของไมโครแคปซูลดังกล่าว ทำให้ปริมาตรอิสระภายในไมโครแคปซูลลดลงซึ่งส่งผลให้สารภายในถูกปลดปล่อยออกมาจากไมโครแคปซูลในอัตราที่เร็วขึ้น โดยการปลดปล่อยจะเริ่มจากความแตกต่างของอุณหภูมิรอบๆ ไมโครแคปซูล ทำให้สารภายในบริเวณพื้นผิวระเบิดออกมาพร้อมกับชั้นของผนังไมโครแคปซูล รวมทั้งการสะสมของแรงดันภายในไมโครแคปซูล (Hydrostatic pressure) ทำให้เกิดการบีบ ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ยุบตัว และเกิดการแพร่ในระดับโมเลกุล

อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของการปลดปล่อยของไฮโดรเจลยังขึ้นกับ ความสัมพันธ์ของสารภายในกับพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของตัวเชื่อม โครงข่าย (Crosslink density) ความสัมพันธ์ของขนาดรูพรุนและน้ำหนักโมเลกุลของสารภายใน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) การคลายตัวของของโมเลกุลไฮโดรเจล ตลอดจนวิธีการบรรจุสารภายใน (Loading method) อีกด้วย (Trongsatitkul & Budhlall, 2013)

อีกทั้งยังมีงานวิจัยกล่าวถึงการปลดปล่อยยา (Drug release) จากอนุภาคพอลิเมอร์มีด้วยกัน 3 วิธี 1) การปลดปล่อยเนื่องจากการพังทลายของพอลิเมอร์ 2) การแพร่ผ่านเมทริกซ์ที่บวม และ 3) การปลดปล่อยจากพื้นผิวของอนุภาค (Unagolla & Jayasuriya, 2018) แสดงในภาพที่ 2-9

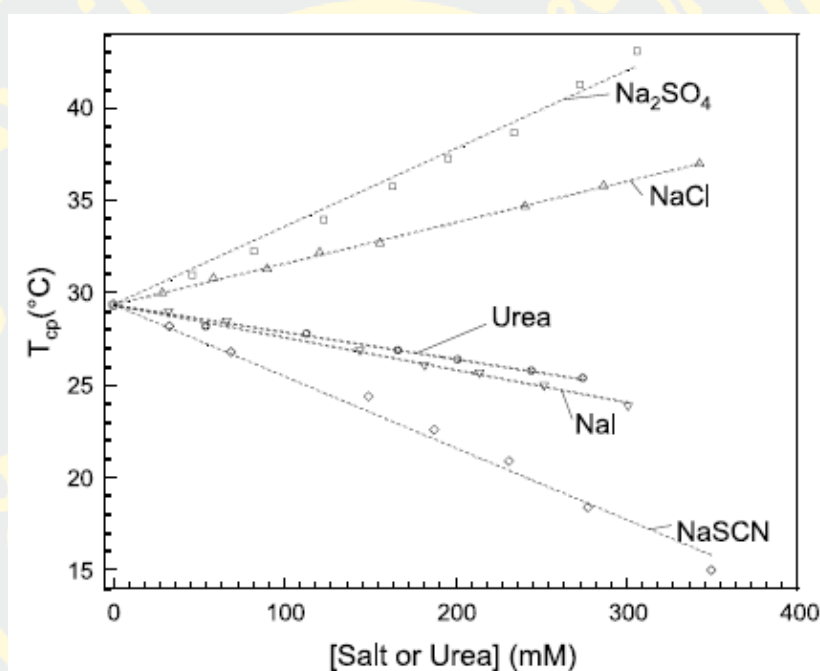
การปลดปล่อยยาในส่วนใหญ่จะพบมากกว่าหนึ่งกลไกเสมอ ซึ่งการปลดปล่อยผ่านพื้นผิวของอนุภาค จะทำให้เกิดการระเบิด โดยยาจะติดอยู่ในชั้นของผิวอนุภาค และสามารถหลีกเลี่ยงการระเบิดได้ โดยการล้างไมโครแคปซูลด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม หรือโดยการเพิ่มความหนาแน่นใน โครงสร้างของไมโครแคปซูล นอกจากกลไกที่กล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้ยังกล่าวอีกว่า การปลดปล่อย อาจขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารภายในแต่ตัวพา เช่น ความพรุน ความ ขรุขระของพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี น้ำหนักโมเลกุลของสาร อัตราการย่อยสลาย ขนาดของ อนุภาค ปริมาณของสารภายใน และอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Matrix interaction)



ภาพที่ 2-9 กลไกการปลดปล่อยยาจากอนุภาคพอลิเมอร์ (Unagolla & Jayasuriya, 2018)

อีกทั้งยังพบว่าอิทธิพลของไอออน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง VPTT ของนาโนเจลที่มี อะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบ (Acrylamide-Based Nanogels) ในน้ำที่มีชนิดและปริมาณไอออนที่ แตกต่างกัน โดยชนิดของไอออนที่ส่งผลกระทบต่อค่า VPTT เป็นไปตามลำดับฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series: $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{S}_2\text{O}_3^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^{2-} > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- \approx \text{NO}_3^- > \text{I}^- > \text{ClO}_4^- > \text{SCN}^-$) ซึ่งเป็น ความสามารถของประจุลบ (anionic) และ $((\text{CH}_3)_4\text{N}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+})$ เป็นความสามารถของประจุบวก ในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ (Salting-in) และลดความสามารถ ในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ (Salting-out) (Hyde et al., 2017) ซึ่งการเพิ่ม/ลดความ สามารถการ ละลายน้ำ ส่งผลโดยตรงต่อค่า VPTT โดยไอออนที่ทำให้เพิ่มความ สามารถในการละลายน้ำ จะทำ ให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์สูงขึ้น ในทางกลับกัน ไอออนที่ทำให้ลดความสามารถในการละลายน้ำ

จะทำให้ค่า VPTT ของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งมีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า VPTT ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากพอลิอะคริลาไมด์ (poly(acrylamide)) ร่วมกับพอลิอะคริลิกแอซิด (poly(acrylic acid)) อยู่ในน้ำที่มีไอออนลบที่มีความเข้มข้นในช่วง 0-0.4 M พบว่า การมีอยู่ของ I^- และ SCN^- ทำให้เกิดการลดลงค่า VPTT ของพอลิเมอร์ลดลงจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 25 และ 17 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ การมีอยู่ของ SO_4^{2-} และ Cl^- ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า VPTT ของพอลิเมอร์ จาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 37 และ 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ (Beaudoin et al., 2021) แสดงในภาพที่ 2-10



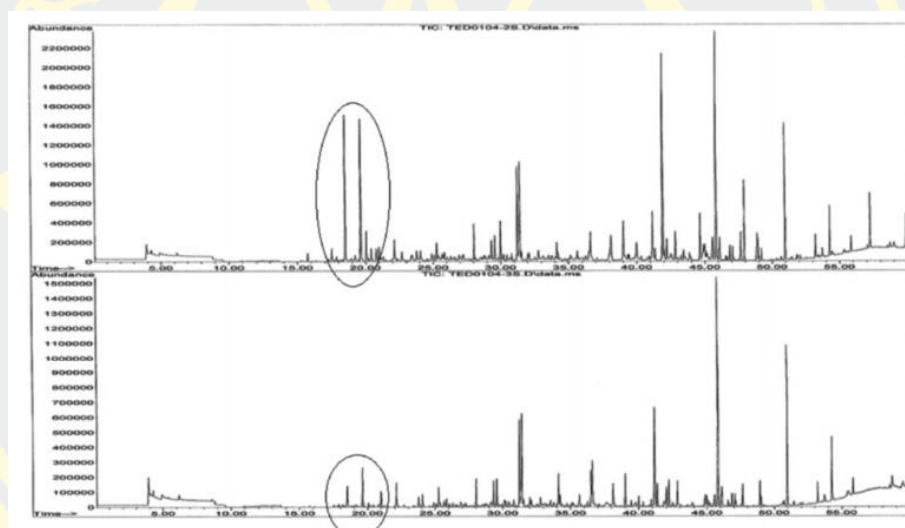
ภาพที่ 2-10 การเปลี่ยนแปลง VPTT ของสารสังเคราะห์ร่วมกับพอลิอะคริลาไมด์ต่อเกลือในสารละลายบัฟเฟอร์ (Beaudoin et al., 2021)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แนวทางการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่ปลดปล่อยจากไมโครแคปซูล

1.1 High performance liquid chromatography; HPLC

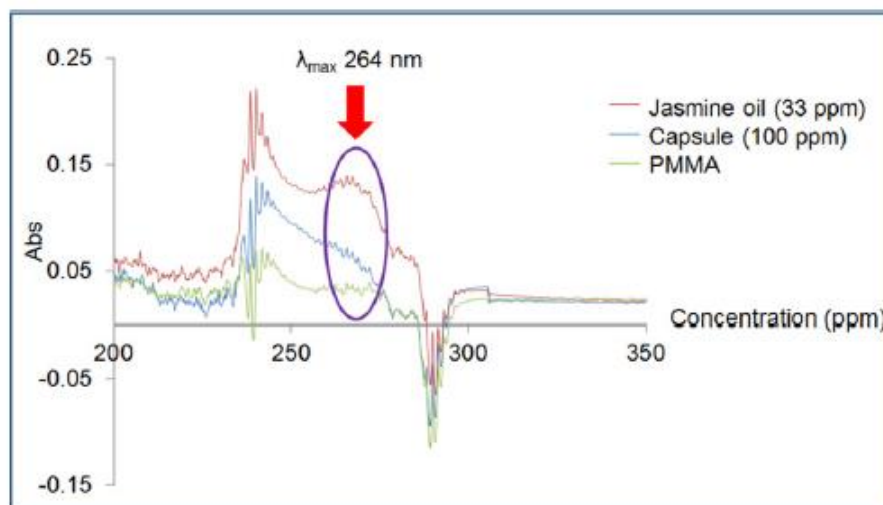
Tekin et al. ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของไมโครแคปซูลที่เตรียมจากพอลิยูรีเทนยูเรีย (Polyurethane-urea) สำหรับห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยในน้ำยาปรับผ้านุ่ม โดยการซักผ้า ขนหนูด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอมและมีน้ำหอมที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูล แสดงดังภาพที่ 2-11 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่คงเหลือหลังจากการซักด้วยเครื่องซักผ้า ด้วย GC-MS โดยใช้เทคนิค Headspace พบว่าผ้าขนหนูที่ใช้น้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอมจะมีกลิ่นหอมยาวนานขึ้น (Tekin et al., 2013)



ภาพที่ 2-11 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เหลืออยู่บนผ้าขนหนูที่ซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอม (ด้านบน) และซักด้วยน้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีน้ำหอมที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูล (ด้านล่าง) (Tekin et al., 2013)

1.2 UV-Vis spectrophotometer

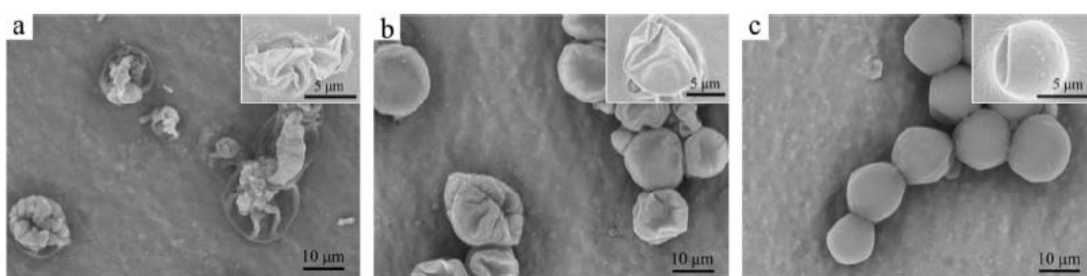
การศึกษาไมโครแคปซูลทำจากพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate; PMMA) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยน้ำหอมกลิ่นมะลิ เตรียมโดยวิธีอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion; O/W) ภาพที่ 2-12 ศึกษาประสิทธิภาพการห่อหุ้มจากอัตราการปลดปล่อยน้ำหอม และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 264 นาโนเมตร พบว่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงถึงร้อยละ 72 (Teeka, Chaiyasat, & Chaiyasat, 2014)



ภาพที่ 2-12 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยน้ำหอมกลิ่นมะลิจากไมโครแคปซูล PMMA ด้วย UV-Vis spectrophotometer (Teeka et al., 2014)

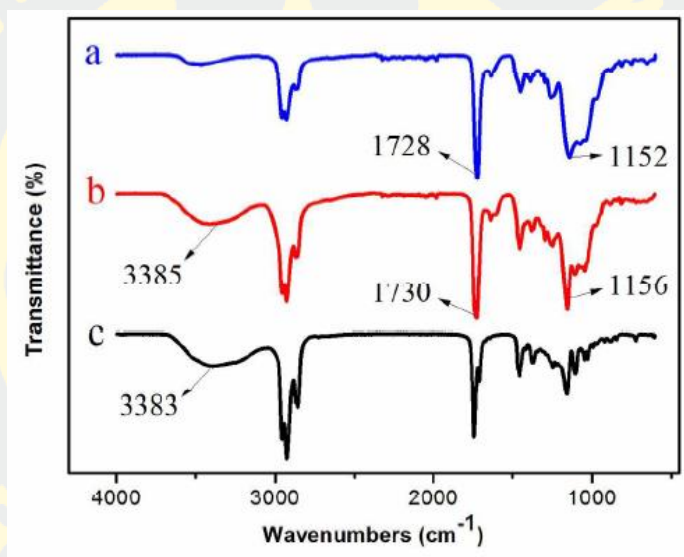
1.3 การชั่งน้ำหนัก

อีกทั้งมีการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลพอลิ(1,4-บิวเทนไดออล ไดเมทาคริเลต) (Poly (1,4-butanediol dimethacrylate); PBDDMA) ที่มีสารภายในเป็นน้ำมันหอมเปปเปอร์มินท์ (Dementholized peppermint oil; DPO) และ Caprylic/capric triglyceride; GTCC โดยทดสอบการเกาะติดบนผ้าฝ้าย แสดงภาพที่ 2-13 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าปริมาณสารที่บรรจุภายในไมโครแคปซูลมีผลต่อสัดส่วนผิวของไมโครแคปซูล โดยบรรจุน้ำหอมเปปเปอร์มินท์บริสุทธิ์ผิวของไมโครแคปซูลมีลักษณะแห้งและแตก สำหรับการบรรจุน้ำหอมเปปเปอร์มินท์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ไมโครแคปซูลมีลักษณะกลมและมีผิวเรียบซึ่งเหมาะสมในการกักตัวของไมโครแคปซูล (D. Zhao et al., 2016)



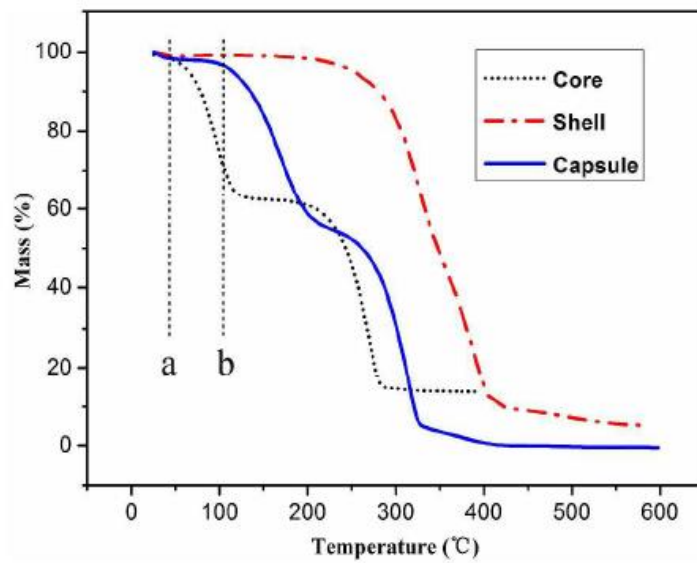
ภาพที่ 2-13 SEM ของไมโครแคปซูลน้ำหอมที่บรรจุน้ำหอมในปริมาณที่แตกต่างกัน ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ (a) 100 (b) 75 และ (c) 50 (D. Zhao et al., 2016)

การวิเคราะห์ผนังของไมโครแคปซูลด้วย FTIR เทคนิค ATR โดยการนำ ไมโครแคปซูลละลายด้วยโทลูอีน (Toluene) เพื่อสกัดน้ำหอมออกจากไมโครแคปซูลจากนั้นกรองเปลือกที่ได้และล้างอีกสามครั้ง ภาพที่ 2-14 แสดงให้เห็นการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิลแบบยึด (C=O) (Carbonyl-stretching) ที่เลขคลื่น (Wavenumber) 1728 เซนติเมตร⁻¹ C-O stretching ของกลุ่มเอสเตอร์ (Ester) 1152 เซนติเมตร⁻¹ ในผนังไมโครแคปซูลทำจาก PBDDMA และในการวิเคราะห์ไมโครแคปซูล จะพบหมู่ฟังก์ชันของผนังไมโครแคปซูลที่กล่าวมาแล้ว และยังพบพีก (Peak) ที่ 3383 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงกลุ่มไฮดรอกซิลแบบยึดในไมโครแคปซูลและในสารภายในไมโครแคปซูล (DPO/GTCC) (D. Zhao et al., 2016)



ภาพที่ 2-14 ผลการวิเคราะห์ไมโครแคปซูลน้ำหอมด้วย FTIR (a) ผนังไมโครแคปซูล PBDDMA (b) ไมโครแคปซูล (c) สารภายในไมโครแคปซูล (DPO/GTCC) (D. Zhao et al., 2016)

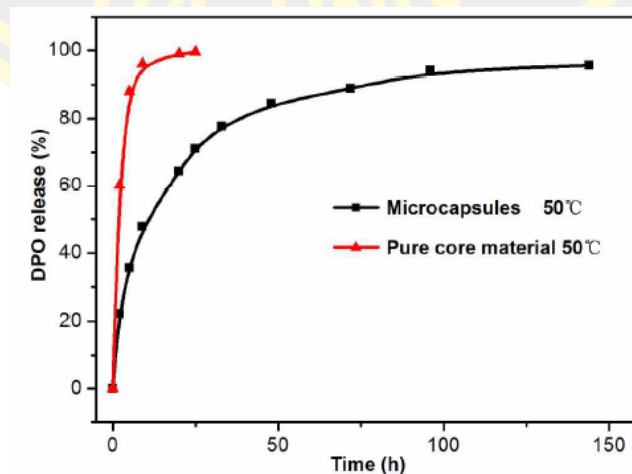
การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของผนังพอลิ(1,4-บิวเทนไดออกไซด์เมทาคริเลต) ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis; TGA ภาพที่ 2-15 แสดงให้เห็นว่า น้ำหอมในไมโครแคปซูล (Capsule) จะระเหยเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่ น้ำหอมที่ไม่ได้แคปซูล (Core) จะระเหยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพที่ดีขึ้นของน้ำหอมในไมโครแคปซูล (D. Zhao et al., 2016)



ภาพที่ 2-15 กราฟ TGA ของไมโครแคปซูลน้ำหอมทำจากพอลิ(1,4-บิวเทนไดออล ไดมัทาคริเลต)

(D. Zhao et al., 2016)

การปลดปล่อยน้ำหอมในไมโครแคปซูลทำโดยนำไมโครแคปซูลน้ำหอมอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนกับสารภายในไมโครแคปซูล และวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของไมโครแคปซูลหลังจากการได้รับความร้อนที่เวลาใดๆ แสดงภาพที่ 2.16 แสดงพฤติกรรมการปลดปล่อยของไมโครแคปซูลและสารภายในที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าสารภายในมีการปลดปล่อยอย่างสมบูรณ์หลังจาก 5 ชั่วโมง ในขณะที่ไมโครแคปซูลมีการปลดปล่อยเพียงร้อยละ 20 จากปริมาณเริ่มต้น (D. Zhao et al., 2016)

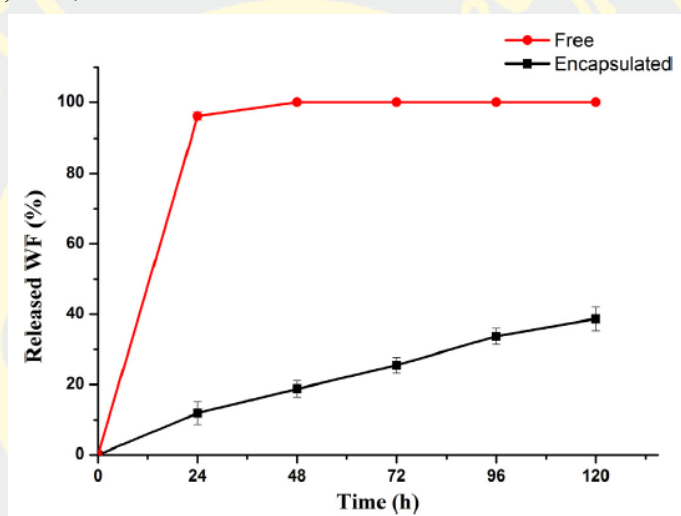


ภาพที่ 2-16 แสดงพฤติกรรมการปลดปล่อยของไมโครแคปซูลและสารภายในที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

(D. Zhao et al., 2016)

1.4 Gas chromatography – mass spectrometry; GC-MS

การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยกลิ่นแดงโมจากไมโครแคปซูลที่ทำจากแกมมาไซโคลเด็กซ์ทริน (γ -Cyclodextrin; γ -CD) กับกลิ่นแดงโมที่ไม่ได้ทำการห่อหุ้ม ภาพที่ 2-17 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยของกลิ่นแดงโมด้วย GC-MS พบว่ากลิ่นแดงโมที่ไม่ได้ห่อหุ้มมีปลดปล่อยอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยกลิ่นจนหมดภายใน 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามกลิ่นแดงโมที่บรรจุในไมโครแคปซูลนั้น มีอัตราการปลดปล่อยที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยที่ 24 ชั่วโมงแรก มีอัตราการปลดปล่อยอยู่ที่ร้อยละ 39 และสามารถปลดปล่อยได้นานกว่า 120 ชั่วโมง (Xiao, Hou, Kang, Niu, & Kou, 2019)



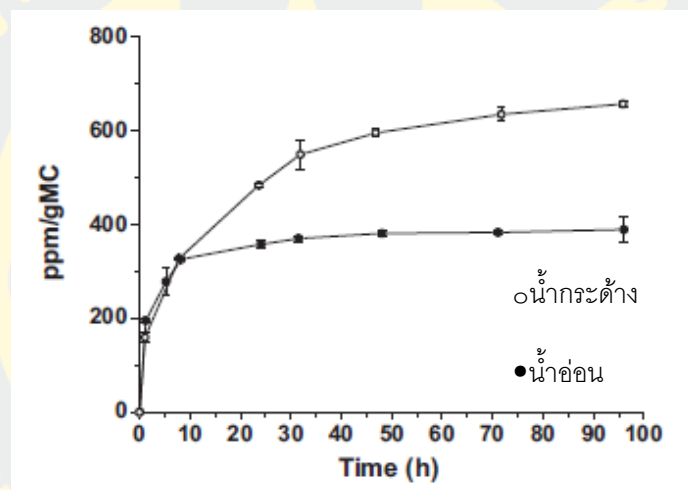
ภาพที่ 2-17 อัตราการปลดปล่อยของน้ำหอมในไมโครแคปซูลเปรียบเทียบกับน้ำหอมที่ไม่ได้ห่อหุ้ม (Xiao et al., 2019)

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยสารจากไมโครแคปซูล

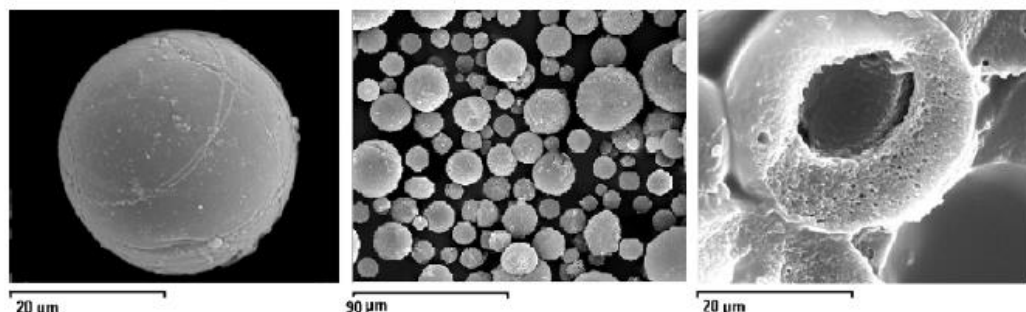
2.1 ผลกระทบของความกระด้างของน้ำ

การใช้พอลิเมอร์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยน้ำหอม เช่น การศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยน้ำหอมวานิลลิน จากไมโครแคปซูลทำจากพอลิซัลโฟน (Polysulfone) ในสภาวะน้ำกระด้างและน้ำอ่อน และกวนด้วยความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์การปลดปล่อยวานิลลินด้วย HPLC ภาพที่ 2-18 พบว่าในช่วง 10 ชั่วโมงแรก วานิลลินถูกปลดปล่อยออกจากไมโครแคปซูลอย่างรวดเร็ว และอัตราการปลดปล่อยในน้ำทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 10-30 ชั่วโมงพบว่าอัตราการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำกระด้างมีค่าสูงขึ้นถึงร้อยละ 90 ของปริมาณน้ำหอมทั้งหมด ซึ่งกลไกในการปลดปล่อยเกิดจาก 2 ปัจจัย 1) สันฐานวิทยาของไมโครแคปซูล (รูพรุนและโครงสร้าง) แสดงดังภาพที่ 2-19 2) อัตราการกวนจากการวิเคราะห์สันฐานวิทยาด้วย

SEM ไมโครแคปซูล พอลิซัลโฟน/วานิลลิน มีลักษณะทรงกลม ผนังมีรูพรุนความหนา 5.43 ± 1.82 ไมโครเมตร รูพรุนมีความกว้าง 1.4-14 นาโนเมตร ทำให้วานิลลินสามารถแพร่ผ่านผนังไปยังตัวกลางภายนอกได้เป็นจำนวนมาก และผลจากการกวนจะทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำหอม บริเวณพื้นผิวของไมโครแคปซูล โดยจากการศึกษา น้ำกระด้างจะมีแร่ธาตุสูง (แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) ไบคาร์บอเนต และซัลเฟต) ซึ่งทำให้น้ำกระด้างมีค่า pH เท่ากับ 8.1 ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำอ่อน 7.2 การเพิ่มความเป็นกรดจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของวานิลลินในน้ำได้ เนื่องจากเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) จากอะโรมาติกอัลดีไฮด์ไปเป็นอะโรมาติกคาร์บอกซิลิก ที่มีความสามารถในการละลายสูง (Pena et al., 2012)



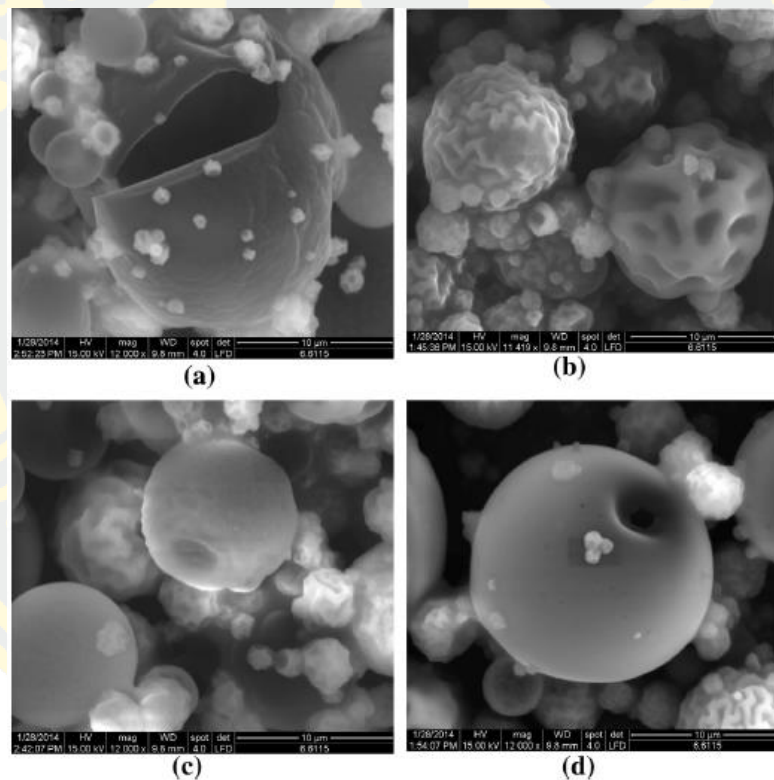
ภาพที่ 2-18 การปลดปล่อยวานิลลินจากไมโครแคปซูลพอลิซัลโฟน (○) โดยใช้น้ำกระด้างเป็นตัวกลาง (●) โดยใช้น้ำอ่อนเป็นตัวกลาง (Pena et al., 2012)



ภาพที่ 2-19 ภาพถ่ายจาก SEM ของไมโครแคปซูลพอลิซัลโฟน/วานิลลิน (Pena et al., 2012)

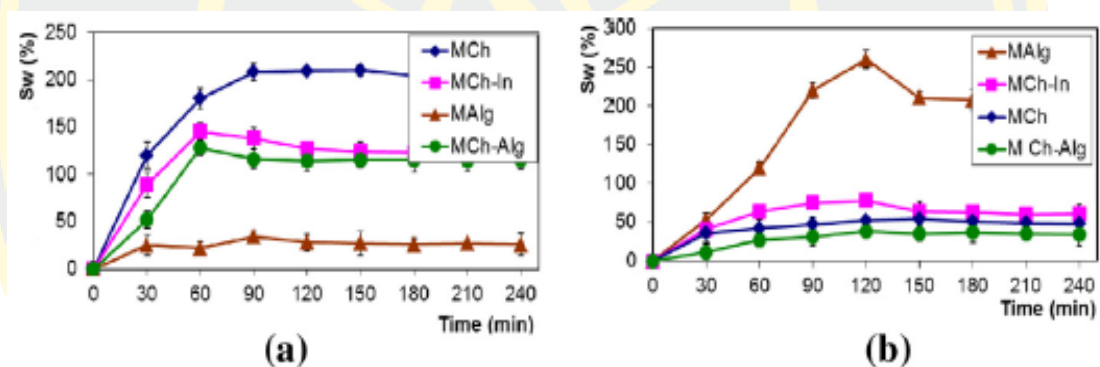
2.2 ผลกระทบของค่าความเป็นกรดต่าง

การศึกษาการห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยกลิ่นผักชี (Coriander essential oil; CEO) ในวัสดุต่างๆ ได้แก่ ไคโตซาน (Chitosan; MCh) อัลจินิกต (Alginate; MAIlg) ไคโตซานผสมอัลจินิกต (Chitosan/Alginate; MCh-Alg) และไคโตซานผสมอินนูลิน (Chitosan/Inulin; MCh-In) พบว่าไคโตซานมีคุณสมบัติในการละลายได้ในค่า pH ต่ำและเมื่อทำปฏิกิริยากับอัลจินิกตจะสามารถก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไฮโดรเจลโคแอคเซอร์เวท (Complex coacervate hydrogels) ทำให้ไมเลกุลดูดซับน้ำได้ดีแต่จะไม่ละลายน้ำดังภาพที่ 2-20(c) ในขณะที่อินนูลินมีคุณสมบัติทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อสังเคราะห์ร่วมกับไคโตซาน แสดงดังภาพ 2-20(d) (Dima et al., 2016)



ภาพที่ 2-20 ภาพจาก SEM ของไมโครแคปซูลที่ใช้วัสดุห่อหุ้มที่แตกต่างกัน (a) อัลจินิกต (b) ไคโตซาน (c) ไคโตซาน/อัลจินิกต (d) ไคโตซาน/อินนูลิน (Dima et al., 2016)

จากการศึกษาการพองตัวของไมโครแคปซูล 0.5 กรัม เติมนลงในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ต่างกัน (2.5 และ 6.5) จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองและดูน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่เปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้น พบว่าสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำไมโครแคปซูลและสถานะของตัวกลางมีอิทธิพลอย่างมากในการพองตัวของไมโครแคปซูล โดยการแทรกซึมของน้ำในไมโครแคปซูลที่ pH 2.5 พบว่าไมโครแคปซูลอัลจินต (MAI_g) มีการพองตัวต่ำที่สุดเนื่องจากในสถานะนี้อัลจินตสามารถเปลี่ยนเป็นกรดแอลจินิกที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำได้ ในขณะที่ไมโครแคปซูลที่ทำจากวัสดุอื่น ๆ มีการพองตัวที่มากขึ้นเนื่องจากไคโตซานสามารถเพิ่มการดูดซับน้ำได้ดี ดังภาพที่ 2-21 (a) เมื่อปรับ pH ให้สอดคล้องกับค่าความเป็นกรด (Constant acidity; pK_a) ของสารอัลจินต และไคโตซาน (pK_aAl_g 3.5 และ pK_aCh 6.5) ภาพที่ 2-21(b) สำหรับสถานะที่ pH 6.5 กลุ่มคาร์บอกซิลของกรดยูนิทจะแตกตัวเป็นไอออนอย่างสมบูรณ์ช่วยให้น้ำซึมผ่านไมโครแคปซูลอัลจินตได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้ค่าการพองตัวมีค่าสูงขึ้น (Dima et al., 2016)

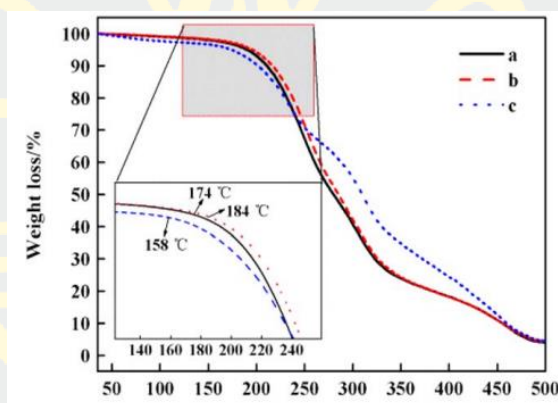


ภาพที่ 2-21 การพองตัวของไมโครแคปซูลที่ใช้วัสดุห่อหุ้มแตกต่างกันและในสถานะ pH ต่างกัน (a) การพองตัวในสถานะ pH 2.5 (b) การพองตัวในสถานะ pH 6.5 (Dima et al., 2016)

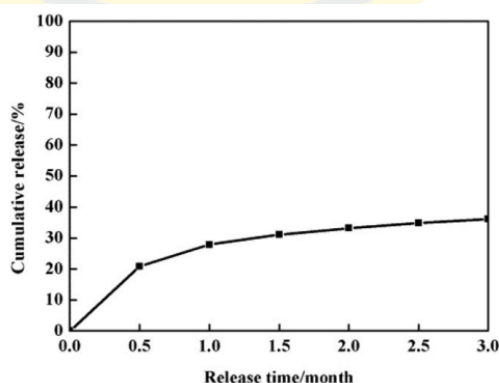
3. ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวและอูณหภูมิ

การศึกษาไมโครแคปซูลที่ทำจากพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พอลิเมทิลเมทาคริเลตเจือด้วย Lauryl methacrylate (PMMA-co-LMA) และ พอลิเมทิลเมทาคริเลตเจือด้วยบิวทิลเมทาคริเลต (PMMA-co-BMA) และมีการผสมพาราฟิน (Paraffin) เพื่อเป็นตัวสนับสนุนในการดูดซับน้ำหอม โดยศึกษาในสถานะตัวกลางต่างๆ ได้แก่ อากาศและสารลดแรงตึงผิวที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ภาพที่ 2-22 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูล PMMA-co-BMA สูงถึง 184 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อัตราการปลดปล่อยของน้ำหอมในสถานะที่มีสารลดแรงตึงผิวมีค่าสูงกว่าในสถานะของอากาศ ภาพที่ 2-23 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ

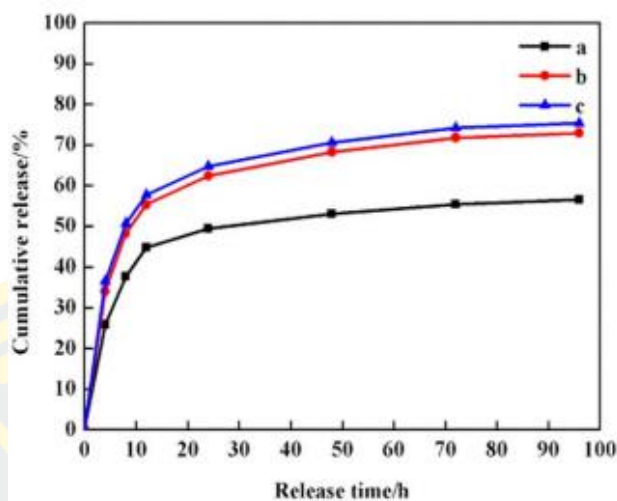
พบว่าในช่วงหนึ่งเดือนแรกมีการปลดปล่อยน้ำหอมอย่างรวดเร็วและมีการปลดปล่อยอยู่ตลอดเวลา เมื่อผ่านไป 3 เดือนพบว่าไมโครแคปซูลน้ำหอมสามารถรักษาความหอมของกลิ่นได้ถึงร้อยละ 63.9 ของน้ำหอมภายในแคปซูล (Zhang et al., 2016) ในขณะที่การปลดปล่อยน้ำหอมในสารลดแรงตึงผิวสาร โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium Lauryl Sulfate; SDS) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำได้โดยเติม ไมโครแคปซูลน้ำหอม 2 กรัม ใน SDS ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จำนวน 160 มิลลิลิตร และมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 400 รอบ ต่อนาที แสดงดังภาพที่ 2-24 พบว่าการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสารลดแรงตึงผิวที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใน 8 ชั่วโมงแรกน้ำหอมจะมีการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วและลดช้าลงใน เวลาต่อมา ในขณะที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน เนื่องจากพาราฟินมีจุดหลอมเหลวที่ 37 องศาเซลเซียส (Zhang et al., 2016)



ภาพที่ 2-22 เติลยรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง TGA (a) PMMA (b) PMMA-co-BMA (c) PMMA-co-LMA (Zhang et al., 2016)



ภาพที่ 2-23 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทำจาก PMMA-co-BMA ในอากาศ (Zhang et al., 2016)

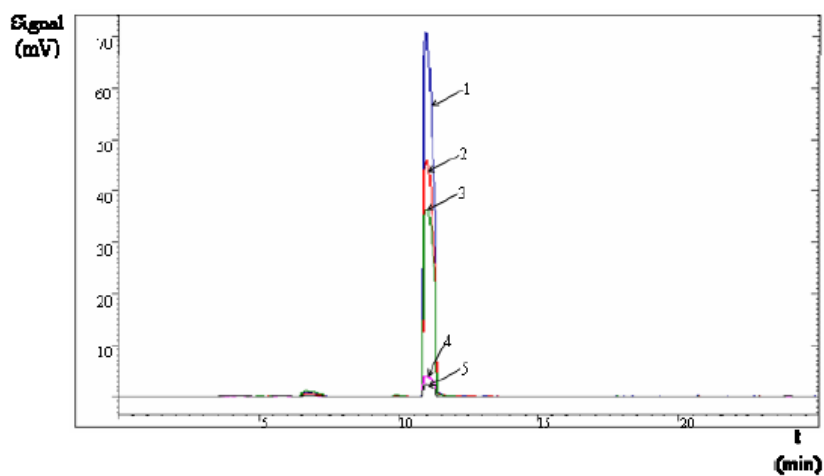


ภาพที่ 2-24 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลทำจาก PMMA-co-BMA ในสารลดแรงตึงผิวที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 30 องศาเซลเซียส (b) 40 องศาเซลเซียส และ (c) 50 องศาเซลเซียส

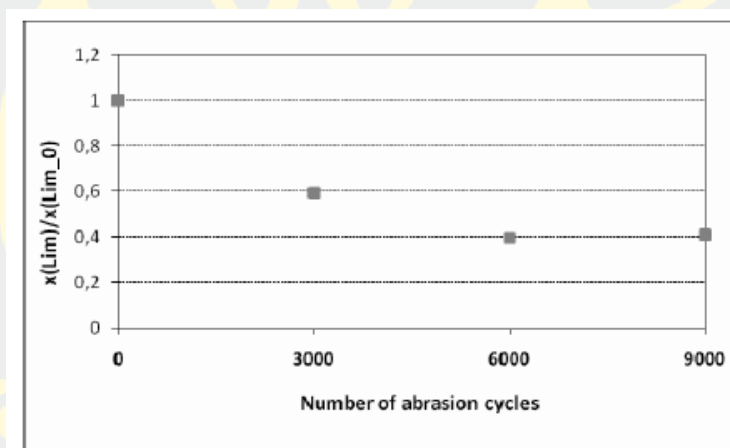
(Zhang et al., 2016)

4. ผลกระทบของแรงทางกล

การใช้ไมโครแคปซูลทำจากพอลิยูรีเทน-ยูเรีย (Polyurethane-urea; PUU) ในการห่อหุ้มน้ำหอมลิโมนีน เพื่อทดสอบการเกาะติดของน้ำหอมบนผ้าหลังการซัก โดยมีการศึกษาหุ่มฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FTIR และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่า ไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม มีการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ไมโครเมตร และการปลดปล่อยน้ำหอมวิเคราะห์ด้วย GC พบว่าการปลดปล่อยของกลิ่นอยู่ที่ร้อยละ 24 หลังจากการซักรอบแรก และการปลดปล่อยร้อยละ 97 หลังจากการซัก 5 รอบ แสดงดังภาพที่ 2-25 นอกจากนี้การทดสอบการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลด้วยแรงขัดถู (Abrasion) พบว่าที่การขัดถู 3000 และ 9000 รอบ พบการสูญเสียน้ำหอมลิโมนีนมีค่าร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับจากปริมาณเริ่มต้นดังภาพที่ 2-26 (Teixeira, 2010)



ภาพที่ 2-25 โครมาโทแกรมของผ้าที่ชุบด้วยไมโครแคปซูลน้ำหอมหลังจากการซัก 1) การซัก 1 รอบ 2) การซัก 2 รอบ 3) การซัก 3 รอบ 4) การซัก 4 รอบ และ 5) การซัก 5 รอบ ด้วย GC (Teixeira, 2010)

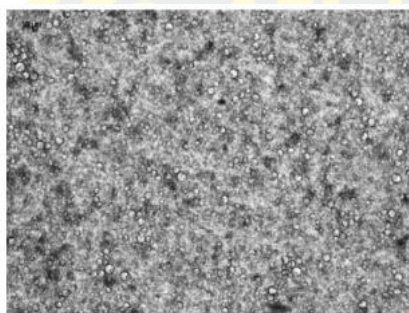


ภาพที่ 2-26 น้ำหนักสัมพัทธ์ของน้ำหอมลิโมนินที่เกาะติดบนผ้า (Teixeira, 2010)

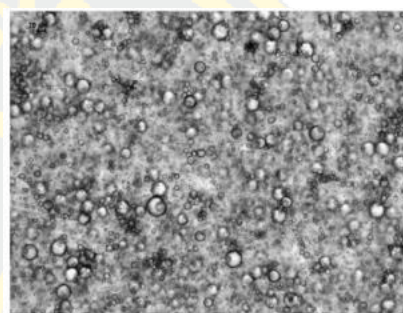
อีกทั้งมีการศึกษาการใช้ไมโครแคปซูลจากพอลิยูรีเทน/ยูเรีย (Polyurethane/urea; PUU) ในการห่อหุ้มน้ำหอม (Top note: เลมอนความเข้มข้นร้อยละ 19.51 โดยน้ำหนัก Middle note: มะลิความเข้มข้นร้อยละ 35.6 โดยน้ำหนัก Base note: แผลกหอมความเข้มข้นร้อยละ 35.6 โดยน้ำหนัก มัสก์ความเข้มข้นร้อยละ 9.15 โดยน้ำหนัก) ศึกษาขนาดและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลน้ำหอมด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงดังภาพที่ 2-27 แสดงให้เห็นอนุภาคของน้ำหอมมีขนาด 1 ไมโครเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร และพบว่าน้ำหอมมีลักษณะเป็นทรงกลมมีผนังห่อหุ้ม และภายในเป็นของเหลว อีกทั้งมีการทดสอบการเสียดสีของพื้นผิวสิ่งทอที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอมเกาะอยู่และวิเคราะห์การปลดปล่อยกลิ่นหอมด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี จากโครมาโทแกรมตรวจพบพีค (Peak) 4 พีค ได้แก่ ลิโมนิน แผลกหอม มะลิ และมัสก์ ที่เวลา 12 65 69 และ 72 นาที ตามลำดับ ไมโครแคปซูล

น้ำหอมบนเส้นใยผสมระหว่างขนสัตว์และพอลิเอสเตอร์ (wool/polyester) จะปลดปล่อยกลิ่นเมื่อผนังไมโครแคปซูลแตกเนื่องจากแรงเสียดสี และภายหลังการขัดถู 9000 รอบ จะยังคงพบกลิ่นลิโมนีน ร้อยละ 78 แผลกหอมร้อยละ 59 และ มะลิร้อยละ 50 จากปริมาณที่มีอยู่ตอนต้น โดยไม่พบเพียงกลิ่นมัสก์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งกลิ่นในระดับที่ต่างกัน (Rodrigues et al., 2009)

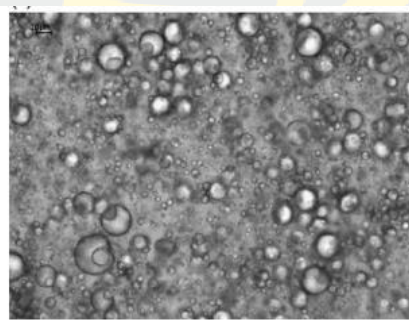
(ก) กำลังขยาย 10x



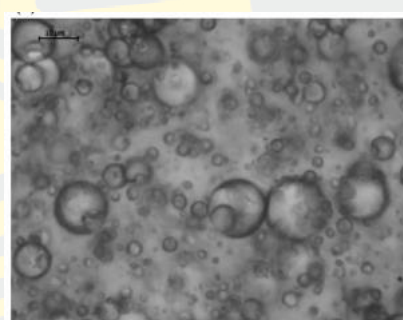
(ข) กำลังขยาย 20x



(ค) กำลังขยาย 40x



(ง) กำลังขยาย 100x



ภาพที่ 2-27 ภาพถ่ายไมโครแคปซูลน้ำหอมจากกล้องจุลทรรศน์ (Rodrigues et al., 2009)

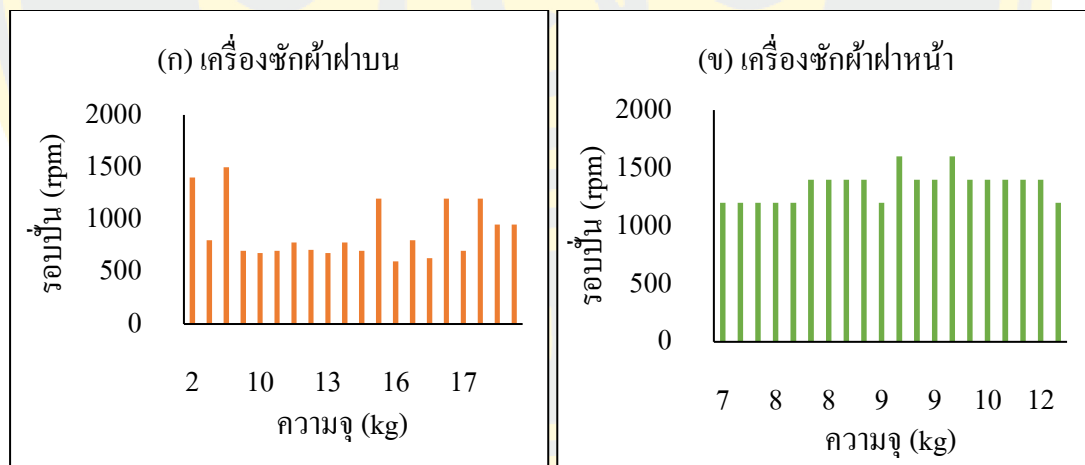
5. ผลกระทบของเคมีพื้นผิวของไมโครแคปซูล

การเกาะติดของไมโครแคปซูลน้ำหอมขึ้นอยู่กับเคมีพื้นผิว (Surface chemistry) ของผนังไมโครแคปซูล โดยไมโครแคปซูลที่มีผนังเป็นพอลิยูรีเทน (Polyurethane) และมีสารภายในเป็นน้ำหอม Neroline ไมโครแคปซูลเป็นทรงกลมผิวขรุขระขนาด 2 ไมโครเมตร และ 100 ไมโครเมตร การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยวิธีการ FTIR-ATR และ ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย TGA พบว่า มีการลดลงของน้ำหนักภายหลังการให้ความร้อน 2 จุดคือ ที่อุณหภูมิ 188 องศาเซลเซียส (สูญเสียของน้ำหนักร้อยละ 73 จากปริมาณเริ่มต้น) และที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส (สูญเสียของน้ำหนักร้อยละ 21 จากปริมาณเริ่มต้น) โดยการลดลงของน้ำหนักในครั้งแรกเกิดจากการแพร่และการระเหยของสารภายใน (Core material) และการลดลงของน้ำหนักครั้งที่สองเป็นการสลายตัวทาง

ความร้อนของผนัง (Shell material) โดยการสลายของผนังเริ่มต้นที่ 260 องศาเซลเซียส ยิ่งไปกว่านั้น การวิเคราะห์ศักย์ซีตา (Zeta potential: ζ) ของไมโครแคปซูลน้ำหอมที่ pH 3-9 พบว่าไมโครแคปซูล มีค่า Isoelectric point (IEP) เท่ากับ 5.38 ทำให้ไมโครแคปซูลมีประจุเป็นลบ (Anion) เมื่ออยู่ใน pH 7 ซึ่งค่า IEP เท่ากับ 3 และมีประจุลบเช่นกัน จึงทำให้การเกาะติดของพอลิยูรีเทน บนฝ้ายเกิดขึ้นได้น้อย ในทางกลับกัน ถ้าหากใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นประจุบวกจะทำให้ไมโครแคปซูลจะดูดซับได้ดีบนผิวของสารลดแรงตึงผิว (Abdelkader, Azizi, Baffoun, Chevalier, & Majdoub, 2018)

คุณลักษณะของเครื่องซักผ้า

เครื่องซักผ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ฝาหน้า และฝาบน จากการรวบรวมความจุของเครื่องซักผ้าที่มีขายตามท้องตลาดกับความเร็วยรอบในการปั่นของเครื่องซักผ้าแสดงดังภาพที่ 2-28 พบว่า เครื่องซักผ้าชนิดฝาบนมีรอบการปั่นอยู่ในช่วง 500 – 1400 รอบต่อนาที โดยมากอยู่ในช่วง 800 รอบต่อนาที และเครื่องซักผ้าชนิดฝาหน้ามีรอบการปั่นอยู่ในช่วง 1200 – 1600 รอบต่อนาที โดยมากอยู่ในช่วง 1400 รอบต่อนาที (Power Buy., 2561)



ภาพที่ 2-28 ข้อมูลความจุของเครื่องซักผ้าและความเร็วยรอบในการปั่น ของเครื่องซักผ้าที่มีขายในท้องตลาด (Power Buy., 2561)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ (Beaker)
2. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
3. หลอดหยดสาร (Dropper tube)
4. กระบอกลม (Cylinder)
5. ไมโครปิเปต (Micropipette)
6. ช้อนตักสาร (Spatula)
7. เครื่องชั่งสาร (Analytical balance / Digital scale)
8. เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
9. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
10. ขวดฉีดสารตัวอย่างอัดโนมัติ (Headspace vials) 20 มิลลิลิตร
11. ไซริงค์กรองสารไนลอน (Syringe filter nylon) รูปกรวย 0.45 ไมโครเมตร
12. หลอดปั่นเหวี่ยง (Centrifuge tube) 2 มิลลิลิตร
13. กระบอกฉีดยา (Syringe) 1 มิลลิลิตร
14. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
15. เตาอบ (Oven)
16. กระจกสไลด์นับเม็ดเลือด (Hemocytometer)

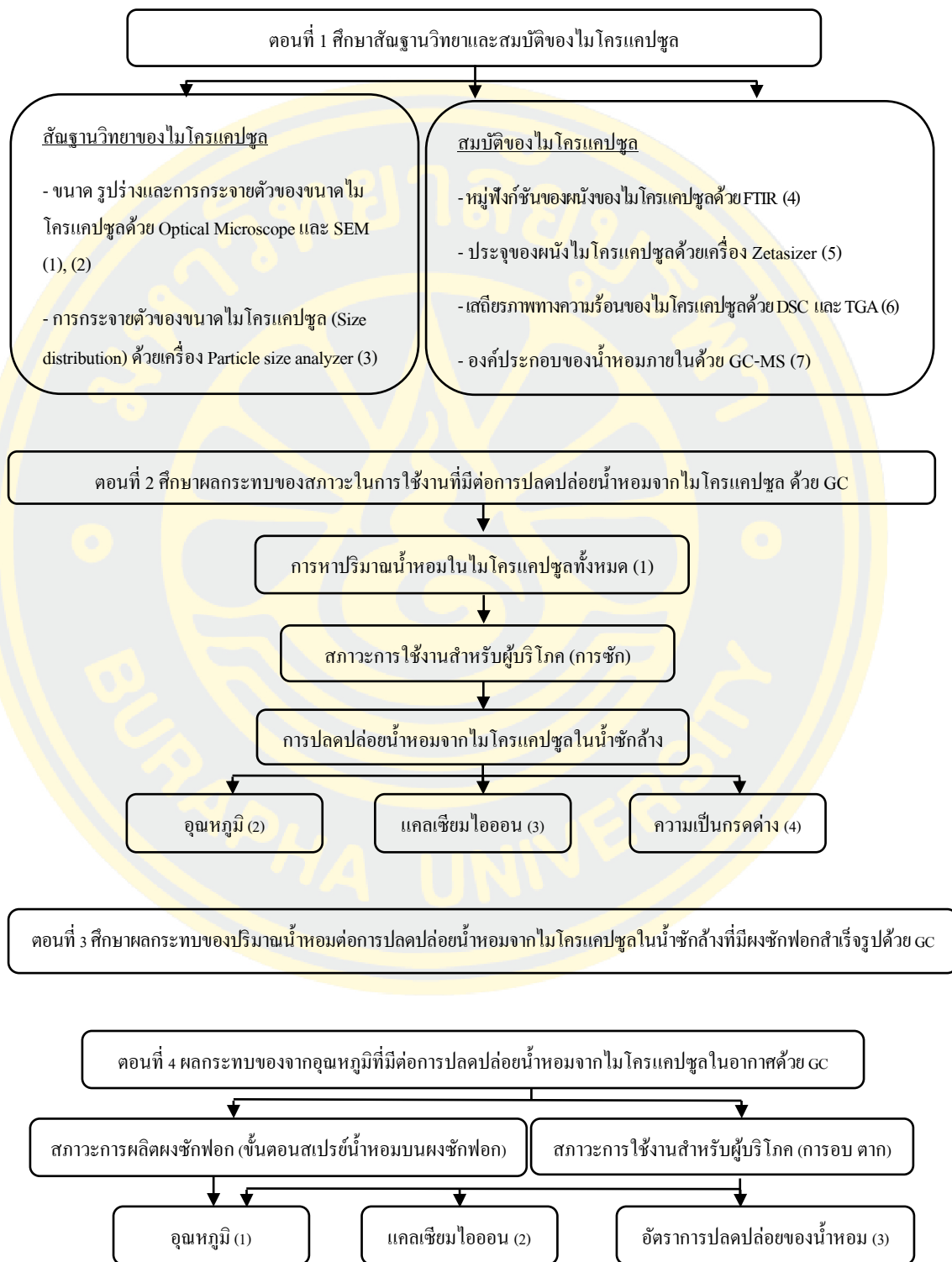
สารเคมี

1. น้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลน้ำหอมแขวนลอยอยู่
2. ลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (Linear alkylbenzene sulfonate; LAS)
3. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO_3)
4. น้ำปราศจากไอออน 18.2 MΩ (Deionized water; DI water)
5. น้ำมันสำหรับกล้องจุลทรรศน์ (Immersion oil for Microscope)

เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)
2. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer; GC-MS)
3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC)
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform Infrared Spectrometer; FTIR)
5. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
7. เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size analyzer)
8. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระดับนาโน และศักย์ซีต้า (Zetasizer)
9. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry; DSC)
10. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาลิซิส (Thermogravimetric Analysis; TGA)

แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 3-1 แผนผังการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 ศึกษาพื้นฐานวิทยาและสมบัติของไมโครแคปซูล

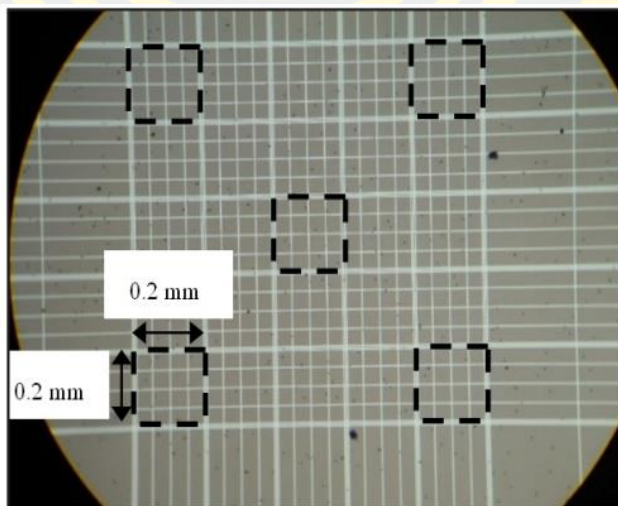
1. วิเคราะห์ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

1.1 ชั่งน้ำหอมทางการค้าที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำหอมอยู่ภายในแขวนลอยอยู่ในน้ำจำนวน 0.01 กรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 4 กรัม ผสมให้เข้ากัน

1.2 นำสารตัวอย่างจากข้อ 1 จำนวน 10 ไมโครลิตร หยดลงบนกระจกสไลด์ (Hemocytometer) นำไปตรวจนับจำนวนและวัดขนาดไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ กำลังขยาย 100 เท่า สุ่มตรวจนับทั้งหมด 5 จุด บนกระจกสไลด์ ดังภาพที่ 3-2 และทำการสุ่มนับทั้งหมด 3 ครั้งจากขวดเดียวกัน

1.3 คำนวณหาความหนาแน่นของจำนวนไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในสารตัวอย่างในข้อที่ 1 โดยการนับนำจำนวนไมโครแคปซูลเฉลี่ย 5 ช่อง หาด้วยปริมาตรของช่อง ซึ่งมีปริมาตร 0.2 มิลลิเมตร x 0.2 มิลลิเมตร x 0.1 มิลลิเมตร ดังสมการที่ (3-1)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{จำนวนเม็ดน้ำหอม/จำนวนช่อง}}{\text{ปริมาตรช่อง}} = \frac{\text{ไมโครแคปซูล}}{4 \times 10^{-6}} \quad (3-1)$$



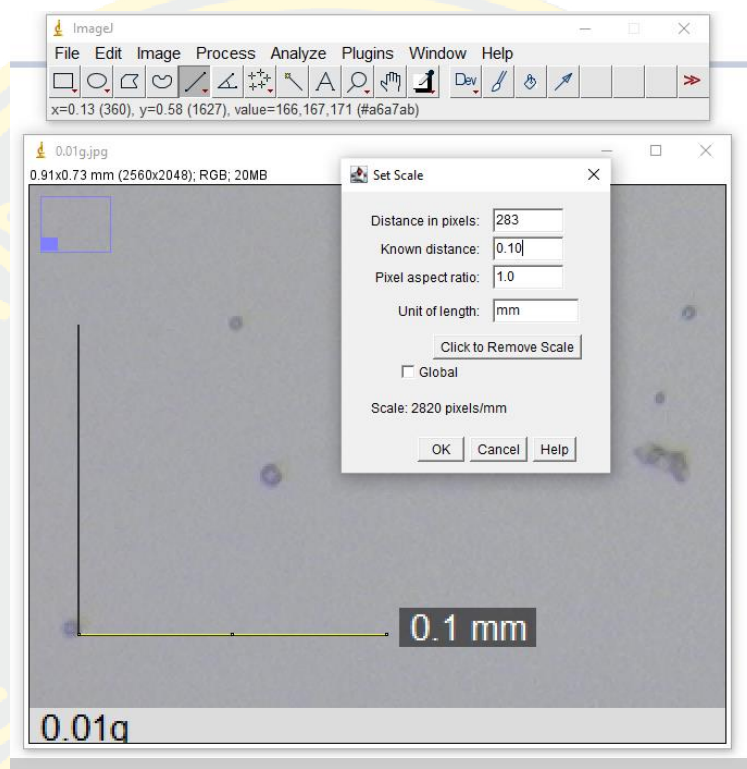
ภาพที่ 3-2 การหาความหนาแน่นของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำ ด้วย Hemocytometer (วุฒิวาณิชสรรรพ์, นิลฉวี, รัตนคม และกงจักร., 2015)

1.4 วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลด้วยโปรแกรม ImageJ

1.5 คลิก File >> Open >> เลือกรูปที่ต้องการวิเคราะห์

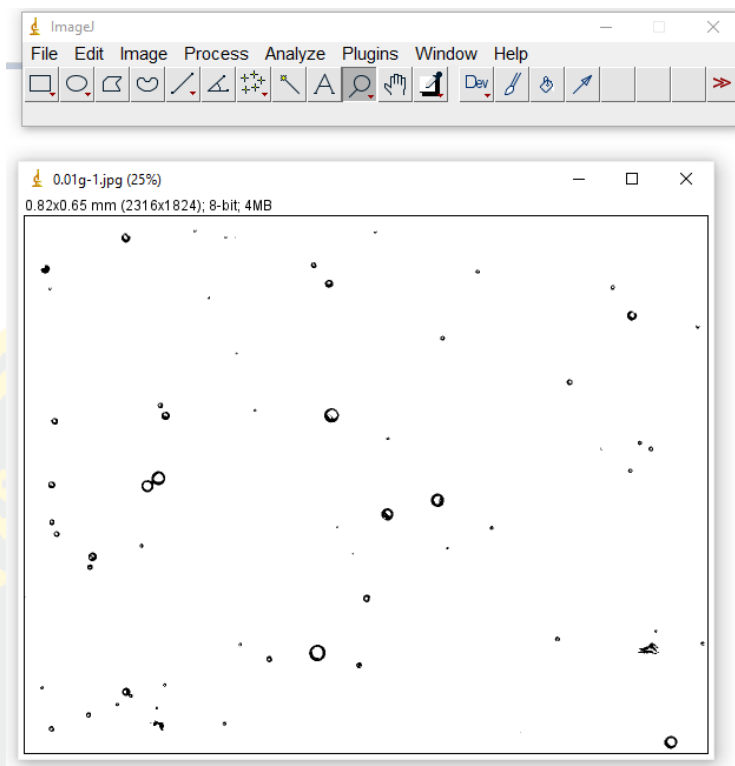
1.6 ตั้งค่ามาตราส่วนโดย ลากเส้นมาตราส่วนจากรูปที่ใช้ จากนั้นไปที่ Analyze >>

Set scale >> ระบุขนาด และหน่วยที่ต้องการ ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ (การตั้งค่ามาตราส่วน)

1.7 ตั้งค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เพื่อแยกวัตถุออกจากภาพพื้นหลังให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยคลิก Image >> Adjust >> Threshold จะได้ภาพสีขาวดำที่มีไมโครแคปซูลแยกจากพื้นหลังชัดเจนดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ (การตั้งค่าเทรสโฮลด์)

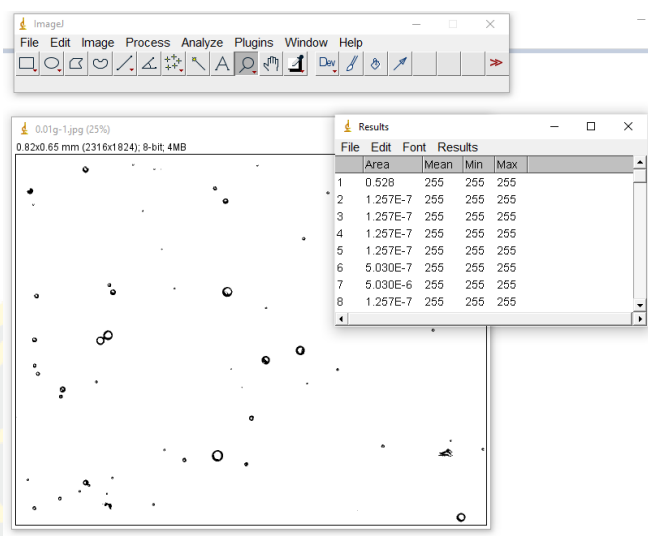
- 1.8 วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวโดยไปที่ Analyze >> Analyze particles >> เลือก Show: Outlines เลือก Display results จะได้ค่าพื้นที่ (Area; A) ดังภาพที่ 3-5
- 1.9 คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter; D) ด้วยสมการที่ 3-2

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (3-2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ (mm^2)

π คือ ค่าคงที่พาย ($\text{Pi} = 3.14159$)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)



ภาพที่ 3-5 การหาขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ

2. วิเคราะห์ขนาด รูปร่างของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

- 2.1 หยดไมโครแคปซูลลงบนจานเพาะเชื้อ
- 2.2 ให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 40 และ 90 องศาเซลเซียส
- 2.3 นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX กำลังขยาย 500 เท่า

3. การกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูล (Size distribution) ด้วยเครื่อง Particle size analyzer

นำไมโครแคปซูลน้ำหอมไปแขวนลอยในน้ำปราศจากไอออน วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูล (Size distribution) ด้วยเครื่อง Particle size analyzer ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผนังไมโครแคปซูลด้วย FTIR

หยดไมโครแคปซูลลงบนจานเพาะเชื้อ ทำลายผนังไมโครแคปซูลด้วยการบด เพื่อให้ น้ำหอมระเหยออก จากนั้นปล่อยให้ น้ำหอมระเหยจน น้ำหนักคงที่ นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy in Attenuated Total Reflectance (FTIR-ATR)

5. วิเคราะห์ประจุของผนังไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Zetasizer

นำไมโครแคปซูลน้ำหอมไปแขวนลอยในน้ำปราศจากไอออน วิเคราะห์ประจุของผนังไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Zetasizer ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

6. วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูล

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลด้วย DSC ด้วยเทคนิค Heat-Cool-Heat เริ่มจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 0 ถึง 30 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิลงถึง 0 องศาเซลเซียส และ ให้ความร้อนอีกครั้งจาก 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 1 องศาเซลเซียสต่อนาที

อีกทั้ง การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลด้วย TGA ช่วงอุณหภูมิ 25 -600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

7. การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำหอมภายในไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Gas

Chromatograph-Mass Spectrometer; GC-MS

สภาวะเครื่อง Gas Chromatography ที่ใช้

- ลักษณะคอลัมน์ (Column description) : Capillaries
- ตัวตรวจวัด (Detector) : MS
- อุณหภูมิเตาอบ (Oven Temperature) : 60 °C
- อุณหภูมิตัวตรวจวัด (Detector Temperature) : 230 °C
- อุณหภูมิฉีดสาร (Injector Temperature) : 150 °C
- แก๊สพา (Carrier Gas) : He flow rate 2.0 mL/min

7.1 ป้อนไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม ลงในขวด ขนาด 20 มิลลิลิตร

7.2 นำขวดไปทดสอบด้วยเครื่อง GC-MS ทำการเปรียบเทียบโครมาโทแกรมที่ได้กับข้อมูลโครมาโทแกรมมาตรฐาน (Library searching)

ตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะในการทำงานที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ด้วย Gas Chromatography; GC

โดยติดตามปริมาณของน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่อง Gas Chromatography

วิเคราะห์โดยเทคนิค Headspace

สภาวะเครื่อง Gas Chromatography ที่ใช้

- ลักษณะคอลัมน์ (Column description)	: TR-BIODIESEL
- ตัวตรวจวัด (Detector)	: FID
- อุณหภูมิตู้อบ (Oven Temperature)	: 60 °C
- อุณหภูมิตรวจวัด (Detector Temperature)	: 230 °C
- อุณหภูมิฉีดสาร (Injector Temperature)	: 150 °C
- แก๊สพา (Carrier Gas)	: He flow rate 0.5 mL/min

1. ป้อนสารละลาย 0.5 มิลลิลิตร ลงในขวดขนาด 20 มิลลิลิตร

2. อุ่นสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขนาดตัวอย่าง (Sample size) 1 มิลลิลิตร

การแบ่งส่วน (Split ratio) เท่ากับ 0.6

3. นำขวดไปทดสอบด้วยเครื่อง GC ทำการบันทึกพื้นที่ใต้กราฟ (Peak area) และโครมาโทแกรม (Chromatogram) ที่ได้

4. รายงานผลสัดส่วนการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลดังสมการ (3-3)

$$\text{ร้อยละการปลดปล่อยน้ำหอม} = \frac{\text{ปริมาณการปลดปล่อยน้ำหอมที่เวลาต่างๆ}}{\text{ปริมาณน้ำหอมทั้งหมด}} \times 100 \quad (3-3)$$

1. การหาปริมาณน้ำหอมในไมโครแคปซูลทั้งหมด

1.1 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 3 มิลลิกรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร

1.2 ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

1.3 วัดซ้ำขวดเดิมจนค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio; S/N) ต่ำกว่า 3

1.4 คำนวณผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด (รอบที่ 1 ถึง n) กำหนดให้เป็นปริมาณน้ำหอมทั้งหมด

2. ผลกระทบของอุณหภูมิในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง

2.1 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม และ ลิเนียร์อัลคิลเบนซีน ซัลโฟเนต (Linear alkylbenzene sulfonate; LAS) 0.6 กรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 8 กรัม ซึ่งเป็นการจำลององค์ประกอบต่างๆ ในขณะซักล้าง (Zhang et al., 2016)

2.2 นำขวดบรรจุสารตัวอย่างปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิภายในขวดจะถูกควบคุมด้วยน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะขณะซักผ้าในน้ำ)

2.3 นำสารตัวอย่างในข้อ 2 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กรองด้วยไซริงค์กรองสารในลอนรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร

2.4 นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ขวด 20 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

2.5 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเป็น 60 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะขณะซักผ้าในน้ำอุ่น) และ 80 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะขณะซักผ้าในน้ำร้อน)

3. ศึกษาผลกระทบของแคลเซียมไอออนในน้ำต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง

ในน้ำกระด้างมีไอออนหลากหลายชนิด(เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+}) โดยทั่วไปมักใช้ปริมาณเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นตัวชี้วัดความกระด้างในน้ำ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการสังเคราะห์น้ำที่มีแคลเซียมไอออนเป็นองค์ประกอบเพื่อใช้ในการจำลองการซักล้างในน้ำกระด้างชนิดต่างๆ

3.1 กำหนดปริมาณสารสัมพันธ์จากสมการ $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ เพื่อเตรียมน้ำกระด้างสังเคราะห์ที่มีแคลเซียมไอออน

3.2 ชั่งสาร CaCO_3 50 มิลลิกรัม ละลายด้วย HCl เข้มข้น 0.5 โมล 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 1 ลิตร จะได้น้ำอ่อน

3.3 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับปริมาณของ CaCO_3 ในน้ำกระด้างชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

ความกระด้าง (mg of CaCO ₃ /L)	ชนิดของน้ำ	ปริมาณ CaCO ₃ (mg)	ปริมาตร HCl (mL)
0	น้ำปราศจากไอออน	0	0
0 – 75	น้ำอ่อน	50	2
110	น้ำประปา	110	0
75 - 150	น้ำกระด้างปานกลาง	150	6
150 - 300	น้ำกระด้าง	250	10
> 300	น้ำกระด้างมาก	350	14

3.4 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม และ ลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (Linear alkylbenzene sulfonate; LAS) 0.6 กรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 8 กรัม

3.5 นำขวดบรรจุสารตัวอย่างปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.6 นำสารตัวอย่างที่ได้ในข้อที่ 5 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กรองสารตัวอย่างด้วยไซริงค์กรองสารในลอนรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร

3.7 นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ขวด 20 มิลลิลิตรทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

3.8 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับชนิดของน้ำตามความกระด้างเป็น น้ำประปา น้ำกระด้างปานกลาง น้ำกระด้าง และน้ำกระด้างมาก

4. ผลกระทบของความเป็นกรดต่างในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง

4.1 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม และ ลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (Linear alkylbenzene sulfonate; LAS) 0.6 กรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำที่ปรับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ปริมาตร 8 กรัม ซึ่งเป็นการจำลององค์ประกอบต่างๆ ในขณะซักล้าง (Zhang et al., 2016)

4.2 นำขวดบรรจุสารตัวอย่างปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิภายในขวดจะถูกควบคุมอุณหภูมิตั้งแต่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

4.3 นำสารตัวอย่างในข้อ 2 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กรองด้วยไซริงค์กรองสาร ไนลอนรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4.4 นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ขวด 20 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ปริมาณ น้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

4.5 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับความเป็นกรดต่างของน้ำซ้กล้างเท่ากับ 5 และ 7

ตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำหอมต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซ้กล้างที่มีผงซักฟอกสำเร็จรูป

1. ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม และ ผงซักฟอก 32 มิลลิกรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 8 กรัม

2. นำขวดบรรจุสารตัวอย่างปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. นำสารตัวอย่างที่ได้ในข้อ 2 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กรองสารตัวอย่างด้วยไซริงค์กรองสารไนลอนรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ขวด 20 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

5. ทำการทดลองซ้ำโดยปรับปริมาณน้ำหอมเป็น 68, 85 และ 102 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตอนที่ 4 ผลกระทบของจากอุณหภูมิที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ

1. ผลกระทบของอุณหภูมิในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล

1.1 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร ปิดฝา

1.2 นำไปอบด้วยเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (จำลองสภาวะการตากผ้า) เป็นเวลา 1, 3 และ 6 ชั่วโมง

1.3 นำไมโครแคปซูลที่ได้จากการอบมาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

1.4 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับอุณหภูมิในการอบเป็น 60 องศาเซลเซียส (จำลองสถานะในการผลิตผงซักฟอกในขั้นตอนสเปรย์น้ำหอมลงบนผงซักฟอก) และ 80 องศาเซลเซียส (จำลองสถานะการอบผ้า)

2. ผลกระทบของแคลเซียมไอออนที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลหลังการซักล้างในน้ำกระด้างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

2.1 ชั่งน้ำหอมที่บรรจุในไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม ใส่ขวดขนาด 20 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 1 กรัม

2.2 นำไปอบด้วยเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.3 นำไมโครแคปซูลที่ได้จากการอบมาทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่เปลี่ยนแปลงด้วย GC

2.4 ทำการทดลองซ้ำโดยปรับชนิดของน้ำที่มีปริมาณ Ca^{2+} เป็น 50, 150, 250, 350 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. วิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูล (Release rate of perfume)

ชั่งไมโครแคปซูล 2 กรัมลงในจานเพาะเชื้อ ให้ความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 วัน จนน้ำหนักคงที่ โดยปริมาณการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูล คำนวณดังสมการที่ 3-4

$$\text{อัตราการปลดปล่อย (ร้อยละต่อวัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)} - \text{น้ำหนักวันใดๆ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)} \times \text{เวลา (วัน)}} \times 100 \quad (3-4)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การทดสอบการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสถานะต่างๆ แบ่งเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติของไมโครแคปซูล

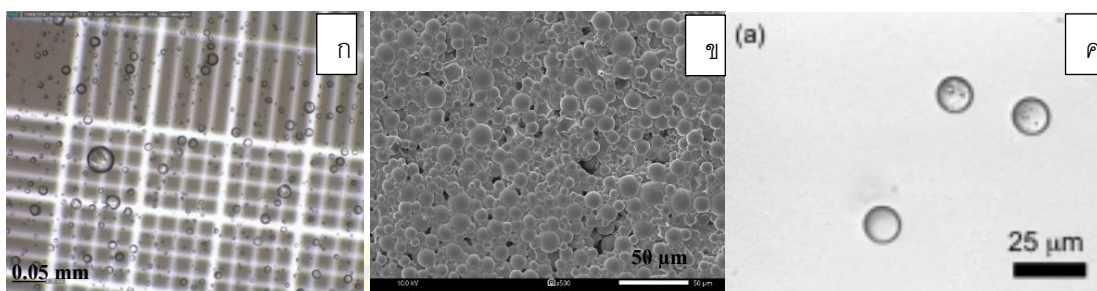
ตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะการซักที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล
ในน้ำซักล้าง

ตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำหอมต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโคร
แคปซูลในน้ำซักล้างที่มีผงซักฟอกสำเร็จรูป

ตอนที่ 4 ศึกษาผลกระทบของจากอุณหภูมิที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโคร
แคปซูลในอากาศ

ตอนที่ 1 ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติของไมโครแคปซูล

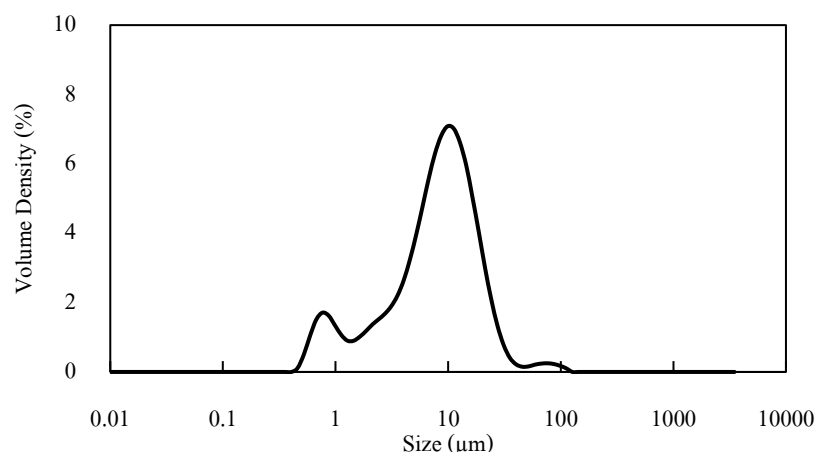
น้ำหอมที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำหอมที่มีขายทางการค้า และเป็นน้ำหอมที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก จากข้อมูลทางการค้า น้ำหอมนี้เป็นน้ำหอมที่ถูกบรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล ซึ่งจะทำให้อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมถูกควบคุมโดยชนิดของผนังไมโครแคปซูล จึงศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของไมโครแคปซูลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) กำลังขยาย 10 เท่า ดังภาพที่ 4-1 (ก) พบว่าไมโครแคปซูลมีทรงกลม ขอบของทรงกลมมีสีเข้มซึ่งน่าจะเป็นบริเวณผนังของไมโครแคปซูล จากสัณฐานวิทยาข้างต้นไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำหอมนี้เป็นไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว (Single core microcapsule) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Watanabe, Kimura, & Ono, 2014) ในภาพที่ 4-1 (ค) อีกทั้งภาพถ่ายไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ยืนยันว่าไมโครแคปซูลเป็นทรงกลมขนาดเล็กโดยไมโครแคปซูลส่วนใหญ่ มีขนาด ประมาณ 6-10 ไมโครเมตร และบางส่วนเป็นทรงกลมขนาดใหญ่ประมาณ 17-20 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 4-1 (ข)



ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ก) แบบใช้แสงกำลังขยาย 10 เท่า (ข) แบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า (ค) ไมโครแคปซูลแกนกลางเดี่ยวจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Watanabe et al., 2014)

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูล (Size distribution) ด้วยเครื่อง Particle size analyzer

การวิเคราะห์ขนาดของไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Particle size analyzer สามารถวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนได้จากค่าการกระเจิงแสงที่เกิดโดยอนุภาคที่ตรวจวัด และเปรียบเทียบปริมาณของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณของทรงกลม โดยแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตรเทียบเท่า (Equivalent volume diameter, D_v) พบว่า ไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำหอม แฉวนลอยอยู่ในน้ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร โดยอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร เมื่อคิดเป็นปริมาตรจะมีค่าสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 7 ของปริมาตรทั้งหมด ดังภาพที่ 4.2 อีกทั้ง ยังพบว่า อนุภาคขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ $1.5 (\pm 0.012)$ ไมโครเมตร เมื่อคิดเป็นปริมาตรจะคิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาตรทั้งหมด ($D_{v(10)}$) ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ $20.7 (\pm 0.06)$ ไมโครเมตร เมื่อคิดเป็นปริมาตรจะคิดเป็นร้อยละ 90 ของปริมาตรทั้งหมด ($D_{v(90)}$) กล่าวได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($D_{v(50)}$) มีค่า $8.9 (\pm 0.16)$ ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-2 ขนาดและการกระจายตัวของไมโครแคปซูล

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูล

Concentration	0.0111 (± 0.0004) %
Uniformity	0.756 (± 0.0314)
Span	2.169 (± 0.0304)
Specific Surface Area	1119 (± 5.5076) m ² /kg
Weighted Residual	1.17 (± 0.0208) %
D_{v(10)}	1.51 (± 0.012) µm
D_{v(50)}	8.9 (± 0.16) µm
D_{v(90)}	20.7 (± 0.06) µm
D_[4,3]	11.2 (± 0.10) µm
D_[3,2]	4.12 (± 0.02) µm

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ขนาดไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Particle size analyzer ไม่สามารถวิเคราะห์จำนวนเม็ดไมโครแคปซูลได้ จึงทำการหาสัดส่วนของจำนวนไมโครแคปซูลที่แขวนลอยอยู่ โดยสุ่มนับจำนวนไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และคำนวณความหนาแน่นของเม็ดไมโครแคปซูลดังสมการที่ 4-1 โดยจากผลการทดลองข้างต้น ไมโครแคปซูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่าเฉลี่ยประมาณ 10 ไมโครเมตร ($D_{v(50)}$) (8.9 ± 0.16) ไมโครเมตร พบว่าที่ปริมาณน้ำหอม 0.01 กรัม มีจำนวนไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร

เท่ากับ 1.4×10^5 เม็ดต่อตารางเซนติเมตร และมีจำนวนไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมโครเมตร เท่ากับ 0.3×10^5 เม็ดต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นสัดส่วน 82.4 และ 17.6 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำหอมเป็น 0.02 และ 0.03 กรัม พบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน กล่าวได้ว่าปริมาณไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 78.6 (± 3.43) ของไมโครแคปซูลทั้งหมด และ ปริมาณไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครเมตร มีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 21.4 (± 3.37) ของไมโครแคปซูลทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4-2

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{จำนวนเม็دن้้ำหอม/จำนวนช่อง}}{\text{ปริมาตรช่อง}} = \frac{\text{ไมโครแคปซูลน้ำหอม}}{4 \times 10^{-6}} \quad (4-1)$$

ตารางที่ 4-2 ปริมาณ ไมโครแคปซูลที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหอม

ปริมาณ น้ำหอม	D < 10 ไมโครเมตร			D ≥ 10 ไมโครเมตร		
	ความ หนาแน่น (เม็ด/cm ³)	SD	สัดส่วน จำนวน น้ำหอม (%)	ความ หนาแน่น (เม็ด/cm ³)	SD	สัดส่วน จำนวน น้ำหอม (%)
0.01 g	1.4×10^5	0.7×10^5	82.4	0.3×10^5	0.4×10^5	17.6
0.02 g	2.8×10^5	0.3×10^5	75.7	0.9×10^5	0.4×10^5	24.3
0.03 g	3.5×10^5	0.4×10^5	77.8	1.0×10^5	0.5×10^5	22.2
	ค่าเฉลี่ย		78.6	ค่าเฉลี่ย		21.4

อีกทั้ง ได้มีการนำภาพถ่ายเม็ดไมโครแคปซูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ไปวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลด้วยโปรแกรม ImageJ แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 การกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลด้วยโปรแกรม ImageJ

ครั้งที่	D < 10 ไมโครเมตร	D ≥ 10 ไมโครเมตร
1	86.67	13.33
2	80.00	20.00
3	83.33	16.67
ค่าเฉลี่ย	83.33	16.67
SD	3.33	3.33

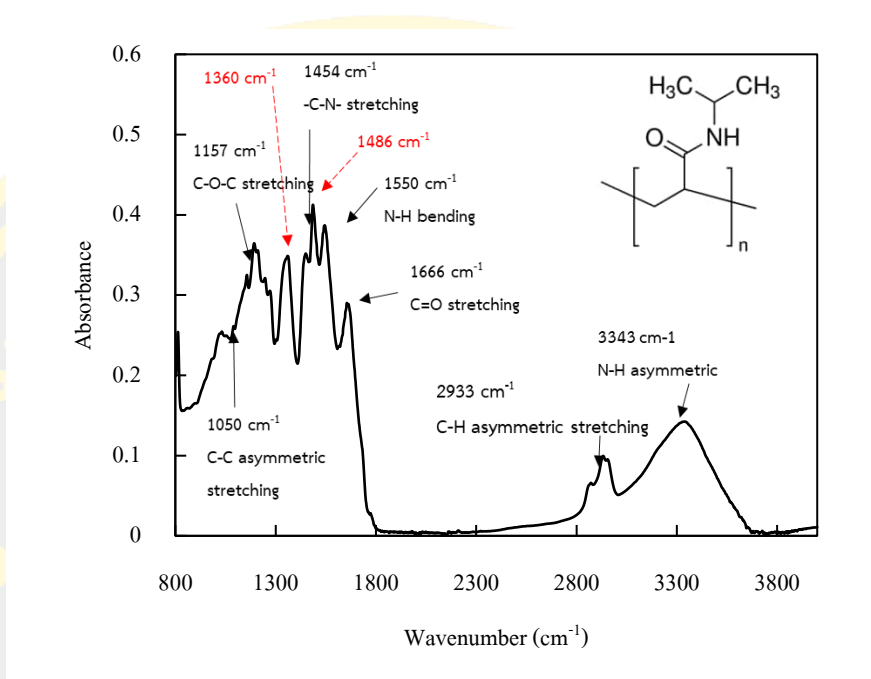
พบว่าปริมาณไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 83.3 (± 3.33) ของไมโครแคปซูลทั้งหมด และปริมาณไมโครแคปซูลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครเมตร มีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 16.7 (± 3.33) ของไมโครแคปซูลทั้งหมด กล่าวได้ว่า จากการวิเคราะห์ปริมาณไมโครแคปซูลทั้ง 2 วิธี (การนับ และการใช้โปรแกรม imageJ) ให้ผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ไมโครแคปซูลขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีจำนวนมากถึงร้อยละ 83 ของจำนวนไมโครแคปซูลทั้งหมด

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผนังไมโครแคปซูลด้วย FTIR

องค์ประกอบของผนังไมโครแคปซูล วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR-ATR spectroscopy แสดงในภาพที่ 4-3 เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของสารมาตรฐาน (Library searching) พบว่าผนังไมโครแคปซูล มีความเป็นไปได้ที่จะเป็น Hydroxocobalamin Acetate หรือเป็น 3,5-Diacetamido-2,4,6-Trilodobenzoic acid หรือเป็น Poly(acrylamide) ดังแสดงในภาพผนวก โดยสารสองชนิดแรกไม่จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ จึงเป็นไปได้ว่าผนังไมโครแคปซูลเป็นพอลิอะคริลาไมด์ ซึ่งนิยมใช้ในการทำไมโครแคปซูลที่มีกลการปล่อยที่ควบคุมโดยเคมี (Chemically control system) ประเภทไฮโดรเจล (Hydrogel) ยิ่งไปกว่านั้น การปรากฏพิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wavenumber) 3343 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะ N-H บนสายโซ่พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) และปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 2933 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเกิดจาก C-H ในพันธะ -CH₂ อีกทั้งพบพิกที่ตำแหน่ง 1666 เซนติเมตร⁻¹ 1550 เซนติเมตร⁻¹ และ 1454 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะคาร์บอนิล C=O พันธะ N-H และพันธะ C-N ในกลุ่มเอไมด์ตามลำดับ รวมถึงการปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 1157 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะ C-O-C และพิกที่ตำแหน่ง 1050 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะ C-C

จากข้อมูลของหมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์ได้จากผนังไมโครแคปซูลนั้น สอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) แสดงในตารางที่ 4-4 (Gaabour, 2017) อย่างไรก็ตาม

ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1360 และ 1486 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งน่าจะเป็นองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นองค์ประกอบร่วมในพอลิอะคริลาไมด์ กล่าวได้ว่า ไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำหอมนี้ผลิตจากพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide-based microcapsule)



ภาพที่ 4-3 สเปกตรัม FTIR ของผนังไมโครแคปซูล

ตารางที่ 4-4 หมู่ฟังก์ชันของพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) (Gaabour, 2017)

Wavenumber (cm ⁻¹)	Band assignment
3419	N-H asymmetric stretching
2940	C-H asymmetric stretching
1660	C=O stretching
1601	N-H bending
1431	C-N stretching
1111	C-O-C stretching
1070	C-C asymmetric stretching

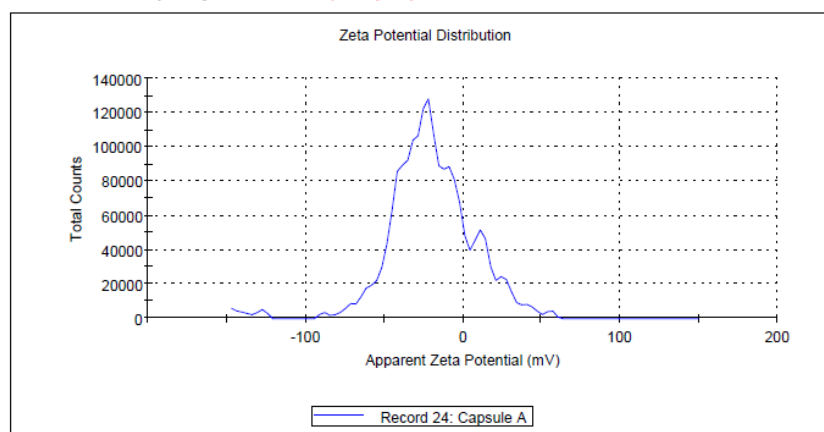
การวิเคราะห์ศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของผนังไมโครแคปซูลด้วยเครื่อง Zetasizer

พื้นผิวของไมโครแคปซูลมีค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) เฉลี่ยเท่ากับ $-48.2 (\pm 1.76)$ มิลลิโวลต์ (ข้อมูลการวิเคราะห์ศักย์ซีต้าแสดงในภาคผนวก ก) ในสภาวะตัวกลางเป็นน้ำปราศจากไอออน ที่มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ศักย์ซีต้าของพื้นผิวที่มีพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบ (*N-n*-Isopropylacrylamid; NPAM) ซึ่งมีเป็นลบเช่นกัน (Salinas et al., 2018)

ประจุบนผิวของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ โดยอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่าค่า Points of zero charge (pH_{pzc}) (pH_{pzc} คือ ค่า pH ของสารละลายที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ แล้วทำให้ค่าศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์) จะทำให้ผิวของอนุภาคมีค่าศักย์ซีต้าเป็นลบ ในทางกลับกัน อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่าค่า pH_{pzc} จะทำให้ผิวของอนุภาคมีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวก ดังนั้น การที่ผนังแคปซูลมีค่าศักย์ซีต้าเป็นลบเมื่อแขวนลอยในน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 แสดงให้เห็นว่า ผนังแคปซูลน่าจะมีค่า Points of zero charge (pH_{pzc}) ต่ำกว่า 7

Results			
	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -48.9	Peak 1: -31.1	58.6	13.0
Zeta Deviation (mV): 66.6	Peak 2: -5.32	19.7	5.27
Conductivity (mS/cm): 0.707	Peak 3: 11.6	11.3	5.08

Result quality [See result quality report](#)



ภาพที่ 4-4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของไมโครแคปซูล

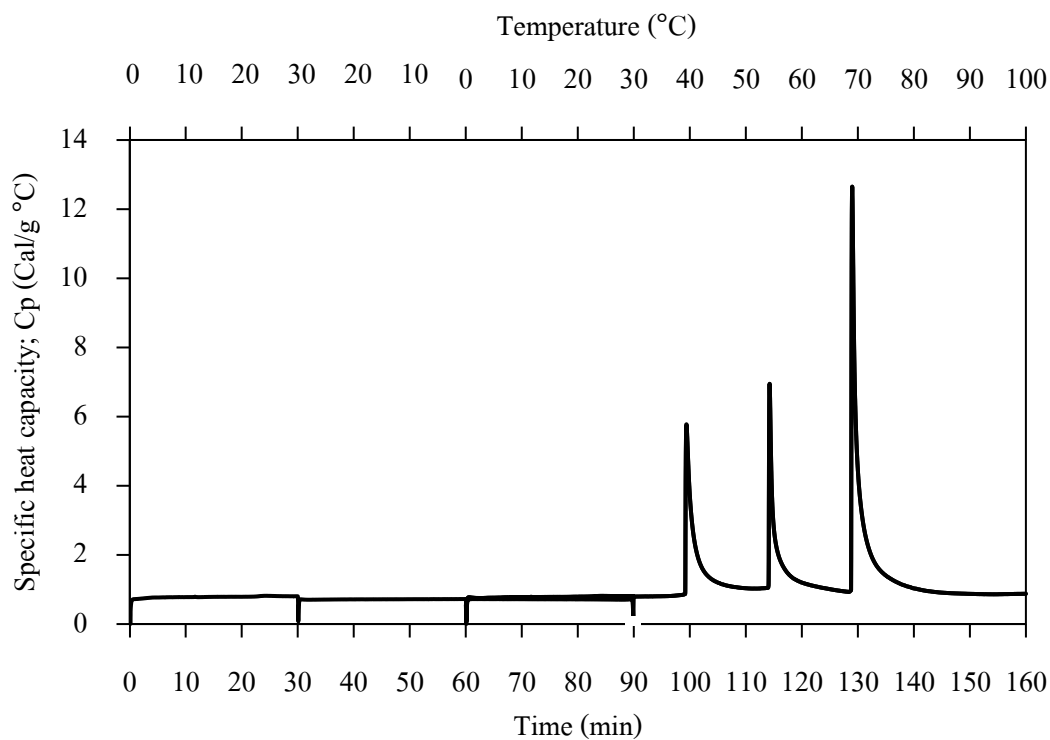
การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูล

เสถียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลวิเคราะห์ด้วย DSC โดยใช้เทคนิค heating cooling cycle ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อน 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ในสถานะที่มีแก๊สไนโตรเจน เริ่มจากการให้ความร้อนที่ 0 ถึง 30 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำหอมบางส่วนที่อาจจะแพร่ผ่านผนังไมโครแคปซูลและละลายอยู่ในน้ำ จากนั้นทำให้ตัวอย่างเย็นลงจาก 30 ถึง 0 องศาเซลเซียส แล้วเริ่มให้ความร้อนอีกครั้งในช่วง 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4-5 พบว่า การให้ความร้อนช่วงแรก (0 ถึง 30 องศาเซลเซียส) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน จึงเป็นไปได้ว่า ตัวอย่างน้ำหอมที่นำมาทดสอบนี้ มีเพียงไมโครแคปซูล (น้ำและน้ำหอมที่อาจจะแพร่ผ่านผนังไมโครแคปซูลละลายอยู่ในน้ำ มีน้อยมาก) สำหรับช่วงที่สองการทำให้เย็นลง (30 ถึง 0 องศาเซลเซียส) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเช่นกัน ในขณะที่ การให้ความร้อนช่วงที่สาม (0 ถึง 100 องศาเซลเซียส) พบ การดูดความร้อน 3 จุด ที่อุณหภูมิ 40, 55 และ 70 องศาเซลเซียส โดยการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ 5.6 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส อุณหภูมิจุดนี้น่าจะเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคเชิงปริมาตร (Volume phase transition temperature: VPTT) ของไมโครแคปซูล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ VPTT ของพอลิอะคริลาไมด์ (32 องศาเซลเซียส) (Trongsatitkul & Budhlall, 2013) อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์พอลิอะคริลาไมด์ร่วมกับกรดอะคริลิก (Acrylic acid) จะทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูงกว่าเดิม จึงทำให้อุณหภูมิ VPTT สูงขึ้นเป็น 37.5 องศาเซลเซียส (Farooqi, Khan, Shah, & Siddiq, 2017)

อุณหภูมิ VPTT เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของไมโครแคปซูล โดยเมื่อไมโครแคปซูลอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ VPTT ผนังไมโครแคปซูลจะมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และจะดูดซับน้ำ ทำให้เกิดการบวมของผนัง (Swollen state) ซึ่งกลไกการปลดปล่อยสารภายในไมโครแคปซูลยังคงเกิดขึ้นโดยการแพร่ผ่านของสารผ่านรูของผนังไมโครแคปซูล แต่เมื่อไมโครแคปซูลอยู่ในอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ VPTT จะทำให้ผนังเกิดการหดตัว ซึ่งเกิดจากทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์กับสารละลาย (Beaudoin et al., 2021) ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารภายในไมโครแคปซูลออกมา

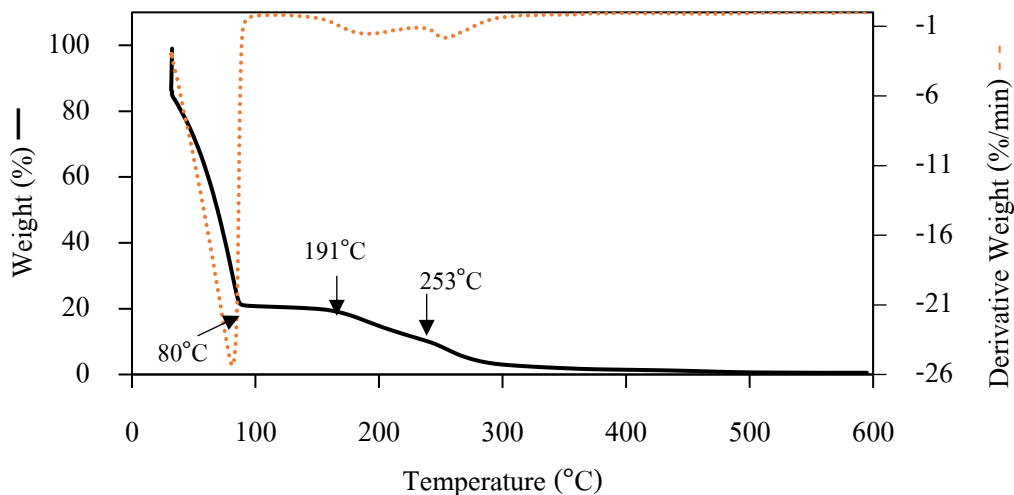
นอกจากนี้ พบการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นการระเหยของน้ำหอมภายในไมโครแคปซูล (Ether และ Ester) ที่ถูกปลดปล่อยออกจากไมโครแคปซูล เนื่องจากเกิดการหดตัวของไมโครแคปซูล (อุณหภูมิสูงกว่า VPTT) และพบการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ของผนังที่มีองค์ประกอบพอลิอะคริลาไมด์ผสม (Polyacrylamide-based substance) ที่มีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับพอลิอะคริลาไมด์บริสุทธิ์ ($T_g=75.5$ องศาเซลเซียส) ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงของ

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว เช่นเดียวกันงานวิจัย ที่มีการเตรียมพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ร่วมกับกรดอะคริลิก (Acrylic acid) ซึ่งมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 68.6 องศาเซลเซียส (Jafarigol, Salehi, & Mortaheb, 2020)



ภาพที่ 4-5 เทอร์โมแกรม DSC ของผนังไมโครแคปซูล

อีกทั้ง เสดียรภาพทางความร้อนของไมโครแคปซูลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ในช่วง 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงในภาพที่ 4-6 พบการสูญเสียน้ำหนักของไมโครแคปซูลน้ำหอมเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 81, 191 และ 253 องศาเซลเซียส โดยมีการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 78, 9 และ 10 ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ เป็นไปได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส น่าจะเป็นการสูญเสียน้ำหนักน้ำหอมภายในไมโครแคปซูล ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 191 องศาเซลเซียส น่าจะเป็นจุดหลอมเหลว (Melting point) ของไมโครแคปซูล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (T_M ของพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ร่วมกับกรดอะคริลิก (Acrylic acid) = 193 องศาเซลเซียส ในขณะที่ T_M ของพอลิอะคริลาไมด์บริสุทธิ์ เท่ากับ 179 องศาเซลเซียส) (Jafarigol et al., 2020) และการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 253 องศาเซลเซียส น่าจะเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของผนังไมโครแคปซูล (Decomposition)



ภาพที่ 4-6 เทอร์โมแกรม TGA ของน้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแขวนลอยอยู่

จากผลการวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูลข้างต้น สรุปได้ว่าน้ำหอมทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมผงซักฟอก เป็นไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ($D_{v(50)}$) มีค่า $8.9 (\pm 0.06)$ ไมโครเมตร โดยมีจำนวนไมโครแคปซูลที่มีขนาด < 10 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 78.6 ของจำนวนไมโครแคปซูลทั้งหมด และผนังไมโครแคปซูลมีพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีอนุหภูมิ VPTT เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และอนุหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำหอมภายในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatograph-Mass Spectrometry; GC-MS)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำหอมภายในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค GC-MS ปรากฏโครมาโทแกรมของน้ำหอมดังภาพที่ 4-7 และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่วิเคราะห์ได้กับข้อมูลโครมาโทแกรมมาตรฐาน (Library searching) พบว่า สารประกอบในน้ำหอมส่วนใหญ่ มีหมู่ฟังก์ชันเป็นอีเทอร์ (Ether) และ เอสเตอร์ (Ester) โดยมีองค์ประกอบของน้ำหอมชนิดต่างๆ ในไมโครแคปซูล แสดงดังตารางที่ 4-5



ภาพที่ 4-7 โครมาโทแกรมของน้ำหอมในไมโครแคปซูล

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบของน้ำหอมในไมโครแคปซูล

No.	Data	Functional group
1	Air	
2	Water	
3, 6	4-Vinyl-tetrahydro-4-pyranol	Ether
4	Octane,1-propoxy-(CAS)Propyl Octyle	Ether
5	n-Dodecanol	Alcohol
7	2-Propanol,1,1'-[(1-methyl-1,2-ethanediyl)	Ether
•	2,3-Pentanediol,2,4-dimethyl	Alcohol
10	1-Tetradecanol	Alcohol
11, 18	Ethanol,2-(dodecyloxy)	Ether
14	Methoxyacetic acid, tetradecyl ester	Ester
16	1,2-Benzenedicarboxylic acid	Ester
22	Diethylene glycol monododecyl ether	Ether
23	Octaethylene glycol monododecyl ether	Ether
25	Triethylene glycol monododecyl ether	Ether
26, 27	Octaethylene glycol monododecyl ether	Ether
31	Tetradecanoic acid, tetradecyl ester	Ester
32, 34	Octaethylene glycol monododecyl ether	Ether
33, 36	Hexadecanoic acid, tetradecyl ester	Ester
35, 39	Cholest-5-en-3-ol(3,beta)-acetate	Ester
37	5-Octadecenal	Aldehydes
38	3-Butoxy-1,1,1,5,5,5-hexamethyl-3-(trimethylsiloxy)trisiloxane	Ether

การวิเคราะห์ด้วย GC-MS ได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือจากหน่วยงานภายนอก ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงและการขอใช้เครื่องมือทำได้ในช่วงเวลาที่จำกัด จึงจำเป็นจะติดตามการปลดปล่อยน้ำหอมด้วย GC-FID ที่มีในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ซึ่งเครื่อง GC-FID (Column: TR-Biodiesel) มีความสามารถในการจำแนกสารได้แตกต่างจาก GC-MS ดังนั้น ข้อมูลข้อสารที่เป็นองค์ประกอบของน้ำหอมในไมโครแคปซูลที่วิเคราะห์ได้จาก GC-MS สามารถนำมาใช้กับการวิเคราะห์ด้วย GC-FID

โดยการนำองค์ประกอบที่ทราบข้างต้น มาทดสอบด้วยเครื่อง GC-FID เพื่อติดตามการปลดปล่อยน้ำหอมในไมโครแคปซูล

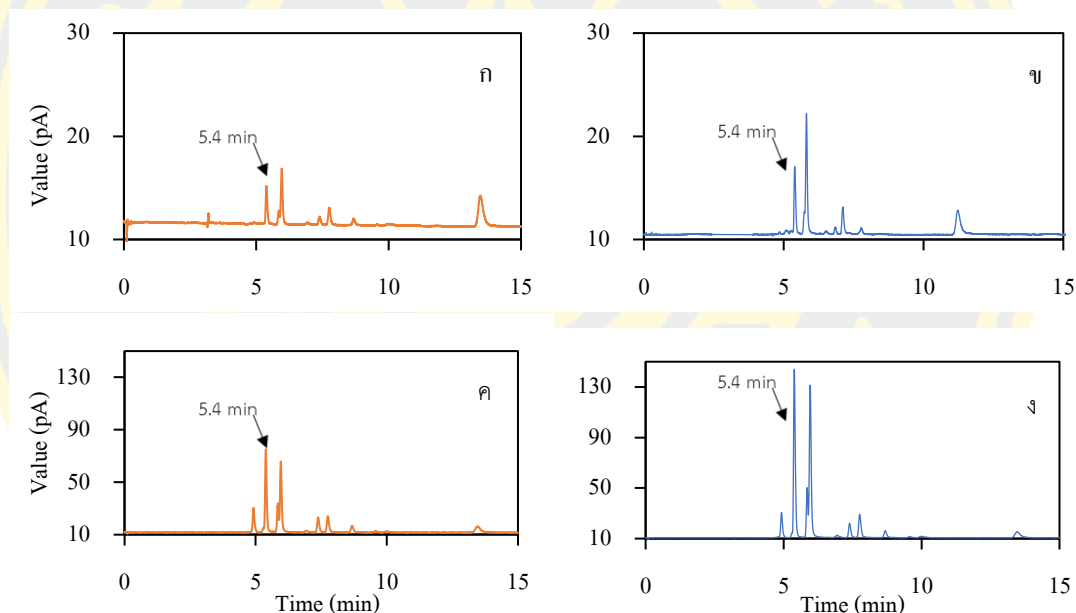
จากผลการวิเคราะห์สมบัติของไมโครแคปซูลที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าน้ำหอมทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมผงซักฟอก เป็นไมโครแคปซูลแบบแกนกลางเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ($D_{v(50)}$) มีค่า $8.9 (\pm 0.06)$ ไมโครเมตร โดยมีจำนวนไมโครแคปซูลที่มีขนาด < 10 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 83.3 ของจำนวนไมโครแคปซูลทั้งหมด และผนังไมโครแคปซูลมีพอลิเอคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีอุณหภูมิ VPTT เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส

ตอนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะการซักที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

การศึกษาการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง ทำโดยการจำลองการซักล้างในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่มีสารลดแรงตึงผิวลีนีเยอร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (LAS) 0.6 กรัม ไมโครแคปซูลภายในบรรจุน้ำหอม 50 มิลลิกรัม และน้ำปราศจากไอออน 8 กรัม กวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนเพื่อจำลองการซักล้างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายหลังจากซักล้าง น้ำหอมบางส่วนภายในไมโครแคปซูลจะถูกปลดปล่อยออกมาจากไมโครแคปซูลไปสู่ น้ำ จึงทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมในวัฏภาคน้ำเพื่อหาปริมาณน้ำหอมที่ถูกปลดปล่อยออกจากไมโครแคปซูล โดยดึงสารตัวอย่างในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร กรองด้วยไซริงค์กรองสารในลอนเพื่อแยกไมโครแคปซูล สารตัวอย่างที่ผ่านการกรองจะถูกวิเคราะห์ด้วย Headspace Gas Chromatograph ซึ่งจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ น้ำหอมย้ายจากวัฏภาคน้ำมาอยู่วัฏภาคแก๊ส โดยโครมาโทแกรมของน้ำหอมก่อนการซักล้าง (สารตัวอย่างก่อนการนำไปปั่นกวน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง) แสดงในภาพที่ 4-8 (ก) และโครมาโทแกรมของน้ำหอมในน้ำหลังการซักล้าง (ภายหลังจากการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) แสดงในภาพที่ 4-8 (ข) จะเห็นได้ว่า น้ำหอมที่ถูกปลดปล่อยในน้ำซักล้างจะปรากฏพีคทั้งหมด 7 พีค โดยปริมาณน้ำหอม (ความสูงพีค) ในน้ำก่อนการซักจะมีเพียงเล็กน้อย แต่ภายหลังจากซักล้างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณน้ำหอมที่ถูกปลดปล่อยออกมามีจำนวนเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากแรงทางกลได้แก่ การกวน ทำให้ผนังของไมโครแคปซูลน้ำหอมแตก รวมถึงอาจเกิดจากสภาวะในการซักได้แก่ อุณหภูมิ ส่งผลให้ความดันภายใน ไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้นเกิดการปลดปล่อยของน้ำหอมมากขึ้น

หากเปรียบเทียบโครมาโทแกรมที่เกิดจากการไมโครแคปซูลที่มีน้ำหอมบรรจุในขวดทดลองเพียงอย่างเดียว แสดงในภาพที่ 4-8 (ค) สภาวะก่อนอบทำเป็นองค์ประกอบของน้ำหอมที่

วิเคราะห์ด้วย Headspace Gas Chromatograph โดยไม่ผ่านการให้ความร้อนโดยเตาอบ พบว่าปรากฏพีคทั้งหมด 8 พีค โดยมีพีคที่เวลา 4.9 นาที ที่ปรากฏขึ้นในสภาวะนี้ แต่ไม่พบในสภาวะน้ำซักล้าง เป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของน้ำหอมที่ปรากฏพีคเวลา 4.9 นาที มีความสามารถในการละลายในน้ำสูง เมื่อจำลองสภาวะการทำให้ผ้าแห้งโดยการอบผ้า (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่สภาวะนี้จะเรียกว่า หลังอบ) แสดงในภาพที่ 4-8 (ง) พบว่าความสูงพีคจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ที่เกิดจากผลกระทบของอุณหภูมิ โดยการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่ปลดปล่อยจากการซักและที่ปลดปล่อยจากการทำให้แห้งที่สภาวะต่างๆ จะคำนวณโดยใช้ปริมาณพื้นที่ใต้กราฟของพีคทั้งหมด (Total peak area) เนื่องจากพีคที่ปรากฏขึ้นเป็นองค์ประกอบของน้ำหอมทั้งหมด



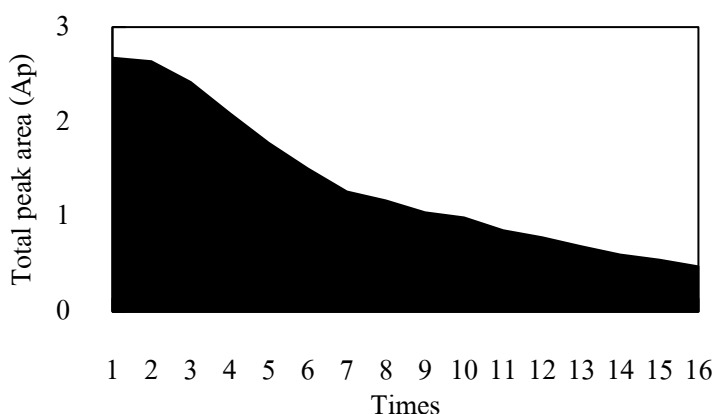
ภาพที่ 4-8 โครมาโทแกรมการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำ (ก) ก่อนซักล้าง (ข) หลังซักล้าง 1 ชั่วโมง การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ (ค) ก่อนอบ (ง) หลังอบ

ผลกระทบของอุณหภูมิและน้ำกระด้างที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

การจำลองสภาวะการซักล้างทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่มีน้ำหอม(ไมโครแคปซูล แวนดอย) 50 มิลลิกรัม และลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (LAS) 0.6 กรัม ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ 8 กรัม ซึ่งมีการปรับปริมาณ CaCO_3 ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ในช่วง 50-350 มิลลิกรัมต่อลิตร และให้ความร้อนเครื่องปฏิกรณ์ที่ 30 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในระหว่างการซักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณร้อยละการปลดปล่อยน้ำหอมในไมโครแคปซูล (Release of Perfume) จากสมการ (4-2)

$$\text{ร้อยละการปลดปล่อยน้ำหอม} = \frac{\text{ปริมาณน้ำหอมที่ปลดปล่อยในน้ำภายหลังการซัก}}{\text{ปริมาณน้ำหอมทั้งหมด}} \times 100 \quad (4-2)$$

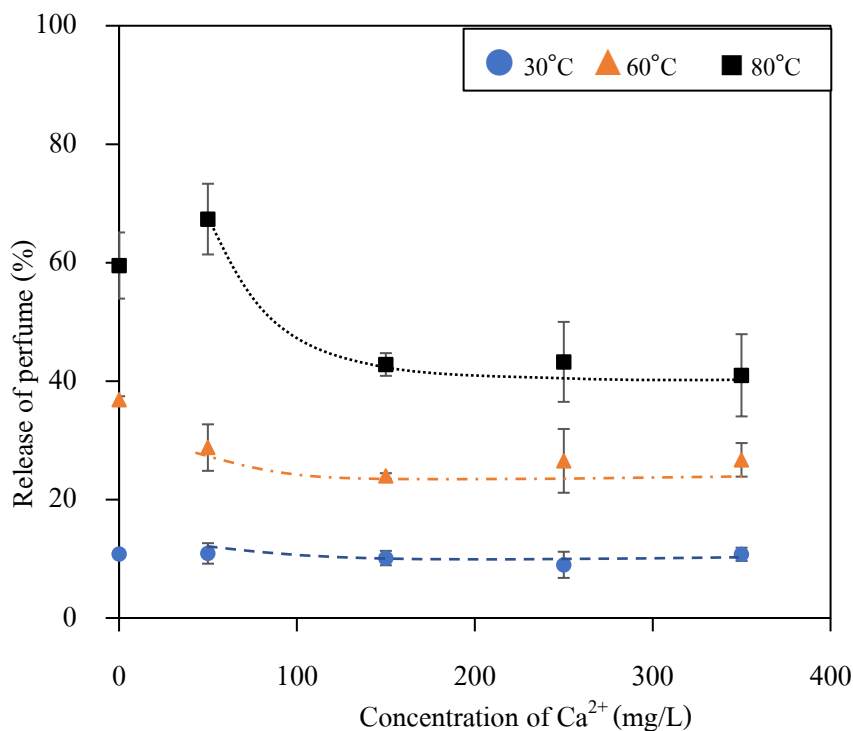
ปริมาณน้ำหอมทั้งหมดคำนวณจากผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟ (Total peak area) ที่เกิดจากการปลดปล่อยน้ำหอมที่มีการฉีดต่อเนื่องจนกระทั่งไม่ปรากฏพีก ดังภาพที่ 4-9 ซึ่งทำการทดลองโดยนำน้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแวนดอยอยู่ปริมาณ 3 มิลลิกรัมใส่ขวด แล้ววิเคราะห์ด้วย Headspace Gas Chromatograph ฉีดซ้ำขวดเดิม จนกระทั่งค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio; S/N) ต่ำกว่า 3 จากนั้นคำนวณผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดให้เป็นปริมาณน้ำหอมทั้งหมด สำหรับน้ำหอม 3 มิลลิกรัม จะมีพื้นที่ใต้กราฟ (ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟ จากการฉีดรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 16) รวมมีค่า $19.5 (\pm 2.75)$ พิโกแอมแปร์ ในการทดลองในสภาวะต่างๆ ใช้น้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแวนดอยอยู่ปริมาณ 50 มิลลิกรัม ดังนั้นผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟของน้ำหอมทั้งหมดที่จะนำไปใช้ในการคำนวณในการทดลองต่อไปมีค่าเท่ากับ 324 พิโกแอมแปร์



ภาพที่ 4-9 พื้นที่ใต้กราฟของพีกทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำหอมที่มีไมโครแคปซูลแวนดอย อยู่ 3 มิลลิกรัม

ผลกระทบของอุณหภูมิในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ภายหลังจากซັกล้าง ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ที่มี Ca^{2+} ในช่วง 0 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 แสดงดัง ภาพที่ 4-10 พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมที่อุณหภูมิน้ำซັกล้าง 80 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ ผนังของไมโครแคปซูล น้ำหอมมีพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบหลัก (Polyacrylamide-based) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิต่างๆ จัดเป็นไมโครแคปซูลประเภทไฮโดรเจล โดยในกรณีที่พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง วิกฤตเชิงปริมาตร (Volume phase transition temperature; VPTT) พอลิเมอร์จะสามารถละลายน้ำได้และเกิดการบวม (Swollen state) ทำให้น้ำหอมภายในไมโครแคปซูลเกิดการปลดปล่อยอย่างช้าๆ ในทางกลับกัน หากอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง วิกฤตเชิงปริมาตร พอลิเมอร์จะไม่ละลายน้ำและเกิดการหดตัว ส่งผลให้น้ำหอมภายในไมโครแคปซูลเกิดการปลดปล่อย ได้มากยิ่งขึ้น (López-León, Elaissari, Ortega-Vinuesa, & Bastos-González, 2007) ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง วิกฤตเชิงปริมาตรของไมโครแคปซูลที่ทำจากพอลิอะคริลาไมด์ในการทดลองนี้จะอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าไมโครแคปซูล ที่แขวนลอยในน้ำซັกล้างที่อุณหภูมิ 80 และ 60 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ VPTT ซึ่งมีค่า 40 องศาเซลเซียส) จะทำให้ไมโครแคปซูลเกิดการยุบตัว (Collapse) (Salinas et al., 2018) ส่งผลให้น้ำหอมภายในไมโครแคปซูลถูกปลดปล่อยออกมาได้ มากกว่าไมโครแคปซูลที่แขวนลอยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ได้ดี ทำให้เกิดการบวมของผนัง ส่งผลให้การปลดปล่อยน้ำหอมออกจากไมโครแคปซูลเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อีกทั้ง การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ VPTT สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีกล่าวไว้ว่า อัตราการปลดปล่อยสารจากไมโครเจลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (Trongsatitkul & Budhlall, 2013)

ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ภายหลังจากซັกล้างในน้ำประปา พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำประปาที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 11.27 (± 0.28), 36.15 (± 5.55) และ 68.74 (± 1.54) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า แนวโน้มการปลดปล่อยน้ำหอมจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการปลดปล่อยน้ำหอม ในน้ำกระด้างสังเคราะห์

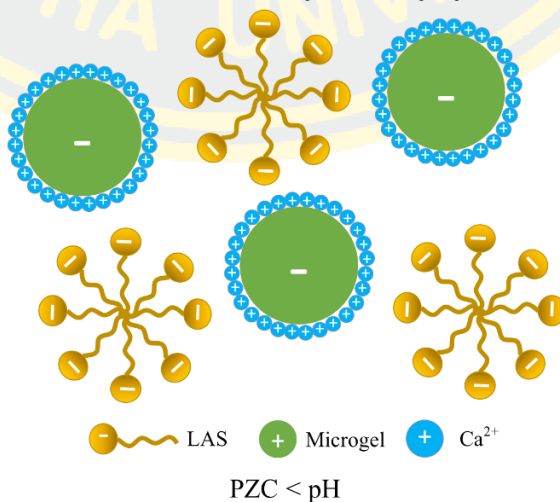


ภาพที่ 4-10 การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสภาวะการซักล้างที่ใช้น้ำที่มีแคลเซียมไอออน ซักที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยมีค่าความเป็นกรดเบสของน้ำซักล้างเท่ากับ 7

การศึกษาผลกระทบของค่าความกระด้างของน้ำซักล้าง โดยการสังเคราะห์น้ำที่มีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็น 0.5 ถึง 3.5 mM) ในน้ำอุณหภูมิ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-10 พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำที่มีแคลเซียมไอออนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำที่มีแคลเซียมไอออนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ในน้ำสังเคราะห์ปริมาณ Ca^{2+} น้อยกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลลดลง ในขณะที่ในน้ำสังเคราะห์ปริมาณ Ca^{2+} มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่ส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมอย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ การมีอยู่ของ CO_3^{2-} (CO_3^{2-} มาจากน้ำกระด้างสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากการละลาย CaCO_3) แม้จะมีความสามารถสูงสุดในการเพิ่มการละลายของพอลิเมอร์ในน้ำตามลำดับฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series: $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{S}_2\text{O}_3^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^{2-} > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- \approx \text{NO}_3^- > \text{I}^- > \text{ClO}_4^- > \text{SCN}^-$ (Hyde et al., 2017)) และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า VPTT อย่างมีนัยสำคัญ (Beaudoin et al., 2021) อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของไอออนในช่วงทำการทดลอง (0.5 ถึง 3.5 mM) น่าจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า VPTT เนื่องจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า VPTT ของ

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากพอลิอะคริลาไมด์ (poly(acrylamide)) ร่วมกับพอลิอะคริลิกแอซิด (poly(acrylic acid)) ในน้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนลบในช่วง 0 ถึง 10 mM มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 1 องศาเซลเซียส (Beaudoin et al., 2021) ดังนั้น การปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำกระด้างที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ VPTT (จากการวิเคราะห์ DSC พบว่า VPTT = 40 องศาเซลเซียส) และการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำกระด้างที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ VPTT น่าจะเป็นผลมาจากการมีอยู่ของไอออนบวก(Ca^{2+})

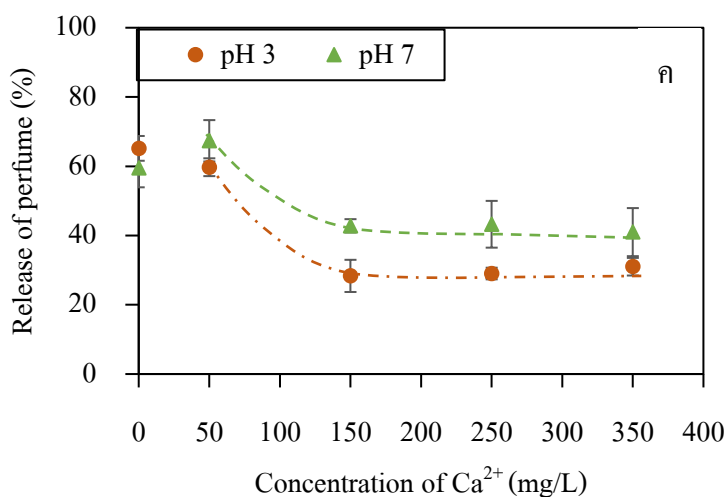
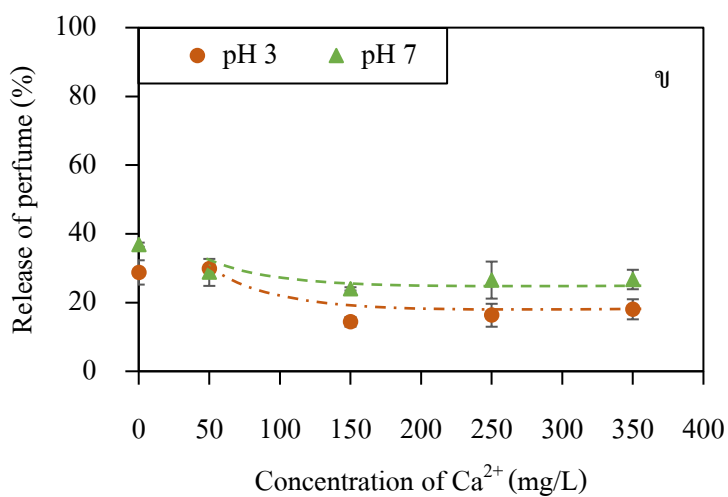
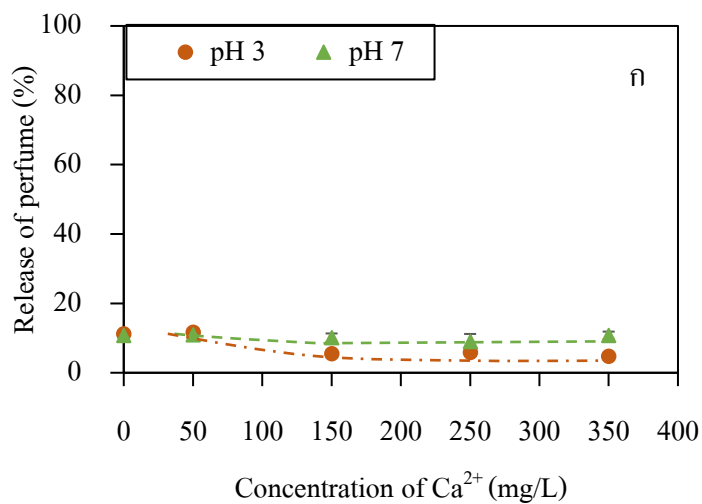
จากผลการวิเคราะห์ศักย์ซีต้าข้างต้น พบว่า ไมโครแคปซูลมีประจุเป็นลบ (ค่าศักย์ซีต้าเฉลี่ย เท่ากับ -48.2 ± 1.76 มิลลิโวลต์) ในน้ำปราศจากไอออน ที่มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 7 ทำให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะเข้าไปล้อมรอบไมโครแคปซูลได้ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุในขณะเดียวกัน สารลดแรงตึงผิวซึ่งมีประจุลบ จะไม่เข้าไปล้อมรอบไมโครแคปซูล (เกิดแรงผลักระหว่างประจุของสารลดแรงตึงผิวและไมโครแคปซูล) แต่จะจับตัวเป็นไมเซลล์ (Micelle) ดังภาพที่ 4-11 จึงเป็นไปได้ว่า การมีอยู่ของแคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ VPTT) จะไปขัดขวางการหดตัวเกิดขึ้น (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ ทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมออกจากไมโครแคปซูลมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของแคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้นสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร การปลดปล่อยน้ำหอมมีค่าคงที่ อาจเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมไอออนมีมากเกินไปที่จะห้อมล้อมไมโครแคปซูล สำหรับผลกระทบของปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยน้ำหอมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากกลไกการปลดปล่อยน้ำหอมในที่อุณหภูมิต่ำกว่า VPTT เป็นการแพร่ผ่านของน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ซึ่งมีการปลดปล่อยในปริมาณน้อยกว่าการปลดปล่อยด้วยกลไกการหดตัวของไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิสูงกว่า VPTT



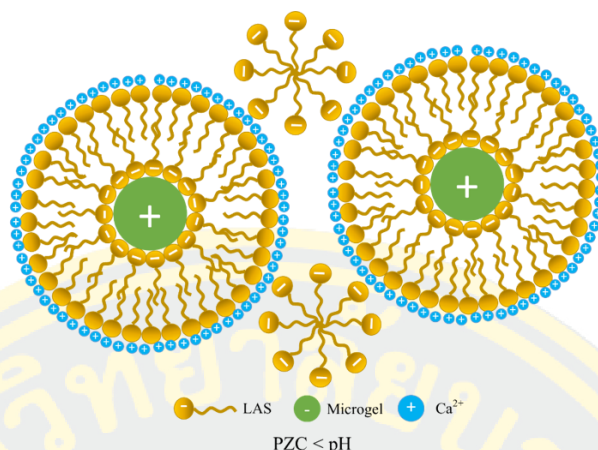
ภาพที่ 4-11 การจำลองการล้อมรอบของประจุบนพื้นผิวไมโครแคปซูลที่มีประจุลบ

ผลกระทบของค่าความเป็นกรดต่างที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

ผลกระทบของค่าความเป็นกรดต่างของน้ำซักล้างเป็นการจำลองสภาวะการซักผ้าเปื้อนคราบเหงื่อ ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ที่มีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการปรับค่าความเป็นกรดต่างลดลงที่ pH 3 เปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำซักล้างที่ pH 7 โดยใช้ไมโครแคปซูลบรรจุน้ำหอม 50 มิลลิกรัม ลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (LAS) 0.6 กรัม ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ 8 กรัม และให้ความร้อนเครื่องปฏิกรณ์ที่ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในระหว่างการซักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ดังภาพที่ 4-12) พบว่าในน้ำซักล้างที่มีความกระด้างและที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 และ 7 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไม่พบความแตกต่างในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลอย่างมีนัยสำคัญ (ดังภาพที่ 4-12 (ก)) เนื่องจากการปลดปล่อยของน้ำหอมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิต่ำกว่า VPPT) ถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านของน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ในขณะที่ ในน้ำซักล้างที่มีความกระด้างและมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้างที่มีค่าความเป็นกรดต่าง pH 7 สูงกว่าที่ pH 3 (ดังภาพที่ 4-12 (ข)) อาจเป็นเพราะ เมื่อน้ำซักล้างมีค่าความเป็นกรดต่างลดลง น่าจะทำให้ไมโครแคปซูลเกิดการเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวจากประจุลบเป็นประจุบวก ทำให้สารลดแรงดึงผิวที่มีประจุเป็นลบ เคลื่อนที่ไปล้อมรอบไมโครแคปซูล เนื่องจากแรงดึงดูดของประจุที่ต่างกัน ในขณะที่แคลเซียมไอออนที่เป็นบวก จะไปล้อมรอบสารลดแรงดึงผิวอีกชั้นหนึ่ง ดังภาพที่ 4-13 จึงเป็นไปได้ว่า การล้อมรอบไมโครแคปซูลด้วยสารลดแรงดึงผิวร่วมกับการมีอยู่ของแคลเซียมไอออน ในช่วง 0-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้การบีบตัวของผนังไมโครแคปซูลเกิดได้ลดลง ส่งผลให้การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลลดลง ในขณะที่การมีอยู่ของ Ca^{2+} ในปริมาณมากเกินไป (มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะไม่ส่งต่อการปลดปล่อยน้ำหอมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำซักล้างที่มีความกระด้างและมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ดังภาพที่ 4-12 (ค))



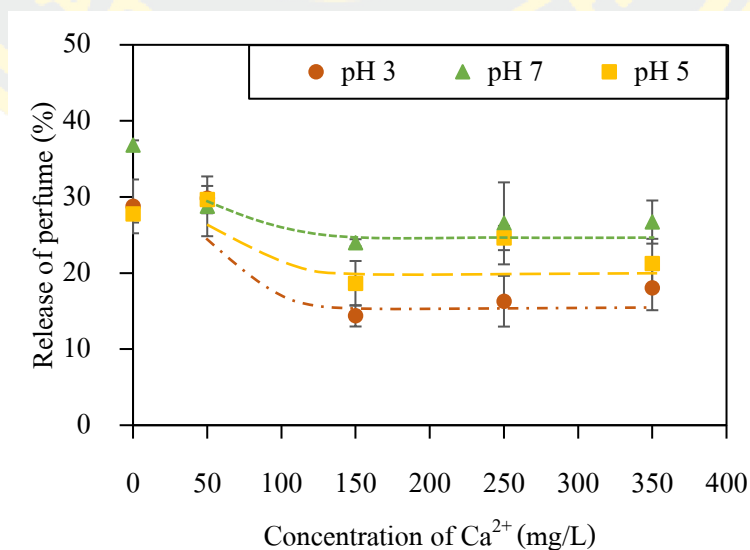
ภาพที่ 4-12 การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะซักล้างที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 7 และ 3 ที่อุณหภูมิ
(ก) 30 องศาเซลเซียส (ข) 60 องศาเซลเซียส และ (ค) 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-13 การจำลองการล้อมรอบของประจุบนพื้นผิวไมโครแคปซูลที่มีประจุบวก

อีกทั้ง ได้ทำการทดสอบการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำกระด้างสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างที่ pH 3 pH 5 และ pH 7 แสดงดังภาพที่ 4-14 พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำกระด้างสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลงเมื่อ pH ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

แม้ว่าการปนเปื้อนของแคลเซียมไอออนในน้ำซักล้างจำนวนมาก (มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะส่งผลให้การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลลดลง กล่าวคือ มีการสูญเสียน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในขณะที่ซักผ้าลดลง อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของแคลเซียมไอออนจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการซัก การก่อตัวของไมเซลล์ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการซักผ้า อีกทั้งการปนเปื้อนของแคลเซียมไอออนอาจส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมในขณะสวมใส่ ซึ่งจะมีการกล่าวถึงต่อไป



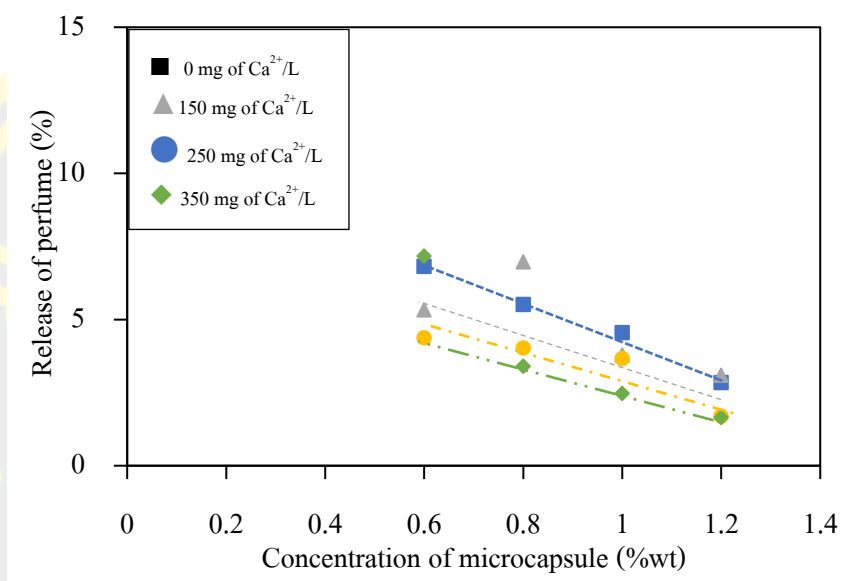
ภาพที่ 4-14 การปลดปล่อยน้ำหอมในสถานะซักล้างที่มีค่าความเป็นกรดด่างที่ 7 5 และ 3 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตอนที่ 3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณไมโครแคปซูลในผงซักฟอกสำเร็จรูปในการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

การศึกษาผลกระทบของปริมาณไมโครแคปซูลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมในผงซักฟอกสำเร็จรูป เพื่อเป็นการจำลองสภาวะการใช้งานจริงของผู้บริโภค และการจำลองการซักผ้าเน้นการตามฉลากข้างบรรจุภัณฑ์สินค้า โดยใช้ผงซักฟอก 32 มิลลิกรัม ในน้ำกระด้างชนิดต่างๆ 8 มิลลิลิตร และปรับปริมาณไมโครแคปซูล 50 ถึง 102 มิลลิกรัม (โดยคิดเป็นร้อยละโดยมวล 0.6 ถึง 1.2 ของปริมาณน้ำซักล้าง) ทำการซักล้างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 และมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4-15 พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะ กลไกการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นการแพร่ผ่านผนังที่เกิดการบวมน้ำ เมื่อจำนวนไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น ควรจะทำให้ปริมาณน้ำหอมในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำหอมในน้ำกลับมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะความสามารถในการละลายของน้ำหอมมีค่าจำกัด จึงทำให้ไมโครแคปซูลแต่ละแคปซูลมีการปลดปล่อยน้ำหอมลดลง ส่งผลให้ร้อยละการปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำต่อปริมาณน้ำหอมทั้งหมดมีค่าลดลง ซึ่งพบแนวโน้มเดียวกันในน้ำกระด้างสังเคราะห์ที่มีปริมาณ Ca^{2+} ที่แตกต่างกัน

ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบแรงตึงผิว (Surface tension) ของน้ำซักผ้าที่เตรียมในสภาวะการใช้งานจริงของผู้บริโภค (ผงซักฟอกสำเร็จรูป 32 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็นปริมาณ LAS ในผงซักฟอก 26 มิลลิกรัม ที่มีไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัมในน้ำ 8 กรัม คิดเป็นความเข้มข้นของ LAS ในน้ำ 3.25 กรัมต่อลิตร) กับแรงตึงผิวในสภาวะการจำลองการซัก (ลิเนียร์อัลคิลเบนซินซัลโฟเนต (LAS) 0.6 กรัมที่มีไมโครแคปซูล 50 มิลลิกรัม ในน้ำ 8 กรัม คิดเป็นความเข้มข้นของ LAS ในน้ำ 75 กรัมต่อลิตร) พบว่า ค่าแรงตึงผิวของน้ำซักผ้าในสภาวะการใช้งานจริงของผู้บริโภค (สภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 ในตารางที่ 4-6) มีค่าไม่แตกต่างจากค่าแรงตึงผิวของสภาวะการจำลองการซัก (สภาวะที่ 3 และสภาวะที่ 4 ในตารางที่ 4-6) แม้ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสภาวะการใช้งานจริงจะมีจำนวนน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวในสภาวะจำลองถึง 23 เท่า นั่นเป็นเพราะความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสภาวะข้างต้น มีค่าสูงกว่าค่า CMC (Critical micelle concentration) ของ LAS (CMC ของ LAS ที่ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.65 กรัมต่อลิตร) จึงไม่ทำให้ค่าแรงตึงผิวลดลงภายหลังจากการเติมสารลดแรงตึงผิวเกินกว่า 0.65 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน พบว่า น้ำซักล้างที่มีสารลดแรงตึงผิวในปริมาณสูง (สภาวะที่ 4 ตารางที่ 4-6) จะทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมมีค่า 10.77 ในขณะที่น้ำซักล้าง

ที่มีสารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อย (สภาวะที่ 2 ตารางที่ 4-6) จะมีการปลดปล่อยน้ำหอมเพียง 6.82 จะเห็นได้ว่า สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในผงซักฟอกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการซัก หากมีมากเกินไปจะทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลมีปริมาณสูงขึ้น นั่นอาจทำให้ปริมาณน้ำหอมคงอยู่ในไมโครแคปซูล จะถูกปลดปล่อยในขณะที่สวมใส่ได้ลดลง



ภาพที่ 4-15 การปลดปล่อยน้ำหอมในผงซักฟอกสำเร็จรูปที่มีปริมาณ ไมโครแคปซูลเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยให้ความร้อนอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

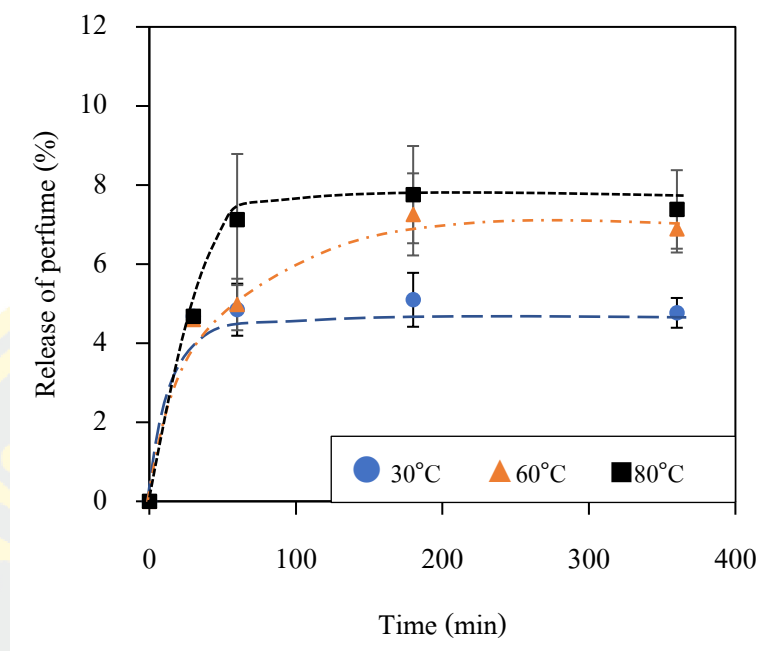
ตารางที่ 4-6 ค่าแรงตึงผิวของน้ำซักผ้าและการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง

สภาวะที่	สารตัวอย่าง	แรงตึงผิว (ดาเยนต่อเซนติเมตร)	ร้อยละการ ปลดปล่อยน้ำหอม
1	ผงซักฟอก 32 มก. + น้ำปราศจาก ไอออน 8 มล.	33.28 (±0.48)	
2	ผงซักฟอก 32 มก. + ไมโครแคปซูล 50 มก. + น้ำปราศจากไอออน 8 มล.	30 (±0.00)	6.82
3	Las-Na 0.6 ก. + น้ำปราศจาก ไอออน 8 มล.	35.89 (±0.19)	
4	Las-Na 0.6 ก. + ไมโครแคปซูล 50 มก. + น้ำปราศจากไอออน 8 มล.	34.17 (±0.29)	10.77

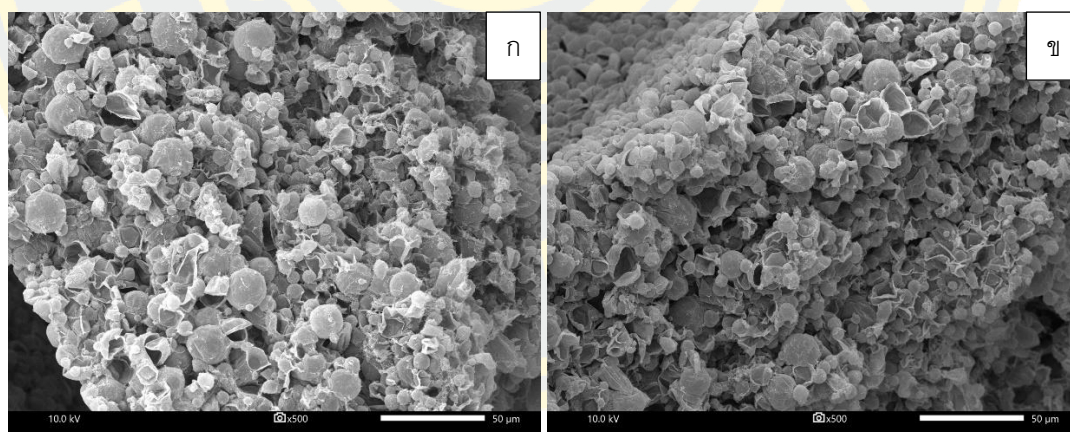
ตอนที่ 4 ศึกษาผลกระทบของการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในอากาศ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

การจำลองสภาวะการทำผ้าแห้ง คัดเสมือนมีเพียงไมโครแคปซูลเท่านั้นที่เหลื่ออยู่บนเนื้อผ้า จึงทำการทดลองบรรจุไมโครแคปซูลน้ำหอม 50 มิลลิกรัม ใส่ขวดปิดฝา นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 ถึง 360 นาที โดยจำลองสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (การจำลองการตากผ้า) 60 องศาเซลเซียส (จำลองขั้นตอนสเปรย์น้ำหอมบนผงซักฟอกในกระบวนการผลิต) และ 80 องศาเซลเซียส (การจำลองการอบผ้า) ดังแสดงในภาพที่ 4-16 พบว่า การจำลองการตากผ้าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะเกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก คิดเป็นปริมาณน้ำหอมร้อยละ 4.8 จากปริมาณน้ำหอมทั้งหมด และจะเกิดการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จนถึง 360 นาที เนื่องจากกลไกการปลดปล่อยในสภาวะนี้เกิดขึ้นเองจากการแพร่ ซึ่งเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของน้ำหอมที่ผิวด้านนอกของไมโครแคปซูล กับความเข้มข้นของสภาวะแวดล้อม

ในขณะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะเกิดการปลดปล่อยของน้ำหอมอย่างรวดเร็วและคงที่ที่ 180 นาที คิดเป็นปริมาณการปลดปล่อยอยู่ที่ร้อยละ 7 จากปริมาณน้ำหอมทั้งหมด และพบแนวโน้มการปลดปล่อยเช่นเดียวกันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดการปลดปล่อยของน้ำหอมอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่ที่เวลา 60 นาที การปลดปล่อยน้ำหอมที่สูงขึ้นและเร็วขึ้นน่าจะเป็นผลจากน้ำหอมภายในไมโครแคปซูลมีความดันไอเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถกลายเป็นไอของน้ำหอมสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำหอมสามารถเคลื่อนที่ผ่านไมโครแคปซูลไปได้มากขึ้น (Yang et al., 2014) อีกทั้งความดันไอที่สูงขึ้นทำให้ไมโครแคปซูลเกิดการแตก ซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่ายไมโครแคปซูลที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 4-17 (ก) ซึ่งพบการแตกของไมโครแคปซูลจำนวนมากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 4-17 (ข)



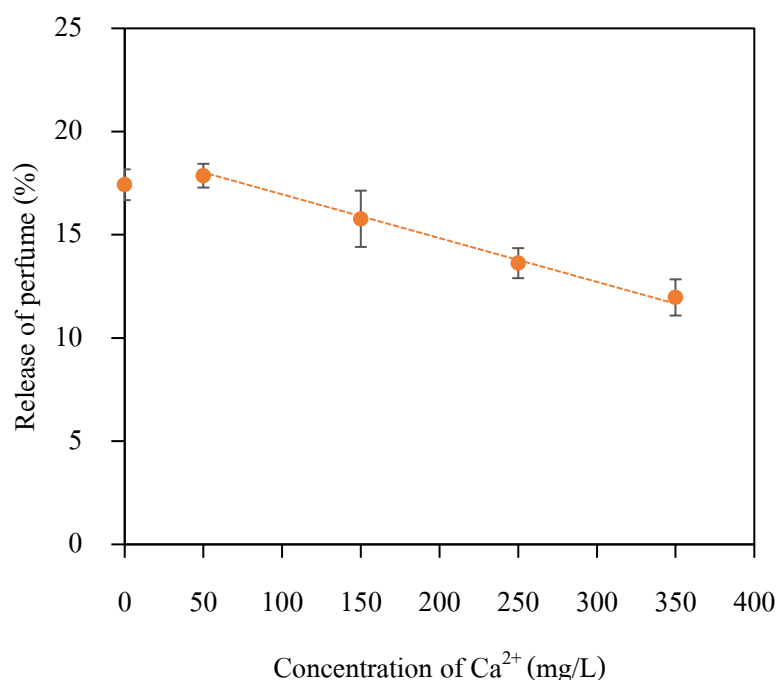
ภาพที่ 4-16 การปลดปล่อยน้ำหอมในสภาวะอากาศ ให้ความร้อนอุณหภูมิ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-17 ภาพถ่าย SEM ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส และ (ข) 90 องศาเซลเซียส

ผลกระทบของแคลเซียมไอออนที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลหลังการซักล้างในน้ำกระด้างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลกระทบของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่ผ่านกระบวนการซักล้างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการจำลองสถานการณ์ใช้งานจริงของผู้บริโภคขณะตากผ้าหลังการซักเสร็จ โดยใช้ลิเนียร์อัลทิลเบนซินซิลโฟเนต (LAS) 0.6 กรัม ในน้ำกระด้างสังเคราะห์ 1 กรัม (Ca^{2+} ในช่วง 50-350 มิลลิกรัมต่อลิตร) และให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 4-18 พบการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส Ca^{2+} จะไปขัดขวางการหดตัวเกิดขึ้น (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ ทำให้การปลดปล่อยน้ำหอมออกจากไมโครแคปซูลมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของแคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้นสูงกว่า 110 มิลลิกรัมต่อลิตร การปลดปล่อยน้ำหอมมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการห่อล้อมไมโครแคปซูลที่หนาขึ้น ดังกลไกในภาพที่ 4-11 การจำลองการล้อมรอบของประจุบนพื้นผิวไมโครแคปซูลที่มีประจุลบ ซึ่งมีการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำที่มีแคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้น 110 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณร้อยละ 18.2 (± 0.49) จากปริมาณน้ำหอมทั้งหมด



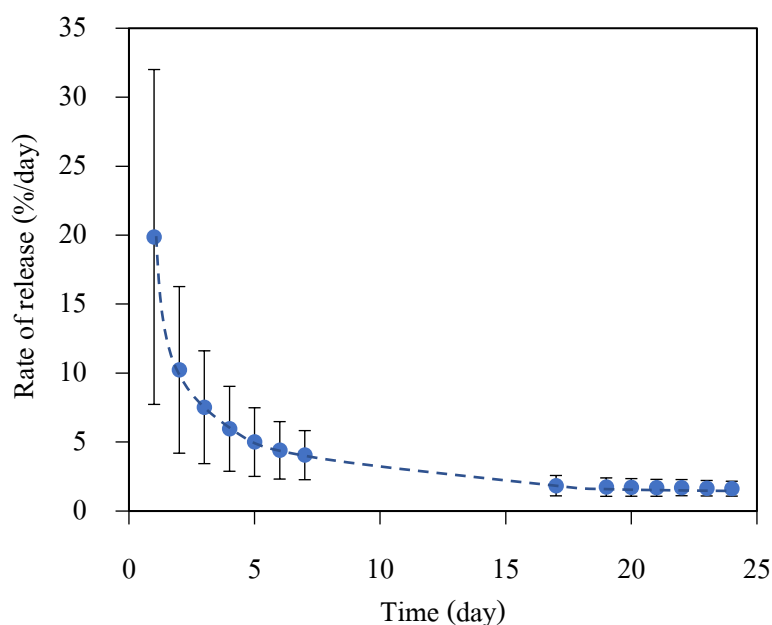
ภาพที่ 4-18 การปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในสารละลายที่มี Ca^{2+} เพื่อจำลองสถานการณ์ตากผ้า โดยวิเคราะห์ในสภาวะอากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล (Release rate of perfume)

การวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมทำการนำไมโครแคปซูล 2 กรัม ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 วัน จนน้ำหนักคงที่ โดยอัตราการปลดปล่อยน้ำหอมคำนวณดังสมการ (4-3)

$$\text{อัตราการปลดปล่อย(ร้อยละต่อวัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)} - \text{น้ำหนักวันใดๆ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)} \times \text{เวลา (วัน)}} \times 100 \quad (4-3)$$

พบว่า อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูล ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัตราการปลดปล่อยภายหลังการอบ 1 วันมีค่าร้อยละ 20 (± 0.24) ของปริมาณน้ำหอมทั้งหมด และอัตราการปลดปล่อยน้ำหอมจะลดลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ โดยอัตราการปลดปล่อยน้ำหอมภายหลังการอบ 23 วัน มีค่าร้อยละ 0.04 (± 0.015) ของปริมาณน้ำหอมทั้งหมด โดยคิดน้ำหนักที่หายไปเป็นร้อยละ 38.05 (± 12.93) แสดงดังภาพที่ 4-19 ดังนั้นไมโครแคปซูลนี้สามารถปลดปล่อยน้ำหอมได้อย่างน้อย 23 วัน อย่างไรก็ตาม แม้การตรวจวัดปริมาณน้ำหอมจะยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การรับรู้กลิ่นหอม (Sensory test) ที่ปลดปล่อยในช่วงวันท้ายๆ โดยผู้สวมใส่นั้น จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึง ความเข้มข้นหรือปริมาณน้ำหอมที่ผู้สวมใส่ยังคงได้กลิ่นด้วย



ภาพที่ 4-19 อัตราการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูล สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

ไมโครแคปซูลน้ำหอมทางการค้าเป็นไมโครแคปซูลชนิดแกนกลางเดี่ยว ทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8.9 ไมโครเมตร อีกทั้งผิวของไมโครแคปซูลมีประจุเป็นลบที่สภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 โดยไมโครแคปซูลมี 2 ส่วน น้ำหอมที่บรรจุภายในไมโครแคปซูล (ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS พบว่า น้ำหอมประกอบไปด้วย อีเทอร์ เอสเตอร์ แอลกอฮอล์ และ แอลดีไฮด์) และผนังไมโครแคปซูล ซึ่งจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค DSC และ FTIR พบว่า ผนังไมโครแคปซูลมีพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบ โดยพอลิอะคริลาไมด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อน และมีอุณหภูมิ VPTT เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ไมโครแคปซูลน้ำหอมนี้มีความสามารถในการละลายน้ำได้เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ทำให้ไมโครแคปซูลเกิดการบวมและเกิดแรงดันภายในแคปซูลส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านของน้ำหอมผ่านผนังไมโครแคปซูล ในทางตรงข้าม เมื่อไมโครแคปซูลอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ผนังไมโครแคปซูลจะหดตัวลง และส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยของน้ำหอมจากไมโครแคปซูลได้มากยิ่งขึ้น

การศึกษาผลกระทบของสภาวะการซักรีดที่มีต่อการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำซักล้าง พบว่าการปลดปล่อยน้ำหอมจากไมโครแคปซูลในน้ำ (ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในช่วง 50-350 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าการปลดปล่อยสูงกว่าการปลดปล่อยในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 0.76 เท่า และสูงกว่าการปลดปล่อยในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 3.4 เท่า เนื่องจากในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า VPTT ผนังไมโครแคปซูลจะไม่ละลายน้ำ และเกิดการหดตัว ส่งผลให้น้ำหอมภายในไมโครแคปซูลเกิดการปลดปล่อยได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งศึกษาผลกระทบของปริมาณ Ca^{2+} ในช่วง 50-350 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 (pH 7) พบว่า การปลดปล่อยน้ำหอมในน้ำที่มี Ca^{2+} 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงร้อยละ 5 และ 25 ตามลำดับ เนื่องจากแคลเซียมไอออนเข้าไปล้อมรอบไมโครแคปซูลที่มีประจุลบ เป็นผลให้เกิดการขัดขวางการหดตัวของพอลิเมอร์ส่งผลให้การปลดปล่อยลดลง อย่างไรก็ตามในน้ำที่มี Ca^{2+} มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมไอออนมากเกินไปในการล้อมรอบไมโครแคปซูลทำให้เกิดการปลดปล่อยคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อลดค่าความเป็นกรดต่างจาก 7 ไปเป็น 3 ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส การปลดปล่อยน้ำหอมมีค่าลดลงอยู่

ที่ร้อยละ 9 และ 14 ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของผนัง ไมโครแคปซูลจาก ปรจุลบ (pH=7) ไปเป็นประจุบวก (pH=3) ทำให้การล้อมรอบของประจุบริเวณผิวไมโครแคปซูลเปลี่ยนแปลงไป ยิ่งไปกว่านั้นการจำลองการซักล้างในน้ำที่มีผงซักฟอก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สภาวะการใช้งานจริงตามฉลากข้างบรรจุภัณฑ์สินค้า พบว่า การเพิ่มปริมาณ ไมโครแคปซูล น้ำหอมในช่วงร้อยละ 0.6-1.2 โดยน้ำหนัก ในน้ำมี Ca^{2+} 150, 250 และ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้การปลดปล่อยน้ำหอมลดลงร้อยละ 3.6, 3 และ 3.2 ตามลำดับ อาจเป็นเพราะความสามารถในการละลายของน้ำหอมที่มีอย่างจำกัด

การปลดปล่อยน้ำหอมในอากาศที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก และจะมีการปลดปล่อยคงที่ โดยการปลดปล่อยน้ำหอมที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 7 ของปริมาณน้ำหอมทั้งหมด ซึ่งสูงกว่าการปลดปล่อยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 0.4 เท่า อาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงน้ำหอมในไมโครแคปซูลมีความดันไอเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำหอมผ่านไมโครแคปซูลมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มความดันไอมากขึ้น อาจนำไปสู่การแตกของไมโครแคปซูลทำให้ปลดปล่อยน้ำหอมได้สูงขึ้น

ข้อมูลการปลดปล่อยน้ำหอมในการซักและการทำให้แห้งที่สภาวะต่างๆ จะทำให้ผู้ประกอบการทราบถึงแนวทางการตรวจสอบความคงอยู่ของน้ำหอมในไมโครแคปซูลที่มีขายทางการค้า ภายหลังจากซักล้างและอบแห้ง ซึ่งความหอมจะมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ซักล้าง อีกทั้งทำให้สามารถควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตสารซักล้างที่จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหอมระหว่างกระบวนการผลิต

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเกาะติดของน้ำหอมบนเส้นใยชนิดต่างๆ เนื่องจากประจุบนเส้นใยที่แตกต่างกัน
2. ควรการวิเคราะห์หากลิ่นด้วยการดม (Sensory test)
3. พัฒนาเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหอมที่บรรจุภายในไมโครแคปซูลด้วยวิธีอื่นๆ

บรรณานุกรม

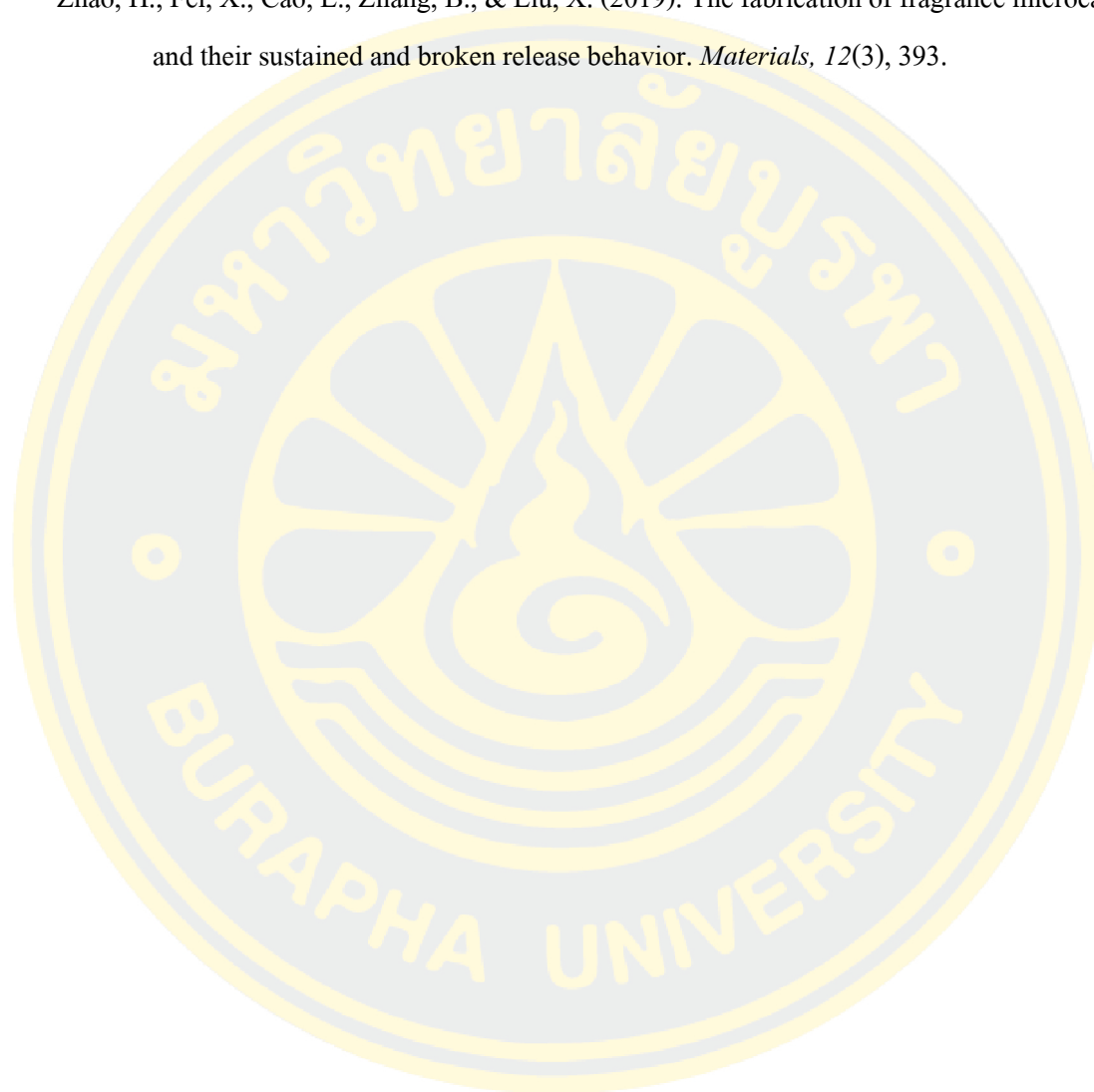
- Abdelkader, M. B., Azizi, N., Baffoun, A., Chevalier, Y., & Majdoub, M. (2018). New microcapsules based on isosorbide for cosmetotextile: Preparation and characterization. *Industrial Crops and Products*, *123*, 591-599.
- Bajpai, D. (2007). Laundry detergents: an overview. *Journal of oleo science*, *56*(7), 327-340.
- Beaudoin, G., Lasri, A., Zhao, C., Liberelle, B., De Crescenzo, G., & Zhu, X.-X. (2021). Making Hydrophilic Polymers Thermoresponsive: The Upper Critical Solution Temperature of Copolymers of Acrylamide and Acrylic Acid. *Macromolecules*, *54*(17), 7963-7969.
- Buccellato, F. (2007). Formulation notes Fragrancing Detergents: Creating functional, effective and stable scents. *Perfumer & flavorist*, *32*(7).
- Chisvert, A., López-Nogueroles, M., & Salvador, A. (2018). Perfumes In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*.
- Dima, C., Patrascu, L., Cantaragiu, A., Alexe, P., & Dima, s. (2016). The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of Coriandrum sativum L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules. *Food chemistry*, *195*, 39-48.
- Fahlbusch, K. G., Hammerschmidt, F. J., Panten, J., Pickenhagen, W., Schatkowski, D., Bauer, K., et al. (2000). Flavors and fragrances. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Farooqi, Z. H., Khan, H. U., Shah, S. M., & Siddiq, M. (2017). Stability of poly (N-isopropylacrylamide-co-acrylic acid) polymer microgels under various conditions of temperature, pH and salt concentration. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*(3), 329-335.
- Fernandez-Gonzalez, A. (2012). *Stabilization of functional ingredients by microencapsulation: Interfacial polymerisation*. University of Birmingham,
- Gaabour, L. (2017). Spectroscopic and thermal analysis of polyacrylamide/chitosan (PAM/CS) blend loaded by gold nanoparticles. *Results in physics*, *7*, 2153-2158.
- Galbraith, C. (2018). AN OVERVIEW OF THE GLOBAL FLAVOURS & FRAGRANCES MARKET, 11th EDITION. *IAL Consultants*. Retrieved from http://www.ialconsultants.com/uploads/CUBE_press_release/2018-08-02/FF_PressRelease_2018.pdf

- Hyde, A. M., Zultanski, S. L., Waldman, J. H., Zhong, Y.-L., Shevlin, M., & Peng, F. (2017). General principles and strategies for salting-out informed by the Hofmeister series. *Organic Process Research & Development*, 21(9), 1355-1370.
- Jafarigol, E., Salehi, M. B., & Mortaheb, H. R. (2020). Preparation and assessment of electro-conductive poly (acrylamide-co-acrylic acid) carboxymethyl cellulose/reduced graphene oxide hydrogel with high viscoelasticity. *Chemical Engineering Research and Design*, 162, 74-84.
- Jamdade, M. S. S., Chaudhari, M. S. D., & Pondkule, M. A. V. (2021). A COMPLETE REVIEW ON MICROENCAPSULATION.
- Kasperkowiak, M., Strzemieska, B., & Voelkel, A. (2016). Characteristics of natural and synthetic molecular sieves and study of their interactions with fragrance compounds. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52.
- Kaur, R., Kukkar, D., Bhardwaj, S. K., Kim, K.-H., & Deep, A. (2018). Potential use of polymers and their complexes as media for storage and delivery of fragrances. *Journal of controlled release*, 285, 81-95.
- Lengyel, M., Kállai-Szabó, N., Antal, V., Laki, A. J., & Antal, I. (2019). Microparticles, microspheres, and microcapsules for advanced drug delivery. *Scientia Pharmaceutica*, 87(3), 20.
- López-León, T., Elaïssari, A., Ortega-Vinuesa, J. L., & Bastos-González, D. (2007). Hofmeister effects on poly (NIPAM) microgel particles: macroscopic evidence of ion adsorption and changes in water structure. *ChemPhysChem*, 8(1), 148-156.
- Nesterenko, A., Alric, I., Silvestre, F., & Durrieu, V. (2013). Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. *Industrial crops and products*, 42, 469-479.
- Pena, B., Panisello, C., Aresté, G., Garcia-Valls, R., & Gumí, T. (2012). Preparation and characterization of polysulfone microcapsules for perfume release. *Chemical Engineering Journal*, 179, 394-403.
- Rodrigues, S. N., Martins, I. M., Fernandes, I. P., Gomes, P. B., Mata, V. G., Barreiro, M. F., et al. (2009). Scentfashion®: Microencapsulated perfumes for textile application. *Chemical Engineering Journal*, 149(1-3), 463-472. doi:10.1016/j.cej.2009.02.021

- Salinas, Y., Castilla, A., & Resmini, M. (2018). An l-proline based thermoresponsive and pH-switchable nanogel as a drug delivery vehicle. *Polymer Chemistry*, 9(17), 2271-2280.
- STANDARD, B., & ISO, B. (2002). Textiles—Tests for colour fastness—.
- Teeka, P., Chaiyasat, A., & Chaiyasat, P. (2014). Preparation of Poly (methyl methacrylate) Microcapsule with Encapsulated Jasmine Oil. *Energy Procedia*, 56, 181-186.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.147>
- Teixeira, C. S. N. R. (2010). Microencapsulation of perfumes for application in textile industry.
- Tekin, R., Bac, N., & Erdogmus, H. (2013). *Microencapsulation of fragrance and natural volatile oils for application in cosmetics, and household cleaning products*. Paper presented at the Macromolecular Symposia.
- Tolve, R., Galgano, F., Caruso, M. C., Tchuenbou-Magaia, F. L., Condelli, N., Favati, F., et al. (2016). Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *International journal of food sciences and nutrition*, 67(8), 888-918.
- Trongsatitkul, T., & Budhlall, B. M. (2013). Microgels or microcapsules? Role of morphology on the release kinetics of thermoresponsive PNIPAm-co-PEGMa hydrogels. *Polymer Chemistry*, 4(5), 1502-1516.
- Unagolla, J. M., & Jayasuriya, A. C. (2018). Drug transport mechanisms and in vitro release kinetics of vancomycin encapsulated chitosan-alginate polyelectrolyte microparticles as a controlled drug delivery system. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 114, 199-209.
- Watanabe, T., Kimura, Y., & Ono, T. (2014). Monodisperse polylactide microcapsules with a single aqueous core prepared via spontaneous emulsification and solvent diffusion. *RSC Advances*, 4(10), 4872-4877.
- Xiao, Z., Hou, W., Kang, Y., Niu, Y., & Kou, X. (2019). Encapsulation and sustained release properties of watermelon flavor and its characteristic aroma compounds from γ -cyclodextrin inclusion complexes. *Food Hydrocolloids*, 97, 105202.
- Yang, Z., Peng, Z., Li, J., Li, S., Kong, L., Li, P., et al. (2014). Development and evaluation of novel flavour microcapsules containing vanilla oil using complex coacervation approach. *Food chemistry*, 145, 272-277.
- Zhang, Y., Song, J., & Chen, H. (2016). Preparation of polyacrylate/paraffin microcapsules and its application in prolonged release of fragrance. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(42).

Zhao, D., Jiao, X., Zhang, M., Ye, K., Shi, X., Lu, X., et al. (2016). Preparation of high encapsulation efficiency fragrance microcapsules and their application in textiles. *RSC advances*, 6(84), 80924-80933.

Zhao, H., Fei, X., Cao, L., Zhang, B., & Liu, X. (2019). The fabrication of fragrance microcapsules and their sustained and broken release behavior. *Materials*, 12(3), 393.



ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวณัชชา แก้วโบราณ	
วัน เดือน ปี เกิด	13 กันยายน 2539	
สถานที่เกิด	สมุทรปราการ	
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	149/185 ม.9 ต.บางโหลง อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540	
ตำแหน่งและประวัติการ ทำงาน	พ.ศ. 2561	นักศึกษาฝึกงาน บริษัท ไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 - 2562	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา
	พ.ศ. 2562 - 2565	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา
รางวัลหรือทุนการศึกษา	ทุนอุดหนุนวิจัยและพัฒนา เพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (วจร. 1/2562) โครงการผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ระยะที่ 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (GRA 3/2562) บริษัท ไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด	