ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ — **สาขา**

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ — **ภาควิชา**

เรื่อง การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกา

Development of Polydiacetylene and Silica Nanoparticles-Based Time-Temperature Indicator

นามผู้วิจัย นางสาวอัจฉรียา นพวิญญูวงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชิราวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกา

Development of Polydiacetylene and Silica Nanoparticles-Based Time-Temperature Indicator

โดย

นางสาวอัจฉรียา นพวิญญูวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัจฉรียา นพวิญญูวงศ์ 2557: การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกา ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D. 181 หน้า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดใหม่ฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกาได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเพื่อติดตามคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการขนส่ง การจัดจำหน่าย และการเก็บรักษา อุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักสำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น พอลิไดอะเซทิลีนเป็นหนึ่งในคอนจูเกตเตดพอลิเมอร์ที่น่าสนใจที่สามารถเกิดเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงเมื่อเผชิญกับอุณหภูมิ การเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าไปก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางด้านสีของพอลิไดอะเซทิลีนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไอออนิกกับหมู่คาร์บอกซิลิกของพอลิไดอะเซทิลีนที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถแสดงสีที่เข้มกว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเนื่องจากความเสถียรทางด้านโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีน สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกาจะสามารถให้สีน้ำเงินเข้มภายใต้การฉายแสงยูวี จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่า อนุภาคนาโนซิลิกาสามารถอยู่ในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล จึงทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล การเติมสารแอมฟิฟิลิกจะไปลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกาให้ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส จึงเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อเก็บไว้ที่ 30-50 องศาเซลเซียส และมีค่าร้อยละการตอบสนองของสีมากกว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล สำหรับการขึ้นรูปฟิล์ม ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกา ชนิดและความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 กับของพลาสติไซเซอร์ มีผลต่อการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มเริ่มต้นจะมีสีม่วงและจะเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีแดงได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) และอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) สูตร P3-2 สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ชัดเจนเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5-15 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากับ 121.32 และ 138.99 กิโลจูลต่อโมล สำหรับความเข้มข้นของอนุภาคซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ ภายหลังการเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนังและตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของอนุภาคซิลิกาที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าเท่ากับ 86.36 และ 114.06 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งต่างกันน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล นอกจากนี้ ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมินี้ยังสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เร็วภายใต้ภาวะเก็บที่อุณหภูมิไม่คงที่อีกด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแต่ละชนิดได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันระหว่าง การเปลี่ยนสี เวลา และอุณหภูมิ ฉะนั้นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดใหม่ฐานพอลิเมอร์สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือที่สามารถแสดงประวัติอุณหภูมิและเวลาได้

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Atchareeya Nopwinyuwong 2014: Development of Polydiacetylene and Silica Nanoparticles-Based Time-Temperature Indicator. Doctor of Philosophy (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Panuwat Suppakul, Ph.D. 181 pages.

A novel time-temperature indicator (TTI) based on polydiacetylene (PDA) and silica nanoparticles were investigated and developed to monitor the quality and safety of food products during transportation, distribution and storage. Temperature which is one of the most critical factors can affect to the quality of food products, especially chilled food products. PDA is one of the most interesting conjugated polymers which can induce the color transition from blue to red when exposed with temperature. An incorporation of silica nanoparticles can improve chromic properties of PDA due to ionic interaction with its carboxylic groups at the silica surface. The PDA/SiO_2 nanocomposite could clearly show color tone than that of PDA vesicle due to structural stability of PDA. Under ultraviolet light irradiation, PDA/SiO_2 nanocomposite could exhibit an intense blue solution. Later on, physical and chemical properties of PDA/SiO_2 nanocomposite were investigated. Silica nanoparticle was in the core of PDA vesicle, thus PDA/SiO_2 nanocomposite exhibited slightly larger size than PDA vesicle. An addition of amphiphilic polymer could reduce color transition temperature of PDA/SiO_2 nanocomposite below 60 °C, thus it could occur at 30-50 °C. The %CR of PDA/SiO_2 nanocomposite was higher than that of PDA vesicle. For film formation, concentration of silica nanoparticles, type and concentration of plasticizer, and ratio between Pluronic F127 and plasticizer could affect to color change at different temperatures. The present results show an initial color of plasticized PDA/SiO_2 films was purple and they could fast change to red-colored film at higher temperature. The P3-2 formula of plasticized PDA (5mM)/SiO_2 (1 and 5% w/v) films could clearly change in color when stored at 5-15 °C. The activation energies (E_a) of both TTI responses were 121.32 and 138.99 kJ/mol for concentration of silica nanoparticles at 1 and 5%, respectively. After kept at 4 and 10 °C, E_a of skinless chicken breast quality and TTI responses (SiO_2 5% w/v) were 86.36 and 114.06 kJ/mol, which a difference between them was less than 40 kJ/mol. Moreover, this TTI could fast change in color under non-isothermal condition. The mathematical model of each TTI was established according to the relationships between color changes and time and temperature. Finally, this novel polymer-based TTI used as a reliable device, which could exhibit time-temperature history.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิราวุฒิ เพชรเย็น และรองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนสามารถทำให้งานวิจัยดำเนินมาได้อย่างต่อเนื่องและสำเร็จในที่สุด ตลอดจนช่วยสละเวลาในตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนัสสา นันทิวัชรินทร์ ที่คอยสละเวลามาร่วมให้คำปรึกษาที่ดี ดร.สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ประจำห้องปฏิบัติการพัฒนาการบรรจุภัณฑ์ ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาริณี นามพิชญ์ ประธานการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร สถาบันวิทยาการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนนิสิตผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาเอก ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ บัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ Prof. Dr. Takuya Kitaoka ที่ให้คำปรึกษาที่ดีตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าได้ปฏิบัติงานวิจัยอยู่ที่มหาวิทยาลัยคิวชู คณาจารย์ภาควิชาฯ ที่ได้มอบความรู้อันเป็นประโยชน์ยิ่ง เจ้าหน้าที่ภาควิชาฯ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ และเพื่อนพี่น้องภาควิชาฯ ที่ให้ความช่วยเหลือและมีน้ำใจไมตรีให้กันตลอดมา ขอขอบพระคุณบริษัทสยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารพอลิเอทิลีนไกลคอล บริษัทยูพีเอ็มราฟลาแทค จำกัด และบริษัทเอเวอรี่เดนนิสสัน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ฟิล์มสติกเกอร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณอา น้องๆ และนายสุชาติ ภูทองเงิน ที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถฝ่าฝันอุปสรรคไปได้จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ สุดท้ายนี้ประโยชน์ทั้งมวลอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

อัจฉรียา นพวิญญวงศ์

กรกฎาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	51
อุปกรณ์	51
วิธีการ	53
ผลและวิจารณ์	74
สรุปและข้อเสนอแนะ	142
สรุป	142
ข้อเสนอแนะ	145
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	146
ภาคผนวก	159
ภาคผนวก ก ข้อมูลแสดงค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา	160
ภาคผนวก ข ข้อมูลแสดงค่าความแตกต่างของสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกในชนิดและปริมาณแตกต่างกัน	167
ภาคผนวก ค ข้อมูลของเนื้อไก่ในถาดบรรจุเชิงการค้า	174
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	177

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างตัวชี้วัดที่ใช้ในการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ทั้งภายนอกและภายในภาชนะบรรจุและหลักการทำงานหรือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสำหรับบ่งบอกคุณภาพของอาหารที่ถูกบรรจุ	8
2	ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่มีจำหน่ายทางการค้า	13
3	ค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพของอาหาร	13
4	ฟังก์ชันคุณภาพและครึ่งชีวิตสำหรับการเสื่อมเสียของดัชนีคุณภาพ A	15
5	ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการเก็บเนื้อสัตว์	26
6	ตัวอย่างสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการเน่าเสียโดยแบคทีเรีย	28
7	สูตรสารละลายฟิล์มผสมทั้งหมด ในกรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400	66
8	อุณหภูมิยังผล (T_{eff}) และอายุการเก็บที่เหลือ (t_r) ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาสำหรับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บในทั้งสองรูปแบบ	87
9	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 60,000 เท่า	91
10	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM และ SEM ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า	97
11	การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ทั้งก่อนและหลังการเติมพลูโรนิกเอฟ127 ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส	102
12	การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ไม่มีและมีการเติมสารแอมฟิฟิลิก โดยสารแอมฟิฟิลิกมีส่วนผสมของพลาสติไซเซอร์ต่างชนิดกัน ที่อุณหภูมิ 5 และ 35 องศาเซลเซียส	107

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดที่มีอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1 และ 5 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส	121
14	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้ออกไก่ลอกหนัง และตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส	126
15	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส)และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2)	131
16	อุณหภูมิยังผล (T_{eff}) และอายุการเก็บที่เหลือ (t_r) ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2)	131
17	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบเชิงเส้น) จากการทำนายค่าฟังก์ชันการตอบสนอง ของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ ซึ่งมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่แตกต่างกัน	132

ตารางผนวกที่

ก1	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ	161
ก2	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ	162

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก3	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ	163
ก4	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาการเก็บ	164
ก5	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาการเก็บ	165
ก6	ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาการเก็บ	166
ข1	ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 3:7 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))	168

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข2 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl)) 169

ข3 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl)) 170

ข4 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 3:7 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl)) 171

ข5 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl)) 172

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข6 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl)) 173

ค1 ปริมาตรและน้ำหนักของเนื้อออกไก่ลอกหนังต่อถาดบรรจุในเชิงการค้า 176

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โมเดลของหน้าที่การบรรจุ	4
2	แผนภูมิของระบบการบรรจุแบบล้ำสมัย (sophisticated packaging system)	5
3	ตัวชี้วัดคุณภาพอาหารแบบทางตรงและทางอ้อม	6
4	ตัวอย่างการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์เชิงการค้า	7
5	การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดอุณหภูมิวิกฤต	10
6	การเปลี่ยนสีของตัวรวบรวมอุณหภูมิ/เวลาวิกฤต	11
7	การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ	11
8	แนวคิดการประยุกต์ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเป็นเครื่องมือติดตามคุณภาพของอาหาร	12
9	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่	17
10	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์ แบบช่องเดี่ยว (ก) และแบบ 3 ช่องต่อกัน (ข)	18
11	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์	19
12	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานแบคทีเรีย	20
13	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานสารสีไวแสง (ก) และการเปลี่ยนสีตามเวลาและอุณหภูมิ (ข)	21
14	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพลาสโมนิกนาโนคริสตัล	22
15	ห่วงโซ่ความเย็นภายใต้การขนส่งระดับอุตสาหกรรมตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย	25
16	สีและลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ในระหว่างเกิดการเน่าเสีย	26
17	ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์	27
18	ลักษณะการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่ในจานทดลอง	31
19	พื้นผิวตอบสนองของค่าสี (ก) และการวาดกราฟคอนทัวร์ (contour) ของการตอบสนอง ของสี (ข) ตามการเปลี่ยนแปลงเวลาและอุณหภูมิของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์อะไมเลส	32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ที่ถูกผสมด้วย BBS เข้มข้น ร้อยละ 1 (ก) และ 2 (ข) โดยน้ำหนัก ตามการเปลี่ยนแปลงเวลาและอุณหภูมิ	34
21	การเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลินทรีย์ ทางด้านเคมีกายภาพและการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในระบบตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานจุลินทรีย์ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส	35
22	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์	36
23	โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่างๆ	37
24	โครงสร้างโมเลกุลของ PCDA	40
25	กลไกการเกิดพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล โดยการเกิดพอลิเมอไรเซชันของ PCDA	40
26	ลักษณะการจัดเรียงตัวของฟอสโฟไลปิด ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว (ก) และลักษณะของไลโพโซม (ข)	42
27	ลักษณะหมุนของอะตอมภายในสายโซ่หลักของพอลิไดอะเซทิลีน	43
28	แบบจำลองโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์	45
29	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่ต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล	48
30	กลไกการเปลี่ยนโครงสร้างที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน เมื่อเกิดการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและการเติมสารแอมฟิฟิลิก	49
31	อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค TEM (ก) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทั้งพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์และพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการแทรกตัวของอนุภาคนาโน (ข)	50
32	การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ	64
33	รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเก็บ	71
34	การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อผสมกับสารแอมฟิฟิลิก ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน	74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกที่เข้มข้นร้อยละ 0 (ก) 2 (ข) และ 4 (ค) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง	76
36	ผลของปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาต่อค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิก เอฟ127 ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส (ก) และเวลาในการเก็บคงที่ 4 ชั่วโมง (ข)	77
37	การจำลองการยึดจับกันระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ถูกเติมเข้าไป	79
38	การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิกเอฟ127 ร้อยละ 0 (ก) 7.5 (ข) และ 15 (ค) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง	80
39	ผลของปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาต่อค่าร้อยละการตอบสนองของสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิก เอฟ127 ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส (ก) และเวลาในการเก็บคงที่ 4 ชั่วโมง (ข)	81
40	การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสี (ก) และการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันผลตอบสนองของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส	83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	กราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของค่า *k* กับส่วนกลับของอุณหภูมิของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส	84
42	การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง จากอุณหภูมิ 25 ไปยัง 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง	86
43	การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 3 ชั่วโมง จากอุณหภูมิ 25 ไปยัง 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมง	86
44	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข)	89
45	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (15 กิโลโวลต์)	92
46	ความเป็นสีน้ำเงินของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ภายหลังการฉายแสงยูวี	93
47	การดูดกลืนแสงของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร	94
48	แถบสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา	95
49	แถบสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน (ก) และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข)	99

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส	100
51	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมพลูโรนิก เอฟ127 ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส	101
52	เฉดสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมพลาติไซเซอร์ โดยไม่มีการเติมพลาติไซเซอร์ (ตัวควบคุม) (ก) PEG-400 (ข) กลีเซอรอล (ค) ซอร์บิทอล (ง) และ ไซลิทอล (จ) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5	104
53	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) สูตร P3-2 G3-2 S3-2 และ X3-2 โดยเรียงตามชนิดของพลาสติไซเซอร์ ดังนี้ PEG-400 (ก) กลีเซอรอล (ข) ซอร์บิทอล (ค) และไซลิทอล (ง) ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส	105
54	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	108
55	โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 (ก) กลีเซอรอล (ข) ซอร์บิทอล (ค) และไซลิทอล (ง)	108
56	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมี PEG-400 เป็นพลาสติไซเซอร์ และมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	110

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
57	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมี PEG-400 เป็นพลาสติไซเซอร์ และมีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	111
58	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10 และ 20) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส	113
59	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส	114
60	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกาแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 1 5 10 และ 20 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	115
61	การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 (ก) และ 10 (ข) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิการเก็บแตกต่างกัน ในระยะเวลา 2 วัน	116
62	กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส	120
63	กราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของค่า *k* กับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) สูตร P3-2 (ก) และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 (ข) ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส	122
64	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเนื้อออกไก่ลอกหนังและค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส	124

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้ออกไก่ลอกหนังและค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส	125
66	ตัวอย่างการใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 เพื่อติดตามการเน่าเสียของเนื้ออกไก่ลอกหนัง เมื่ออาหารยังคงความสด (ก) และอาหารเกิดการเน่าเสียแล้ว (ข)	127
67	การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส) (ก) และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2) (ข)	128
68	กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส) (ก) และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2) (ข)	130
69	การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 20) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)	134
70	การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)	135
71	การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)	136
72	การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)	137

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

73 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 20) 138

74 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) 139

75 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) 140

76 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) 141

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ค1 ถาดบรรจุเนื้อไก่ ยี่ห้อ เอส-เพียว 175

ค2 ส่วนประกอบภายในถาดบรรจุเนื้อไก่ ยี่ห้อ เอส-เพียว 175

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CR	=	colorimetric response
CTI	=	critical temperature indicators
DNBP	=	dinitrobenzyl pyridine compound
ES	=	emeraldine salt
FTIR	=	Fourier transform infrared spectrometer
IP	=	intelligent packaging
KBr	=	potassium bromide
LB	=	leucoemeraldine base
LS	=	leucoemeraldine salt
PB	=	pernigraniline base
PCDA	=	10,12-pentacosadiynoic acid
PDA	=	polydiacetylene
PEG	=	poly(ethylene glycol)
PP	=	polypropylene
PPG	=	poly(propylene glycol)
PS	=	pernigraniline salt
PVOH	=	poly(vinyl alcohol)
RFID	=	radio frequency identification
SEM	=	scanning electron microscope
t_r	=	remaining shelf life
%T	=	%transmission
T_{eff}	=	effective temperature
TCD	=	total color difference
TEM	=	transmission electron microscope
E_a	=	activation energy

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกา

Development of Polydiacetylene and Silica Nanoparticles-Based Time-Temperature Indicator

คำนำ

ปัจจุบันแรงผลักดันทางด้านนวัตกรรมทางเทคโนโลยีการบรรจุอาหารได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในเรื่องความต้องการอาหารที่ผ่านการแปรรูปขั้นต่ำ เพื่อรักษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อาหาร และเรื่องการกระจายสินค้าทั้งการค้าปลีกและการค้าส่ง นอกจากนี้ ยังต้องการความปลอดภัยและคุณภาพทางประสาทสัมผัสอีกด้วย การพัฒนาการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ (intelligent packaging, IP) สามารถตอบสนองต่อแรงผลักดันนี้ได้ โดยการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ทำหน้าที่ติดตามผลิตภัณฑ์ รับรู้สิ่งแวดล้อมภายนอก หรือ ภายในภาชนะบรรจุ และสื่อสารกับมนุษย์หรืออุปกรณ์ เพื่ออำนวยความสะดวกในการตัดสินใจ ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์รวมถึงการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารด้วย

การบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ มีอยู่หลายประเภท เช่น รหัสแท่ง (barcode) แผ่นป้ายชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (radio frequency identification tag, RFID) ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature indicator) ตัวชี้วัดก๊าซ หรือไอระเหย (gas or vapor indicator) ตัวชี้วัดชีวภาพ (bioindicator) และตัวชี้วัดการเน่าเสียของอาหาร (food spoilage indicator) เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ เนื่องจากระบบขนส่งในปัจจุบัน มีความเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและสะดวกมากขึ้น สามารถจัดส่งสินค้าไปยังผู้บริโภคที่ห่างไกลได้ในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารคือสภาวะของระบบในระหว่างการขนส่ง ส่วนใหญ่แล้วก็หมายถึงอุณหภูมินั่นเอง ผลิตภัณฑ์อาหารที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิมากที่สุด ได้แก่ กลุ่มอาหารแช่เย็นหรือแช่เยือกแข็ง หากในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษาเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบไปจากเดิม จะสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นอย่างมาก ฉะนั้น ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจึงมีข้อดี คือ ช่วยติดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปและตอบสนองต่อสายตามนุษย์ได้อย่างชัดเจน ทำให้สะดวกในการพิจารณาเลือกซื้อ และสร้างความปลอดภัยต่อผู้บริโภค นอกจากนี้ยังมีต้นทุนต่ำอีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พอลิไดอะเซทิลีน (polydiacetylene, PDA) เป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่น่าสนใจโดยมีสมบัติทางสีที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ในงานด้านต่างๆ อาทิเช่น ด้านชีววิทยา สิ่งแวดล้อม และเคมี เป็นต้น สมบัติเด่นของพอลิไดอะเซทิลีนคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมภายนอกของระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง ตัวทำละลายหรือสารเคมีบางชนิด และการบีบอัดแรงกระแทก เป็นต้น ฉะนั้นจึงเป็นการตรวจวัดที่มีราคาถูก เนื่องจากไม่ต้องมีเครื่องมือที่ราคาแพงในการตรวจวัด สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้ ในปัจจุบันนี้ มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้เล็งเห็นความสำคัญอันนี้และนำประยุกต์ให้เข้ากับงานวิจัยของตนเอง ซึ่งงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน ได้นำเอาลักษณะพิเศษของพอลิไดอะเซทิลีนมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ นอกจากนี้ นาโนเทคโนโลยี ก็เป็นอีกแขนงหนึ่งของสาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ที่มีความเจริญรุดหน้าอย่างรวดเร็ว อนุภาคนาโนถูกจัดเป็นอนุภาคระดับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นอนุภาคนั้นได้ด้วยตาเปล่า อนุภาคนาโนจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยในระบบ และมีขนาดอนุภาคเล็กมากทำให้มีพื้นที่ผิวจำนวนมากด้วย ซึ่งจำนวนพื้นที่ผิวที่มากนี้จะสามารถทำให้มันเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารได้ดี และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารนั้นได้อีกด้วย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อนุภาคนาโนเข้ามาเพื่อช่วยให้การจัดเรียงตัวของพอลิไดอะเซทิลีนเกิดการคงตัวมากขึ้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับสารแอมฟีฟิลิก และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

2. ศึกษาวิธีการเตรียมลักษณะต่อเฉพาะและสมบัติของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

3. ศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการผลิตตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

4. ศึกษาการประยุกต์ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

5. ศึกษาอุณหภูมิยังผลและอายุการเก็บที่เหลือของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในกรณีอุณหภูมิในการเก็บไม่คงที่

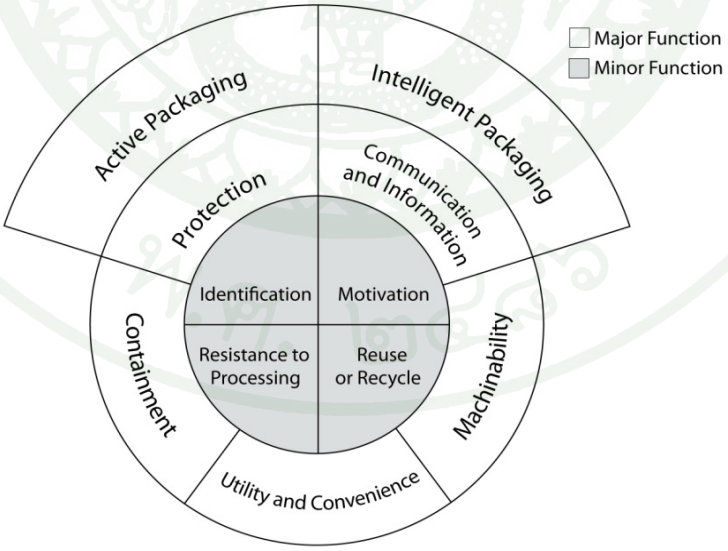
6. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. การบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์

ปัจจุบันนี้ หน้าที่ของภาชนะบรรจุอาหาร นอกจากจะใช้เพื่อป้องกันผลิตภัณฑ์อาหารจากสภาพแวดล้อม เช่น แสง แก๊สออกซิเจน ความชื้น เชื้อจุลินทรีย์ แรงกระทำทางกล และฝุ่นละออง เพื่อบรรจุอาหารในระหว่างการขนส่ง เพื่อสื่อสารข้อมูลบางอย่างให้ผู้บริโภคได้ทราบ เช่น ฉลากบ่งบอกข้อมูลโภชนาการของผลิตภัณฑ์และปริมาณที่เหมาะสมแก่การบริโภค เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้บริโภค เช่น การมีฝาที่เปิดได้ง่ายและ/หรือปิดเปิดได้ เพื่อสามารถใช้ร่วมกับเครื่องจักรได้ แล้วยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษา รักษาคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อสนองความต้องการของผู้ผลิต ผู้จัดจำหน่ายและผู้บริโภคอีกด้วย (Ahvenainen, 2003) การพัฒนาเทคโนโลยีระบบการบรรจุให้ทันสมัยเพื่อตอบสนองด้านคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารให้มากขึ้นจะอาศัยพื้นฐานมาจากหน้าที่การบรรจุหลักอยู่ 2 อย่างคือ การปกป้องผลิตภัณฑ์อาหารและการสื่อสารข้อมูลให้ผู้บริโภคได้ทราบ ซึ่งจะเรียกระบบการบรรจุแบบใหม่นี้ว่า การบรรจุแบบแอคตีฟและการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1 แต่ในงานวิจัยนี้ จะกล่าวเฉพาะการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์

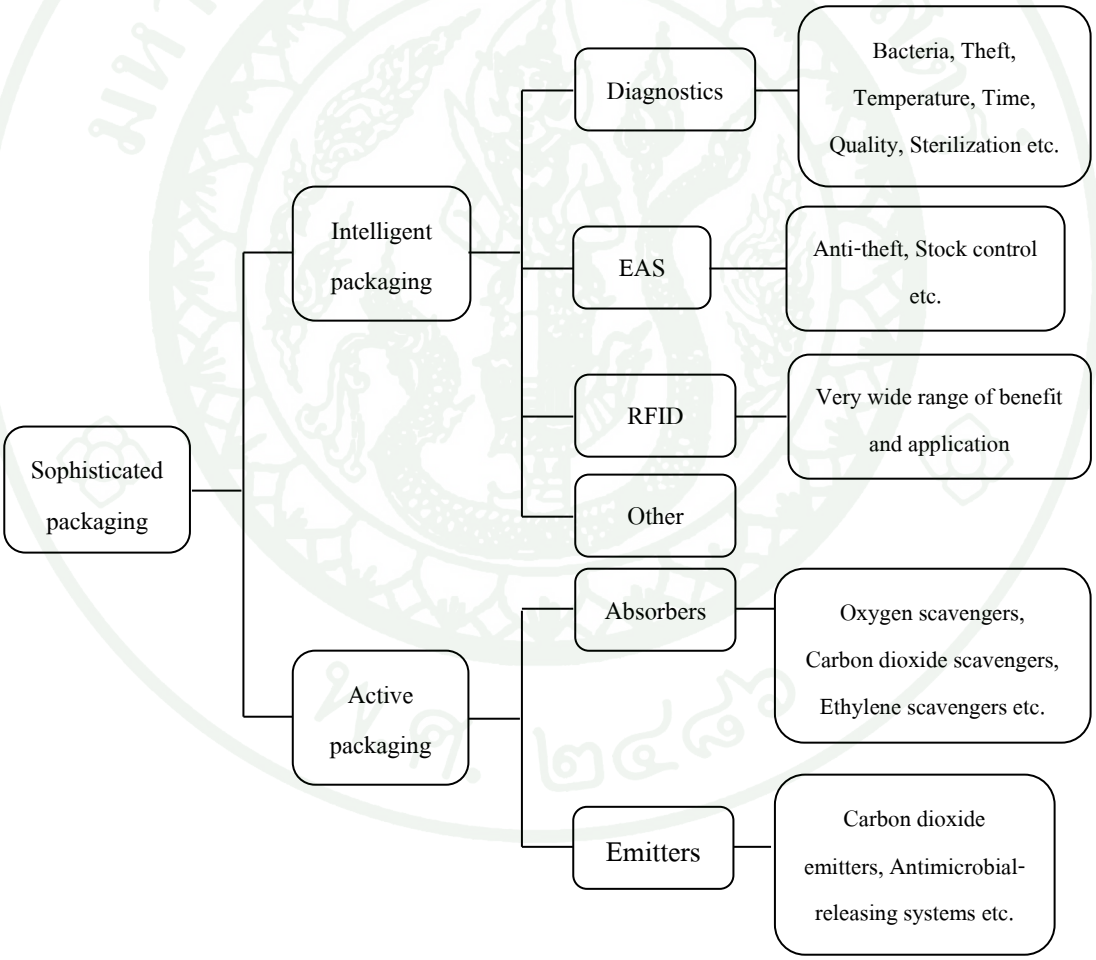


ภาพที่ 1 โมเดลของหน้าที่การบรรจุ

ที่มา: Suppakul (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์นี้ จัดอยู่ในระบบการบรรจุแบบล้ำสมัย (sophisticated packaging system) ซึ่งสามารถแยกย่อยได้หลายรูปแบบ (ภาพที่ 2) ในที่นี้จะให้ความสนใจในรูปแบบการบรรจุแบบวินิจฉัย (diagnostic packaging) คือ วัสดุบรรจุที่สามารถให้ข้อมูลเพื่อบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารภายในภาชนะบรรจุอาหารให้ผู้บริโภคได้รับรู้ ซึ่งจะติดตามคุณภาพหรือการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์อาหารทางตรงหรือทางอ้อมผ่านตัวชี้วัดก็ได้ การวิเคราะห์ด้วยตัวชี้วัดนี้จะเป็นวิธีการตรวจสอบที่ไม่ต้องทำลายชิ้นอาหาร แต่จะอาศัยการสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัด จึงทำให้การตรวจสอบมีความสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งตัวชี้วัดนี้สามารถพัฒนาให้เกี่ยวข้องกับหลายๆ ด้าน เช่น แบคทีเรีย การขโมย อุณหภูมิ เวลา คุณภาพ และการสเตอริไลเซชัน เป็นต้น

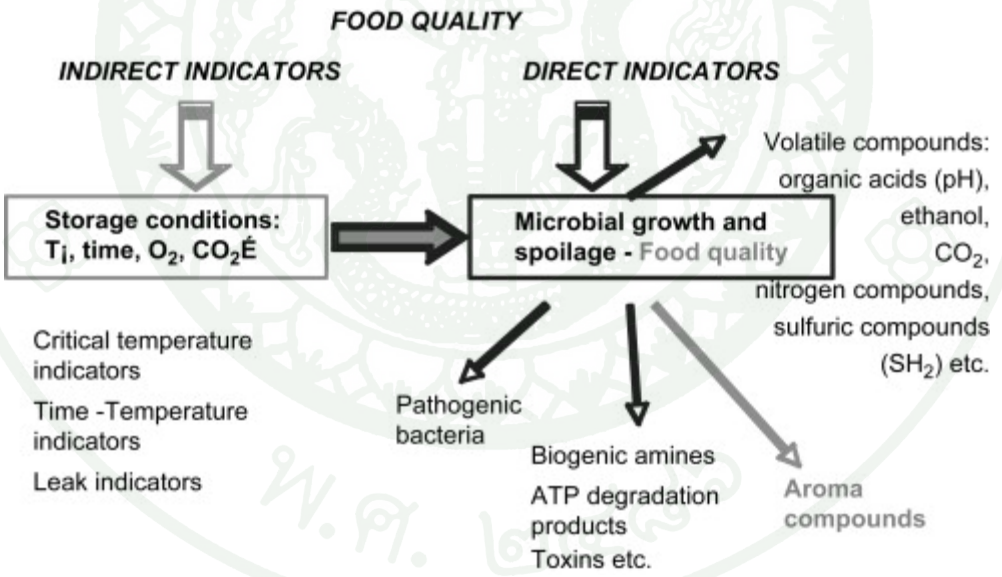


ภาพที่ 2 แผนภูมิของระบบการบรรจุแบบล้ำสมัย (sophisticated packaging system)

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Hurme (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวชี้วัดทางตรง (direct indicator) คือ วัสดุบรรจุที่สามารถติดตามคุณภาพหรือการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์อาหารได้จากการเจริญของจุลินทรีย์หรือการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งปัจจัยโดยตรงเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ปริมาณสารประกอบที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นทั้งที่สามารถระเหยได้ (volatile compound) และระเหยไม่ได้ (non-volatile compound) และปริมาณสารประกอบที่มีกลิ่นหอม (aroma compound) เป็นต้น ตัวอย่างของตัวชี้วัดโดยตรง เช่น ตัวชี้วัดชีวภาพ ตัวชี้วัดการสุกของผลไม้ (ripeness indicator) ตัวชี้วัดการเน่าเสียของอาหารหรือตัวชี้วัดความสดใหม่ (freshness indicator) และตัวชี้วัดก๊าซหรือไอระเหย เป็นต้น ส่วนตัวชี้วัดทางอ้อม (indirect indicator) คือ วัสดุบรรจุที่สามารถติดตามคุณภาพหรือการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์อาหารได้จากสภาวะในการเก็บรักษา (storage condition) อันได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างของตัวชี้วัดโดยอ้อม เช่น ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ตัวชี้วัดรอยรั่ว (leak indicator) และตัวชี้วัดความพร้อมในการเสิร์ฟ (ready-to-serve indicator) เป็นต้น (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ตัวชี้วัดคุณภาพอาหารแบบทางตรงและทางอ้อม

ที่มา: Dainelli *et al*. (2008)

การบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและเป็นส่วนสำคัญในระบบบรรจุภัณฑ์ เพราะจะช่วยในการติดตามผลและให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาหารที่ผ่านการบรรจุแล้ว ทั้งในระหว่างการจัดเก็บและการจัดจำหน่ายก่อนถึงมือผู้บริโภค ซึ่งผู้ผลิตสามารถตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนจัดจำหน่ายและผู้บริโภคสามารถทราบถึงคุณภาพอาหารในภาชนะบรรจุก่อนการตัดสินใจซื้อ ทั้งนี้ข้อมูลทางด้านคุณภาพหรือสิ่งต่างๆ ภายในผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่เราไม่สามารถรับรู้ได้จากการมองด้วยสายตา ฉะนั้นจึงต้องใช้สิ่งที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในตัวอาหารเป็นข้อมูลในการทำให้เกิดประโยชน์แก่ผู้บริโภค เพื่อความสะดวก ความปลอดภัย รวมทั้งเพื่อให้มีคุณภาพของสินค้าที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นสินค้าที่มีราคาไม่แพงมาก เนื่องจากมีขนาดเล็กและสามารถผลิตได้ครั้งละจำนวนมาก จึงทำให้ตัวผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้การบรรจุแบบนี้มีราคาที่สูงขึ้นกว่าปกติเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่เราได้รับ ฉะนั้นการพัฒนาการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์จึงได้ถูกเล็งเห็นความสำคัญเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการติดตามคุณภาพของอาหารที่สังเกตได้ง่ายด้วยตาเปล่าและยังสามารถช่วยสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคได้อีกด้วย ตัวอย่างการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์เชิงการค้า เช่น ตัวชี้วัดการสุกของลูกแพร์ ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิของเนื้อสัตว์ ตัวชี้วัดแก๊สออกซิเจนของคัพเค้ก และตัวชี้วัดความสดใหม่ของเนื้อสัตว์ เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์เชิงการค้า

ที่มา: Hogan and Kerry (2008); Poças *et al*. (2008); Smolander (2008)

การบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีอยู่หลายประเภท ได้แก่ ตัวชี้วัดความสดใหม่ ตัวชี้วัดการสุก ตัวชี้วัดรอยรั่ว และตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีการออกแบบให้มีลักษณะเป็นวัตถุชิ้นเล็กติดอยู่บนภาชนะบรรจุอาหาร สามารถติดได้ทั้งด้านในและด้านนอกภาชนะบรรจุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการทำงานของตัวชี้วัดนั้นๆ (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ ถึงแม้ตัวชี้วัดบางประเภทจะมีต้นทุนสูง อาจเนื่องจากวัสดุที่ใช้และ/หรือวิธีการผลิต แต่ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นนั้นถือว่ามีค่าเพิ่มเล็กน้อยเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับจากเทคโนโลยีการบรรจุแบบนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตัวชี้วัดที่ใช้ในการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ทั้งภายนอกและภายในภาชนะบรรจุ และหลักการทำงานหรือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสำหรับบ่งบอกคุณภาพของอาหารที่ถูกบรรจุ

ตัวชี้วัด	หลักการหรือสารที่ทำปฏิกิริยา	ข้อมูลที่บ่งบอก	การประยุกต์ใช้
เวลาและอุณหภูมิ (ภายนอก)	ทางกล ทางเคมี เอนไซม์	สภาวะการเก็บรักษา	อาหารที่เก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิแช่เย็นและแช่แข็ง
แก๊สออกซิเจน (ภายใน)	สีที่เปลี่ยนตามปฏิกิริยารีดอกซ์ สีที่เปลี่ยนตาม pH เอนไซม์	สภาวะการเก็บรักษา	อาหารที่บรรจุภายในภาชนะบรรจุที่ควบคุมปริมาณของออกซิเจน
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ภายใน)	ทางเคมี	การรั่วและสภาวะการเก็บรักษา การรั่วของภาชนะบรรจุ	การบรรจุอาหารแบบปรับปรุงและควบคุมสภาพบรรยากาศ
การเจริญของจุลินทรีย์หรือความสด (ภายในหรือภายนอก)	สีที่เปลี่ยนตาม pH สีทุกชนิดที่ทำปฏิกิริยากับกระบวนการเมทาบอไลท์ (สารระเหยหรือไม่ใช่สารระเหย)	คุณภาพจุลินทรีย์ของอาหาร (เช่น การเน่าเสีย)	อาหารสด เช่น เนื้อ ปลา เป็ดและไก่
เชื้อโรค	สารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับสารพิษ	แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค เช่น *Escherichia coli* O157	อาหารสด เช่น เนื้อ ปลา เป็ดและไก่

ที่มา: Ahvenainen (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ เป็นหนึ่งในนวัตกรรมใหม่ของการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัด บันทึก และควบคุมคุณภาพในระหว่างการขนส่งและการจัดจำหน่ายให้มีประสิทธิภาพ โดยระบบจะสามารถบอกถึงประวัติของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะมาถึงมือผู้บริโภค ฉะนั้นถ้าอาหารเคยผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมและระยะเวลานานเพียงพอจะทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารนั้นได้ โดยเฉพาะกลุ่มอาหารแช่เย็น จะมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญตลอดการขนส่งและการเก็บ ซึ่งตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจะแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีหรือการเปลี่ยนรูปเพื่อให้ผู้บริโภคสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน

Taoukis and Labuza (1989) ได้อธิบายความหมายของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิไว้ดังนี้ สิ่งประดิษฐ์ที่ราคาถูก สามารถวัดหรือบ่งชี้ได้ง่าย การเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ซึ่งอาจแสดงประวัติอุณหภูมิของอาหารทั้งหมดหรือบางส่วนในบริเวณที่สิ่งประดิษฐ์นั้นไปติดอยู่ หลักการทำงานของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ มีทั้งการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงกล เคมี เคมีไฟฟ้า เอนไซม์ หรือจุลินทรีย์ชีวภาพ ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับไม่ได้ และแสดงการตอบสนองได้อย่างชัดเจน เช่น การเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี การเปลี่ยนสีหรือการเคลื่อนที่ของสี โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.1 การจำแนกประเภทของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

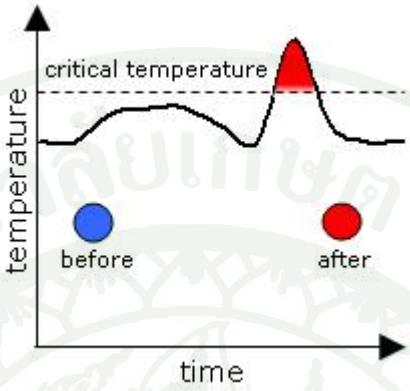
แบ่งลักษณะการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ (Taoukis *et al.*, 1991) ดังนี้

2.1.1 ตัวชี้วัดอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature indicators, CTI)

การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออุณหภูมิการเก็บสูงเกินอุณหภูมิวิกฤต แสดงว่าในช่วงแรกหากอุณหภูมิการเก็บเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นหรือต่ำลงแต่ไม่เกินอุณหภูมิวิกฤต การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดจะยังคงแสดงสีเหมือนสีเริ่มต้น แต่ถ้าอุณหภูมิการเก็บนั้นสูงเกินอุณหภูมิวิกฤต ตัวชี้วัดจะเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีสุดท้ายทันทีและไม่ผันกลับมายังสีเริ่มต้นแม้ว่าอุณหภูมิจะลดต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตก็ตาม (ภาพที่ 5) ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่สามารถบอกระยะเวลาที่เก็บและประวัติการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมินั้นได้ ฉะนั้นตัวชี้วัดประเภทนี้จะเป็นเครื่องมือที่ใช้เตือนให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์ได้ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิไม่เหมาะสม ซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาจทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเสื่อมเสียคุณภาพทางเนื้อสัมผัสของไอศครีมจากการผ่านการละลายมาแล้ว แม้ว่าอุณหภูมิจะลงลดกลับไป ณ จุดเดิม ไอศครีมแข็งตัวเหมือนเดิม แต่เนื้อไอศครีมไม่สามารถกลับมาเหมือนเดิมได้อีก



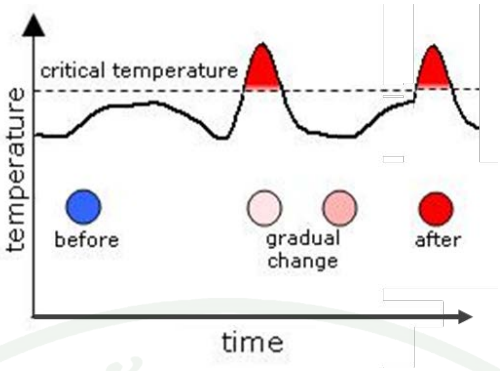
ภาพที่ 5 การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดอุณหภูมิวิกฤต

ที่มา: On Point Technical Information (2009)

2.1.2 ตัวรวบรวมอุณหภูมิ/เวลาวิกฤต (critical temperature/time integrators, CTTI)

การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออุณหภูมิการเก็บสูงเกินอุณหภูมิวิกฤต แสดงว่าในช่วงแรกหากอุณหภูมิการเก็บเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นหรือต่ำลงแต่ไม่เกินอุณหภูมิวิกฤต การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดจะยังคงแสดงสีเหมือนสีเริ่มต้น แต่ถ้าอุณหภูมิการเก็บนั้นสูงเกินอุณหภูมิวิกฤต ตัวชี้วัดจะเริ่มเปลี่ยนสีและจะค่อยๆ เปลี่ยนสีเข้มขึ้นไปเรื่อยจนกระทั่งถึงสีสุดท้ายตามระยะเวลา และไม่ผันกลับมายังสีเริ่มต้นแม้ว่าอุณหภูมิจะลดต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตก็ตาม (ภาพที่ 6) ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะแสดงว่าผลิตภัณฑ์ได้ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งจะมีการสะสมเวลาเมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ที่อุณหภูมินั้น เป็นการบอกประวัติการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นและระดับความเข้มของสีจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา เช่น การเสื่อมเสียคุณภาพของวัคซีน โดยปกติแล้ววัคซีนจะมีประสิทธิภาพการทำงานอยู่ช่วงเวลาหนึ่งเมื่อเก็บรักษาในอุณหภูมิที่กำหนดหรือเหมาะสม แต่เมื่อการเก็บนั้นอยู่ในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ประสิทธิภาพของวัคซีนจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งวัคซีนนั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีกต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

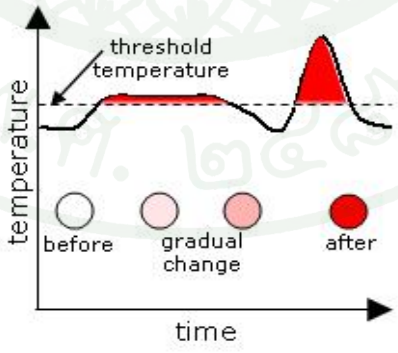


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนสีของตัวรวบรวมอุณหภูมิ/เวลาวิกฤต

ที่มา: On Point Technical Information (2009)

2.1.3 ตัวรวบรวมเวลาและอุณหภูมิ (time temperature integrators or indicators, TTI)

การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ แสดงว่าตัวชี้วัดจะเริ่มทำงานตั้งแต่เริ่มติดตัวชี้วัดไปกับผลิตภัณฑ์ สีจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงสีสุดท้ายเมื่ออุณหภูมิการเก็บนั้นสูงเกินอุณหภูมิอ้างอิงมากเกินไป (ภาพที่ 7) ระดับความเข้มของสีจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา ทำให้ทราบประวัติการเก็บรักษาและการกระจายสินค้าได้อย่างครบถ้วนยิ่งขึ้น โดยจะแปรความหมายของข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งสัมพันธ์กับการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ฉะนั้นจึงเป็นระบบที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด



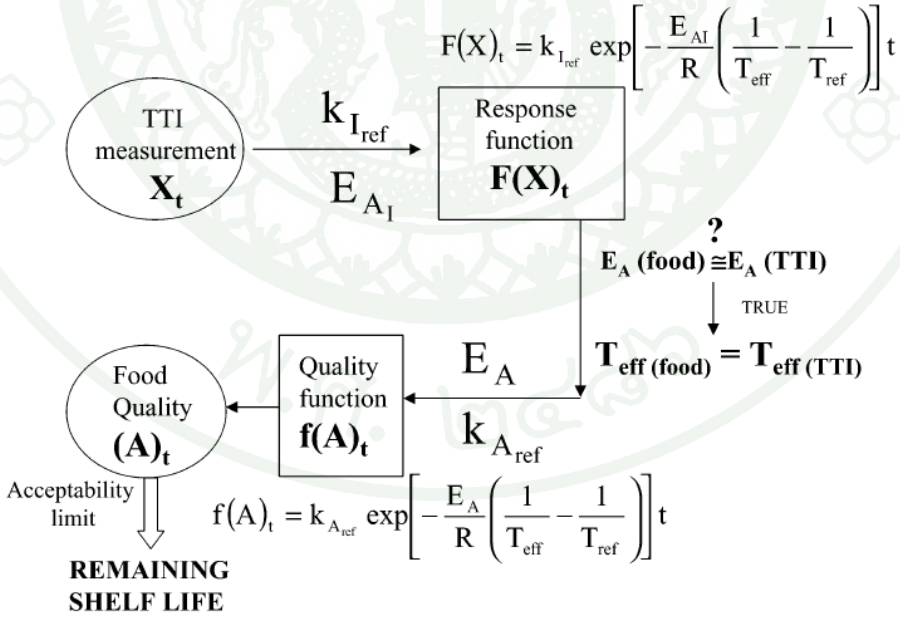
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

ที่มา: On Point Technical Information (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 แนวคิดในการพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

เริ่มต้นจากค่าการเปลี่ยนแปลงตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจะสามารถแปลงเป็นฟังก์ชันการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ($F(X)$) เพื่อใช้ในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ ซึ่งการศึกษานี้ก็ยังสามารถใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหารได้อีกด้วย จากนั้นสามารถหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy, E_a) ของทั้งตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิและอาหารได้ ซึ่งถ้าค่า E_a ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันหรืออยู่ในช่วงเดียวกับค่า E_a ของอาหาร จะสามารถกล่าวได้ว่า อุณหภูมิยังผล (effective temperature, T_{eff}) ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับของอาหารมีค่าเท่ากัน นั่นแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงอาหารเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากัน ซึ่ง T_{eff} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระบบที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ จะส่งผลกระทบให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น อายุการเก็บที่เหลือก็จะน้อยลงเมื่อเทียบกับระบบที่มีอุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปค่า E_a ของทั้งสองจะมีความแตกต่างกันไม่ควรเกิน 25 กิโลจูลต่อโมล (Taoukis, 2001) ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการบ่งชี้อายุการเก็บรักษาของอาหารได้ (ภาพที่ 8) ตัวอย่างค่า E_a ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่มีขายทางการค้า และค่า E_a สำหรับการสูญเสียคุณภาพของอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 8 แนวคิดการประยุกต์ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเป็นเครื่องมือติดตามคุณภาพของอาหาร

ที่มา: Giannakourou and Taoukis (2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่มีจำหน่ายทางการค้า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ	พลังงานก่อกัมมันต์	
ตราสินค้า	กิโลแคลอรีต่อโมล	กิโลจูลต่อโมล
Check point® Type C	12	50.21
Check point® Type M	26.8	112.13
Check point® Type S	30.1	125.94
Check point® Type 4	46.5	194.56
3M Monitor Mark™ All Type	7.9-11.9	33-50
Fresh-Check®	19.1-21.5	80-90
OnVu™	21.5-35.8	90-150
TT Sensor™	26.8-30.1	112.13-125.94
(eO)®	23.9-26.3	100-110

ที่มา: ภาณุวัฒน์ (2552)

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพของอาหาร

การเปลี่ยนแปลง	พลังงานก่อกัมมันต์	
	กิโลแคลอรีต่อโมล	กิโลจูลต่อโมล
การแพร่ผ่านเชิงควบคุม	0-15	0-62.76
ปฏิกิริยาเนื่องจากเอนไซม์	10-15	41.84-62.76
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	15	62.76
ปฏิกิริยาลิปิดออกซิเดชั่น	10-25	41.84-104.60
การสูญเสียสารอาหาร	20-30	83.68-125.52
ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์	25-50	104.60-209.20
การเจริญของจุลินทรีย์	20-60	83.68-251.04
การทำลายสปอร์	60-80	251.04-334.72
การทำลายเวเจทิทีฟเซลล์	50-150	209.20-627.60

ที่มา: Labuza (1982)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 การสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

2.3.1 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับคุณภาพของอาหาร

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางชีวเคมี ปฏิกิริยาทางกายภาพ หรือปฏิกิริยาทางจุลชีววิทยา ทำให้จึงมีความซับซ้อนสูงมาก ฉะนั้นการประเมินการเสื่อมเสียของอาหารและการสูญเสียอายุการเก็บรักษา ในทางปฏิบัติสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการสูญเสียปัจจัยทางด้านคุณภาพที่พึงปรารถนา เช่น สารอาหาร กลิ่นรส หรือการเกิดปัจจัยทางด้านคุณภาพที่ไม่พึงปรารถนา เช่น กลิ่นรสผิดปกติ จำนวนจุลินทรีย์ การเปลี่ยนสีของอาหาร เป็นต้น อัตราการสูญเสียปัจจัยทางด้านคุณภาพที่พึงปรารถนา ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับอัตราการเกิดปัจจัยทางด้านคุณภาพที่ไม่พึงปรารถนา ดังแสดงในสมการที่ 1

$$r_A = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^m \tag{1}$$

โดยที่ A เป็นปัจจัยทางด้านคุณภาพ k เป็นอัตราคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา และ m เป็นอันดับของปฏิกิริยา หากไม่คำนึงถึงอันดับของการเกิดปฏิกิริยา (m) จะสามารถแสดงการจัดรูปใหม่ดังสมการที่ 2

$$f(A) = kt \tag{2}$$

เมื่อ $f(A)$ เป็นฟังก์ชันคุณภาพของอาหาร ซึ่งมีความสัมพันธ์ร่วมกับครึ่งชีวิต (เวลาสำหรับความเข้มข้นของดัชนีคุณภาพ A ลดลงครึ่งหนึ่งของคุณภาพเริ่มต้น) แสดงในตารางที่ 4

จากความสัมพันธ์ของสมการอาร์รีเนียส พบว่าการสูญเสียคุณภาพของอาหารสามารถอธิบายในรูปแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ได้ ดังสมการที่ 3

$$f(A) = kt = k_{\text{ref}} \exp\left[\frac{-E_A}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]t \tag{3}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ฟังก์ชันคุณภาพและครึ่งชีวิตสำหรับการเสื่อมเสียของดัชนีคุณภาพ A

อันดับการเกิดปฏิกิริยา	ฟังก์ชันคุณภาพ ($f(A)_t$)	ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$)
0	$A_0 - A_t$	$A_0 / (2k_0)$
1	$\ln(A_0 - A_t)$	$\ln 2 / k_1$
2	$1/A_0 - 1/A_t$	$1/(k_2 A_0)$
m (m ≠ 1)	$\frac{1}{m-1}\left(A_t^{1-m} - A_0^{1-m}\right)$	$\frac{2^{m-1}-1}{k_m(m-1)} - A_0^{1-m}$

ที่มา: Taoukis (2001)

จากสมการที่ 3 กำหนดให้ $f(A)$ เป็นฟังก์ชันคุณภาพของอาหาร k เป็นอัตราคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ E_a เป็นพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาซึ่งควบคุมการสูญเสียคุณภาพ และ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส โดยพลังงานก่อกัมมันต์ของอาหารจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียหรือก่อโรคในอาหาร ถ้าหากอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็น T_{eff} ซึ่งเปรียบเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารที่เผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ เวลาหนึ่ง สามารถแสดงดังสมการที่ 4

$$f(A) = kt = k_{\text{ref}} \exp\left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{eff}}} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]t \qquad (4)$$

2.3.2 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลา-อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (X) จะสามารถนำมาเขียนในรูปฟังก์ชันการตอบสนอง (response function, $F(X)$) ได้ โดยที่ $F(X) = k_I t$ และสอดคล้องกับสมการอาร์ริเนียส ดังแสดงในสมการที่ 5

$$F(X) = k_I t = k_{I_{\text{ref}}} \exp\left[\frac{-E_{a_I}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]t \qquad (5)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ $k_{I\text{ref}}$ เป็นอัตราคงที่ของการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิอ้างอิง (T_{ref}) และ E_{aI} เป็นพลังงานก่อกัมมันต์ของการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็น T_{eff} ซึ่งเปรียบเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่เผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ เวลาหนึ่ง สามารถแสดงดังสมการที่ 6

$$F(X)_t = k_I t = k_{I_{\text{ref}}} \exp\left[\frac{-E_{a_I}}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{eff(TTI)}}} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] t \qquad (6)$$

2.4 ระบบของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่พบในปัจจุบัน

2.4.1 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่ (diffusion-based TTIs)

เป็นระบบแรกที่มีการพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิในเชิงพาณิชย์ หลักการทำงานจะอาศัยการแพร่ของสารเอสเทอร์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการตรวจติดตาม และใช้สีย้อมที่มีสีน้ำเงินผสมอยู่ด้วยเพื่อช่วยในการสังเกตเห็นได้ชัดเจนขึ้น ฉะนั้นถ้าตัวชี้วัดนี้อยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว สารเอสเทอร์จะเกิดการหลอมเหลวและสามารถแพร่หรือเคลื่อนที่ได้มาตามกระดาษซับ จึงทำให้เห็นสีน้ำเงินค่อยๆ เคลื่อนที่ ตัวอย่างเชิงการค้า ได้แก่ 3M™ MonitorMark (บริษัท 3M CO. รัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นแถบยาว ด้านซ้ายมือมีช่องใส่ไว้เก็บสารเอสเทอร์ผสมสีย้อมที่มีลักษณะข้นหนืด โดยเชื่อมกับกระดาษซับแต่ก่อนการใช้งานจะถูกกั้นด้วยแผ่นป้องกัน ถัดมาจะมีช่องแสดงการไหลของสารเอสเทอร์ (ภาพที่ 9) เมื่อเริ่มใช้งาน จะดึงแผ่นกั้นทางด้านซ้ายออก ถ้าอุณหภูมิการเก็บสูงกว่าอุณหภูมิอ้างอิง เอสเทอร์จะหลอมเหลวและเคลื่อนที่มาทางช่องขวามือ ทำให้เห็นสารสีน้ำเงินไหลมาตามกระดาษซับเรื่อยๆ อัตราการเคลื่อนที่ของสีย้อมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จึงสามารถติดตามอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาและการกระจายสินค้าได้

ในช่วงแรกมีการนำตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิตราสินค้า 3M™ MonitorMark มาใช้โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) เพื่อติดตามการขนส่งวัคซีนแช่เย็น ซึ่งตัวชี้วัดนี้ถูกพัฒนามาจากแนวความคิดของ Manske (1976) ซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์คิดค้นและจดสิทธิบัตร (US Patent 3,954,011) ระบบตัวชี้วัดเริ่มต้นประกอบด้วยกระดาษซับ สารให้สีที่ผสมในสารเอสเทอร์ โดยสารให้สีเป็นสารประกอบระหว่างไดไทโอออกซาไมด์ (dithiooxamide) กับนิเกิล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปัจจัยที่มีผลการแพร่ของสารเอสเทอร์ ได้แก่ ชนิดของสารเอสเทอร์ ความเข้มข้นของสารเอสเทอร์ และอุณหภูมิในการเก็บ จากการศึกษาพบว่าสารเอสเทอร์แต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน เช่น เมทิลสเตียเรท (methyl stearate) มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 37 ถึง 41 องศาเซลเซียส เอทิลสเตียเรท (ethyl stearate) มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 22 ถึง 26 องศาเซลเซียส เมทิลปาล์มิเตด (methyl palmitate) มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 32 ถึง 35 องศาเซลเซียส และไดเมทิลพทาเลท (dimethyl phthalate) มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง -3 ถึง 2 องศาเซลเซียส เป็นต้น เมื่อป้ายสารเอสเทอร์ลงแผ่นกระดาษซับในปริมาณมาก แสดงว่ามีความเข้มข้นสูง เมื่ออุณหภูมิสูงในระดับที่เกิดการแพร่ได้ จะเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าในปริมาณที่น้อยกว่า และอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่ที่เร็วขึ้นด้วย



ภาพที่ 9 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่

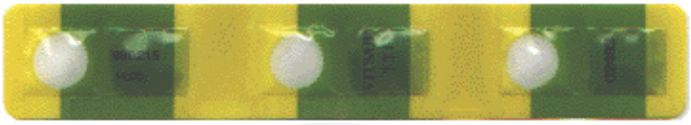
ที่มา: Anonymous (n.d.a.)

2.4.2 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์ (enzyme-based TTIs)

เป็นระบบที่ประกอบด้วย 2 ส่วนแยกออกจากกันด้วยซองพลาสติกขนาดเล็ก ส่วนแรกบรรจุสารละลายเอนไซม์ย่อยไขมัน ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้เมื่ออุณหภูมิเหมาะสม อีกส่วนจะบรรจุผง PVC ซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะดูดซับไขมันไว้และแขวนลอยอยู่ในของเหลวที่ผสม อินดิเคเตอร์ไวต่อความเป็นกรดและเบส ตัวอย่างเชิงการค้า ได้แก่ CheckPoint® I (บริษัท VITSAB International ประเทศสวีเดน) มีทั้งแบบช่องเดียวและ 3 ช่องต่อกัน ก่อนการใช้งานช่องที่ใส่เอนไซม์จะมีสีขาว และช่องที่ใส่ไขมันจะมีสีเขียว เมื่อกระตุ้นด้วยการบีบ ซองพลาสติกจะแตกออกทำให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของเหลวไหลเข้าหากัน ปฏิกิริยาระหว่างไขมันกับเอนไซม์จะเกิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ ทำให้อินดิเคเตอร์ภายในเกิดการเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 10



(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์ แบบช่องเดี่ยว (ก) และแบบ 3 ช่องต่อกัน (ข)

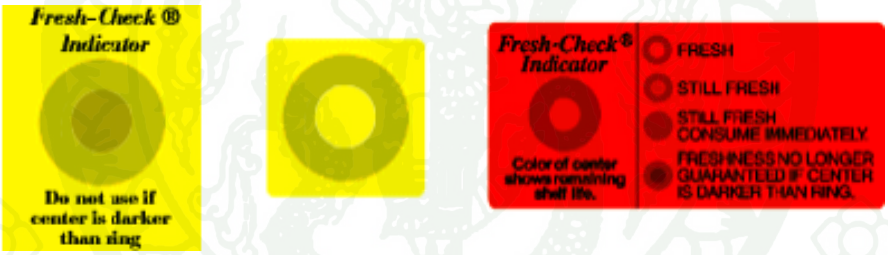
ที่มา: Anonymous (n.d.b.)

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิตราสินค้า CheckPoint® I ถูกพัฒนามาจากแนวความคิดของ Blixt *et al.* (1977) ซึ่งเป็นกลุ่มผู้ประดิษฐ์คิดค้นและจดสิทธิบัตร (US Patent 4,043,871) ระบบตัวชี้วัดเริ่มต้นประกอบด้วยสารไตรคาโพอิน (tricapoin) ที่ทำหน้าที่เป็นสับสเตรท ซิลิกาผงละเอียดที่ทำหน้าที่เป็นตัวพา (carrier) เอนไซม์ไลเปสจากตับอ่อน และสีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบส หลักการทำงานก็คือ เมื่อสับสเตรทเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์จะทำให้ผลิตสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด จากนั้นสารนี้จะไปทำให้สีย้อมเกิดการเปลี่ยนสี ปัจจัยที่มีผลการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัด ได้แก่ ชนิดของสับสเตรท และความเข้มข้นของเอนไซม์ เมื่อมีการสารที่ช่วยเพิ่มความหนืดให้กับสารไตรคาโพอิน เช่น น้ำมันหล่อลื่น (spindle oil) หรืออะลูมิเนียมสเตียเรท (aluminium stearate) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีช้าขึ้นเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิระดับหนึ่ง เนื่องจากสับสเตรทเคลื่อนที่มาสัมผัสกับเอนไซม์ได้ช้า และความเข้มข้นของเอนไซม์ที่สูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเร็ว นอกจากนี้ ในระบบที่มีตัวพาจะช่วยทำให้การเปลี่ยนสีเกิดเร็วขึ้นด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4.3 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ (polymer-based TTIs)

เป็นระบบที่อาศัยการเปลี่ยนสีของมอนอเมอร์บางชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในสถานะของแข็งเมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยการเปลี่ยนสีสามารถสังเกตเห็นเมื่อค่าการสะท้อนแสงของพอลิเมอร์ลดลง ตัวอย่างเชิงการค้า ได้แก่ Fresh-Check® TTI (บริษัท Lifelines Technology Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นวงกลมซ้อนกัน 2 วง โดยพื้นที่ของวงกลมที่อยู่ตรงกลางจะเป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ ซึ่งจะเคลือบด้วยมอนอเมอร์ไดแอเซทิลีนที่ไม่มีสี ส่วนพื้นที่วงแหวนรอบนอก จะเป็นสีอ้างอิงไว้เพื่อเปรียบเทียบ แต่เนื่องจากใช้วัสดุประกบที่มีสีแดงหรือสีเหลือง ฉะนั้นจึงเห็นการเปลี่ยนสีจากโปร่งใสเป็นสีดำเนื่องจากมอนอเมอร์ไดอะซีทิลีนเกิดเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ด้วยตัวมันเอง จับกันและเกิดการสร้างพันธะมากขึ้น จึงมีความเป็นผลึกสูงขึ้น การผ่านของแสงก็น้อยลง ก่อนใช้งานจะถูกกระตุ้นจากเวลาในการผลิต ทำให้ต้องเก็บในอุณหภูมิแช่แข็งมาก เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นช้าก่อนที่จะนำมาใช้จริง (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์

ที่มา: De Jong (2004)

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิตราสินค้า CheckPoint® I ถูกพัฒนามาจากแนวความคิดของ Patel *et al.* (1976) ซึ่งเป็นกลุ่มผู้ประดิษฐ์คิดค้นและจดสิทธิบัตร (US Patent 3,999,946) ระบบตัวชี้วัดเริ่มต้นประกอบด้วยมอนอเมอร์ไดอะซีทิลีนที่เตรียมไว้ในสารละลายพี-ไดออกเซน (p-dioxane) และกระดาษกรอง จากนั้นหยดสารละลายไว้บนกระดาษกรองและทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปเก็บไว้อุณหภูมิต่างๆ คือ -20 0 23 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ -20 และ 0 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดแสดงไม่มีสีและมีสีฟ้าอ่อนตามลำดับ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 23 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป จากไม่มีสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มทันที และจะค่อยเปลี่ยนเป็นสีแดง โดยที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นสีแดงได้เร็วขึ้น เช่น ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงได้โดยใช้เวลา 67 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ เป็นต้น

2.4.4 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานแบคทีเรีย (bacterial-based TTIs)

เป็นระบบที่อาศัยการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีระบบรหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีการผลิตสารเมทาบอไลต์ เช่น กรดอินทรีย์ และสามารถเกิดปฏิกิริยากับสีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบสได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้คือ แลกติกแอซิดแบคทีเรีย จะสามารถผลิตกรดแลกติกได้ ตัวอย่างเชิงการค้า ได้แก่ TRACEO® (บริษัท CRYOLOG ประเทศฝรั่งเศส) ประกอบด้วยแผ่นเจลขนาดเล็กที่บรรจุจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นอันตรายและสีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบส โดยจะเคลือบแผ่นเจลทับแถบรหัสแท่ง เมื่ออุณหภูมิสูง จะช่วยกระตุ้นให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตเร็วขึ้นและผลิตสารเมทาบอไลต์มากขึ้น จากนั้นตัวชี้วัดจะเกิดการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีไปเป็นสีชมพู สีที่เกิดขึ้นไปบดบังแถบรหัสแท่ง จึงทำให้ไม่สามารถอ่านแถบรหัสแท่งได้ (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานแบคทีเรีย

ที่มา: Cryolog (2006)

2.4.5 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานสารสีไวแสง (photochromic-based TTIs)

เป็นระบบการเปลี่ยนสีโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนสีของสารไวแสง เช่น สารประกอบไดไนโตรเบนซิล ไพริดีน (dinitrobenzyl pyridine compound, DNBP) ซึ่งการเปลี่ยนสีนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ตัวอย่างเชิงการค้า ได้แก่ OnVu™ (บริษัท Ciba Specialty Chemicals &

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Freshpoint ประเทศสวีเดน) ก่อนการใช้งานจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ เช่น แสงยูวี ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีไปเป็นสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นนำตัวชี้วัดสีน้ำเงินเข้มไปติดตามผลิตภัณฑ์อาหาร เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวชี้วัดจะค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนสีให้ซีดหรือจางลง จนกระทั่งกลับมาเป็นไม่มีสีได้เร็วขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดจะใช้เวลาในการซีดจางประมาณ 7 วัน แต่ในระยะเวลาเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดยังคงแสดงสีน้ำเงินที่อ่อนกว่าวันแรกเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 13



(ก) (ข)

ภาพที่ 13 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานสารสีไวแสง (ก) และการเปลี่ยนสีตามเวลาและอุณหภูมิ (ข)

ที่มา: Bizerba (2008)

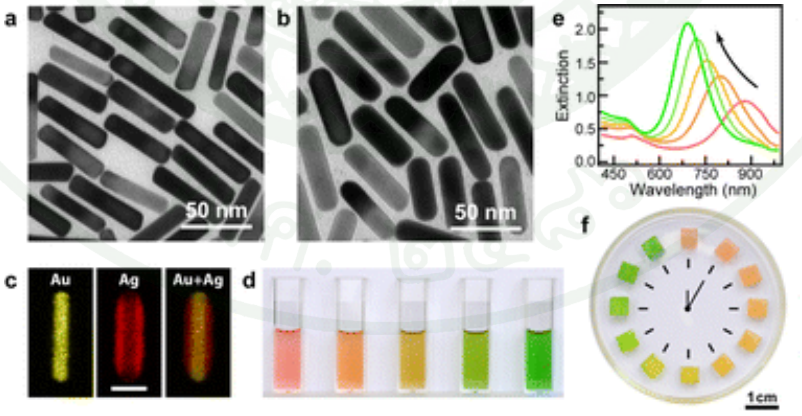
2.4.6 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพลาสโมนิกนาโนคริสตัล (plasmonic nanocrystal-based TTIs)

เป็นระบบใหม่ล่าสุดที่ค้นพบซึ่งยังศึกษาอยู่ในระดับงานวิจัย และยังไม่ได้นำไปผลิตในเชิงพาณิชย์ ตัวชี้วัดระบบนี้ถูกค้นพบโดย Zhang *et al.* (2013) ที่มีการนำเอาอนุภาคนาโนทองมาเตรียมในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (silver nitrate, $AgNO_3$) โดยปกติแล้วสายทางการแพทย์จะนำอนุภาคนาโนทองนำมาประยุกต์สำหรับการถ่ายภาพ (bioimaging) เช่น การนำอนุภาคนาโนทองมาเชื่อมต่อกับทรานสเฟอร์ริน (transferrin) เพื่อใช้ถ่ายภาพเซลล์มะเร็ง สามารถเข้าไปในเซลล์มะเร็งได้มากกว่า 6 เท่า และประยุกต์สำหรับการติดตามและตรวจสอบ *Streptococcus aureus* เนื่องจากอนุภาคนาโนทองมาเชื่อมต่อกับแอนตี้โปรตีนเอ (anti-protein A) ที่เป็นผลิตภัณฑ์เฉพาะของ *S. aureus* ได้ และประยุกต์สำหรับเป็นสูตรตำรับยา เนื่องจากอนุภาคนาโนทองสามารถเข้ากัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้กับร่างกายและไม่มีพิษ และยาบางชนิดมีการละลายต่ำ เช่นนาโพรเซน (naproxen) แต่อนุภาคนาโนทองจะเข้าไปเชื่อมต่อทำให้ตัวยามีการละลายดีขึ้น เป็นต้น ทั้งนี้รูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนทองที่แตกต่างกัน ก็จะมีสีที่เป็นลักษณะจำเพาะที่แตกต่างกันด้วย เช่น รูปร่างกลมขนาด 13 และ 50 นาโนเมตร จะให้แดงและสีม่วง ตามลำดับ และรูปแท่งที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านแคบเท่ากับ 2.12 และ 5.56 จะให้สีน้ำเงินและสีแดงส้ม ตามลำดับ เป็นต้น (สุวิชา, 2554)

จากงานวิจัยพบว่า อนุภาคนาโนทองจะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในแกนกลางของอนุภาคเงินได้ ทำให้ขนาดอนุภาคเงินมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อศึกษาขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมของเงินจะเกิดการเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณที่ผิวของอนุภาคนาโนทองมากขึ้น มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคนาโนทองที่เปลี่ยนไป จึงเกิดการเปลี่ยนสีจากสีแดงส้ม ไปเป็นสีส้ม สีเหลือง สีเขียวอ่อน และสีเขียวในที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนสีของสารละลายผสมนี้สามารถดูดกลืนแสงสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 650-900 นาโนเมตร (ภาพที่ 14) โดยเบื้องต้นได้เตรียมต้นแบบตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิลักษณะที่เป็นแผ่นวุ้นที่มีการเติมสารละลายผสมที่มีสีแดงส้มลงไป แล้วนำไปติดตามคุณภาพของนมกล่องพลาสเจอไรซ์ที่เก็บไว้ที่ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ตัวชี้วัดเกิดการเปลี่ยนสีจากสีแดงส้มไปเป็นสีเขียวได้เร็วขึ้น และเมื่อศึกษาทางจลนพลนศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดมีค่าอยู่ระหว่าง 50-190 กิโลจูลต่อโมล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนทองและสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตอีกด้วย



ภาพที่ 14 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพลาสโมนิกนาโนคริสตัล

ที่มา: Zhang *et al.* (2013)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.5 การประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น (chilled food products) ในประเทศไทยได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามพฤติกรรมการดำเนินชีวิตที่เปลี่ยนไปของผู้บริโภคด้วยวิถีชีวิตที่รีบเร่งเพื่อแข่งกับเวลาที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้จึงเลือกที่จะซื้อผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายไว้ภายในซุปเปอร์มาเก็ตขนาดใหญ่มากกว่าในตลาดสด เนื่องจากผู้บริโภคส่วนใหญ่จะสามารถซื้อของได้ช่วงเวลาเย็นภายหลังการเลิกทำงานซึ่งช่วงเวลานั้นตลาดสดบางที่ก็ได้ปิดไปแล้ว และในบางครั้งการจัดสรรเวลาในการทำกิจกรรมหลายประเภทมักจะเลือกทำในช่วงเวลาและสถานที่เดียวกัน โดยเฉพาะในห้างสรรพสินค้า เพื่อความสะดวกในจัดการกิจกรรมหลายๆ กิจกรรมให้สำเร็จในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ ยังพบผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นในร้านสะดวกซื้อและ/หรือร้านค้าปลีกขนาดกลางที่อยู่ตามเขตพื้นที่นั้นๆ อีกด้วย ซึ่งยิ่งช่วยให้ผู้บริโภคมีทางเลือกและหาซื้อรับประทานได้ง่ายขึ้น ฉะนั้นจากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ผู้บริโภคให้ความสนใจกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นกันมากขึ้น

จากการสำรวจความคาดหวังของกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคที่มีต่ออาหารแช่เย็นและแช่แข็ง พบว่า ความสะอาด ถูกสุขอนามัย เป็นสิ่งที่กลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคคาดหวังมากที่สุดคือ ร้อยละ 83 รองลงมาคือรสชาติอาหารที่อร่อย ร้อยละ 77 และเมนูที่หลากหลาย ร้อยละ 71 นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคยังคาดหวังว่าอาหารแช่เย็นและแช่แข็งจะใช้วัตถุดิบที่มีความสดใหม่และมีคุณภาพด้วย (Business Thai, 2551) เนื่องจากในปัจจุบันคนในสังคมหันมาดูแลสุขภาพกันมากขึ้น ความสะอาดและถูกสุขอนามัยจึงเป็นสิ่งที่หลายๆ คนคาดหวังและใส่ใจมาก ฉะนั้นผู้ผลิตและผู้ประกอบการจะต้องมีการควบคุมคุณภาพทั้งในระหว่างการผลิต การบรรจุ การเก็บและการจัดจำหน่ายเป็นอย่างดี ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นก็คืออุณหภูมิ ฉะนั้นจะต้องมีการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้อาหารยังคงสดใหม่ แต่ในบางครั้งมันก็อยู่นอกเหนือการควบคุม นั่นคือ อุณหภูมิในระหว่างการเก็บและการขนส่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ได้ไม่เป็นตามที่กำหนดไว้ อาหารก็จะมีโอกาสเน่าเสียได้ คุณภาพอาหารก็จะลดลง

2.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

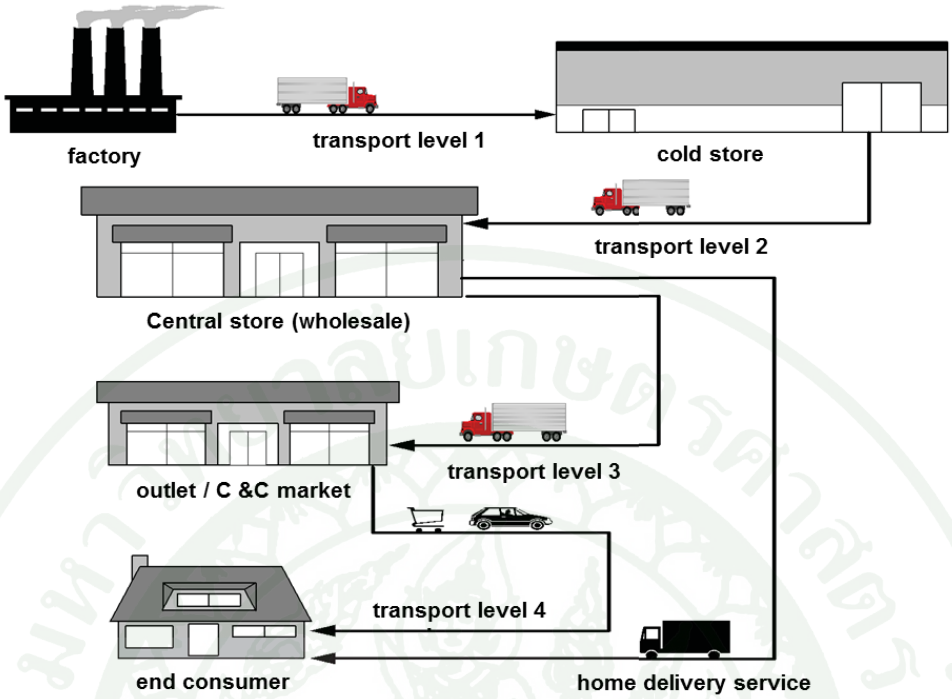
ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น คือ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องควบคุมอุณหภูมิไว้ระหว่าง -1 ถึง 8 องศาเซลเซียส เพื่อลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีและการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากจุลินทรีย์ และยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดหรืออาหารแปรรูป วิธีนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณค่าทางโภชนาการและสมบัติทางประสาทสัมผัสน้อยที่สุด ทำให้ผู้บริโภคมองว่าผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นเป็นอาหารที่สดและเป็นอาหารสุขภาพ การกระจายผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นไปยังผู้บริโภคอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับระบบการกระจายสินค้าที่ค่อนข้างละเอียดอ่อนซึ่งต้องเกี่ยวข้องกับห้องเย็นและการขนส่งในห้องเย็นหรือตู้แช่เย็นที่ใส่สินค้าในร้านค้า โดยเฉพาะอาหารแช่เย็นที่มีความเป็นกรดต่ำซึ่งเกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคได้ง่าย เช่น เนื้อสดหรือเนื้อที่ผ่านการทำให้สุกก่อนเล็กน้อย พิซซ่าหรือแป้งโดที่ยังไม่ได้อบ จะต้องเตรียมและบรรจุอาหารภายใต้สภาวะที่ปลอดเชื้ออย่างระมัดระวัง ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นแบ่งออกตามอุณหภูมิในการเก็บรักษาได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้คือ กลุ่มแรก จะมีอุณหภูมิในการเก็บรักษา อยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 องศาเซลเซียส สำหรับอาหารประเภทปลาสด เนื้อสด ไส้กรอกเนื้อบด ปลาและเนื้อรมควัน กลุ่มที่สอง จะมีอุณหภูมิในการเก็บรักษา อยู่ระหว่าง 0 ถึง +5 องศาเซลเซียส สำหรับอาหารพาสเจอไรซ์ เช่น เนื้อกระป๋อง นม ครีม โยเกิร์ต หรือผักสลัดแซวิช อาหารอบ พาสตา พิซซ่า แป้งโด หรือพาสรีที่ยังไม่อบ กลุ่มที่สาม จะมีอุณหภูมิในการเก็บรักษา อยู่ระหว่าง 0 ถึง +8 องศาเซลเซียส สำหรับพายเนื้อหรือปลาที่ผ่านการให้ความร้อนจนสุกแล้ว เนื้อหมักที่สุกหรือยังไม่สุก เนย มาการีน เนยแข็ง ผลไม้สด (กิตตยาและโสบุญชัย, 2545)

เมื่อพิจารณาถึงหลักการของการเก็บรักษาโดยการแช่เย็นแล้ว อาหารที่จะเกิดการเสื่อมเสียได้มากนั้นควรจะเก็บแช่เย็นนับตั้งแต่หลังการเก็บเกี่ยวหรือหลังจากฆ่าเสร็จแล้วจนถึงการขนส่ง ช่วงการแปรรูปหรือช่วงจำหน่าย และช่วงเก็บรักษาก่อนจะนำไปรับประทานหรือประกอบอาหารตามครัวเรือน แต่ในความเป็นจริงแล้วมันเป็นสิ่งที่ทำได้ยากที่จะให้ทุกขั้นตอนอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างที่เห็นได้ง่ายๆ ก็คือ ในช่วงการเก็บเกี่ยวหรือหลังการฆ่าจนกว่าจะนำเข้าไปแช่เย็นจะต้องใช้เวลานานถึง 1-2 วัน ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าตั้งแต่ช่วงต้นมีโอกาสของการเสื่อมเสียเกิดขึ้นได้ ภาพที่ 15 แสดงให้เห็นถึงห่วงโซ่ความเย็น (cold chain) ภายใต้การขนส่งระดับอุตสาหกรรมตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย โดยระบบการขนส่งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการจากโรงงาน จะสามารถเกิดการขนส่งได้ 4 ระดับ ดังนี้ ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นจะถูกขนส่งด้วยรถบรรทุกที่มีระบบแช่เย็นไปเก็บไว้ในโรงเก็บเย็นก่อนซึ่งเป็นการขนส่งระดับที่ 1 จากนั้นจะเริ่มจัดจำหน่ายด้วยรถบรรทุกที่มีระบบแช่เย็นไปยังผู้ขายส่งซึ่งเป็นการขนส่งระดับที่ 2 จากผู้ขายส่งจะส่งต่อไปยังผู้ขายปลีกด้วยรถบรรทุกที่มีระบบแช่เย็นซึ่งเป็นการขนส่งระดับที่ 3 ในระหว่างนี้ผู้บริโภคบางรายอาจจะสั่งซื้อสินค้าโดยตรงกับผู้ขายส่งก็ได้ และขั้นสุดท้ายคือการขนส่งระดับที่ 4 เป็นการขนส่งของผู้ซื้อจากผู้ขายปลีกไปยังที่พัก ซึ่งในขั้นตอนนี้การขนส่งจะไม่ได้มีการควบคุมความเย็นเหมือนกับการขนส่งระดับอื่นๆ ฉะนั้นภายหลังการซื้อควรรีบจัดเก็บเข้าตู้เย็นทันที (Handley, 2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 ห่วงโซ่ความเย็นภายใต้การขนส่งระดับอุตสาหกรรมตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

ที่มา: Handley (2010)

กระบวนการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นนั้นๆ ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นที่จะพบบ่อยและกล่าวถึงมากที่สุดคือ เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เนื่องจากเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีรูปแบบหลายลักษณะ และเป็นที่นิยมในการบริโภคอย่างมาก การเน่าเสียของเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ ภายหลังการชำแหละ ในระหว่างกระบวนการผลิต และการเก็บรักษา ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยเรียงลำดับได้ดังนี้ การเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเน่าเสียเนื่องจากเกิดการย่อยของเอนไซม์เอง (Dave and Ghaly, 2011) โดยเริ่มต้นเนื้อสดจะมีสีแดงและฉ่ำด้วยน้ำ ดูน่ารับประทาน แต่เมื่อเวลาผ่านไป ผิวหน้าเริ่มแห้งและสีเริ่มซีดลง เกิดรสกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และเกิดเมือก จากนั้นสีของเนื้อจะเริ่มดำ เพราะเริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับไขมันที่อยู่ภายในและปฏิกิริยาการย่อยของเอนไซม์ (ภาพที่ 16) (Chambers and Grandin, 2001) แต่ทั้งนี้ การเน่าเสียของเนื้อสัตว์สามารถมีโอกาสเกิดขึ้นเนื่องจากหลายปัจจัย ซึ่งมีทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก ดังแสดงในตารางที่ 5 (Rahman, 1999) จะเห็นได้ว่าการควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยภายนอกก็มีผลต่ออายุการเก็บและคุณภาพของเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์เช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 16 สีและลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ในระหว่างเกิดการเน่าเสีย

ที่มา: Chambers and Grandin (2001)

ตารางที่ 5 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการเก็บเนื้อสัตว์

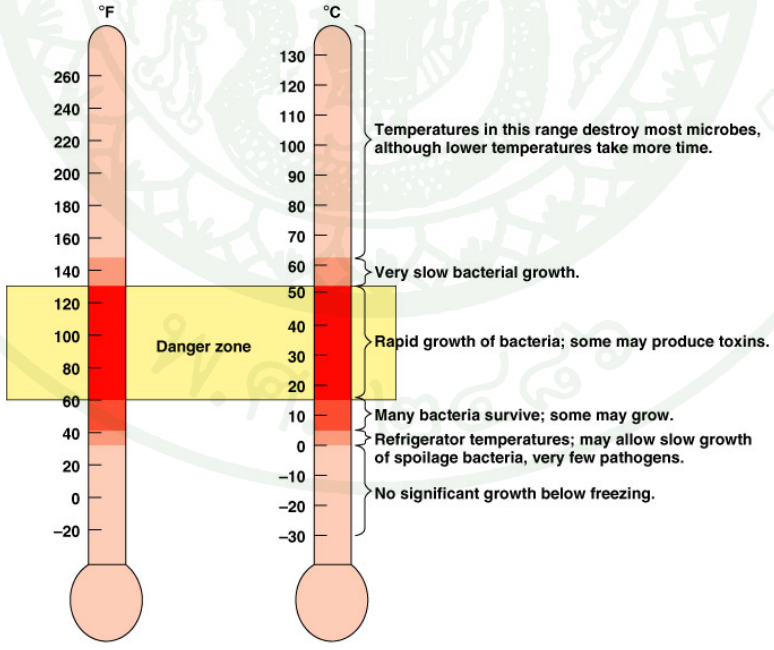
ชนิด	ปัจจัย
ภายใน	ชนิดของเนื้อสัตว์ (เช่น เนื้อวัว หรือ เนื้อหมู) ระบบการให้อาหารและการผสมพันธุ์ ช่วงเวลาการบ่มเนื้อก่อนการชำแหละ จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น สมบัติทางเคมี (เช่น ปริมาณเปอร์ออกไซด์ ความเป็นกรดและเบส สภาพเป็นกรด ความสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน) ปริมาณออกซิเจนที่หาได้ง่าย สภาวะในกระบวนการผลิต และการควบคุมสุขอนามัย (การทำความสะอาดของพนักงานและเครื่องมือตามมาตรฐาน)
ภายนอก	ระบบการจัดการคุณภาพ การควบคุมอุณหภูมิ ระบบการบรรจุ (ชนิดของวัสดุ อุปกรณ์ และปริมาณแก๊ส) ประเภทของการเก็บรักษา

ที่มา: Rahman (1999)

ในเบื้องต้นจะพบว่าที่ผิวของเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์จะมีจุลินทรีย์อยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งมีทั้งแบคทีเรีย ยีสต์และรา ก่อนที่จะเกิดการเน่าเสีย โดยกลุ่มของแบคทีเรีย ได้แก่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pseudomonas spp., *Micrococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Sarcina* spp., *Lactobacillus* spp., *Salmonella* spp., *Escherichia* spp., *Clostridium* spp. และ *Bacillus* spp. เป็นต้น (Nychas and Tassou, 1997; Arnaut-Rollier *et al*., 1999; Lin *et al*., 2004; Jay *et al*., 2005; Doyle, 2007; Bonardi *et al*., 2008) นอกจากนี้ ยังมี *Enterobacter* spp., *Klebsiella* spp. และ *Shigella* spp. อีกด้วย (Ali *et al*., 2010; Filimon *et al*., 2010) กลุ่มของยีสต์ ได้แก่ *Candida* spp., *Cryptococcus* spp., *Rhodotorula* spp. และ *Saccharomyces* spp. เป็นต้น และกลุ่มรา ได้แก่ *Cladosporium* spp., *Sporotrichum* spp., *Geotrichum* spp., *Penicillium* spp. และ *Mucor* spp. เป็นต้น (Garcia-Lopez *et al*., 1998; Jay *et al*., 2005) ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าหากการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บ การขนส่งหรือการจัดจำหน่ายไม่ดี อุณหภูมิในการเก็บสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ จะทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่เหล่านี้สามารถเกิดการเจริญเร็วขึ้น และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 15 องศาเซลเซียสแต่ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์ในกลุ่มที่สามารถผลิตพิษได้เจริญได้ดี (ภาพที่ 17) (Bauman, 2004) ดังเช่น เมื่อเก็บเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส การเจริญของ *Pseudomonas* spp. จะช้ามาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 2 องศาเซลเซียส *Pseudomonas* spp. จะมีการเจริญเร็วขึ้น ซึ่งทำให้มีผลต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ และการเจริญของ *Salmonella* spp. จะเจริญช้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 7 องศาเซลเซียส แต่จะเจริญได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 7 องศาเซลเซียส (Sentence, 1991)



ภาพที่ 17 ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์

ที่มา: Bauman (2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Garcia-Lopez *et al*. (1998) ได้กล่าวไว้ว่าการเจริญของจุลินทรีย์ประเภท *Pseudomonas* spp. และ *Enterobacteriaceae* spp. จะพบได้บ่อยในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ถูกบรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลง โดยเฉพาะเนื้อหมู มากกว่าผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ถูกบรรจุในภาวะสุญญากาศ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ดังเช่นเมื่อบรรจุเนื้ออกไก่ลอกหนังด้วยระบบที่มีอากาศแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส จะตรวจพบว่าจุลินทรีย์ทั้งหมด *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae* spp. และ *Brochothrix thermosphacta* เจริญสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และสามารถผลิตสารเมทาบอไลต์หรือสารที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นมาบริเวณช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ (แอมโมเนีย ไดเมทิลเอมีนและไตรเมทิลเอมีน) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Rukchon *et al.*, 2014) ซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นสารประกอบทางเคมีที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอาหารภายในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ มีอยู่หลายประเภท ได้แก่ กรดอินทรีย์ กรดไขมัน คีโตน แอลกอฮอล์ สารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้และระเหยไม่ได้ และแก๊สที่มีกลิ่นฉุนหรือสารประกอบประเภทซัลไฟด์ (Dainty, 1996) นอกจากนี้ สารประกอบทางเคมียังเกิดจากผลพลอยได้จากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ได้ ฉะนั้นสารประกอบทางเคมีเหล่านี้จึงสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการเน่าเสียของเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ได้ (Jay *et al*., 2005)

เมื่อเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์เริ่มเน่าเสีย จุลินทรีย์จะมีการเจริญมากขึ้นและผลิตสารประกอบทางเคมีมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะผลิตสารประกอบทางเคมีได้แตกต่างกัน อาทิเช่นจุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรีย ดังแสดงตัวอย่างสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการเน่าเสียในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตัวอย่างสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการเน่าเสียโดยแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย	สารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการเน่าเสีย
Pseudomonas spp. และ *Enterobacteriaceae* spp.	ซีสเทอีน ซิสทีน เมไธโอนีน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมทิลซัลไฟด์ ไดเมทิลซัลไฟด์ สารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ (แอมโมเนีย ไดเมทิลเอมีน และไตรเมทิลเอมีน) และคาร์บอนไดออกไซด์
Pseudomonas fluorescens	เมทิลเอมีน ไดเมทิลเอมีน ไตรเมทิลเอมีน และเอทิลเอสเทอร์
Enterobacteriaceae fragi และ *Clostridium* spp.	ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 (ต่อ)

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย	สารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการเน่าเสีย
Lactobacillus sake และ *Hafnia alvei*	ไฮโดรเจนซัลไฟด์
Shewanella putrifaciens	ไตรเมทิลเอมีน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ เมทิลเมอร์แคปแทน
Enterobacteriuceue spp., *Brochothrix thermosphacta* และ *homofermentative Luctobucilhls* spp.	ไดเมทิลซัลไฟด์ ไฮโพแซนทีน อะซีโตอินไดอะซิติล และ 3-เมทิลบิวทานอล
Brochothrix thermosphacta	อะซีโตอิน และกรดแอซิติก
Photobacterium phosphoreum	ไตรเมทิลเอมีน และไฮโพแซนทีน
Vibrionacaea spp.	ไตรเมทิลเอมีน และไฮโดรเจนซัลไฟด์
Aerobic spoilers	แอมโมเนีย กรดแอซิติก กรดบิวทีริก และ กรดโพรพิโอนิก

ที่มา: Borch *et al*. (1996); Dainty (1996); Garcia-Lopez *et al*. (1998); Jakobsen and Bertelsen (2002); Balamatsia *et al.* (2006, 2007); Baston *et al.* (2008) และ Rukchon *et al.* (2014)

นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นอื่นๆ ยังได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากนม ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผักและผลไม้ ซึ่งกระบวนการเน่าเสียในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นเกิดเนื่องจากจุลินทรีย์เป็นหลักเช่นกัน อาทิเช่น นมเป็นผลิตภัณฑ์ที่สารอาหารอยู่จำนวนมาก แม้กระบวนการพาสเจอไรซ์จะสามารถทำลายแบคทีเรียในกลุ่มไซโครไฟล์และเมโซไฟล์ได้ แต่มีจุลินทรีย์บางประเภทที่ทนต่ออุณหภูมิสูงสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ เช่น *Alcaligenes* spp., *Microbacterium* spp. และสปอร์ของ *Bacillus* spp. และ *Clostridium* spp. นอกจากนี้ ภายหลังกระบวนการพาสเจอไรซ์อาจสามารถเกิดการปนเปื้อนจากแบคทีเรียได้ เช่น *Pseudomonas* spp. และแบคทีเรียในกลุ่มไซโครไฟล์ประเภทแกรมบวก เมื่อนมเกิดการเน่าเสีย จะเริ่มมีกลิ่นบูดและฟองแก๊สเกิดขึ้น แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากนม เช่น โยเกิร์ต บัตเตอร์มิลค์ และครีมเปรี้ยว เป็นต้น จะมีความเป็นกรดสูงทำให้สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียหลายชนิดได้ ฉะนั้นจึงพบการเจริญของยีสต์และราเป็นส่วนใหญ่ แต่มีแบคทีเรียบางชนิดเจริญได้คือ *Pseudomonas* spp. (Doyle, 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

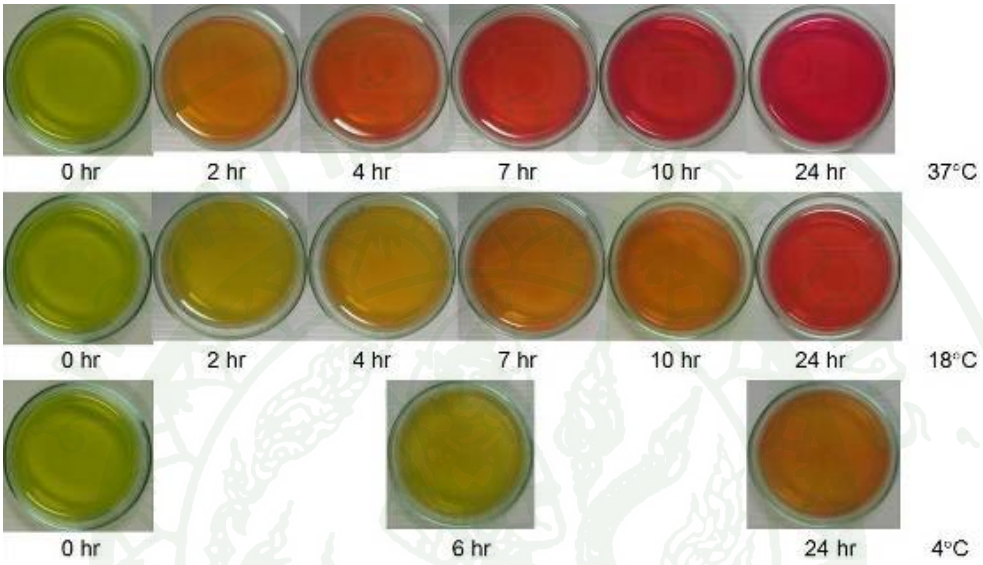
2.5.2 ตัวอย่างงานวิจัยทางด้านตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น หากผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากภาวะการเก็บและการขนส่งไม่เหมาะสม ผู้ผลิต ผู้จัดจำหน่ายหรือผู้บริโภคจะไม่สามารถทราบได้เลย ฉะนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีตัวชี้วัดเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวและบ่งบอกให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องได้ทราบ เพื่อลดความเสี่ยงในการจัดจำหน่ายหรือบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่สดใหม่ ซึ่งก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายได้อีกด้วย ในปัจจุบัน มีนักวิจัยจำนวนมากได้ตระหนักและเห็นความสำคัญในเรื่องนี้ จึงพยายามที่จะพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถนำไปใช้ติดตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนั้นๆ ได้จริง แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาทั้งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิและค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพของอาหารด้วย จะต้องแตกต่างกันไม่เกิน 25 กิโลจูลต่อโมล (Taoukis, 2001)

Wanihsuksombat *et al.* (2010) ได้ศึกษาและพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่สภาวะไอระเหย โดยอาศัยการทำงานของกรดแลกติกที่สามารถเกิดการแพร่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิตัวชี้วัดนี้ถูกเตรียมขึ้นจากการผสมระหว่างสารละลายผงวุ้นที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ระดับ (ร้อยละ 1 1.5 2 และ 2.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) กับสีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบส ในที่นี้จะใช้สีย้อมผสมระหว่างเมทิลเรด (methyl red) กับโบรโมไทมอลบลู (bromothylmol blue) ซึ่งมีวิธีการเตรียมสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nopwinyuwong *et al.* (2010) จากนั้นเมื่อผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายสีเขียว แล้วนำมาเทลงจานเพาะเชื้อประเภทแก้ว และทิ้งไว้จนกระทั่งเกิดการแข็งตัวของวุ้น จากนั้นเตรียมนำกระดาษกรองที่ถูกหยดด้วยกรดแลกติกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ไปติดไว้บริเวณฝาของจานเพาะเชื้อ แล้วนำตัวชี้วัดทั้ง 4 ชนิดไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้คือ 4 10 18 25 37 และ 45 องศาเซลเซียส แล้ววัดค่าสีและคำนวณมาเป็นค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีหรือ ΔE พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการแพร่สภาวะไอของกรดแลกติกจากฝาของจานเพาะเชื้อมาจนถึงผิวหน้าวุ้นมากขึ้น จนทำให้สีของวุ้นค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเขียว ไปเป็นสีเหลือง สีส้ม และสีแดงในที่สุด ฉะนั้นที่อุณหภูมิสูง จะให้สีวุ้นเกิดสีแดงได้เร็วขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18 และเมื่อศึกษาทางจลนพลนศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 50.03 54.37 52.07 และ 51.56 กิโลจูลต่อโมล สำหรับตัวชี้วัดทั้งหมด 4 สูตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพอาหารด้วยการแพร่ผ่านเชิงควบคุม (0-62.76 กิโลจูลต่อโมล) ปฏิกิริยาเนื่องจากเอนไซม์ (41.84-62.76 กิโลจูลต่อโมล) และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (62.76 กิโลจูลต่อโมล) (Labuza, 1982) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่จะสามารถนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ติดตามได้คือ ผักและผลไม้ ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์อยู่ในช่วง 29-79 กิโลจูลต่อโมล เช่นเดียวกับตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่ทางการค้าชนิด 3 M MonitorMark™ ที่มีพลังงานก่อกัมมันต์อยู่ในช่วง 33-50 กิโลจูลต่อโมล สามารถนำไปใช้ติดตามคุณภาพผักและผลไม้สด ได้แก่ แอปเปิ้ล แครอท สตอเบอรรี่ และเห็ด เป็นต้น



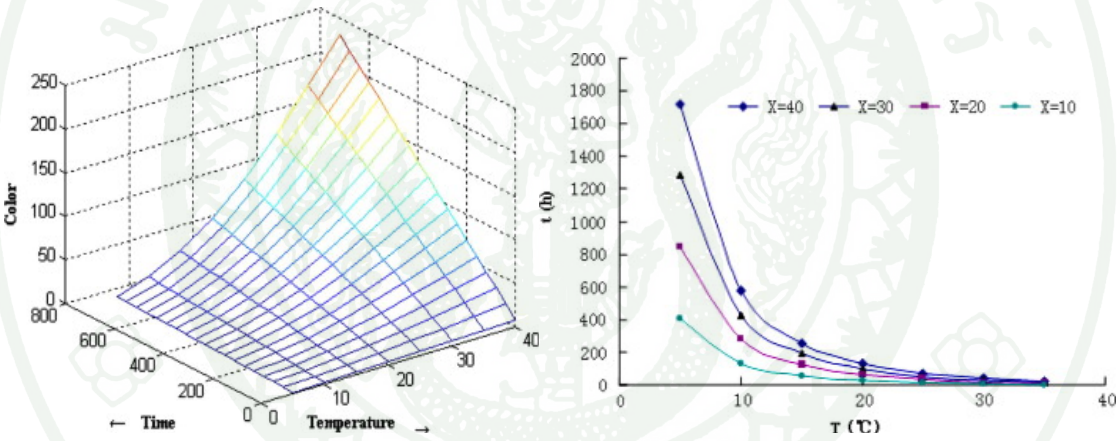
ภาพที่ 18 ลักษณะการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่ในจานทดลอง

ที่มา: Wanihsuksombat *et al.* (2010)

Yan *et al.* (2008) ได้ศึกษาและพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์อะไมเลสที่เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงระหว่างเอนไซม์อะไมเลสกับสตาร์ช ตัวชี้วัดนี้ถูกเตรียมขึ้นจากการผสมระหว่างผงสตาร์ชที่ผ่านการเติมด้วยสารละลายไอโอดีน ในอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชกับสารละลายไอโอดีนเป็น 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส กับเอนไซม์อะไมเลสที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 15 20 25 และ 30 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะถูกอัดให้เป็นเม็ดที่มีสีน้ำเงิน ซึ่งจะได้ตัวชี้วัดทั้งหมด 4 สูตรตามความเข้มข้นของเอนไซม์อะไมเลส แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 8 12 18 25 และ 37 องศาเซลเซียส และวัดค่าสีตลอดช่วงการเก็บรักษา พบว่า อุณหภูมิจะมีผลทำให้เกิดระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization) สูงขึ้น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการเปลี่ยนสีของไอโอดีนคลาเทรต (iodine clathrate) ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสตาร์ช ไอโอดีนคลาเทรตสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นไม่มีสี แต่ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์อะไมเลสมีสีเหลืองอ่อน ฉะนั้นสีสุดท้ายของไอโอดีน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คลาเทรตจึงมีสีเหลืองอ่อนปนมาด้วย และถ้าเพิ่มปริมาณเอนไซม์อะไมเลสมากขึ้น จะทำให้ความเข้มของสีสุดท้ายที่มาจากสีของเอนไซม์อะไมเลสยิ่งเข้มขึ้น ภาพที่ 19 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิการเก็บสูงขึ้น ระยะเวลาการเก็บนานขึ้น จะทำให้ตัวชี้วัดมีค่าสีสูงขึ้น และอุณหภูมิการเก็บยิ่งสูง การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดยิ่งเกิดเร็วขึ้น และเมื่อศึกษาทางจลนพลนศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 109.63 114.59 112.98 และ 102.74 กิโลจูลต่อโมล สำหรับตัวชี้วัดทั้งหมด 4 สูตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพอาหารด้วยการเจริญของจุลินทรีย์ (83.68-251.04 กิโลจูลต่อโมล) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (104.60-209.20 กิโลจูลต่อโมล) และการสูญเสียสารอาหาร (83.68-125.52 กิโลจูลต่อโมล) (Labuza, 1982) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่จะสามารถนำไปใช้ติดตามได้คือ ปลาบอคแช่เย็น ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้จากดัชนีตัวชี้วัด การเจริญ *Pseudomonas* spp. และการเจริญ *S. putrefaciens* ของปลาบอคแช่เย็น ได้เป็น 86.6 81.6 และ 82.8 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ



(ก) (ข)

ภาพที่ 19 พื้นผิวตอบสนองของค่าสี (ก) และการวาดกราฟคอนทัวร์ (contour) ของการตอบสนองของสี (ข) ตามการเปลี่ยนแปลงเวลาและอุณหภูมิของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานเอนไซม์อะไมเลส

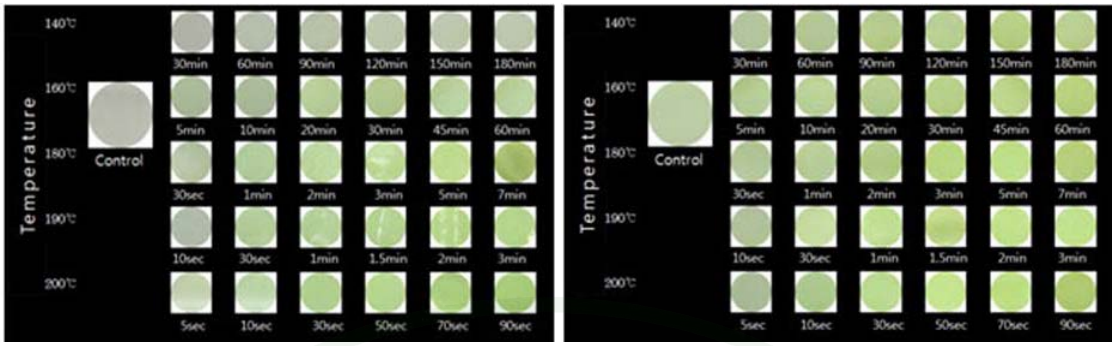
ที่มา: Yan *et al.* (2008)

Lee and Shin (2012) ได้ศึกษาและพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ที่เกิดจากเปลี่ยนสีของโฟลูมิเนสเซนซ์ 4,4'-บิส(2-เบนโซซาโซอิล)สติลบีน โครโมฟอร์ม (photoluminescent 4,4'-bis(2-benzoxazolyl)stilbene chromophores, BBS) ตัวชี้วัดนี้ถูกเตรียมขึ้นรูป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) โดยผสมเม็ดพลาสติกที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมหรือโคพอลิเมอร์ชนิดพอลิโอเลฟินระหว่างเอทิลีนกับนอร์บอร์นีน (TOPAS 5013) ปริมาณ 0.5 กิโลกรัม กับสารให้สี BBS ที่มีสองความเข้มข้นคือ ปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก จากนั้นผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 นาที จะได้แผ่นฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE หรือ Teflon) หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปผ่านการอัดขึ้นรูป (compression moulding) ด้วยการใช้แม่พิมพ์ โดยช่วงแรกจะให้ความร้อนระดับหนึ่งก่อน (preheating) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 นาที และอัดด้วยความดันประมาณ 20 เมกะปาสคาล ประมาณ 3 นาที จากนั้นนำแผ่นฟิล์มภายหลังการอัดขึ้นรูปไปจุ่มในอ่างน้ำแข็งเพื่อให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิโดยทันที โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 80-100 ไมโครเมตร แล้วนำไปทดสอบที่อุณหภูมิคงที่แตกต่างกัน คือ 140 160 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส แล้ววัดค่าสีและคำนวณมาเป็นค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีหรือ ΔE พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนสีได้เร็วขึ้น และการเปลี่ยนสีจะสามารถเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของ TOPAS 5013 ได้ (T_g ของ TOPAS 5013 คือ 130 องศาเซลเซียส) โดยเมื่อเก็บฟิล์มไว้ที่ 140 องศาเซลเซียส ฟิล์มที่ถูกผสมด้วย BBS เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีเขียวภายใน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นสีก็จะเริ่มนิ่ง ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง แต่สำหรับฟิล์มที่ถูกผสมด้วย BBS เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีเขียวภายใน 90 นาทีเท่านั้น ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณ BBS สูงขึ้น เกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีเขียวได้เร็วและชัดเจนยิ่งขึ้น ค่า ΔE ก็จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ฟิล์มจะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีแค่ภายใน 20 นาที 1 นาที และ 10 วินาที ตามลำดับ (ภาพที่ 20) และเมื่อศึกษาทางจลนพลนศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 185.67 และ 179.29 กิโลจูลต่อโมล สำหรับตัวชี้วัดที่ถูกผสมด้วย BBS เข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานการแพร่ทางการค้า พบว่าตัวชี้วัดทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่าสูงกว่ามาก เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ติดตามผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิสูงได้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องเข้าสู่กระบวนการสเตอริไรซ์ เช่น อาหารในโรงพยาบาลหรืออาหารที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนภายใต้แรงดันที่กำหนดและผลิตภัณฑ์เบเกอรี่หรือลูกกวาด เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

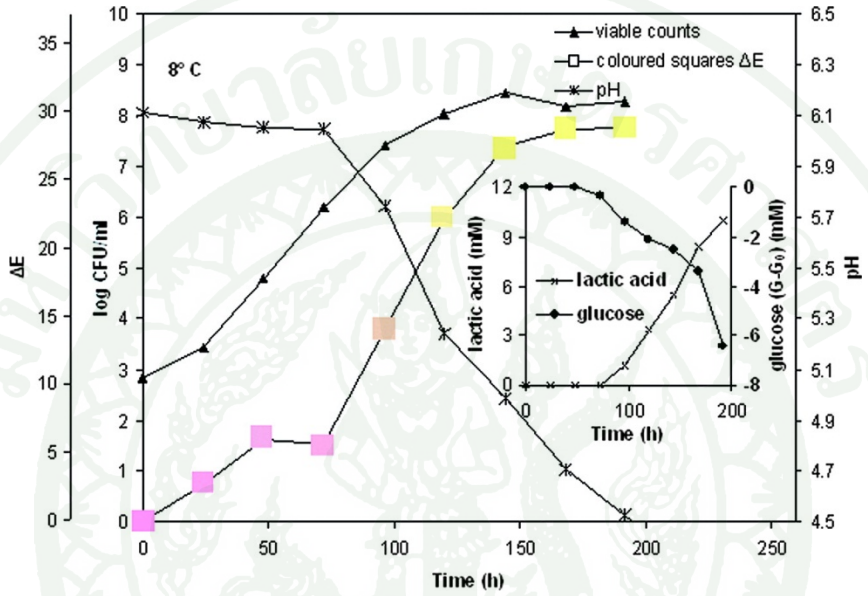
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ที่ถูกผสมด้วย BBS เข้มข้นร้อยละ 1 (ก) และ 2 (ข) โดยน้ำหนัก ตามการเปลี่ยนแปลงเวลาและอุณหภูมิ

ที่มา: Lee and Shin (2012)

Vaikousi et al. (2008) ได้ศึกษาและพัฒนาต้นแบบตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานจุลินทรีย์ โดยอาศัยการเจริญและกิจกรรมเมแทบอลิกของ *L. sakei* ตัวชี้วัดนี้ถูกเตรียมขึ้นจากการผสมระหว่างอาหารเลี้ยงเชื้อแบบเหลวที่มีกรดอะมิโนอยู่ในปริมาณสูงที่ปรับค่าความเป็นกรดและเบส ประมาณ 6.4-6.5 ก่อนที่จะทำการสเตอริไรซ์ สีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบสที่ผ่านการสเตอริไรซ์แล้ว และแบคทีเรียประเภท *L. sakei* ซึ่งมีปริมาณเริ่มต้นเป็น 0.699 log CFU ต่อมิลลิลิตร การคัดเลือกสีย้อมที่มีความเป็นกรดและเบส จะต้องมีสมบัติดังนี้คือ ยอมให้จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ แสดงการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนและเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับเมื่อค่าความเป็นกรดและเบสลดลง จากสีย้อมทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ เมทิลเรด (methyl red) คลอโรฟีนอลเรด (chlorophenol red) บรอมครีซอลเพอเพิล (bromocresol purple) สีย้อมผสมระหว่างโบรโมครีซอลกรีน (bromocresol green) กับคลอโรฟีนอลเรด (chlorophenol red) รีซาซูริน (resazurin) อะลิซาริน (alizarin) และ พี-ไนโตรฟีนอล (*p*-nitrophenol) พบว่าคลอโรฟีนอลเรดถูกเลือกให้เป็นสีย้อมในระบบนี้ โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับจากสีแดงไปเป็นสีส้มและเป็นสีเหลืองในที่สุด เมื่อค่าความเป็นกรดและเบสลดลง ซึ่งค่าความเป็นกรดและเบสขึ้นอยู่กับการเจริญของแบคทีเรีย จากการทดลองได้นำตัวชี้วัดไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่คือ 0 4 8 12 และ 16 องศาเซลเซียส จากนั้นตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ ค่าความเป็นกรดและเบส และหาค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีหรือ ΔE พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น *L. sakei* จะสามารถใช้กลูโคสในการเจริญและผลิตกรดแลกติกขึ้น เมื่อปริมาณกรดแลกติกมากขึ้น ค่าความเป็นกรดและเบสลดลง และ ΔE ของตัวชี้วัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยคลอโรฟีนอลเรดจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีแดงไปเป็นสีส้มและเป็นสีเหลืองในที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 21 และเมื่อศึกษาทางจลนพลน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดมีค่าเท่ากับ 97.7 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการสูญเสียคุณภาพอาหารด้วยการเจริญของจุลินทรีย์ (83.68-251.04 กิโลจูลต่อโมล) (Labuza, 1982) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่จะสามารถนำไปใช้ติดตามได้คือ ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ถูกบรรจุในภาวะสุญญากาศหรือในสภาพบรรยากาศดัดแปลงที่มีพื้นฐานการเจริญของแลกติกแอซิดแบคทีเรีย ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้เป็น 103.2 กิโลจูลต่อโมล



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลินทรีย์ ทางด้านเคมีกายภาพ และการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในระบบตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานจุลินทรีย์ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส

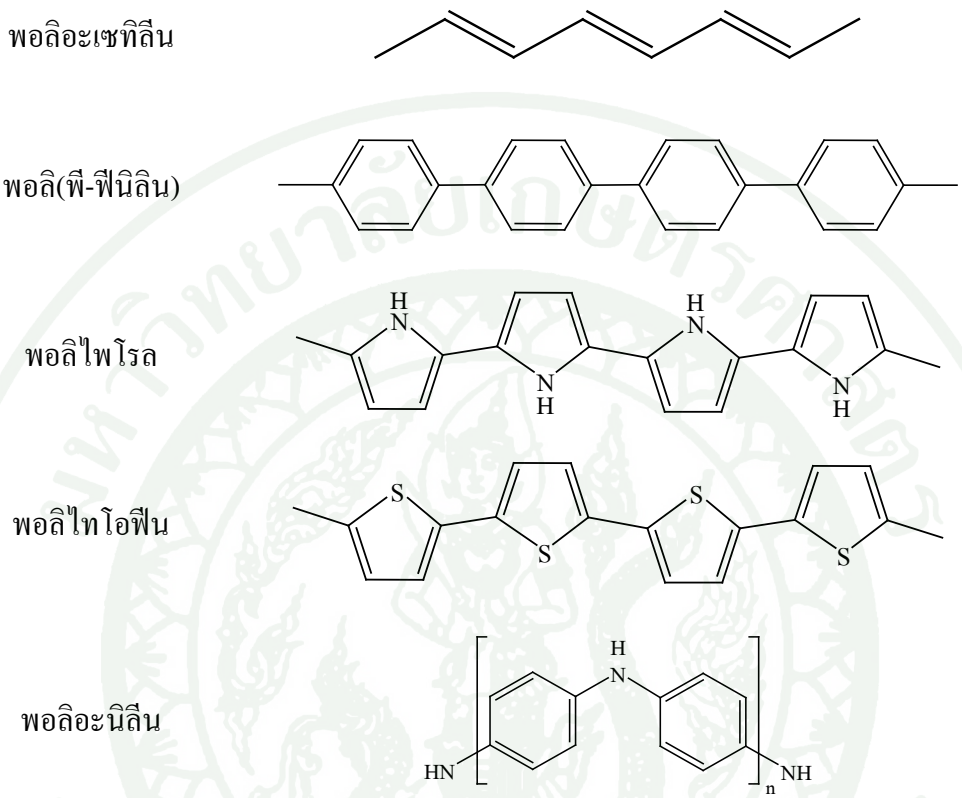
ที่มา: Vaikousi et al. (2008)

3. คอนจูเกตพอลิเมอร์

คอนจูเกตพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugated polymer) คือ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว ซึ่งมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene) พอลิ(พี-ฟีนิลีน) (poly(p-phenylene)) พอลิไพโรล (polypyrrole) พอลิไทโอฟีน (polythiophene) และพอลิอะนิลีน (polyaniline) ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้จะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากมอนอเมอร์ประเภทอะเซทิลีน (acetylene) ฟีนิลีน (phenylenes) ไพโรล (pyrole) ไทโอฟีน (thiophene) และอะนิลีน (aniline) ตามลำดับ นอกจากนี้ โครงสร้างดังกล่าวยังทำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโมเลกุลได้ ดังนั้นพอลิเมอร์เหล่านี้จึงมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ (electrically conducting polymers) (จตุพร, ม.ป.ป.)



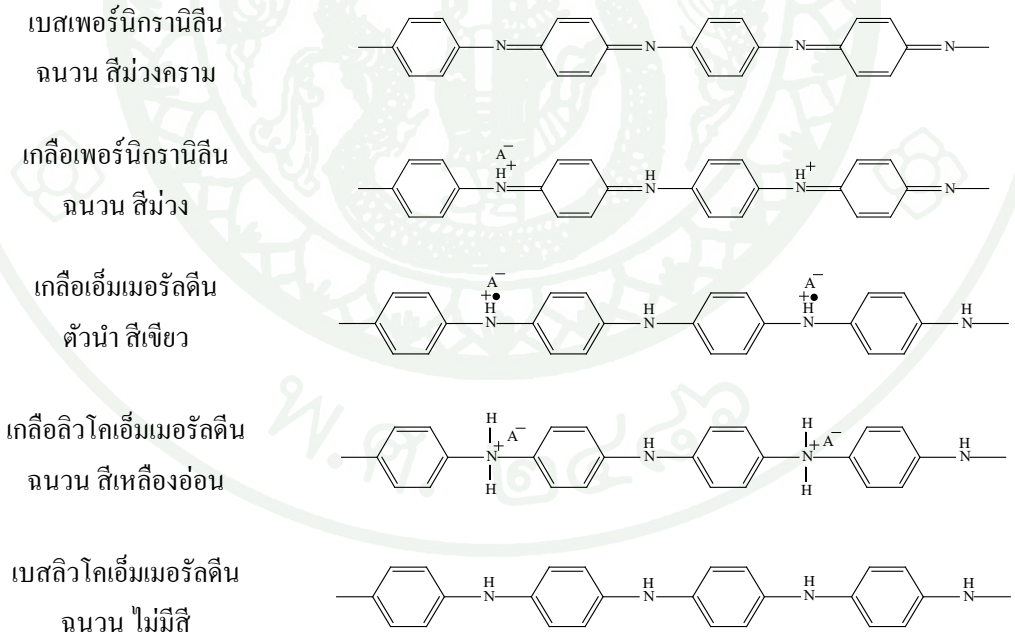
ภาพที่ 22 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์

ที่มา: จตุพร (ม.ป.ป.)

เมื่ออยู่ในสภาวะปกติหรือสภาวะที่เป็นกลาง พอลิเมอร์เหล่านี้จะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีบางชนิดที่เติมลงไป มีโอกาสทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสายโซ่ (intra-molecular conductivity) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสายโซ่ (inter-molecular conductivity) ซึ่งจัดเป็นการกระตุ้นทางเคมีที่เรียกว่า การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยอาจจะเป็นปฏิกิริยารีดักชันหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันก็ได้ ถ้าสารที่เติมลงไปเป็นอะตอมหรือสารที่ขาดแคลนอิเล็กตรอน จะเรียกสารดังกล่าวว่า ตัวออกซิไดส์ในทางเคมีหรือพีโดพันท์ (P-dopant) แต่ถ้าเป็นอะตอมหรือสารที่เติมลงไปมีอิเล็กตรอนมาก จะเรียกสารนั้นว่า ตัวรีดิวซ์ในทางเคมีหรือเอ็นโดพันท์ (N-dopant) ดังนั้นกระบวนการกระตุ้นด้วยตัวออกซิไดส์จึงอาจจะเรียกได้ว่าเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการออกซิเดชันของพอลิเมอร์และกระบวนการกระตุ้นด้วยตัวรีดิวซ์ จึงอาจจะเรียกว่าเป็นกระบวนการรีดักชันของพอลิเมอร์ จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลในแนวระนาบ (planar) และทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะที่ไม่เป็นกลาง นั่นคือ มีประจุเกิดขึ้นในโครงสร้าง จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นั้นสูงขึ้น นอกจากจะเกิดสภาพที่เป็นตัวนำและฉนวนแล้ว ยังมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติอื่นด้วย เช่น สี และปริมาตร อย่างเช่น โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนในแบบต่างๆ จะทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยเริ่มจากการเติมโปรตอนให้กับเบสเพอร์นิกรานิลีน (pernigraniline base, PB) ซึ่งมีสีม่วงคราม จะเกิดการเปลี่ยนไปเป็นเกลือเพอร์นิกรานิลีน (pernigraniline salt, PS) ซึ่งมีสีม่วง และนอกจากนี้ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่อเนื่องของเบสลิวโคเอ็มเมอรัลดีน (leucoemeraldine base, LB) ซึ่งไม่มีสี และเกลือเอ็มเมอรัลดีน (emeraldine salt, ES) ซึ่งมีสีเขียว จะทำให้ได้เกลือเพอร์นิกรานิลีนในที่สุด ส่วนเกลือลิวโคเอ็มเมอรัลดีน (leucoemeraldine salt, LS) ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน เกิดจากการเติมโปรตอนให้กับเบสลิวโคเอ็มเมอรัลดีน (leucoemeraldine base, LB) ซึ่งไม่มีสี เป็นต้น ทำให้มีการนำพอลิอะนิลีนไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย (Wallace *et al*., 2009)



ภาพที่ 23 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่างๆ

ที่มา: Wallace *et al*. (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมบัติทางด้านสีของพอลิเมอร์เหล่านี้ สามารถที่จะตรวจวัดการเปลี่ยนสีด้วยวิธีคัลเลอริเมตรี (colorimetric method) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจอย่างง่าย ประหยัด และสะดวก เนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องที่มีราคาแพงในการตรวจวัด และเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งจะต่างจากวิธีการตรวจวัดแบบฟลูออเรสเซนส์ (fluorescent method) และเคมีไฟฟ้า (electrochemical methods) (Nakamura and Karube, 2003; Lee *et al*., 2006) จากสมบัติทางไฟฟ้า สี การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ และปฏิกิริยากรด-เบส ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวพิเศษของคอนจูเกตพอลิเมอร์ จึงทำให้คอนจูเกตพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมากทั้งในด้านเคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ และมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ด้านการแพทย์ (เช่น การนำพายาเข้าสู่เป้าหมาย (drug delivery) และอวัยวะเทียม) ด้านเคมี (เช่น การตรวจวัดสารเคมีหรือเซนเซอร์ การแยกสารอิแนนชิโอเมอร์ การแยกธาตุ และการวิเคราะห์สาร) ด้านสิ่งแวดล้อม (เช่น ตรวจวัดสารมลพิษ) ด้านพลังงาน (เช่น แบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง) และด้านอุตสาหกรรม (เช่น การป้องกันการกัดกร่อน การป้องกันรังสีรบกวน การป้องกันไฟฟ้าสถิต) เป็นต้น (Wallace *et al*., 2009; Inzett, 2008) แต่ในงานวิจัยนี้ เลือกให้ความสนใจที่จะศึกษาพอลิไดอะเซทิลีน ซึ่งเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเฉพาะตัวพิเศษทั้งทางด้านโครงสร้างและทางแสงที่แตกต่างไปจากคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น สามารถจัดเรียงตัวของโมเลกุลประกอบได้เอง สามารถเกิดปฏิกิริยาภายหลังฉายรังสียูวีหรือแกมมาได้โดยไม่ต้องมีตัวเริ่มต้น และเตรียมได้ง่ายในน้ำซึ่งอยู่ในรูปของไลโพโซม (liposomes) หรือเวสิเคิล (vesicle) เป็นต้น (Yoon *et al*., 2009) เพื่อนำมาพัฒนาเป็นตัวชี้วัดเวลา-อุณหภูมิต่อไป

4. พอลิไดอะเซทิลีน

พอลิไดอะเซทิลีน เป็นสารชนิดหนึ่งในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติในการเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นจากสิ่งเร้าและสารเคมีบางชนิด เช่น อุณหภูมิ (Gou *et al.*, 2010; Nopwinyuwong *et al.*, 2012; Patricia de Oliveira *et al.*, 2012) ความเป็นกรดและเบส (Kew and Hall, 2006; Patricia de Oliveira *et al.*, 2012) ตัวทำละลาย (Yoon *et al.*, 2007) และโมเลกุลชีวภาพ (Xia *et al.*, 2010) เป็นต้น ในปัจจุบันนี้การใช้งานของพอลิไดอะเซทิลีนส่วนใหญ่จะพบในงานด้านชีววิทยา สิ่งแวดล้อม และเคมี ยกตัวอย่างเช่น ทางการแพทย์ จะนิยมใช้เป็นตัวเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดโมเลกุลเป้าหมาย ได้แก่ จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในร่างกายมนุษย์ เช่น ไวรัสโรคไข้หวัดใหญ่ (Reichert *et al*., 1995) หรือการทำงานของเอนไซม์ (Okada *et al*., 1999) ภายในเนื้อเยื่อ เป็นต้น ส่วนมากจะใช้ในรูปของสารละลาย แต่ไม่ค่อยพบในรูปของแผ่นฟิล์มเท่าที่ควร อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มนั้นจะต้องมีการเติมส่วนผสมของสารเคมีอื่นเพิ่มเติมเพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติที่ดีและขึ้นรูปได้ง่ายใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งการเติมสารเคมีอื่นลงไปนั้นจะมีผลต่อความเสถียรภาพทางโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนได้ ฉะนั้นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจึงต้องเพิ่มความระมัดระวังมากขึ้น

4.1 ลักษณะพิเศษของพอลิไดอะเซทิลีน ได้แก่

4.1.1 พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเตรียมได้จากไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวเองของโมเลกุลให้ประกอบเข้ากันได้เอง (self-assembly)

4.1.2 พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดขึ้นได้โดยการฉายรังสียูวีหรือแกมมาของไดอะเซทิลีน โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวเริ่มต้นหรือตัวเร่งอันตรกิริยาทางเคมี ฉะนั้นพอลิไดอะเซทิลีนที่ได้จึงไม่มีการปนเปื้อนจากผลิตผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการ

4.1.3 พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำในรูปของไลโพโซมหรือเวสิเคิล

4.1.4 พอลิไดอะเซทิลีนมีสมบัติพิเศษด้านการเปลี่ยนสี โดยสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ไปเป็นสีแดงซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร เมื่อได้รับการตอบสนองจากสิ่งกระตุ้นต่างๆ เช่น ความร้อน ความเป็นกรดเบส หรือตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

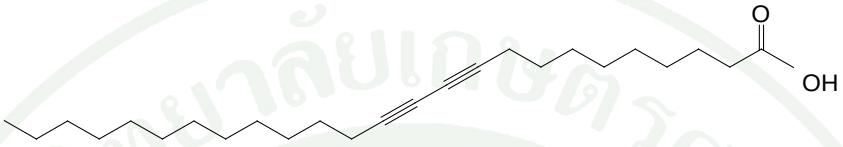
4.1.5 พอลิไดอะเซทิลีนมีสมบัติทางด้านฟลูออเรสเซนซ์ สามารถตรวจสอบได้ง่ายด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์แสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence microscopy) นั่นคือ พอลิไดอะเซทิลีนจะปรากฏสมบัติฟลูออเรสเซนซ์เฉพาะในเฟสสีแดงเท่านั้น ฉะนั้น ถ้าต้องการตรวจสอบการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน ก็สามารถใช้เทคนิคนี้ได้

4.2 การสังเคราะห์พอลิไดอะเซทิลีน

พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเตรียมได้จากการเกิดพอลิเมอไรเซชันของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์เมื่อได้รับแสงยูวีภายใต้สภาวะที่เหมาะ ซึ่งไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน จะมีความสามารถในการรวมตัวกับน้ำจนเกิดเป็นลักษณะเป็นเวสิเคิลได้ต่างกัน สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารตั้งต้นคือ 10,12-เพนตะโคซะไดอายน์โนอีกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid, PCDA) มีสูตรโมเลกุล $C_{25}H_{42}O_2$ ซึ่งเป็นหนึ่งในไดอะซิทิลีนลิปิดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก (ภาพที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

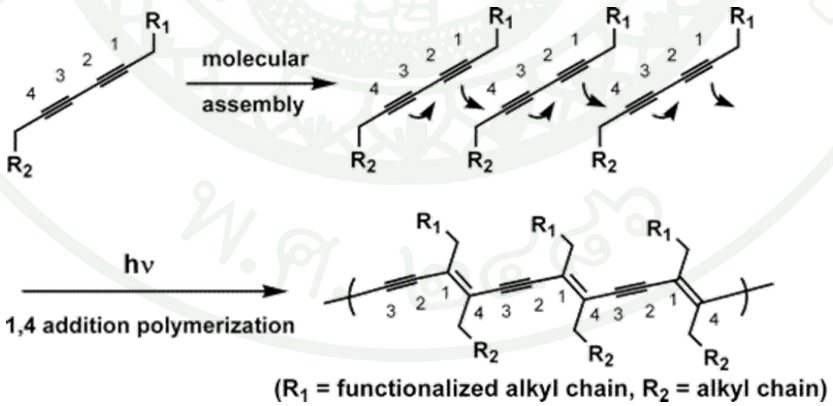
24) แสดงถึงโครงสร้างของ PCDA ซึ่งมีหมู่ไดอะซิทิลีนที่ประกอบด้วยพันธะสาม 2 พันธะอยู่ตำแหน่ง 10 และ 12 บริเวณส่วนหางของโครงสร้างที่เป็นสายโซ่แอลคิลจะมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก ซึ่งไม่ชอบน้ำ และที่บริเวณหัวของโครงสร้างจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) ซึ่งมีขั้วสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้หรือมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก จึงทำให้สามารถเตรียม PCDA ให้อยู่ในรูปของเวสิเคิล ซึ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำได้ง่ายโดยใช้กระบวนการอัลตร้าโซนิกส์



ภาพที่ 24 โครงสร้างโมเลกุลของ PCDA

ที่มา: Balakrishnan *et al*. (2010) และ Nopwinyuwong *et al.* (2012)

PCDA จะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าหากันได้ด้วยตัวมันเอง (assembly) และเมื่อผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอไรเซชันด้วยแสง (photopolymerization) จะเกิดการจับกันที่ตำแหน่ง 1 และ 4 ของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน (1,4-addition polymerization) (Morigaki *et al.*, 2002) และเกิดการจับกันอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนเกิดเป็นลักษณะเวสิเคิล และเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นสีน้ำเงิน (ภาพที่ 25)

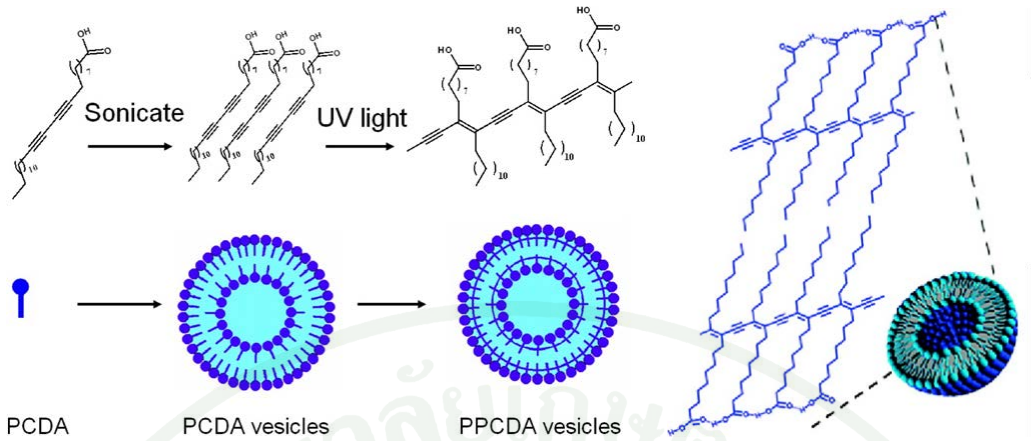


(ก)

ภาพที่ 25 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมของ PCDA (ก) และกลไกการเกิดพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ข)

ที่มา: Morigaki *et al.*(2002) และ Potisatityuenyong *et al*. (2006, 2008)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ข)

ภาพที่ 25 (ต่อ)

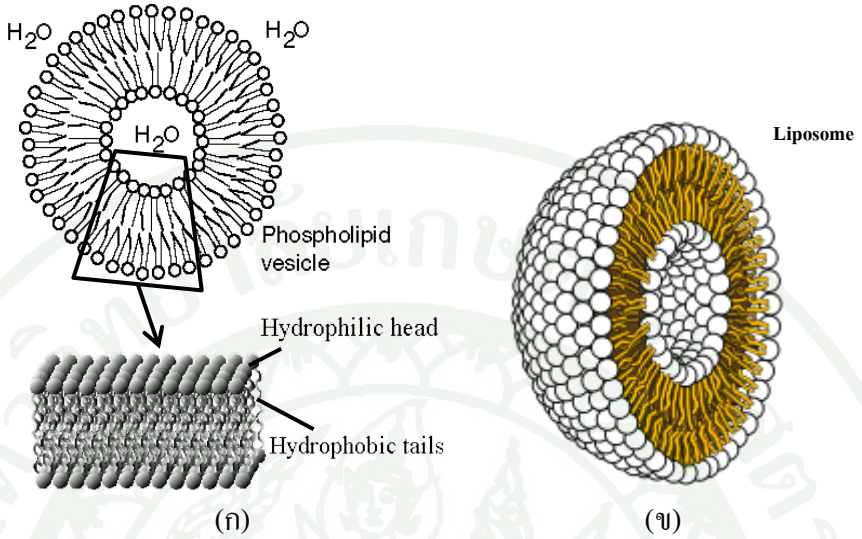
ฉะนั้นในการทดลองจะใช้เครื่องล้างอัลทราโซนิกส์เพื่อทำให้โมลกุลของ PCDA เกิดการจัดเรียงตัวกันได้เอง ซึ่งจะให้สารละลายที่ไม่มีสี จากนั้นนำไปฉายรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะเกิดการสังเคราะห์ให้ได้สารพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีสีน้ำเงินเกิดขึ้น (Potisatityuenyong *et al*., 2006, 2008)

4.3 การจัดเรียงตัวของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

โครงสร้างแบบเวสิเคิลเกิดจากการจัดเรียงตัวของฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นสองชั้น (bilayer membrane) แล้วเกิดการม้วนตัวเป็นถุงทรงกลมโอบอุ้มน้ำไว้ภายใน จึงเรียกว่า เวสิเคิลหรือไลโพโซม (Alberts *et al.*, 1994) ซึ่งลักษณะของฟอสโฟไลปิดจะประกอบด้วยส่วนหัวที่มีขั้ว (hydrophilic head) จึงเข้ากันได้กับน้ำที่จัดเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วเช่นกัน และมีส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) ซึ่งเข้ากันไม่ได้กับน้ำ (ภาพที่ 26) ฉะนั้นจึงเรียกสารที่มีลักษณะโมเลกุลทั้ง 2 แบบ คือ มีขั้วและไม่มีขั้วอยู่ในตัวมันเองว่า โมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) หรือแอมฟิไฟล์ (amphiphile) สารกลุ่มนี้มีสมบัติที่เข้ากันได้กับน้ำและน้ำมันในระดับหนึ่ง แสดงว่าสามารถลดแรงตึงผิวของน้ำและน้ำมันได้ จึงเรียกสารกลุ่มนี้ว่า สารลดแรงตึงผิว (surfactant หรือ surface active agent) เมื่อโมเลกุลแอมฟิฟิลิกจำนวนมากอยู่ในน้ำ โมเลกุลทั้งหลายเหล่านั้นจะเข้าจัดเรียงรวมตัวกันเองโดยอัตโนมัติด้วยวิธีจัดเรียงตัวเอง (self-assembly) โดยโมเลกุลเหล่านั้นจะหันเอาส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากันโดยอัตโนมัติ และหันเอาส่วนหัวที่ชอบน้ำออกเข้าสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(supramolecular structure) ที่สามารถคงตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำได้ โดยไม่แยกชั้นออกมาเหมือนเช่นการนำน้ำและน้ำมันมารวมกัน แต่ก็ไม่ละลายได้อย่างอิสระเหมือนการละลายเกลือในน้ำ



ภาพที่ 26 ลักษณะการจัดเรียงตัวของฟอสโฟไลปิด ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว (ก) และลักษณะของไลโพโซม (ข)

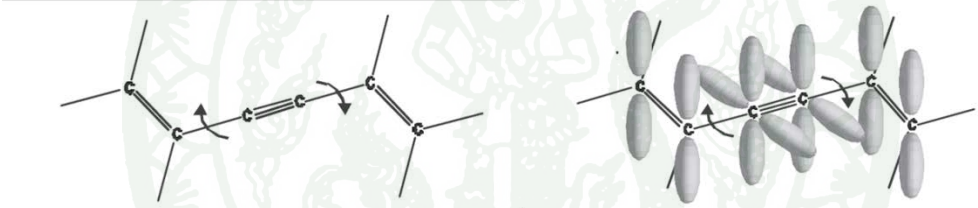
ที่มา: ปริญญา (2536)

รูปร่างของโครงสร้างที่เกิดใหม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลแอมฟิฟิลิกนั้น เช่น อาจรวมตัวเป็นไมเซลล์ (micelle) ทรงกลมหรือทรงกระบอก หรือแผ่นสองชั้น (bilayer membrane) อย่างเช่น ในกรณีของฟอสโฟไลปิด เป็นต้น และ แม้ว่าจะมีผู้พยายามใช้ลักษณะทางเรขาคณิตของโมเลกุล เช่น พื้นที่ผิวของส่วนหัวที่มีขั้ว ความยาวและปริมาตรของส่วนหางที่ไม่มีขั้ว ในการคำนวณ เพื่อพยากรณ์ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมฟิฟิลิกแต่ละชนิดก็ตาม (Israelachvili, 1991) ก็ยังมีปัจจัยอันซับซ้อนอื่นๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุล อันได้แก่ อันตรกิริยาต่างๆ ระหว่างโมเลกุลแอมฟิฟิลิกเอง รวมถึงอันตรกิริยาที่มันมีต่อโมเลกุลของตัวกลางอย่างน้ำที่มันกระจายอยู่ด้วย เช่น แรงพันธะไฮโดรเจน แรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waals forces) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 สมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

พอลิไดอะเซทิลีนมีสมบัติพิเศษด้านการเปลี่ยนสี โดยสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความคลื่น 620 ถึง 640 นาโนเมตร ไปเป็นสีแดงซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร (Jonas *et al.*, 1999; Carpick *et al.*, 2000, 2004; Lee *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Schott, 2006) เมื่อได้รับการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ เช่น ความร้อน และความเป็นกรด-เบส และตัวทำละลายอินทรีย์ (Jiang *et al.*, 2010) เป็นต้น โดยการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม ที่อยู่ระหว่างพันธะคู่และสามของสายโซ่หลัก ทำให้โครงสร้างสายโซ่หลักเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวจากที่อยู่ในแนวระนาบมาเป็นไม่อยู่ในแนวระนาบ ซึ่งส่งผลให้ความยาวของพันธะสามระหว่างอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม ที่เชื่อมกันอยู่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม พอลิไดอะเซทิลีนจึงเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดง (Carpick *et al.*, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ลักษณะหมุนของอะตอมภายในสายโซ่หลักของพอลิไดอะเซทิลีน

ที่มา: Carpick *et al.* (2004)

ดังนั้นเพื่อง่ายต่อการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงสี จึงมีการให้คำจำกัดความของการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในการเปลี่ยนสีหรือการตอบสนองสี (colorimetric response, CR) เป็นร้อยละการเปลี่ยนแปลงของรูปสีน้ำเงินไปเป็นรูปสีแดง ซึ่งสามารถหาสัมพันธ์ได้จากสมการที่ 7 และ 8

$$\%CR = \frac{\left(PB_0 - PB_1\right)}{PB_0} \times 100 \tag{7}$$

$$\%PB = \frac{A_{\text{blue}}}{\left(A_{\text{blue}} + A_{\text{red}}\right)} \times 100 \tag{8}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ PB_1 คือ ร้อยละสีน้ำเงินสิ้นสุด หลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

PB_0 คือ ร้อยละสีน้ำเงินเริ่มต้น

A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน

A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง

4.5 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

4.5.1 ความร้อน

การเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของพอลิไดอะเซทิลีนโดยส่วนมากมักจะเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ เมื่อพอลิไดอะเซทิลีนได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะมีการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลออกและทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวที่มีขั้วเกิดการแตกออก ส่งผลให้ออร์บิทัลพีที่สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกตบิดตัว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง (Ahn *et al.*, 2009)

4.5.2 ความเป็นกรด-เบส

กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อมีการเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส เกี่ยวข้องกับการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่หมู่คาร์บอกซิล (Kew and Hall, 2006) จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-COO^-$) ที่อยู่ติดกัน จึงส่งผลให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของหมู่โซ่ข้าง นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงรูปของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต ทำให้เกิดการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสั้นลง จึงปรากฏให้เห็นเป็นสารละลายสีแดงขึ้น

4.5.3 ตัวทำละลาย

การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากตัวทำละลายจะมีกลไกการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกับเมื่อได้รับการรบกวนจากความเป็นเบส (Potisatityuenyong *et al.*, 2008) โดยพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวทำละลายที่ผิวร่วมเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกออก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ซิลิคอนไดออกไซด์

ซิลิคอนไดออกไซด์ หรือเป็นที่รู้จักในชื่อซิลิกา เป็นสารประกอบระหว่างออกไซด์และซิลิคอน เขียนสูตรทางเคมีได้คือ SiO_2 ซิลิคอนเป็นธาตุเบาที่มีสมบัติกึ่งโลหะ ตามปกติในธรรมชาติพบว่าซิลิคอนจะรวมกับออกซิเจนและอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นซิลิเกต (silicates) พบได้ในชั้นเปลือกโลกมากกว่าร้อยละ 26 และซิลิกาก็เป็นซิลิเกตชนิดหนึ่งแต่มีเพียงอะตอมของซิลิคอนและออกซิเจนเป็นส่วนประกอบเท่านั้น มักพบได้ทั่วไปในธรรมชาติอาจในรูปของทรายหรือควอตซ์ และยังเป็นสารประกอบที่มีจำนวนมากบนเปลือกโลกอีกด้วย (เบญจพร, 2547) ในปัจจุบันซิลิกาได้นำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตที่หลากหลาย เช่น แก้ว คริสตัล เจล แอโรเจล เป็นต้น และใช้เป็นวัสดุเบื้องต้นในการผลิตกระจก ขวดแก้ว และเส้นใยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคม เป็นต้น ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นผลึกโควาเลนซ์ขนาดใหญ่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างอะตอมแบบโครงผลึกร่างตาข่าย 3 มิติ อะตอมของซิลิคอนจัดเรียงตัวเหมือนกับคาร์บอนในผลึกเพชร แต่มีออกซิเจนคั่นอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอนแต่ละคู่ (ภาพที่ 28) ผลึกซิลิคอนไดออกไซด์จึงมีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูงถึง 1730 องศาเซลเซียส เนื่องจากในโครงสร้างมีพันธะโควาเลนซ์อยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนที่ไม่มีโครงผลึกเรียกว่า ซิลิกาเจล (เป็นเม็ดแข็งๆ ใสๆ คล้ายเม็ดทราย ดูดความชื้นได้ดี)



ภาพที่ 28 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์

ที่มา: นิรนาม (2554)

ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกร่างตาข่ายดังกล่าว ไม่สามารถเกิดการสร้างหรือสลายพันธะได้เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่อยู่ในรูปที่เสถียรมาก ฉะนั้นการนำเอาซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกามาใช้งานร่วมกับวัสดุตัวอื่นจะอยู่ในรูปของซิลิกาฟูม (silica fume) หรือไมโครซิลิกา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(microsilica) หรือซิลิกาฟูมควบแน่น (condensed silica fume) แทน โดยมีสูตรทางเคมีเช่นเดียวกับซิลิคอนไดออกไซด์ก็คือ SiO_2 แต่โครงสร้างของซิลิกาฟูมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมีซิลิคอนไดออกไซด์ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์อื่นๆ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) เป็นต้น ร้อยละ1 หรือ 2 ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป (ชัย, 2542)

การเตรียมซิลิกาฟูมเกิดเนื่องจากเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตโลหะซิลิคอนและเฟอโรซิลิคอนอัลลอย (ferrosilicon alloy) ซึ่งเป็นกระบวนการลดออกซิเจนที่ประกอบรวมอยู่ในของแร่ควอตซ์ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิคอน โดยวิธีการหลอมด้วยไฟฟ้า (electric arc) ด้วยเตาหลอมไฟฟ้า โดยให้กระแสไฟผ่านไปยังอิเล็กโทรดที่ทำจากแท่งคาร์บอน และมีถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง และให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ในระหว่างขั้นตอนนี้อาจเกิดซิลิคอนออกไซด์ (SiO) ซึ่งเป็นสารพิษอันตราย จึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิด โดยสามารถทำได้ด้วยการเติมคาร์บอนดึงอะตอมออกซิเจนออกเหลือเพียงซิลิคอน และในบางครั้งอาจเกิดไอ (fume) ของซิลิคอนออกไซด์หลุดลอดออกจากเตาถลุง จากนั้นเกิดออกซิไดซ์กับอากาศภายนอกและควบแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (glassy phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุง ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปฝุ่นละเอียดนี้ถูกเรียกว่าซิลิกาฟูมหรือฟูมซิลิกา (fume silica) ซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพของคนงานหากสูดหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดโรคซิลิโคซิสที่เป็นอันตรายต่อปอด โดยทั่วไปซิลิกาฟูมจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเตรียมโดยวิธีการดูดซับไนโตรเจน (nitrogen absorption) ขนาดของซิลิกาฟูมนี้เป็นขนาดที่เล็กมาก กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟูมที่เล็กมากจึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงทำให้ซิลิกาฟูมเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยากับวัสดุตัวอื่นได้เร็วมาก เช่น การเกิดปฏิกิริยากับปอซโซลานเมื่อใช้เตรียมคอนกรีตในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น (ชัย, 2542)

ในปัจจุบันนี้ ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างซิลิกาด้วยนาโนเทคโนโลยี เพื่อให้มีการจัดเรียงโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบซึ่งจะประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างตามต้องการได้ ทำให้ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโน (อยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 นาโนเมตร) หรือเรียกอีกอย่างว่าอนุภาคนาโนซิลิกา จะมีสมบัติเฉพาะตัวและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน มีรูพรุนขนาดนาโนเมตรตามที่ต้องการ นิยมถูกนำมาพัฒนาใช้ใน

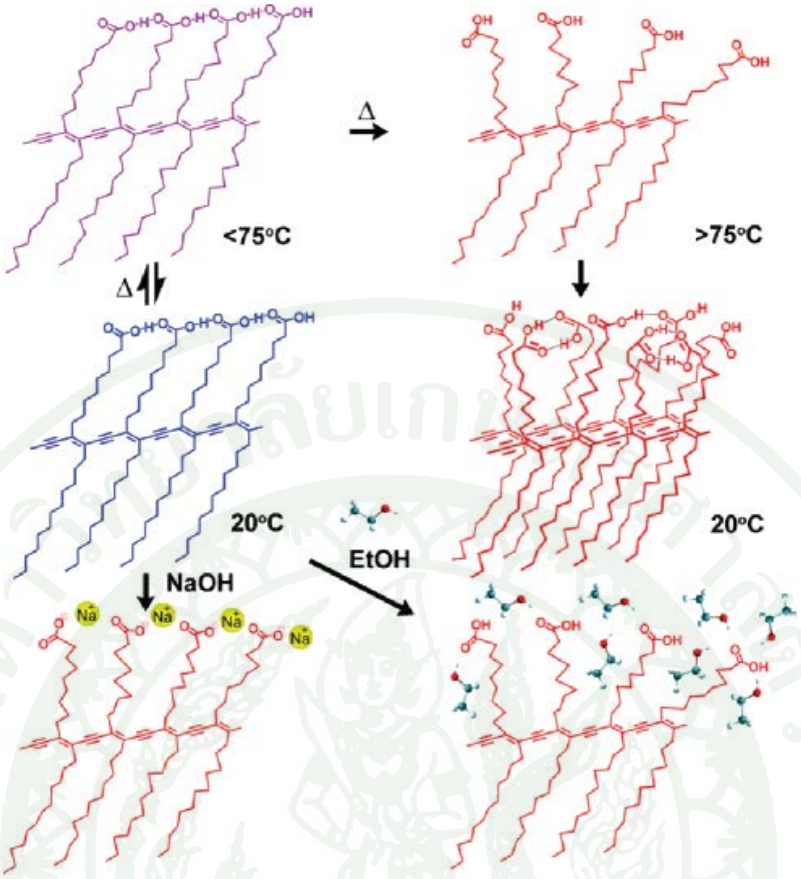
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆมากมาย เช่น ใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ยาง (เช่น ถุงมือยางที่ใช้ป้องกันสารเคมี (Das and Kapgate, 2012) หรือยางธรรมชาติที่ถูกปรับปรุงเพื่อทนความร้อนและน้ำมันได้ดี ซึ่งเรียกอีกอย่างว่ายางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) (Jarnthong *et al.*, 2010; Hamzah *et al.*, 2012)) ใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง (Park *et al.*, 2013) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในด้านทันตกรรม (เช่น วัสดุขัดชั้นเคลือบฟันป้องกันฟันผุโดยการทำให้ผิวฟันเรียบ ป้องกันการเกาะของแบคทีเรีย (Gaikwad and Sokolov, 2008)) ใช้เติมในสีเพื่อเพิ่มความเหนียวข้น (Mathe, 2010; Gupta *et al.*, 2011) รวมไปถึงในอุตสาหกรรมด้านอิเล็กโทรนิก (Meier *et al.*, 2007) เป็นต้น เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกา มีสมบัติที่แข็งแรง มีความเป็นรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำอีกด้วย

6. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Potisatityuenyong *et al.* (2008) ได้ศึกษากลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลโดยพิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสสิเคิลจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ และตัวทำละลาย ด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่า ผลการวัดการดูดกลืนแสงแสดงถึงความแตกต่างของกลไกการเปลี่ยนสีระหว่างการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ และการกระตุ้นด้วยตัวทำละลาย การเปลี่ยนสีโดยอุณหภูมิมีสองกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการที่ผันกลับได้จากการเปลี่ยนแปลงคอนฟอร์มเมชันของสายโซ่เมทิลีนและขบวนการที่ผันกลับไม่ได้จากการสลายพันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิลิกที่ปลายสายโซ่ ขบวนการที่ผันกลับได้แสดงการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงในช่วงอุณหภูมิ 20-70 องศาเซลเซียส แต่ขบวนการที่ผันกลับไม่ได้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระบวนการเปลี่ยนสีโดยตัวทำละลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาอยู่ 2 ชนิด คือ เอทิลแอลกอฮอล์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีโครงสร้างยาวกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่ปลายสายโซ่บริเวณพื้นผิวเพียงกลไกเดียว และในกรณีโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็เช่นกัน แต่จะเกิดพันธะไอออนิกระหว่างโซเดียมไอออนกับออกซิเจนไอออนด้วย ฉะนั้น ตัวทำละลายทั้งสองสามารถทำให้โครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง (ภาพที่ 29)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

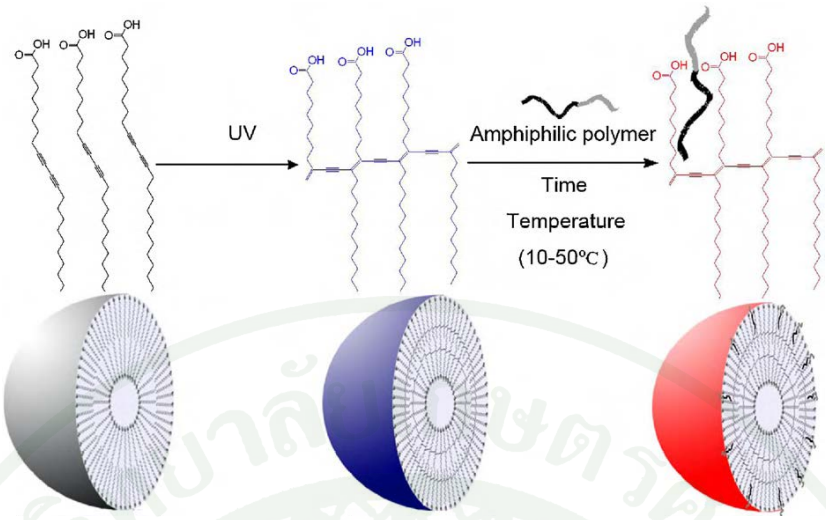


ภาพที่ 29 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่ต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

ที่มา: Potisatityuenyong *et al.* (2008)

Gou *et al.* (2010) ได้ศึกษาการพัฒนาตัวเซ็นเซอร์ฐานพอลิไดอะเซทิลีนและแอมฟิฟิลิกขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ โดยตัวเซ็นเซอร์นี้จะมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ โดยสารแอมฟิฟิลิกจะมีทั้งส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งส่วนที่ไม่มีขั้วของสารแอมฟิฟิลิกจะแทรกเข้าไปอยู่ที่ผิวของพอลิไดอะเซทิลีนในด้านที่ไม่มีขั้ว (ภาพที่ 30) อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และสมบัติของแอมฟิฟิลิก อันได้แก่ ความเข้มข้น มวลโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุล ความไม่มีขั้ว และสมบัติความไวต่ออุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เลือกพลูโรนิค (pluronic) เป็นสารแอมฟิฟิลิกที่มีมวลโมเลกุลแตกต่างกันซึ่งอยู่ในรูปพอลิเอทิลีนไกลคอล-พอลิโพรพิลีนไกลคอล-พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol)-poly(propylene glycol)-poly(ethylene glycol), PEG-PPG-PEG) ได้แก่ Pluronic F127 (PEG_{99}-PPG_{67}-PEG_{99}) มีน้ำหนักโมเลกุล 12,700 Pluronic F68 (PEG_{76}-PPG_{29}-PEG_{76}) น้ำหนักโมเลกุล 8,400 และ Pluronic L35 (PEG_{11}-PPG_{16}-PEG_{11}) มีน้ำหนักโมเลกุล 1,900

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 กลไกการเปลี่ยนโครงสร้างที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน เมื่อเกิดการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและการเติมสารแอมฟิฟิลิก

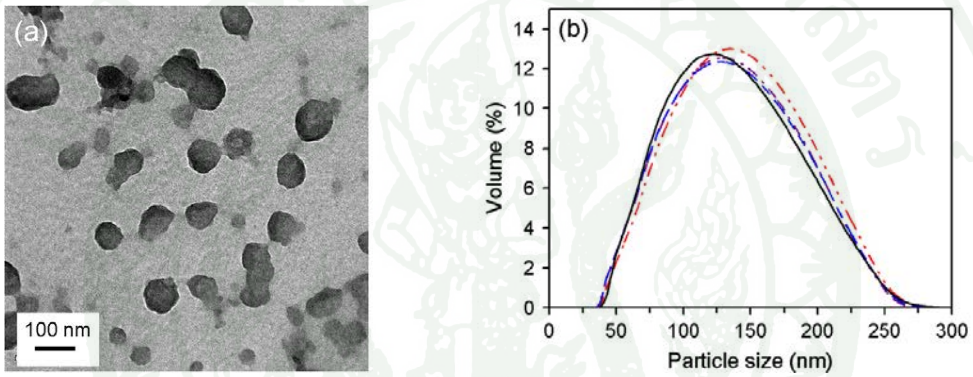
ที่มา: Gou *et al*. (2010)

ข้อดีสำหรับการเติมสารแอมฟิฟิลิกลงไป คือ สารแอมฟิฟิลิกสามารถเป็นได้ทั้งสารลดแรงตึงผิวและพลาสติกไซเซอร์ โดยสารแอมฟิฟิลิกจะช่วยลดอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเปลี่ยนสีลง ทำให้พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เร็วขึ้น โดยปกติแล้ว พอลิไดอะเซทิลีนจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีถ้ามีอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซสเซียส นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของสารแอมฟิฟิลิกก็มีผลต่อการเปลี่ยนสี โดยสามารถอธิบายได้จากผลการทดลองดังนี้ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10-50 องศาเซสเซียส จะพบว่า F127 จะให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนที่สุด เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด จึงสามารถลดอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเปลี่ยนสีได้มากสุด เมื่อเทียบกับ F68 และ L35 และในทางตรงกันข้าม ถ้าเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล น้ำหักโมเลกุล 4000 (PEG-4000) ซึ่งเป็น hydrophilic เข้าไปแทนสารแอมฟิฟิลิก พบว่า สีของพอลิไดอะเซทิลีนยังคงเป็นสีน้ำเงินอยู่ แม้จะตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานถึง 5 วัน ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนสีของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีน/แอมฟิฟิลิก เป็นแบบไม่ผันกลับ และสารละลายพอลิไดอะเซทิลีน/แอมฟิฟิลิก สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในช่วง 10-50 องศาเซลเซียส ฉะนั้นจึงสามารถที่จะพัฒนาไปใช้เป็นตัวเซนเซอร์ตรวจติดตามเวลาและอุณหภูมิได้

Traiphol *et al.* (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เมื่อเติมลงในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ซึ่งเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า พอลิไดอะเซทิลีนแสดงสมบัติการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เปลี่ยนสีโดยขึ้นกับความสามารถในการจัดเรียงตัวได้เองของโมเลกุลไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์มีหลากหลายรูปแบบ ซึ่ง PCDA เป็นหนึ่งในไดอะเซทิลีนลิปิดที่ใช้กันทั่วไปและเป็นลิปิดที่ได้รับความนิยม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบภายในโมเลกุล พบว่า เมื่อส่องดูด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ จะเกิดการแทรกตัวเข้าไปในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล โดยจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างผิวอนุภาคนาโนกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ขนาดอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้อยู่ระหว่าง 20 ถึง 200 นาโนเมตร และการวิเคราะห์การแจกแจงของขนาดอนุภาคด้วยรังสีเลเซอร์ พบว่า ขนาดพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการแทรกตัวของอนุภาคนาโน จะอยู่ระหว่าง 40 ถึง 270 นาโนเมตร (ภาพที่ 31)



(ก) (ข)

ภาพที่ 31 อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค TEM (ก) และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทั้งพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์และพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการแทรกตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เข้มข้นแตกต่างกันคือ ร้อยละ 0 (–), 5 (– –), 9 (– · –) และ 17 (– ·· –) โดยน้ำหนัก (ข)

ที่มา: Traiphol *et al.* (2011)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 ผงพลาสติกชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVOH) จากบริษัท JVP (JAPAN VAM & POVAL CO., LTD) ประเทศญี่ปุ่น

1.2 ฟิล์มสติกเกอร์ชนิดพอลิโพรไพลีน (polypropylene, PP) สีขาวมุก ซึ่งมีความหนา 127 ไมโครเมตร จากบริษัท ยูพีเอ็ม ราฟลาแทค จำกัด

1.3 เนื้ออกไก่ลอกหนังสดแช่เย็น จากบริษัทเบทาโกร จำกัด (มหาชน)

1.4 ถุงไนลอน (nylon) ลามิเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เป็นเส้นตรง (linear low density polyethylene, LLDPE) ซึ่งมีความหนา 80 ไมโครเมตร

2. สารเคมี

2.1 10,12-เพนตะโคสะไดอายน์โนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid, PCDA) จาก Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2 อนุภาคนาโนซิลิกา ชื่อทางการค้า คือ Aerosil®200 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ประเทศไทย

2.3 เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 99 (ethyl alcohol, CH_2OH) จาก Merck ประเทศเยอรมัน

2.4 พลูโรนิก เอฟ127 (pluronic® F127) จาก Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.5 คลอโรฟอร์ม (chloroform, $CHCl_3$) จาก Lab-Scan ประเทศไปแลนด์

2.6 พอลิเอทิลีนไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 400 (poly(ethylene glycol-400), PEG-400) จากสยามเคมีคอลอินดัสตรี้ ประเทศไทย

2.7 กลีเซอรอล (glycerol, $C_3H_8O_3$) จาก Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

2.8 ซอร์บิทอล (sorbitol, $C_6H_{14}O_6$) จาก Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

2.9 ไซลิทอล (xylitol, $C_5H_{12}O_5$) จาก Fluka BioChemika ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

2.10 น้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI water)

2.11 น้ำกลั่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. เครื่องมือ

3.1 เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) ยี่ห้อ Buchi รุ่น R-205 V-800 B-490 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2 เครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2450 ประเทศญี่ปุ่น

3.3 เครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ (Ultrasonic Cleaner) ยี่ห้อ CREST รุ่น 275 DAE ประเทศมาเลเซีย

3.4 เครื่องตรวจวิเคราะห์อนุภาคนาโน (Nanoparticle Analyzer) ยี่ห้อ Horiba Scientific รุ่น SZ-100 ประเทศญี่ปุ่น

3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น TECNAI T20/G^2 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5600LV ประเทศญี่ปุ่น

3.7 เครื่องทำแห้งภายใต้ความเย็นและสุญญากาศ (Freeze Dryer) ยี่ห้อ SCANVAC รุ่น CoolSafe™ (CS-110) ประเทศเดนมาร์ก

3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ประเทศเยอรมัน

3.9 เครื่องวัดสี (Chroma Meter) ยี่ห้อ Minolta รุ่น CR-400 ประเทศญี่ปุ่น

3.10 เครื่องวัดแก๊ส (Pac Check) ยี่ห้อ Mocon รุ่น 650 EC ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.11 เครื่องวัดความหนา (Digimatic Thickness Gage) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น ID-C112BS ประเทศญี่ปุ่น

3.12 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7 ประเทศเยอรมัน

3.13 ตู้ดูดไอสารเคมี (Fume Cupboard) ยี่ห้อ MAJOR PRODUCTS รุ่น SUPER FLOW ประเทศไทย

3.14 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ยี่ห้อ Accuplus รุ่น i250-S ประเทศไทย

3.15 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่า (Incubator Shaker) ยี่ห้อ New Brunswick รุ่น INNOVA 42R ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.16 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED53/E2 ประเทศเยอรมัน

3.17 ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar Flow) ยี่ห้อ Heal Force รุ่น HFsafe-1500C สาธารณรัฐประชาชนจีน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.18 เครื่องผสม (Vortex Mixer) ยี่ห้อ CT Laboratory รุ่น CTL 107 ประเทศแคนาดา

3.19 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ยี่ห้อ Memmert รุ่น WB 14 ประเทศเยอรมัน

3.20 เครื่องชั่งดิจิตอล (Precision Balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer (PA4102) ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.21 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Precision Balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S ประเทศเยอรมัน

3.22 ตู้เย็น (Refrigerator) ชนิด 2 ประตู ยี่ห้อ Sanyo รุ่น SR-F272 ประเทศไทย

3.23 ไมโครปิเปตต์ (micropipette) ยี่ห้อ Gilson ประเทศฝรั่งเศส

3.24 กระบอกฉีดยาปราศจากเชื้อชนิดใช้ครั้งเดียวทิ้ง (disposable syringe) ขนาด 1 มิลลิลิตร ยี่ห้อ NIPRO ประเทศไทย

3.25 ตัวกรองเข็มฉีดยาไนลอน (nylon syringe filter) ขนาดรู 0.45 ไมโครเมตร

3.26 จานเพาะเชื้อ (petridish) ประเภทแก้ว ขนาด 90x14 มิลลิเมตร

3.27 คิวเวตต์ที่ทำจากควอตซ์ (quartz cuvette)

3.28 เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการ

1. การศึกษาวิธีการเตรียมต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับสารแอมฟิฟิลิก และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

1.1 ผลของความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกต่อการเปลี่ยนสี

1.1.1 การเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

นำสาร PCDA มาละลายด้วยคลอโรฟอร์ม ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายในขวดก้นกลม จากนั้นนำต่อเข้าเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (rotating evaporator) เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกไป โดยมีการตั้งค่าการหมุนเป็น 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส ความดันในระหว่างการกลั่นเป็น 100 มิลลิบาร์ อุณหภูมิน้ำในหม้อต้มคืออุณหภูมิห้อง และใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที เมื่อเครื่องเริ่มทำงาน ตัวทำละลายจะค่อยๆ ระเหยเป็นไอ จนกระทั่งสังเกตเห็นชั้นลิปิดบางที่แยกชั้นบนผิวหน้าของสารละลาย จึงหยุดการทำงานของ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เครื่อง แล้วจากนั้นนำมาเติมน้ำปราศจากไอออนเพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายให้เป็น 1 มิลลิโมลาร์ แล้ววางสารละลายไว้ในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ เพื่อกำจัดประจุที่อยู่ในสารละลาย โดยตั้งอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำสารละลายออกมาพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในตู้เย็น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเร่งให้เกิดการสร้างผลึกในลิพิดเมมเบรน (lipid membrane) หลังจากนั้นนำสารละลายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาฉายแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้มีการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) จนได้สารละลายเป็นสีน้ำเงินเข้ม เรียกสารละลายนี้ว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล สิ่งสำคัญนั้นจะต้องเก็บสารละลายที่ได้ไว้ในตู้เย็นก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง

1.1.2 การเตรียมสารแอมฟิฟิลิกในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

นำสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.1.1) ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร มาผสมกับสารแอมฟิฟิลิก ปริมาณ 0.9 มิลลิลิตร โดยสารแอมฟิฟิลิกที่เลือกใช้ คือ ส่วนผสมระหว่างพลูโรนิก เอฟ 127 ซึ่งปรับความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ PEG-400 จากนั้นนำไปวางไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิคงที่ไว้ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนสีที่ได้

1.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับสารแอมฟิฟิลิก

นำสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.1.2) มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณเป็นค่าร้อยละของการตอบสนองสี โดยใช้สมการที่ 7 และ 8 ที่ได้กล่าวไปข้างต้นในการคำนวณ และพลอตกราฟระหว่างค่าร้อยละของการตอบสนองสีกับเวลา ที่อุณหภูมิการเก็บคงที่ต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ผลของการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาต่อการเปลี่ยนสี

1.2.1 การเตรียมสารแขวนลอยซิลิกา

ชั่งน้ำหนักของผงซิลิกาให้เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปไว้ในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ จนกระทั่งมองเห็นว่าผงซิลิกาไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน แสดงว่าเกิดการกระจายตัวที่ดี

1.2.2 การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

ภายหลังการสกัด PCDA ด้วยคลอโรฟอร์มในขวดก้นกลมแล้ว ให้เทสารแขวนลอยซิลิกา (จากข้อ 1.2.1) ลงไป จากนั้นนำขวดก้นกลมมาวางในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ เพื่อให้สารทั้งสองเกิดการรวมตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี โดยตั้งอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำสารละลายออกมาพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในตู้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาฉายแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้มีการเกิดพอลิเมอร์จนได้สารละลายเป็นสีน้ำเงินเข้ม

1.2.3 การเตรียมสารแอมฟีฟิลิกในสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

เหมือนข้อ 1.1.2 แต่ใช้สารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.2.2) แทนสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.1.1)

1.2.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมสารแอมฟีฟิลิก

เหมือนข้อ 1.1.3 แต่ใช้สารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.2.3) แทนสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.1.2)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3 ผลของอุณหภูมิการเก็บต่อสมบัติการเปลี่ยนสีและการศึกษาทางจลนพลศาสตร์

1.3.1 การเตรียมสารแอมฟีฟิลิกในสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

นำสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.2.2) ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร มาผสมกับสารแอมฟีฟิลิก ปริมาณ 0.9 มิลลิลิตร โดยสารแอมฟีฟิลิกที่เลือกใช้ คือ ส่วนผสมระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 ที่มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ PEG-400 จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ โดยจะกำหนดอุณหภูมิในการเก็บแบบคงที่และไม่คงที่ ในกรณีอุณหภูมิการเก็บคงที่ จะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 24 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ในกรณีอุณหภูมิการเก็บไม่คงที่จะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 มีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 ไปเป็น 45 องศาเซลเซียส ทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง โดยจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และรูปแบบที่ 2 มีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 ไปเป็น 45 องศาเซลเซียส ทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 3 ชั่วโมง โดยจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนสีที่ได้แล้วเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา

1.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมสารแอมฟีฟิลิก

นำสารละลายที่ได้ (จากข้อ 1.3.1) ทั้งอุณหภูมิในการเก็บแบบคงที่และไม่คงที่มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณเป็นค่าร้อยละของการตอบสนองสี โดยใช้สมการที่ 7 และ 8 ที่ได้กล่าวไปข้างต้นในการคำนวณ และพลอตกราฟระหว่างค่าร้อยละการตอบสนองของสีกับเวลา ทั้งอุณหภูมิในการเก็บแบบคงที่และไม่คงที่

1.3.3 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1.3.2 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KyPlot เวอร์ชัน 2.0 เพื่อปรับกราฟที่พลอตระหว่างค่าร้อยละของการตอบสนองสีกับเวลา ที่อุณหภูมิการเก็บคงที่ต่างๆ ให้อยู่ในรูปกราฟที่พลอตระหว่างฟังก์ชันการตอบสนองของตัวชี้วัด ($F(X)$) กับเวลา ซึ่งมีลักษณะกราฟ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็นเส้นตรง ทำให้สามารถหาค่าความชันหรือค่าคงที่ (rate constant, k) จากสมการที่ 9 ได้ (Taoukis and Labuza, 1989) จากนั้นพลอตกราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของ k ในแต่ละอุณหภูมิ ($\log k$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ โดยต้องแปลงหน่วยของอุณหภูมิจากองศาเซลเซียสเป็นเคลวิน (Kelvin, K) ก่อน จากสมการอาร์รีเนียส (สมการที่ 10) สามารถจัดรูปใหม่เป็นสมการที่ 11 ฉะนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่า E_a ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาและเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา

$$F(X) = kt \tag{9}$$

โดยที่ $F(X)$ คือ ฟังก์ชันการตอบสนองของตัวชี้วัด

k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

t คือ เวลาของการเก็บตัวชี้วัด

$$k = A\exp\left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T}\right)\right] \tag{10}$$

$$\log k = \left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T}\right)\right] + \log A \tag{11}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์

A คือ จุดตัดของสมการ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ในกรณีอุณหภูมิการเก็บไม่คงที่ สามารถนำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1.3.2 มาคำนวณหา T_{eff} และ t_r ตามสมการที่ 6 เมื่อกำหนดให้ T_{ref} เป็นอุณหภูมิการเก็บคงที่ค่าหนึ่ง และค่า E_a ได้มาจากการคำนวณจากข้างบน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และสมบัติทางเคมี (chemical properties) ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา กับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

1.4.1 สมบัติทางกายภาพ

ก. ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค

ก่อนที่จะนำสารละลายตัวอย่างเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์อนุภาคนาโนเพื่อศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสงเลเซอร์ (laser light scattering technique) นั้น สารละลายตัวอย่างจะต้องนำไปผ่านเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ เพื่อให้คลื่นความถี่สูงทำให้อนุภาคภายในเกิดการกระจายตัวกันได้ดีและไม่จับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ จากนั้นจึงทำการวัดโดยกำหนดชนิดของคิวเวตต์ ชนิดของตัวทำละลาย และอุณหภูมิในขณะที่วัด ในที่นี้ ตั้งไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำข้อมูลที่ได้มาพลอตกราฟระหว่างร้อยละของปริมาณอนุภาคกับขนาดของอนุภาคในหน่วยนาโนเมตร

ข. โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยว

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและแบบส่องกราด สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะนำสารละลายตัวอย่างหยดลงบนกริดทองแดงแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำตัวอย่างไปส่องเพื่อดูขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาค ส่วนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะนำสารละลายตัวอย่างหยดลงบนไมกาเวเฟอร์ (mica wafer) ที่ติดไว้บนแท่ง stub จากนั้นนำไปเคลือบด้วยผงคาร์บอน แล้วนำตัวอย่างไปส่องเพื่อดูขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค. การดูดกลืนแสง

ศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยดูดสารละลายตัวอย่างลงในคิวเวตต์ชนิดควอตซ์ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น blank

1.4.2 สมบัติทางเคมี

นำสารละลายตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง อุณหภูมิประมาณ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำไปไว้ในกระบอกแก้วแล้วต่อเข้าเครื่องทำแห้งภายใต้ความเย็นและสุญญากาศ ซึ่งอาศัยหลักการแช่แข็งและระเหิดเอาน้ำออกจากตัวอย่าง ซึ่งเครื่องสามารถทำความเย็นได้ที่อุณหภูมิ -110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้จนกระทั่งน้ำแข็งเกิดการระเหิดออกไปจนหมด เหลือเพียงเฉพาะสารตัวอย่างที่ต้องการ จากนั้นนำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำเงินเข้มมาประมาณ 1-2 มิลลิกรัม มาบดร่วมกับเกลือโพแทสเซียมโบรไมด์ (potassium bromide, KBr) แล้วนำไปอัดเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นใสกลมบาง ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า เทคนิคโพแทสเซียมโบรไมด์เพลเลท (KBr-pellet technique) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง โดยใช้โหมดทดสอบแบบ TR ในช่วงเลขคลื่น (wave number) เท่ากับ 4000-400 เซนติเมตร$^{-1}$ อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นการพลอตระหว่างร้อยละการส่งผ่าน (%transmission, %T) กับเลขคลื่น

2. การศึกษาวิธีการเตรียมต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของฟิล์มของพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

2.1 การเตรียมฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

2.1.1 การเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

ชั่งสาร PCDA มา 0.0152 กรัม ละลายในเอทานอลปริมาณ 4 มิลลิลิตร จากนั้นวางสารละลายไว้ในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำให้ PCDA เกิดการละลายได้ดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในเอทานอล แล้วดูดสารละลายที่ได้ด้วยกระบอกฉีด ขนาด 1 มิลลิลิตร และฉีดผ่านตัวกรองเข็มฉีดยาไนลอน ที่มีขนาดรู 0.45 ไมโครเมตร เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกไป จะได้สารละลายที่ใส จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 20 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นนำมาวางไว้ในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ พร้อมตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ หยดสารละลายใสที่ได้ลงในน้ำปราศจากไอออน โดยคลื่นความถี่สูงและความร้อนจะช่วยให้ PCDA สามารถเกิดการแขวนลอยได้ดีในน้ำและกำจัดเอทานอลให้ระเหยออกไปได้ ภายหลังการหยดสารละลายใสจนหมด สารละลายที่ได้ในบีกเกอร์จะมีลักษณะสีขาวขุ่น ให้เติมน้ำปราศจากไอออนลงไปเพื่อปรับปริมาตรทั้งหมดเป็น 20 มิลลิลิตร ซึ่งถือว่ามีความเข้มข้นเป็น 2 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำสารละลายออกมาพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในตู้เย็น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเร่งให้เกิดการสร้างผลึกในลิพิดเมมเบรน (lipid membrane) หลังจากนั้นนำสารละลายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาฉายแสงยูวี เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้มีการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) จะได้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่เป็นสารละลายสีน้ำเงินเข้ม สิ่งสำคัญนั้นจะต้องเก็บสารละลายที่ได้ไว้ในตู้เย็นก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง (โดยปกติ ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ จะใช้ PCDA 0.0076 กรัม)

2.1.2 การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

ก. การเตรียมสารแขวนลอยซิลิกา

ชั่งน้ำหนักของผงซิลิกาให้เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 20 มิลลิลิตร แล้วนำไปไว้ในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ จนกระทั่งมองเห็นว่าผงซิลิกาไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน แสดงว่าเกิดการกระจายตัวที่ดี

ข. การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ

ภายหลังการสกัด PCDA ด้วยเอทานอลและการกรองผ่านตัวกรองเข็มฉีดยาไนลอนแล้ว นำสารแขวนลอยซิลิกา (จากข้อ 2.1.2 ก.) วางในเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ พร้อมตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆ หยดสารละลายใสที่ได้ลงในสารแขวนลอยซิลิกา โดยคลื่นความถี่สูงและความร้อนจะช่วยให้ PCDA และอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถเกิดการแขวนลอยได้ดีในน้ำ พร้อมทั้งช่วยกำจัดเอทานอลให้ระเหยออกไปได้อีกด้วย ภายหลังการหยดสารละลายใสจนหมด สารละลายที่ได้ในบีกเกอร์จะมีลักษณะสีขาวขุ่น ให้เติมน้ำปราศจากไอออนลงไปเพื่อปรับปริมาตรทั้งหมดเป็น 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายออกมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไว้ในตู้เย็น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเร่งให้เกิดการสร้างผลึกในลิพิดเมมเบรน (lipid membrane) หลังจากนั้นนำสารละลายออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาฉายแสงยูวี เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้มีการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) จะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม สิ่งสำคัญนั้นจะต้องเก็บสารละลายที่ได้ไว้ในตู้เย็นก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง

2.1.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เลือกใช้ PVOH เป็นสารก่อฟิล์มหรือสารที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่งจะเตรียมสารละลาย PVOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยการชั่งผง PVOH มา 10 กรัม แล้วเติมน้ำปราศจากไอออนลงไป จากนั้นนำไปวางบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมทั้งให้ความร้อนด้วย โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส กวนสารละลายในระดับเหมาะสม ซึ่งไม่แรงจนทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในสารละลาย และกวนไปจนกระทั่งผง PVOH ละลายจนหมด จะได้สารละลายใสไม่มีสีและมีลักษณะหนืดปานกลาง

2.1.4 การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

นำสารละลายสีน้ำเงินเข้ม (ในที่นี้ มี 2 ประเภท ได้แก่ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (จากข้อ 2.1.1) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (จากข้อ 2.1.2)) มาผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (จากข้อ 2.1.3) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จากนั้นนำสารละลายผสมที่ได้มาเทลงในจานเพาะเชื้อประเภทแก้ว แล้วทิ้งไว้ให้แห้งในห้องบ่มควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงลอกออกมาเป็นแผ่นฟิล์มตามที่ต้องการ

2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนกับสารแอมฟิฟิลิก และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา กับฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน โดยศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและแบบส่องกราด สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะนำแผ่นฟิล์มที่ได้ (จากข้อ 2.1.4) มาทำการตรึง (fixation) แล้วนำไปฝังลงในพลาสติกแข็ง ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า plastic embedding technique เพื่อให้มีความแข็งมากพอที่จะสามารถตัดให้ได้บางถึง 0.3-0.6 ไมโครเมตร ชิ้นตัวอย่างที่ตัดแล้วจะถูกช้อนด้วยแผ่นกริดทองแดง แล้วนำตัวอย่างไปส่องเพื่อดูขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาค ส่วนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะนำแผ่นฟิล์มที่ได้ (จากข้อ 2.1.4) มาตัดให้มีขนาดกว้างและยาวประมาณ 0.5 ซม. จากนั้นนำไปติดไว้บนแท่ง stub แล้วนำตัวอย่างไปส่องเพื่อดูขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาค

2.2.2 สมบัติทางเคมี

นำแผ่นฟิล์มที่ได้ (จากข้อ 2.1.4) มาตัดให้มีขนาดกว้างและยาวประมาณ 1.5 ซม. จากนั้นพับทบไปมาเพื่อให้มีจำนวนชั้นมากขึ้นแต่พื้นที่หน้าตัดเล็กลง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง โดยใช้โหมดทดสอบแบบ ATR ในช่วงเลขคลื่น (wave number) เท่ากับ 4000-400 เซนติเมตร$^{-1}$ อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นการพลอตระหว่างร้อยละการส่งผ่าน (%transmission, %T) กับเลขคลื่น

3. การศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการผลิตตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

3.1 ผลของสารแอมฟิฟิลิกต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสี

3.1.1 การเตรียมฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

เตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์ และสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตามข้อ 2.1.1 และข้อ 2.1.2 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1.2 การเตรียมสารแอมฟีฟิลิก

ในขั้นตอนนี้ สารแอมฟีฟิลิก จะประกอบด้วย สารละลายพลูโรนิก เอฟ127 ซึ่งเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ PEG-400 ซึ่งเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยปริมาตร หรือสำหรับการเตรียมฟิล์ม สามารถกล่าวได้ว่า พลูโรนิก เอฟ127 ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) และ PEG-400 ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ (plasticizer)

3.1.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เหมือนกับข้อ 2.1.3 (สารละลาย PVOH เข้มข้นที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.1.4 การเตรียมสารละลายฟิล์มผสม

ส่วนผสมของสารละลายฟิล์ม ประกอบด้วย สารละลายที่มีสีน้ำเงินเข้ม (ในที่นี้มี 2 ประเภท ได้แก่ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา) สารลดแรงตึงผิว พลาสติไซเซอร์ และสารก่อฟิล์ม โดยสามารถเตรียมสารละลายฟิล์มผสมได้จากอัตราส่วนระหว่างสารละลายที่มีสีน้ำเงินเข้ม สารละลายพลูโรนิก เอฟ 127 PEG-400 และสารละลาย PVOH เป็น 1:0.0075:0.0025:1 โดยปริมาตร แต่สำหรับฟิล์มที่ปราศจากการเติมสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์จะใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายที่มีสีน้ำเงินเข้มและสารก่อฟิล์มเป็น 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

3.1.5 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ

การขึ้นรูปฟิล์มอาศัยเทคนิคการหล่อขึ้นเป็นแผ่นฟิล์ม เรียกว่า casting โดยเทสารละลายฟิล์มผสม (จากข้อ 3.1.4) ลงในกรอบอะคริลิกที่วางอยู่บนฟิล์มสติกเกอร์ PP สีขาวมุก และฟิล์มสติกเกอร์ PP สีขาวมุกนี้จะถูกติดไว้บนแผ่นกระจกใสอีกทีหนึ่ง (โดยกรอบอะคริลิกที่ใช้จะมีอยู่ 2 ขนาด คือ ขนาดแรก กว้าง 0.7 ซม. ยาว 4.2 ซม. หนา 0.2 ซม. และ ขนาดที่สอง กว้าง 0.7 ซม. ยาว 7.7 ซม. หนา 0.2 ซม.) ดังแสดงในภาพที่ 32 จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งในห้องบ่มควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวหน้าของฟิล์มเกิดการเซตตัวก่อน แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิต่อที่ 4 องศาเซลเซียส จนครบกำหนด 24 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลังจากนั้นฟิล์มก็จะแห้งและเคลือบติดฟิล์มสติกเกอร์ PP สีขาวมุก แล้วตัดฟิล์มที่ได้ให้มีขนาดกว้าง 1.5 ซม. และยาว 1.5 ซม. เพื่อนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิต่อไป



ภาพที่ 32 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ

3.1.6 การทดสอบความไวต่อการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

นำตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (จากข้อ 2.1.6) มาเก็บไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 90 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนสีและสุ่มวัดค่าสีของตัวชี้วัด การวัดค่าสีจะใช้ระบบ Hunter *L a b* โดยค่า *L* คือ ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) จนถึง 100 (สีขาว) ส่วนค่า *a* คือ ค่าความเป็นสีแดง ซึ่งอธิบายได้ว่าถ้าค่าเป็น (+) จะมีความเป็นสีแดงสูง ถ้าค่าเป็น (-) จะมีความเป็นสีเขียวสูง ส่วนค่า *b* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง ซึ่งอธิบายได้ว่าถ้าค่าเป็น (+) จะมีความเป็นสีเหลืองสูง ถ้าค่าเป็น (-) จะมีความเป็นสีน้ำเงินสูง และคำนวณค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี (total color difference, TCD) ตามสมการของ Hunt (1991) ดังแสดงในสมการที่ 12 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดกับเวลา

$$\mathrm{TCD} = \left[(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 \right]^{1/2} \qquad (12)$$

โดยที่ ΔL คือ ค่าความแตกต่างของความสว่างระหว่างตัวอย่างกับตัวชี้วัดเริ่มต้น

Δa คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีแดงระหว่างตัวอย่างกับตัวชี้วัดเริ่มต้น

Δb คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองระหว่างตัวอย่างกับตัวชี้วัดเริ่มต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 การหาสูตรฟิล์มที่เหมาะสมของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

3.2.1 การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

เตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตามข้อ 2.1.2

3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เหมือนกับข้อ 2.1.3 (สารละลาย PVOH เข้มข้นที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.2.3 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์ม

ก. ชนิดของพลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ที่เลือกใช้มีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล

ข. ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์

เตรียมความเข้มข้นที่ร้อยละ 3 และ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 30 และ 35 ของน้ำหนักผง PVOH ตามลำดับ

ค. อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์

เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายพลูโรนิก เอฟ127 และพลาสติไซเซอร์เป็น 3:7 4:6 และ 5:5 โดยปริมาตร (ในขั้นตอนนี้ จะใช้สารละลายพลูโรนิก เอฟ127 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.4 การเตรียมสารละลายฟิล์มผสม

เหมือนข้อ 3.1.4 ในกรณีที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ แต่เนื่องจากมีปัจจัยต่างๆ (จากข้อ 3.2.3) ที่ต้องนำมาใช้ในการพิจารณาในการเตรียมสูตรฟิล์ม จึงทำให้สามารถเตรียมสูตรสารละลายฟิล์มผสมได้หลายสูตร ซึ่งจะยกตัวอย่างสูตรฟิล์มมาเฉพาะพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 เท่านั้น ในกรณีพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นๆ มีวิธีการกำหนดสูตรฟิล์มเหมือนกัน ดังแสงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สูตรสารละลายฟิล์มผสมทั้งหมด ในกรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400

ชนิดและความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์	อัตราส่วนระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 และพลาสติไซเซอร์	จำนวนสัดส่วนที่ใช้ (ส่วน)				สูตรฟิล์ม*
		สารละลายวัสดุเชิงประกอบ PDA/SiO_2	พลูโรนิก เอฟ127	พลาสติไซเซอร์	สารละลาย PVOH	
PEG-400 (ร้อยละ 3)	3:7	1	0.012	0.028	1	P3-1
	4:6	1	0.016	0.024	1	P3-2
	5:5	1	0.020	0.020	1	P3-3
PEG-400 (ร้อยละ 3.5)	3:7	1	0.012	0.028	1	P3.5-1
	4:6	1	0.016	0.024	1	P3.5-2
	5:5	1	0.020	0.020	1	P3.5-3

หมายเหตุ: * การตั้งชื่อสูตรฟิล์ม สามารถกำหนดได้จากตัวอักษรตัวแรกของชื่อเต็มภาษาอังกฤษต่อมาด้วยจำนวนเลขความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ และปิดท้ายด้วยตัวเลขที่กำหนดให้ 1 = อัตราส่วน 3:7 2 = อัตราส่วน 4:6 และ 3 = อัตราส่วน 5:5 (สำหรับพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นๆ ใช้หลักการตั้งชื่อเหมือนกัน แต่เปลี่ยนเฉพาะตัวอักษรตัวแรก คือ กลีเซอรอลใช้เป็น G ซอร์บิทอลใช้เป็น S และไซลิทอลใช้เป็น X)

3.2.5 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ

เหมือนข้อ 3.1.5 แต่ใช้สารละลายฟิล์มผสมจากข้อ 3.2.4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.6 การทดสอบความไวต่อการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

เหมือนข้อ 3.1.6 แต่ใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจากข้อ 3.2.5 และเก็บไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 65 ชั่วโมง

3.3 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อการเปลี่ยนสี

เมื่อทราบสูตรการเตรียมฟิล์มที่เหมาะสม (จากข้อ 3.2) แล้ว จึงเลือกปรับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาในระดับต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 1 5 10 และ 20 โดยน้ำหนักของ PCDA (แต่สำหรับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ PCDA ถูกเตรียมในข้อ 3.2 แล้ว จึงสามารถนำเอาข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาในระดับอื่นๆ ได้)

3.3.1 การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

เตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 5 และ 20 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตามข้อ 2.1.2 แต่จะใช้ PCDA ในปริมาณมากขึ้น ทำให้มีผลต่อค่าน้ำหนักของผงซิลิกาด้วย

3.3.2 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เหมือนกับข้อ 2.1.3 (สารละลาย PVOH เข้มข้นที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.3.3 การเตรียมสารละลายฟิล์มผสม

ภายหลังที่ทราบถึงชนิดของพลาสติไซเซอร์ ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 และพลาสติไซเซอร์ ที่ทำให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแสดงค่า TCD สูงสุดแล้ว ก็จะได้สูตรฟิล์มที่เหมาะสม (จากข้อ 3.2) จากนั้นนำสูตรฟิล์มที่เหมาะสมนี้มาใช้ในการเตรียมฟิล์ม โดยจะใช้สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโน ซิลิกา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากข้อ 3.3.1 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาในระดับต่างๆ เพื่อศึกษาผลต่อการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

3.3.4 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ

เหมือนข้อ 3.1.5 แต่ใช้สารละลายฟิล์มผสมจากข้อ 3.3.3

3.3.5 การทดสอบความไวต่อการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

เหมือนข้อ 3.1.6 แต่ใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจากข้อ 3.3.4 และเก็บไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 84 ชั่วโมง สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA และที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 96 ชั่วโมง สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของ PCDA

3.4 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

เหมือนข้อ 1.3.3 แต่ใช้ข้อมูลที่ได้จากข้อ 3.3.5 เพื่อมาวิเคราะห์หาค่า k และ E_a ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแทน ในกรณีอุณหภูมิการเก็บคงที่

4. การประยุกต์ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

เพื่อหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นและค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ โดยอาศัยการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์

4.1 การเตรียมตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

เริ่มจากเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเตรียมตามข้อ 2.1.2 จากนั้นเตรียมสารละลายฟิล์มผสมและขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตามข้อ 3.3.3 และ 3.1.5 ตามลำดับ

4.2 การเตรียมผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

ในที่นี้ เลือกใช้ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นเป็นเนื้ออกไก่ลอกหนัง โดยมีการบรรจุเนื้ออกไก่ลอกหนังสดหนัก 134.59 กรัม ซึ่งต้องขนส่งมายังห้องปฏิบัติการภายใน 1 ชั่วโมง จากนั้นบรรจุลงในถาดพลาสติก ขนาด 267.67 มิลลิลิตร แล้วนำไปบรรจุในซอง Nylon/LLDPE และปิดผนึกซองด้วยความร้อน จากนั้นติดตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่ได้จากข้อ 4.1 ไว้บริเวณซองด้านนอกหัวมุมด้านบน แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส

4.3 การหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์

เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถใช้เป็นสารเมทาบอไลต์ในเนื้ออกไก่ลอกหนังได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากงานวิจัยของ Rukchon *et al*. (2014) การตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ มีขั้นตอนดังนี้ ติดเซปทัม (septum) ไว้ด้านบนของถาดบรรจุภัณฑ์เนื้ออกไก่ลอกหนัง จากนั้นใช้เข็มจากเครื่องวัดแก๊ส (pac check) ที่ผ่านการเทียบค่ามาตรฐานแล้ว เจาะบริเวณเซปตัม (septum) แล้วจึงกดปุ่มเริ่มเพื่อดูดแก๊สเหนือช่องว่างมาปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นเครื่องจะประมวลผลและแสดงออกมาเป็นค่าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของร้อยละ (%) หลังจากเก็บบรรจุภัณฑ์เนื้ออกไก่ลอกหนังไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว (จากข้อ 4.2) จะมีการตรวจทุกๆ ชั่วโมงที่ 0 12 24 36 48 66 84 102 120 144 และ 192 และทุกๆ ชั่วโมงที่ 0 6 12 18 24 30 36 48 60 72 และ 84 สำหรับ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นพลอตกราฟระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาในการเก็บรักษา

4.4 การวัดสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

หลังจากเก็บบรรจุภัณฑ์เนื้ออกไก่ลอกหนังไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว (จากข้อ 4.2) ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิในระบบ Hunter *L a b* โดยมีการตรวจวัดตามช่วงเวลาที่สอดคล้องกับข้อ 4.3 จากนั้นคำนวณเป็นค่า TCD (สมการที่ 12) แล้วพลอตกราฟระหว่างค่า TCD กับเวลาในการเก็บรักษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.5 การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

เหมือนข้อ 1.3.3 แต่ใช้ข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.3 เพื่อมาวิเคราะห์หาค่า k และ E_a ของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นแทน ในกรณีอุณหภูมิการเก็บคงที่

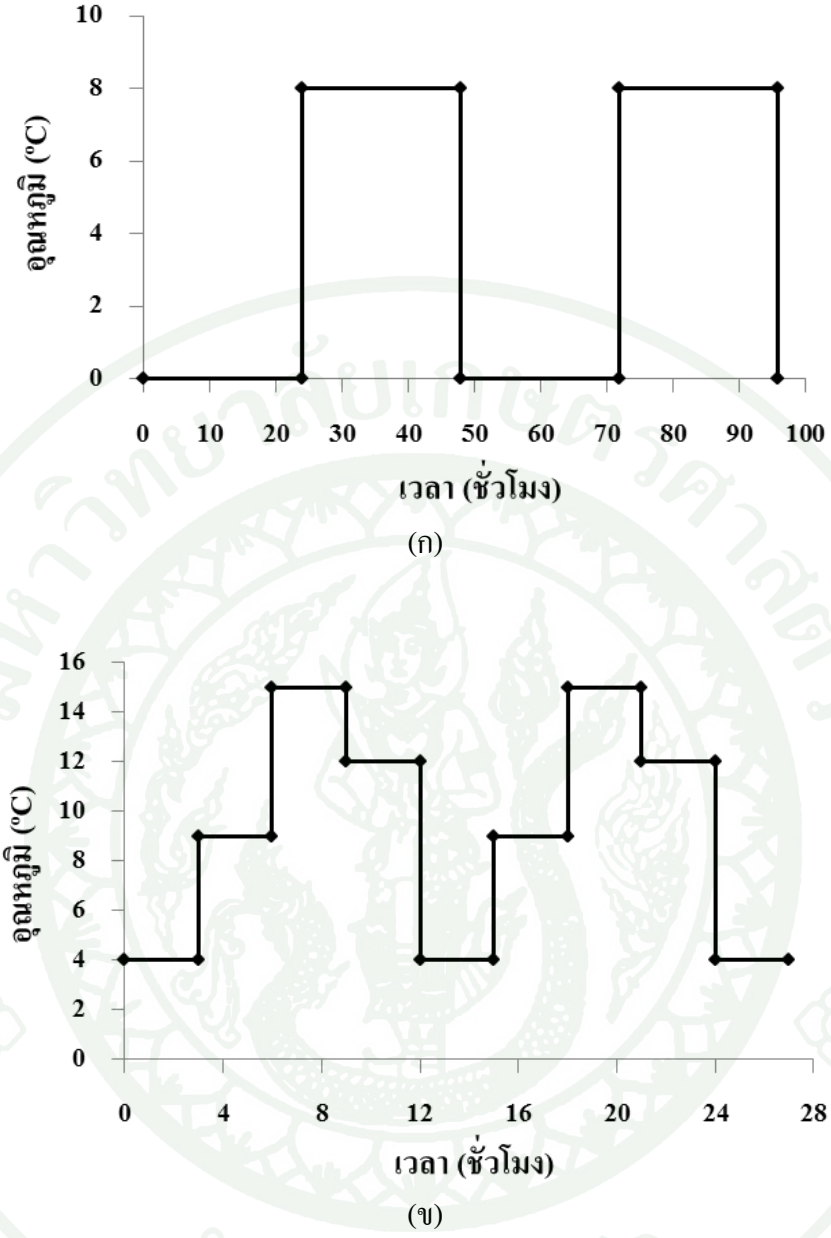
4.6 การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

เหมือนข้อ 1.3.3 แต่ใช้ข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.4 เพื่อมาวิเคราะห์หาค่า k และ E_a ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแทน ในกรณีอุณหภูมิการเก็บคงที่

5. การศึกษาอุณหภูมิยังผลและอายุการเก็บที่เหลือของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในกรณีอุณหภูมิในการเก็บไม่คงที่

นำตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (จากข้อ 4.1) เก็บไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิที่มีการจำลองภาวะระหว่างการขนส่ง โดยการปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งมีการกำหนดรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใน 1 รอบภายใน 48 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิขึ้นไปที่ 8 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง แล้วก็ปรับอุณหภูมิลงไปที่ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ โดยจะเก็บตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิมาวัดสีทุกๆ 24 ชั่วโมง สำหรับแบบที่ 2 เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใน 1 รอบภายใน 12 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิขึ้นไปที่ 9 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลาอีก 3 ชั่วโมง แล้วก็ปรับอุณหภูมิขึ้นไปที่ 15 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลาอีก 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิขึ้นลงไปที่ 12 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลาอีก 3 ชั่วโมง แล้วก็ปรับอุณหภูมิลงไปที่ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ โดยจะเก็บตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิมาวัดสีทุกๆ 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 33 แล้วคำนวณเป็นค่า TCD (สมการที่ 12) จากนั้นพลอต กราฟระหว่างค่า TCD กับเวลาในการเก็บรักษา แล้วปรับกราฟให้เป็นเส้นตรงด้วยโปรแกรม KyPlot ตามข้อ 1.3.3 จากนั้นคำนวณหา T_{eff} และ t_r ตามสมการที่ 6 เมื่อกำหนดให้ T_{ref} เป็นอุณหภูมิการเก็บคงที่ค่าหนึ่ง (ในที่นี้การเก็บในรูปแบบที่ 1 เทียบได้กับที่อุณหภูมิคงที่ 4 องศาเซลเซียส และการเก็บในรูปแบบที่ 2 เทียบได้กับที่อุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส) และค่า E_a ได้มาจากการคำนวณจากข้อ 4.4.2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 33 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเก็บ

6. การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 3.3.5 ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ 4 ชนิดตามปริมาณของอนุภาคนาโนซิลิกา ที่อุณหภูมิและเวลาในการเก็บแตกต่างกัน มาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า TCD อุณหภูมิ และเวลาในลักษณะแผนภาพ 2 มิติและ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Statistica เวอร์ชัน 8.0 (StatSoft Inc., USA) โดยกำหนดให้ แกน x เป็นอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แกน *y* เป็นเวลา และแกน *z* เป็นค่า TCD หรือแทนด้วย *F(X)* จากนั้นสร้างแผนภาพคอนทัวร์ (contur plot) และแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (three-dimension response-surface plot) ในรูปแบบจำลองควอเดรติก (quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ 13 ภายหลังการวิเคราะห์จะได้แบบจำลองควอเดรติกหรือสมการการถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis) พร้อมค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) สำหรับตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์แต่ละชนิด

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} X_i^{\,2} + \sum_{i=1}^{n} b_{ij} X_i X_j \qquad (13)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรอิสระ (ค่าการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ)
b_0 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับเส้นตรง
b_i คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับควอเดรติก
b_{ij} คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับอิทธิพลร่วม
X_i คือ อิทธิพลของเส้นตรงสำหรับตัวแปรอิสระ
X_i^2 คือ อิทธิพลของควอเดรติกสำหรับตัวแปรอิสระ
X_iX_j คือ อิทธิพลร่วมสำหรับตัวแปรอิสระ

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (compare means) ของข้อมูลที่ได้ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และความแตกต่างระหว่างตัวอย่างด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 12.0 for Windows ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

8. สถานที่และระยะเวลาในการทำงานวิจัย

8.1 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ห้องปฏิบัติการกลาง คณะอุตสาหรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

หน่วยสังเคราะห์ภาพระดับนาโน (Center of Nanoimaging, CNI) อาคารชีววิทยา ชั้น 2 ห้อง B200 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ

ห้องปฏิบัติการภาควิชา Agro-Environmental Sciences คณะ Agriculture มหาวิทยาลัยคิวชู เมืองฟุกุโอกะ ประเทศญี่ปุ่น

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

8.2 ระยะเวลาทำการวิจัย

ทำการวิจัยตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 และสิ้นสุดเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับสารแอมฟิฟิลิก และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

1.1 ผลของความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกต่อการเปลี่ยนสี

ภายหลังการสกัด PCDA ด้วยคลอโรฟอร์ม พบว่าสารที่ได้สามารถเกิดการแขวนลอยได้ง่ายในน้ำ โดยการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเกิดจากไดแอซิทิลีนมอนอเมอร์ที่เคลื่อนที่มาประกอบเข้ากันได้เอง และเกิดการเรียงตัวเป็นลักษณะ 2 ชั้นอยู่ในรูปของเวสิเคิล เมื่อทำการฉายรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรแล้ว สารที่ได้จะเกิดการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีน้ำเงิน จึงเรียกสารนี้ว่า พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล จากนั้นเตรียมสารแอมฟิฟิลิกที่เป็นส่วนผสมระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 กับ PEG-400 ซึ่งพลูโรนิก เอฟ127 จะช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลให้ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากโดยปกติแล้ว พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ฉะนั้น เมื่อนำพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลมาผสมกับสารแอมฟิฟิลิก แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน สารละลายผสมที่ได้จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเมื่อผสมกับสารแอมฟิฟิลิก ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

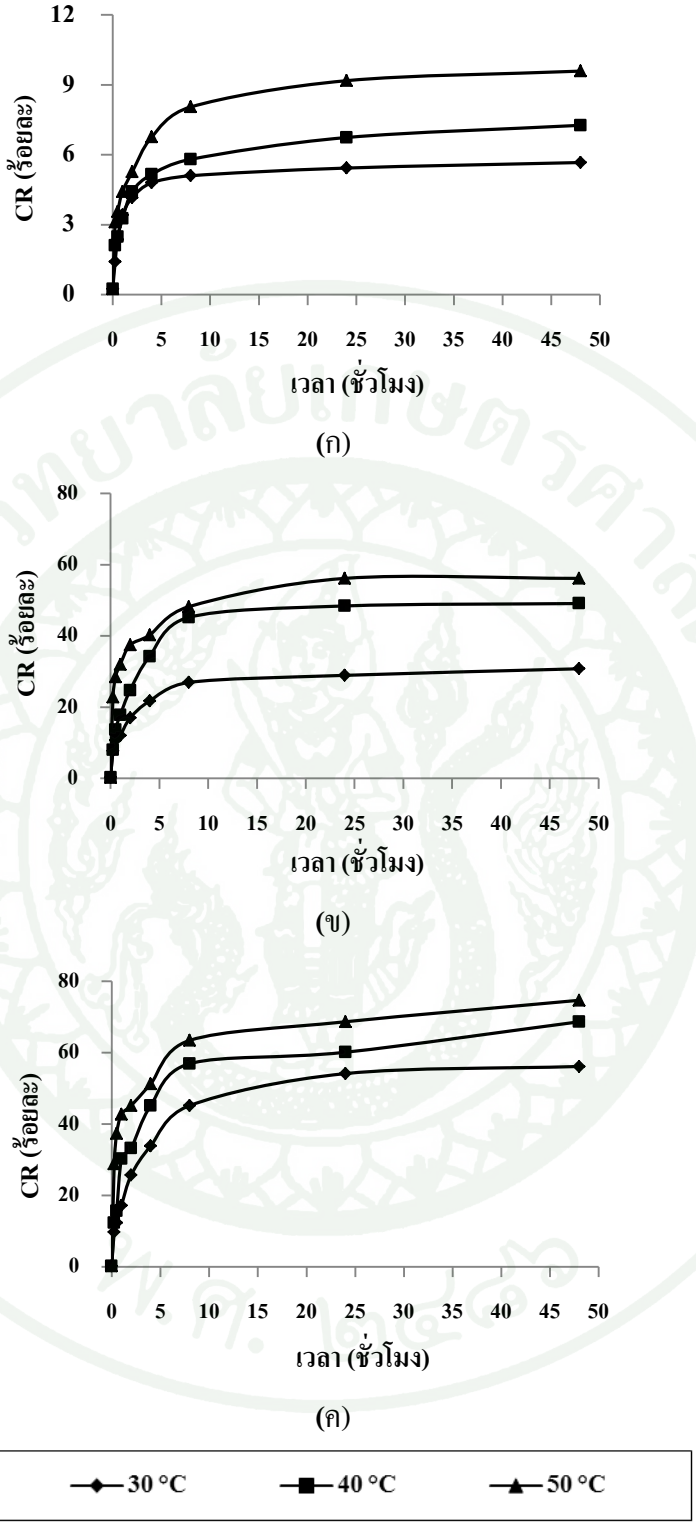
การปรับความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกให้อยู่ในระดับที่แตกต่างกัน ขึ้นกับความเข้มข้นของพลูโรนิก เอฟ127 เป็นหลัก โดยจะใช้พลูโรนิก เอฟ127 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ ร้อยละ 0 จนถึง ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารแอมฟิฟิลิกในแต่ละความเข้มข้นนี้จะถูกเติมลงในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล จากนั้นก็นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นสูงสุด 640 นาโนเมตร จะค่อยๆ ลดลง ค่าการดูดกลืนแสงสีแดงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 540 นาโนเมตร ค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นทั้งสองไปคำนวณหาค่า CR จากสมการที่ 7 และ 8 ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จะเห็นว่า สารผสมระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับสารแอมฟีฟิลิกจะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 8 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะค่อยๆ คงที่ ในทุกอุณหภูมิการเก็บ และอุณหภูมิในการเก็บยิ่งสูงขึ้น การเปลี่ยนสีก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นและให้สีที่ชัดเจนขึ้นด้วย ซึ่งการเปลี่ยนสีนี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่า CR นั่นคือ ความเข้มของสีที่เปลี่ยนมีมากขึ้น ค่า CR ก็สูงขึ้นด้วย ฉะนั้นเมื่อมีการเติมสารแอมฟีฟิลิกที่มีความเข้มข้นสูง จะยิ่งช่วยลดอุณหภูมิในการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลลง (ภาพที่ 35)

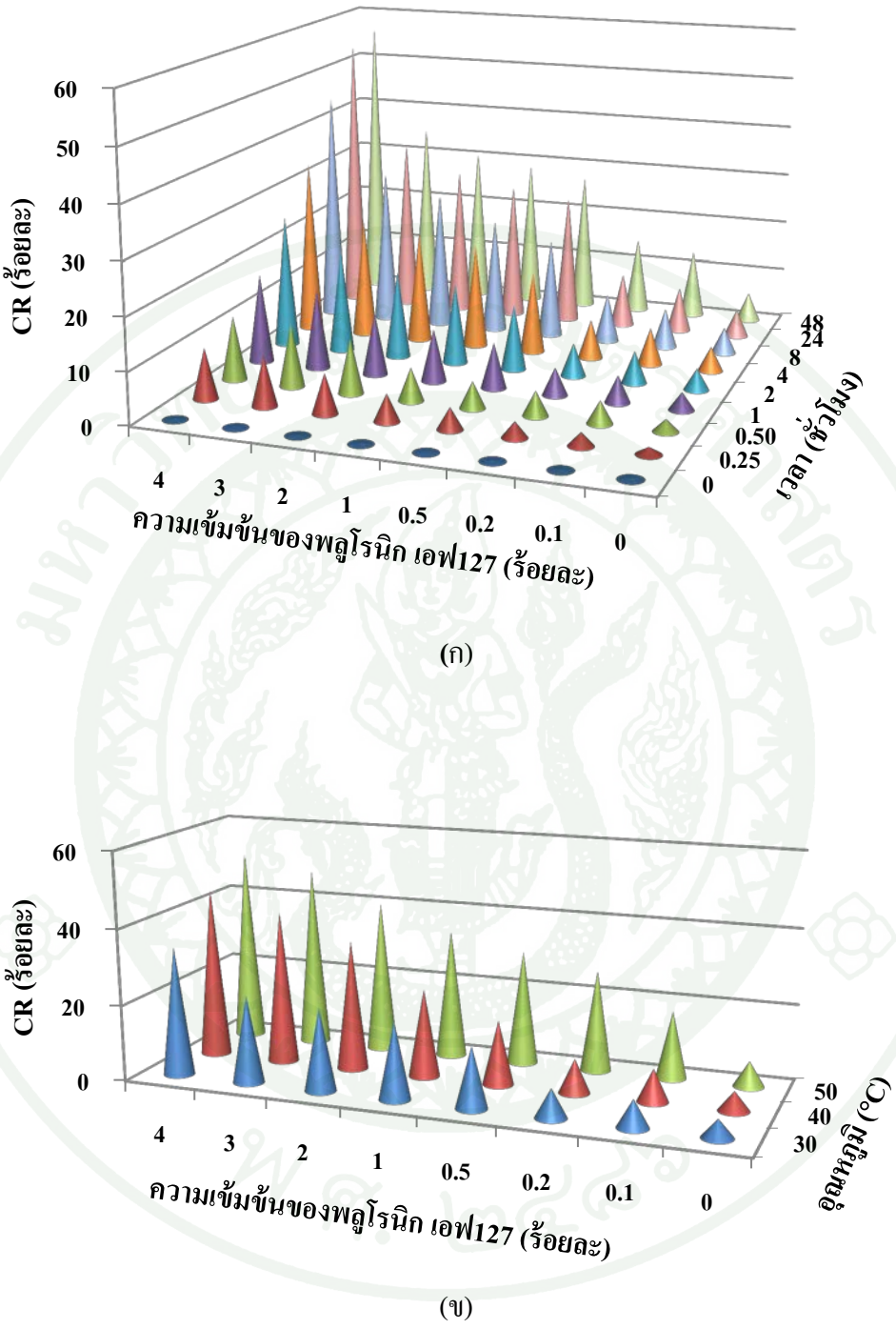
อย่างเช่น ถ้าต้องการให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า CR ประมาณร้อยละ 20 สำหรับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิก จะต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 35ก) แต่สำหรับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิก จะสามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส นั่นคือ สำหรับสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะสามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และสำหรับสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะยิ่งสามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียสได้ แสดงว่ายิ่งใช้ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิกมากขึ้น จะยิ่งทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลสามารถเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้ที่อุณหภูมิต่ำลง และจากภาพที่ 36 จะทำให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า CR ได้อย่างชัดเจนขึ้น นั่นคือ เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิการเก็บคงที่ ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิกที่สูงขึ้น และเวลาในการเก็บมากขึ้น ก็จะให้ค่า CR ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน (ภาพที่ 36ก) และเมื่อกำหนดให้เวลาในการเก็บคงที่ ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิกที่สูงขึ้น และอุณหภูมิในการเก็บมากขึ้น ก็จะให้ค่า CR ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน (ภาพที่ 36ข) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะแสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ก1 ถึง ก3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกที่เข้มข้นร้อยละ 0 (ก) 2 (ข) และ 4 (ค) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 36 ผลของปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาต่อค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิก เอฟ127 ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส (ก) และเวลาในการเก็บคงที่ 4 ชั่วโมง (ข)

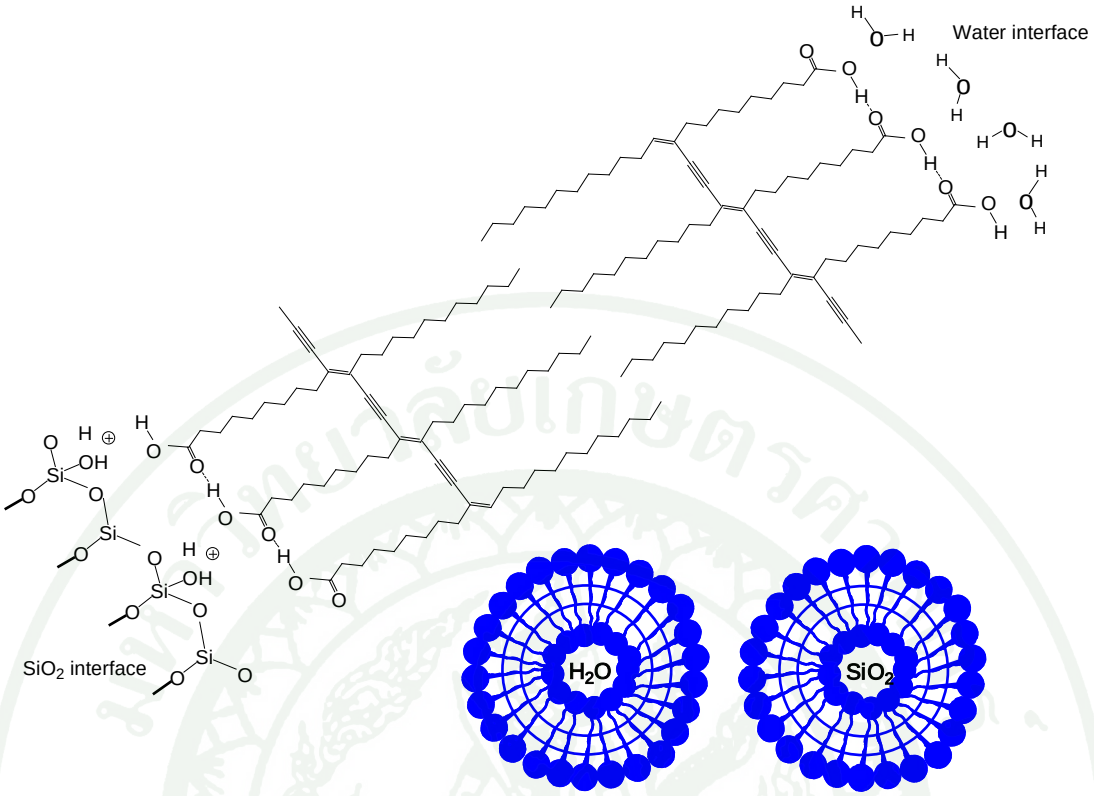
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ผลของการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาต่อการเปลี่ยนสี

อนุภาคนาโนที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกา นิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ และมีสมบัติที่แข็งแรง มีความเป็นรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำอีกด้วย โดยอนุภาคนาโนซิลิกาจะถูกแขวนลอยในน้ำด้วยเครื่องล้างอัลทราโซนิกส์ จากนั้นนำไปผสมกับ PCDA ที่ผ่านการสกัดแล้ว และผ่านการฉายรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะทำให้ได้สารที่มีสีน้ำเงินเช่นกัน แต่เรียกสารนี้ว่า สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา โดยซิลิคอนไดออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ จะมีโครงสร้างอยู่ในรูป Si-OH $Si-OH_2^+$ และ $Si-OH^-$ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการสร้างพันธะไอออนิกและ/หรือพันธะไฮโดรเจนได้ (Lu *et al.*, 2001; Su, 2006) โดย PCDA จะหันด้านหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลิกเข้าหากลุ่มทำงาน (active group) บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาเพื่อสร้างพันธะไอออนิกซึ่งกันและกัน และเมื่อ PCDA จำนวนมากค่อยๆ เคลื่อนที่เข้ามาใกล้และหันด้านหัวเข้าหาอนุภาคนาโนซิลิกา จนสามารถล้อมรอบอนุภาคนาโนซิลิกาได้ จึงเปรียบเสมือนว่าอนุภาคนาโนซิลิกาจะเข้าไปอยู่แกนกลางของโมเลกุล PCDA ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Traiphol *et al.* (2011) ที่มีการศึกษาการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ลงในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ภายหลังการฉายรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร PCDA จะเกิดการจัดเรียงตัวได้เอง และสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่าง PCDA ที่อยู่ข้างๆ จนเกิดเป็นลักษณะที่เรียกว่า การจัดเรียงตัวแบบ 2 ชั้นหรือ bi-layer นั่นเอง สารที่ได้จะเกิดการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีน้ำเงิน โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกาอยู่ในตำแหน่งแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ส่วนหมู่คาร์บอกซิลิกที่เป็นด้านหัวของ PCDA อีกฝั่งหนึ่ง ที่หันออกสู่ภายนอก โดยจะเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ จึงทำให้โมเลกุลสามารถแขวนลอยได้ดีในน้ำ ส่วนด้านหางของ PCDA จะเป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่วนที่ไม่มีขั้ว จะเกิดการหันมาจับกันเองของ PCDA อีกสายหนึ่ง โดยความแข็งแรงของแรงในการยึดติดกันของกลุ่มไฮโดรคาร์บอนทางด้านหาง จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะไอออนิกที่หมู่คาร์บอกซิลิกทางด้านหัวมาก ภาพที่ 37 ได้แสดงการจำลองการยึดจับกันเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าไปในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

การเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมสารแอมฟิฟิลิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเวลาเริ่มต้นสารละลายยังคงมีความเป็นสีน้ำเงินสูงกว่าสีแดง ค่าร้อยละสีน้ำเงินก็มีค่าสูงสุดเป็น 100 แต่ค่าร้อยละการตอบสนองของสีจะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือไม่พบการเปลี่ยนแปลงอะไรเลย แต่เมื่อเวลานานขึ้น

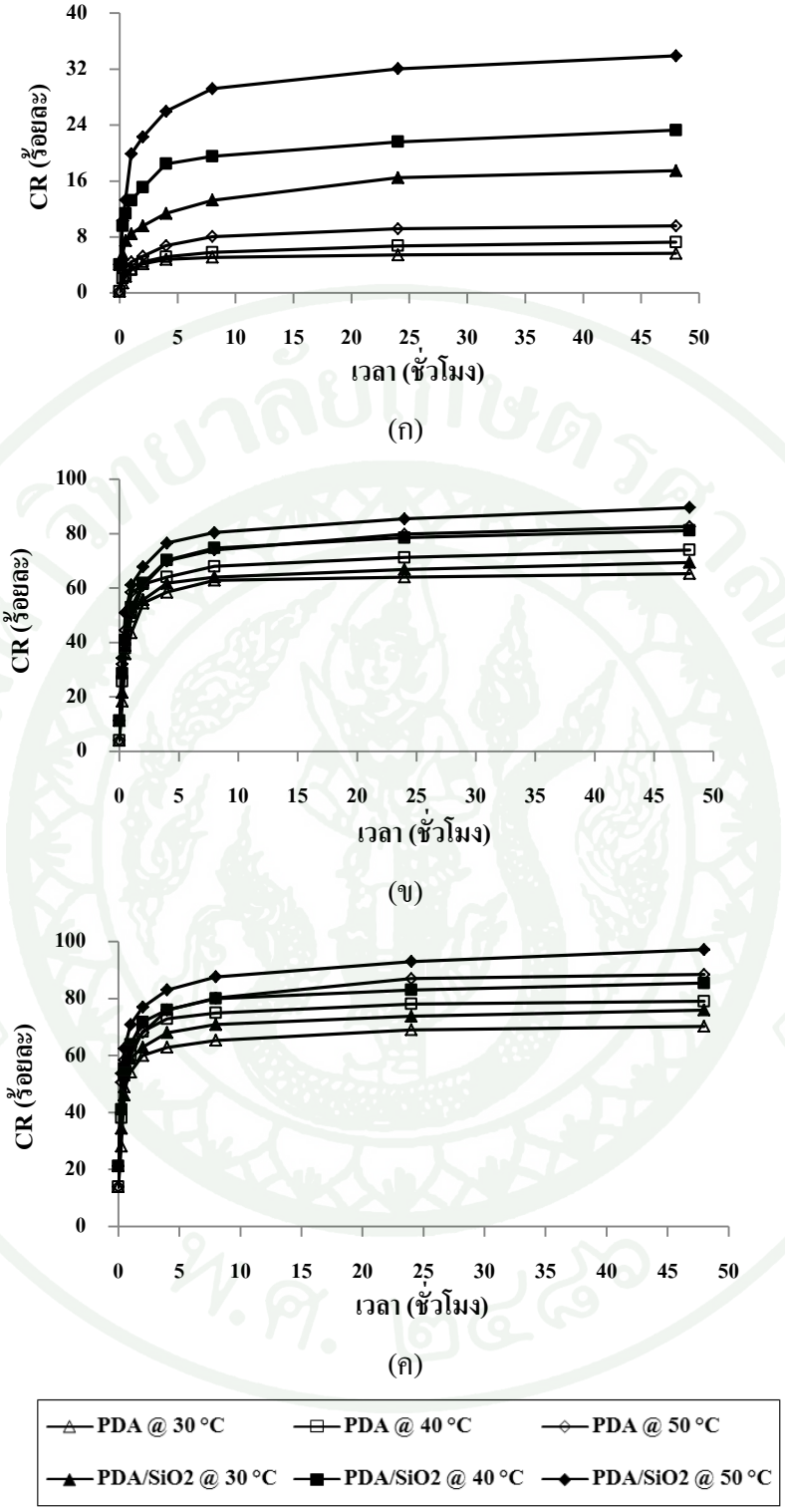
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 37 การจำลองการยึดจับกันระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ถูกเติมเข้าไป

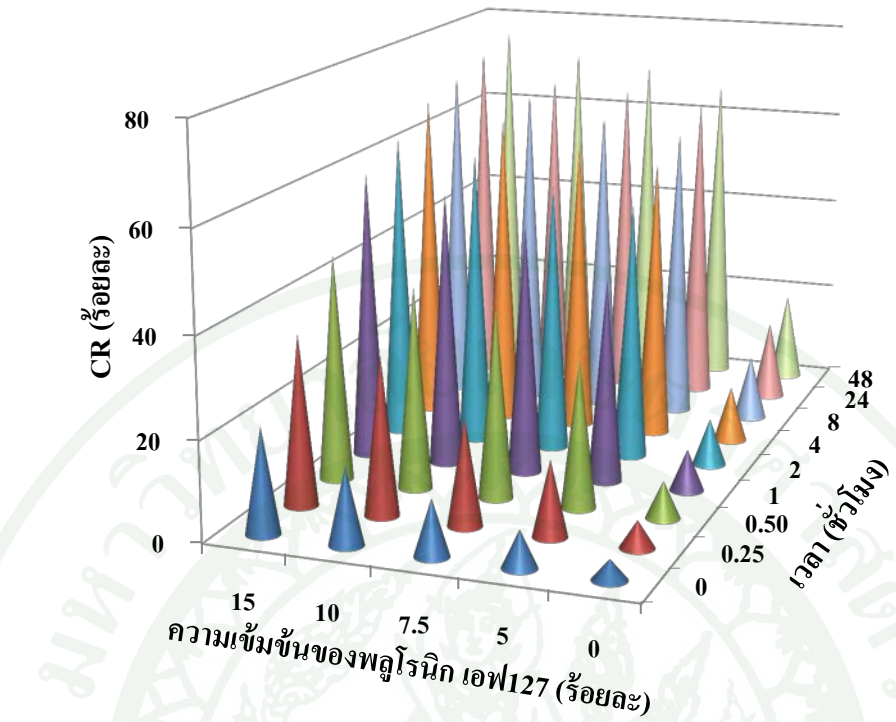
สารละลายจะค่อยเริ่มเปลี่ยนสีจากในรูปสีน้ำเงินเป็นในรูปสีแดง ค่าร้อยละสีน้ำเงินก็จะมีค่าค่อยๆ ลดลง แต่ค่าร้อยละการตอบสนองของสีจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงเวลาหนึ่ง การเปลี่ยนสีเริ่มคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนไปมากกว่านี้แล้ว ทำให้ค่าร้อยละการตอบสนองของสีเริ่มคงที่ในที่สุด แต่การเติมสารแอมฟิฟิลิกในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน จะทำให้สารแอมฟิฟิลิกที่ความเข้มข้นสูงแสดงค่าร้อยละการตอบสนองของสีสูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ และการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ PCDA) ก็จะแสดงค่าร้อยละการตอบสนองของสีสูงกว่าที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโนซิลิกาเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 38 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลา พบว่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละการตอบสนองของสี จะแปรผันโดยตรงกับทั้งอุณหภูมิและเวลา นั่นคือ ที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกเพิ่มขึ้นและเวลาผ่านไป ค่าร้อยละการตอบสนองของสีก็จะเพิ่มขึ้น และที่เวลาคงที่ เมื่อความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละการตอบสนองของสีก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 39 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะแสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ก4 ถึง ก6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

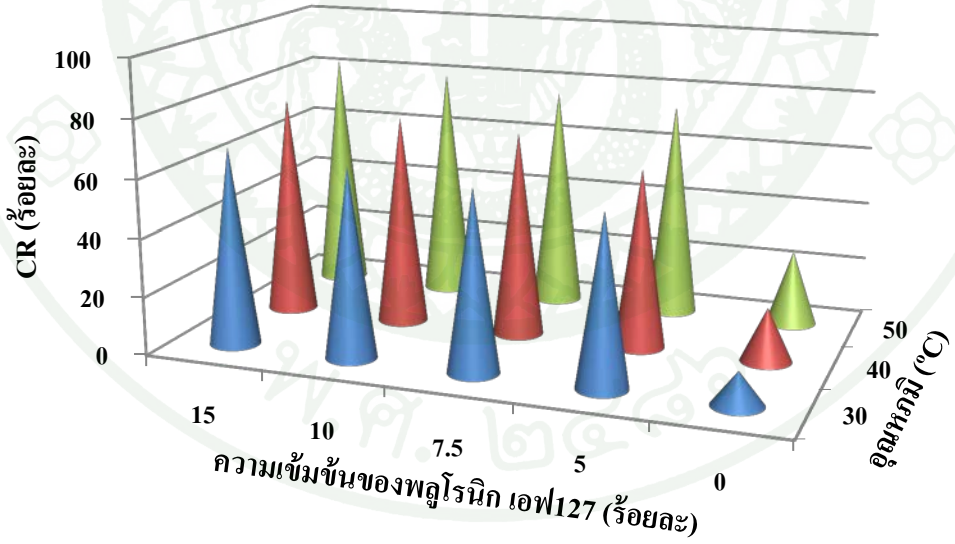


ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิกเอฟ127 ร้อยละ 0 (ก) 7.5 (ข) และ 15 (ค) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 39 ผลของปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาต่อค่าร้อยละการตอบสนองของสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของพลูโรนิก เอฟ127 ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส (ก) และเวลาในการเก็บคงที่ 4 ชั่วโมง (ข)

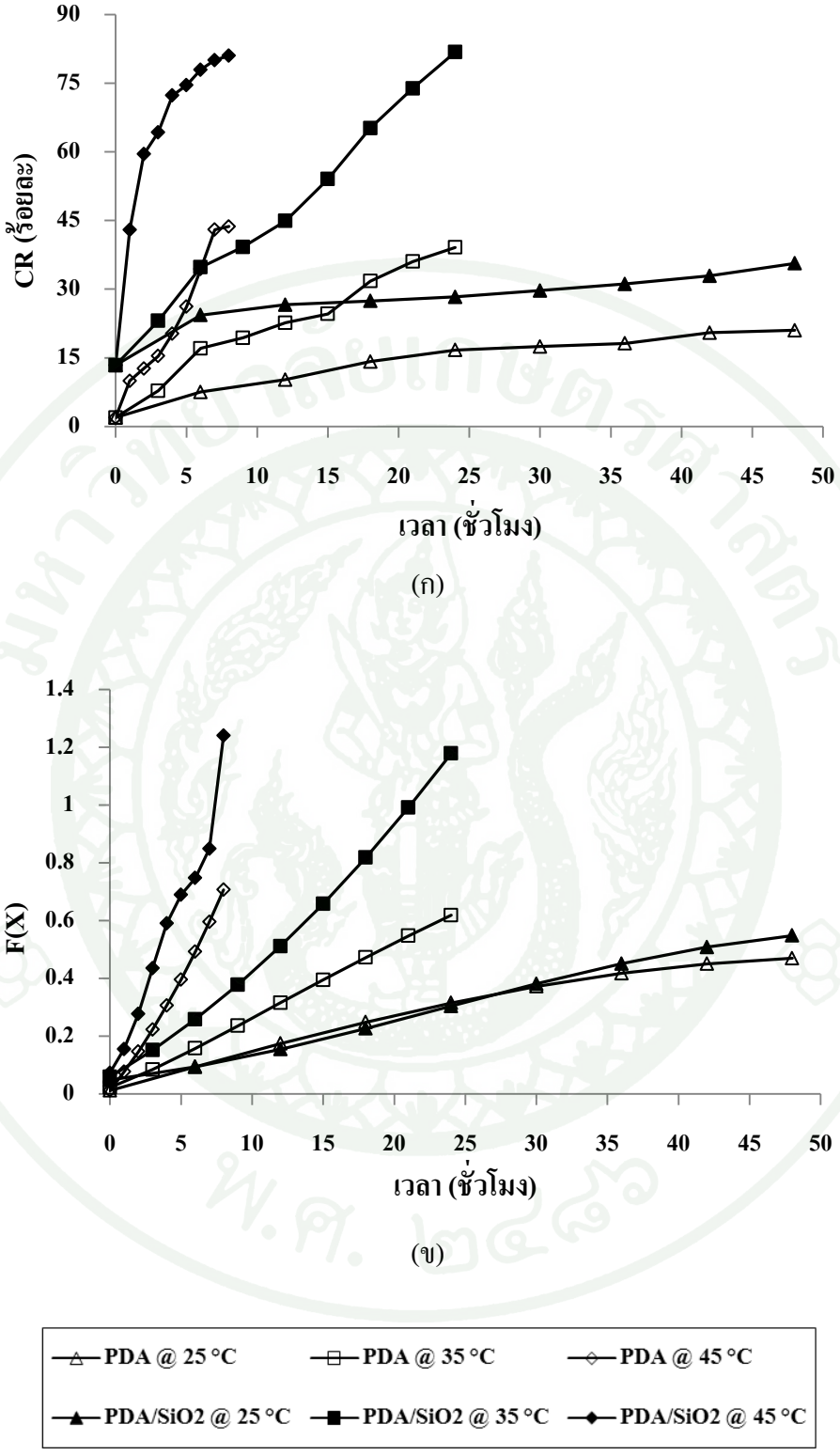
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3 ผลของอุณหภูมิการเก็บต่อสมบัติการเปลี่ยนสีและการศึกษาทางจลพลศาสตร์

สมบัติเด่นของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดและเบส อุณหภูมิ มีเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ หรือใส่แรงกระทำต่อระบบ ซึ่งในที่นี้ จะเน้นในเรื่องของอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดการเปลี่ยนสี และถ้าอุณหภูมินั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เร็วขึ้น ก็จะส่งผลให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลมีการเปลี่ยนสีเร็วขึ้นเช่นกัน จากสมบัตินี้จึงได้นำมาสู่การศึกษาในเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนสี และจลนศาสตร์ของการตอบสนองของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งยังสามารถส่งผลถึงอายุการเก็บที่คงเหลือของสารละลายวัสดุเชิงประกอบนี้ได้อีกด้วย โดย Giannakourou and Taoukis (2003) ได้กล่าวไว้ว่า การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์สามารถหาค่า E_a ได้ จากนั้นนำค่าทางจลนพลศาสตร์ที่ได้และพลังงานก่อกัมมันต์นี้ไปสู่การหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ ในการศึกษาได้มีกำหนดอุณหภูมิในการเก็บรักษาเป็น 2 แบบ คือ อุณหภูมิคงที่ตลอดการเก็บรักษา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น เพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีทางความร้อน (thermochromism) ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา โดยการทดลองจะมีการเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาและนำมาผสมกับสารละลายแอมฟิฟิลิก จากนั้นแยกไปเก็บที่อุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิที่ไม่คงที่ โดยที่ระบบแรกที่จะกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ 3 ระดับ คือ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ส่วนระบบที่สองจะกำหนดให้อุณหภูมิที่ไม่คงที่ ซึ่งแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ การเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสทุก 1 ชั่วโมง และการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสทุก 3 ชั่วโมง โดยเริ่มตั้งแต่ 25 ไปจนถึง 45 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 และ 540 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณค่าร้อยละการตอบสนองของสี ค่า E_a ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่า T_{eff} และอายุการเก็บคงเหลือ (remaining shelf life, t_r) ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ในกรณี การเก็บในภาวะอุณหภูมิคงที่ พบว่า ค่าร้อยละการตอบสนองของสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเก็บมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา นอกจากนี้ที่อุณหภูมิการเก็บสูงขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้เร็วขึ้นหรือระยะการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงสั้นลงนั่นเอง (ภาพที่ 40) จากการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีในแต่ละอุณหภูมิพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะไม่ค่อยเป็นเส้นตรง ฉะนั้นจึงต้องมีการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

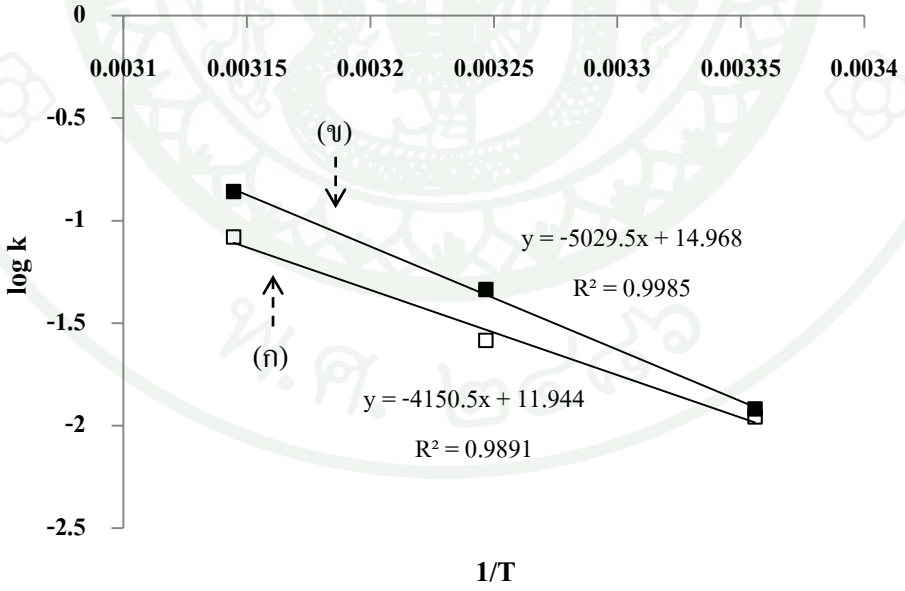


ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสี (ก) และการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันผลตอบสนองของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรับกราฟให้มีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง โดยกำหนดค่าร้อยละการตอบสนองของสีให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันผลตอบสนอง (response function) หรือเขียนใหม่เป็น $F(X)$ ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่า $F(X) = k_1 t$ โดยที่ k_1 เป็นอัตราคงที่ของผลตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ (ซึ่งในที่นี้ คือ สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกา) ณ อุณหภูมิใดๆ ภายหลังการปรับกราฟให้เป็นเส้นตรงแล้ว จะได้ค่า k_1 ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพลอตกราฟระหว่าง $\log k$ กับ $1/T$ ตามสมการที่ 11 ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบนี้

จากภาพที่ 41 เมื่อคำนวณหาค่า E_a จากความชันของสมการเส้นตรง จะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาและสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา มีค่าเท่ากับ 96.29 และ 79.46 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ซึ่งจากค่า E_a ดังกล่าวเมื่อไปเทียบกับค่า E_a สำหรับการสูญเสียคุณภาพของอาหาร (Labuza, 1982) พบว่า สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงค่า E_a ของผลิตภัณฑ์อาหารที่จะนำมาใช้ ได้แก่ กลุ่มอาหารที่เกิดการเสื่อมเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (41.84-104.60 กิโลจูลต่อโมล) การสูญเสียสารอาหาร (83.68-125.52 กิโลจูลต่อโมล) และการเจริญ



ภาพที่ 41 กราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของค่า k กับส่วนกลับของอุณหภูมิของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส

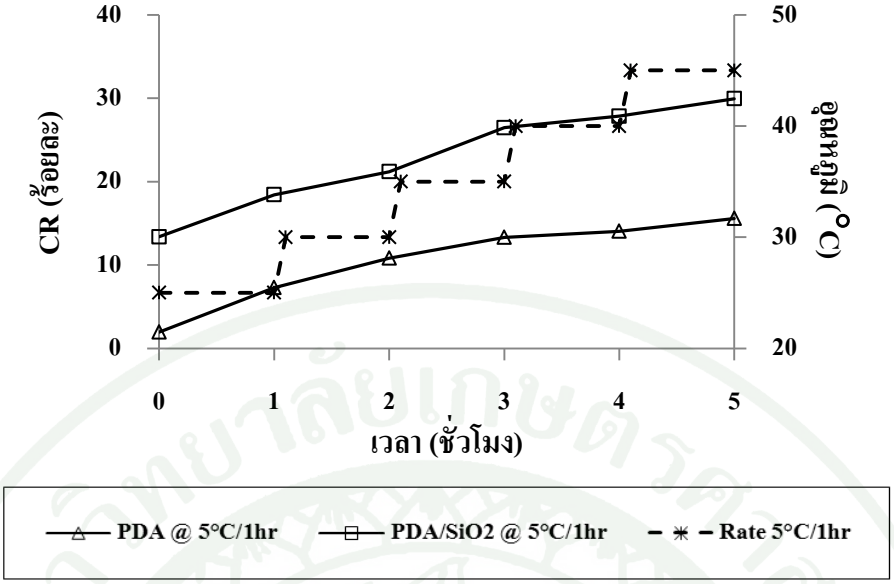
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของจุลินทรีย์ (83.68-251.04 กิโลจูลต่อโมล) สำหรับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงค่า E_a ของผลิตภัณฑ์อาหารกลุ่มที่เกิดการเสื่อมเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (41.84-104.60 กิโลจูลต่อโมล) หรือผลิตภัณฑ์อาหารประเภทผักและผลไม้ที่เกิดการสูญเสียความชื้นก็ได้ โดยค่าที่ได้ควรแตกต่างกันไม่เกิน 25 กิโลจูลต่อโมล (Taoukis, 2001) เพื่อให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเป็นตัวแทนในการบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นต่อผลิตภัณฑ์และสามารถบ่งบอกให้ผู้บริโภคมองเห็นได้อย่างชัดเจน

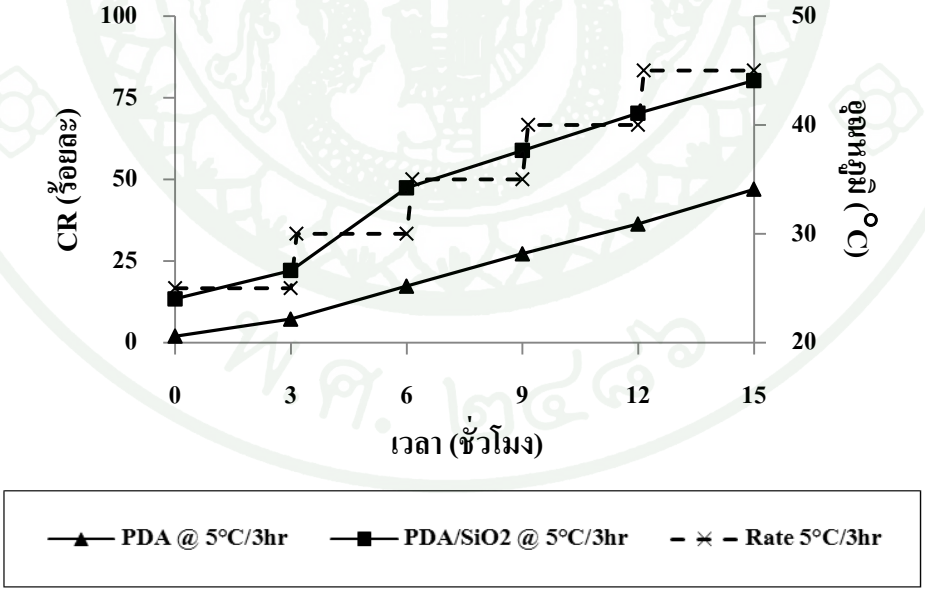
ในกรณี การเก็บในภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ พบว่า ค่าร้อยละการตอบสนองของสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเก็บมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง (รูปแบบที่ 1) จะให้ค่าร้อยละการตอบสนองของสีที่ต่ำกว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ 3 ชั่วโมง (รูปแบบที่ 2) เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในรูปแบบที่ 1 จะใช้เวลาเพียง 5 ชั่วโมงในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 ไปถึง 45 องศาเซลเซียส แต่ในรูปแบบที่ 2 จะใช้เวลานานถึง 15 ชั่วโมง ฉะนั้นการให้อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งที่นานเกินไป จะทำให้สารละลายนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่มากขึ้น (ภาพที่ 42 และ 43)

จากการศึกษาภาวะอุณหภูมิที่ไม่คงที่ จะสามารถส่งผลต่ออายุการเก็บที่เหลือของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น หรือระยะเวลาที่เก็บไว้ในอุณหภูมิสูงนานขึ้น จะเป็นตัวกระตุ้นให้สารละลายนี้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงได้เร็วขึ้น นั่นหมายความว่า อายุการเก็บที่เหลือของสารละลายนี้ก็จะน้อยลง ทำให้ในบางครั้งไม่สามารถนำไปใช้ติดตามผลิตภัณฑ์อาหารได้อีก เพราะว่าเกิดการเปลี่ยนสีไปยังจุดสุดท้ายอย่างถาวรแล้วและไม่สามารถเกิดการผันกลับมาเป็นสีตั้งต้นได้ จากเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงต้องการคำนวณหาค่า t_r ของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโน ซิลิกาและค่า T_{eff} ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เปรียบเสมือนว่าเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิคงที่ ในระยะเวลาหนึ่ง แต่ในระหว่างนั้นอุณหภูมิในการเก็บไม่คงที่ จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเทียบเท่ากับว่ามีการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิยังผลในระยะเวลาเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง จากอุณหภูมิ 25 ไปยัง 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง



ภาพที่ 43 การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการตอบสนองของสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บทุกๆ 5 องศาเซลเซียสต่อ 3 ชั่วโมง จากอุณหภูมิ 25 ไปยัง 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการที่ 6 ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เมื่อทราบพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ก็สามารถคำนวณหาค่า T_{eff} และ t_r จะได้ว่า ค่า T_{eff} ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา มีค่าเท่ากับ 41 และ 38 องศาเซลเซียส สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบที่ 1 และ 39 และ 40 องศาเซลเซียส สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบที่ 2 ตามลำดับ สำหรับค่า t_r ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา มีค่าเท่ากับ 346 และ 954 ชั่วโมง สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบที่ 1 และ 88 และ 41 ชั่วโมง สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบที่ 2 ตามลำดับ (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 อุณหภูมิยังผล (T_{eff}) และอายุการเก็บที่เหลือ (t_r) ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา สำหรับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บในทั้งสองรูปแบบ

สารละลาย	รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2	
	T_{eff}(°C)	t_r(hr)	T_{eff}(°C)	t_r(hr)
PDA	41.36	346	39.42	88
PDA/SiO_2	38.15	954	39.97	41

ฉะนั้นการเพิ่มอุณหภูมิในรูปแบบที่ 2 ถึงแม้จะมีการเพิ่มในอัตราที่ต่ำกว่าแต่มีการใช้เวลาในการสัมผัสที่อุณหภูมินั้นๆได้นานกว่า ก็สามารถทำให้ค่า t_r ของสารละลายตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสั้นลงมาก นอกจากนี้ การที่อุณหภูมิการเก็บไม่คงที่ยังส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้อีกด้วย ดังเช่นงานวิจัยของ Taoukis (2001) ที่มีการศึกษาค่า T_{eff} สำหรับการเก็บรักษาปลาบอคและความแปรปรวนของอุณหภูมิระหว่างการเก็บปลาบอคตลอด 24 ชั่วโมง ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลาบอค และเลือกตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพนี้ โดยมีการกำหนดความแปรปรวนของอุณหภูมิอยู่ 2 ชุด พบว่า ความแปรปรวนของอุณหภูมิชุดที่ 1 และ 2 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลาบอคเทียบเท่ากับการเก็บปลาบอคที่อุณหภูมิ 8.93 และ 9.80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแบบ Enzymatic TTI-Model M เหมาะสมสำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลาบอคมากที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

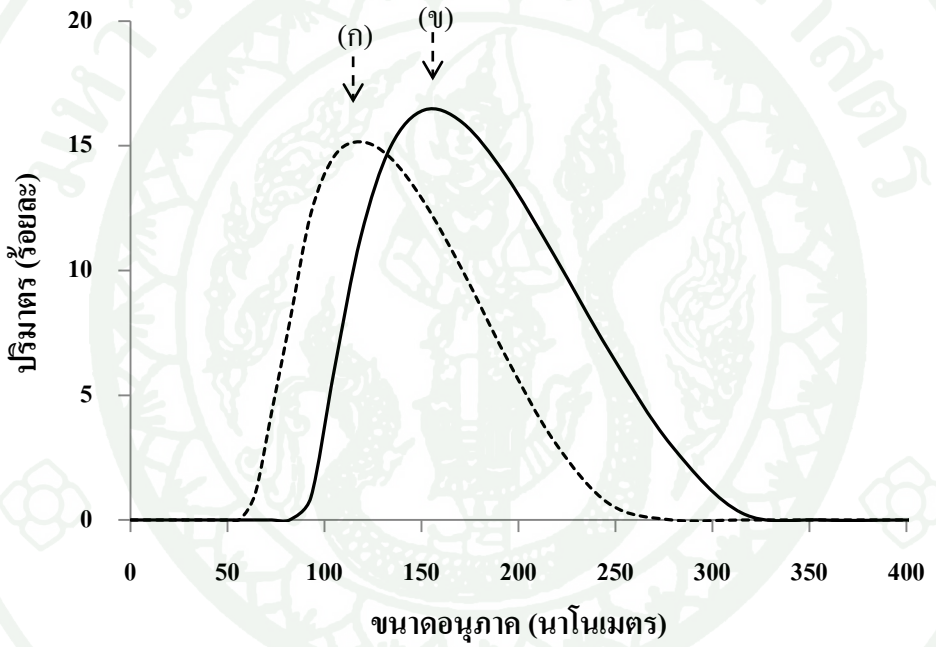
1.4 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ถูกเติมด้วยอนุภาคนาโน จัดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่สามารถละลายหรือรวมตัวกันโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย หรือเรียกว่า ไฮโดรโซล (hydrosol) โดยปกติแล้วโมเลกุลของ PCDA จะประกอบทั้งส่วนไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิก โดยส่วนไฮโดรโฟบิกหรือส่วนที่ไม่มีขั้วจะเกิดการจับกันเองโดยอัตโนมัติ แล้วหันส่วนไฮโดรฟิลิกหรือส่วนที่มีขั้วไปจับกับน้ำและอนุภาคนาโนซิลิกา แต่ภายหลังการเตรียมจะได้โครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนอยู่ในรูปเวสิเคิล ซึ่งการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าไปในสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลนี้มีผลต่อขนาดและรูปร่างอนุภาคของสาร ทำให้ต้องอาศัยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่ เทคนิคการกระเจิงของแสงเลเซอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การแจกแจงของขนาดอนุภาคด้วยรังสีเลเซอร์ เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยอาศัยลำอนุภาคอิเล็กตรอนแบบทั้งผ่านทะลุและสะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ และเทคนิคการดูดกลืนแสงโดยอาศัยสมบัติการดูดกลืนแสงของสารเมื่อถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวจากเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาได้

การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของสาร สามารถอาศัยเทคนิคในการวิเคราะห์หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (sieving techniques) เทคนิคการตกตะกอน (sedimentation techniques) เทคนิคทางไฟฟ้า (electrical sensing techniques) เทคนิคทางแสง (optical techniques) และเทคนิคสเปคโทรสโคปทางอะคูสติก (acoustic spectroscopy) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิคเป็นการวัดลักษณะเฉพาะของอนุภาคของสารโดยทางอ้อมจะตั้งอยู่บนสมมติฐานของแต่ละเทคนิคการวัด ดังนั้นผลที่ได้จากแต่ละเทคนิคนั้นอาจให้ค่าที่แตกต่างกัน ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ (อารีและคณะ, 2545) ซึ่งในที่นี้ เลือกการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางแสงซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้อย่างรวดเร็วและใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณน้อยได้ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (laser diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ จากการศึกษาได้นำสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกามาผ่านการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ก่อน เพื่อให้อนุภาคที่เกิดการเกาะกันได้ดีอย่างอนุภาคนาโนซิลิกา เกิดการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระจายตัวแยกออกจากกัน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคจะถูกวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น และยังได้มีการกำหนดอุณหภูมิในการวัดไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยชะลอการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ซึ่งพบว่า ขนาดอนุภาคภายในสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีการกระจายตัวอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคภายในสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่ได้มีการเติมอนุภาคนาโน จะอยู่ระหว่าง 50 ถึง 250 นาโนเมตร และเมื่อพิจารณาจากขนาดอนุภาคที่มีเปอร์เซ็นต์มากที่สุด พบว่า ขนาดอนุภาคที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโน จะอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 150 นาโนเมตร และ 150 ถึง 200 นาโนเมตร โดยเฉลี่ย ตามลำดับ (ภาพที่ 44)



ภาพที่ 44 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข)

ฉะนั้นการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาลงในสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Traiphol *et al*. (2011) ที่ศึกษาลักษณะของสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ถูกเติมด้วยอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยคณะนักวิจัยกล่าวว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลไม่ได้เกิดจากการที่อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์แทรกตัวเข้าสู่แกนกลางของเวสิเคิล แต่จะเกิดจากการที่พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์แล้วเกิดการเคลือบบนผิวของ

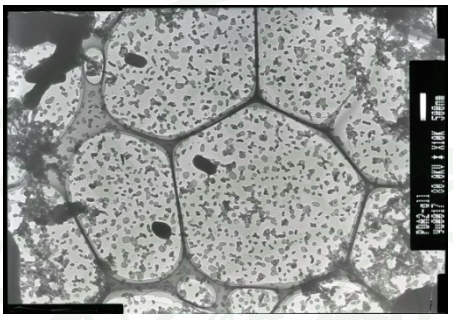
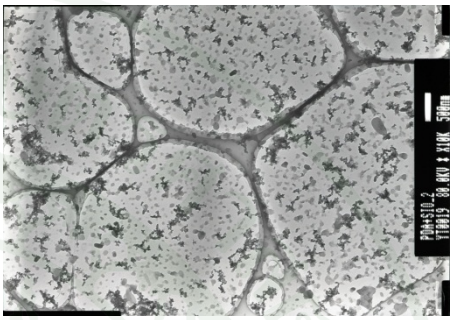
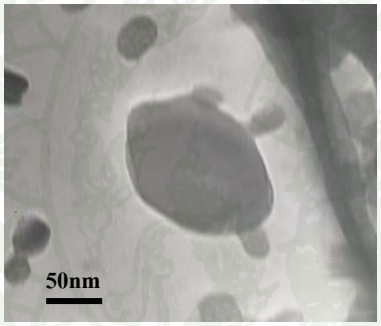
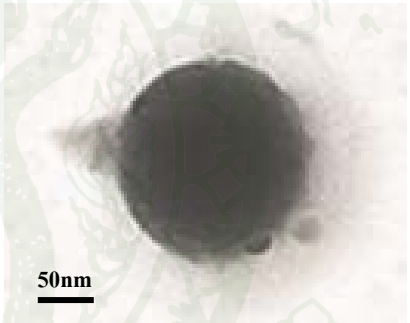
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในที่สุด แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ควรต้องมีการศึกษาลักษณะรูปร่างของอนุภาคภายในสารละลายวัสดุเชิงประกอบนี้ด้วยโดยอาศัยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทั้งส่องผ่านและส่องกราด

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปในฟิลาเมนท์ (filament) อิเล็กตรอนจะวิ่งออกมาจากส่วนปลายของฟิลาเมนท์ไปยังวัตถุ ซึ่งลำแสงอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านวัตถุจะวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) และจะถูกขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้น สุดท้ายอิเล็กตรอนจะไปกระตุ้นโมเลกุล fluorescence screen ทำให้เกิดเป็นภาพ 2 มิติ สามารถมองเห็นองค์ประกอบภายในอนุภาคได้ชัดเจน และมีกำลังขยายสูงมาก โดยวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (atomic number) มาก ภาพที่ได้จะเห็นเป็นสีดำ ส่วนวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมน้อย ภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับตารางที่ 9 นั่นคือ ภายหลังการนำสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามาหยดบนกริดทองแดง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM โดยเปรียบเทียบกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล พบว่า รูปร่างของอนุภาคภายในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลมีลักษณะไม่แน่นอน บางโมเลกุลมีรีบ้าง บางโมเลกุลมีกลมบ้าง โดยจะเห็นสีเทาอย่างชัดเจน สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีลักษณะค่อนข้างกลม โดยตำแหน่งตรงกลางจะมีสีดำ แต่บริเวณรอบๆ จะมีสีเทา เนื่องจากโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีนมีลักษณะโปร่งแสง (transparency) แสงสามารถผ่านได้ ฉะนั้นจึงมองเห็นเป็นสีเทา ส่วนอนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะทึบแสง แสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ ฉะนั้นจึงมองเห็นเป็นสีดำ นอกจากนี้ การแสดงภาพเป็นสีเทาและสีดำ ยังสอดคล้องกับเลขอะตอมของธาตุดังได้กล่าวไปข้างต้น นั่นคือ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีเลขอะตอมน้อยกว่าธาตุซิลิคอน ที่เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของอนุภาคนาโนซิลิกา จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจจะยืนยันได้ว่า พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา จนพอลิไดอะเซทิลีนอยู่ล้อมรอบอนุภาคนาโน จึงเสมือนว่าอนุภาคนาโนซิลิกาอยู่ในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu *et al*. (2001) และ Su (2006) โดยโครงสร้างพอลิไดอะเซทิลีนที่อยู่ในส่วนด้านนอกของอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบชั้นซ้อนทับกันไปมาจำนวนหลายชั้น ซึ่งการจัดเรียงตัวนี้จะมีความเป็นระเบียบมากกว่าในส่วนของด้านในของอนุภาค

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

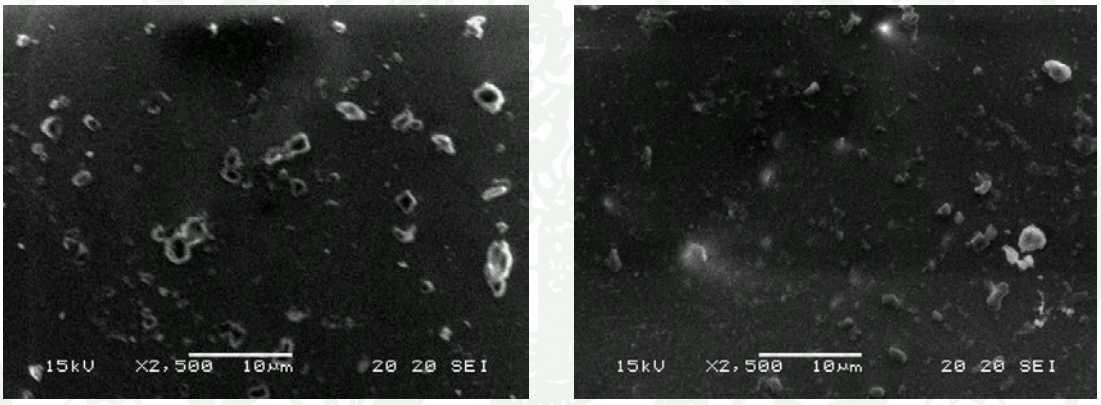
ตารางที่ 9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 60,000 เท่า

กำลังขยาย	PDA	PDA/SiO_2
10,000 เท่า		
60,000 เท่า		

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการให้ความร้อนที่ขั้วแคโทด ยิงไปยังพื้นผิววัตถุซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยโลหะแล้วสะท้อนกลับออกมา ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปกระทบพื้นผิวโลหะนั้นจะเกิดการกระตุ้นให้วัตถุเกิดพลังงานมากขึ้น แล้ววัตถุก็จะคายพลังงานออกมาในลักษณะของลำแสงอิเล็กตรอน จากนั้นอิเล็กตรอนทั้ง 2 แบบจะถูกเครื่องจับอิเล็กตรอนรวบรวมให้ไปปรากฏบนจอภาพของกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM ภาพที่ปรากฏจึงเป็นภาพ 3 มิติ แต่กำลังขยายจะไม่สูง และความหนาของตัวอย่างไม่จำเป็นต้องบาง เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM อีกด้วย ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานหรือรูปร่างโครงสร้าง และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างภายนอก โดยไม่เห็นองค์ประกอบด้านใน นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM ยังสามารถต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ หรือที่เรียกว่าเครื่อง EDS/EDX (energy dispersive X-ray spectrometer) โดยธาตุที่สามารถถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องนี้ ได้แก่ ธาตุทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ซิลิคอน (Si) คลอไรด์ (Cl) โพแทสเซียม (K) และอะลูมิเนียม (Al) จาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาจะนำสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามาหยดบนไมกาเวเฟอร์ ที่มีความมันวาว (polished mica wafer) แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปเคลือบทับด้วยผงคาร์บอนอีกครั้ง แล้วจึงนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM โดยเปรียบเทียบกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล พบว่า อนุภาคภายในสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา จะมีลักษณะกลวงหรือเกิดรูตรงกลางอย่างชัดเจน รูปร่างไม่ค่อยแน่นอน อาจมีรีบ้าง กลมบ้าง เช่นเดียวกับผลจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM (ภาพที่ 45ก) แต่เมื่อเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าไป พบว่า อนุภาคจะมีลักษณะตัน ไม่เกิดรูตรงกลาง (ภาพที่ 45ข) ฉะนั้นจึงช่วยเพิ่มน้ำหนักความน่าเชื่อถือของเหตุผลที่ว่า อนุภาคนาโนซิลิกาสามารถอยู่ในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลได้ เนื่องจากพอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาได้



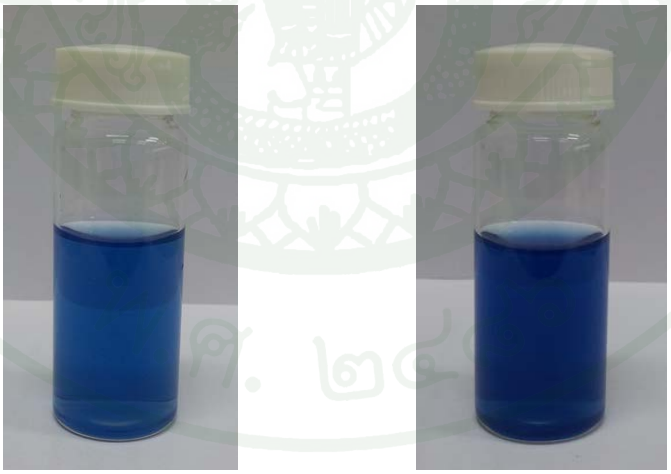
(ก) (ข)

ภาพที่ 45 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด SEM ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (15 กิโลโวลต์)

การวิเคราะห์โดยการใช้ยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่พอเหมาะกับการส่งผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic transition) ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล พลังงานจะถูกดูดกลืนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะมีออบิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น (higher energy orbital) โดยเครื่องจะบันทึกความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น นอกจากนี้ยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยังสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านคุณภาพและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

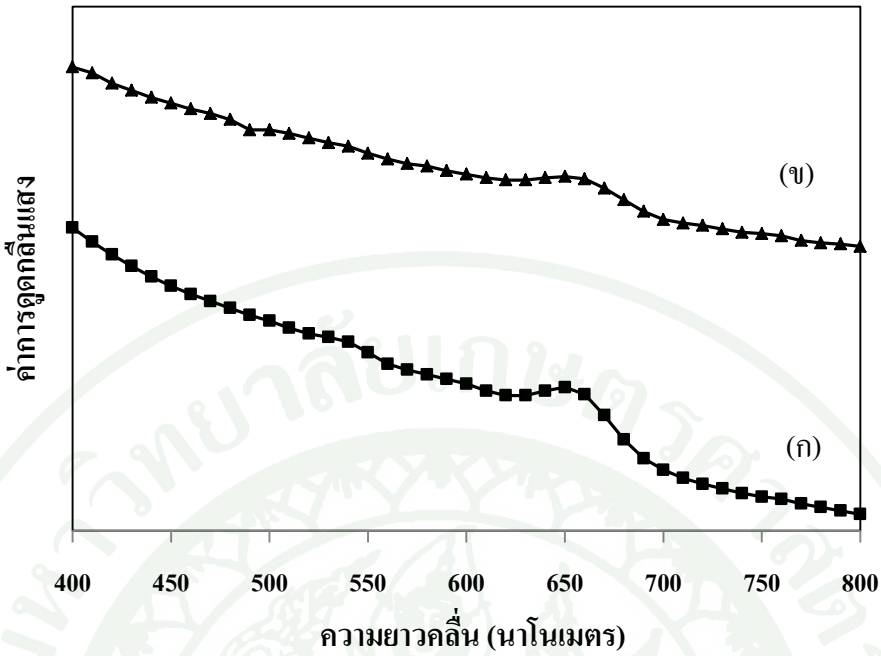
ปริมาณโดยความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะสามารถใช้ในการจำแนกชนิดของสาร ในขณะที่ปริมาณการดูดกลืนแสงจะใช้ในการบอกปริมาณของสารที่นำมาวิเคราะห์ จากการศึกษาพบว่าสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการฉายรังสียูวีภายหลังที่ไดแอซิทิลีนมอนอเมอร์สามารถจัดเรียงตัวของโมเลกุลเข้าหากันได้เอง จะเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันหรือการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลขึ้นมาใหม่ในตำแหน่ง 1 และ 4 ของไดแอซิทิลีนมอนอเมอร์ จนเกิดเป็นพันธะคู่และพันธะสามภายในโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีน และเกิดการเรียงตัวเป็นลักษณะ 2 ชั้นอยู่ในรูปของเวสิเคิล สารละลายที่ได้จะมีสีฟ้า จากนั้นนำมาวิเคราะห์การดูดกลืนแสง ที่ช่วงความคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าทั้งสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาและสารละลายพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 630-670 นาโนเมตร ซึ่งแสดงค่าความเป็นสีน้ำเงินของพอลิไดอะเซทิลีน ส่วนค่าความเป็นสีแดง จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 530-560 นาโนเมตร แต่จะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากความเป็นสีน้ำเงินมีอิทธิพลต่อการดูดกลืนแสงมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมอนุภาคนาโนจะช่วยทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 630-670 นาโนเมตร มากขึ้นด้วย นั่นแสดงว่า สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามีความเป็นสีน้ำเงินมากกว่า (ภาพที่ 46 และ 47)



(ก) (ข)

ภาพที่ 46 ความเป็นสีน้ำเงินของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ภายหลังการฉายแสงยูวี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



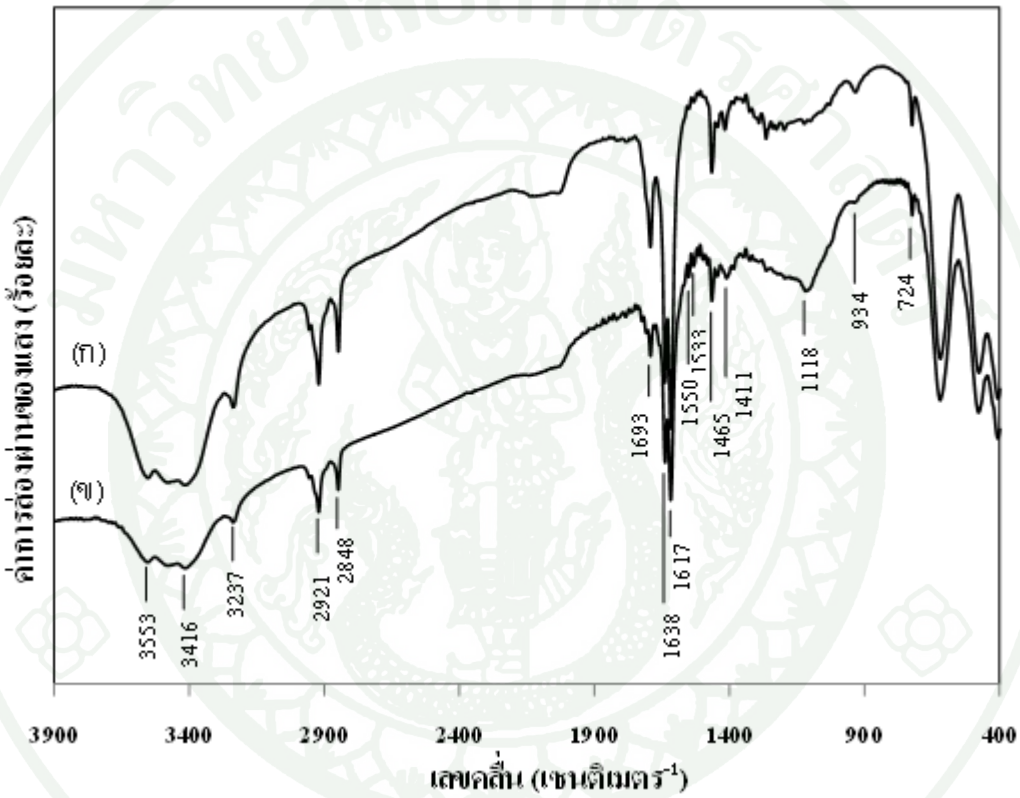
ภาพที่ 47 การดูดกลืนแสงของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข) ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร

ในงานวิจัยของ Su (2006) ได้มีการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการฉายแสงยูวีต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร และผลของการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาต่อความเข้มการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการฉายแสงยูวีให้นานขึ้น จะทำให้การดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมอนุภาคนาโนซิลิกาลงในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ได้ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรในช่วงเวลาต่างๆ พบว่า ความเข้มการดูดกลืนแสงจะมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งคงที่ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา พบว่า ความเข้มการดูดกลืนแสงค่อนข้างจะคงที่ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ฉะนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการฉายแสงยูวีและการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มค่าความเป็นสีน้ำเงินของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

สำหรับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาข้อมูลทางด้านโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ ซึ่งวัสดุนั้นอาจจะเป็นผง ของเหลว หรือแผ่นก็ได้ สำหรับตัวอย่างในงานวิจัยนี้คือ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กับอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่จำนวนมาก ฉะนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์จึงไม่ค่อยเห็นแถบสเปกตรัมของพอลิไดอะเซทิลีนและ/หรืออนุภาคนาโนซิลิกาได้อย่างชัดเจน จึงนำเอาตัวอย่างสารละลายทั้งสองนี้มาทำแห้งภายใต้ความเย็นและสุญญากาศ เพื่อให้ได้ตัวอย่างออกมาเป็นลักษณะผง ซึ่งตัวอย่างที่ได้นี้มีลักษณะเป็นผงสีน้ำเงิน จะสามารถนำไปวิเคราะห์ได้จะต้องนำไปบดร่วมกับเกลือโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นจึงค่อยนำเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์ ผลวิเคราะห์จะแสดงข้อมูลออกมาเป็นลักษณะของแถบสเปกตรัมที่เลขคลื่นนั้นๆ ซึ่งจะจำเพาะต่อหมู่ฟังก์ชัน (ภาพที่ 48)



ภาพที่ 48 แถบสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (ก) และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข)

แถบสเปกตรัมที่เกิดการส่องผ่านของแสงของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลในรูปของสารละลาย ได้แก่ OH stretching จะปรากฏที่ตำแหน่ง 3553 3416 และ 3237 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับโมเลกุลของน้ำบนพื้นผิวและกลุ่มไฮดรอกซิล (-COOH) โดยอยู่ในช่วงเลขคลื่น 3550-3450 และ 3400-3200 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากการจับกันระหว่างสองอะตอมและหลายๆ อะตอม ตามลำดับ (Huggins *et al*., 1997) CH_2 vibration แบบไม่สมมาตร และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมมาตร จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2921 และ 2848 เซนติเมตร$^{-1}$ (Mino *et al.*, 1991; Yuan *et al.*, 2007; Traiphol *et al.*, 2011) การยืดตัวของหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) ภายหลังการเกิดสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นบริเวณหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ด้านปลายสายโซ่ของ PCDA โดยจะปรากฏที่ตำแหน่ง 1693 เซนติเมตร$^{-1}$ (Kim *et al*., 2005; Yuan *et al.*, 2007; Kim *et al*., 2008) แถบสเปกตรัมที่แสดงการยืดตัวของพันธะคู่ (C=C stretching) ในโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจะปรากฏที่ตำแหน่ง 1638 และ 1617 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งโดยปกติแล้วจะพบอยู่ในช่วง 1680 ถึง 1600 เซนติเมตร$^{-1}$ (Coates, 2000) นอกจากนี้ยังพบแถบสเปกตรัมที่แสดงการสั่นของอะตอมต่างๆ ภายในโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ได้แก่ methylene (CH_2) scissoring vibration ที่ตำแหน่ง 1465 เซนติเมตร$^{-1}$ C-O stretching ที่ตำแหน่ง 1411 เซนติเมตร$^{-1}$ (Mino *et al.*, 1991) และ methylene (CH_2) rocking vibration ที่ตำแหน่ง 724 เซนติเมตร$^{-1}$ (Coates, 2000; Stuart, 2004) อีกด้วย สำหรับสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะพบแถบสเปกตรัมที่แตกต่างจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ที่ตำแหน่ง 1550 และ 1533 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอกซิเลต แอนไอออน (COO^-) ของพอลิไดอะเซทิลีน และ 1118 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ O-Si-O/Si-O-Si ซึ่งโดยปกติแล้วจะพบอยู่ในช่วง 1585 ถึง 1510 เซนติเมตร$^{-1}$ และในช่วง 1130 ถึง 1000 เซนติเมตร$^{-1}$ ตามลำดับ (Stuart, 2004; Parida *et al.*, 2006) ฉะนั้นแถบสเปกตรัมทั้งสองแบบที่เกิดขึ้นนี้สามารถยืนยันได้ว่า หมู่คาร์บอกซิเลต แอนไอออน (COO^-) ของพอลิไดอะเซทิลีน สามารถสร้างพันธะไอออนิกกับอนุภาคนาโนซิลิกาในกลุ่มของ $Si\text{-}OH_2^+$ ได้

2. ลักษณะเฉพาะและสมบัติของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

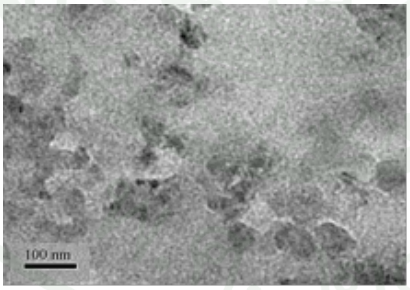
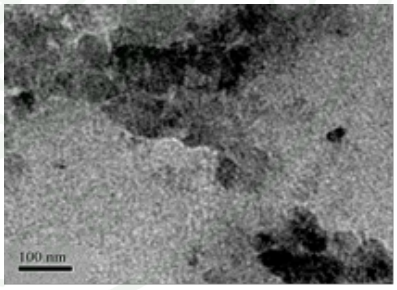
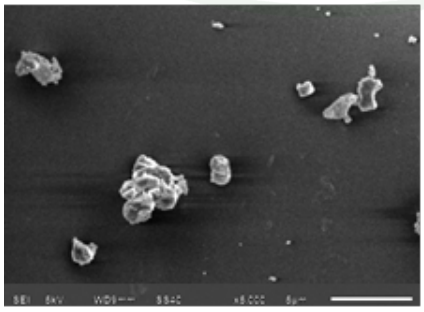
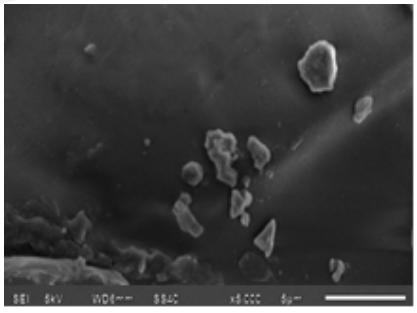
การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นเป็นแผ่นฟิล์ม เป็นวิธีใหม่ที่นำมาใช้พัฒนาการเตรียมฟิล์มด้วยพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งได้เลือกใช้ PVOH เป็นสารละลายในการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ข้อดีของการเลือกใช้ PVOH ในงานวิจัยนี้ คือ PVOH สามารถเตรียมเป็นสารละลายได้ง่ายโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายอย่างเดียว และสามารถแห้งได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง และการที่ PVOH มีน้ำเป็นตัวทำละลายชนิดเดียว จึงมีผลดีต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เนื่องจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายหรือสารเคมี ฉะนั้นถ้าในตัวทำละลายฟิล์มมีสารเคมีร่วมด้วยนอกเหนือจากน้ำ ก็อาจทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีไปถึงจุดที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปของ PVOH จะมีลักษณะใสสีน้ำเงิน โดยที่ฟิล์มที่ได้จาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีสีที่เข้มกว่าฟิล์มที่ได้จากพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

ภายหลังการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้ว จึงนำตัวอย่างฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามาศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา พบว่า ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและส่องกราดของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะแสดงลักษณะของโมเลกุลแล้วคล้ายคลึงกับผลการวิเคราะห์ในรูปสารละลายของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM และ SEM ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

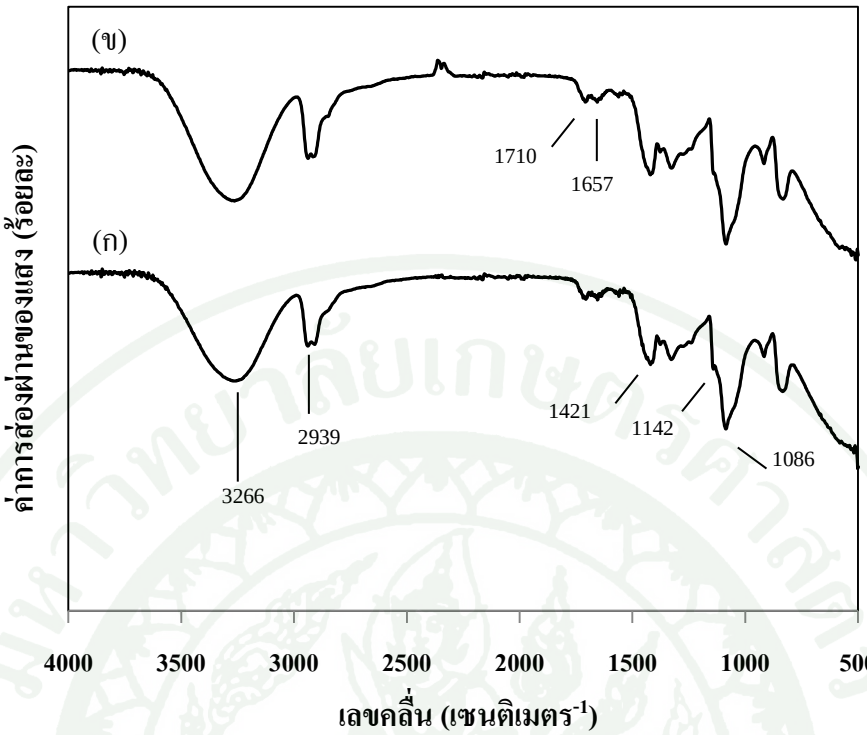
ชนิดของกล้องจุลทรรศน์	PDA	PDA/SiO_2
TEM		
SEM		

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รูปร่างของอนุภาคภายในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา มีลักษณะไม่แน่นอน บางโมเลกุลมีรีบ้าง บางโมเลกุลมีกลมบ้าง โดยจะเห็นสีเทาอย่างชัดเจน สำหรับรูปร่างของอนุภาคภายในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาจะมีลักษณะค่อนข้างกลม โดยตำแหน่งตรงกลางจะมีสีดำ แต่บริเวณรอบๆ จะมีสีเทา เนื่องจากโมเลกุลของพอลิไดอะเซทิลีนมีลักษณะโปร่งแสง แสงสามารถผ่านได้ ฉะนั้นจึงมองเห็นเป็นสีเทา ส่วนอนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะทึบแสง แสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ ฉะนั้นจึงมองเห็นเป็นสีดำ จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจจะยืนยันได้ว่า พอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาได้ จึงเปรียบเสมือนว่าอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าไปอยู่ในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล

สำหรับการศึกษาสมบัติทางเคมีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า ไม่ค่อยมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน (ภาพที่ 49) ทั้งนี้เนื่องมากจากปริมาณส่วนใหญ่ของฟิล์มมาจากส่วนของ PVOH ซึ่งทำหน้าที่ขึ้นรูปให้เป็นแผ่นฟิล์มได้ และปริมาณของอนุภาคนาโนที่เติมเข้าไปมีปริมาณน้อยมากถ้าเทียบกับสัดส่วนของสารชนิดอื่นภายในฟิล์ม ฉะนั้นแถบสเปกตรัมที่สามารถพบได้มาจากหมู่ฟังก์ชันของ PVOH เป็นหลักและรองลงมาคือพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ O-H stretching จะปรากฏในช่วงเลขคลื่น 3550 ถึง 3200 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบที่มีลักษณะกว้างมาก โดยจะสัมพันธ์กับการยืดตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ใน PVOH ที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล (Coates, 2000; Mansur *et al*., 2008) และการยืดตัวของกลุ่มอะตอมคาร์บอนกับไฮโดรเจนที่ยึดกันด้วยพันธะเดี่ยว (C-H stretching) จะปรากฏอยู่ในช่วงเลขคลื่น 2840 ถึง 3000 เซนติเมตร$^{-1}$ (Mansur *et al*., 2008) ส่วนแถบสเปกตรัมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะแสดงแถบสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่นต่างๆ ได้แก่ การยืดตัวของหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) ภายหลังการเกิดสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นบริเวณหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ด้านปลายสายโซ่ของ PCDA โดยจะปรากฏอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1720 ถึง 1700 เซนติเมตร$^{-1}$ (Kim *et al*., 2005) และการยืดตัวของกลุ่มอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอนที่ยึดกันด้วยพันธะคู่ (C=C stretching) จะปรากฏอยู่ที่เลขคลื่น 1421 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตำแหน่งที่เชื่อมระหว่าง PCDA สองโมเลกุลที่อยู่ติดกัน จนเกิดเป็นลักษณะของเวสิเคิล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 49 แถบสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน (ก) และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา (ข)

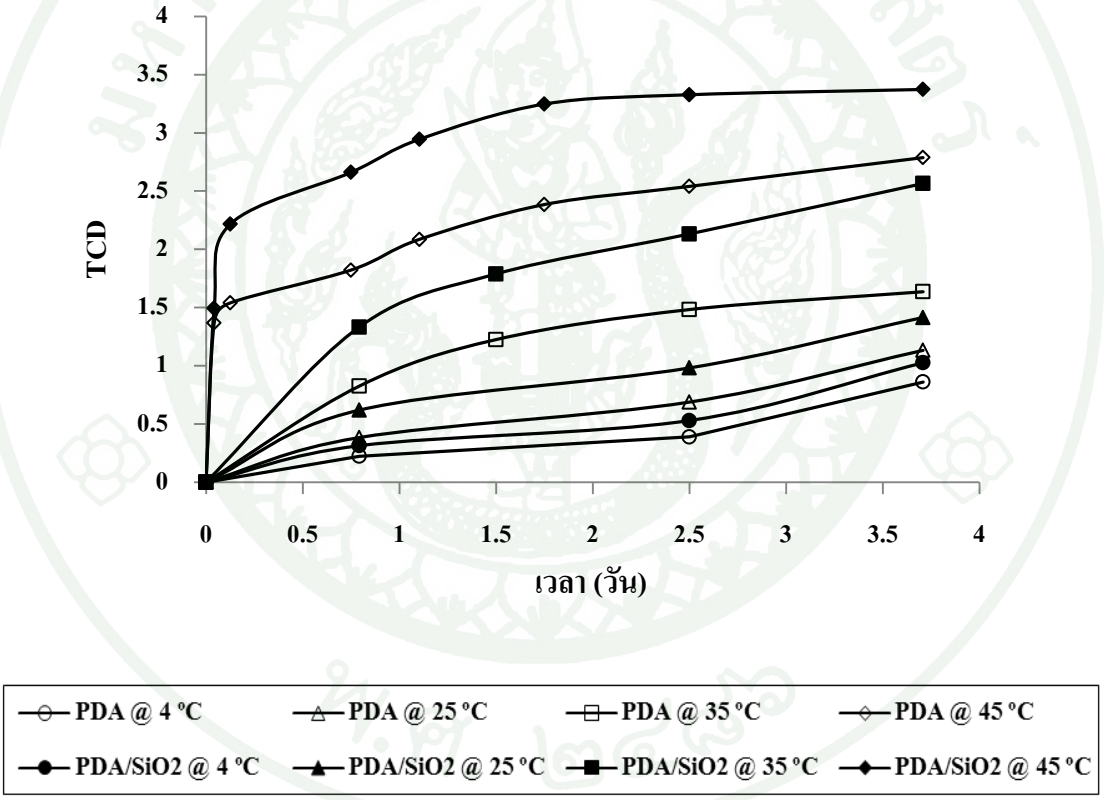
3. ผลการศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการผลิตตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

3.1 ผลของสารแอมฟีฟิลิกต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสี

จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่าสารแอมฟีฟิลิกมีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิ-ลีนเวสิเคิล โดยจะช่วยลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนสีลง ทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ภายหลังการขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหล่อ ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ได้จะมีลักษณะใสสีน้ำเงินเหมือนกัน แต่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะให้ความเข้มสีที่มากกว่า เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่ถูกเติมเข้าไปจะช่วยในการตรึงสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลให้มีความเสถียรมากขึ้น ทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลนั้นสามารถแสดงความเป็นสีน้ำเงินออกมาได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของแสงคือ โครงสร้างที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไม่มีอนุภาคนาโนซิลิกาจะเป็นโครงสร้างแบบโปร่งแสง การหักเหของแสงสะท้อนมีน้อย แต่โครงสร้างที่มีอนุภาคนาโนซิลิกาจะสามารถให้แสงส่องผ่านได้น้อยกว่า เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะทึบแสง ทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับมากกว่า จึงสามารถเห็นสีที่เข้มขึ้น และเมื่อนำฟิล์มทั้งสองประเภทนี้ไปเก็บไว้ในอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะให้ค่า TCD สูงกว่าฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนในทุกอุณหภูมิในการเก็บ และที่อุณหภูมิในการเก็บที่สูงขึ้น จะทำให้ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินและค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีแดงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิในการเก็บที่ต่ำกว่า แต่ก็ยังใช้เวลาในการเปลี่ยนสีนานอยู่ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ไม่ได้สูงมาก ซึ่งสังเกตได้จากค่า TCD ที่ให้ค่าไม่สูง นั่นคือมีค่าไม่เกิน 3.5 สำหรับที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 50)

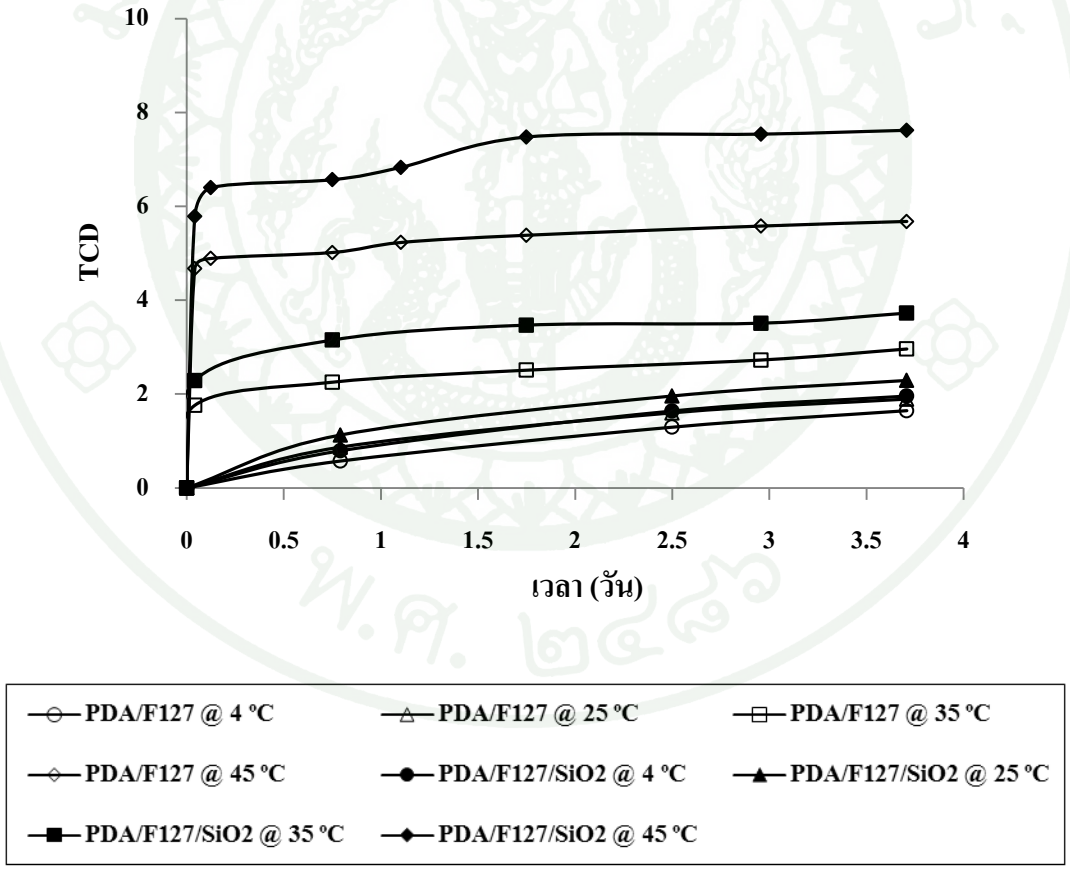


ภาพที่ 50 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส

โดยปกติแล้วค่า TCD ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป สายตามนุษย์จะสามารถเริ่มมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ ฉะนั้นในการทดลองนี้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สามารถทำให้ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีได้แต่ยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร จึงมีการปรับการเปลี่ยนสีของพอลิได

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อะเซทิลีนเวสิเคิลให้ชัดเจนขึ้น โดยเติมสารแอมฟิฟิลิกลงไปในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ภายหลังการใส่สารแอมฟิฟิลิกลงไป จะทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีน้ำเงินอมม่วง ทำให้ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะใสสีม่วง แต่เนื่องจากอิทธิพลจากอนุภาคนาโนซิลิกา จึงทำให้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามีสีค่อนข้างจะเป็นสีน้ำเงินมากกว่า และเมื่อนำฟิล์มทั้งสองประเภทนี้ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะให้ค่า TCD สูงกว่าฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนในทุกอุณหภูมิในการเก็บ และที่อุณหภูมิในการเก็บที่สูงขึ้น จะทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีจากสีได้ดีกว่าที่อุณหภูมิในการเก็บที่ต่ำกว่า (ภาพที่ 51) และเมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ได้เติมสารแอมฟิฟิลิก พบว่า การเติมสารแอมฟิฟิลิกจะให้การเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เร็วขึ้น และให้ค่า TCD ที่สูงขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมพลูโรนิก เอฟ127 ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ดังกล่าว สามารถเห็นการเปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจนเมื่อนำเอาฟิล์มในแต่ละอุณหภูมิมาเรียงเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะให้สีที่เข้มกว่าฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนในทุกอุณหภูมิการเก็บ แต่เฉดสียังอยู่ในทางเดียวกันคือ ที่อุณหภูมิต่ำ ฟิล์มแสดงเฉดสีน้ำเงิน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ฟิล์มจะค่อยๆ เปลี่ยนสีไปเป็นสีน้ำเงินปนม่วง และสีม่วงในที่สุด และเมื่อมีการเติมสารแอมฟีฟิลิกลงไป ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนจะค่อยเปลี่ยนสีจากสีม่วง ไปเป็นสีม่วงเข้ม สีม่วงปนแดง และสีแดงในที่สุด เมื่ออุณหภูมิการเก็บค่อยๆ สูงขึ้น แต่สำหรับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินปนม่วง ไปเป็นสีม่วง และสีม่วงปนแดงในที่สุด ซึ่งฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะเปลี่ยนสีไปได้ช้ากว่าฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน เนื่องจากสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคนาโนซิลิกา จึงเกิดการขยับตัวหรือเคลื่อนไหวได้น้อย ฉะนั้นจะเห็นได้ว่า การเติมสารแอมฟีฟิลิกลงไปจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลให้น้อยลง

ตารางที่ 11 การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ทั้งก่อนและหลังการเติมพลูโรนิก เอฟ127 ที่อุณหภูมิ 4 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส

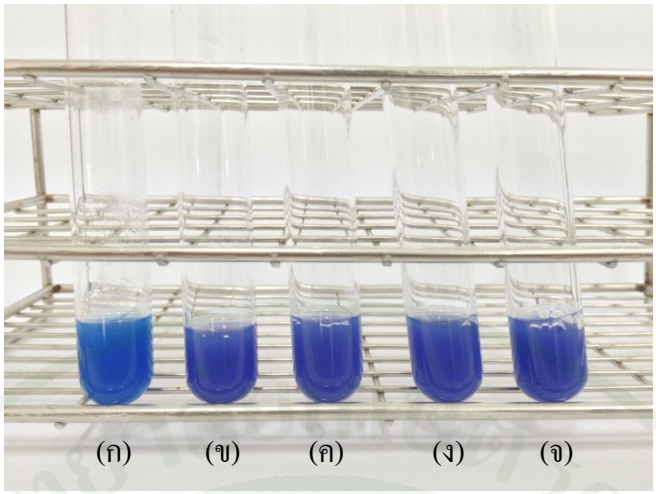
ชนิดของฟิล์ม	**4 °C**	**25 °C**	**35 °C**	**45 °C**
PDA/PVOH				
PDA/SiO_2/PVOH				
PDA/F127/PVOH				
PDA/SiO_2/F127/PVOH				

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 สูตรฟิล์มที่เหมาะสมของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา

จากการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ได้มีการนำเอาสารแอมฟิฟิลิกมาใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในฟิล์ม เนื่องจากมีความโดดเด่นในเรื่องความสามารถในการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ซึ่งจะเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการนำไปพัฒนาเป็นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นได้ ในขั้นตอนนี้ ได้เลือกใช้พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ และอนุภาคนาโนซิลิกา ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาเป็นตัวแทนในการคัดเลือกสูตรฟิล์มที่เหมาะสม เนื่องจากปัจจัยที่จะใช้เป็นส่วนประกอบในฟิล์มนี้ มีอยู่หลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของพลาสติไซเซอร์ ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่ใช้คือ พลูโรนิก เอฟ127 ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ มีอยู่ 4 ชนิด แก่ PEG-400 กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล โดยเตรียมที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ ร้อยละ 3 และ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่วนผสมระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 กับพลาสติไซเซอร์ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารแอมฟิฟิลิก ซึ่งสัดส่วนระหว่างทั้ง 2 ตัวนี้ จะพิจารณาอยู่ 3:7 4:6 และ 5:5 โดยปริมาตร สาเหตุที่เลือกสัดส่วนเหล่านี้เนื่องจากในขั้นแรกก่อนการเตรียมขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ได้ลองทดสอบส่วนผสมของทั้งคู่นี้กับสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จากอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ทั้งหมด ได้แก่ 2:8 3:7 4:6 และ 5:5 โดยปริมาตร พบว่า มีแต่สัดส่วน 2:8 เท่านั้นที่ไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่าของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ส่วนสัดส่วนอื่นสามารถเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินปนม่วง จากภาพที่ 52 จะเป็นได้ว่า เมื่อเตรียมที่อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 พลาสติไซเซอร์ทั้ง 4 ชนิดสามารถเปลี่ยนสีเริ่มต้นของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาได้ ฉะนั้นจึงนำสัดส่วน 3:7 4:6 และ 5:5 มาใช้ในการเตรียมขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มต่อไป

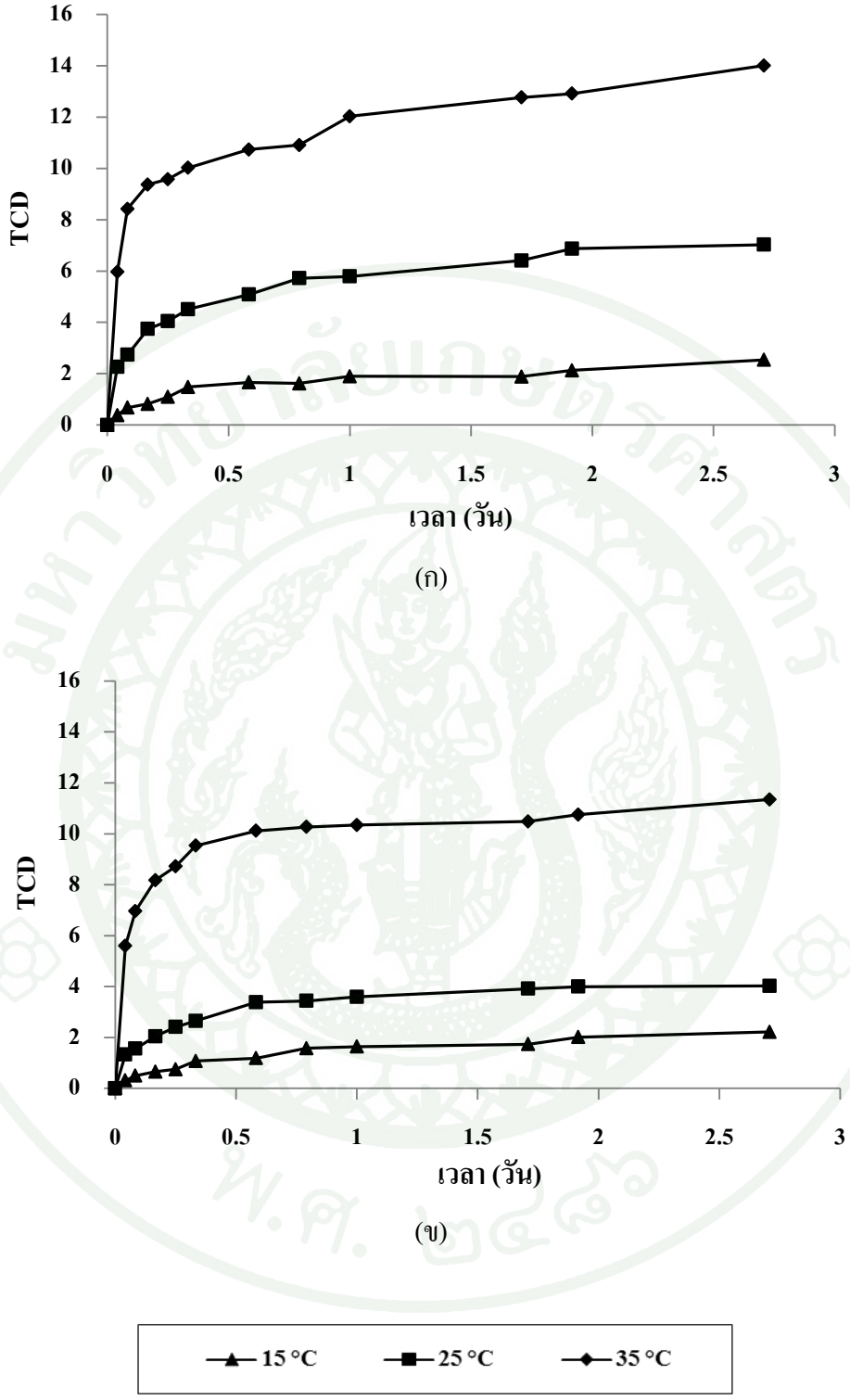
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 52 เฉดสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ภายหลังการเติมพลาติไซเซอร์ โดยไม่มีการเติมพลาติไซเซอร์ (ตัวควบคุม) (ก) PEG-400 (ข) กลีเซอรอล (ค) ซอร์บิทอล (ง) และไซลิทอล (จ) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5

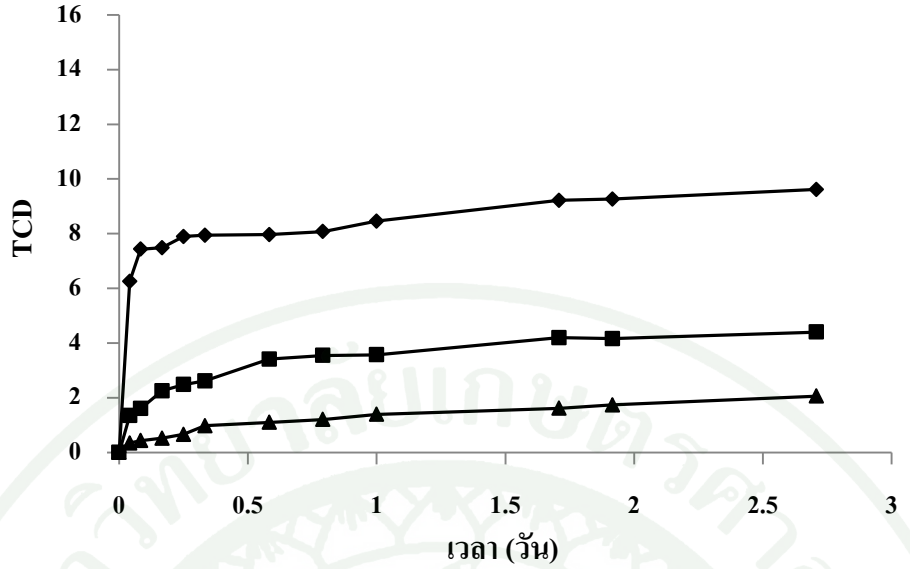
ภายหลังการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาในทั้งหมด 24 สูตร ได้แก่ P3-1 ถึง P3-4 และ P3.5-1 ถึง P3.5-4 สำหรับ PEG-400 G3-1 ถึง G3-4 และ G3.5-1 ถึง G3.5-4 สำหรับกลีเซอรอล S3-1 ถึง S3-4 และ S3.5-1 ถึง S3.5-4 สำหรับซอร์บิทอล X3-1 ถึง X3-4 และ X3.5-1 ถึง X3.5-4 สำหรับไซลิทอล ได้นำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มทุกสูตรจะให้ค่า TCD สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเก็บสูงขึ้น และสูตรฟิล์มที่ใช้ PEG-400 เป็นพลาสติไซเซอร์ จะให้ค่า TCD สูงกว่าสูตรฟิล์มที่ใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดอื่น เมื่อใช้ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 53) อย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ฟิล์มสูตร P3-2 G3-2 S3-2 และ X3-2 จะมีค่า TCD เท่ากับ 14.01 11.35 9.61 และ 9.03 ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส มีค่า TCD น้อยกว่า 3 และทั้งสองอุณหภูมินี้ ให้ค่า TCD ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 12 พบว่าที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ให้ค่าสีที่แตกต่างไปจากเดิมน้อยมาก เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับค่า TCD ของฟิล์มทุกสูตร จะแสดงอยู่ในตารางภาคผนวกที่ ข1 ถึง ข6 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้พิจารณาเพื่อคัดเลือกหาสูตรฟิล์มที่ดีที่สุด โดยแบ่งการพิจารณาจากผลของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของพลาสติไซเซอร์ ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

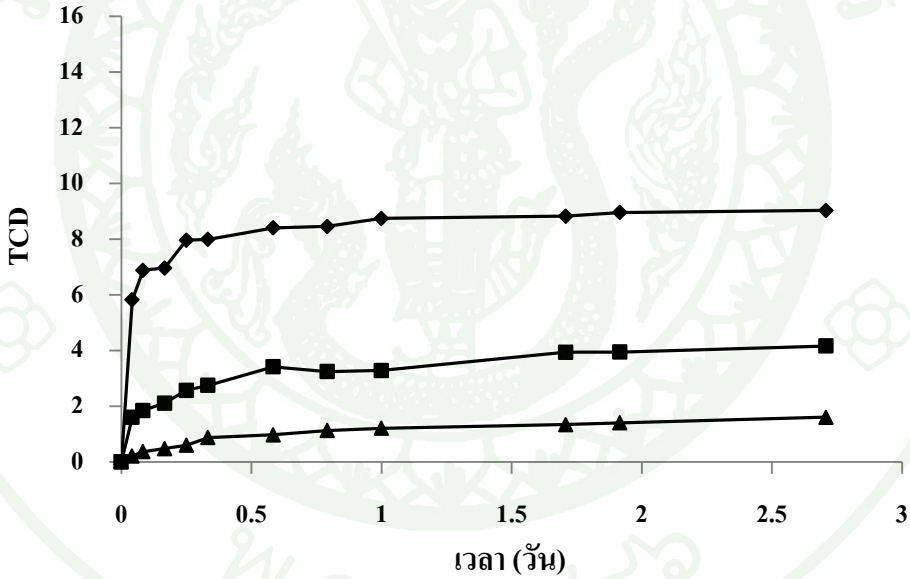


ภาพที่ 53 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) สูตร P3-2 G3-2 S3-2 และ X3-2 โดยเรียงตามชนิดของพลาสติไซเซอร์ ดังนี้ PEG-400 (ก) กลีเซอรอล (ข) ซอร์บิทอล (ค) และไซลิทอล (ง) ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส

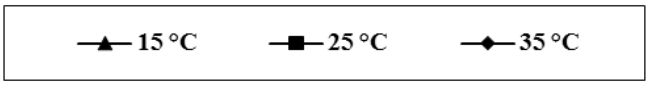
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ค)



(ง)



ภาพที่ 53 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ไม่มีและมีการเติมสารแอมฟีฟิลิก โดยสารแอมฟีฟิลิกมีส่วนผสมของพลาสติไซเซอร์ต่างชนิดกัน ที่อุณหภูมิ 5 และ 35 องศาเซลเซียส

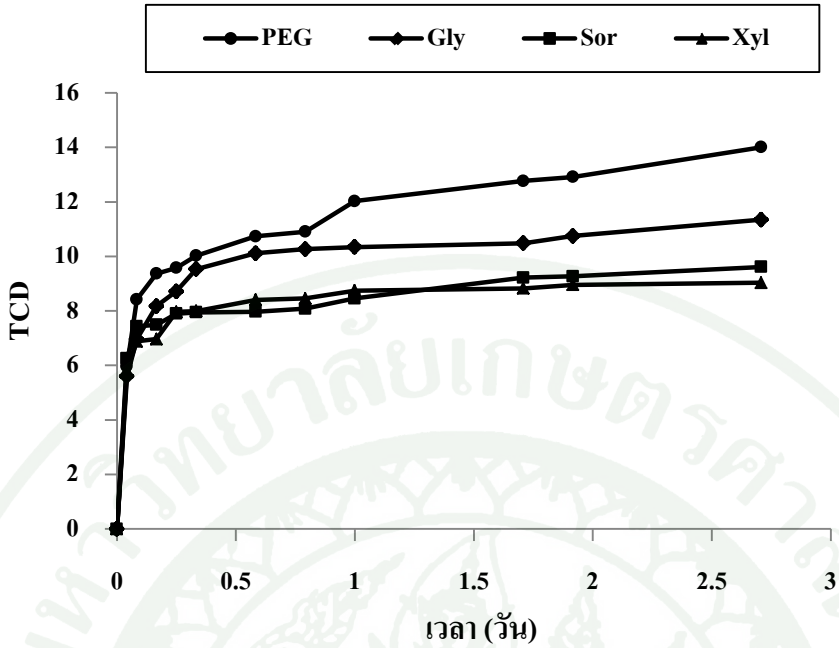
อุณหภูมิ (ºC)	PDA/SiO_2 (Blank)	PDA/SiO_2 (F127/PEG*)	PDA/SiO_2 (F127/Gly*)	PDA/SiO_2 (F127/Sor*)	PDA/SiO_2 (F127/Xyl*)
5					
35					

หมายเหตุ *PEG คือ PEG-400 Gly คือ กลีเซอรอล Sor คือ ซอร์บิทอล และ Xyl คือ ไซลิทอล

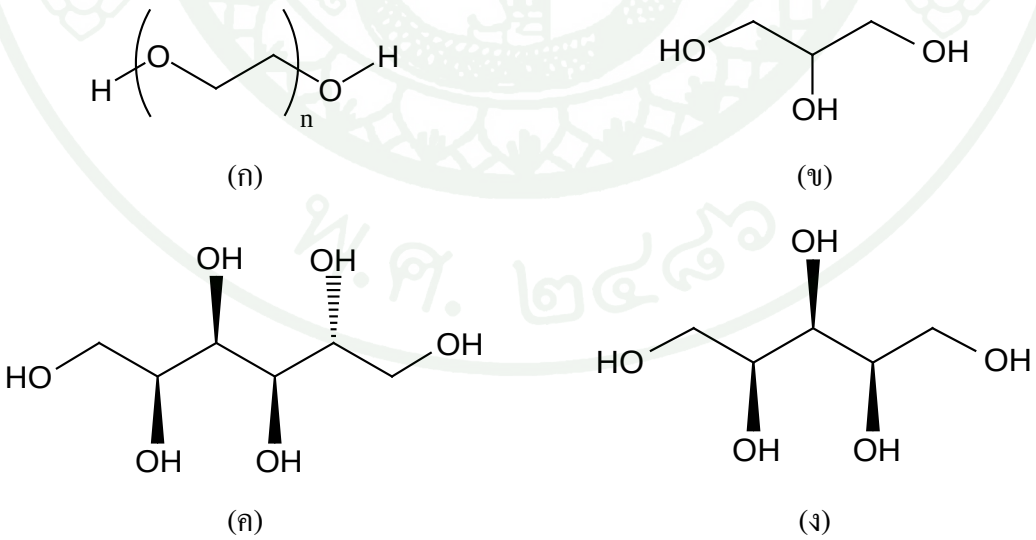
3.2.1 ผลของชนิดของพลาสติไซเซอร์

จากการทดสอบชนิดของพลาสติไซเซอร์เบื้องต้นกับสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา พบว่า พลาสติไซเซอร์ทั้ง 4 ชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งถ้าดูจากตาเปล่า จะเห็นว่า พลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 จะให้เฉดสีน้ำเงินปนม่วงที่เข้มกว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่น เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อภายหลังการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปเก็บไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส และนำออกมาวัดสีตลอดการเก็บ พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา เมื่อเตรียมที่อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก พลาสติไซเซอร์ทั้ง 4 ชนิด จะให้ค่า TCD เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจากนั้นจะค่อยๆ คงที่ โดยพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 จะให้ค่า TCD ที่สูงที่สุด หมายความว่า ฟิล์มที่ได้จะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ตามอุณหภูมิมากที่สุด โดยฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินปนม่วงไปเป็นสีม่วง (ภาพที่ 54) โดยพลาสติไซเซอร์แต่ละชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาได้แตกต่างกัน เนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์ที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 55)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 54 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 55 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 (ก) กลีเซอรอล (ข) ซอร์บิทอล (ค) และไซลิทอล (ง)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

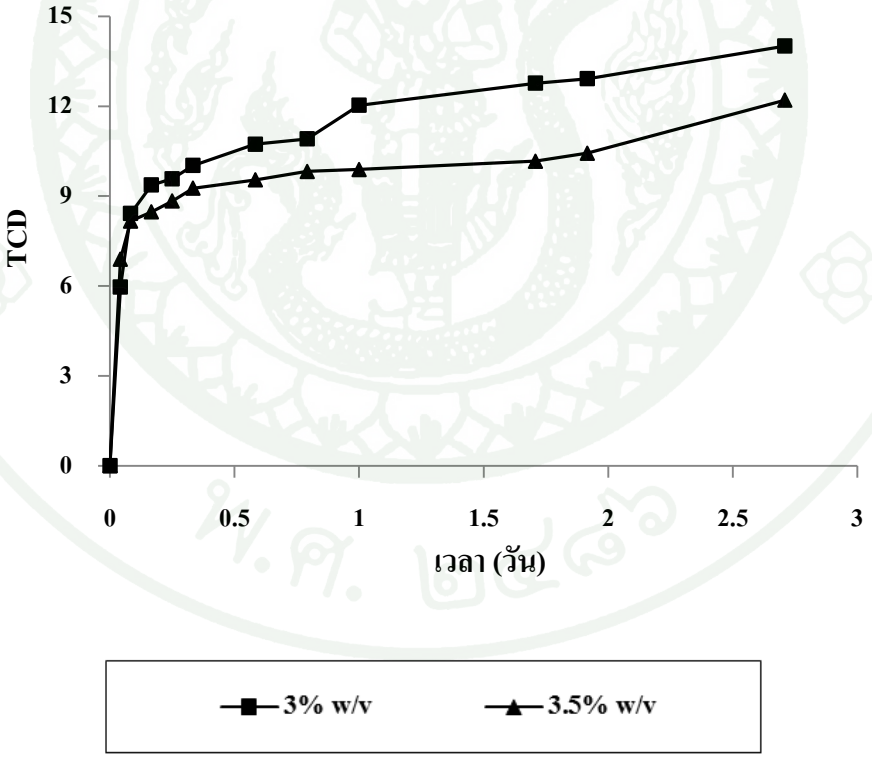
เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์เหล่านี้ พบว่า พลาสติไซเซอร์แต่ละชนิดมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแตกต่างกัน โดยพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล จะมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลเท่ากับ 2 3 6 และ 5 หมู่ ตามลำดับ พลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 จะมีความพิเศษกว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นๆ คือ PEG-400 เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการจับตัวกันด้วยหน่วยที่ซ้ำเดิม ทำให้สายเกิดการยาวขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อพิจารณาที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์จะพบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จำนวน 2 หมู่ จากความยาวของสายโซ่และจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่น้อยนี้ ทำให้มันสามารถเคลื่อนที่เข้าไปใกล้กับโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลได้มาก และอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวนี้จะสามารถส่งผลต่อการขยับหรือเคลื่อนไหวของสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทางด้านที่จับกับโมเลกุลของน้ำ นั่นคือ เมื่อสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการขยับหรือเคลื่อนไหว จะทำให้มุมของพันธะภายในโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีพันธะสามคอยเชื่อมระหว่างโมเลกุลระหว่าง PCDA ทั้งสองโมเลกุลนั่นเอง และต่อจากนั้นพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลก็จะเกิดการเปลี่ยนสีขึ้นด้วยสมบัติเฉพาะตัวของมันเอง เมื่อจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้น ก็จะทำให้มีความเป็นระเกะระกะมากขึ้นด้วย การเคลื่อนที่เข้าไปใกล้กับโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลก็จะยากขึ้น จึงทำให้โครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลยังคงมีความเสถียรภาพมากกว่า การเปลี่ยนสีก็จะเกิดขึ้นน้อยกว่า ฉะนั้นพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 จึงมีผลต่อการเปลี่ยนสีมากที่สุด รองลงมาคือ พลาสติไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล ตามลำดับ แต่เนื่องจากปริมาณที่ใช้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้ผลของพลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 และกลีเซอรอลไม่ค่อยแตกต่างกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wittaya (2013) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ต่อสมบัติของฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีนถั่วเขียว พบว่า พลาสติไซเซอร์ชนิด PEG-400 และกลีเซอรอลสามารถเป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดซอร์บิทอลสำหรับฟิล์มบริโภคได้ เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่า จึงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากกว่า นอกจากขนาดโมเลกุลแล้ว ยังมีลักษณะโครงสร้างหรือการจัดเรียงตัวของพลาสติไซเซอร์ จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของพลาสติไซเซอร์ และความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ที่สามารถมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพลาสติไซเซอร์กับพอลิเมอร์อีกด้วย (Donhowe and Fennema, 1993; Yang and Paulson, 2000)

3.2.2 ผลของความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์

จากการทดลองได้มีการเตรียมความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์อยู่ 2 ระดับคือ ร้อยละ 3 และ 3.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งความเข้มข้นนี้ถูกพิจารณามาจากการสัดส่วนของพลาสติไซเซอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก โดยมีการเทียบปริมาณกับวัสดุของแข็งที่ใช้ ซึ่งก็คือเม็ดพลาสติก ปกติจะใช้อยู่ในช่วง ร้อยละ 30 ถึง 35 ของน้ำหนักเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งในที่นี้คือ วัสดุของแข็งก็คือ ผง PVOH ซึ่งเตรียมเป็นสารละลาย PVOH เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากการทดลอง พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่ความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะให้ค่า TCD สูงกว่าที่ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ตลอดช่วงการเก็บ (ภาพที่ 56) นั่นแสดงว่า ถึงแม้ว่าพลาสติไซเซอร์จะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นยิ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ดีขึ้น แต่ถ้าปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากเกินไป อาจจะไม่ได้ช่วยเพิ่มสมบัติดังกล่าว โดยปกติแล้ว ในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก การเติมปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากเกินไป อาจจะเกิดการจับตัวกันเองและทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวขวางกั้นไม่ให้เม็ด พลาสติกรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติยืดหยุ่นต่ำลง ฉะนั้นความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการเปลี่ยนสีและให้ค่าสีที่สูงกว่า

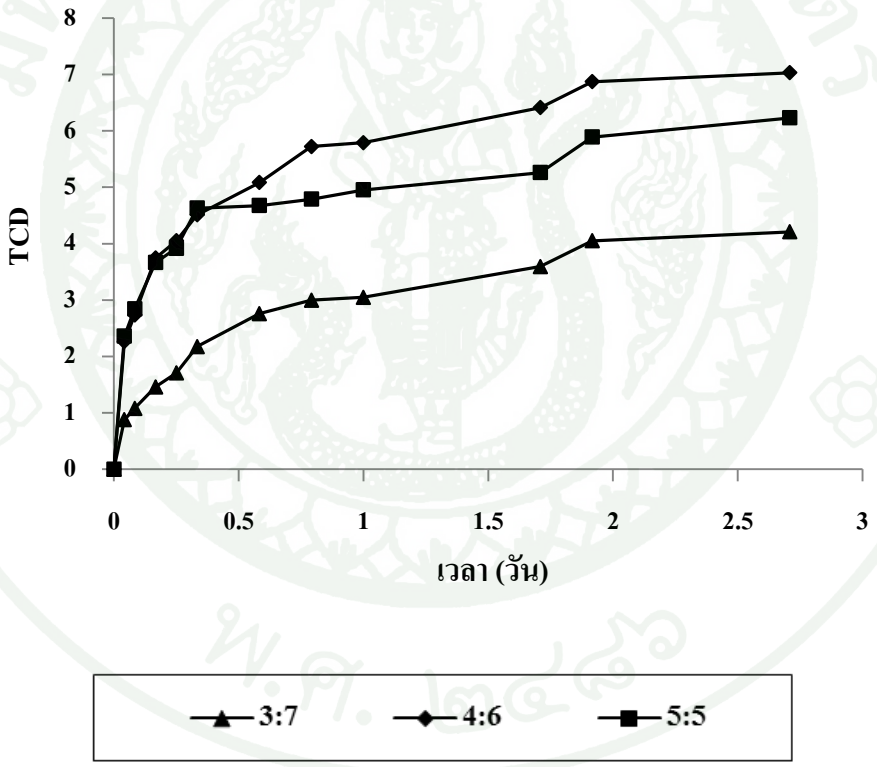


ภาพที่ 56 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมี PEG-400 เป็นพลาสติไซเซอร์ และมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์

ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ที่เลือกใช้มีอยู่ 3 ระดับ ได้แก่ 3:7 4:6 และ 5:5 จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงเลือกพิจารณาในกลุ่มของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มี PEG-400 เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และเก็บไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส มาเป็นตัวแทนในการพิจารณาเลือกอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสม พบว่า ฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 จะให้ค่า TCD สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ตลอดช่วงการเก็บ (ภาพที่ 57) ฉะนั้นจึงเลือกอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์ที่ 4:6 มาใช้ในการเตรียมสูตรฟิล์มที่เหมาะสมต่อไป



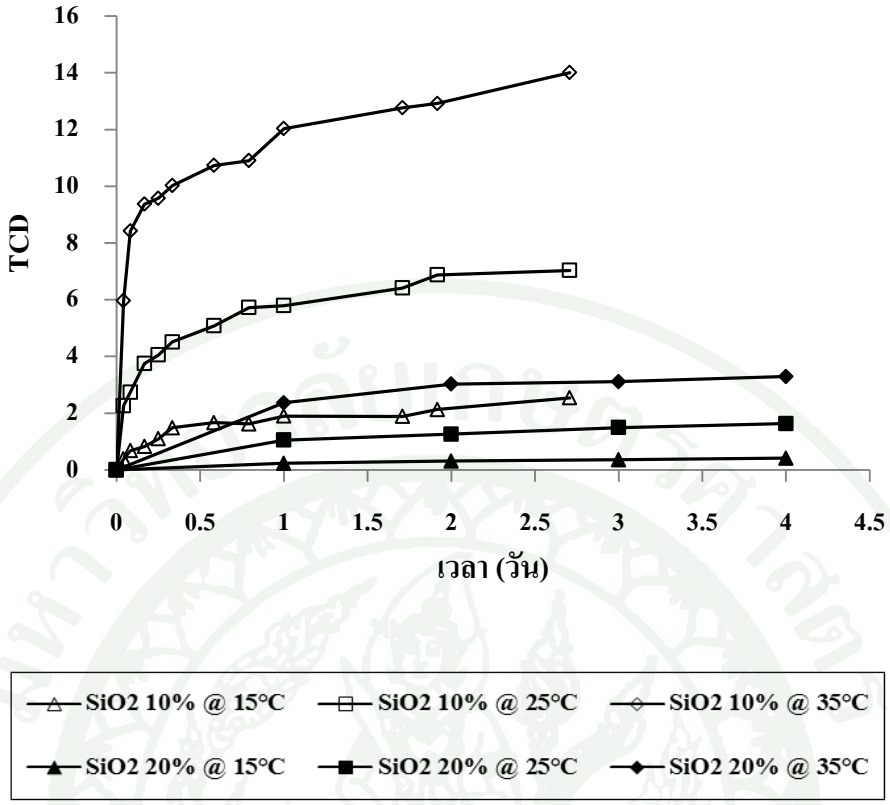
ภาพที่ 57 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) ที่มีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์แตกต่างกัน โดยมี PEG-400 เป็นพลาสติไซเซอร์และมีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาต่อการเปลี่ยนสี

จากผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จึงทำให้ทราบถึงปริมาณและส่วนประกอบที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมสูตรฟิล์ม สูตรฟิล์มที่เหมาะสมจะประกอบด้วยพอลิไดอะเซทิลีนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ อนุภาคนาโนซิลิกา PEG-400 ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 และ PEG-400 เป็น 4:6 และสารละลาย PVOH จากสูตรดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ยังไม่ทราบความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เหมาะสมเพื่อใช้พัฒนาเป็นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น ซึ่งความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา เนื่องจากมันสามารถช่วยตรึงโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล จึงทำให้โครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการขยับหรือเคลื่อนไหวน้อย ฉะนั้นสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลยังคงมีความเป็นสีน้ำเงินมากกว่าความเป็นสีแดง นั่นคือ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเกิดการเปลี่ยนสีไปจากเดิมน้อยมาก แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เติมลงไปด้วย ถ้าหากมีปริมาณมากเกินไป พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลก็อาจจะเกิดการเปลี่ยนสีน้อย เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิในระดับหนึ่ง ฉะนั้นในขั้นตอนนี้ จึงมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของอนุภาคนาโนที่ใช้ในระดับแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 1 5 10 และ 20 โดยเตรียมความเข้มข้นของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเป็น 5 มิลลิโมลาร์ และใช้สูตร P3-2 พบว่า เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาอยู่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิการเก็บมากกว่า 15 องศาเซลเซียส และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจะเห็นการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนเมื่อเก็บไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส และมากกว่า 35 องศาเซลเซียส สำหรับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาอยู่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ (ภาพที่ 58)

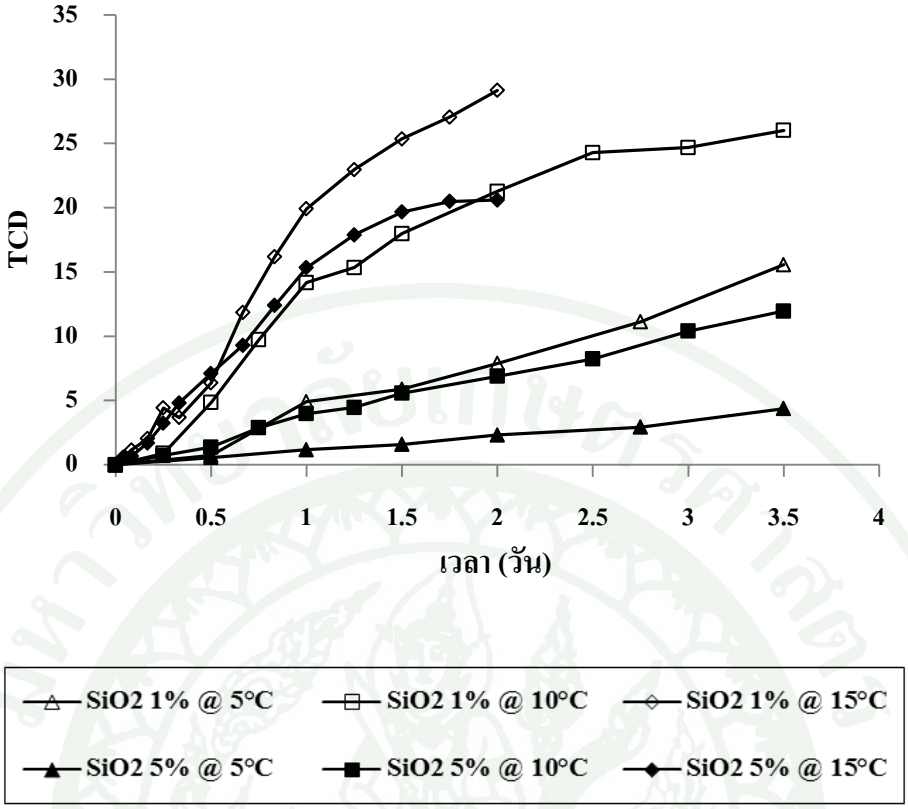
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 58 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10 และ 20) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส

แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิการเก็บต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสได้ และเมื่อพิจารณาจากค่า TCD พบว่า ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะให้ค่า TCD สูงกว่าที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากสีเริ่มต้นของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะให้สีม่วง แต่ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะให้สีน้ำเงินปนม่วง ซึ่งเฉดสีของฟิล์มที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีแดงได้ง่ายและเร็วกว่า เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (ภาพที่ 59)

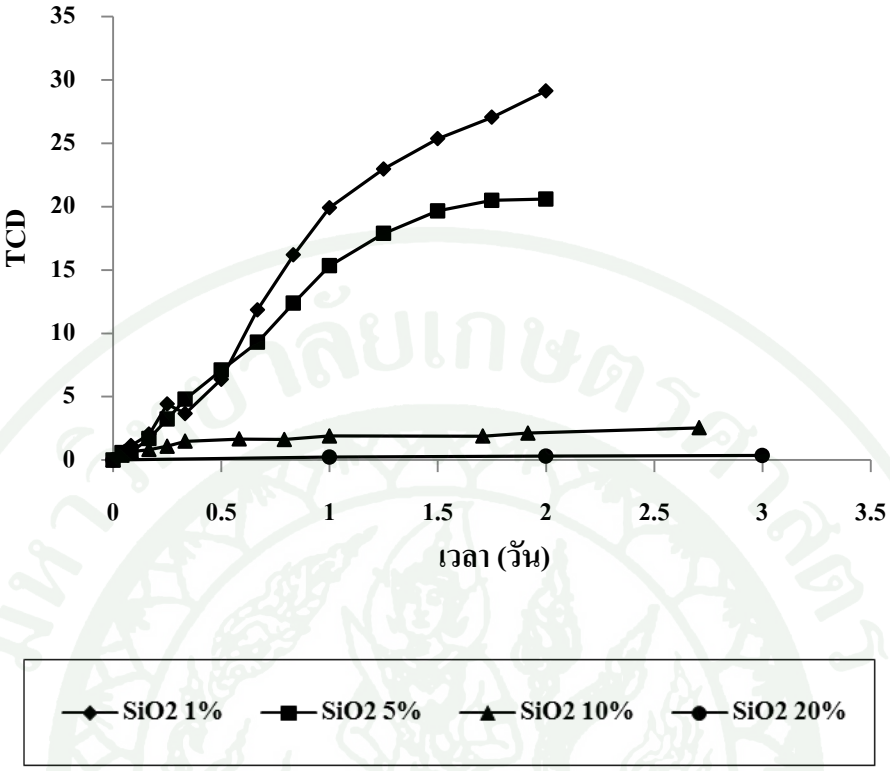
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 59 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 5 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า TCD ของฟิล์มที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมาก (ภาพที่ 60) นั่นแสดงว่า ฟิล์มที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถที่นำไปใช้ศึกษาที่ภาวะการเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสได้ ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่สนใจศึกษาและพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่นำไปใช้ติดตามการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น ซึ่งอุณหภูมิแช่เย็น จะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส ฉะนั้นถ้าต้องการให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส จะต้องลดปริมาณของอนุภาคนาโนซิลิกาให้น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นต้นไป

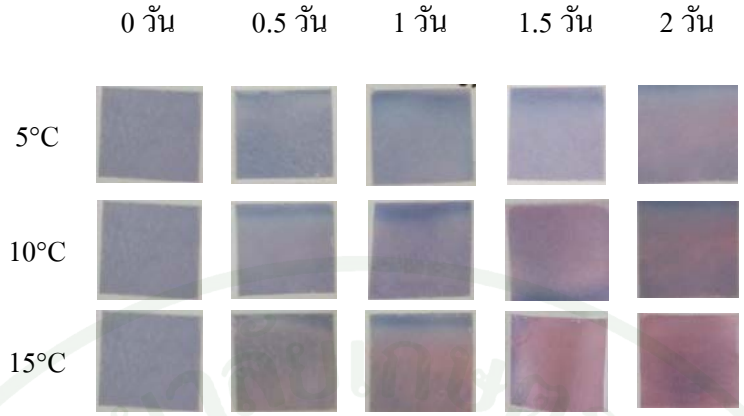
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



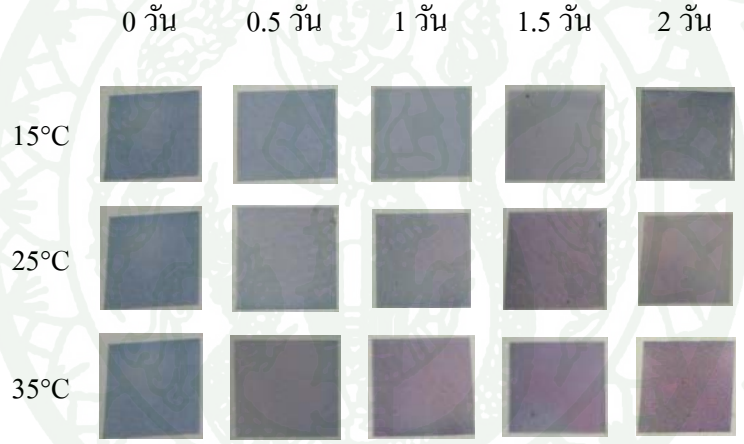
ภาพที่ 60 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกาแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 1 5 10 และ 20 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 61 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิการเก็บแตกต่างกัน ในระยะเวลา 2 วัน พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงไปเป็นสีแดงในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 61 การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 (ก) และ 10 (ข) โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิการเก็บแตกต่างกัน ในระยะเวลา 2 วัน

3.4 จลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

จากภาพที่ 58 และ 59 ซึ่งแสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 5 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถนำไปใช้ศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุณหภูมิได้ โดยใช้โปรแกรม KyPlot ที่ทำหน้าที่จัดกราฟที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงให้มีลักษณะเป็นเส้นตรงได้ เพื่อนำกราฟเส้นตรงที่ได้ไปจัดให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะแสดงวิธีคำนวณเฉพาะฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เท่านั้น

เริ่มต้นจากต้องปรับค่า TCD ใหม่เพื่อทำให้เป็นค่ามาตรฐาน โดยนำค่า TCD ที่ได้จากการทดลองมาพลอตกราฟกับเวลาแล้วหาสมการเส้นแนวโน้มที่มีค่า R^2 สูงสุด จากนั้นนำเวลาไปแทนค่า x ในสมการที่เลือกมา ทำให้ได้ค่า TCD ใหม่ ซึ่งสมการที่ได้แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บและชนิดของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ดังแสดงตามสมการที่ 14-19 ซึ่งมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9953-0.9998 จากแนวคิดของ Hong and Park (2000) ทำให้ได้ค่า $F(X)$ ซึ่งนำมาพลอตกราฟกับค่า TCD ใหม่ โดยให้แกน y คือ ค่า $F(X)$ ที่ได้จากแนวคิดของ Hong and Park (2000) และแกน x คือ ค่า TCD ใหม่ สามารถสร้างสมการได้ด้วยโปรแกรม KyPlot ดังแสดงตามสมการที่ 20-25 ซึ่งเลือกสมการที่ให้ค่า R^2 สูงสุด หลังจากนั้นจากการใช้โปรแกรม KyPlot จะได้ค่า $F(X)$ ใหม่ ให้นำค่า $F(X)$ ใหม่กับเวลาไปพลอตกราฟ และหาสมการเส้นแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง จะได้ค่าความชันของกราฟหรือค่า k ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก ปรับค่า TCD ใหม่เพื่อทำให้เป็นค่ามาตรฐาน โดยการพลอตกราฟระหว่างค่า TCD ที่ได้จากการทดลองกับเวลา และหาสมการเส้นแนวโน้มที่ให้ค่า R^2 สูงสุด ดังนี้

ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = -3E\text{-}06x^3 + 0.0004x^2 + 0.1628x \quad (R^2 = 0.9924) \tag{14}$$

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = -1E\text{-}08x^4 + 2E\text{-}06x^3 - 3E\text{-}05x^2 + 0.0435x \quad (R^2 = 0.9968) \tag{15}$$

ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = -0.0037x^2 + 0.6188x \quad (R^2 = 0.9838) \tag{16}$$

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = 4E\text{-}06x^3 - 0.0006x^2 + 0.1641x \quad (R^2 = 0.9958) \tag{17}$$

ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = -0.0004x^3 + 0.0204x^2 + 0.4951x \quad (R^2 = 0.9913) \tag{18}$$

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = -3E\text{-}06x^4 - 0.0005x^3 + 0.0163x^2 + 0.4758x \quad (R^2 = 0.9973) \tag{19}$$

เมื่อ y = ค่า TCD ที่ได้จากการทดลอง และ x = เวลา (วัน)

ขั้นที่สอง แทนค่า x = เวลา (วัน) ลงในสมการที่ 14-19 ทุกอุณหภูมิการเก็บ เพื่อคำนวณหาค่า y ใหม่ หรือค่า TCD ใหม่ นั่นเอง

ขั้นที่สาม สร้างสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(X)$ จากแนวคิดของ Hong and Park (2000) กับค่า TCD ใหม่ ด้วยโปรแกรม KyPlot ดังนี้

ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = 4.891E\text{-}04 + 0.0300x \quad (R^2 = 0.9936) \tag{20}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = 0.0064 + 0.0561x + 0.0016x^2 \quad (R^2 = 0.9977) \tag{21}$$

ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = 0.0083 + 0.0348x + 4.72\text{E-}05x^2 \quad (R^2 = 0.9987) \tag{22}$$

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = 0.0049 + 0.0625x \quad (R^2 = 0.9938) \tag{23}$$

ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะได้ว่า

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1;

$$y = -0.0014 + 0.0433x \quad (R^2 = 0.9995) \tag{24}$$

ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5;

$$y = 0.0129 + 0.0470x \quad (R^2 = 0.9975) \tag{25}$$

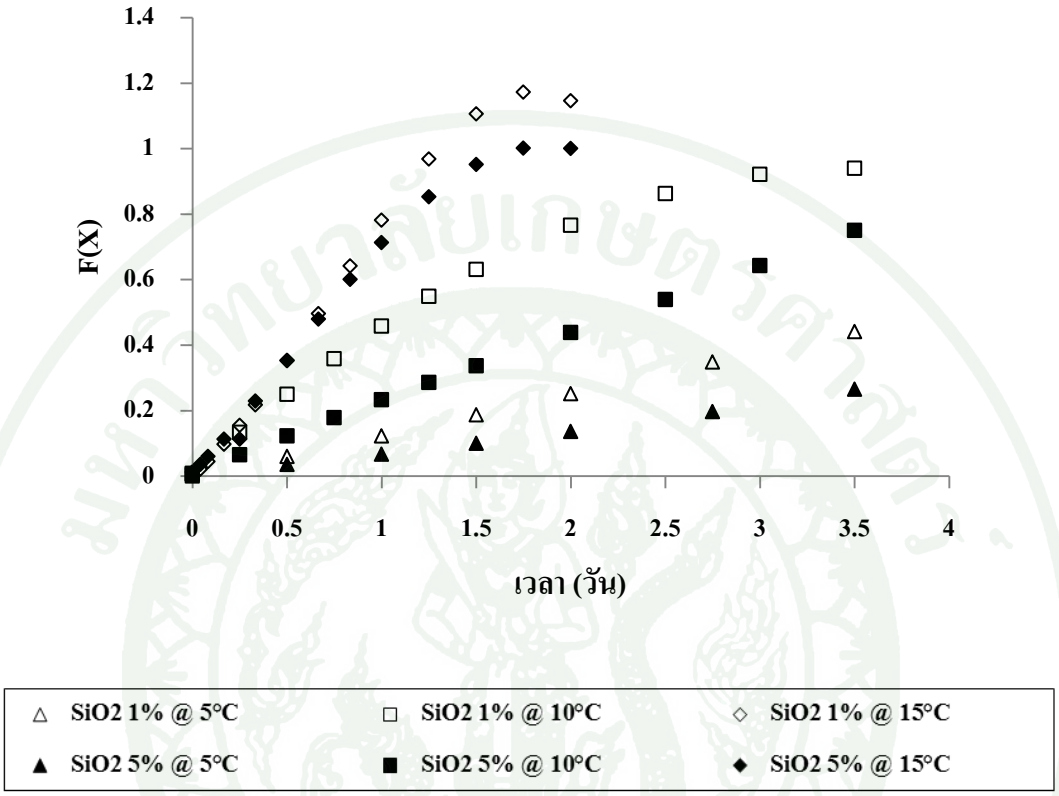
เมื่อ $y = F(X)$ และ $x =$ ค่า TCD ใหม่

ขั้นที่สี่ ได้ค่า $F(X)$ ใหม่ จากโปรแกรม KyPlot

ขั้นที่ห้า พลอตกราฟระหว่างค่า $F(X)$ ใหม่ที่ได้กับเวลา ตามสมการที่ 9 ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นเมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า *F(X)* ใหม่ที่ได้กับเวลาแล้ว จะได้กราฟเส้นตรงที่ตัดแกน $x = 0$ (ดังภาพที่ 62) และค่าความชันที่ได้จากกราฟ ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา



ภาพที่ 62 กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5) สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส

สำหรับการวิเคราะห์ค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 1 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0046 วัน$^{-1}$ และ 0.9503 ตามลำดับ ส่วนตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0031 วัน$^{-1}$ และ 0.9765 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 1 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0137 วัน$^{-1}$ และ 0.8658 ตามลำดับ ส่วนตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0091 วัน$^{-1}$ และ 0.9976 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 1 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0284 วัน$^{-1}$ และ 0.9672 ตามลำดับ ส่วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

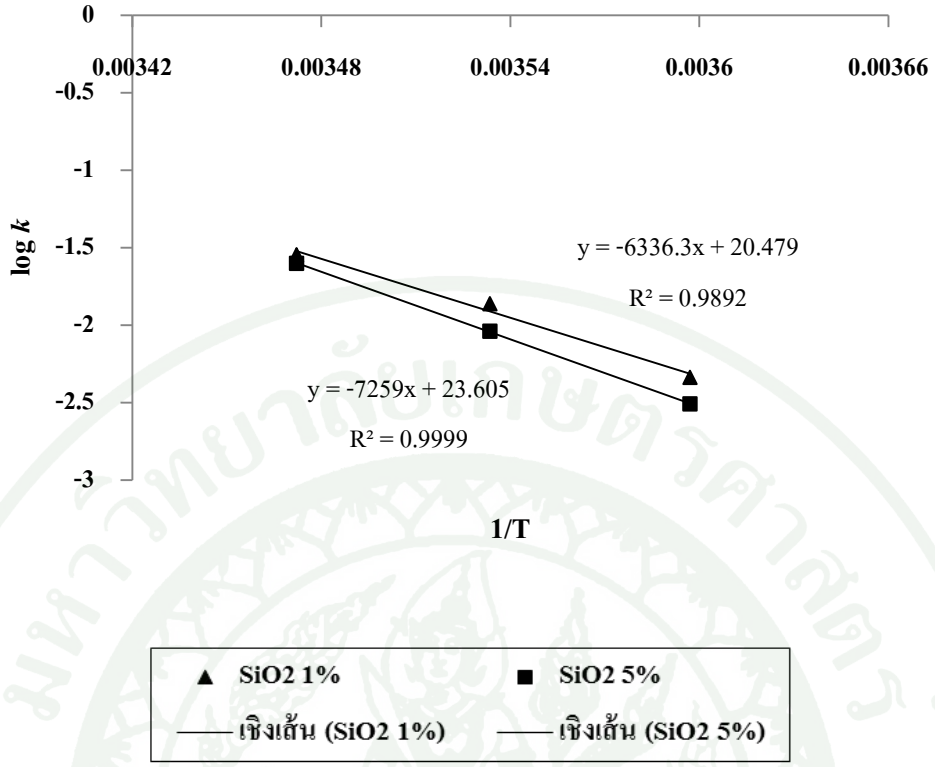
ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0250 วัน$^{-1}$ และ 0.9534 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดที่มีอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1 และ 5 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ			
	SiO_2 1% สูตร P3-2		SiO_2 5% สูตร P3-2	
	k (day^{-1})	R^2	k (day^{-1})	R^2
5	0.0046	0.9503	0.0031	0.9765
10	0.0137	0.8658	0.0091	0.9976
15	0.0284	0.9672	0.0250	0.9534

จากค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่ได้นี้ สามารถนำไปใช้คำนวณหาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ โดยอาศัยสมการของอาร์รีเนียส ตามสมการที่ 10 และ 11 ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งจะพลอตกราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของค่า k กับส่วนกลับของอุณหภูมิ (ภาพที่ 63) ทำให้สามารถหาพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ จากความชันของสมการที่ 11 ภายหลังการคำนวณ พบว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 1 มีค่าเท่ากับ 121.32 กิโลจูลต่อโมล ส่วนพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 138.99 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าสูงกว่า แสดงว่าตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 สามารถเกิดการเปลี่ยนสีสัมพันธ์กับอุณหภูมิได้ดีกว่าที่อุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 15 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 63 กราฟระหว่างค่าลอการิทึมฐาน 10 ของค่า *k* กับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) สูตร P3-2 (ก) และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 (ข) ที่อุณหภูมิ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส

ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิทั้งสองชนิดที่ได้นี้ มีค่ามากกว่า 100 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งใกล้เคียงกับตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่มีจำหน่ายทางการค้า เช่น Check point® Type M และ S TT Sensor™ และ (eO)® เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสัมพันธ์กับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการสูญเสียคุณภาพอาหาร ประเภทการเปลี่ยนแปลงด้วยการเจริญจุลินทรีย์ (83.68-251.04 กิโลจูลต่อโมล) การสูญเสียสารอาหาร (83.68-125.52 กิโลจูลต่อโมล) และการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ (104.60-209.20 กิโลจูลต่อโมล) อีกด้วย (ภาณุวัฒน์, 2552; Labuza, 1982) ฉะนั้นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 จึงถูกนำไปใช้ติดตามการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนังในขั้นต่อไป

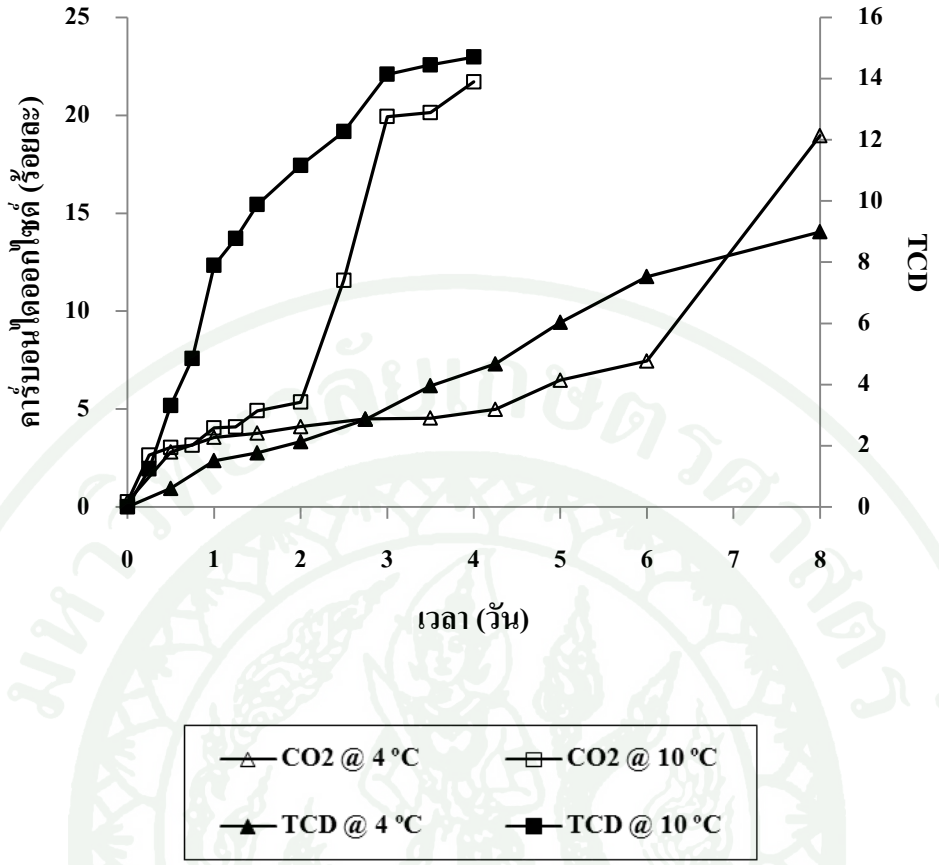
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นที่นำมาใช้ทดสอบกับตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นมาได้ คือ เนื้ออกไก่ลอกหนัง โดยการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนังเกิดจากการเจริญของจุลินทรีย์เป็นหลัก จากนั้นค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ และผิวของผลิภิตภัณฑ์ซีดจางลง เป็นต้น กระบวนการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนังภายในบรรจุภัณฑ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเนื้ออกไก่ลอกหนังเริ่มเน่าเสีย จุลินทรีย์จะใช้สารอาหารที่มีอยู่ในการเจริญเติบโต พร้อมทั้งผลิตสารเมทาบอไลต์ เมื่อระยะเวลาผ่านไป สารเมทาบอไลต์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุลินทรีย์ จากงานวิจัยของ Rukchon *et al*. (2014) พบว่า สารเมทาบอไลต์ที่พบในการเน่าเสียของเนื้ออกไก่ลอกหนังและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับการเจริญของจุลินทรีย์ได้ดี คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส จะมีอายุการเก็บรักษาอยู่ที่ 6.12 และ 2.78 วัน ตามลำดับ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยเพิ่มปริมาณมากขึ้นภายในช่องว่างของภาชนะบรรจุหรือเหนือผิวของอาหาร ไปพร้อมกับปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย และการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อการเจริญของจุลินทรีย์มากขึ้นไปถึงระดับที่บ่งชี้ว่าเนื้ออกไก่ลอกหนังเกิดการเน่าเสียแล้ว คือ จำนวนจุลินทรีย์เกิน 10^7 โคโลนีต่อกรัม สภาพเนื้ออกไก่ลอกหนังจะมีสีซีด น้ำไหลเยิ้มปรากฏให้เห็นชัด นั่นหมายถึงผู้บริโภคไม่ควรรับประทาน เนื่องจากอาจเกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ ซึ่งถ้ามีการติดตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิไปพร้อมกับบรรจุภัณฑ์ ผู้บริโภคจะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากภายนอกภาชนะบรรจุ และจะช่วยให้เพิ่มการตัดสินใจเลือกคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคได้

การทดลองนี้ได้อ้างอิงการบรรจุเนื้ออกไก่ลอกหนังตามถาดบรรจุภัณฑ์จริงที่มีขายตามท้องตลาด ยี่ห้อเอส-เพียว เพื่อจะได้ติดตามกระบวนการเสื่อมเสียคุณภาพให้สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยมีการควบคุมปริมาณเนื้ออกไก่ลอกหนังและปริมาตรภายในบรรจุภัณฑ์ตามบรรจุภัณฑ์จริง ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะแสดงอยู่ในภาพผนวกที่ ก1 ก2 และตารางภาคผนวกที่ ค1 ภายหลังเตรียมบรรจุภัณฑ์เนื้ออกไก่ลอกหนังแล้ว ได้มีการติดตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิไว้ด้านนอกของกล่องบรรจุเนื้ออกไก่ลอกหนัง ในที่นี้เลือกใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 โดยตรวจวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกับการวัดสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการเก็บ ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส พบว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นมีปริมาณมากขึ้นตามอุณหภูมิการเก็บ โดยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นเมื่อเนื้ออกไก่ลอกหนังเริ่มเกิดการเน่าเสียมีค่าประมาณร้อยละ 10 และ 12 และค่า TCD มีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 9 และตั้งแต่ 0 ถึง 15 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 64)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

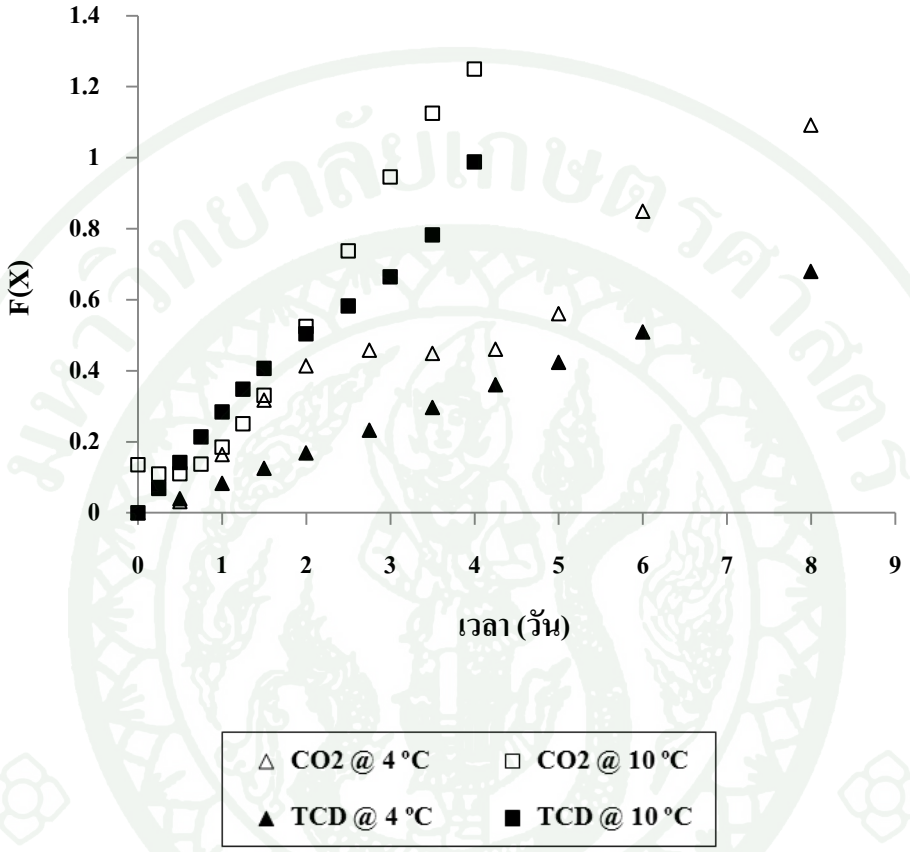


ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเนื้ออกไก่ลอกหนังและค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส

โดยอุดมคติการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่า TCD ที่อุณหภูมิเดียวกันควรจะอยู่ในแนวตำแหน่งเดียวกัน (alignment) สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 64 พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น โอกาสการเหลื่อมของตำแหน่งที่เวลาเดียวกันมีมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเกิดเวลาล้าหลัง (lag time) ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นเมทาบอไลต์จากการเจริญของจุลินทรีย์ แสดงว่าจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในช่วงเริ่มต้นยังไม่พร้อมที่จะเจริญในช่วงทวีคูณ (log phase) เมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ซึ่งความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา จากผลดังกล่าวจึงเป็นหลักฐานสำคัญที่พิสูจน์ว่า ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิมีข้อจำกัด ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความแม่นยำลดลงเนื่องจากเป็นตัวชี้วัดคุณภาพทางอ้อมที่อาศัยข้อสมมติว่าจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนนั้นจะต้องพร้อมที่จะเจริญทันทีในช่วงทวีคูณ ซึ่งมีอัตราการเจริญสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังแสดงในช่วง 2 วันแรกที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และจากข้อมูลในภาพที่ 64 นี้สามารถนำไปใช้ศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้ โดยใช้โปรแกรม KyPlot ดังที่อธิบายวิธีการคำนวณไปแล้วข้างต้น (ตามข้อ 3.4) ทำให้ได้ค่า *F(X)* และเมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า *F(X)* ที่ได้กับเวลา จะทำได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 65



ภาพที่ 65 กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้ออกไก่ลอกหนังและค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส

จากนั้นสามารถหาค่าความชันจากกราฟเส้นตรงนี้ได้ ค่าความชันที่ได้นี้เรียกว่า ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาหรือค่า *k* ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีค่า *k* และ R^2 เท่ากับ 0.0056 วัน$^{-1}$ และ 0.9325 และ 0.0035 วัน$^{-1}$ และ 0.9999 สำหรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่า *k* และ R^2 เท่ากับ 0.0124 วัน$^{-1}$ และ 0.9555 และ 0.0100 วัน$^{-1}$ และ 0.9837 สำหรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 14

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้ออกไก่ลอกหนัง และตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	CO_2		ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ*	
	k (day^{-1})	R^2	k (day^{-1})	R^2
4	0.0056	0.9325	0.0035	0.9999
10	0.0124	0.9555	0.0100	0.9837

หมายเหตุ * ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ คือ ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2

จากค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่ได้นี้ สามารถหาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ ซึ่งจะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนัง มีค่าเท่ากับ 86.36 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการตอบสนองค่าสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 114.06 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการตอบสนองค่าสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 มีค่ามากกว่า อาจเนื่องจากการเลือกใช้เนื้ออกไก่ลอกหนังได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมาก่อน จึงมีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นในระหว่างการเก็บรักษา นั่นคือ ปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นอาจจะมีน้อยกว่าผลิตภัณฑ์เนื้ออกไก่ลอกหนังสดที่ชำแหละขายในท้องตลาด ฉะนั้นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดซิลิการ้อยละ 5 สามารถนำไปใช้ติดตามการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนังได้ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้เมื่อเนื้ออกไก่ลอกหนังเกิดการเน่าเสียแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 66

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



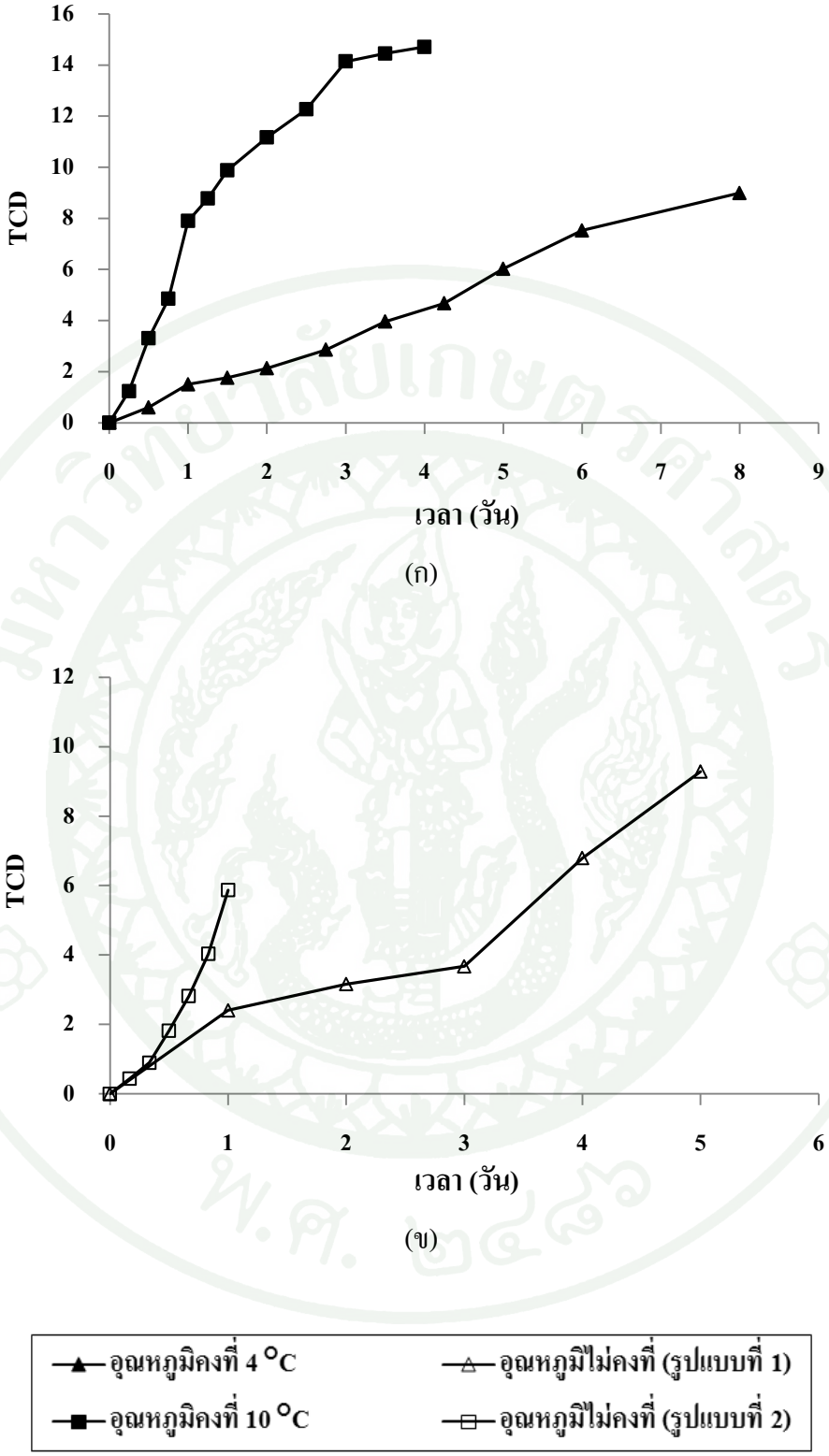
(ก) (ข)

ภาพที่ 66 ตัวอย่างการใช้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 เพื่อติดตามการเน่าเสียของเนื้ออกไก่ลอกหนัง เมื่ออาหารยังคงความสด (ก) และอาหารเกิดการเน่าเสียแล้ว (ข)

5. ผลการศึกษาอุณหภูมิยังผลและอายุการเก็บที่เหลือของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในกรณีอุณหภูมิการเก็บไม่คงที่

ในขั้นตอนนี้ ต้องการศึกษาผลต่อภาวะเก็บต่อการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพและการนำไปใช้งานของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ หากอุณหภูมิการเก็บไม่คงที่ มีผลทำให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นจากเดิม ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเช่นกัน ฉะนั้นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็ว แสดงว่า อายุการเก็บที่เหลืออยู่ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิก็จะน้อยลงจากเดิม เมื่อเทียบกับที่เก็บไว้อุณหภูมิคงที่ จากการทดลองได้ศึกษาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) สูตร P3-2 โดยนำข้อมูลทางด้านค่า TCD มาจากการทดลองในข้อ 4 สำหรับการเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ คือ 4 และ 10 องศาเซลเซียส และสำหรับการเก็บไว้ที่อุณหภูมิไม่คงที่ จะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 จะมีการปรับอุณหภูมิแค่ 2 ค่าใน 1 รอบ คือ 0 และ 8 องศาเซลเซียส ส่วนรูปแบบที่ 2 จะมีการปรับอุณหภูมิแค่ 4 ค่าใน 1 รอบ คือ 4 9 15 และ 12 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ตลอดเวลาการเก็บ และรูปแบบที่ 2 จะให้การเปลี่ยนแปลงค่า TCD สูงกว่ารูปแบบที่ 1 จากภาพที่ 67 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 1 ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิในการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ 4 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 67 การเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส) (ก) และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2) (ข)

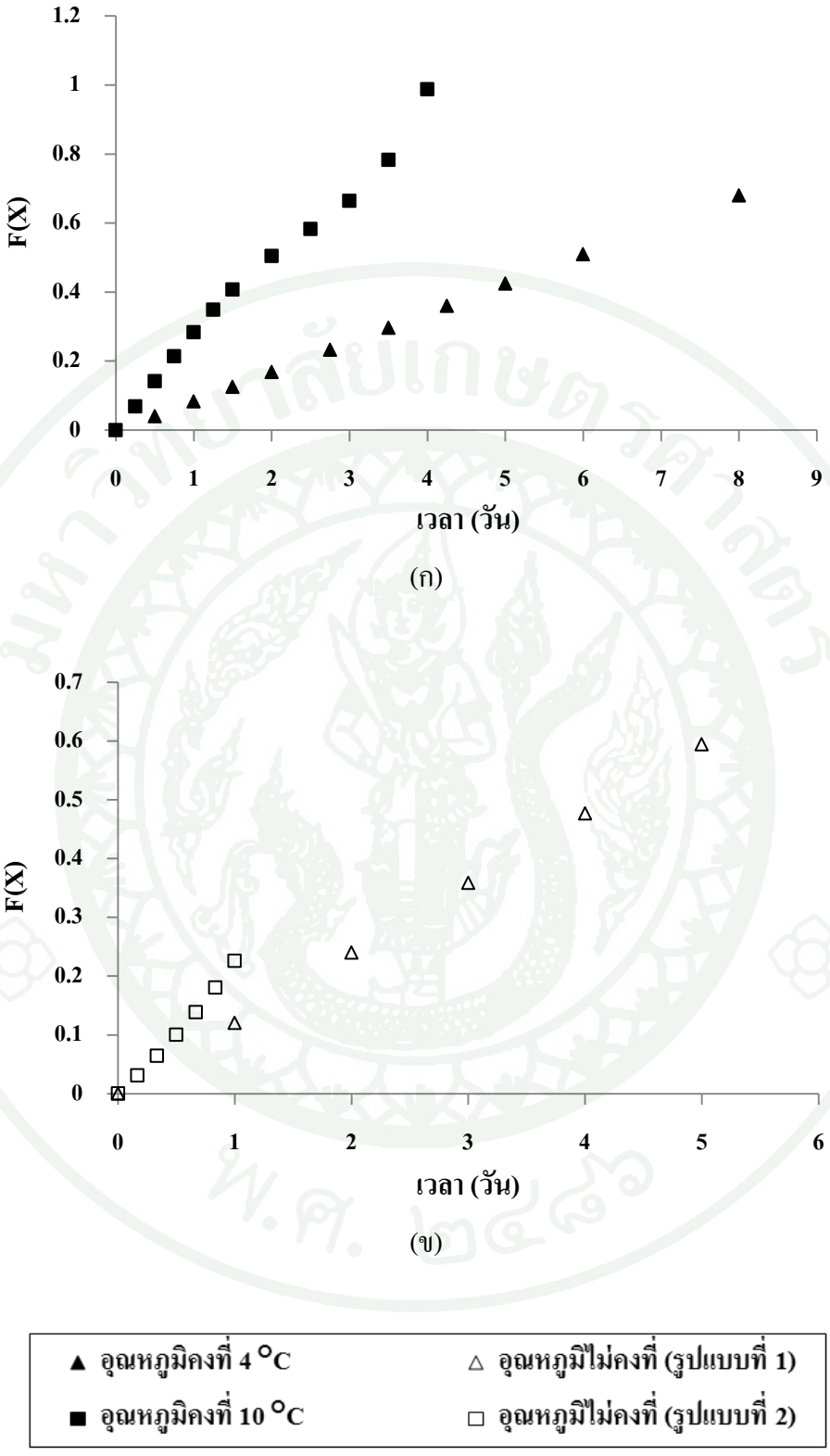
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุณหภูมิ ในภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 2 ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมินี้ สามารถนำไปใช้ศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ โดยใช้โปรแกรม KyPlot ดังที่อธิบายวิธีการคำนวณไปแล้วข้างต้น (ตามข้อ 3.4) ทำให้ได้ค่า $F(X)$ และพลอตกราฟระหว่างค่า $F(X)$ ที่ได้กับเวลาจะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 68

ภายหลังได้กราฟเส้นตรง สามารถหาค่าความชันจากกราฟเส้นตรงนี้ได้ ซึ่งค่าความชันนี้เรียกว่า ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการวิเคราะห์ค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ พบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ 4 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0035 วัน$^{-1}$ และ 0.9999 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0100 วัน$^{-1}$ และ 0.9837 ตามลำดับ ส่วนภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 1 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0050 วัน$^{-1}$ และ 1.000 ตามลำดับ และที่ภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 2 ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ค่า k และ R^2 เท่ากับ 0.0090 วัน$^{-1}$ และ 0.9930 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 15 ซึ่งดังที่กล่าวไปแล้วว่า ในภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 1 ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ 4 องศาเซลเซียส และในภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 2 ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ ในการเก็บที่อุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส สามารถพิจารณาได้จากค่า k ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 68 กราฟระหว่าง *F(X)* กับเวลา สำหรับค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส) (ก) และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2) (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การทำนายของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิคงที่ (4 และ 10 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2)

	อุณหภูมิคงที่				อุณหภูมิไม่คงที่			
	4 °C		10 °C		รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2	
	k (วัน$^{-1}$)	R^2	k (วัน$^{-1}$)	R^2	k (วัน$^{-1}$)	R^2	k (วัน$^{-1}$)	R^2
TTI	0.0035	0.9999	0.0100	0.9837	0.0050	1.000	0.0090	0.9930

จากภาวะการเก็บที่อุณหภูมิไม่คงที่นี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่า T_{eff} และ t_r ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ โดยพิจารณาจากสมการที่ 6 ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งภายหลังการคำนวณจะได้ค่า T_{eff} เป็น 6.04 และ 10.97 องศาเซลเซียส เมื่อภาวะการเก็บอยู่ในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นั่นหมายความว่า ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสามารถเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิการเก็บคงที่ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1 และ 5 วัน ตามลำดับ แต่ในระหว่างนั้นเกิดภาวะการเก็บอุณหภูมิไม่คงที่ ทำให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนสีไปจากเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เทียบเท่ากับว่ามีการเก็บตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิไว้ที่ 6.04 และ 10.97 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1 และ 5 วัน ตามลำดับ และมีผลทำให้อายุการเก็บที่เหลือน้อยลงจากเดิม คือ 2.87 และ 2.24 วัน เมื่อภาวะการเก็บอยู่ในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 อุณหภูมิยังผล (T_{eff}) และอายุการเก็บที่เหลือ (t_r) ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดความเข้มข้นอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 สูตร P3-2 ที่อุณหภูมิไม่คงที่ (รูปแบบที่ 1 และ 2)

	อุณหภูมิไม่คงที่			
	รูปแบบที่ 1		รูปแบบที่ 2	
	T_{eff}(°C)	t_r(วัน)	T_{eff}(°C)	t_r(วัน)
TTI	6.04	2.87	10.97	2.24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการทดลองได้สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองควอเดรติกโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับใช้ทำนายค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ตารางที่ 17) พบว่าแบบจำลองควอเดรติกที่ได้จะให้สมการที่มีค่าคงที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าคงที่ที่แตกต่างกันนี้จะเกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (ในที่นี้คือ อุณหภูมิและเวลา) ที่ไปส่งผลต่อค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ถ้าค่าคงที่ที่อยู่หน้าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวไหนมีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นนั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์มากเช่นกัน นอกจากนี้ สมการแต่ละสมการในแบบจำลองควอเดรติกจะให้ค่า R^2 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.727-0.997

ตารางที่ 17 ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ R^2 จากสมการทำนายค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า TCD ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ซึ่งมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่แตกต่างกัน

ปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ)	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ควอเดรติก)						
	b_0	b_i	b_j	b_{ii}	b_{ij}	b_{jj}	R^2
20	0.8409	-0.1292	0.0040	0.0041	0.0005	-0.00001	0.997
10	0.4518	-0.1863	0.0873	0.0102	0.0050	-0.00220	0.972
5	12.8367	-3.2495	-0.1498	0.1704	0.0365	0.00005	0.812
1	-2.0243	0.2363	0.0365	-0.0009	0.0394	-0.00050	0.727

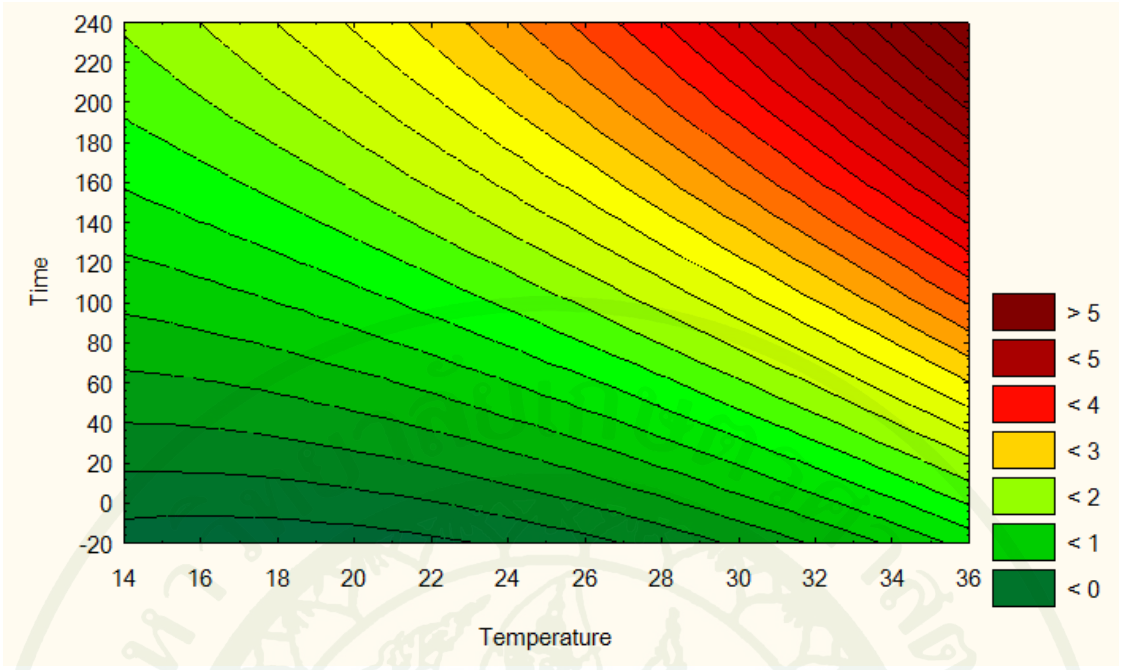
สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาสร้างแผนภาพการตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ใน 2 รูปแบบคือแผนภาพคอนทัวร์และแผนภาพ 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 69-72 จะสังเกตเห็นว่าแผนภาพดังกล่าวทั้ง 4 ชนิดของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ให้ลักษณะของแผนภาพที่คล้ายคลึงกัน นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีก็เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าฟังก์ชันการตอบสนองดังกล่าวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าอุณหภูมิและเวลาต่างเพิ่มขึ้นค่าฟังก์ชันการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

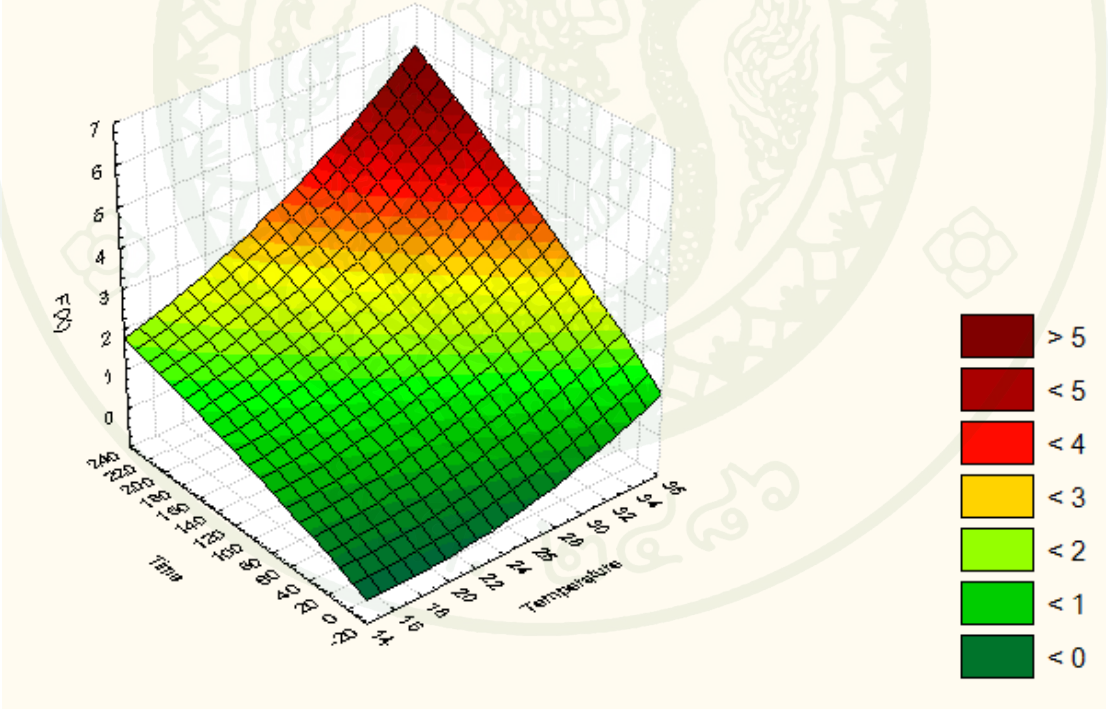
ตอบสนองยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์นี้สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดได้ทั้งอุณหภูมิและเวลาร่วมกัน โดยทำหน้าที่บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของทั้งอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างไปจากเดิมได้โดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาที่อาศัยความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม Bobelyn *et al*. (2006) ได้ให้ความเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารสดที่เวลาต่าง ๆ ไม่ได้เป็นไปตามกลไกลของแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์อย่างง่ายไปทั้งหมด

นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถใช้ทำนายระยะเวลาในการทำงานของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแต่ละชนิดก่อนถึงจุดยุติได้ โดยการแทนค่าฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสีที่อุณหภูมิต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 73-76 โดยพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจะมีระยะเวลาในการทำงานที่มากกว่า อย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่เป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) จะมีระยะเวลาในการทำงานประมาณ 250 ชั่วโมง แต่ในขณะที่ 15 องศาเซลเซียส ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิจะมีระยะเวลาในการทำงานลดลงเหลือประมาณ 40 ชั่วโมง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการขยับตัวน้อย จึงเกิดความเสถียรสูง นั่นแสดงให้เห็นว่าสอดคล้องกับการสร้างแผนภาพการตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ นอกจากนี้ ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิแต่ละชนิดจะสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกา โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาต่ำจะทำให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสามารถเกิดการเปลี่ยนได้ที่อุณหภูมิต่ำ นั่นคือ ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่เป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1 และ 5) สามารถเกิดการเปลี่ยนได้ในช่วงอุณหภูมิ 5-15 องศาเซลเซียส แต่ในขณะที่ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่เป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10 และ 20) สามารถเกิดการเปลี่ยนได้ในช่วงอุณหภูมิ 15-35 องศาเซลเซียส และเมื่อสังเกตที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1 5 10 และ 20 จะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงไปเป็นสีแดงหรือสีชมพูได้ภายในระยะเวลา 85 100 280 และ 300 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นหากต้องการจะปรับระยะเวลาในการทำงานของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์จะต้องปรับที่ระดับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกา และจากผลการทดลองที่ได้จึงกล่าวได้ว่าตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้สามารถตรวจสอบประวัติอุณหภูมิและเวลาได้ ดังเช่นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานอื่นๆ (Yan *et al.*, 2008; Wanihsuksombat *et al.*, 2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



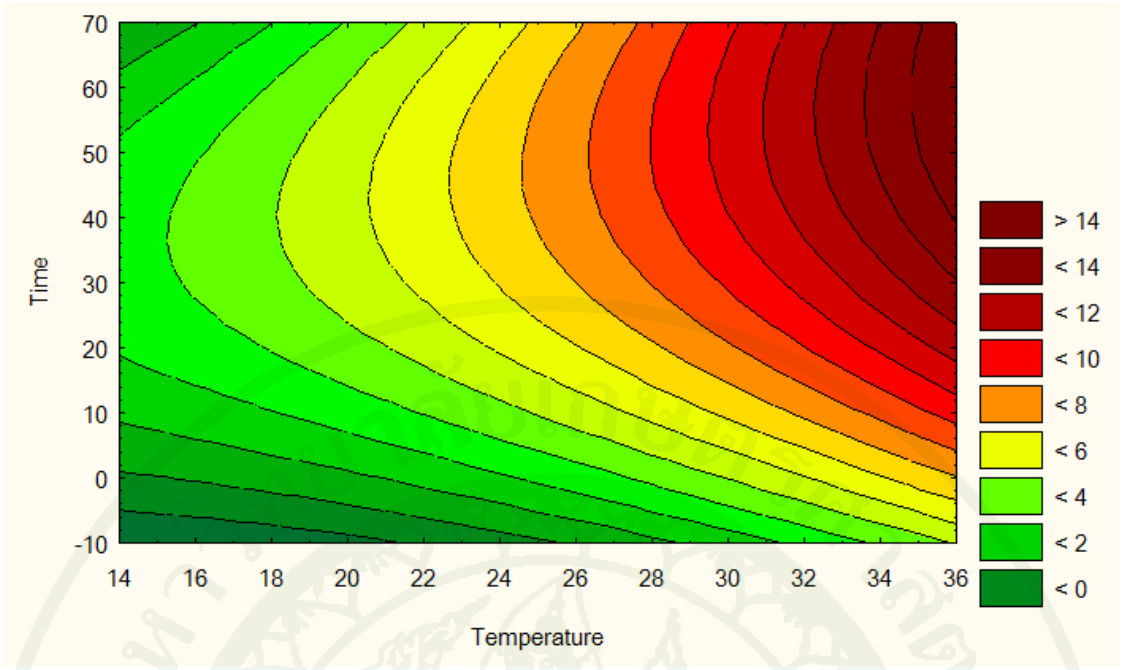
(ก)



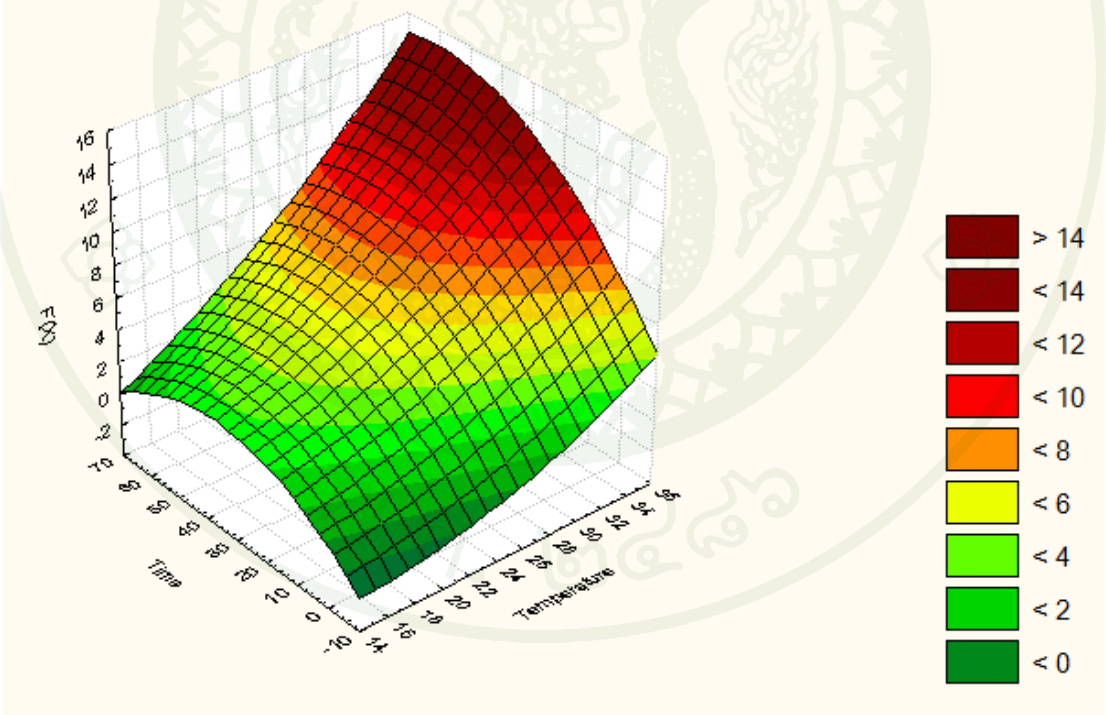
(ข)

ภาพที่ 69 การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 20) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



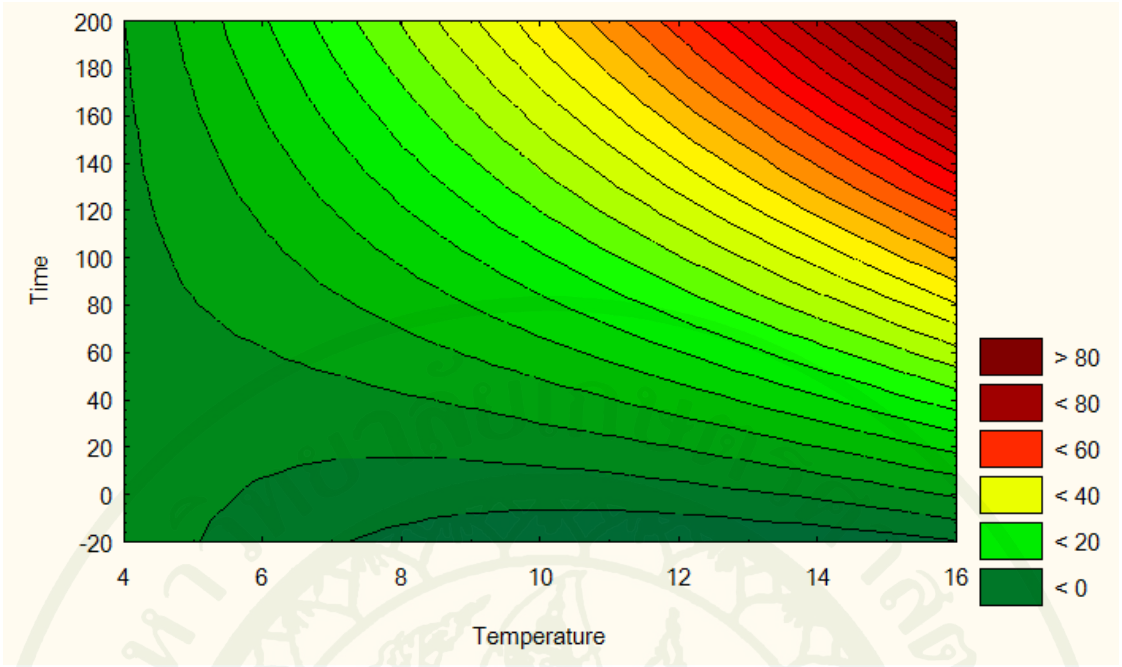
(ก)



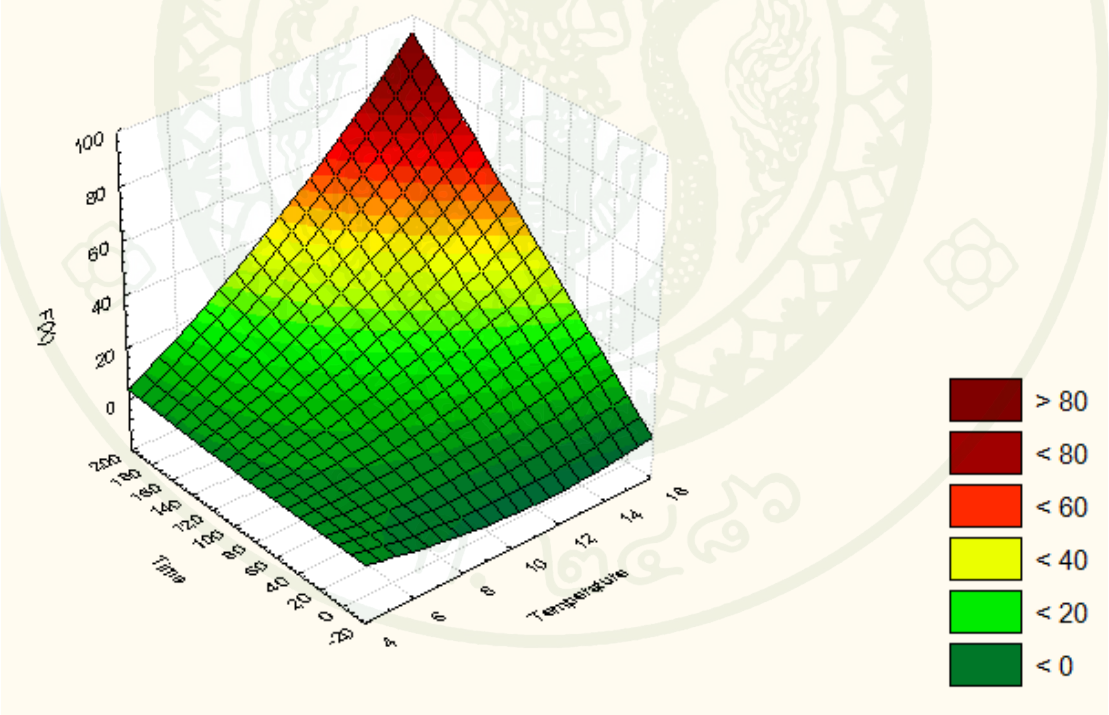
(ข)

ภาพที่ 70 การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



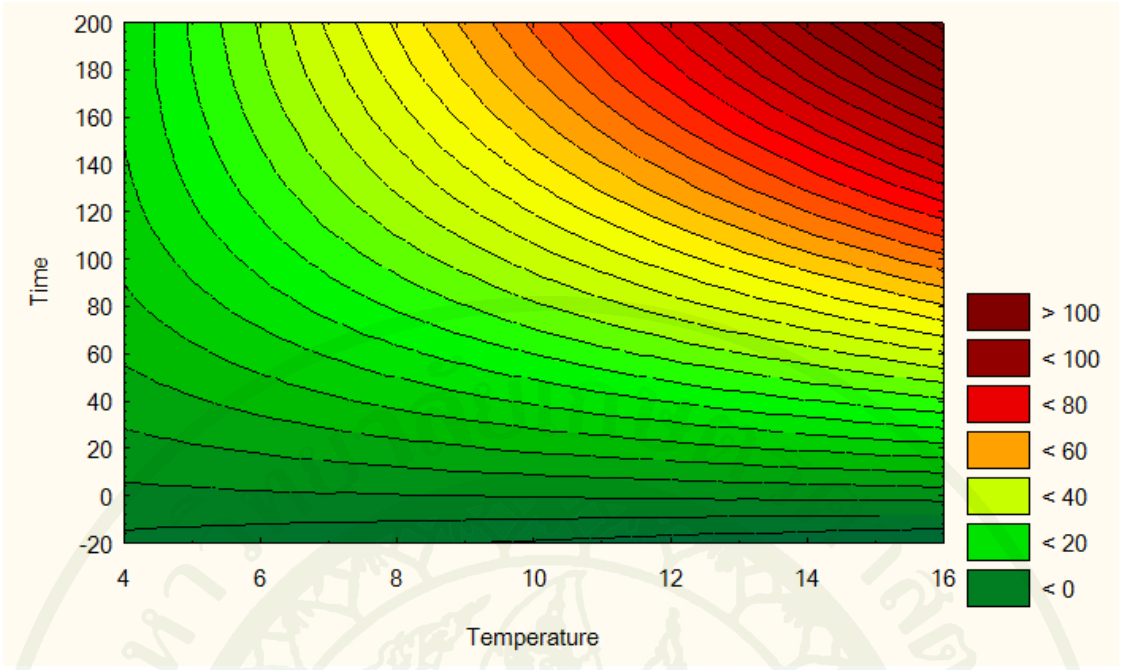
(ก)



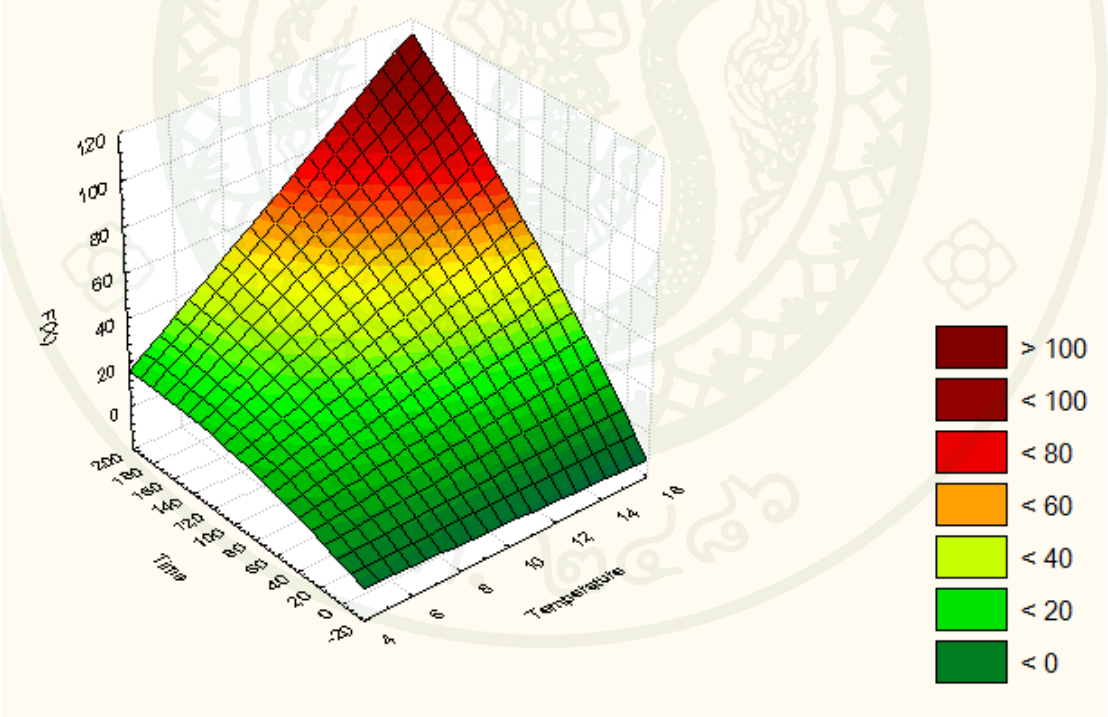
(ข)

ภาพที่ 71 การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



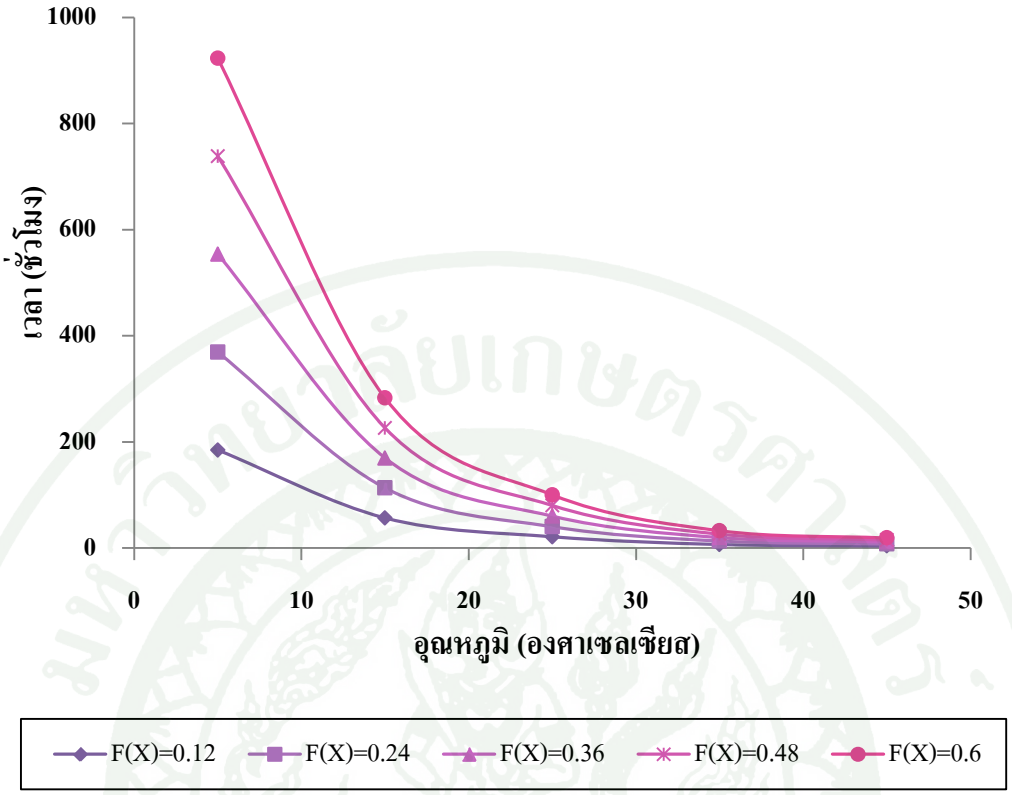
(ก)



(ข)

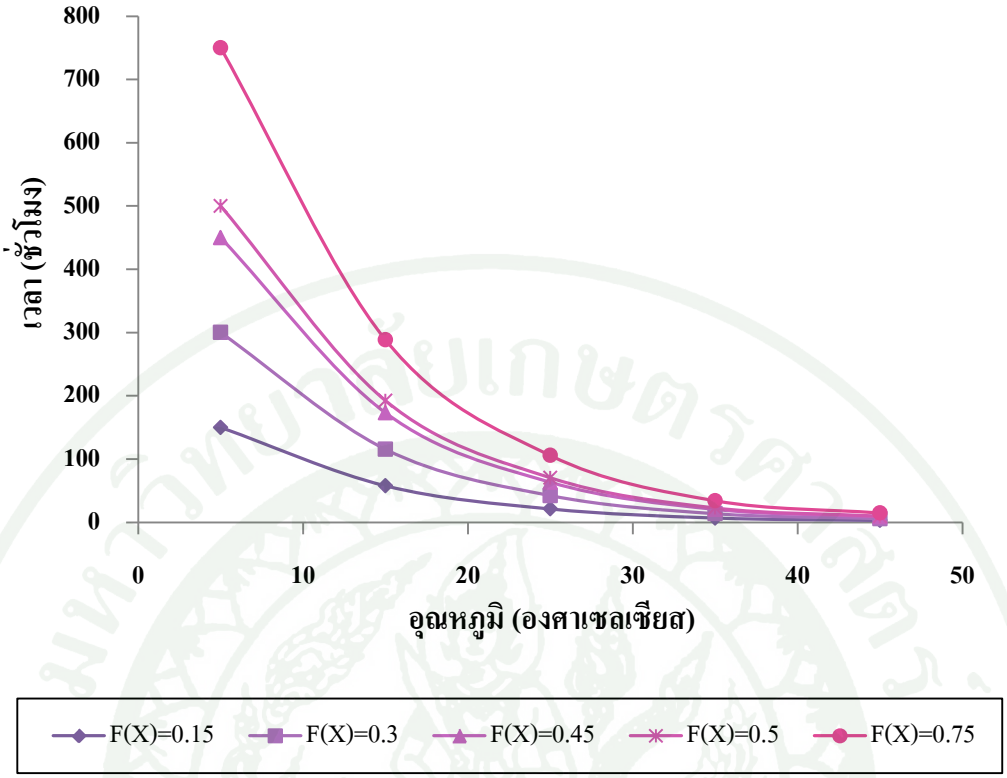
ภาพที่ 72 การตอบสนองพื้นผิวของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1) แผนภาพคอนทัวร์ (ก) แผนภาพ 3 มิติ (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



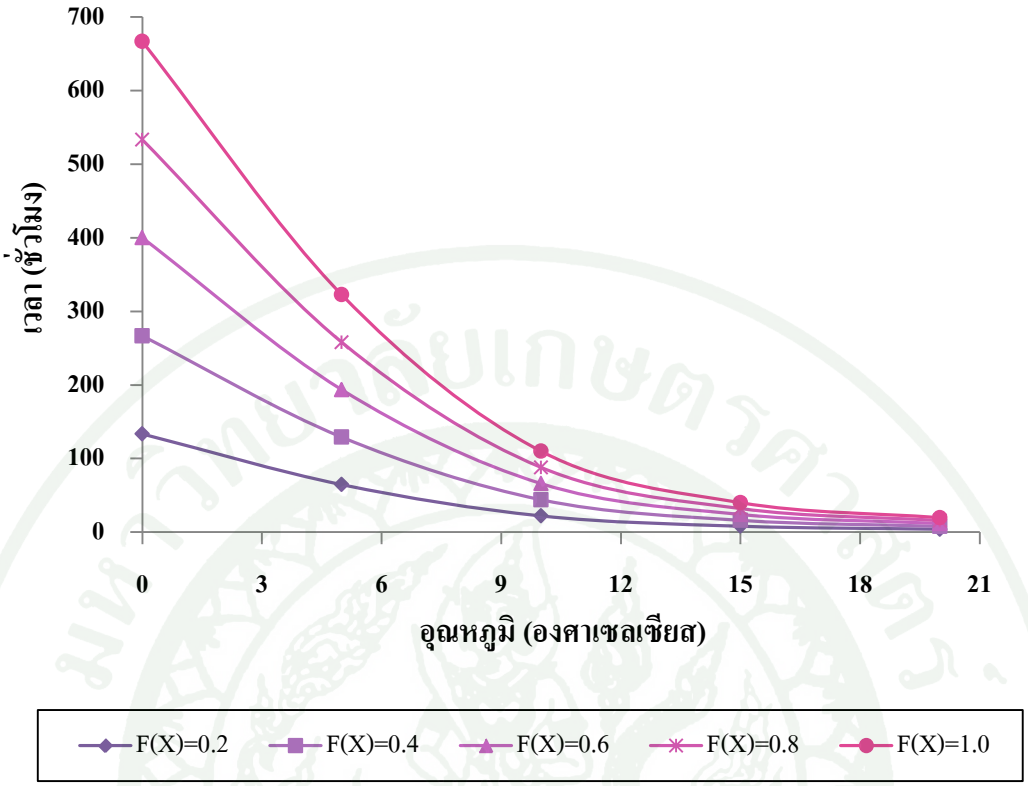
ภาพที่ 73 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 20)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



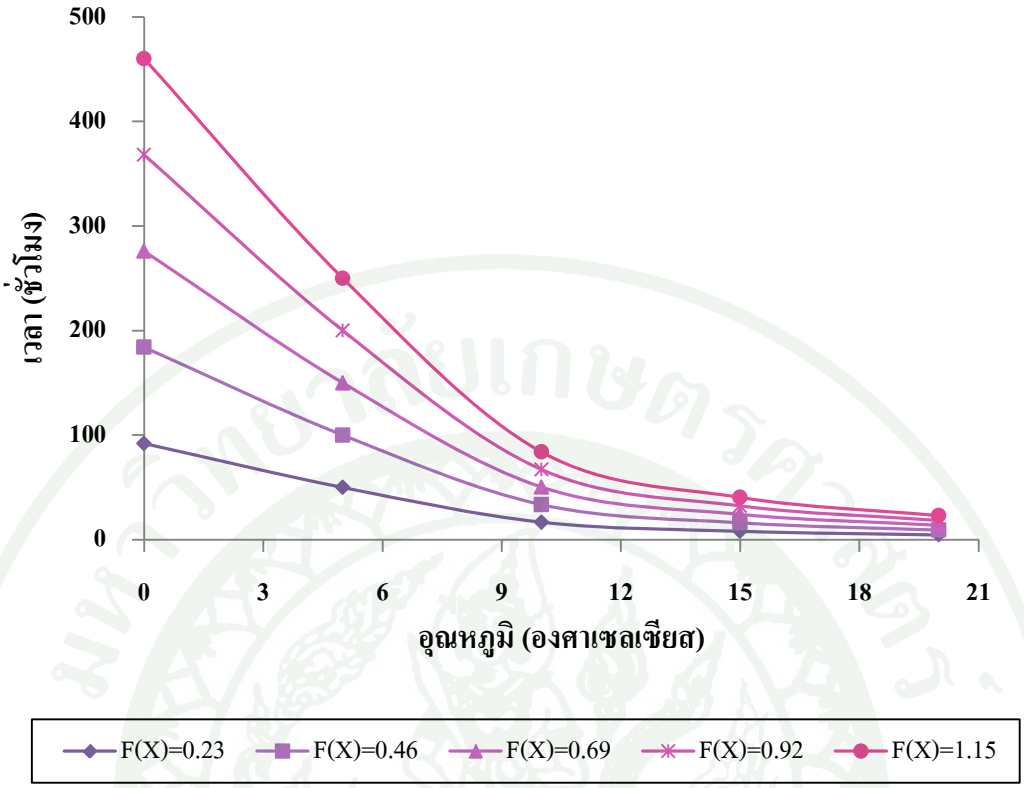
ภาพที่ 74 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 75 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 5)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 76 ผลของเวลา ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ อันเนื่องมาจากฟังก์ชันการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างทั้งหมดของสี ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 1)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการศึกษาวิธีการเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา สามารถเตรียมได้ทั้งจากวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายและการใช้เทคนิคอัลทราโซนิกส์ แต่การใช้เทคนิคอัลทราโซนิกส์จะสามารถเตรียมได้ง่ายกว่า ใช้เวลาการสกัดไม่นาน และใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าคลอโรฟอร์มที่ใช้ในวิธีแรก เพราะคลอโรฟอร์มเป็นสารเคมีที่มีกลิ่นฉุนและมีความเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจอย่างมาก ฉะนั้นจึงเลือกที่จะใช้วิธีการสกัดด้วยเทคนิคอัลทราโซนิกส์

2. ภายหลังการสกัดและการฉายแสงยูวี พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะให้สารสีน้ำเงิน โดยสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาจะให้สีที่เข้มกว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่เติมเข้าไปสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุกับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PCDA บริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งจะช่วยตรึงสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลให้เกิดการขยับได้น้อยลง โครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจึงมีความเสถียรมากขึ้นและสามารถแสดงความเป็นสีน้ำเงินได้สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้สมบัติด้านการหักเหแสงของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาสูงกว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเนื่องมากจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีลักษณะทึบแสง จึงทำให้เห็นสารละลายมีสีเข้มกว่า นอกจากนี้การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวของสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM และ SEM สามารถช่วยยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนซิลิกาจะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในแกนกลางของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาลงไปจะมีลักษณะกลวงคล้ายกับเวสิเคิล

3. การเติมสารแอมฟิฟิลิกที่เป็นส่วนผสมระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 กับ PEG-400 ลงไปในพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา จะช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารละลายทั้งสองชนิดให้ต่ำลง ทำให้สารละลายทั้งสองชนิดเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารละลายทั้งสองชนิดก็จะให้ค่าร้อยละการตอบสนองของสีมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารแอมฟิฟิลิกก็มีผลต่อการเปลี่ยนสีเช่นกันในทุกอุณหภูมิและเวลาการเก็บ ยิ่งความเข้มข้นของสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แอมฟีฟิลิกมากขึ้น จะยิ่งทำให้สารละลายทั้งสองชนิดนี้แสดงค่าร้อยละการตอบสนองของสีมากขึ้นด้วย สาเหตุเนื่องมาจากสารแอมฟีฟิลิกไปมีผลต่อการขยับตัวของสายโซ่ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อนำผลไปศึกษาทางจลนพลศาสตร์ พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา มีค่าเท่ากับ 96.29 และ 79.46 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งถือมีค่าที่สูง นั่นแสดงว่า การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลและสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามีความแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอย่างมาก

4. การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มสามารถทำได้เมื่อนำสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกามาผสมกับสารละลาย PVOH ซึ่งสารละลาย PVOH สามารถเตรียมได้ง่ายโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายได้ สามารถทิ้งไว้ให้แห้งได้ที่อุณหภูมิห้อง และที่สำคัญเมื่อผสมด้วยกันแล้วจะไม่ทำให้สารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการเปลี่ยนสีไปก่อนที่จะนำไปใช้งาน ภายหลังการขึ้นรูปฟิล์ม จะได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงินใส และเมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด TEM และ SEM พบว่ามีลักษณะของผลการวิเคราะห์ที่ไม่ค่อยแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ในรูปของสารละลาย แต่เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีลักษณะใส จึงต้องเคลือบขึ้นบนแผ่นสติกเกอร์สีขาวเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนสีและการวัดสีในระหว่างการเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ

5. ส่วนประกอบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ได้แก่ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล อนุภาคนาโนซิลิกา พลูโรนิก เอฟ127 พลาสติไซเซอร์ และสารละลาย PVOH ส่วนปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มนี้ ก็มีผลต่อการเลือกสูตรที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 3 วัน จึงได้สูตรฟิล์มที่เหมาะสม ดังนี้คือ พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ อนุภาคนาโนซิลิกาเข้มข้นร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พลูโรนิก เอฟ127 เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พลาสติไซเซอร์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลาย PVOH เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยชนิดของพลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนระหว่างพลูโรนิก เอฟ127 กับพลาสติไซเซอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกาได้ดีที่สุดคือ PEG-400 และ 4:6 ตามลำดับ โดยฟิล์มจะมีสีเริ่มต้นเป็นสีม่วง และสามารถเกิดการเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง และสีแดงได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้เมื่อนำผลไปศึกษาทางจลนพลศาสตร์ พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าเท่ากับ 121.32 และ 138.99 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งถือมีค่าที่สูง นั่นแสดงว่า การเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบนี้มีความแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอย่างมาก

6. ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนกับอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถูกเลือกนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเพื่อติดตามการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น ซึ่งในที่นี้คือ เนื้ออกไก่ลอกหนัง เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส พบว่า เนื้ออกไก่ลอกหนังจะมีอายุการเก็บรักษาอยู่ที่ 6.12 และ 2.78 วัน ตามลำดับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวแทนการเสื่อมเสียคุณภาพของเนื้ออกไก่ลอกหนัง และค่า TCD ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบนี้ มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บสูงขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันในทั้งสองอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาจากค่า k นอกจากนี้เมื่อนำผลไปศึกษาทางจลนพลศาสตร์ พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเสื่อมเสียคุณภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการตอบสนองของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ 86.36 และ 114.06 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งแม้ว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของทั้งสองจะไม่เท่ากันพอดี แต่ก็สามารถแสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ก็สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้เก็บผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นได้

7. อุณหภูมิการเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิชนิดนี้อย่างมาก ถ้าอุณหภูมิการเก็บไม่คงที่ จะสามารถทำให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่าเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิการเก็บคงที่ ภายหลังการจำลองภาวะการเก็บในสองรูปแบบ พบว่า รูปแบบที่ 1 และ 2 จะให้การเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับการเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า k และเมื่อคำนวณหาค่า T_{eff} สำหรับภาวะการเก็บในสองรูปแบบ พบว่า มีค่าเท่ากับ 6.04 และ 10.97 องศาเซลเซียส สำหรับภาวการณ์เก็บในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า TCD เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่ นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณหาค่า t_r ของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิได้ พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.87 และ 2.24 วัน สำหรับภาวะการเก็บในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อายุการเก็บที่เหลือของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ จะสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนสีที่เหลือของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิ จากการศึกษานี้สามารถนำไปจำลองใช้กับการขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างแผนภาพการตอบสนองพื้นผิวในรูปแบบแผนภาพคอนทัวร์และแผนภาพ 3 มิติ พบว่า แผนภาพดังกล่าวแสดงการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงสีของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิขึ้นกับทั้งอุณหภูมิและเวลาร่วมกัน และเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการทำงานพบว่า การปรับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาจะสามารถปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการทำงานของตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลอเมอร์นี้ได้

9. การพัฒนาตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิฐานพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนซิลิกาเพื่อนำมาประยุกต์กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น ถือได้ว่าเป็นตัวชี้วัดแบบใหม่ที่ยังไม่มีใครได้ศึกษามาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ และการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลิกาในระหว่างช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรนี้ สามารถที่จะผลิตตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิขึ้นมาหลายสูตรเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานนั้นๆ ได้ ฉะนั้นตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมินี้จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมเพื่อแข่งขันกับต่างประเทศได้

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการใช้สารแอมฟิฟิลิกมาช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลจาก 60 มาเป็น 15 องศาเซลเซียสนี้ เพื่อต้องการให้ตัวชี้วัดเวลาและอุณหภูมิสามารถมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำได้สูงนั้น ทำให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการซึ่งอยู่ในระหว่างการเตรียมฟิล์มจะต้องถูกปรับให้มีอุณหภูมิที่ต่ำหรือไม่สูงเกิน 25 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีก่อนที่จะใช้งานจริง และภายหลังฟิล์มแห้งแล้วจะนำมาใช้งานทันที เพื่อต้องการให้ฟิล์มที่นำมาใช้ในการทดลองยังคงมีลักษณะใหม่อยู่เสมอ สีเริ่มต้นยังไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทั้งนี้เนื่องจากภาวะภายในห้องปฏิบัติการยังไม่เหมาะสมเพียงพอที่จะสามารถเตรียมและเก็บฟิล์มจำนวนครั้งละปริมาณมาก จึงเตรียมเฉพาะใช้งานเท่านั้น และหากไม่สามารถนำฟิล์มที่เตรียมได้มาใช้ได้ทัน สามารถนำไปเก็บไว้ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสได้ ซึ่งจุดนี้จึงอาจเป็นข้อจำกัดสำหรับการนำไปผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตตยา สมยาภักดี และโสบุญชัย กิตติเสรีบุตร. 2545. **อาหารแช่เย็น (chilled foods).** (สื่อสิ่งพิมพ์). ศูนย์บริการข้อมูลเกี่ยวกับความปลอดภัยในการบริโภคอาหาร (E-Center For Food Safety) ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.

จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. ม.ป.ป. **การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี** คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ (อัดสำเนา)

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2542. ซิลิกาฟูม. **วารสารคอนกรีต.** 18: 1-8.

นิรนาม. 2554. **สารโครงผลึกร่างตาข่าย.** แหล่งที่มา: http://www.ponglearning.com/?p=1473, 23 กรกฎาคม 2557.

เบญจพร พวงจำปี. 2547. **ซิลิคอน.** รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ. 18/2547. 30 หน้า.

ปริญญา อรุโณทยานันท์. 2536. **Self Assembly-วิทยาการจากต้นแบบธรรมชาติ**. แหล่งที่มา: http://www.gpo.or.th/rdi/html/self.html, 13 มีนาคม 2555.

ภาณุวัฒน์ สรรพกุล. 2552. **เอกสารคำสอน เทคโนโลยีการบรรจุแบบแอคตีฟและอินเทลลิเจนท์.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุวิชา สร้อยสุวรรณ. 2554. Gold nanoparticles กับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์. **วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม.** 18: 8-9.

อารี ธนบุญสมบัติ, ภัทราวรรณ คหะวงศ์ และ ศุภมาส ด่านวิทยากุล. 2545. เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค. **LAB TODAY** 1 (3): 1-11.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ahn, D.J., S. Lee and J.M. Kim. 2009. Rational design of conjugated polymer supramolecules with tunable colorimetric responses. **Adv. Func. Mat.** 19: 1483-1496.

Ahvenainen, R. 2003. Active and intelligent packaging: an introduction, pp. 5-20. *In* R. Ahvenainen, eds. **Novel Food Packaging Techniques.** Woodhead Publishing Limited, England.

Alberts B., D. Bray, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts and J.D. Watson. 1994. **Molecular Biology of the Cell.** 3rd ed. Garland Publishing, New York.

Ali N.H., A. Farooqui, A. Khan, A.Y. Khan and S.U. Kazmi. 2010. Microbial contamination of raw meat and its environment in retail shops in Karachi, Pakistan. **J. Infect. Dev. Ctries.** 4: 382-388.

Anonymous. n.d.a. **Time-Temperature Indicator.** Available Source: http://www.arrowscientific.com.au/time_temperature_integrators.htm, September 6, 2010.

Anonymous. n.d.b. **CheckPoint® Technology.** Available Source: http://www.visab.com/CheckPointTechnology, September 6, 2010.

Arnaut-Rollier, I., L.D. Zutter and J.V. Hoof. 1999. Identities of the *Pseudomonas* spp. in flora from chilled chicken. **Int. J. Food Microbiol.** 48: 87-96.

Balakrishnan, S., S. Lee and J.M. Kim. 2010. Thermochromic reversibility of conjugated polymers derived from a diacetylenic lipid containing lithium salt. **J. Mat. Chem.** 20: 2302-2304.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Balamatsia, C.C., E.K. Paleologos, M.G. Kontominas and I.N. Savvaidis. 2006. Correlation between microbial flora, sensory changes and biogenic amines formation in fresh chicken meat stored aerobically or under modified atmosphere packaging at 4 ˚C: Possible role of biogenic amines as spoilage indicators. **Antonie van Leeuwenhoek.** 89: 9-17.

_____, A. Patsias, M.G. Kontominas and I.N. Savvaidis. 2007. Possible role of volatile amines as quality-indicating metabolites in modified atmosphere-packaged chicken fillets: Correlation with microbiological and sensory attributes. **Food Chem.** 104: 1622-1628.

Baston, O., I. Tofan, A.L. Stroia, D. Moise and O. Barna. 2008. Refrigerated chicken meat freshness. Correlation between easily hydrolisable nitrogen, pH value and biogenic amine contents. **Food Technol.** 2: 37-43.

Bauman, R.W. 2004. **Microbiology: Chapter 6 Microbial Nutrition and Growth.** (Instruction Media). Benjamin Cummings, Pearson Education, Inc., USA.

Bizerba. 2008. **Trust is Good, Control is Better.** Availiable Source: http://www.bizerba.com /en /press/2008/intelligent_labels_en.html, September 6, 2010.

Blixt, K.G., S.I.A. Tornmarck, R. Juhlin, K.R. Salenstedt and M. Tiru. 1977. **Enzymatic Substrate Composition Adsorbed on a Carrier.** US Pantent 4,043,871.

Bobelyn, E., M.L.A.T.M. Hertog and B.M. Nicolai. 2006. Applicability of an enzymatic time-temperature-integrator as a quality indicator for mushrooms in the distribution chain. **Postharvest Biol. Technol.** 42: 104-114.

Bonardi, S., F. Salmi, E. Riboldi, C. Bacci, and F. Brindani. 2008. Detection and count of *Salmonella enterica* in pork and poultry meat products. **Vet. Res.** 32: 315-317.

Borch, E., M.L. Kant-Muemansb and Y. Blixt. 1996. Bacterial spoilage of meat products. **Int. J. Food Microbiol.** 33: 103-120.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Business Thai. 2551. **อาหารแช่เย็น-แช่แข็ง วิถีคนยุคใหม่.** แหล่งที่มา: http://www.marketingoops.com/reports/behaviors/%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%AB%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%8A%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%A2%E0%B9%87%E0%B8%99-%E0%B9%81%E0%B8%8A%E0%B9%88%E0%B9%81%E0%B8%82%E0%B9%87%E0%B8%87-%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%96/, 20 กรกฎาคม 2557.

Carpick, R.W., D.Y. Sasaki and A.R. Burns. 2000. First observation of mechanochromism at the nanometer scale. **Langmuir** 16: 1270-1278.

_____, D.Y. Sasaki, M.S. Marcus, M.A. Eriksson and A.R. Burns. 2004. Polydiacetylene films: A review of recent investigations into chromogenic transitions and nanomechanical properties. **J. Phys.: Condens. Matter.** 16: R679-R697.

Coates, J. 2000. Interpretation of infrared spectra: a practical approach, pp. 10815-10837. *In* R.A. Meyers, ed. **Encyclopedia of Analytical Chemistry.** John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Chambers, P.G. and T. Grandin. 2001. **Guidelines for Humane Handling, Transport and Slaughter of Livestock.** Availiable Source: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/animalwelfare/guidelines%20humane%20handling%20tran sport%20slaughter.pdf, July 18, 2014.

Cryolog. 2006. **CRYOLOG's TRACEO® Tracks Freshness from Factory to Fork.** Availiable Source: http://www.infotechfrance.com/cgi-local/affichage_signet_secteur.pl?UNI_ID=8&RUB_ID=54&SS_ID=8835&SEC_ID=433, September 6, 2010.

Dainelli, D., N. Gontard, D. Spyropoulos, E. Zondervan-van den Beuken and P. Tobback. 2008. Active and intelligent food packaging: legal aspects and safety concerns. **Trends Food Sci. Technol.** 19: S103-S112.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Dainty, R.H. 1996. Chemical/biochemical detection of spoilage. **Int. J. Food Microbiol.** 33: 19-33.

Das, C. and B.P. Kapgate. 2012. Preparation and studies of nitrile rubber nanocomposites with silane modified silica nanoparticles. **Res. J. Recent Sci.** 1: 357-360.

Dave, D. and A.E. Ghaly. 2011. Meat spoilage mechanisms and preservation techniques: A critical review. **Am. J. Agric. Bio. Sci.** 6: 486-510.

De Jong, A. 2004. **Packaging and Food Quality: Active and Intelligent Packaging**, Power Point Presentation on June 2, 2004. TNO Nutrition and Food Research, The Netherlands.

Donhowe, L.G. and O.R. Fennema. 1993. The effects of plasticizers on crytallinity, permeability, and mechanical properties of methylcellulose films. **J. Food Porc. Preserv.** 17: 247-257.

Doyle, M.E. 2007. **Microbial Food Spoilage-Losses and Control Strategies.** Available Source: http://fri.wisc.edu/docs/pdf/FRI_Brief_Microbial_Food_Spoilage_7_07.pdf, July 20, 2014.

Filimon, M.N., A. Borozan, D. Bordean, F. Radu and R. Popescu. 2010. Microorganisms, qualitative indicators for meat products. **Anim. Sci. Biotechnol.** 43: 346-349.

Gaikwad, R.M. and I. Sokolov. 2008. Silica nanoparticles to polish tooth surfaces for caries prevention. **J. Dent. Res.** 87: 980-983.

Garcia-Lopez, M.L., M. Prieto and A. Otero. 1998. The physiological attributes of Gram-negative bacteria associated with spoilage of meat and meat products, pp. 1-34. *In* A. Davies and R. Board, eds. **The Microbiology of Meat and Poultry.** Blackie Academic and Professional, London.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Giannakourou, M.C. and P.S. Taoukis. 2003. Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. **J. Food Sci.** 68: 201-209.

Gou, M.L., G. Guo, J. Zhang, K. Men, J. Song, F. Luo, X. Zhao, Z.Y. Qian and Y.Q. Wei. 2010. Time-temperature chromatic sensor based on polydiacetylene (PDA) vesicle and amphiphilic copolymer. **Sens. Actuators B** 150: 406-411.

Gupta, A., A.S.G. Khalil, M. Offer, M. Geller, M. Winterer, A. Lorke and H. Wiggers. 2011. Synthesis and ink-jet printing of highly luminescing silicon nanoparticles for printable electronics. **J. Nanosci. Nanotechnol.** 11: 5028-5033.

Hamzah, R., M.A. Bakar, M. Khairuddean, I.A. Mohammed and R. Adnan. 2012. A structural study of epoxidized natural rubber (ENR-50) and its cyclic dithiocarbonate derivative using NMR spectroscopy techniques. **Molecules** 17: 10974-10993.

Handley, S. 2010. **Cold chain under control from start to finish.** (Instruction Media). Work Leading Gases and Engineering company, The Linde Group, München, Germany.

Hogan, S.A. and J.P. Kerry. 2008. Smart packaging of meat and poultry products, pp. 33-60. *In* J. Kerry and P. Butler, eds. **Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods**. John Wiley & Sons Ltd, England.

Hong, S.I. and W.S. Park. 2000. Use of color indicators as an active packaging system for evaluating kimchi fermentation. **J. Food Eng.** 46: 67-72.

Huggins, K.E., S. Son and S.I. Stupp. 1997. Two-dimensional supramolecular assemblies of a polydiacetylene. 1. Synthesis, structure, and third-order nonlinear optical propertie. **Macromol.** 30: 5305-5312.

Hunt, R.W.G. 1991. **Measuring Colour.** 2nd ed. Ellis Horwood Limited, England.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Hurme, E. 2003. **Intelligent packaging systems for bioproducts.** VTT Biotechnology. Available Source: http://www.vtt.fi/intelligent/seminar_aug03/hurme.pdf, March 13, 2012.

Inzett, G. 2008. **Conducting Polymers: A New Era in Electrochemistry.** Spring-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.

Israelachvili, J.N. 1991. **Intermolecular and Surface Forces.** 2nd ed. Academic Press, London.

Jakobsen, M. and G. Bertelsen. 2002. The use of CO_2 in packaging of fresh red meats and its effect on chemical quality changes in the meat: A review. **J. Muscle Foods.** 13: 143-168.

Jarnthong, M., Z. Peng, C. Nakason and N. Lopattananon. 2010. Surface modification of silica nanoparticles for reinforcement of epoxidized natural rubber. **Adv. Mater. Res.** 93-94: 370-376.

Jay, J.M., M.J. Loessner and D.A. Golden. 2005. **Modern Food Microbiology.** 7th ed. Springer Science and Business Media, New York.

Jiang, H., Y. Wang, Q. Ye, G. Zou, W. Su and Q. Zhang. 2010. Polydiacetylene-based colorimetric sensor microarray for volatile organic compounds. **Sens. Actuators B** 143: 789-794.

Jonas, U., K. Shah, S. Norvez and D.H. Charych. 1999. Reversible color switching and unusual solution polymerization of hydrazide-modified diacetylene lipids. **J. Am. Chem. Soc.** 121: 4580-4588.

Kim J.M., J.S. Lee, H. Choi, D. Sohn and D.J. Ahn. 2005. Rational design and in-situ FTIR analyses of colorimetrically reversibe polydiacetylene supramolecules. **Macromol.** 38: 9366-9376.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kim, K.W., H. Choi, G.S. Lee, D.J. Ahn and M.K. Oh. 2008. Effect of phospholipid insertion on arrayed polydiacetylene biosensors. **Colloids Surf. B: Biointerf.** 66: 213-217.

Kew, S.J. and E.A.H. Hall. 2006. pH response of carboxy-terminated colorimetric polydiacetylene vesicles. **Anal. Chem.** 78: 2231-2238.

Labuza, T.P. 1982. **Shelf-life dating of foods.** Westport, CT: Food and Nutrition Press, pp. 57-62.

Lee, B.-S. and H.-S. Shin. 2012. Polymer-based time-temperature indicator for high temperature processed food products. **Food Sci. Biotechnol.** 21: 1483-1487.

Lee, D.C., S.K. Sahoo, A.L. Cholli and D.J. Sandman. 2002. Structural aspects of the thermochromic transition in urethane-substituted polydiacetylenes. **Macromolecules** 35: 4347-4355.

Lee, N.Y., Y.K. Jung and H.G. Park. 2006. On-chip colorimetric biosensor based on polydiacetylene (PDA) embedded in photopolymerized poly(ethylene glycol) diacrylate (PEG-DA) hydrogel. **Biochem. Eng. J.** 29: 103-108.

Lin, M., M. Al-Holy, M. Mousavi-Hesary, H. Al-Qadiri and A.G. Cavinato. 2004. Rapid and quantitative detection of the microbial spoilage in chicken meat by diffuse reflectance spectroscopy (600-1100 nm). **Lett. Appl. Microbiol.** 39:148-155.

Lu, Y.F., Y. Yang, A. Sellinger, M.C. Lu, J.M. Huang, H.Y. Fan, R. Haddad, G. Lopez, A.R. Burns, D.Y. Sasaki, J. Shelnutt and C.J. Brinker. 2001. Self-assembly of mesoscopically ordered chromatic polydiacetylene/silica nanocomposites. **Nature** 410: 913-917.

Manske, W.J. 1976. **Selected Time Interval Indicating Device.** US Pantent 3,954,011.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Mathe, N.R. 2010. **The Rheology of Silicon Nanoparticle Ink for Screen Printing Electronic Devices.** M.S. Thesis, University of Cape Town.

Meier, C., A. Gondorf, S. Lüttjohann and A. Lorke. 2007. Silicon nanoparticles: Absorption, emission, and the nature of the electronic bandgap. **J. Appl. Phys.** 101: 103112-1 - 103112-8.

Mino N., H. Tamura and K. Ogawa. 1991. Analysis of color transitions and changes on Langmuir-Blodgett films of a polydiacetylene derivative. **Langmuir** 7: 2336-2341.

Morigaki, K., T. Baumgart, U. Jonas, A. Offenhäusser and W. Knoll. 2002. Photopolymerization of diacetylene lipid bilayers and its application to the construction of micropatterned biomimetic membranes. **Langmuir** 18: 4082-4089.

Nakamura, H. and I. Karube. 2003. Current research activity in biosensors. **Anal. Bioanal. Chem.** 377: 446-468.

Nopwinyuwong, A., S. Trevanich and P. Suppakul. 2010. Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage. **Talanta** 81: 1126-1132.

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. 2012. Preparation of polydiacetylene vesicle and amphiphilic polymer as time-temperature indicator. **Adv. Mater. Res.** 506: 552-555.

Nychas, G.J.E and C.C. Tasso. 1997. Spoilage process and proteolysis in chicken as detected by HPLC. **J. Sci. Food Agric.** 74:199-208.

Okada, S.Y., R. Jelinek and D. Charych. 1999. Induced color change of conjugated polymeric vesicles by interfacial catalysis of phospholipase A_2. **Angew. Chem. Int. Ed.** 38: 655-659.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

On Point Technical Information. 2009. **Technology: Temperature Indicators.** Availiable Source: http://www.onpoint.at, July 17, 2014.

Parida, S.K., S. Dash, S. Patel and B.K. Mishra. 2006. Adsorption of organic molecules on silica surface. **Adv. Colloid Interface Sci.** 121: 77-110.

Park, Y.H., H.C. Bae, Y. Jang, S.H. Jeong, H.N. Le, W.-I. Ryu, M.G. Yoo, Y.-R. Kim, M.-K. Kim, J.K. Lee, J. Jeong and S.W. Son. 2013. Effect of size and surface charge of silica nanoparticles on cutaneous toxicity. **Mol. Cell. Toxicol.** 9: 67-74.

Patel, G.N., A.F. Preziosi and R.H. Baughman. 1976. **Time-Temperature History Indicators.** US Pantent 3,999,946.

Patrícia de Oliveira, C., F. Soares Nilda de Fátima, E.A.F. Fontes, T. Veloso de Oliveira and A.M.M. Filho. 2012. Behaviour of polydiacetylene vesicles under different conditions of temperature, pH and chemical components of milk. **Food Chem.** 135: 1052-1056.

Poças, M.F.F., T.F. Delgado and F.A.R. Oliveira. 2008. Smart packaging technologies for fruits and vegetables, pp. 151-166. *In* J. Kerry and P. Butler, eds. **Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods**. John Wiley & Sons Ltd, England.

Potisatityuenyong, A., G. Tumcharern, S.T. Dubas, M. Sukwattanasinitt. 2006. Layer-by-layer assembly of intact polydiacetylene vesicles with retained chromic properties. **J. Colloid Interface Sci.** 304: 45-51.

Potisatityuenyong, A., R. Rojanathanes, G. Turncharern and M. Sukwattanasinitt. 2008. Electric absorption spectroscopy probed side-chain movement in chromic transitions of polydiacetylene vesicles. **Langmuir.** 24: 4461-4463.

Rahman, S.F. 1999. Post harvest handling of foods of animal origin, pp. 47-54. *In* S.F. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation.** Marcel Dekker, NY.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Reichert, A., J.O. Nagy, W. Spevak and D. Charych. 1995. Polydiacetylene liposomes functionalized with sialic acid bind and colorimetrically detect influenza virus. **J. Am. Chem. Soc.** 117: 829-830.

Rukchon, C., A. Nopwinyuwong, S. Trevanich, T. Jinkarn and P. Suppakul. 2014. Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. **Talanta** (In Press) DOI: 10.1016/j.talanta.2014.07.048

Schott, M. 2006. The colors of polydiacetylenes: A commentary. **J. Phys. Chem.** B 110: 15864-15868.

Sentence, C.B. 1991. **Growth of Bacteria and Spoilage of Meat.** Availiable Source: http://www.meatupdate.csiro.au/data/Chilled_meat_for_export_02-91.pdf, July 20, 2014.

Smolander, M. 2008. Freshness indicators for food packaging, pp. 111-128. *In* J. Kerry and P. Butler, eds. **Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods**. John Wiley & Sons Ltd, England.

Stuart, B.H. 2004. Inorganic molecules and polymers, pp. 95-136. *In* B.H. Stuart, ed. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications.** John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Su, Y.L. 2006. Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. **React. Funct. Polym.** 66: 967-973.

Suppakul, P. 2012**.** Intelligent packaging. Part VII: Trends in Frozen Food Packaging, pp. 835-858. *In* D.-W. Sun, ed. **Handbook of Frozen Food Processing and Packaging**, 2nd Ed. CRC Press LLC: Boca Raton, FL.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Taoukis, P.S. 2001. Modelling the use of time-temperature indicators in distribution and stock rotation, pp. 420-431. *In* L.M.M. Tijskens, M.L.A.T.M. Hertog and B.M. Nicolai (Eds.). **Food Process Modelling.** CRC Press LLC: Boca Raton, FL.

_____ and T.P. Labuza. 1989. Applicability of time temperature indicators as shelf–life monitors of food products. **J. Food Sci.** 54: 783-788.

_____, B. Fu and T.B. Labuza. 1991. Time-temperature indicators. **Food Technol.** 45: 70-82.

Traiphol, N., N. Rungruangviriya, R. Potai and R. Traiphol. 2011. Stable polydiacetylene/ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism: The influence of strong surface anchoring. **J. Colloid Interface Sci.** 356: 481-489.

Vaikousi, H., C.G. Biliaderis and K.P. Koutsoumanis. 2008. Development of a microbial time/temperature indicator prototype for monitoring the microbiological quality of chilled foods. **Appl. Environ. Microbiol.** 74: 3242-3250.

Wallace, G.G., G.M. Spinks, L.A.P. Kane-Maguire and P.R. Teasdale. 2009. **Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems.** 3rd ed. CRC Press: Taylor & Francis Group, Florida.

Wanihsuksombat, C., V. Hongtrakul and P. Suppakul. 2010. Development and characterization of a prototype of a lactic acid–based time–temperature indicator for monitoring food product quality. **J. Food Eng.** 100: 427-434.

Wittaya, T. 2013. Influence of type and concentration of plasticizers on the properties of edible film from mung bean proteins. **KMITL Sci. Tecnol. J.** 13: 51-58.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Xia, Y., J. Deng and L. Jiang. 2010. Simple and highly sensitive detection of hepatotoxin microcystin-LR via colorimetric variation based on polydiacetylene vesicles. **Sens. Actuators B Chem.** 145: 713-719.

Yan, S., C. Huawei, Z. Limin, R. Fazheng, Z. Luda, Z. Hengtao. 2008. Development and characterization of a new amylase type time-temperature indicator. **Food Control.** 19: 315-319.

Yang, L. and A.T. Paulson. 2000. Mechanical and water vapor barrier properties of edible gellan films. **Food Res. Internat.** 33: 563-570.

Yoon, B., S. Lee and J. M. Kim. 2009. Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. **Chem. Soc. Rev.** 38: 1958-1968.

Yoon, J., S.K. Chae and J.-M. Kim. 2007. Colorimetric sensor for volatile organic compounds (VOCs) based on conjugated polymer-embedded electronspun fibers. **J. Am. Chem. Soc.** 129: 3038-3039.

Yuan W., G. Jiang, Y. Song and L. Jiang. 2007. Micropatterning of polydiacetylene based on a photoinduced chromatic transition and mechanism study. **J. Appl. Polym. Sci.** 103: 942-946.

Zhang, C., A.-X. Yin, R. Jiang, J. Rong, L. Dong, T. Zhao, L.-D. Sun, J. Wang, X. Chen and C.-H. Yan. 2013. Time-temperature indicator for perishable products based on kinetically programmable Ag overgrowth on Au nanorods. **ACS Nano.** 7: 4561-4568.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลแสดงค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล
และสารละลายวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคซิลิกา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)							
	ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)							
	0	0.1	0.2	0.5	1	2	3	4
0	0.247[a]	0.232[a]	0.259[a]	0.273[a]	0.259[a]	0.260[a]	0.224[a]	0.234[a]
15	1.414[b]	2.587[b]	3.055[b]	4.197[b]	5.293[b]	7.714[b]	9.591[b]	9.749[b]
30	2.366[c]	4.358[c]	4.769[c]	5.144[c]	6.399[c]	10.704[c]	12.284[c]	12.328[c]
60	3.416[d]	5.214[d]	5.354[d]	8.811[d]	10.154[d]	12.071[d]	15.577[d]	17.234[d]
120	4.164[e]	6.205[e]	6.452[e]	12.754[e]	15.586[e]	16.941[e]	20.298[e]	25.749[e]
240	4.803[f]	7.270[f]	7.622[f]	16.037[f]	20.298[f]	21.721[f]	23.137[f]	33.893[f]
480	5.103[g]	7.714[g]	9.469[g]	19.249[g]	22.298[g]	26.940[g]	30.520[g]	45.205[g]
1440	5.433[h]	8.836[h]	10.469[h]	25.595[h]	26.940[h]	28.940[h]	34.246[h]	54.164[h]
2880	5.670[i]	13.347[i]	14.866[i]	27.105[i]	28.766[i]	30.785[i]	35.058[i]	56.164[i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)							
	ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)							
	0	0.1	0.2	0.5	1	2	3	4
0	0.247[a]	0.232[a]	0.259[a]	0.273[a]	0.259[a]	0.260[a]	0.224[a]	0.234[a]
15	2.114[b]	2.880[b]	3.747[b]	4.587[b]	5.373[b]	8.033[b]	12.328[b]	12.328[b]
30	2.482[c]	4.884[c]	5.693[c]	7.270[c]	8.675[c]	13.689[c]	14.763[c]	15.700[c]
60	3.266[d]	5.803[d]	7.014[d]	9.636[d]	9.749[d]	17.807[d]	20.298[d]	30.261[d]
120	4.426[e]	6.773[e]	8.857[e]	13.587[e]	16.503[e]	24.704[e]	27.874[e]	33.293[e]
240	5.164[f]	8.675[f]	9.015[f]	16.896[f]	23.289[f]	34.246[f]	40.458[f]	45.205[f]
480	5.809[g]	11.827[g]	12.328[g]	21.721[g]	28.940[g]	45.205[g]	47.807[g]	56.940[g]
1440	6.743[h]	15.012[h]	15.700[h]	26.940[h]	39.111[h]	48.428[h]	53.033[h]	60.149[h]
2880	7.266[i]	16.503[i]	18.086[i]	33.582[i]	45.205[i]	49.106[i]	56.164[i]	68.689[i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)							
	ความเข้มข้นของสารแอมฟีฟิลิก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)							
	0	0.1	0.2	0.5	1	2	3	4
0	0.247[a]	0.232[a]	0.259[a]	0.273[a]	0.259[a]	0.260[a]	0.224[a]	0.234[a]
15	3.114[b]	5.647[b]	8.554[b]	12.812[b]	18.630[b]	22.825[b]	26.066[b]	28.894[b]
30	3.566[c]	8.649[c]	15.821[c]	19.249[c]	22.345[c]	28.444[c]	31.721[c]	37.377[c]
60	4.426[d]	10.335[d]	18.086[d]	20.298[d]	26.940[d]	32.008[d]	39.590[d]	42.766[d]
120	5.264[e]	15.700[e]	20.298[e]	28.930[e]	32.560[e]	37.460[e]	42.587[e]	45.205[e]
240	6.761[f]	17.807[f]	26.940[f]	30.233[f]	34.246[f]	40.224[f]	47.807[f]	51.293[f]
480	8.053[g]	21.721[g]	31.506[g]	34.521[g]	36.096[g]	48.205[g]	51.293[g]	63.470[g]
1440	9.180[h]	31.506[h]	32.560[h]	35.535[h]	44.360[h]	56.164[h]	56.164[h]	68.689[h]
2880	9.590[i]	32.560[i]	35.535[i]	37.377[i]	47.205[i]	56.164[i]	63.470[i]	74.710[i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)									
	ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา					มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา				
	0	5	7.5	10	15	0	5	7.5	10	15
0	0.247 [a]	1.330 [a]	4.038 [a]	8.960 [a]	13.878 [a]	4.038 [a]	7.440 [a]	11.301 [a]	15.464 [a]	21.182 [a]
15	1.414 [b]	10.310 [b]	18.464 [b]	25.258 [b]	28.182 [b]	5.481 [b]	15.245 [b]	21.600 [b]	32.053 [b]	34.480 [b]
30	2.366 [c]	21.600 [c]	35.848 [c]	37.962 [c]	49.040 [c]	7.498 [c]	30.053 [c]	38.848 [c]	41.047 [c]	46.042 [c]
60	3.416 [d]	34.024 [d]	43.557 [d]	48.881 [d]	54.196 [d]	8.440 [d]	41.760 [d]	50.960 [d]	55.960 [d]	58.960 [d]
120	4.164 [e]	44.513 [e]	54.483 [e]	56.950 [e]	59.985 [e]	9.596 [e]	52.881 [e]	55.687 [e]	60.800 [e]	62.938 [e]
240	4.803 [f]	55.412 [f]	58.440 [f]	61.600 [f]	62.843 [f]	11.374 [f]	58.058 [f]	61.780 [f]	64.981 [f]	68.018 [f]
480	5.103 [g]	58.385 [g]	62.843 [g]	63.281 [g]	65.321 [g]	13.259 [g]	61.028 [g]	64.028 [g]	67.815 [g]	70.880 [g]
1440	5.433 [h]	62.843 [h]	64.028 [h]	67.988 [h]	68.995 [h]	16.464 [h]	64.620 [h]	66.843 [h]	68.440 [h]	73.768 [h]
2880	5.670 [i]	61.780 [i]	65.321 [i]	68.440 [i]	70.275 [i]	18.464 [i]	65.687 [i]	69.424 [i]	71.880 [i]	75.976 [i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)									
	ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา					มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา				
	0	5	7.5	10	15	0	5	7.5	10	15
0	0.247[a]	1.330[a]	4.038[a]	8.960[a]	13.878[a]	4.038[a]	7.440[a]	11.301[a]	15.464[a]	21.182[a]
15	2.114[b]	13.245[b]	25.687[b]	30.641[b]	38.139[b]	9.596[b]	19.800[b]	28.656[b]	33.440[b]	40.993[b]
30	2.482[c]	30.641[c]	37.962[c]	42.549[c]	52.960[c]	11.374[c]	32.053[c]	40.848[c]	47.152[c]	55.385[c]
60	3.266[d]	45.243[d]	49.557[d]	53.761[d]	59.950[d]	13.245[d]	49.557[d]	52.960[d]	56.320[d]	63.906[d]
120	4.426[e]	51.329[e]	61.467[e]	64.125[e]	68.385[e]	15.077[e]	54.702[e]	61.802[e]	69.424[e]	71.760[e]
240	5.164[f]	58.385[f]	64.028[f]	68.995[f]	72.860[f]	18.464[f]	61.467[f]	70.275[f]	72.669[f]	76.019[f]
480	5.809[g]	65.321[g]	67.988[g]	71.378[g]	74.981[g]	19.520[g]	69.867[g]	74.721[g]	77.351[g]	80.013[g]
1440	6.743[h]	68.128[h]	71.275[h]	75.976[h]	78.097[h]	21.600[h]	74.520[h]	78.543[h]	81.469[h]	83.013[h]
2880	7.266[i]	70.275[i]	73.990[i]	77.520[i]	79.040[i]	26.270[i]	76.019[i]	81.192[i]	83.994[i]	85.440[i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าร้อยละการตอบสนองสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลทั้งที่ไม่มีและมีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ที่มีการเติมสารแอมฟิฟิลิกเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการเก็บ

เวลา (นาที)	CR (ร้อยละ)									
	ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา					มีการเติมอนุภาคนาโนซิลิกา				
	0	5	7.5	10	15	0	5	7.5	10	15
0	0.247[a]	1.330[a]	4.038[a]	8.960[a]	13.878[a]	4.038[a]	7.440[a]	11.301[a]	81.469[a]	21.182[a]
15	3.114[b]	22.304[b]	32.053[b]	40.385[b]	50.577[b]	10.310[b]	28.278[b]	34.291[b]	43.768[b]	53.673[b]
30	3.566[c]	40.339[c]	44.513[c]	53.761[c]	58.385[c]	13.259[c]	44.407[c]	50.880[c]	60.838[c]	62.450[c]
60	4.426[d]	55.412[d]	58.385[d]	60.843[d]	62.843[d]	19.861[d]	52.960[d]	61.173[d]	66.027[d]	70.880[d]
120	5.264[e]	58.385[e]	60.986[e]	63.281[e]	67.988[e]	22.304[e]	66.027[e]	67.802[e]	70.729[e]	76.990[e]
240	6.761[f]	66.708[f]	69.988[f]	73.990[f]	75.981[f]	25.960[f]	74.402[f]	76.507[f]	80.182[f]	83.013[f]
480	8.053[g]	72.860[g]	73.990[g]	77.981[g]	80.192[g]	29.200[g]	78.543[g]	80.384[g]	85.440[g]	87.612[g]
1440	9.180[h]	77.981[h]	79.808[h]	82.084[h]	86.995[h]	32.053[h]	81.469[h]	85.440[h]	88.009[h]	92.993[h]
2880	9.590[i]	80.183[i]	82.660[i]	86.128[i]	88.440[i]	35.894[i]	85.440[i]	89.596[i]	92.293[i]	97.200[i]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลแสดงค่าความแตกต่างของสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10)
ที่มีการเติมสารแอมฟีฟิลิกในชนิดและปริมาณแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 3:7 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.67	0.15	0.13	0.37	0.73	0.22	0.25	0.26	0.88	1.10	0.87	0.66	4.84	3.61	3.40	3.45
2	0.41	0.47	0.18	0.41	0.58	0.30	0.21	0.36	1.08	1.15	1.08	0.89	5.80	4.33	4.72	4.32
4	0.41	0.52	0.32	0.43	0.54	0.40	0.26	0.46	1.46	1.32	1.20	1.17	6.89	5.05	5.09	4.92
6	0.39	0.57	0.34	0.64	0.76	0.42	0.45	0.89	1.70	1.56	1.42	1.34	7.64	6.17	5.42	5.50
8	1.20	0.76	0.71	0.60	0.92	0.52	0.60	0.92	2.17	1.61	1.61	1.59	8.62	6.65	6.22	5.59
14	0.61	1.01	0.65	0.66	1.09	0.69	0.53	0.95	2.76	2.04	1.85	1.86	8.78	6.40	6.25	5.74
19	1.80	1.06	0.72	0.69	1.39	0.54	1.04	1.09	3.00	2.41	2.11	2.34	8.83	7.06	6.37	5.84
24	2.43	1.08	1.13	0.68	1.61	0.99	1.09	1.04	3.05	2.65	2.33	2.61	8.96	7.57	6.30	5.82
41	2.28	1.19	1.22	0.94	1.61	1.43	1.41	1.62	3.59	2.75	2.57	2.58	9.00	7.84	6.74	5.93
46	2.34	1.45	1.46	1.11	1.72	1.68	1.54	1.70	4.05	3.22	2.75	2.75	9.19	7.82	7.52	5.92
65	2.43	1.93	1.80	1.67	2.08	1.88	1.67	1.84	4.21	3.28	2.88	2.76	10.78	8.94	8.88	6.78

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.46	0.32	0.33	0.35	0.38	0.31	0.34	0.22	2.26	1.32	1.35	1.61	5.97	5.59	6.26	5.82
2	0.60	0.52	0.46	0.47	0.68	0.50	0.44	0.37	2.74	1.56	1.61	1.85	8.42	6.96	7.43	6.88
4	0.78	0.69	0.53	0.54	0.82	0.65	0.52	0.48	3.74	2.04	2.26	2.11	9.37	8.18	7.49	6.96
6	1.08	0.76	0.75	0.67	1.10	0.75	0.66	0.60	4.05	2.41	2.48	2.57	9.58	8.71	7.90	7.96
8	1.53	0.94	0.95	0.88	1.48	1.07	0.98	0.88	4.51	2.65	2.62	2.75	10.02	9.53	7.94	7.99
14	1.75	1.13	1.19	0.98	1.66	1.19	1.10	0.97	5.08	3.38	3.41	3.42	10.73	10.11	7.97	8.40
19	1.92	1.59	1.25	1.10	1.62	1.58	1.21	1.13	5.72	3.44	3.55	3.24	10.91	10.27	8.08	8.45
24	2.08	1.64	1.50	1.30	1.90	1.64	1.40	1.21	5.79	3.59	3.57	3.28	12.03	10.34	8.46	8.74
41	2.16	1.67	1.69	1.35	1.89	1.73	1.62	1.34	6.41	3.91	4.20	3.94	12.77	10.48	9.22	8.82
46	2.28	2.05	1.78	1.44	2.13	2.01	1.74	1.40	6.87	3.99	4.16	3.94	12.92	10.75	9.27	8.96
65	2.53	2.25	2.15	1.67	2.54	2.22	2.06	1.60	7.03	4.03	4.40	4.16	14.01	11.35	9.61	9.03

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.82	0.24	0.42	0.16	0.53	1.55	0.18	0.48	2.36	1.56	1.35	1.36	6.14	6.00	4.79	5.65
2	0.86	0.50	0.49	0.34	0.93	1.96	0.47	0.69	2.84	1.61	1.42	1.34	7.30	7.36	5.98	7.39
4	1.37	0.78	0.70	0.44	1.00	1.98	0.53	0.89	3.67	2.04	1.61	1.59	8.52	8.11	6.59	7.98
6	1.50	0.84	0.87	0.61	1.11	2.09	0.72	1.00	3.92	2.28	1.85	1.86	8.91	8.52	6.92	8.55
8	2.29	1.21	0.86	1.05	1.49	2.16	0.85	1.49	4.63	2.41	2.11	2.34	9.27	8.51	7.15	11.05
14	2.26	1.49	1.13	1.29	1.63	2.32	1.16	1.43	4.67	2.65	2.34	2.47	9.24	8.90	7.40	9.34
19	2.25	1.45	1.27	1.36	1.92	2.35	1.47	1.57	4.79	2.75	2.33	2.61	9.40	8.69	7.46	9.83
24	2.29	1.54	1.26	1.55	2.18	2.44	1.55	1.57	4.95	3.22	2.57	2.58	9.71	8.84	7.44	9.76
41	2.36	1.53	1.39	1.86	2.15	2.40	1.54	1.61	5.26	3.33	2.75	2.75	8.91	9.18	7.57	9.83
46	2.43	1.49	1.57	1.81	2.28	2.49	1.62	1.61	5.89	3.65	2.88	2.76	9.32	9.66	8.22	9.25
65	2.81	2.00	1.92	1.85	2.21	2.54	1.68	1.86	6.23	3.87	3.24	3.15	11.09	11.19	9.16	9.14

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 3:7 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.18	0.18	0.14	0.34	0.52	0.29	0.49	0.36	0.66	0.47	0.87	0.60	6.83	4.54	5.32	3.46
2	0.12	0.12	0.73	0.51	0.69	0.34	0.60	0.34	0.89	0.66	1.01	0.89	8.09	5.58	6.34	3.99
4	0.20	0.18	0.93	0.56	0.62	0.42	0.62	0.35	0.88	0.89	1.08	0.91	8.85	6.77	7.29	4.79
6	0.16	0.44	0.81	0.64	0.78	0.53	0.75	0.32	1.08	1.10	1.20	1.17	9.64	7.61	7.71	5.89
8	0.66	0.72	1.14	0.59	1.03	0.73	0.91	0.57	1.46	1.32	1.42	1.34	9.89	7.63	8.25	4.92
14	0.73	0.84	1.45	0.87	1.16	0.95	1.12	0.80	1.89	1.56	1.61	1.59	9.95	8.21	8.03	6.08
19	1.02	1.07	1.31	1.38	1.16	1.27	1.24	0.83	2.17	1.61	1.85	1.86	9.97	8.25	8.17	4.76
24	1.42	1.29	1.64	1.57	1.20	1.28	1.35	1.08	2.76	2.04	1.93	2.12	10.14	8.54	8.38	5.05
41	1.67	1.37	1.78	1.72	1.23	1.49	1.49	1.42	2.89	1.92	2.11	2.42	10.45	8.71	8.61	5.28
46	1.94	1.83	1.80	1.89	1.32	1.63	1.63	1.55	3.07	2.41	2.33	2.39	10.49	8.82	8.72	5.26
65	2.32	1.92	1.88	1.94	1.54	1.89	1.66	1.83	3.44	2.74	2.56	2.51	10.54	8.73	8.88	6.20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 4:6 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.28	0.17	0.24	0.15	0.30	0.25	0.41	0.21	2.03	1.15	0.67	0.63	6.90	3.75	2.99	3.60
2	0.41	0.36	0.52	0.17	0.45	0.39	0.46	0.35	2.41	1.32	0.88	0.87	8.17	4.68	3.65	4.69
4	0.44	0.42	0.68	0.33	0.44	0.53	0.50	0.47	2.99	1.56	1.02	1.35	8.47	5.65	4.22	5.40
6	0.70	0.77	0.85	0.38	0.84	0.65	0.67	0.53	3.74	2.04	1.35	1.61	8.83	6.02	4.66	5.87
8	0.84	1.01	1.02	0.59	0.89	0.72	0.71	0.69	4.20	2.23	1.61	1.85	9.26	6.45	4.81	5.95
14	0.97	1.10	0.94	0.83	1.03	1.01	1.07	1.06	4.16	2.41	2.26	2.18	9.54	6.78	5.32	6.16
19	1.16	1.25	1.31	0.97	1.20	1.30	1.11	1.07	4.51	2.65	2.48	2.38	9.82	7.88	6.78	6.50
24	1.53	1.41	1.57	0.86	1.29	1.50	1.36	1.15	4.40	3.38	2.62	3.24	9.89	8.56	7.54	7.23
41	1.79	1.62	1.69	1.09	1.88	1.79	1.57	1.28	5.08	3.44	3.41	2.75	10.16	9.60	8.25	8.14
46	1.93	1.82	1.89	1.27	2.05	1.98	1.80	1.44	5.76	3.59	3.55	3.42	10.43	10.26	9.44	8.77
65	2.20	2.06	2.13	1.55	2.46	2.15	2.05	1.58	6.41	3.93	3.70	3.68	12.20	11.15	10.93	9.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าความแตกต่างของสีขอฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน (5 มิลลิโมลาร์) กับอนุภาคนาโนซิลิกา (ร้อยละ 10) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวและพลาสติไซเซอร์เป็น 5:5 และความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เป็นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 5 15 25 และ 35 องศาเซลเซียส (ในที่นี้ ทดสอบกับพลาสติไซเซอร์ 4 ชนิด ได้แก่ PEG-400 (PEG) กลีเซอรอล (Gly) ซอร์บิทอล (Sor) และไซลิทอล (Xyl))

เวลา (ชั่วโมง)	TCD															
	5 ºC				15 ºC				25 ºC				35 ºC			
	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl	PEG	Gly	Sor	Xyl
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.44	0.45	0.56	0.58	1.03	1.13	0.66	1.07	1.86	1.22	1.23	1.55	6.54	4.85	4.07	5.49
2	0.45	0.70	0.85	0.80	1.09	1.65	1.01	1.48	2.68	1.43	1.42	1.73	7.89	6.45	5.67	5.43
4	0.66	1.13	1.30	1.25	1.23	1.75	1.13	1.60	3.37	2.01	1.61	1.59	9.00	9.28	6.90	6.19
6	1.03	1.34	1.40	1.35	1.46	2.16	1.28	1.59	3.59	2.28	1.85	1.86	10.13	9.43	7.27	7.78
8	1.14	1.80	1.85	1.95	1.58	2.14	1.68	1.84	3.92	2.41	2.13	2.20	9.98	9.93	9.21	8.75
14	1.59	2.28	2.39	2.45	1.84	2.18	1.88	1.90	4.67	2.77	2.34	2.34	10.87	10.21	9.28	8.97
19	1.55	2.48	2.32	2.40	1.89	2.30	2.07	2.10	4.79	2.93	2.50	2.47	11.63	10.54	9.38	9.25
24	1.61	2.46	2.54	2.51	2.03	2.33	2.06	2.15	4.95	3.22	2.67	2.64	12.01	10.38	9.37	9.45
41	1.50	2.46	2.56	2.46	2.19	2.44	2.17	2.23	5.26	3.17	2.80	2.75	12.65	11.97	9.14	10.13
46	1.52	2.54	2.60	2.45	2.37	2.42	2.35	2.38	5.89	3.39	2.98	2.82	12.24	11.73	9.94	9.95
65	1.75	2.82	2.84	2.65	2.45	2.46	2.33	2.43	6.07	3.65	3.15	2.98	11.99	11.16	11.01	9.77

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ข้อมูลของเนื้อไก่ในถาดบรรจุเชิงการค้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค1 ถาดบรรจุเนื้อไก่ ยี่ห้อ เอส – เพียว



ภาพผนวกที่ ค2 ส่วนประกอบภายในถาดบรรจุเนื้อไก่ ยี่ห้อ เอส – เพียว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาตรและน้ำหนักของเนื้อออกไก่ลอกหนังต่อถาดบรรจุในเชิงการค้า

หมายเลขถาด	น้ำหนักเนื้อออกไก่ลอกหนัง (กรัม)	ปริมาตรเนื้อออกไก่ลอกหนัง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรบรรจุในบรรจุภัณฑ์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรช่องว่างในบรรจุภัณฑ์ (มิลลิลิตร)
1	421.95	432	832	400
2	422.93	427	843	416
3	410.65	413	822	409
ค่าเฉลี่ย	418.51± 6.825	424 ± 9.849	832.33 ± 10.504	408.33 ± 8.021

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวอัจฉรียา นพวิญญูวงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	อ.เมือง จ.ขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีทางอาหาร) ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลรองชนะเลิศอันดับหนึ่ง ในสาขาอุตสาหกรรมเกษตร จากงานประกวดนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2552 ในชื่อผลงานที่ว่า Colorimetric Mixed Dyes-Based Food Spoilage Indicator-FreshZense โดยทีมผู้ช่วยวิจัยประกอบด้วย รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล ผศ.ดร.สุดสาย ตรีวานิช และ นส.อัจฉรียา นพวิญญูวงศ์ รางวัลรองชนะเลิศ อันดับหนึ่ง จากงานประกวดนวัตกรรมข้าวไทย ปี 2552 โดยมูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ และสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในชื่อผลงานที่ว่า เคยู เฟรชเซ็นซ์ (KU FreshZense) ฉลากบอกความสดใหม่จากแป้งข้าวเจ้า โดยทีมผู้ช่วยวิจัยประกอบด้วย รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล ผศ.ดร.สุดสาย ตรีวานิช และ นส.อัจฉรียา นพวิญญูวงศ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลงานการตีพิมพ์

Nopwinyuwong, A., S. Trevanich and P. Suppakul. 2010. Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage. **Talanta** 81: 1126-1132.

Poster Presentations:

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Preparation of Polydiacetylene Vesicle and Amphiphilic Polymer as Time-Temperature Indicator**.** *In* **Chiang Mai International Conference on Biomaterials & Applications 2011 (CMICBA2011).** August 9-10, 2011. Chiang Mai, Thailand.

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. 2012. Preparation of polydiacetylene vesicle and amphiphilic polymer as time-temperature indicator. **Adv. Mater. Res.** 506: 552-555.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Formation of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite as Colorimetric Indicator: Effect of Time and Temperature. *In* **The 2nd International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMaP2011).** October 27-29, 2011. Busan, Korea.

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. 2013. Formation of polydiacetylene/silica nanocomposite as a colorimetric indicator: Effect of time and temperature. **Adv. Polm. Technol.** 32: E724-731.

Poster Presentations:

Nopwinyuwong, A., W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Response Modeling for Polydiacetylene/Silica Nanocomposite as Time-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Temperature Indicator**.** *In* **5th Shelf Life International Meeting & Workshop on Food Packaging Safety (SLIM2012).** May 30-June 1, 2012. Changwon, South Korea.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Preparation and Characterization of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite Embedded in Poly(vinyl alcohol) Films for Time-Temperature Indicator. *In* **The 13th ASEAN Food Conference (AFC2013) Meeting Future Food Demands: Security & Sustainability**. September 9-11, 2013. Singapore.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., T. Kaisone, P. Hanthanon, C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Effects of Nanoparticle Concentration and Plasticizer Type on Colorimetric Behavior of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite as Time-Temperature Indicator. *In* **The 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering (11th EMSES).** December 18-21, 2013. Phuket, Thailand.

Nopwinyuwong, A., T. Kaisone, P. Hanthanon, C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Effects of nanoparticle concentration and plasticizer type on colorimetric behavior of polydiacetylene/silica nanocomposite as time-temperature indicator. **Energy Procedia** (In Press)

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., T. Kaisone, P. Hanthanon, C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Suppakul. Preparation of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite for Use as a Time-Temperature Indicator: Effect of Plasticizer. *In* **Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science 2013 (HKICEAS2013).** December 19-21, 2013. Hong Kong.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., C. Rukchon, C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Development of Time-Temperature Indicator Based on Polydiacetylene/Silica Nanocomposite for Monitoring Fresh Skinless Chicken Breast Quality. *In* **The 19th IAPRI World Conference on Packaging.** June 15-18, 2014. Melbourne, Australia.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Response Modeling of Time-Temperature Indicator Based on Polydiacetylene/Silica Nanocomposite**.** *In* **The 19th IAPRI World Conference on Packaging.** June 15-18, 2014. Melbourne, Australia.

Oral Presentations:

Nopwinyuwong, A., T. Kaisone, P. Hanthanon, C. Nandhivajrin, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. Novel Time-Temperature Indicator based on Polydiacetylene/Silica Nanocomposite: Effect of Nanoparticle Concentration and Plasticizer Type. *In* **International Symposium on Green Manufacturing and Applications 2014 (ISGMA2014).** June 24-28, 2014. Busan, Korea.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nopwinyuwong, A., T. Kitaoka, W. Boonsupthip, C. Pechyen and P. Suppakul. 2014. Effect of cationic surfactants on characteristics and colorimetric behavior of polydiacetylene/silica nanocomposite as time-temperature indicator. **Appl. Surf. Sci.** 314: 426-432.

Rukchon, C., A. Nopwinyuwong, S. Trevanich, T. Jinkarn and P. Suppakul. 2014. Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. **Talanta** (In Press) DOI: 10.1016/j.talanta.2014.07.048

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

ได้รับทุนสนับสนุนนิสิตผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา (ระดับปริญญาเอก) ระหว่างปีการศึกษา 2553-2555 จากศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร สถาบันวิทยาการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาประเทศไทย (CASAF, NRU-KU, Thailand)

ได้รับทุนนิสิตโครงการแลกเปลี่ยนระยะสั้น ณ Kyushu University เมืองฟุกุโอกะ ประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2554 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีงบประมาณ 2554-2556

ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ จากภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีงบประมาณ 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์