

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนากระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนสำหรับยืดอายุ

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

Development of nanoclay-coated paper for shelf life extension of an
agricultural product

ปีงบประมาณ 2556

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

รศ.ดร. อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ

ผศ.ดร. นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด

ผศ.ดร. หทัยกานต์ มั่นสปียะ

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนงบประมาณแผ่นดิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2556 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยและนิสิตผู้ช่วยวิจัย เจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อใช้ยืดอายุผลผลิตทางการเกษตร โดยใช้ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่ผ่านการดัดแปร (porous nanoclay, NC) เคลือบบนกระดาษคราฟต์ขาว (Kraft paper, KP) และใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) เป็น binder โดยแปรอัตราส่วนของน้ำต่อ PVOH เป็น 100:20 และ 120:20 พบว่าที่ 120:20 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากให้สารเคลือบที่มีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ จากนั้นเคลือบกระดาษด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (Paper+ porous nanoclay, KP+NC) โดยแปรปริมาณ NC เป็นร้อยละ 20, 40 และ 60 ของน้ำหนักกระดาษ วัดประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วย gas chromatography พบว่าปริมาณของ NC ที่เหมาะสมในการเคลือบคือ 60% โดยน้ำหนักของกระดาษ เพราะสามารถดูดซับเอทิลีนได้ดีที่สุด

การศึกษาสมบัติของ KP+NC เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Kraft paper, KP) และกระดาษที่เคลือบด้วยดินเหนียวเบนโทไนท์ (Kraft paper+bentonite, KP+BT) ศึกษาสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความหนา แกรมกระดาษ และน้ำหนักของสารเคลือบ ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting strength) ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) และศึกษาโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์โดยใช้ scanning electron microscope (SEM) พบว่าบรรจุภัณฑ์ทั้ง KP+NC และ KP+BT มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของอากาศ และความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นมากกว่า KP ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงทั้งแนวตามเกรนและแนวขวางเกรนของ KP+BT และ KP+NC มีค่าลดลง จากผลการศึกษาโครงสร้างของ KP KP+BT และ KP+NC โดยใช้ SEM พบว่าที่ผิวหน้าของ KP+BT มีเบนโทไนต์อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นเคลือบอยู่เป็นจำนวนน้อย เบนโทไนต์ส่วนใหญ่จะแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเส้นใยของกระดาษและถูกปกคลุมด้วยสารเคลือบ PVOH ซึ่งอาจทำให้ KP+BT ไม่สามารถดูดซับเอทิลีนได้ ในขณะที่ KP+NC นั้น ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ NC ซึ่งมีการปรับปรุงผิวหน้าและหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการยึดติดได้ดีทั้งที่บริเวณเส้นใยของกระดาษและที่ตัวสารเคลือบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ KP+NC สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ จึงเลือกใช้ KP+NC ในการยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรในการทดลองขั้นต่อไป

การยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรทำโดยนำมะเขือเทศพันธุ์ลูกท้อ (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ที่มีระยะการบริบูรณ์ในช่วง breaker-turning มาห่อด้วย KP+NC และเปรียบเทียบกับห่อด้วยกระดาษคราฟต์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (KP) และมะเขือเทศไม่มีการห่อด้วยกระดาษ (no paper wrapping, NP) เก็บรักษาที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี a^*/b^* value ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่า pH ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริก การสูญเสียน้ำหนัก และปริมาณกรดแอสคอบิก ตลอดระยะเวลาการเก็บจนกระทั่งผลไม่เกิดการเน่าเสีย จากผลการทดลองพบว่ามะเขือเทศที่เก็บใน KP+NC มีค่าความแน่นเนื้อ และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริกลดลงช้ากว่ามะเขือเทศที่เก็บใน KP และ NC ตามลำดับ และยังช่วยชะลอการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงของค่าสี a^*/b^* และกรดแอสคอบิก เมื่อพิจารณาผลการทดลองของ ค่าสี a^*/b^* ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดแอสคอบิก ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การสุกของมะเขือเทศพบว่า มะเขือเทศใน NP, KP และ KP+NC มีการสุกอย่างสมบูรณ์เมื่อเก็บไว้นานประมาณ 15, 22 และ 33 วัน ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการเก็บมะเขือเทศในบรรจุภัณฑ์ KP+NC สามารถช่วยชะลอการสุกของมะเขือเทศโดยดูดซับเอทิลีนไว้ในโครงสร้างแบบมีรูพรุนของ porous nanoclay จึงมีศักยภาพช่วยยืดอายุการเก็บของผลผลิตทางการเกษตรได้

Abstract

This research developed active packaging from paper coated with porous nanoclay (NC) to be used for shelf life extension of fresh produce. Kraft paper (65 gram) was used as packaging base and polyvinyl alcohol (PVOH) was used as binder. The optimum concentration of water:PVOH was 120:20 because it gave a uniformed film layer deposited on the paper. Paper was coated with different amount of NC (Paper+ porous nanoclay, KP+NC) including 20, 40 and 60 % w/w of paper. The ethylene adsorption of the paper coated with NC was determined using gas chromatography. It was found that KP+60%NC could adsorb highest ethylene and thus used for further experiment. Three different packaging treatments were prepared including KP+NC, Kraft paper coated with bentonite (KP+BT), and Kraft paper alone (KP). The paper properties including thickness, gramage, weight of coating material, tensile strength, bursting strength and air permeability were measured. The surface structure of the coated paper was also examine using scanning electron microscope (SEM).

The results showed that KP+NC and KP+BT had significantly higher ($p < 0.05$) bursting strength and air permeability than KP. KP+BT had lowest tensile strength. The SEM micrographs revealed that only small amount of BT was found on the surface of KP+BT because BT was in between paper fiber and was covered with PVOH. This may consequently cause KP+BT to be unable to adsorb ethylene. On the other hand, NC particles, which have ability to adsorb ethylene in their structure, were deposited on the surface of the KP+NC paper. Thus, KP+NC was used for further studies.

The ability of the KP+NC paper for shelf life extension of fresh fruit was investigated by using tomatoes to represent climacteric fruits. Tomatoes were wrapped with KP+NC, and Kraft paper without coating (KP). Tomatoes without paper wrapping (NP) were used as control samples. All samples were stored at $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ and fruit qualities including a^*/b^* color value, firmness, total soluble solid, pH, titratable acidity (g of citric acid equivalent 100 g^{-1}), weight loss and ascorbic acid were measured throughout the storage.

The results revealed that tomatoes wrapped in KP+NC could maintain firmness and titratable acid better than those in KP and NP, respectively. Moreover, weight loss and changes in a^*/b^* color values and ascorbic acid of tomatoes in KP+NC were lower than those in other treatments. According to the results of total soluble solid, a^*/b^* color value, and ascorbic acid, tomatoes in NP, KP, and KP+NC reached fully ripening stage after storage for approximately 15, 22 and 33 days, respectively. It is suggested that KP+NC could extend shelf life of tomatoes probably due to its ability to adsorb ethylene and subsequently slow down the ripening of the tomatoes.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อไทย	iii
บทคัดย่ออังกฤษ	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ix
1. บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
2. วารสารปริทัศน์	3
3. วิธีดำเนินการวิจัย	15
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	22
5. สรุปผลการทดลอง	46
6. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป	48
เอกสารอ้างอิง	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของสารเคลือบ	17
ตารางที่ 2 สมบัติทั่วไปและสมบัติเชิงกลของกระดาษกราฟขาวที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับดินเหนียวนาโนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับเบนโทไนท์	28
ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของกระดาษกราฟที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษกราฟที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์ และกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโน	29
ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีและกายภาพเริ่มต้นของมะเขือเทศพันธุ์ลูกท้อ	34

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ร้อยละการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษคราฟท์ที่มีเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน ร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 กรัมต่อน้ำหนักกระดาษ	23
รูปที่ 2 ภาพถ่ายโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	24
รูปที่ 3 ดัชนีการซึมผ่านของอากาศของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน	26
รูปที่ 4 ดัชนีความต้านทานแรงดึงของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนในแนวตามเกรน (MD) และในแนวขวางเกรน (CD)	27
รูปที่ 5 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโน	28
รูปที่ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษคราฟท์ขาวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	30
รูปที่ 7 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วย PVOH ผสมกับ เบนโทไนท์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	31
รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วย PVOH ผสมกับดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	31
รูปที่ 9 Ripening stage ของมะเขือเทศ (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	34
รูปที่ 10 ความแน่นเนื้อของมะเขือเทศ NP, KP และ KP+NC เก็บรักษาที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	36
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงเพกตินในผลไม้	37
รูปที่ 12 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	38
รูปที่ 13 ค่า pH ของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	39
รูปที่ 14 ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริกของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	40
รูปที่ 15 การสูญเสียน้ำหนักของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	41
รูปที่ 16 ค่า a^*/b^* ของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	43
รูปที่ 17 ปริมาณกรดแอสคอบิกของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$	44

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

PVOH	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยยึดติด (binder)
KP	กระดาษคราฟท์ขาว (Kraft paper) ที่มี basis weight = 65 แกรม
PCH	Porous clay heterostructures
NC	ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (Porous nanoclay)
BT	เบนโทไนท์ (Bentonite)
SEM	Scanning electron microscope
KP+BT	Kraft paper coated with bentonite
KP+NC	Kraft paper coated with porous nanoclay
NP	No package wrapping
a*/b*	ค่าสี (CIE color value)

1. บทนำ

ผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ ดอกไม้ ถือเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย โดยสามารถนำเงินตราเข้าประเทศได้เป็นจำนวนมาก (Center for Agricultural Information, 2013) อย่างไรก็ตามผักและผลไม้ถึงแม้ภายหลังการเก็บเกี่ยวยังคงมีกระบวนการเมตาบอลิซึมเกิดขึ้นตลอดเวลา ส่งผลให้ผลิตผลเหล่านี้เน่าเสียได้ง่าย ซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการจัดจำหน่ายและเก็บรักษา

เอทิลีน(ethylene) เป็นฮอร์โมนพืชที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การสุก และการชราภาพของผลไม้ การชะลอการเสื่อมสภาพและการยืดอายุผลไม้ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สามารถทำได้โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและการยับยั้งการทำงานของเอทิลีนบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) หมายถึง บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้ทำหน้าที่แค่ห่อหุ้มหรือป้องกันผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังสามารถทำหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่งหรือตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์ ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้นได้ (อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ และคณะ, 2549) บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในผลิตผลเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลิตผลสด ซึ่งบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่สามารถกำจัดเอทิลีนเป็นระบบดูดซับเอทิลีน ที่อาจอยู่ในรูปแบบของหรือถุงบรรจุสารดูดซับ หรืออาจเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่มีสารดูดซับเป็นองค์ประกอบ (Caner, Aday and Demir, 2008; Siripatrawan et al., 2006)

ที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อยับยั้งการทำงานของเอทิลีนในผลิตผลสด เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากช่วยในการดูดซับก๊าซเอทิลีน(Choi et al., 2003) นอกจากนี้ยังมีการใช้กระดาษที่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบมาใช้เพื่อช่วยยืดอายุของแตงหอมได้ (พีชชา ตันติเดมิทและคณะ 2549) อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกัมมันต์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีน จึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular-activated carbon, GAC) โดยใช้ Pd, Ti, Cu, Rh และ Co เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งช่วยให้การดูดซับเอทิลีนทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Bailén et al., 2006) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความอึดตัวของสารดูดซับ และการสูญเสียประสิทธิภาพตามระยะเวลาการดูดซับอย่างรวดเร็ว

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาวัสดุนาโน มาผสมในพลาสติกพอลิเอทิลีนมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการรักษาคุณภาพของพุทราจีน (Li et al., 2009) และยังมีการศึกษาการใช้วัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) ในการยืดอายุผลกีวี ซึ่งบรรจุภัณฑ์จาก nano-packing material ที่เตรียมขึ้น

นช่วยรักษาคุณภาพและยืดอายุของผลกีวีได้ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับเก็บรักษาตามปกติ (Hu et al., 2011)

ดินเหนียวนาโน (nanoclay) ได้จากกลุ่มแร่ดินเหนียวที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้ว โดยการนำกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีความสามารถในการขยายตัวได้สูง และมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี เช่น กลุ่มแร่ดินเหนียวมอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เบนโทไนท์ (bentonite) ซึ่งมีความเป็นขี้หรือชอบน้ำ นำมาเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบสารอินทรีย์ โดยการแทนที่ประจุต่าง ๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ (Chmielarz et al. 2009; Srithammaraj, Magaraphan and Manuspiya, 2011) นอกจากนี้ยังมีการนำดินเหนียวนาโนมาดัดแปลงโครงสร้าง โดยการนำใช้สารลดแรงตึงผิว ให้แทรกตัวอยู่ภายในชั้นดินเหนียวของโซเดียมเบนโทไนต์ โดยจะเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันของเตตระเอทอกซีไฮดรอกซีไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวทำให้โครงสร้างของดินเหนียวมีรูพรุนขนาดนาโนเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (porous clay heterostructure, PCH) (Srithammaraj, Magaraphan and Manuspiya, 2011)

ปัจจุบันมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง หนึ่งในวัสดุนาโนที่มีความสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้คือ แร่ดินเหนียวนาโน (nanoclay) ซึ่งหากมีการปรับโครงสร้างภายในให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีโครงสร้างเป็นรูพรุนรวมถึงการปรับปรุงสภาพผิวของรูพรุนด้วยหมู่ฟังก์ชันทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้น และนำมาพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) ให้เหมาะกับการบรรจุผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ที่จะสามารถควบคุมหรือกำจัดก๊าซเอทิลีนที่เป็นต้นเหตุของการสุกหรือเน่าเสียได้ และส่งผลให้สามารถยืดอายุการเก็บผลิตผลและลดการเน่าเสีย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนสำหรับยืดอายุผลิตผลทางการเกษตรของประเทศไทย

2. วารสารปริทัศน์

2.1 การเจริญของผลิตผล

ผลิตผลจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอยู่ตลอดระยะเวลาการเจริญ (development) ตั้งแต่เริ่มแรกจนกระทั่งตายในช่วงระยะเวลาที่มีการเจริญจะเกิดขึ้นตอนการพัฒนาต่างๆ ได้แก่ การเติบโต การบริบูรณ์ การสุก และการชราภาพ (จริงแท้ ศิริพานิช, 2542) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

การเติบโต (growth) คือการเพิ่มขึ้นอย่างไม่กลับคืนของลักษณะทางกายภาพของพืชหรือส่วนของพืช

การบริบูรณ์ (maturation) คือ ขั้นตอนหนึ่งของการเจริญซึ่งนำไปสู่ความบริบูรณ์ทางสรีรวิทยาหรือความบริบูรณ์ทางพืชสวน

การสุก (ripening) คือกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นร่วมกันในช่วงท้ายของการเจริญเติบโตจนถึงช่วงแรกของการชราภาพและส่งผลให้เกิดคุณลักษณะเฉพาะ มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น รส เป็นต้น

การชราภาพ (senescence) คือกระบวนการต่างๆ ในพืชหรือส่วนต่างๆ ของพืชที่เกิดขึ้นหลังจากการบริบูรณ์ทางสรีรวิทยาหรือทางพืชสวนและนำไปสู่การตายของพืชหรือส่วนต่างๆ ของพืชนั้นๆ

ขั้นตอนของการพัฒนาต่างๆ ของการเจริญ (development) นับตั้งแต่เริ่มเติบโตจนกระทั่งชราภาพ (senescence) อาจเหลื่อมล้ำกันขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตผล และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิและอัตราส่วนก๊าซในระหว่างการเก็บรักษา ในการเจริญนั้นผลิตผลต้องใช้เวลาจากกระบวนการหายใจซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เปลี่ยนอาหารให้อยู่ในรูปของพลังงาน โดยทั่วไปแล้วผลไม้สามารถแบ่งประเภทตามอัตราการหายใจได้เป็น 2 ประเภท คือ climacteric กับ non-climacteric ผลไม้ประเภท climacteric คือผลิตผลที่มีอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนสูงขึ้นในระหว่างการสุก

การสุกของผลไม้สามารถเกิดได้หลังจากการเก็บเกี่ยวจากต้นและสามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้ด้วย เอทิลีน นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีและทางกายภาพต่างๆ (จริงแท้ ศิริพานิช, 2542; Biale, 1960) เช่น

- การหายใจเพิ่มมากขึ้นแล้วลดลง
- ความเข้มข้นของเอทิลีนภายในผลและการผลิตเอทิลีนมากขึ้น
- ตอบสนองต่อเอทิลีนได้ง่าย

- องค์ประกอบของผนังเซลล์เปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกตินทำให้ผลไม้อ่อนนิ่ม
- การควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ลดน้อยลง
- โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ถูกสร้างขึ้น
- การสลายตัวของคลอโรฟิลล์ หรือการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุในผลิตภัณฑ์
- แอนโทไซยานินและแคโรทีนอยด์ถูกสร้างขึ้น
- โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนแปลงไป เช่น แป้งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือน้ำตาลชนิดหนึ่งเปลี่ยนไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง
- กรดอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป
- สารระเหยได้ (volatile compounds) ที่ให้กลิ่นรสถูกสร้างขึ้น
- สารพวกแทนนินรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (polymerization) ทำให้ความฝาดลดลง
- เกิดการหลุดร่วง (abscission)

Villanueva et al. (2004) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่างการสุกของ muskmelon พบว่าเนื้อสัมผัสของผลไม้อ่อนนิ่มค่า firmness ลดลงอย่างรวดเร็วในระหว่างการสุก และพบว่าปริมาณเพกตินลดลงส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลไม้อ่อนนิ่มลง จากการวิเคราะห์ค่าการเสื่อมสลายของ pectin ไปเป็น galacturonic acid พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงระหว่างระยะแรกกับระยะสุดท้ายของการบิรูรณ์ การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเหล่านี้ไม่มากนักแต่ก็มีความสำคัญเพราะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคยอมรับ สอดคล้องกับ Biale (1960) ซึ่งสรุปไว้ว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลที่ละลายได้ กรด และเพกตินของผลไม้อ่อนนิ่มในระหว่างการเจริญ ส่งผลให้ปริมาณซูโครสจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กับการลดลงของปริมาณกลูโคสและฟรุคโตส ปริมาณกรดลดลง และปริมาณเพกตินลดลงทำให้เนื้อสัมผัสของผลไม้อ่อนนิ่มลง

2.2 เอทิลีน (C₂H₄)

ก๊าซเอทิลีน (C₂H₄) เป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสี มีกลิ่นเล็กน้อย เป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน เอทิลีนเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ “ripening hormone” เนื่องจาก เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่

มีบทบาทมากมาย ตั้งแต่การเจริญของพืช การพัฒนา จนกระทั่งตาย ที่สามารถทำให้พืชเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาได้ โดยสามารถเร่งให้เกิดการกระบวนการสุกไปจนกระทั่งเกิดการเสื่อมสลาย (senescence) ผลไม้มักมีการผลิตเอทิลีนไม่มากนักในช่วงการเจริญเติบโตแต่อัตราการสังเคราะห์เอทิลีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อถึงช่วงการสุก ผลผลิตที่เกิดบาดแผลหรือรอยขีด หรือเป็นโรค รวมทั้งการเพิ่มอุณหภูมิในการเก็บรักษา มีผลทำให้การสังเคราะห์เอทิลีนเพิ่มขึ้นด้วย การสังเคราะห์เอทิลีนจะลดลงเมื่อเก็บรักษาพืชผลที่อุณหภูมิต่ำหรือในที่มืดออกซิเจนต่ำ และคาร์บอนไดออกไซด์สูง (Vermeiren et al., 2003) เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการสังเคราะห์เอทิลีนแล้วอาจแบ่งประเภทของผลไม้เป็น climacteric fruits และ non-climacteric fruits ซึ่งมีความสามารถในการสังเคราะห์เอทิลีนแตกต่างกัน ดังนี้

(1) climacteric fruit หรือ ผลไม้ที่มีช่วงไคลแมคทิริก เป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงขึ้นและอัตราการสังเคราะห์เอทิลีนมากขึ้นในช่วงการสุก โดยเฉพาะช่วงต้นของการเกิดไคลแมคทิริก ผลไม้ชนิดนี้จึงสามารถเก็บเกี่ยวเมื่อแก่จัดแล้วนำมาบ่มให้สุกได้ และเป็นผลไม้ที่มีความไวต่อก๊าซเอทิลีน ผลไม้ที่มีช่วงไคลแมคทิริกนี้จะมีการผลิตเอทิลีนมากกว่าผลไม้ที่ไม่มีช่วงไคลแมคทิริก

(2) nonclimacteric fruit หรือผลไม้ที่ไม่มีช่วงไคลแมคทิริก เป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจและการสังเคราะห์เอทิลีนไม่เปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวมักจะเก็บเกี่ยวเมื่อสุกบนต้นเพราะโดยทั่วไปไม่สามารถบ่มสุกหลังการเก็บเกี่ยว (นิธยา รัตนাপนนท์ และ ดนัย บุญญเกียรติ, 2548; Grierson and Kader, 1986)

ปริมาณการผลิตเอทิลีนในพืชจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้ ซึ่งในผลไม้เน้นการผลิตเอทิลีนและปริมาณความเข้มข้นภายในมีความสัมพันธ์กับการหายใจ ผลไม้ประเภท non-climacteric จะมีอัตราการผลิตเอทิลีนและความเข้มข้นภายในผลต่ำตลอดการพัฒนาและการเจริญเติบโต ซึ่งเอทิลีนจะมีผลเพียงการเร่ง senescence เท่านั้น ส่วนในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งเป็นผลไม้ที่มีระยะเวลาในการสุกเร็ว ในระหว่างการเจริญเติบโตจะมีการผลิตและความเข้มข้นของเอทิลีนภายในผลต่ำ ขณะที่ผลไม้เริ่มสุก จะมีการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมากรวมทั้งความเข้มข้นภายในสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ เอทิลีนสามารถเร่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้ ทำให้เกิดการสุกและการชราภาพตามมา เนื่องจากอัตราการหายใจมีความสัมพันธ์กับการเสื่อมเสียของผลิตผล กล่าวคือ ในผลิตผลที่มีอัตราการหายใจสูง เช่น บลอคโคลี หน่อไม้ฝรั่ง เห็ด เป็นต้น จะเสื่อม

เสียได้ง่าย แต่ในผลิตผลที่มีอัตราการหายใจต่ำมาก เช่น ถั่ว อินทผลัม มันฝรั่ง และหัวหอม จะมีระยะเวลาเป็นเดือนถึงจะเสื่อมเสีย เมื่อผลไม้สุกจะมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้น ได้แก่ เนื้อสัมผัสของผลไม้อ่อนนุ่มลงเนื่องจากเอทิลีนกระตุ้นการสังเคราะห์และการทำงานของเอนไซม์หลายอย่าง ขณะเดียวกันเอทิลีนก็จะเร่งการเสื่อมสลายตัวของคลอโรฟิลล์ในเนื้อเยื่อทำให้ผลิตผลเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส่งผลให้คุณภาพลดลง และเมื่อผลไม้สุกแล้วจะมีรสชาติที่ดีขึ้นเพราะเอทิลีนกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงในผลไม้ไปเป็นน้ำตาล (Seymour, Taylor and Tucker, 1993)

อย่างไรก็ตาม เอทิลีนก็ทำให้เกิดอาการผิดปกติหลังการเก็บเกี่ยวในผักผลไม้บางชนิด ได้ เช่น ในผักกาดหอมเกิดแผลสีน้ำตาลตามบริเวณก้านใบหรือเส้นใบที่มีสีเขียวเมื่อสัมผัสกับเอทิลีน การเกิดโรคขมในแครอท การงอกของมันฝรั่ง ในผลไม้ที่เกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยว ผลของเอทิลีนกับโรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนผลิตผลยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด มีทั้งที่พบว่าเอทิลีนจะทำให้เกิดโรคและมีทั้งการที่เอทิลีนก่อให้เกิดความต้านทานโรค นอกจากนี้ผลไม้ประเภท climacteric เมื่อได้รับเอทิลีนจะทำให้เกิดการสร้างเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น (autocatalytic) (Beattie and Wade, 1996; Zagory, 1995)

เอทิลีนส่งผลต่อคุณภาพของผลิตผล ทั้งในด้านดี เช่น เป็นตัวเริ่มต้นที่ทำให้เกิดกระบวนการสุก และในด้านที่เป็นอันตรายต่อพืช โดยเร่งการเจริญเติบโตและทำให้คุณภาพและอายุการเก็บรักษาสั้นลง ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตและการทำงานของเอทิลีนได้แก่ ชนิดหรือพันธุ์พืช, อายุทางสรีรวิทยาของพืช เมื่อเก็บเกี่ยว, อุณหภูมิ, ปริมาณออกซิเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, เอทิลีน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ในบรรยากาศ, ความเครียดของผลิตผล, ฮอรโมนพืช รวมทั้งสภาวะยับยั้งการผลิตและการทำงานของเอทิลีน ดังนั้นการดูแลหลังการเก็บเกี่ยวโดยใช้เทคนิคในการจัดการและการเก็บรักษาที่ดีจะช่วยลดการสูญเสียของผลิตผล (จริงแท้ ศิริพานิช, 2542; Seymour, Taylor and Tucker, 1993)

ในระหว่างการเก็บผลิตผลจะมีการหายใจและเกิดกระบวนการต่างๆ ภายในผลิตผลซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ องค์ประกอบของบรรยากาศ อายุการเก็บเกี่ยว อายุการเก็บรักษา และความเครียดต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทอากาศระหว่างสถานที่เก็บรักษาที่เก็บรักษาที่บรรจบบรรยากาศข้างนอกด้วย ถ้าการถ่ายเทอากาศดีความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ในสถานที่เก็บจะใกล้เคียงกับสภาพบรรยากาศปกติ แต่ถ้าการถ่ายเทไม่ดีความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ก็จะต่างไปจากปกติ ทั้งนี้รวมถึงเอทิลีนที่ผลิตผลสร้างขึ้นมาด้วย อาจมีปริมาณมากขึ้นจนมีผลทำให้การสุกหรือการชราภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ ดังนั้นถ้า

ต้องการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้อยู่ได้นานจำเป็นต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ให้คงที่ อยู่ในระดับที่สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ภายในผลิตภัณฑ์ให้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ

การควบคุมและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อาจทำได้หลายทาง เช่น โดยการระบาย อากาศด้วยการเติมก๊าซหรือระบายก๊าซบางชนิดออกจากที่เก็บรักษา ในภาวะการเก็บรักษาที่สามารถ ควบคุมปริมาณขององค์ประกอบของบรรยากาศให้คงที่ได้เรียกว่าการเก็บรักษาในภาวะบรรยากาศ ควบคุม (controlled atmosphere) ซึ่งโดยปกติจะรวมถึงการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยเช่นกัน การ เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศควบคุมจึงเป็นการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปรอย่างหนึ่ง

กระบวนการต่างๆ ทางสรีรวิทยาจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลงส่งผลให้อายุการเก็บรักษานานขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งส่งผลต่ออัตราการหายใจ การสร้างก๊าซ เอทิลีน และกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้ามีปริมาณมากสามารถยับยั้ง ขั้นตอนบางขั้นตอนในกระบวนการหายใจ มีผลชะลอกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวได้ นอกจากนี้ยังมีสมบัติป้องกันการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนของผลิตภัณฑ์ด้วยเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จับ กับบริเวณเร่งปฏิกิริยา (active site) ของเอทิลีน ดังนั้นการลดปริมาณออกซิเจนและเพิ่ม คาร์บอนไดออกไซด์จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายใต้ภาวะที่มี ออกซิเจนน้อยและ/หรือมีคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติเรียกว่าการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัด แปร (modified atmosphere, MA)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่

1. ชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันมีอัตราการหายใจและกระบวนการต่างๆ แตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณการใช้ออกซิเจนการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนไม่เท่ากัน ส่งผลต่อสภาพ บรรยากาศรอบๆผลิตภัณฑ์ภายในภาชนะบรรจุ นอกจากนี้สมบัติในการยอมให้ก๊าซชนิดต่างๆภายใน ผลิตภัณฑ์ผ่านเข้าออกทางผิวหรือเปลือกไปสู่บรรยากาศยอมส่งผลถึงความเข้มข้นของก๊าซภายในผลิตภัณฑ์เอง ด้วย

2. วัยและความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่มีวัยต่างกันอัตราการหายใจการสร้างเอทิลีน และเมตาบอลิซึมต่างๆ แตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่ยังอ่อนอยู่มักมีอัตราต่างๆ ดังกล่าวต่ำกว่าผลไม้ที่กำลัง สุก ส่งผลให้บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาแตกต่างกัน

3. คุณหมุมิในการเก็บรักษา คุณหมุมิที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆสูงขึ้น ส่งผลต่อการใช้และการผลิตก๊าซต่างๆ ของผลิตภัณฑ์
4. ปริมาณของผลิตภัณฑ์ในภาชนะบรรจุ ในปริมาตรที่เท่ากัน การบรรจุผลิตภัณฑ์จำนวนมากทำให้ผลิตภัณฑ์ออกซิเจนมากกว่าและเกิดการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการบรรจุผลิตภัณฑ์จำนวนน้อย
5. สมบัติการยอมให้ก๊าซผ่านเข้าออกของภาชนะบรรจุ (gas transmission rate) ภาชนะบรรจุที่ยอมให้ก๊าซต่างๆ ผ่านเข้าออกได้มากส่งผลให้องค์ประกอบของก๊าซภายในภาชนะบรรจุใกล้เคียงกับบรรยากาศปกติมากกว่าภาชนะบรรจุที่ยอมให้ก๊าซต่างๆผ่านได้น้อย (Beattie and Wade, 1996; Zagory, 1995)

2.3 เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อยับยั้งการทำงานของเอทิลีน

เอทิลีน มีบทบาทสำคัญต่อผักและผลไม้ในการกระตุ้นให้มีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ และยังกระตุ้นการสุกให้เกิดได้เร็วขึ้น ทำให้เกิดทั้งผลดีและผลเสีย ซึ่งบ่อยครั้งที่พบว่าผลเสียต่อคุณภาพและทำให้อายุของผลิตภัณฑ์หลายชนิดสั้นลงระหว่างการเก็บรักษา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการศึกษาหาวิธีการกำจัดและยับยั้งการทำงานของเอทิลีน การใช้เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อยับยั้งการทำงานของเอทิลีนที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ การใช้บรรจุภัณฑ์แบบดัดแปรบรรยากาศ (modified atmosphere packaging) และการดูดซับเอทิลีน ด้วยถ่านกัมมันต์ (active carbon) และสารดูดซับเอทิลีนที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ เช่น ดินเหนียวนาโน (nanoclay)

2.4 การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาพบรรยากาศดัดแปร

คุณหมุมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายใต้คุณหมุมิต่ำ กระบวนการต่างๆ ทางสรีรวิทยาจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลงส่งผลให้อายุการเก็บรักษานานขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งส่งผลต่ออัตราการหายใจ การสร้างก๊าซเอทิลีนและกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้ามีปริมาณมากสามารถยับยั้งขั้นตอนบางขั้นตอนในกระบวนการหายใจมีผลชะลอกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเก็บเกี่ยวได้ นอกจากนี้ยังมีสมบัติป้องกันการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนของผลิตภัณฑ์ด้วยเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จับกับบริเวณเร่งปฏิกิริยา (active site) ของเอทิลีน ดังนั้นการลดปริมาณออกซิเจนและเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์จึง

ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลได้ การเก็บรักษาผลิตผลภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนน้อยและ/หรือมีคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติเรียกว่าการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปร (นิธิยา รัตนานนท์ และ ดนัย บุญยเกียรติ, 2548)

ปริมาณก๊าซชนิดต่างๆในการเก็บรักษาภายใต้ภาวะบรรยากาศดัดแปรนี้ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ เนื่องจากในระหว่างการเก็บผลิตผลจะมีการหายใจและเกิดกระบวนการต่างๆ ภายในผลิตผล ซึ่งขึ้นกับ อุณหภูมิ องค์ประกอบของบรรยากาศ อายุการเก็บเกี่ยว อายุการเก็บรักษา และความเครียดต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเอทิลีนที่ผลิตผลสร้างขึ้นมาด้วย อาจมีปริมาณมากขึ้นจนมีผลทำให้การสุกหรือการชราภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ ดังนั้นถ้าต้องการเก็บรักษาผลิตผลให้อยู่ได้นาน จำเป็นต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ให้คงที่อยู่ในระดับที่สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ภายในผลิตผลให้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ

การควบคุมปริมาณก๊าซต่างๆ ภายในสถานที่เก็บรักษาให้คงที่อาจทำได้หลายทาง เช่น โดยการระบายอากาศด้วยการเติมก๊าซหรือระบายก๊าซบางชนิดออกจากที่เก็บรักษาในภาวะการเก็บรักษาที่สามารถควบคุมปริมาณขององค์ประกอบของบรรยากาศให้คงที่ได้เรียกว่าการเก็บรักษาในภาวะบรรยากาศควบคุม (controlled atmosphere) ซึ่งโดยปกติจะรวมถึงการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยเช่นกัน

ข้อดีของการใช้บรรจุภัณฑ์แบบดัดแปรบรรยากาศในการเก็บรักษาผลิตผล

การเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปรนอกจากมีประโยชน์ด้านการชะลอกระบวนการทางชีวเคมีต่างๆภายในผลผลิต ยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตผลแล้ว ยังมีข้อดีในด้านอื่นๆ ดังนี้

1. ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวผลิตผลที่มีความบริบูรณ์มากขึ้น ผลิตผลที่มีความบริบูรณ์มากมักเก็บรักษาไม่ได้นาน และขนส่งได้ไม่ไกล แต่มีรสชาติและคุณภาพในการบริโภคดีกว่าผลิตผลที่มีความบริบูรณ์น้อย ดังนั้นการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปรสามารถแก้ปัญหานี้ได้
2. ลดความไว (sensitivity) ของผลิตผลต่อเอทิลีน ทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่กระตุ้นโดยเอทิลีนเกิดขึ้นช้าลง ทั้งนี้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายเอทิลีนสามารถไปจับที่บริเวณเร่งปฏิกิริยา (active site) ของเอทิลีนได้

3. ลดอาการผิดปกติทางสรีรวิทยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา เช่น อาการสะท้อนหนาวเพราะเมื่อเกิดการบาดเจ็บระยะแรก (primary injury) ขึ้นในเซลล์แล้ว องค์ประกอบต่างๆที่เคยอยู่ในคอมพาร์ตเมนต์(compartment)ต่างๆจะแพร่ผ่านออกมา โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน ส่งผลให้เกิดอาการผิดปกติสีน้ำตาลขึ้น

4. ลดการเจริญของจุลินทรีย์บรจุภัณฑ์แบบดัดแปรบรรยากาศที่มีการลดปริมาณออกซิเจนสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจน (aerobic microorganism) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่เจริญบนผักและผลไม้

5. เพิ่มคุณภาพของผลิตผล ผลิตผลบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น หน่อไม้ฝรั่งจะมีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นระหว่างการเก็บรักษา สภาพบรรยากาศดัดแปรสามารถชะลอการสร้างเส้นใยในหน่อไม้ฝรั่งได้

ข้อเสียของการใช้บรรจุภัณฑ์แบบดัดแปรบรรยากาศในการเก็บรักษาผลิตผล

การเก็บรักษาผลิตผลภายใต้สภาพบรรยากาศควบคุมที่ได้รับการทดสอบแล้วมักปลอดภัยต่อผลิตผลสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลได้ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาผลิตผลในสภาพบรรยากาศดัดแปรที่ไม่ได้ควบคุมองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ ให้เหมาะสม อาจทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากก๊าซแต่ละชนิดมีความเข้มข้นสูงหรือต่ำเกินไป อาการผิดปกติของผลิตผลเมื่อเก็บรักษาไว้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรมีหลายรูปแบบด้วยกัน ลักษณะที่พบมากได้แก่ ผิวของผลิตผลเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลคล้ายถูกน้ำร้อนลวก มีรสชาติและกลิ่นผิดปกติและสำหรับผลไม้มักมีกระบวนการสุกผิดปกติหรือไม่สุก

Klieber et al. (1996) ได้ศึกษาผลของการลดปริมาณออกซิเจนและเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่มีต่อสรีรวิทยาของมะเขือเทศพันธุ์ Bermuda ระยะ breaker โดยปรับภาวะบรรยากาศเป็น 4 ทริตเมนต์ดังนี้ (1) 0.5%O₂/99.5%N₂ (2) 1.0%O₂/99.0%N₂ (3) 80%O₂/20% อากาศและ (4) ไม่มีการดัดแปรบรรยากาศ เก็บมะเขือเทศในทริตเมนต์ต่างๆ เป็นเวลา 1 3 5 และ 7 วัน ที่ 22°C จากนั้นนำมาเก็บที่ภาวะบรรยากาศ (22°C) ผลการทดลองพบว่ามะเขือเทศที่เก็บใน 80%O₂ และ 20% อากาศ จะเกิดการเสียหายจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ injury) 35% ของมะเขือเทศทั้งหมดหลังจากเก็บเป็นเวลา 5 วัน ในขณะที่การเก็บมะเขือเทศใน 0.5O₂%/99.5%N₂ และ 1.0%O₂/99.0%N₂ เป็นเวลา 3 วัน จะเกิดบาดแผลที่ผิว 95% และ 50% ของมะเขือเทศทั้งหมดตามลำดับ

2.5 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) เป็นสาร hydrophobic และ organophilic เป็นของแข็งสีดำ ที่มีผิวหน้าเป็น non-polar แต่ที่ผิวหน้านี้ก็สามารถเป็น polar ได้เล็กน้อยเนื่องจากการ oxidation ที่ผิวหน้า ถ่านกัมมันต์ได้จากการเผาวัตถุดิบพวกอินทรีย์ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะที่กำเนิดมาจากพืช เช่น กะลามะพร้าว, ชี้อ้อย, แกลบ ฯลฯ ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือถ่านกราไฟต์ คือ ถ่านกัมมันต์มีความพรุนมากกว่า ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือทางกายภาพทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง elementary crystallites ในถ่านเพิ่มขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะได้รูพรุนจำนวนมากทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น สามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา โครงสร้างรูพรุนจะมีผลต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อขนาด (surface-to-size ratio) ดังนั้นในการกระตุ้นคาร์บอนจึงทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส โดยทั่วไปกระบวนการการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของตัวเองและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ (organic) สารไม่มีขั้ว (non-polar substances) เช่น mineral oil, poly aromatic hydrocarbon, chloride phenol เป็นต้น และยังดูดซับสารพวก halogen คือ I, Br, Cl, He และ F และในทางอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์สามารถใช้ดูดซับกลิ่น รส ยีสต์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการหมัก เช่น อัลดีไฮด์คีโตน อีกด้วย (พีชยา ตันติเตมิท และคณะ, 2009; Bailén et al., 2006; Choi et al., 2003) ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ความดันไอต่ำ และมีจุดเดือดสูง จะถูกดูดซับได้ดี, ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้มากขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ และการดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ความดันสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (Choi et al., 2003; Crittenden and Thomas, 1998)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่ใช้ทั่วไปในการดูดซับสารที่มีขั้วต่ำในการบำบัดน้ำเสีย, ใช้ขจัดสี, ใช้บำบัดอากาศเสีย (Crittenden and Thomas, 1998) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารดูดซับเอทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์และกลิ่นในผักและผลไม้ (Brody, Strupinsky and Kline, 2001; Vermeiren et al., 2003) ได้มีการวิจัยใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ palladium chloride เพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นของเอทิลีน ผลปรากฏว่าช่วยลดความแน่นเนื้อของผลกีวีและกล้วย และช่วยลดการสูญเสียสีเขียวใน spinach แต่ไม่มีผลในบร็อคโคลี่ (Abe and Watada, 1991) ในทางการค้ามีการผลิตสารดูดซับเอทิลีนที่มีถ่านกัมมันต์

เป็นส่วนประกอบ ได้แก่ สารดูดซับเอทิลีนที่บรรจุในซองขนาดเล็ก สารดูดซับเอทิลีนในรูปของกล่องกระดาษลูกฟูก นอกจากนี้ยังมีการใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ palladium chloride ในการกำจัดเอทิลีนและการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบใน ethylene gas removing sheet ซึ่งสามารถใช้รักษาความสดของผักและผลไม้ รวมทั้งการใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบแท่งที่ใช้เก็บรักษาผักและผลไม้เพื่อช่วยดูดซับเอทิลีนและกลิ่นไม่ดีที่ปรากฏขึ้น (Brody et al., 2001; Crittenden and Thomas, 1998; Vermeiren et al., 2003)

พีชยา ตันติเตมิท และคณะ (2009) ผลิตกระดาษจากใบสับปะรดที่มีถ่านกัมมันต์เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บแตงหอม ผลิตกระดาษจากใบสับปะรดที่มีถ่านกัมมันต์ มาใช้ยืดอายุแตงหอม เมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษแล้วกระดาษจากใบสับปะรดที่มีถ่านกัมมันต์สามารถลดการผลิตก๊าซเอทิลีนได้น้อยกว่าซองบรรจุสารดูดซับเอทิลีนที่มีจำหน่ายทางการค้า แต่การใช้กระดาษที่มีถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มในการยืดอายุการเก็บรักษาแตงหอมได้ดีกว่ากระดาษที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ (ตัวอย่างควบคุม) ดังนั้นกระดาษที่มีถ่านกัมมันต์จึงมีศักยภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาแตงหอม

การใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากช่วยในการดูดซับก๊าซเอทิลีนยังมีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีน (Bailén et al., 2006) จึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์โดยใช้ Pd, Ti, Cu, Rh และ Co เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งช่วยให้การดูดซับเอทิลีนทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Maneerat et al., 2003) โดย Bailén et al. (2007) พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ Pd ช่วยยืดอายุการเก็บของมะเขือเทศภายใต้ภาวะการดัดแปลงบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ (modified atmosphere packaging, MAP) ได้ดีกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความอึดตัวของสารดูดซับ และการสูญเสียประสิทธิภาพตามระยะเวลาการดูดซับอย่างรวดเร็ว

2.6 ดินเหนียวนาโน (Nanoclay)

ดินเหนียว (clay) ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบสำคัญในดินได้แก่ สารอินทรีย์ (organic matters) สารอนินทรีย์ (inorganic matters) และความชื้น (น้ำ) ในส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์นี้มีแร่ธาตุหรือแร่ดินเหนียวที่สำคัญหลากหลายชนิด ที่สำคัญที่สุดคือกลุ่มแร่ซิลิเกต แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบขึ้นอยู่กับปริมาณชนิดของธาตุ

ที่เป็นองค์ประกอบชนิดโครงสร้างผลึกหรืออัญรูปเป็นต้นแร่ดินเหนียวที่สำคัญนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์และนาโนคอมพอสิต์ก็คือ กลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ เรียกว่ากลุ่ม smectite clay และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้คือ แร่ดินเหนียว มอนท์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเบนโทไนท์ซึ่งอยู่ในตระกูล phyllosilicate ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย แร่ดินเหนียวชนิดอื่นในกลุ่มนี้ที่มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นนาโนเคลย์ได้แก่ saponite และ vermiculite เป็นต้น (รัตนวรรณ มกรพันธุ์, 2547)

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนท์มอริลโลไนท์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่า ความหนาของชั้นผลึกขยายจนถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มากจึงเป็นที่รู้จัก และนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดีใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินเหนียวขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดประจุได้เช่นประจุบวก แร่ดินเหนียวที่สำคัญนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์และนาโนคอมพอสิต์ก็คือ กลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีจุดเด่นคือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ (polarity) เรียกว่ากลุ่ม smectite clay และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้คือ แร่ดินเหนียว montmorillonite

การผลิตดินเหนียวนาโน (nanoclay) จากแร่ดินเหนียวมอนท์มอริลโลไนท์ ซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ ให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทนทำได้โดยการแทนที่ประจุต่างๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า modified clay หรือ organo-philic clay ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ เกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ทำให้ชั้นผลึกห่างกัน เกะก้นอย่างหลวมๆ ที่มี aspect ratio (สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา) สูงมากในสองมิติ

หทัยกานต์ มนัสปิยะ (2551) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนสังเคราะห์จากแหล่งธรรมชาติเพื่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์ฉลาดแบบนาโนคอมพอสิตซึ่งมีการนำดินเหนียวที่มีการดัดแปลงโครงสร้างให้มีรูพรุนพร้อมทั้งการดัดแปลงโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ถูกเตรียมขึ้นจากการแทรกตัวของสารลดแรงตึงผิว (cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB) ระหว่างชั้นดินโซเดียมเบนโทไนต์ในการใช้ดูดซับเฮทิลีนเนื่องจากพื้นที่ผิวสูงและรูพรุนที่มีขนาดเฉพาะโดยดัดแปลงโครงสร้างให้มีรูพรุน (porous clay heterostructures, PCH) จะถูกสังเคราะห์ขึ้นภายในชั้นดินเหนียวของโซเดียมเบนโทไนต์โดยจะเกิดการพอลิเมอไรเซชันของเตตระเอทอกซีไฮเลน (tetraethoxysilane, TEOS) รอบๆ ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวนอกจากนี้ดินเหนียวที่มีการดัดแปลงโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ (hybrid organic-inorganic porous clay heterostructures, HPCH) สามารถสังเคราะห์ได้จากวิธีการควบแน่นของ TEOS และหมู่ฟังก์ชันไทออลเพื่อปรับให้ดินเหนียวมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการตรวจสอบบรรจุภัณฑ์จากการศึกษาการเกิดโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจนพบว่าดินเหนียวที่มีการดัดแปลงโครงสร้างรูพรุนมีพื้นที่ผิว 421-551 เมตร²/กรัม, ขนาดรูพรุน 4.79-5.02 นาโนเมตร, และปริมาตรรูพรุน 0.57-0.66 ซีซี/กรัมซึ่งพบว่ามีพื้นที่ผิวมากกว่าเบนโทไนต์

ดินเหนียวนาโน (nanoclay) หรือที่เรียกกันว่า organoclay (OC) ซึ่งได้จากการนำกลุ่มแอมโมเนียม เช่น เบนโทไนต์มาปรับสภาพให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์ โดยการแทนที่ประจุต่างๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ ซึ่ง OC มีลักษณะเด่นคือ มีความชอบสารอินทรีย์ และมีชั้นผลึกที่ห่างกัน และมี aspect ratio (สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา) สูงมากในสองมิติ นอกจากนี้ยังมีการนำดินเหนียวนาโนมาดัดแปลงโครงสร้าง โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวให้แทรกตัวภายในชั้นต่าง ๆ ของดินเหนียว ได้เป็นดินเหนียวนาโนที่มีรูพรุนขนาดนาโนเป็นจำนวนมาก เรียกว่า porous clay heterostructure จากคุณสมบัติดังกล่าวทั้ง OC และ PCH จึงน่าจะมีศักยภาพในการดูดซับเฮทิลีนได้ดี (Srithammaraj et al., 2012)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรก (Part A) เป็นการศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเคลือบกระดาษด้วยดินเหนียวนาโน และศึกษาสมบัติของกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนที่เตรียมได้

ขั้นตอนที่สอง (Part B) เป็นการนำกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนที่เตรียมได้มาใช้ในการทดลองยืดอายุผลิตผลทางการเกษตร โดยเลือกมะเขือเทศเป็นผลิตผลต้นแบบ เนื่องจากเป็นผลไม้ชนิด climacteric มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอย่างรวดเร็วในระหว่างการเก็บรักษา

Part A. ศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเตรียมกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนและศึกษาสมบัติของกระดาษ

3.1 บรรจุภัณฑ์และดินเหนียวนาโน

3.1.1 วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้คือ กระดาษคราฟต์ขาว 65 แกรม (บริษัท ผลิตภัณฑ์กระดาษไทย จำกัด กรุงเทพฯ)

3.1.2 วัสดุ nanoclay ที่ใช้เป็นสารแอดทีฟเพื่อเคลือบบนกระดาษ แบ่งเป็น

(a) เบนโทไนท์ (bentonite) (Sigma-Aldrich, USA) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ามอนท์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) แร่ดินเหนียวชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึก

ประกอบด้วยชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์รอลอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระไฮดรอล

(b) ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่ผ่านการดัดแปร (porous nanoclay) เตรียมได้จาก

ห้องปฏิบัติการวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 สารเคลือบหรือสารยึดติด เลือกใช้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

3.2 การเตรียมดินเหนียวนาโนเพื่อใช้ในการเคลือบบนกระดาษ

แร่ดินเหนียวนาโน (nanoclay) ที่ใช้ในการทดลองนี้ สังกเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยของ ดร. หทัยกานต์ มนัสปิยะ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีรายละเอียดการเตรียมโดยสังเขป ดังต่อไปนี้ ใช้แร่ดินเหนียวเบนโทไนต์ เป็นสารตั้งต้น โดยนำมาล้างและ

ปรับ pH ให้เป็น 7 เติม quaternary ammonium เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนไอออน

กับ cetyltrimethylammonium bromide คนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการทำ

ปฏิกิริยา จะได้แร่ดินเหนียวและทำการกรองและล้างส่วนผสมออกด้วยการใช้สารละลายเมทานอลและ

น้ำ และทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำแร่ดินเหนียวชนิดออร์กาโนที่ได้นั้นใน dodecylamine เป็นเวลา 30 นาที

ที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วเติม Tetraethylorthosilicate (TEOS) (ที่อัตราส่วนโมลล่ำ ของแร่ดินเหนียว

ดอร์คานีน : dodecylamine:TEOS เท่ากับ 1:20:150) คนต่อไปอีก 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C) กรองแยกออกจากสารละลายอีกครั้ง และทำให้แห้งโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนานหนึ่งคืน จากนั้นสกัดใน สารละลายเมทานอลและไฮโดรคลอริกเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิว จากนั้นกรองแล้วล้างด้วย สารละลาย เมทานอลและน้ำ และอบแห้งในสภาวะสูญญากาศที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในที่สุดจะได้ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (porous clay heterostructure, PCH)

3.3 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวนาโนในการเคลือบบนกระดาษ

3.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษกราฟที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วย ดินเหนียวนาโน

นำกระดาษกราฟที่มีการเคลือบบริเวณผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน ปริมาณร้อยละ 20, 40 และ 60 ของน้ำหนักกระดาษ มาตัดให้มีขนาด 15x15 เซนติเมตร ใส่ในขวด ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ปิดขวดให้สนิท ปรับความเข้มข้นภายในขวดให้มีเอทิลีน 5 ppm. โดยใช้เข็ม ฉีดยาสูดอากาศภายในขวดออกปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นดูดก๊าซเอทิลีนความเข้มข้น 1 % ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แทนที่อากาศภายในขวด วัดปริมาณเอทิลีนที่ดูดซับด้วยกระดาษที่มีดินเหนียวนาโนแบบ มีรูพรุนทั้ง 2 แบบ โดยวัดจากปริมาณเอทิลีนที่เหลืออยู่ภายในขวดที่เวลา 5,30 นาที 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณเอทิลีนที่ได้ด้วย gas chromatography (GC) (Shimadzu GC-9A, Japan) ใช้ stainless steel packed column ขนาด 0.3125 × 0.2125 ตารางเซนติเมตร ยาว 210 เซนติเมตร บรรจุด้วยactivated alumina ปรับอุณหภูมิของ injection port เป็น 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์เป็น 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ flame ionization detector (FID) เป็น 100 องศาเซลเซียส คำนวณเป็นร้อยละการดูดซับเอทิลีน

3.3.2 ศึกษาโครงสร้างของกระดาษกราฟที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโน การศึกษาโครงสร้างของกระดาษกราฟที่มีการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนทำโดยใช้ scanning electron microscope

3.4 ศึกษาการเคลือบกระดาษกราฟที่ขาวด้วยดินเหนียวนาโน

วัสดุบรรจุภัณฑ์กระดาษที่ใช้คือ กระดาษกราฟต์ขาว 65 แกรม (บริษัท ผลิตภัณฑ์กระดาษไทย จำกัด, กรุงเทพฯ) ส่วนดินเหนียวนาโน ที่ใช้แบ่งเป็น เบนโทไนท์(bentonite) และดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (porous nanoclay) ที่ผ่านการดัดแปร ซึ่งเตรียมได้จากห้องปฏิบัติการวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เตรียมสารเคลือบดินเหนียวนาโนที่เหมาะสมเคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์กระดาษ โดยแปรความ ปริมาณของสารเคลือบที่เหมาะสม การศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเคลือบดินเหนียวนาโนบนกระดาษ เริ่มจากศึกษาอัตราส่วนวิธีที่เหมาะสมของสารที่ใช้เป็น binder ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVOH) ทดลองเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบที่มีอัตราส่วนระหว่าง น้ำกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 2 อัตราส่วน ดังนี้

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของสารเคลือบ

อัตราส่วนที่	น้ำ:PVOH
1	100:20
2	120:20

จากนั้นเตรียมสารเคลือบโดยเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่ เหมาะสมที่ได้จากการทดลองชั้นต้นผสมกับดินเหนียวนาโนโดยแปรปริมาณของดินเหนียวนาโนใน ระดับที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 20, 40 และ 60 ของน้ำหนักแห้งของกระดาษแล้วเทลงบนกระดาษ คราฟท์ขาวให้สม่ำเสมอ เพื่อให้ได้กระดาษที่ผ่านการเคลือบไปทำการทดสอบสมบัติของกระดาษต่อไป

เตรียมสารเคลือบนาโนที่เหมาะสมเคลือบลงบนบรรจุภัณฑ์กระดาษ แปรชนิดของสารเคลือบ ได้แก่ เบนโทไนท์ และ ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่ผ่านการดัดแปร โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้ จากการทดลองชั้นต้น ใช้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็น binder จากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าอัตราส่วนของดินเหนียวนาโนร้อยละ 60 ของน้ำหนักแห้งของกระดาษที่ใช้ในการทดลองเป็น อัตราส่วนที่เหมาะสมจึงใช้ในอัตราส่วนดังกล่าวในการเคลือบบนกระดาษ เตรียมสารเคลือบโดยการ ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับดินเหนียวนาโน และ ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กับเบนโทไนท์ เทลงบนกระดาษคราฟท์ขาวให้สม่ำเสมอ เพื่อให้ได้กระดาษที่ผ่านการเคลือบไปทำการ ทดสอบสมบัติของกระดาษต่อไป

3.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษกราฟที่ขาวเคลือบดินเหนียวนาโน ได้แก่ ความหนา แกรมกระดาษ และน้ำหนักของสารเคลือบ วัดค่าความต้านทานแรงดึง tensile strength

- การวัดความหนา โดยใช้เครื่อง micrometer (L&W Micrometer 51) ด้วยมาตรฐาน SCAN-P 6:75 โดยวัดบนกระดาษตัวอย่าง 5 จุด พร้อมทั้งบันทึกค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ย การหาแกรมของกระดาษโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด Mettler Toledo AG204 ด้วยมาตรฐานSCAN-P4 และคำนวณหาค่าแกรมกระดาษ
- การหาน้ำหนักของสารเคลือบทำได้โดยนำน้ำหนักของกระดาษที่ผ่านการเคลือบแล้ว ลบด้วยน้ำหนักกระดาษก่อนการเคลือบ
- ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) วัดด้วยเครื่อง MTS Synergie200 Tensile Tester โดยใช้มาตรฐาน SCAN-P 67:93
- ความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting strength)วัดด้วยเครื่อง Bursting Tester
- ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability)ด้วยเครื่อง Bendsten Air Permeability tester ด้วยมาตรฐาน SCAN-P 60

3.6 ศึกษาโครงสร้างของกระดาษ กระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

การศึกษาโครงสร้างของกระดาษ กระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่ขาวที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน ทำโดยใช้ scanning electron microscope

Part B. ศึกษาการยืดอายุมะเขือเทศด้วยกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโน

3.7 การเตรียมผลิตผล

ใช้มะเขือเทศพันธุ์ลูกท้อ (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ในการทดลองโดยใช้มะเขือเทศที่มีความสม่ำเสมอด้านสี ไม่มีตำหนิ และเก็บเกี่ยวในระยะแก่จัด (mature green) มีน้ำหนักเฉลี่ย 67.87 ± 6.88 g ต่อผล ขนส่งโดยการบรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูก ภายใต้บรรยากาศปกติ มาที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองมะเขือเทศอยู่ในระยะ breaker-turning จากนั้นทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) ความเข้มข้น 500ppm เพื่อลดปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่อาจปนเปื้อนในช่วงการเก็บเกี่ยวและระหว่างการขนส่ง จากนั้นล้างด้วยน้ำประปา ชับน้ำให้แห้ง แล้วเด็ดขั้วออก เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.8 บรรจุภัณฑ์

แบ่งมะเขือเทศที่เตรียมไว้ออกเป็น 3 ส่วน เพื่อใช้ในแต่ละทรีตเมนต์ ซึ่งมีการใช้รูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง แตกต่างกัน ดังนี้

- ไม่มีการห่อด้วยกระดาษ (No paper wrapping, NP) เป็นตัวอย่างควบคุม (Control)
- กระดาษคราฟท์ขาวปกติขนาด 8 นิ้ว x 11 นิ้ว (Kraft paper, KP)
- กระดาษคราฟท์ขาวขนาด 8 นิ้ว x 11 นิ้วที่ผ่านการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (Kraft paper coated with porous nanoclay, KP+NC)

ทุกตัวอย่างทดลอง (treatment) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีตลอดระยะเวลาการเก็บ

3.9 วัดสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ

3.9.1 ความแน่นเนื้อ

วัดความแน่นเนื้อด้วยเครื่อง LLYOD Food Texture Analyzer (model TA 500, England) หัวกดขนาด P4 เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm กดลงในเนื้อมะเขือเทศ 5 mm ความเร็วในการกด 1 mL/s

3.9.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ปั่นมะเขือเทศ ด้วยเครื่อง Moulinex Juice Extractor รุ่น 753 (Spain) ตั่งน้ำคั้นที่แยกกากแล้ว ให้แยกชั้น วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยนำน้ำคั้นส่วนใสซึ่งอยู่ด้านล่าง มา 2-3 หยด มาวัด ความเข้มข้น soluble solid ด้วย Digital Refractometer (ATAGO, DR-A1, U.S.A.) ค่าที่ได้แสดงใน รูปองศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix)

3.9.3 ค่า pH

ปั่นมะเขือเทศด้วยเครื่อง Moulinex Juice Extractor รุ่น 753 (Spain) น้ำคั้นที่แยกกากแล้วมา วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (Inolab, TetraCon[®] 325, StirrOx G, TA 197 Oxi, Germany)

3.9.4 ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริก

เปิดน้ำคั้นส่วนใสจากน้ำคั้นที่แยกกากแล้วมา 5 mL ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมน้ำ กลั่น 100 mL ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N ใช้สารละลายฟีนอล์ฟทา ลีน ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นอินดิเคเตอร์ ไตเตรตจนถึงจุดยุติ คือสารละลายจะมีสีชมพูอ่อนอย่างน้อย 30 วินาที คำนวณปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริกตามสมการ (AOAC, 1995)

$$\text{titratable acidity}(\%) = \frac{\text{mL NaOH} * N \text{ NaOH} * \text{meq. wt. citric acid}}{\text{sample weight}} 100$$

Milliequivalent weight (meq. wt.) citric acid = 0.064

3.9.5 การสูญเสียน้ำหนัก

บันทึกน้ำหนักของมะเขือเทศทุกๆ ที่รีตเมนต์ก่อนการบรรจุแล้วชั่งน้ำหนักหลังจากการเก็บ ด้วยเครื่องชั่ง (Satorius E5500 S, Germany) รายงานเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก

$$\text{weight loss}(\%) = \frac{\text{initial weight} - \text{final weight}}{\text{initial weight}} 100$$

3.9.6 ค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่อง Chroma Meter (Model CR-300 Series, Minolta, Japan) ระบบCIELAB และบันทึกค่า a^* แสดง ค่าสีแดงและสีเขียว (a^* เป็นบวก = มีสีแดง และ ค่า a^* เป็นลบ = มีสีเขียว) ค่า b^* แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ค่า b^* เป็นบวก = มีสีเหลือง และ ค่า b^* เป็นลบ = มีสีน้ำเงิน)

3.9.7 ปริมาณกรดแอสคอบิก

บีเปิดน้ำคั้นส่วนใสจากน้ำคั้นที่แยกกากแล้วมา 5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL เติมสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้นร้อยละ 1 จนถึงขีดปริมาตร จากนั้นบีเปิดมา 5 mL เติมน้ำกลั่น 100 mL เพื่อลดจุดยุติให้ชัดเจนขึ้น ไตเตรตด้วยสารละลาย 2,6 dichlorophenolindophenol ที่ calibrate ด้วยสารละลายกรดแอสคอบิกมาตรฐาน การหาปริมาณกรดแอสคอบิกต้องทำทันทีหลังจากการคั้นน้ำมะเขือเทศ (AOAC, 1995)

3.10 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบทางเคมีกายภาพ การสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณกรดแอสคอบิก ออกแบบการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ความแน่นเนื้อและวัสดุสี ทำการทดลอง 6 ซ้ำ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่า pH ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริก และการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณกรดแอสคอบิกทำการทดลอง 4 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Statistic Package for the Social Science (SPSS, USA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple range test (Montgomery, 2001)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

Part A. วิธีที่เหมาะสมในการเตรียมกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนและสมบัติของกระดาษ

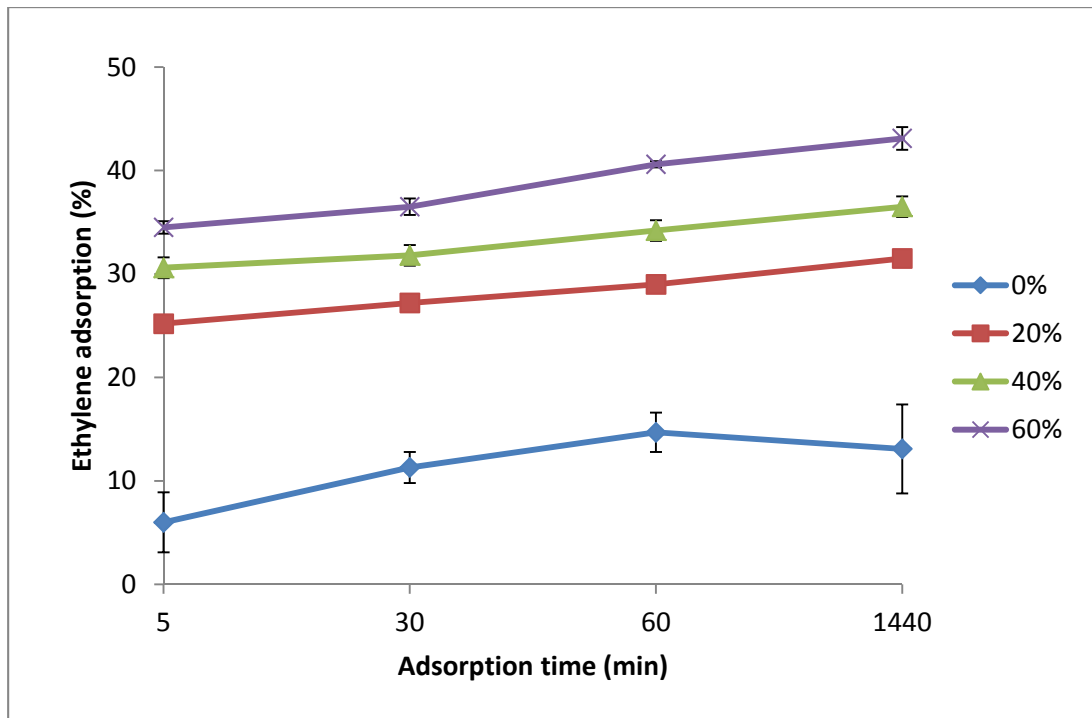
4.1 อัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนในการเคลือบบนผิวหน้ากระดาษกราฟ

4.1.1 ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษกราฟที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษกราฟที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน ที่ร้อยละ 20 40 และ 60 ของน้ำหนักแห้งกระดาษ และติดตามผลที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 1

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน พบว่า กระดาษกราฟที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนร้อยละ 60 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับก๊าซเอทิลีนได้มากที่สุดคือ 45.2 % ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ปริมาณการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นรวมถึงระยะเวลาในการดูดซับก๊าซเอทิลีนส่งผลให้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วยตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า กระดาษกราฟที่ไม่มีเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (Control) กระดาษกราฟที่มีเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนระดับต่างๆ ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่า Control มีประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีนได้ต่ำที่สุด ส่วนการเคลือบผิวหน้ากระดาษด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนช่วยให้การดูดซับเอทิลีนสูงขึ้น และเมื่อปริมาณดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20, 40, 60 ของน้ำหนักกระดาษสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้เพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการดูดซับเอทิลีนที่ระยะเวลาต่างกัน ประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าปริมาณของดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่มีการเคลือบผิวหน้าบนกระดาษกราฟส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโน

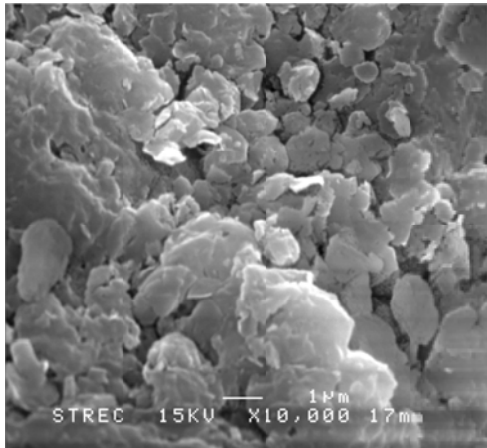


รูปที่ 1 ร้อยละการดูดซับก๊าซเอทิลีนของกระดาษคราฟท์ที่มีเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน ร้อยละ 0 (control), 20, 40 และ 60 กรัมต่อน้ำหนักกระดาษ

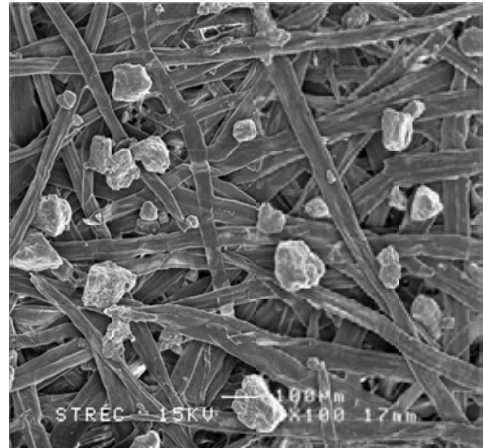
4.1.2 โครงสร้างของกระดาษคราฟท์ที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

ผลการตรวจสอบโครงสร้างของกระดาษคราฟท์ที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนด้วย scanning electron microscope แสดงไว้ในรูปที่ 2

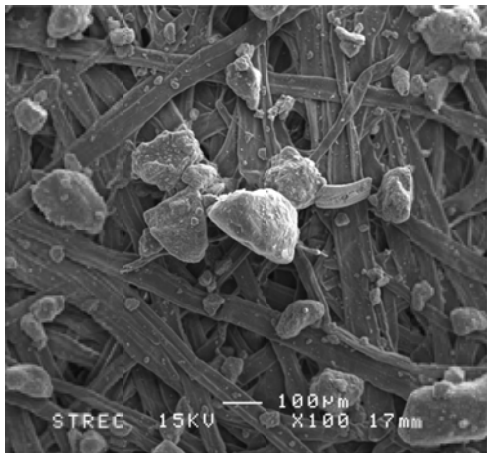
รูปที่ 2(a) แสดงโครงสร้างดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 100 เท่า ทำให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน รูปที่ 2 (b)-(d) แสดงดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่เคลือบอยู่บนกระดาษคราฟท์ที่ปริมาณ 20-60 % ตามลำดับ พบว่ามีดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนกระจายตัวอย่างหนาแน่นบนผิวกระดาษมากขึ้น ตามปริมาณดินเหนียวนาโนที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีน ซึ่งพบว่า มีประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีนได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณดินเหนียวนาโน



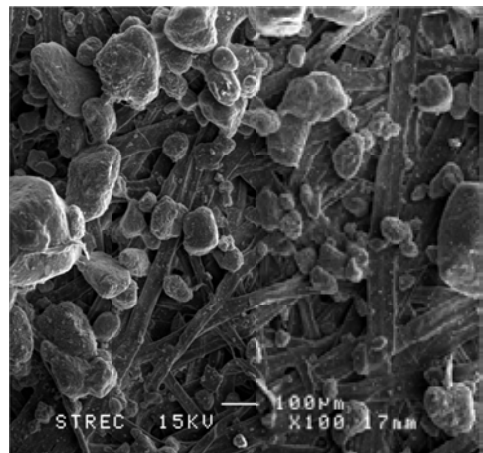
Porous nanoclay



Kraft paper coated with nanoclay 20% w/w



Kraft paper coated with nanoclay 40% w/w



Kraft paper coated with nanoclay 60% w/w

รูปที่ 2 ภาพถ่ายโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 100 เท่า

4.2 การศึกษาปริมาณสาร binder ที่เหมาะสมในการเคลือบดินเหนียวนาโนบนกระดาษ

กระดาษกราฟที่ขาวที่ใช้ในการทดลอง เป็นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อซัลเฟต เป็นกระดาษที่มีความเรียบและมันวาวเพียงด้านเดียวและสามารถนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์แบบอ่อนหรือใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ต่างๆ กระดาษกราฟที่ขาวที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีน้ำหนักอยู่ประมาณ 60-70 กรัม เหมาะที่จะนำมาห่อหุ้มผลไม้ได้ นอกจากนั้นผิวหน้าที่เรียบของกระดาษจะสามารถช่วยให้สารเคลือบกระจายตัวได้ดี จึงเหมาะสมในการนำมาเคลือบด้วยสารละลายที่มีดินเหนียวนาโนกระจายอยู่ได้

ในการทดลองหาอัตราส่วนของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วน 100:20 กระดาษที่ได้หลังจากสารเคลือบแห้งตัวแล้ว กระดาษที่ผ่านการเคลือบมี

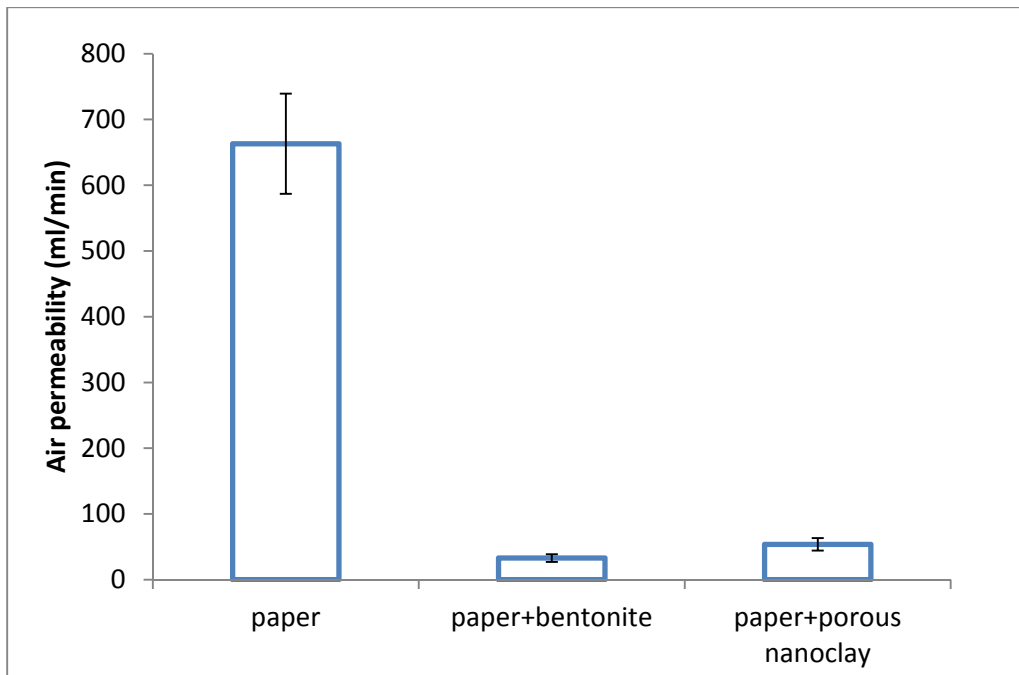
ลักษณะม่วงอมมาก เนื่องจากสารเคลือบมีความเข้มข้นและมีความหนืดมากเกินไปจึงไม่สามารถนำกระดาษทั้งสองชนิดดังกล่าวมาใช้งานได้ ในขณะที่อัตราส่วนของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่ 2 คือ 120:20 สารเคลือบมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและทำให้กระดาษเกิดการม่วงอมเพียงเล็กน้อย สามารถนำมาใช้งานได้ อัตราส่วนของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเคลือบกระดาษที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้ จึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 120:20

4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดาษกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และที่ผ่านการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโน 2 ชนิดคือ bentonite และ porous nanoclay แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของกระดาษ ได้แก่ การซึมผ่านอากาศ ความหนา แกรมกระดาษ น้ำหนักของสารเคลือบ ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ได้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 การซึมผ่านของอากาศ (air permeability)

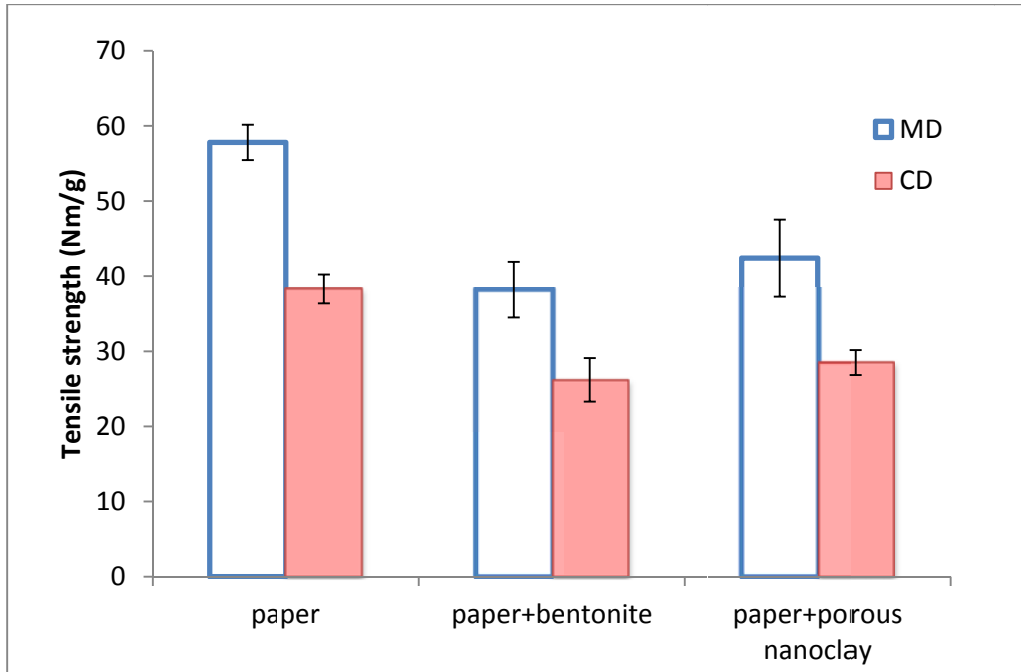
รูปที่ 3 แสดงค่าดัชนีการซึมผ่านของอากาศของกระดาษกราฟที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษกราฟที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนตามลำดับพบว่ากระดาษกราฟสีขาวที่ผ่านการเคลือบจะมีค่าดัชนีการซึมผ่านของอากาศลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 663.1 ± 76.3 มิลลิลิตรต่ออนาที ถึง 53.7 ± 9.50 และ 32.9 ± 5.80 มิลลิลิตรต่ออนาที ตามลำดับ



รูปที่ 3 ดัชนีการซึมผ่านของอากาศของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

4.3.2 ค่าดัชนีความต้านทานแรงดึง(tensile strength)

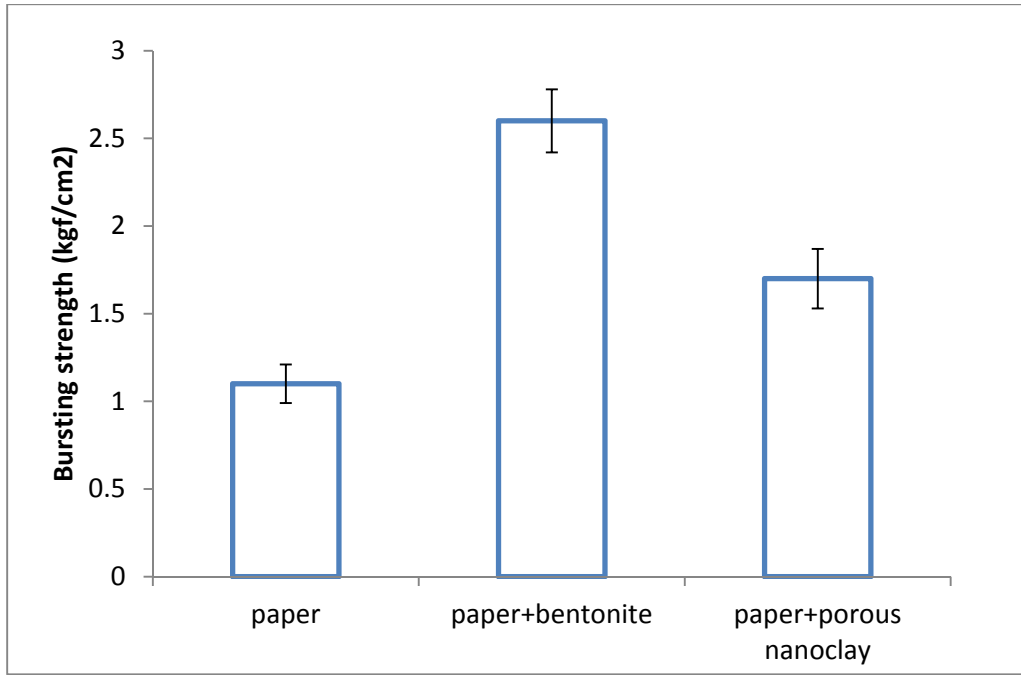
รูปที่ 4 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษคราฟท์ขาวที่ไม่เคลือบ เคลือบด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับดินเหนียวนาโนและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับเบนโทไนท์พบว่าในแนวตามเกรน กระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบจะมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 57.8 ± 2.35 นิวตันเมตรต่อแกรมถึง 42.4 ± 5.13 และ 38.2 ± 1.92 นิวตันเมตรต่อแกรมตามลำดับส่วนในแนวขวางเกรน กระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบจะมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 38.3 ± 3.70 นิวตันเมตรต่อแกรมถึง 28.5 ± 1.67 และ 26.2 ± 2.90 นิวตันเมตรต่อแกรมตามลำดับ



รูปที่ 4 ดัชนีความต้านทานแรงดึงของกระดาษกราฟที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษกราฟที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนในแนวตามเกรน (MD) และในแนวขวางเกรน (CD)

4.3.3 ค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Index)

รูปที่ 5 แสดงค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษกราฟที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโน ตามลำดับ พบว่ากระดาษกราฟสีขาวที่ผ่านการเคลือบจะมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.1 ± 0.11 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ถึง 1.7 ± 0.17 และ 2.6 ± 0.18 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

จากผลการทดสอบสมบัติทั่วไปและสมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทั่วไปและสมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ขาวที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมกับดินเหนียวนาโนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับเบนโทไนท์

สมบัติทั่วไป	Paper (control)	Paper+bentonite	Paper+ porous nanoclay
น้ำหนักกระดาษ(g/m ²)	66.8 ± 0.4	120.6 ± 2	98.5 ± 3.8
ความหนา(μm)	94.2 ± 0.5	156.6 ± 2.7	156.8 ± 1.9
น้ำหนักสารเคลือบ(g/m ²)	-	53.8 ± 2	31.7 ± 3.8
ความต้านทานการซึมผ่านของอากาศ (ml/min)	663.1 ± 76.3	32.9 ± 5.80	53.7 ± 9.50

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์ และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโน ตามลำดับ

สมบัติเชิงกล		Paper (control)	Paper+bentonite	Paper+ porous nanoclay
ดัชนีความต้านทานแรงดึง (Nm/g)	MD	57.8±2.35	42.4±5.13	38.2±3.70
	CD	38.3±1.92	28.5±1.67	26.2±2.90
ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ (kgf/cm ²)		1.1±0.11	2.6±0.18	1.7±0.17

จากการทดสอบสมบัติทั่วไปและสมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ขาว พบว่ากระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับดินเหนียวนาโนและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับเบนโทไนท์มีค่าดัชนีการซึมผ่านของอากาศลดลง นั่นหมายถึงเมื่อกระดาษคราฟท์ขาวผ่านการเคลือบสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดแล้ว กระดาษคราฟท์ขาวมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของอากาศเพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคราฟท์ขาวที่ไม่ผ่านการเคลือบสารเคลือบโดยกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับเบนโทไนท์มีความต้านทานการซึมผ่านของอากาศมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเรซินที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดทั้งดินเหนียวนาโนหรือเบนโทไนท์ให้ติดกับกระดาษคราฟท์ขาว ทั้งนี้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะมีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มหรือกาวที่ปิดบนผิวหน้าของกระดาษคราฟท์ขาวทำให้ความสามารถในการต้านทานของอากาศของกระดาษที่ผ่านการเคลือบทั้งสองแบบมีค่าความต้านทานการซึมผ่านของอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษคราฟท์ขาวที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ

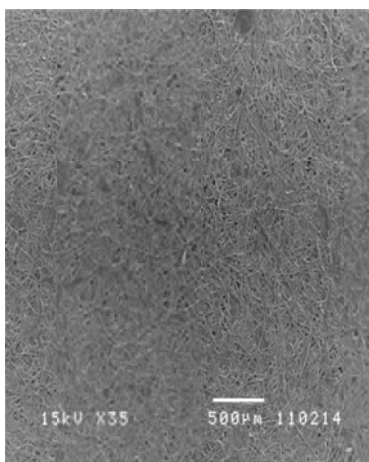
ในส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงของกระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการเคลือบ กระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษคราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโน พบว่าในกระดาษคราฟท์ขาวทั้งแนวตามเกรนและแนวขวางเกรนของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงลดลง โดยในแนวขวางเกรนของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับเบนโทไนท์มีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด การที่ค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนและกระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเบนโทไนท์ลดลงนั้น อาจเนื่องจากสารเคลือบและอนุภาคของดินเหนียวนาโนและเบนโทไนท์เข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของกระดาษ ทำให้ขัดขวางพันธะระหว่างเส้นใยเซลลูโลสทำให้กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยสารทั้งสองมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงลดลงได้

นอกเหนือไปจากนั้นเนื่องจากกระดาษกราฟท์ขาวมีน้ำหนักค่อนข้างต่ำและมีความบางสารเคลือบที่มีโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เมื่อแห้งตัวจะมีลักษณะคล้ายกับฟิล์มเคลือบและมีอนุภาคของดินเหนียวนาโนหรือเบนโทไนท์เกาะติดอยู่ สารเคลือบดังกล่าวทำให้กระดาษมีลักษณะที่เปราะมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงลดลงได้

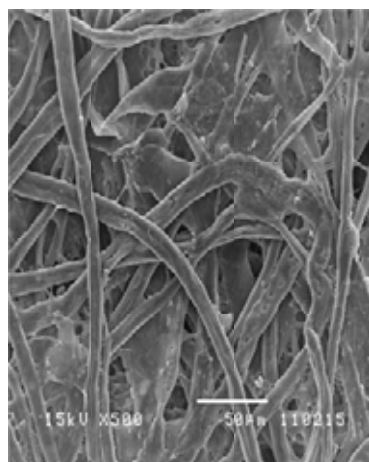
ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงด้นทะลุของกระดาษกราฟท์ขาวที่เคลือบด้วยสารเคลือบทั้ง 2 ชนิด มีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงด้นทะลุเพิ่มขึ้น โดยกระดาษกราฟท์ขาวที่เคลือบด้วยสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับเบนโทไนท์มีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงด้นทะลุมากที่สุด จากค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงด้นทะลุที่เพิ่มขึ้นของกระดาษทั้งสองชนิดนั้น สอดคล้องกับค่าดัชนีการต้านทานการซึมผ่านของอากาศที่มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ด้วยสาเหตุที่สารเคลือบที่มีโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสมนั้นจะปิดช่องว่างภายในกระดาษได้ นอกจากนี้เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเรซินชนิดหนึ่ง สามารถกระจายตัวบนกระดาษและทำหน้าที่เสมือนฟิล์มที่เคลือบผิวอยู่บนกระดาษ ทำให้สามารถเพิ่มความเหนียวและยึดหยุ่นให้กับกระดาษ ส่งผลให้กระดาษที่ผ่านการเคลือบทั้งสองชนิดนั้นมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงด้นทะลุได้มากขึ้น

4.4 โครงสร้างของกระดาษกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วยเบนโทไนท์และกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน

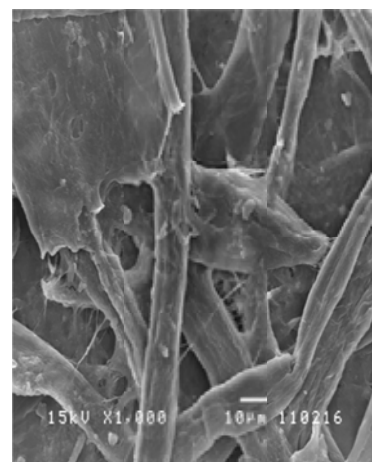
จากการตรวจสอบโครงสร้างของกระดาษกราฟท์ขาว กระดาษกราฟท์ขาวที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยเบนโทไนท์ และกระดาษกราฟท์ขาวที่มีการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน โดยใช้ scanning electron microscope แสดงไว้ในรูปที่ 6-8 ตามลำดับ



กำลังขยาย 35 เท่า

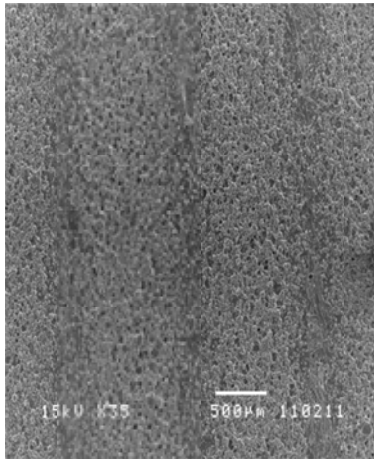


กำลังขยาย 500 เท่า

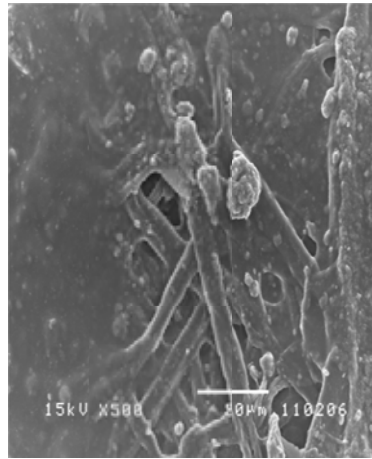


กำลังขยาย 1000 เท่า

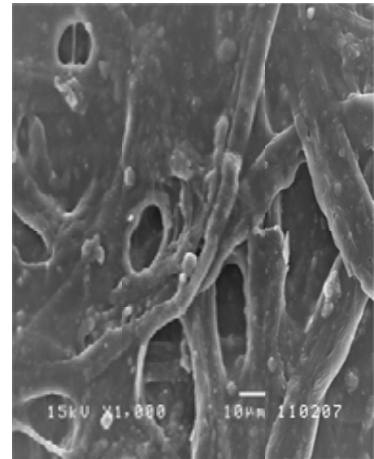
รูปที่ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษกราฟท์ขาวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



กำลังขยาย 35 เท่า

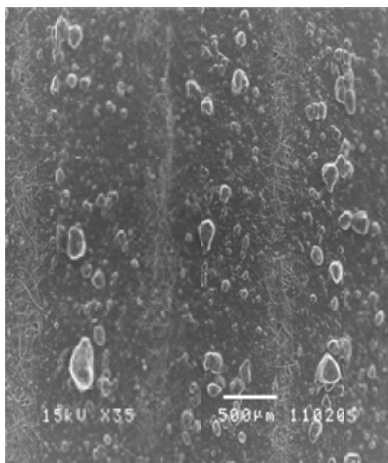


กำลังขยาย 500 เท่า

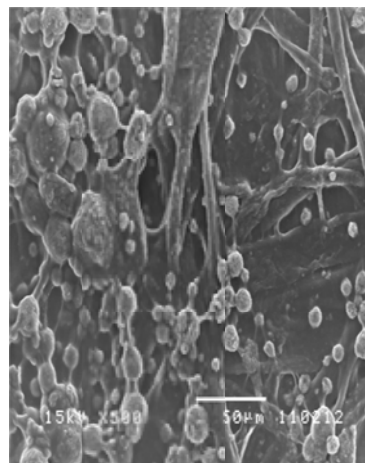


กำลังขยาย 1000 เท่า

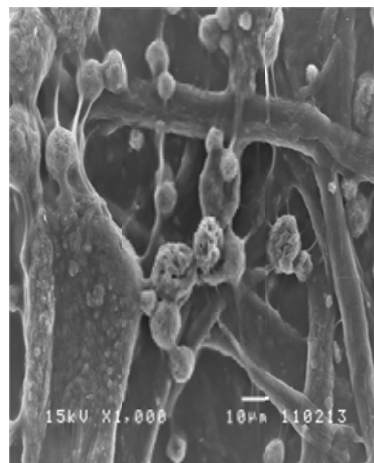
รูปที่ 7 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษกราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับ เบนโทไนท์จากถลุงจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



กำลังขยาย 35 เท่า



กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างของกระดาษกราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับ ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนจากถลุงจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

จากรูปที่ 6-8 ที่แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่ กำลังขยายแตกต่างกันของกระดาษกราฟที่ขาว กระดาษกราฟที่ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับเบนโทไนท์ และกระดาษกราฟที่ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับดินเหนียวนาโน ตามลำดับ พบว่า สำหรับกระดาษกราฟที่ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับเบนโทไนท์ชั้นของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ปกคลุมที่ผิวหน้าของกระดาษโดยที่มีเบนโทไนต์อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นเคลือบอยู่เป็นจำนวนน้อย เบนโทไนต์ส่วนใหญ่จะแทรกลงไประหว่างช่องว่างระหว่างเส้นใยของกระดาษและถูกปกคลุมด้วยสารเคลือบโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในขณะที่กระดาษกราฟที่ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับดินเหนียวนาโนนั้น อนุภาคของดินเหนียวนาโนส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารเคลือบและบางส่วนเกาะติดอยู่ที่เส้นใย แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของดินเหนียวนาโนซึ่งที่ได้มีการปรับปรุงผิวหน้าและหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการยึดติดได้ดีทั้งที่บริเวณเส้นใยของกระดาษและที่ตัวสารเคลือบโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับดินเหนียวนาโนนั้น สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้

Part B. การยืดอายุมะเขือเทศด้วยกระดาษเคลือบดินเหนียวนาโน

4.5 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบเริ่มต้น

ในการทดลองประสิทธิภาพการดูดเอทิลีนเพื่อยืดอายุผลิตผลทางการเกษตร ในการทดลองนี้ใช้มะเขือเทศพันธุ์ลูกท้อ (*Lycopersicon esculentum* Mill.) เนื่องจากมะเขือเทศเป็นผลไม้ประเภท climacteric ผลิตผลที่มีอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนสูงขึ้นในระหว่างการสุก โดยทั่วไปได้มีการกำหนดระยะการสุก (ripening stage) ไว้เป็น ระยะ ต่างๆ เริ่มตั้งแต่ green จนกระทั่งระยะการสุกเต็มที่ หรือ red การทดลองนี้ใช้การกำหนดระยะการสุกตาม United States standards for grades of fresh tomatoes (Fruit and Vegetable Division, U.S. Department of Agriculture) ดังต่อไปนี้

Mature green หมายถึงมะเขือเทศจะมีเขียวตลอดทั้งผล

Breaker หรือหมายถึงมะเขือเทศจะมีสีเขียวอมส้มหรือเหลือง ไม่เกิน 10%

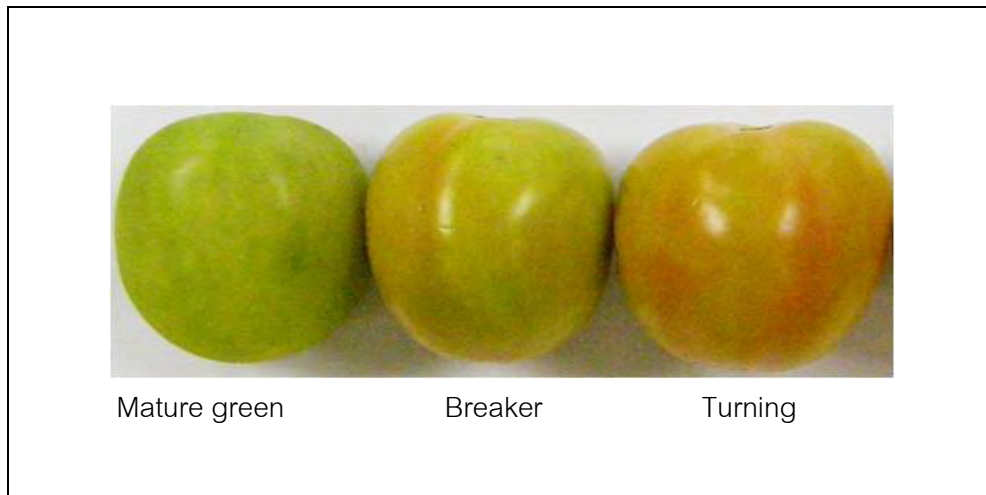
Turning หมายถึงมะเขือเทศจะมีสีเขียวอมส้มหรือเหลืองมากกว่า 10% แต่ไม่เกิน 30%

Pink หมายถึงมะเขือเทศจะมีสีแดงอมส้ม ไม่เกิน 60%

Light red หมายถึงมะเขือเทศจะมีสีแดงอมส้มจนถึงสีแดง

Red หมายถึงมะเขือเทศจะมีสีแดงสดตลอดทั่วทั้งผล

มะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองเก็บเกี่ยวในช่วง mature green ภายหลังจากการขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการ ในการทดลองนี้เริ่มต้นการเก็บรักษาโดยใช้มะเขือเทศที่ระยะ breaker-turning ดังแสดงในรูปที่ 9 และจากการวัดสมบัติทางเคมีและกายภาพเริ่มต้นของมะเขือเทศเมื่อเริ่มการทดลอง มะเขือเทศมีค่าเฉลี่ยสมบัติทางเคมีและกายภาพแสดงในตารางที่ 4 มะเขือเทศที่ระยะ breaker-turning เป็นระยะก่อนที่ผลิตผลจะเริ่มมีอัตราการหายใจสูงขึ้นและสร้างเอทิลีนมากขึ้น เป็นระยะที่เหมาะสมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของเอทิลีนในระหว่างการเก็บรักษา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Carrari and Fernie (2006) และ Martínez-Romero et al. (2009) ซึ่งใช้มะเขือเทศในช่วง breaker และ turning ในการศึกษาผลของเอทิลีนต่อการสุกของผลไม้



รูปที่ 9 Ripening stage ของมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีและกายภาพเริ่มต้นของมะเขือเทศพันธุ์ลูกท้อ

สมบัติทางเคมีและกายภาพเริ่มต้นของมะเขือเทศ	ผลการทดลอง
ความแน่นเนื้อ	8.23 ±0.64N
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	5.07± 0.11
pH	4.04±0.01
ค่า a*/b* (ระยะ breaker-turning)	0.11± 0.07
ร้อยละปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริก	0.46 ±0.02
ปริมาณ ascorbic acid	20.61 ±0.10

4.6 ผลของการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนต่อคุณภาพของมะเขือเทศ

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโน (Kraft paper coated with porous nanoclay, KP+NC) เปรียบเทียบกับกระดาษคราฟท์ขาวที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Kraft paper, KP) และตัวอย่างควบคุม (control) ซึ่งเป็นมะเขือเทศแบบไม่ใช้บรรจุภัณฑ์ (no package, NP) จากนั้นเก็บรักษาที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของมะเขือเทศดังต่อไปนี้

ความแน่นเนื้อ

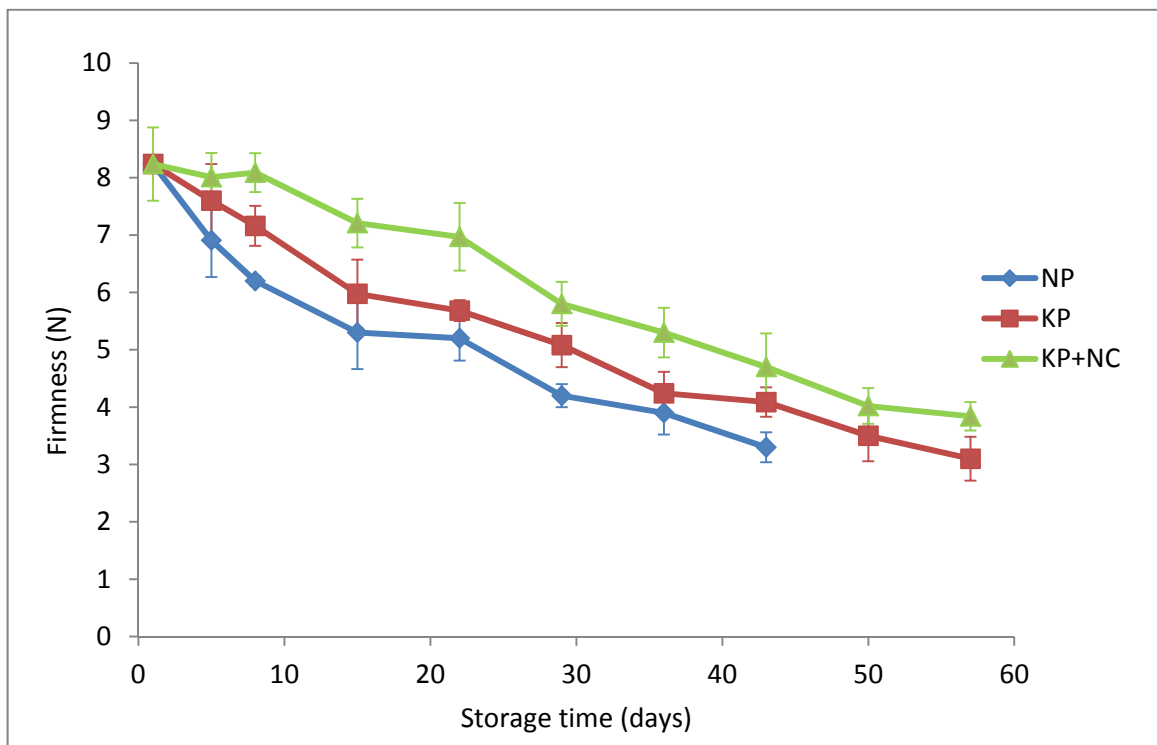
มะเขือเทศมีความแน่นเนื้อเริ่มต้นเท่ากับ $8.23 \pm 0.64\text{N}$ และเมื่ออายุการเก็บมากขึ้น ความแน่นเนื้อของมะเขือเทศทุกที่รีตเมนต์มีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 10) KP+NC มีความแน่นเนื้อมากกว่าที่รีตเมนต์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บอาจเนื่องมาจากกระดาษ KP+NC สามารถดูดซับเอทิลีนที่มะเขือเทศสร้างขึ้นในระหว่างการสุก จึงช่วยชะลอการสุกและการเสื่อมเสียของมะเขือเทศได้ และพบว่า KP มีความแน่นเนื้อมากกว่า NP อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในช่วง 15 วันแรก หลังจากนั้นความแน่นเนื้อของมะเขือเทศทั้งสองที่รีตเมนต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ตลอดอายุการเก็บรักษา ทั้งนี้อาจเนื่องจากการดูดซับเอทิลีนที่มะเขือเทศสร้างขึ้นในการบรรจุทั้งสองประเภทเอทิลีนจะปลดปล่อยจากผลไม้กระตุ้นให้ผลไม้มีอัตราการหายใจที่สูง ส่งผลให้ความแน่นเนื้อลดลงอย่างรวดเร็ว

มะเขือเทศใน NP มีค่าความแน่นเนื้อต่ำสุดอยู่ที่ $3.21 \pm 0.39\text{ N}$ ในวันที่ 43 ของการเก็บ และเป็นวันสุดท้ายของการเก็บรักษา เนื่องจากมะเขือเทศมีลักษณะปรากฏที่ไม่เหมาะสมแก่การนำไปบริโภค มีเนื้อสัมผัสนุ่ม และพบการเจริญของเชื้อราที่บริเวณขั้วและที่ผิวของมะเขือเทศ ซึ่งอาจเนื่องจากเข้าสู่ระยะชราภาพ และอาจเกิดจากการเกิดอาการสะท้านหนาว ส่วนมะเขือเทศที่เก็บใน KP และ KP+NC เมื่อสิ้นสุดการเก็บในวันที่ 57 มะเขือเทศมีความแน่นเนื้อเท่ากับ $3.30 \pm 0.43\text{ N}$ และ $3.84 \pm 0.25\text{N}$ ตามลำดับ มะเขือเทศใน KP และ KP+NC แสดงลักษณะการเสื่อมเสียจนไม่เหมาะต่อการนำไปบริโภค หลังเก็บไว้นาน 50 และ 57 วัน ตามลำดับ

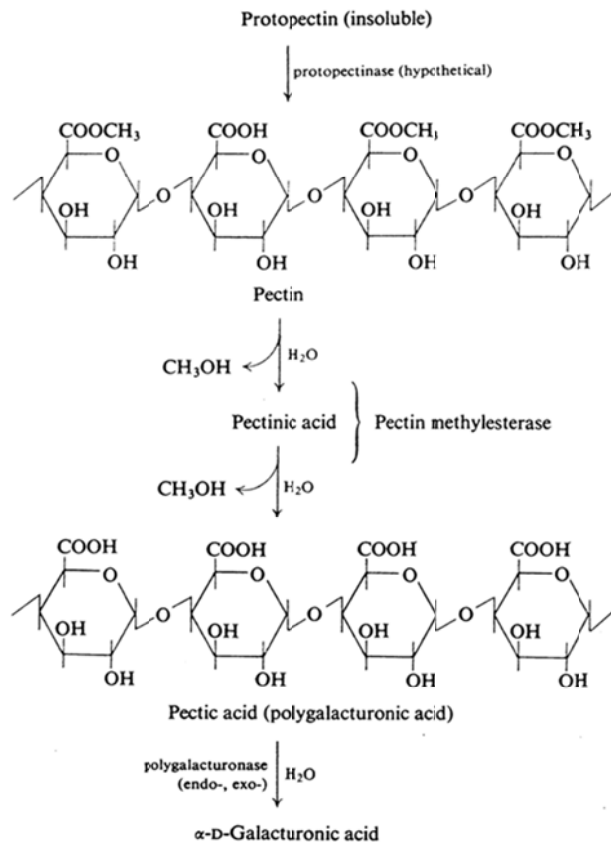
การที่มะเขือเทศมีความแน่นเนื้อลดลง เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ polygalacturonase และ pectin methylesterase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อความแน่นเนื้อ โดยเอนไซม์ทั้ง 2 จะเปลี่ยน polygalacturonic acid ไปเป็นสารประกอบ pectin ซึ่งเดิมอยู่ในรูป protopectin ซึ่งไม่ละลายน้ำ เปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ ระหว่างกระบวนการสุกของผลผลิต ส่งผลให้ความแน่นเนื้อลดลง ดังแสดงในรูปที่ 11 กิจกรรมของเอนไซม์ polygalacturonase จะเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการบิรูรณ์

และการสร้างเอนไซม์ polygalacturonase จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีเอทิลีน (Grierson and Tucker, 1983; Seymour, Taylor, and Tucker, 1993)

การลดปริมาณเอทิลีนในภาวะการเก็บสามารถป้องกันการสูญเสียความแน่นเนื้อได้ เนื่องจากการยับยั้งการสร้างก๊าซเอทิลีนส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ polygalacturonase ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Siripatravan and Assatarakul (2009) ที่ศึกษาการเก็บมะเขือเทศโดยใช้บรรจุภัณฑ์แบบ modified atmosphere packaging พบว่าระหว่างการสุกของผลไม้จะมีค่าความแน่นเนื้อลดลง และการยับยั้งการทำงานของเอทิลีนในบรรจุภัณฑ์แบบ modified atmosphere packaging ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของความแน่นเนื้อได้ เนื่องจากสารประกอบเพกตินจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากถ้าระหว่างการเก็บรักษาไม่มีกระบวนการสุกเกิดขึ้น



รูปที่ 10 ความแน่นเนื้อของมะเขือเทศ NP, KP และ KP+NC เก็บรักษาที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงเพกตินในผลไม้

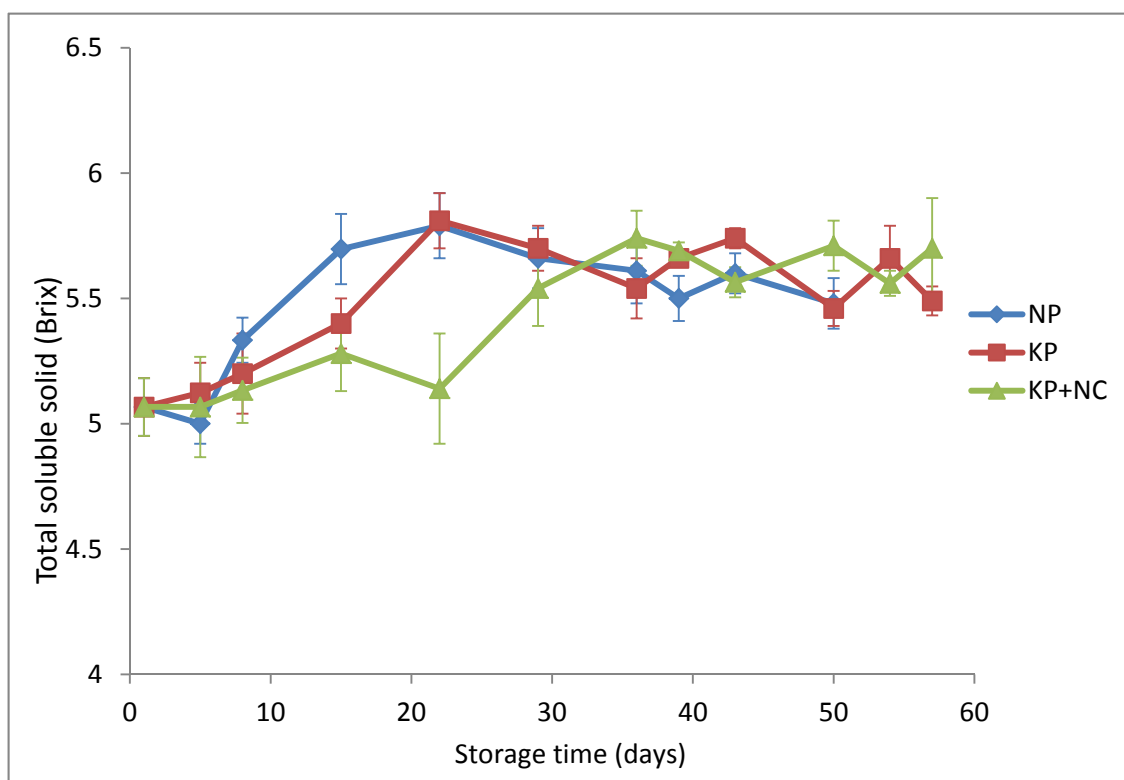
ที่มา : Eskin, Henderson, and Townsend (1971)

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

มะเขือเทศมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยรายงานเป็นค่า °Brix ในวันที่เริ่มต้นของการเก็บรักษาซึ่งมะเขือเทศอยู่ในระยะ breaker-turning stage มีค่าเท่ากับ 5.07 ± 0.11 มะเขือเทศในทุกระดับการสุกจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเก็บ โดยที่มะเขือเทศใน KP+NC มีค่าเพิ่มขึ้นช้ากว่าในทุกระดับการสุก และหลังจากนั้นจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตลอดการเก็บ (รูปที่ 12) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Martínez-Romero et al. (2009) ซึ่งรายงานว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในมะเขือเทศจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการสุกของผลไม้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนจากแป้งเป็นน้ำตาล ได้แก่ fructose และ glucose (Biale, 1960; Seymour, Taylor, and Tucker, 1993)

มะเขือเทศเก็บใน NP และ KP มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เร็วกว่ามะเขือเทศใน KP+NC มะเขือเทศใน NP และ KP มีค่าสูงสุดในวันที่ 15 และวันที่ 22 ตามลำดับของการเก็บ โดยมีค่าเป็น 5.79 ± 0.13 และ 5.81 ± 0.11 ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าตัวอย่างใน

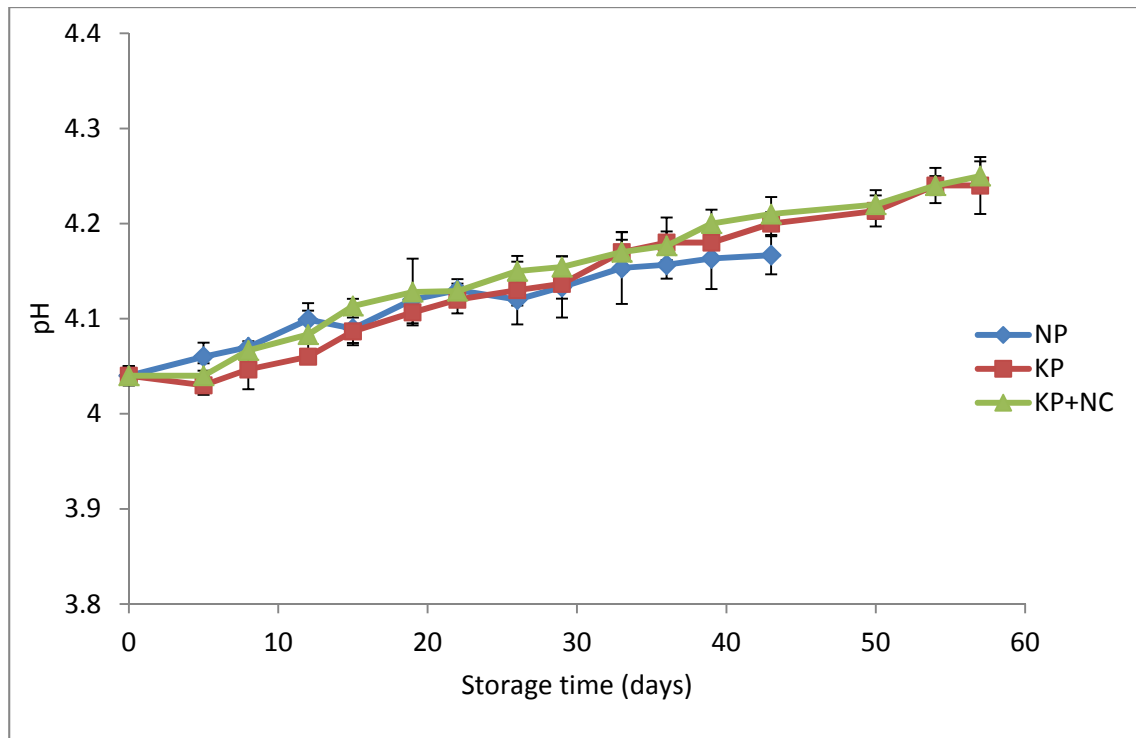
KP+NC ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 36 โดยมีค่าเป็น 5.74 ± 0.21 แต่หลังจากนี้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของมะเขือเทศในทรีตเมนต์เดียวกันไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายหลังระยะการสุกอย่างสมบูรณ์ และในแต่ละทรีตเมนต์มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บ ทั้งนี้ตัวอย่าง NP มีการเก็บรักษาไว้นาน 43 วัน เนื่องจากมะเขือเทศมีลักษณะปรากฏที่ไม่เหมาะแก่การบริโภค มีเนื้อสัมผัสฝืนนุ่ม และมีการเจริญของเชื้อราในบริเวณขั้วและผิวของผลไม้ส่วน มะเขือเทศใน KP และ KP+NC แสดงลักษณะการเสื่อมเสียจนไม่เหมาะต่อการนำไปบริโภค หลังเก็บไว้นาน 50 และ 57 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 12 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มะเขือเทศ NP, KP และ KP+NC เก็บรักษาที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$

ค่า pH

มะเขือเทศมีค่า pH เริ่มต้นที่ 4.04 ± 0.01 โดยค่า pH ของมะเขือเทศในทุกทรีตเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บ (รูปที่ 13) และมะเขือเทศในแต่ละทรีตเมนต์มีค่า pH ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การที่มะเขือเทศมีค่า pH สูงขึ้นอาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของมะเขือเทศที่เข้าสู่ระยะการสุก สอดคล้องกับรายงานของ Martínez-Romero et al. (2009) ซึ่งพบว่าค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อผลไม้สุก เมื่อสิ้นสุดการเก็บ NP, KP และ KP+NC มีค่า pH เท่ากับ 4.1 ± 0.02 , 4.2 ± 0.01 และ 4.2 ± 0.02 หลังเก็บมะเขือเทศไว้นาน ตามลำดับ 43, 57 และ 57 วันตามลำดับ

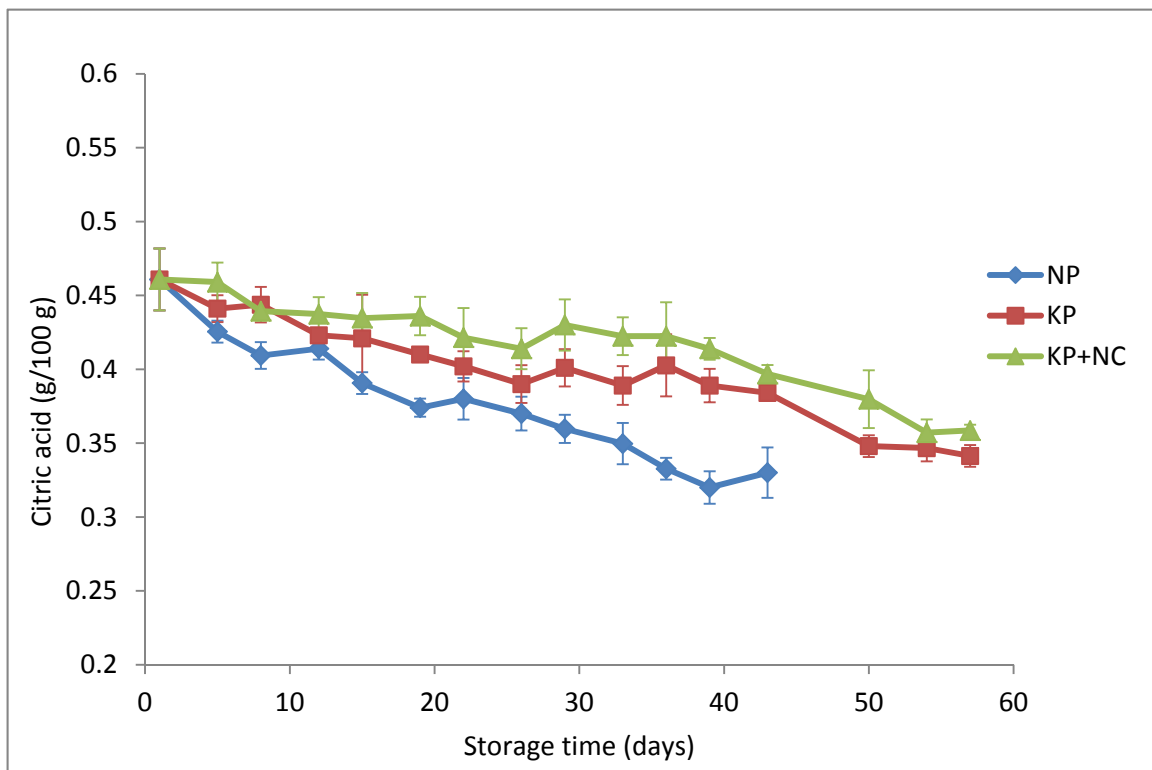


รูปที่ 13 ค่า pH ของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ 10±2°C

ปริมาณกรดที่ไต่เตรตได้ในรูปกรดซิตริก

มะเขือเทศมีปริมาณกรดที่ไต่เตรตได้ในรูปกรดซิตริกเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 0.46 ± 0.03 มะเขือเทศทุกทรีตเมนต์มีแนวโน้มปริมาณกรดที่ไต่เตรตได้ในรูปกรดซิตริกลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บ (รูปที่ 14) หลังจากวันแรกของการเก็บจนถึงสิ้นสุดการเก็บ ในระยะเวลาการเก็บที่เท่ากัน NP มีปริมาณกรดที่ไต่เตรตได้ในรูปกรดซิตริกอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์อื่นๆ อาจเนื่องจากเกิดการสุกเร็วกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ ทั้งนี้การที่มะเขือเทศเข้าสู่กระบวนการสุกจะสามารถผลิตเอทิลีนได้สูงขึ้นและไปกระตุ้นให้เกิดการหายใจที่เพิ่มมากขึ้น (Seymour, Taylor and Tucker, 1993) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Martínez-Romero et al. (2009) ซึ่งพบว่าปริมาณกรดซิตริกสัมพันธ์กับการเสื่อมคุณภาพของมะเขือเทศซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเอทิลีนในระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากอาการสะท้านหนาว (chilling injury) เมื่อเก็บมะเขือเทศซึ่งเป็นผลไม้ประเภท climacteric fruit ไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้มีการหายใจผิดปกติ จึงมีการใช้กรดไปในกระบวนการ metabolism และการหายใจมากขึ้นตามไปด้วย (Lyons, 1973; Siripatrawan and Assatarakul, 2009)

นอกจากนี้ยังพบว่าในระยะเวลาการเก็บที่เท่ากันปริมาณกรดซิตริกที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริกของ KP ต่ำกว่า KP+NC อาจเนื่องจาก KP+NC สามารถดูดซับเอทิลีนไว้ในโครงสร้าง จึงช่วยชะลอการสุกของผลไม้ได้ และสามารถชะลอการสุกได้ดีกว่าเมื่อเก็บใน KP เมื่อสิ้นสุดการเก็บ NP, KP และ KP+NC มีปริมาณกรดซิตริกที่ไตเตรตได้ในรูปกรดซิตริกเท่ากับร้อยละ 0.33 ± 0.02 , 0.34 ± 0.01 และ 0.36 ± 0.01 ภายหลังจากเก็บรักษามะเขือเทศไว้วัน 43, 57 และ 57 วันตามลำดับ อาจสรุปได้ว่าการใช้ KP+NC นั้น nanoclay ที่เคลือบอยู่บนผิวของกระดาษอาจช่วยดูดซับเอทิลีนส่งผลให้เกิดการชะลอการสุกของมะเขือเทศ

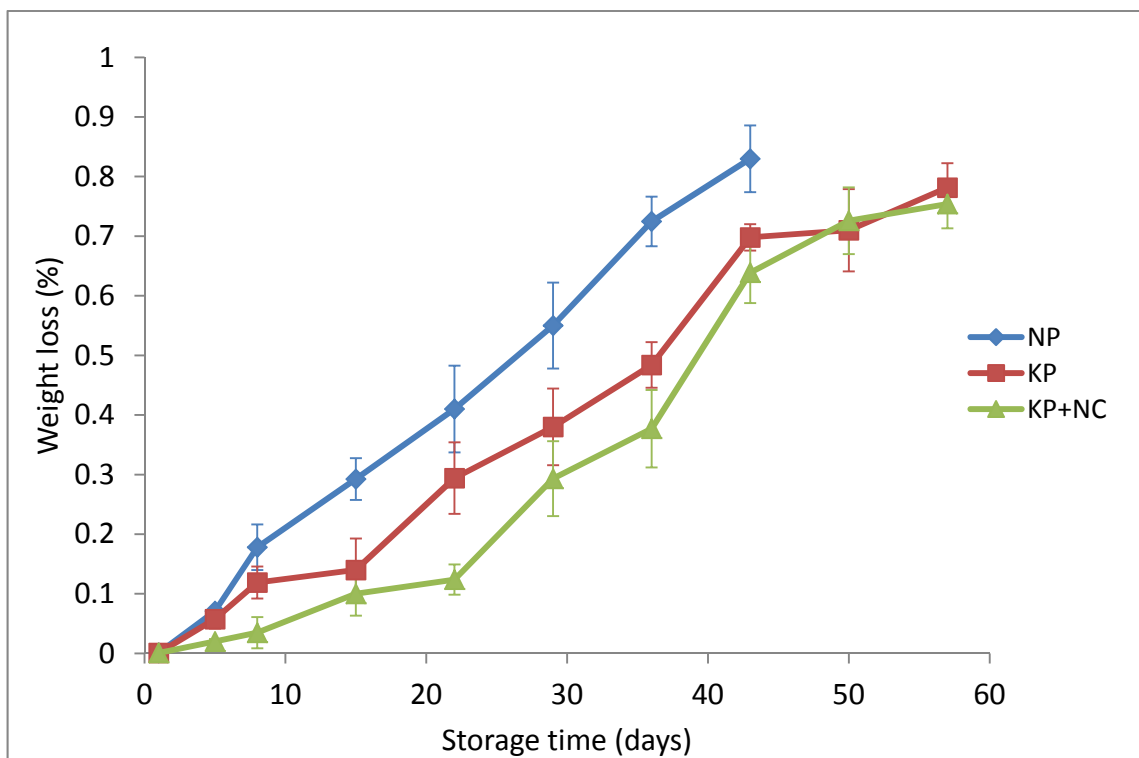


รูปที่ 14 ปริมาณกรดซิตริกของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$

เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก

เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของทุกๆ ทรีตเมนต์มีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บ (รูปที่ 15) NP มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บ โดยการลดปริมาณเอทิลีนโดยการห่อมะเขือเทศด้วยกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนช่วยชะลอระยะเวลาการสุก และช่วยลดอัตราการหายใจของมะเขือเทศ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของ KP+NC ในช่วง 43 วันแรกของการเก็บ มีค่าต่ำกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ

อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการเก็บนาน 43 วัน NP มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 0.82 ± 0.61 % ส่วน KP และ KP+NC มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 0.78 ± 0.41 % และ 0.75 ± 0.43 % ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการเก็บนาน 57 วัน การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง KP และ KP+NC อาจเกิดจากทั้งการสุกของมะเขือเทศ และยังสามารถเกิดจากการดูดความชื้นจากผลมะเขือเทศไว้โดยกระดาษคราฟท์ ส่วนดินเหนียวนาโนที่เคลือบอยู่บนกระดาษมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงไม่น่าจะส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการสูญเสียน้ำจากมะเขือเทศ



รูปที่ 15 เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$

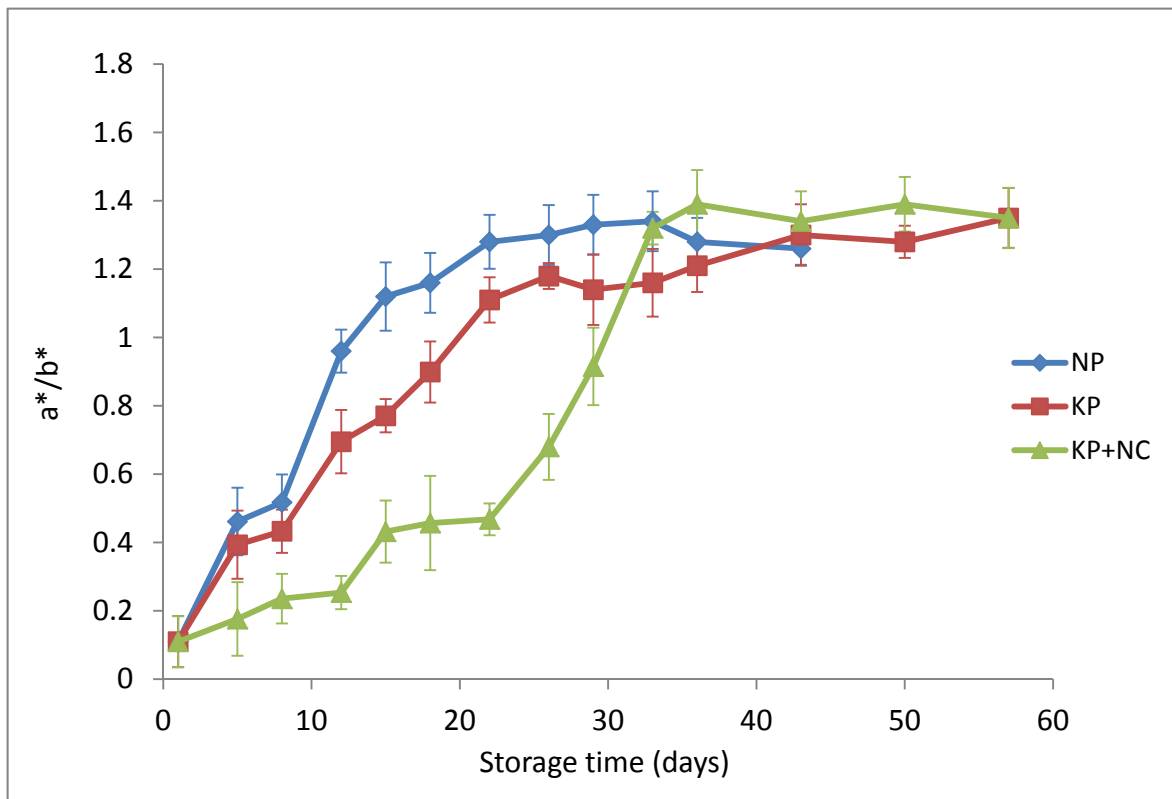
ค่า a^*/b^*

มะเขือเทศมีค่า a^*/b^* เริ่มต้นเท่ากับ 0.11 ± 0.07 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บในทุกทรีตเมนต์ (รูปที่ 16) รงควัตถุหรือสารให้สีของผลไม้ส่วนใหญ่จะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงในระหว่างการเก็บ ในขณะที่สารสีชนิดอื่นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับพันธุ์ ความแก่ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา (Carrari and Fernie, 2006) Zhang et al. (2009) กล่าวว่า ค่าสี hue value ของมะเขือเทศในระยะ mature green stage จะมีค่า a^* เป็นลบ ซึ่งบ่งบอกว่าผลมีสีเขียว และสีจะมีการ

เปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นบวกที่ระยะ breaker และ turning ในการทดลองนี้เริ่มเก็บมะเขือเทศที่ระยะ breaker-turning ซึ่งค่าสีมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นซึ่งบ่งชี้ว่ามะเขือเทศมีสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะการสุก

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 16 พบว่าในช่วงแรกของการเก็บค่า a^*/b^* ของมะเขือเทศใน NP มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่รีตเมนต์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$). อาจเนื่องจากการไม่มีการห่อด้วยบรรจุภัณฑ์มะเขือเทศจึงมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสุกได้อย่างอิสระโดยไม่มีผลกระทบจากปัจจัยของบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังอาจเป็นเพราะเมื่อเก็บผลผลิตในที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานอาจจะทำให้ผลผลิตมีอัตราการหายใจที่สูงขึ้นแบบผิดปกติเนื่องจากเกิดอาการสะท้อนหนาว (Lyons, 1973; Siripatrawan and Assatarakul, 2009) อย่างไรก็ตามไม่มีการวัดสีของตัวอย่างควบคุมที่เก็บไว้นานกว่า 43 วัน เนื่องจากมะเขือเทศมีลักษณะปรากฏที่ไม่เหมาะสมแก่การบริโภค มีเนื้อสัมผัสนุ่ม และบางตัวอย่างเกิดการเจริญของเชื้อรา ส่วนตัวอย่างที่เก็บใน KP+NC มีค่า a^*/b^* เพิ่มขึ้นช้ากว่าตัวอย่างอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องจาก KP+NC ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเอทิลีนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสุก จึงช่วยชะลอการสุกและการเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งมีความสัมพันธ์กับการสุกของผลไม้ได้ ดังนั้นเพื่อพิจารณาค่าสี a^*/b^* ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การสุกของมะเขือเทศพบว่า มะเขือเทศใน NP, KP และ KP+NC เริ่มสุกเมื่อเก็บไว้นานประมาณ 15-18, 22 และ 33 วัน ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าสี a^*/b^* สูงที่สุดในช่วงเวลาดังกล่าว

นอกจากนี้ยังพบว่าในรีตเมนต์เดียวกัน หลังจากตัวอย่างมีค่า a^*/b^* เพิ่มขึ้นสูงสุดแล้วค่า a^*/b^* มีการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงเพียงเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญอาจเนื่องมาจากมะเขือเทศเริ่มเข้าสู่ระยะชราภาพ (senescence) หลังจากที่มีมะเขือเทศเริ่มเข้าสู่การเสื่อมสภาพภายหลังผ่านช่วงระยะการสุกอย่างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งในช่วงนี้ผลไม้จะมีอัตราการหายใจต่ำส่งผลให้การผลิตก๊าซเอทิลีนลดลง (Buta and Thompson, 1998) นอกจากนี้จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า มะเขือเทศเก็บใน KP+NC เข้าสู่ระยะ senescence ช้ากว่า KP และ NP ตามลำดับ

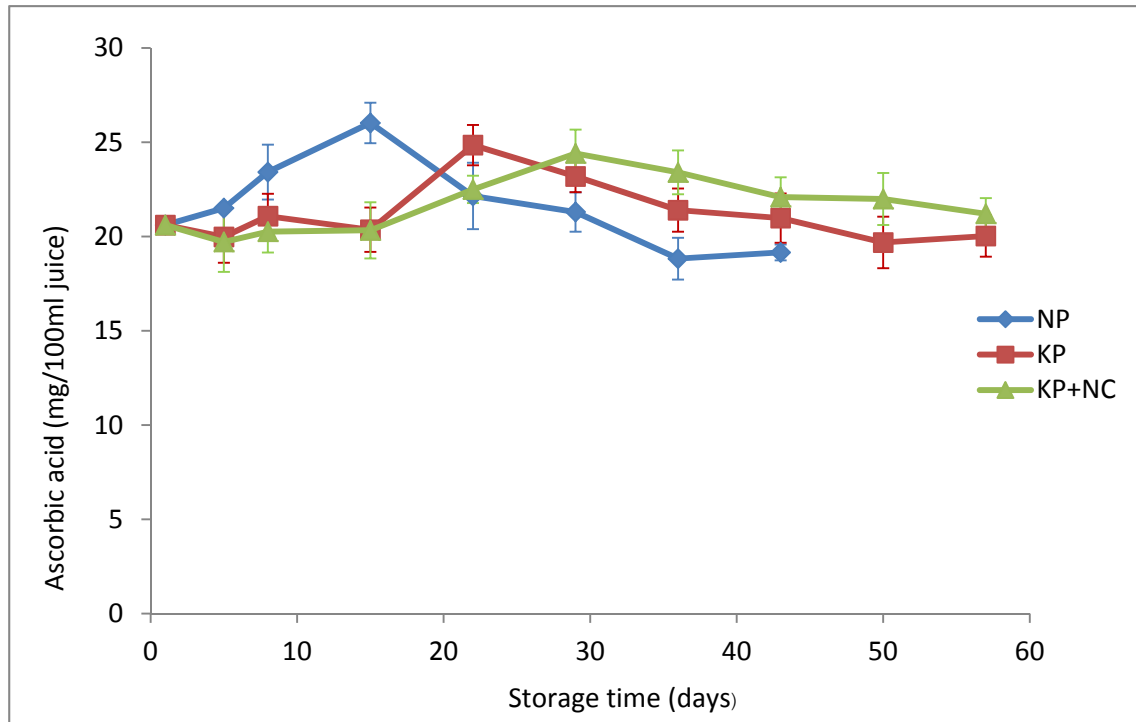


รูปที่ 16 ค่า a^*/b^* ของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^\circ\text{C}$

ปริมาณกรดแอสคอบิก

ปริมาณกรดแอสคอบิกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเก็บในทุกๆทรีตเมนต์ (รูปที่ 17) NP, KP และ KP+NC มีปริมาณกรดแอสคอบิกสูงสุดในวันที่ 15, 22 และ 29 ของการเก็บตามลำดับ และหลังจากนี้ปริมาณกรดแอสคอบิกมีแนวโน้มลดลงจนถึงสิ้นสุดการเก็บ เนื่องจากแต่ละทรีตเมนต์เกิดกระบวนการสุกและเข้าสู่ระยะชราภาพที่เวลาต่างกัน มะเขือเทศที่เกิดการสุกอย่างสมบูรณ์ก่อนก็จะมีปริมาณกรดแอสคอบิกสูงสุดก่อน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carrari and Fernie (2006) ที่กล่าวว่า มะเขือเทศจะมีปริมาณกรดแอสคอบิกเพิ่มขึ้นเมื่อมะเขือเทศเริ่มเปลี่ยนสีผิวจากเขียวไปเป็นแดงปริมาณกรดแอสคอบิกจะเพิ่มขึ้นสูงสุดจากนั้นจะลดลงเมื่อกระบวนการสุกของผลไม้เข้าสู่ระยะชราภาพ (Malewski and Markakis, 1971) อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้เป็นในทางตรงข้ามกับรายงานของ Martínez-Romero et al. (2009) ซึ่งพบว่าปริมาณกรดแอสคอบิกมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงระยะการสุก ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของพันธุ์มะเขือเทศที่ใช้แตกต่างกัน ส่งผลต่อกลไกทางชีวเคมีในช่วงการสุกของผลไม้ที่แตกต่างกัน

ผลการทดลองของปริมาณกรดแอสคอบิกสอดคล้องกับค่า a^*/b^* โดยพบว่า NP มีค่า a^*/b^* เพิ่มขึ้นเร็วกว่า KP และ KP+NC ตามลำดับ ปริมาณกรดแอสคอบิกและค่าสีของมะเขือเทศใน KP+NC มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าใน KP และ NP อาจเนื่องจาก KP+NC สามารถดูดซับเอทิลีนจึงช่วยชะลอการสุกของมะเขือเทศได้



รูปที่ 17 ปริมาณกรดแอสคอบิกของมะเขือเทศที่เก็บใน NP, KP และ KP+NC ที่ $10 \pm 2^\circ\text{C}$

จากผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะเขือเทศที่เก็บรักษาใน NP, KP และ KP+NC ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งมะเขือเทศเกิดการเสื่อมเสีย พบว่าในวันเริ่มต้นของการเก็บมะเขือเทศอยู่ในระยะ breaker-turning ซึ่งมีความแน่นเนื้อ $8.23 \pm 0.64 \text{ N}$ และมีสีเขียวอมส้ม (ค่าสี a^*/b^* value = 0.11 ± 0.07) ในระหว่างการเก็บรักษา มะเขือเทศในทุกทรีตเมนต์มีลักษณะปรากฏ สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลง โดยสีเปลี่ยนจากเขียวอมส้มเป็นสีแดงทั่วทั้งผลเนื่องจากเกิดการสุก เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏร่วมกับ ค่าสี a^*/b^* ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณ ascorbic acid ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การสุกของมะเขือเทศพบว่า มะเขือเทศใน NP, KP และ KP+NC มีการเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากเกิดการสุกเมื่อเก็บไว้นานประมาณ 15-18, 22 และ 30-33 วัน ตามลำดับ ภายหลังจากการสุกเมื่อเก็บไว้นานขึ้นมะเขือเทศจะเข้าสู่ระยะชราภาพและมีลักษณะทาง

กายภาพเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งไม่เหมาะแก่การบริโภค เช่น ความแน่นเนื้อลดลง ผิวนอกของผลไม้ย่นหรือเกิดตำหนิ

มะเขือเทศที่เก็บแบบ NP มีลักษณะปรากฏที่ไม่เหมาะแก่การนำไปบริโภค เมื่อเก็บไว้นาน 43 วัน เนื่องจากมะเขือเทศเข้าสู่ระยะชราภาพเร็วกว่ามะเขือเทศที่เก็บใน KP และ KP+NC นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากอาการสะท้านหนาว (chilling injury) เมื่อเก็บมะเขือเทศซึ่งเป็นผลไม้ประเภท climacteric fruit ไว้ที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่มีบรรทัดฐานที่เป็นระยะเวลานาน อาจส่งผลให้มีการหายใจผิดปกติ จึงมีการใช้กรดไปในกระบวนการ metabolism และการหายใจมากขึ้นตามไปด้วย (Lyons, 1973; Siripatrawan and Assatarakul, 2009) โดย Cantwell และ Suslow (2000) พบว่ามะเขือเทศเป็นพืชประเภท climacteric มักเกิดอาการสะท้านหนาว ได้ง่ายเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10°C นานกว่า 2 สัปดาห์ หรือเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°C นานกว่า 8 วัน มะเขือเทศใน KP มีลักษณะปรากฏที่ไม่เหมาะแก่การบริโภคเมื่อเก็บไว้จนถึงวันที่ 57 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการเก็บรักษา ส่วนมะเขือเทศที่เก็บใน KP+NC มะเขือเทศยังมีลักษณะปรากฏที่ยอมรับได้ในวันที่ 57 อย่างไรก็ตามในวันที่ 57 มะเขือเทศมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มะเขือเทศใน KP+NC มีการเปลี่ยนแปลงจนมีลักษณะที่ไม่เหมาะแก่การบริโภค ซ้ำกว่าตัวอย่างอื่น อาจเนื่องจาก KP+NC สามารถดูดซับเอทิลีนที่ผลไม้สร้างขึ้น จึงช่วยชะลอการสุกของมะเขือเทศได้ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระยะชราภาพช้าลง

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการใช้ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนในการเคลือบบนผิวหน้ากระดาษคราฟท์ขาว (Kraft paper, KP) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีนของกระดาษที่ผ่านการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน และปริมาณของดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนที่เหมาะสมคือ 60% โดยน้ำหนักของกระดาษ เนื่องจากเป็นปริมาณสูงสุดที่สามารถเคลือบบนกระดาษได้ และสามารถดูดซับเอทิลีนได้สูงที่สุด

การศึกษาการเคลือบกระดาษคราฟท์ขาวด้วยดินเหนียวนาโน 2 ชนิด คือ เบนโทไนท์ (bentonite, BT) และ ดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุน (porous nanoclay, NC) โดยใช้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) เป็น binder สรุปได้ว่าสารละลายที่เหมาะสมในการใช้เป็น binder คือ อัตราส่วนของน้ำตอ PVOH ที่ 100:20 และปริมาณของดินเหนียวนาโนที่เหมาะสมในการเคลือบคือ 60% โดยน้ำหนักของกระดาษ

จากการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลาย PVOH ที่ผสมกับดินเหนียวนาโน (KP+NC) และกระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลาย PVOH ที่ผสมกับเบนโทไนท์ (KP+BT) พบว่ากระดาษคราฟท์ขาวที่ผ่านการเคลือบมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของอากาศ และความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคราฟท์ขาวที่ไม่ผ่านการเคลือบโดย KP+BT มีความต้านทานการซึมผ่านของอากาศและความต้านทานแรงดันทะลุมากที่สุด ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงทั้งแนวตามเกรนและแนวขวางเกรนของกระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลง

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของกระดาษด้วย scanning electron microscope (SEM) พบว่าอนุภาคของดินเหนียวนาโนที่มีการปรับปรุงผิวหน้าและหมู่ฟังก์ชันให้สามารถดูดซับเอทิลีนได้ มีความสามารถในการยึดติดได้ดีทั้งที่บริเวณเส้นใยของกระดาษและที่ตัวสารเคลือบ PVOH จึงทำให้กระดาษ KP+NC สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ในขณะที่กระดาษ KP+BT มีเบนโทไนต์อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นเคลือบอยู่เป็นจำนวนน้อย เบนโทไนต์ส่วนใหญ่จะแทรกลงไประหว่างช่องว่างระหว่างเส้นใยของกระดาษและถูกปกคลุมด้วยสารเคลือบ PVOH อาจทำให้ KP+BT ไม่สามารถดูดซับเอทิลีนได้ จึงเลือกใช้กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยดินเหนียวนาโนในการทดลองยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

การศึกษามลของการใช้ KP+NC ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ในการยืดอายุการเก็บมะเขือเทศ โดยห่อมะเขือเทศที่ระยะการสุกที่ breaker-turning และเปรียบเทียบกับการใช้กระดาษคราฟท์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Kraft paper, KP) และที่ไม่มีการใช้บรรจุภัณฑ์ใดๆ ในการห่อมะเขือเทศเลย (No

paper wrapping, NP) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ได้แก่ ค่าสี a^*/b^* value ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่า pH ปริมาณกรดที่ไทเตรตได้ในรูปกรดซิตริก การสูญเสียน้ำหนัก และปริมาณกรดแอสคอบิก ตลอดระยะเวลาการเก็บจนกระทั่งผลไม่เกิดการเน่าเสีย

จากผลการทดลองพบว่ามะเขือเทศที่เก็บใน KP+NC มีค่าความแน่นเนื้อ และปริมาณกรดที่ไทเตรตได้ในรูปกรดซิตริกลดลงช้ากว่ามะเขือเทศที่เก็บใน KP และ NP ตามลำดับ และพบว่าการบรรจุมะเขือเทศใน KP+NC ช่วยชะลอการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงของค่าสี a^*/b^* และกรดแอสคอบิก เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏร่วมกับ ค่าสี a^*/b^* ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณ ascorbic acid ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การสุกของมะเขือเทศพบว่า มะเขือเทศใน NP, KP และ KP+NC มีการสุกอย่างสมบูรณ์ เมื่อเก็บไว้นานประมาณ 15, 22 และ 33 วัน ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการเก็บมะเขือเทศใน KP+NC ช่วยชะลอการสุกโดยดูดซับเอทิลีนไว้ในโครงสร้างแบบมีรูพรุนของ porous nanoclay จึงช่วยยืดอายุการเก็บของมะเขือเทศได้

ในงานวิจัยนี้พัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ โดยใช้ดินเหนียวนาโนมาเคลือบบนบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ และบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวสามารถยืดอายุการเก็บของมะเขือเทศได้ จึงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ หรือดอกไม้ เพื่อช่วยยืดอายุในการเก็บและชะลอการเน่าเสียในระหว่างการเก็บรักษา

6. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป

เนื่องจากดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนนอกจากจะดูดซับเอทิลีนแล้ว ยังอาจดูดซับสารระเหยที่ให้กลิ่นรสของผลไม้ได้เช่นกัน อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านกลิ่นรสของผลไม้ ดังนั้นอาจมีการศึกษาผลของการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนต่อคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของผลไม้

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนในการชะลอการสุกของผลไม้ชนิด climacteric fruits โดยใช้มะเขือเทศเป็นผลผลิตต้นแบบเท่านั้น หากต้องการนำไปใช้ให้มีความหลากหลายควรมีการศึกษาการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโนในการยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรกับผลไม้ชนิดอื่นๆ หรืออาจทดลองกับดอกไม้ เช่น กัลฉวยไม้ด้วยเช่นกัน เนื่องจากผลไม้ต่างชนิดกันมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีภายหลังการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน และอาจทำการทดลองการใช้กระดาษเคลือบดินเหนียวนาโน กับภาวะการเก็บที่ต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิต่างๆ เพราะอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับเอทิลีนหรืออาจทดลองศึกษาร่วมกับการใช้การยืดอายุผลผลิตโดยวิธีอื่น เช่น modified atmosphere packaging

เอกสารอ้างอิง

- จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2542. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิตยา รัตนพานนท์ และ ดนัย บุญยเกียรติ. 2548. การปฏิบัติการภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- งานนิเทศสัมพันธ์เอ็มเทค. 2550. บรรจุภัณฑ์ฉลาด: นวัตกรรมยืดอายุผักผลไม้ [online]. แหล่งที่มา: http://www.mtec.or.th/Th/news/cool_stuff/cool27.html
- รัตนวรรณ มกรพันธุ์. 2547. นาโนเคลย์/นาโนคอมพอสิต. LAB TODAY Vol.18.กรุงเทพฯ: บริษัทฐานการพิมพ์
- พีชยา ตันติเตมิท, อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ, วรณมาตุลยธัญ, อนุวัช สุวรรณกุล, และนุชจรินทร์ เหลืองสะอาด. 2549. บรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุผักและผลไม้สด การประชุมวิชาการครั้งที่14, 16-17 มีนาคม 2549 คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- หทัยกานต์ มนัสปิยะ. การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของดินเหนียวนาโนแบบมีรูพรุนสังเคราะห์จากแหล่งแร่ธรรมชาติเพื่อการใช้งานในบรรจุภัณฑ์ฉลาดแบบนาโนคอมพอสิต. [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJID=MRG4980024
- อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ,รมณี สงวนดีกุล, นุชจรินทร์ เหลืองสะอาดและกานูวัฒน์ สรรพกุล. 2549. เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปของประเทศไทย. รายงานผลการวิจัย. ศูนย์ส่งเสริมการวิจัยในภูมิภาคเอเชียของมูลนิธิเกาหลี่เพื่อการศึกษาขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Abe, K., and Watada, A. E. 1991. Ethylene Absorbent to Maintain Quality of Lightly Processes Fruits and Vegetables. *Journal of Food Science* 56, 1589-1592.
- Bailén, G., Guillén, F., Castillo, S., Serrano, M., Valero, D., Martínez-Romero, D., 2006. Use of activated carbon inside modified atmosphere packaging to maintain tomato fruit quality during cold storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 2229-2235
- Bailén, G., Guillén, F., Castillo, S., Zapata, P.J., Serrano, M., Valero, D., Martínez-Romero, D., 2007. Use of a palladium catalyst to improve the capacity of activated carbon to absorb ethylene, and its effect on tomato ripening. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5, 579-586.
- Biale, J.B. 1960. The Post-harvest biochemistry of tropical and subtropical fruits. *Advanced Food Research* 10, 293-354.
- Beattie B., and Wade N. 1996. Storage, Ripening and handling of fruit. In *Fruit Processing*, pp. 40-69. Glasgow: Blackie Academic and Professional.
- Brody, A. L., Strupinsky, E. R., and Kline, L. R. 2001. *Active packaging for Food Applications*. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, 218 pp.
- Caner, C., M.S. Aday, M.Demir. 2008. Extending the quality of fresh strawberries by equilibrium modified atmosphere packaging. *European Food Research and Technology* 227, 1575-1583.

- Cantwell, M., and Suslow, T. V. 2000. Produce Facts . [online]. Tomato. University of California, Davis. Available from: <http://www.ethylenecontrol.com/technical/uc801.html> [2014, April 22].
- Carrari, F., and Fernie, A.R. 2006. Metabolic regulation underlying tomato fruit development. *Journal of Experimental Botany* 57, 1883–1897.
- Center for Agricultural Information. 2013. Thailand foreign agricultural trade statistics 2012. Office of Agricultural Economics.
- Chmielarz, L., Gil, B., Kustrowski, P., Piwowarska, Z., Dudek, B. and Michalik, M. 2009. Montmorillonite-based porous clay heterostructures (PCHs) intercalated with silica-titania pillars-synthesis and characterization. *Journal of Solid State Chemistry* 182, 1094-1104.
- Choi, B.U., D.K. Choi, Y.W. Lee, B.K.Lee. 2003. Adsorption equilibria of methane, ethane, ethylene, nitrogen, and hydrogen onto activated carbon. *Journal of Chemical Engineering Data* 48, 603–607.
- Crittenden, B., and Thomas, W. J. 1998. *Adsorption Technology & Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 8-30.
- Eskin, N. A. M., Henderson, H. M. and Townsend, R. J. 1971. Postharvest changes in fruits and vegetables. *Biochemistry of Food*. New York: Academic Press.
- Grierson, D. and Kader, A. A. 1986. Fruit ripening and quality. In *The Tomato Crop*, Edited by: Atherton, J.G. and Rudich, J. 241–278. London: Chapman and Hall.
- Grierson, D. and Tucker, G.A. 1983. Timing of ethylene and polygalacturonase synthesis to control of tomato fruit ripening. *Planta* 157,174-179.
- Hu, Q., F.Yong, Y. Yanting, N. Ma, L. Zhao. 2011. Effect of nanocomposite-based packaging on postharvest quality of ethylene-treated kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during cold storage. *Food Research International* 44, 1589–1596.
- Klieber, A., Ratanachinakorn, B. and Simons, D. H. 1996. Effects of low oxygen and high carbon dioxide on tomato cultivar 'Bermuda' fruit physiology and composition. *Scientia Horticulturae* 65, 251-261.
- Li, H., F. Li, L. Wang, J. Sheng, Z. Xin, L. Zhao, H. Xiao, Y. Zheng, Q. Hu. 2009. Effect of nano-packing on preservation quality of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. var. *inermis* (Bunge) Rehd). *Food Chemistry* 114, 547–552
- Lyons, J. M.1973. Chilling injury in plants. *Plant Physiology* 24: 445–466.
- Maneerat, C., Y. Hayata, N. Egashira, K. Sakamoto, Z. Hamai, M. Kuroyanagi. 2003. Photocatalytic reaction of TiO₂ to storage. *Transaction ASAE* 46, 725–730.
- Martínez-Romero, D., Guillén, F., Castillo, S., Zapata, P. J., Valero, D., and Serrano, M. 2009. Effect of ethylene concentration on quality parameters of fresh tomatoes stored using a carbon-heat hybrid ethylene scrubber. *Postharvest Biology and Technology* 51, 206-211.

- Seymour, G.B., Taylor, J.E. and Tucker, G.A. 1993. Biochemistry of fruit ripening, London: Chapman and Hall.
- Siripatrawan, U. and Assatarakul, K. 2009. Methyl jasmonate coupled with modified atmosphere packaging to extend shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentim* Mill.) during cold storage. International Journal of Food Science and Technology 44, 1065-1071.
- Siripatrawan, U., Sanguandeeikul, R., Luangsa-ard, N., and Suppakul, P. 2006. Food packaging improvement: An effective means to promote international trade. The Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on Packaging. October 3-5, 2006. Tokyo, Japan. pp. 412-416.
- Srithammaraj, K., Magaraphan, R., and Manuspiya, H. 2012. Modified porous clay heterostructures by organic-inorganic hybrids for nanocomposite ethylene scavenging/sensor packaging film. Packaging Technology and Science 25, 63-72.
- Vermeiren, L., Heirlings, L., Devlieghere, F., and Debevere, J. 2003. Oxygen, ethylene and other scavengers. In Novel Food Packaging Techniques, pp. 22-49. Cambridge: Woodhead Publishing limited.
- Zagory, D. 1995. Ethylene-removing packaging. In Active Food Packaging, pp. 38-54. Glasgow: Blackie Academic and Professional.