



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

.....
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
ต่อการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ : มะละกอพันธุ์ปลุกไม่ลาย
(*Carica papaya L.*)

Efficacy of Activated Carbon from Scrap Tire in-situ LDPE Film on Ethylene Gas
Adsorption for Active Packaging : Papaya cv. Pluk Mai Lie (*Carica papaya L.*)

นามผู้วิจัย นายอริวัชร สิริเมื่องจินดา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... อาจารย์ชिरาวดี เพชรเย็น วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์ Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์ดวงเดือน อางวงศ์ Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญวรัตน์ จิณกาญจน์ Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
ต่อการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ : มะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย
(*Carica papaya L.*)

Efficacy of Activated Carbon from Scrap Tire in-situ LDPE Film on Ethylene Gas
Adsorption for Active Packaging : Papaya cv. Pluk Mai Lie (*Carica papaya L.*)

โดย

นายอริวัชร สิริเมืองจินดา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิริวัชร สิริเมืองจินดา 2556: ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำต่อการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์แอดทีฟ : มะละกอฟันธุ์ปลักไม้ลาย (*Carica papaya L.*) ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชिरาวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด. 195 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์จากการกระตุ้นด้วยสารละลายกรด (กรดไฮโดรคลอริก, กรดซัลฟูริก) สารละลายต่างๆ (โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) และสารละลายโลหะคลอไรด์ (ซิงค์คลอไรด์, แมกนีเซียมคลอไรด์) โดยวิธีการทดลองประกอบด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้น ซึ่งในกระบวนการกระตุ้นมีการผันแปรอุณหภูมิในช่วง 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของสารละลายในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ซึ่งพบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านชาร์ตต่อกรดซัลฟูริกเท่ากับ 1:2 ของเศษยางรถยนต์ขนาด 0.45 ถึง 0.50 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์ม โดยเปรียบเทียบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้น ในปริมาณ 1, 3, 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนจากฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ และศึกษาการยืดอายุของมะละกอฟันธุ์ปลักไม้ลาย (*Carica papaya L.*) พบว่าการเติมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่สูงที่สุด โดยแสดงอายุการเก็บรักษาของมะละกอฟันธุ์ปลักไม้ลายจาก 12 วัน เป็น 20 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Athiwat Sirimuangjinda 2013: Efficacy of Activated Carbon from Scrap Tire in-situ LDPE Film on Ethylene Gas Adsorption for Active Packaging : Papaya cv. Pluk Mai Lie (*Carica papaya L.*). Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Mr. Chiravoot Pechyen, Ph.D. 195 pages.

This research was the study of the effect of activation by acid (HCl, H₂SO₄), alkaline (NaOH, KOH) and metal chloride (ZnCl₂, MgCl₂) solution on properties of activated carbon from scrap tires. The experiment was included both carbonization and activation. The variable studied was temperature (400, 500, 600, 700 °C) and chemical ratio by weight (1:1, 1:2, 1:3) in activation process. It was found that the optimum condition was 700 °C in 30 minutes using 1:2 of char:H₂SO₄ for scrap tire size of 0.45 - 0.50 mm. Then the activated carbon was mixed with low density polyethylene (LDPE) for film forming. Comparison of LDPE blend with activation and non-activation carbon were 1, 3, 5, 7 and 10 phr. Efficacy of the ethylene absorber from LDPE in-situ activated carbon for extending shelf life of papaya cv. Pluk Mai Lie (*Carica papaya L.*) was also investigated. The efficacy study showed that the ethylene adsorption in-situ 10 phr treated activated carbon performed the high gaseous ethylene adsorption. It decelerated shelf life of papaya cv. Pluk Mai Lie from 12 to 20 days at the storing temperature of 13 ± 2 °C.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชिरาวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำระหว่างดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาและพิจารณาแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาค้นคว้าวิจัยงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้อำนวยการหน่วยวิจัยเทคโนโลยีเซรามิกส์แห่งศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ นักวิจัยอาวุโส ดร.ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาค้นคว้าวิจัย ช่วยเหลือด้านวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ อบรมสั่งสอน อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือการปฏิบัติงานวิจัย อีกทั้งยังขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration, NUI-RC) จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประจำปี 2554 และทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554 ที่สนับสนุนด้านงบประมาณ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณครอบครัว สิริเมืองจินดา ที่ได้เลี้ยงดู อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา

อธิวัชร สิริเมืองจินดา

เมษายน 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	143
สรุป	143
ข้อเสนอแนะ	145
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	146
ภาคผนวก	153
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์	154
ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบและการคำนวณค่าการทดสอบของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	160
ภาคผนวก ค การตรวจวัดคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของมะละกอพันธุ์ ปลักไม้ลาย	171
ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าจากการทดลอง	174
ประวัติการศึกษาและประวัติการทำงาน	195

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบของฟิล์ม (พีเอชอาร์)	50
2 คุณภูมิในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	96
3 คุณภูมิในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	96
4 ค่ามูสสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	100
5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส)	104
ตารางผนวกที่	
ง1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วย สารละลายกรด (ร้อยละ)	175
ง2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด (ร้อยละ)	176
ง3 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด	177
ง4 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วย สารละลายต่าง (ร้อยละ)	178
ง5 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง (ร้อยละ)	179
ง6 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	180
ง7 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วย สารละลายโลหะคลอไรด์ (ร้อยละ)	181
ง8 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์ (ร้อยละ)	182
ง9 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โลหะคลอไรด์	183
ง10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	184

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง11 สมบัติการซึมผ่านของของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	185
ง12 ร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในระบบปิดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	186
ง13 ค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	187
ง14 ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	188
ง15 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	189
ง16 ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	190
ง17 ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	191
ง18 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	192
ง19 ความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (นิวตัน)	193
ง20 ความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (องศาบริกซ์)	194

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)	4
2 สมบัติของบรรจุภัณฑ์แอกทีฟของอาหาร	23
3 ลักษณะของสกรูเกลียวหนอนคู่ชนิดต่างๆ	36
4 กระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film process)	38
5 แผนผังระบบการต่อชุดเตาเผา (furnace reactor)	49
6 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วย สารละลายกรด	57
7 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วย สารละลายกรด	58
8 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด	59
9 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	61
10 ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	62
11 ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	63
12 ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	64
13 ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด	66
14 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	67
15 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย กรด	68
16 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
17 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	71
18 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	72
19 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	73
20 ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	74
21 ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	76
22 ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	77
23 ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	78
24 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	80
25 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง	81
26 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	83
27 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	84
28 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	85
29 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	87

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	88
31	ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	89
32	ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	90
33	ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	92
34	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	93
35	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์	94
36	สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ภาวะการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 โดยกลั่นจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	95
37	ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	98
38	ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	98
39	ค่าร้อยละการยืดตัวออกของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	99
40	ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	102
41	ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	103
42	อุณหภูมิที่ก่อผลึกและอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	105
43	อุณหภูมิเสื่อมสลายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์	105

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	107
45	ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	107
46	ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	108
47	ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	110
48	ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	110
49	ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	111
50	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	112
51	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	113
52	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	113
53	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	115
54	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอบันทึกด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
55	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	116
56	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายในวันที่ 0 (ก่อนการเก็บรักษา)	117
57	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 4 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	118
58	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 8 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	119
59	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 12 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	120
60	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 16 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	121
61	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 20 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	122
62	ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 24 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	123
63	ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	125
64	ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	125
65	ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	126
66	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	127

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
67	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	127
68	ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	128
69	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิ เอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	129
70	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิ เอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	129
71	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิ เอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	130
72	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายในวันที่ 0 (ก่อนการเก็บรักษา)	131
73	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 4 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	132
74	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 8 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	133
75	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 12 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	134
76	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 16 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	135
77	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 20 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	136
78	ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 24 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม	137

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
79	ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	139
80	ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	139
81	ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	140
82	ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น	141
83	ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น	142
84	ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์	142

ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีน
ความหนาแน่นต่ำต่อการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ
: มะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย (*Carica papaya L.*)

Efficacy of Activated Carbon from Scrap Tire in-situ LDPE Film on
Ethylene Gas Adsorption for Active Packaging : Papaya cv. Pluk Mai Lie
(*Carica papaya L.*)

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมากมาย
หลากหลายชนิด มีศักยภาพในการผลิตเพื่อบริโภคภายในประเทศ และยังมีมากพอที่จะส่งออกป
จำหน่ายยังต่างประเทศ ประกอบกับตลาดในต่างประเทศมีความต้องการผลผลิตทางการเกษตร
ของไทย ทำให้ต้องทำการขนส่งผลไม้ซึ่งเป็นที่นิยมในต่างประเทศ ซึ่งการเดินทางโดยทางเรือจะมี
ต้นทุนในการขนส่งต่ำที่สุด และยังสามารถขนส่งได้ในครั้งละปริมาณมาก หากแต่จะใช้เวลาในการ
ขนส่งยาวนานกว่ายานพาหนะประเภทอื่น ซึ่งถือเป็นข้อเสียเปรียบ การขนส่งที่ล่าช้าจะมีผลทำให้
ผลไม้บางส่วนเกิดการเน่าเสียหายอันเนื่องมาจากผลไม้ได้ปลดปล่อยก๊าซเอทิลีนออกมาบริเวณพื้นผิว
ซึ่งจะทำให้ผลไม้สุกก่อนเวลาอันควร อีกทั้งยังทำให้พื้นผิวเกิดรอยช้ำ สีของผลไม้เปลี่ยนเป็นสี
น้ำตาล สร้างความเสียหายให้กับผู้ประกอบการเป็นอย่างมาก จึงได้มีการนำสารดูดซับก๊าซเอทิลีน
มาประยุกต์ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปลดปล่อยออกมา ซึ่งเป็นต้นเหตุของความเสียหาย
ทั้งหมด โดยสารดูดซับเอทิลีนนี้จะบรรจุอยู่ภายใต้บรรจุภัณฑ์เพื่อทำการยืดอายุผลไม้ จึงเป็นการ
เพิ่มต้นทุนในการเก็บรักษาผลไม้ และเพิ่มน้ำหนักในการขนส่งโดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิด
ในการใช้ถ่านกัมมันต์ผสมขึ้นรูปกับฟิล์มพลาสติกโดยผ่านกระบวนการทางความร้อน เพื่อเป็น
บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีสารดูดซับก๊าซเอทิลีนผสมในตัวในการยืดอายุการเก็บของผลไม้

ถ่านกัมมันต์ ถือเป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดซับกันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง
ของเหลว หรือก๊าซ อันเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนจำนวนมาก พื้นผิวสูง โดยกระบวนการ
ผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องใช้กระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนภายใต้ภาวะที่
ไม่มีก๊าซออกซิเจน และต้องใช้กระบวนการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพเพื่อเพิ่มพื้นผิว

ของถ่านกัมมันต์ วัตถุประสงค์ที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง อาทิเช่น เศษยางรถยนต์ โดยในแต่ละปีประเทศไทยนั้น มีการทิ้งเศษยางรถยนต์มากกว่า 1,200 ตันต่อปี (ธราพงษ์, 2553) ซึ่งยากแก่การกำจัดและถือเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้น จึงได้มีแนวคิดในการกำจัดเศษยางรถยนต์โดยการนำเศษยางรถยนต์มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับก๊าซเอทิลีนได้เป็นอย่างดี ฉะนั้นแล้ว จึงสามารถประยุกต์ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของผลไม้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาในระหว่างการขนส่งได้นานขึ้น ต้นทุนในการผลิตบรรจุภัณฑ์ลดลงเนื่องจากสารดูดซับก๊าซ เอทิลีนอยู่ผสมภายในตัวบรรจุภัณฑ์ ยังรวมไปถึงน้ำหนักในการขนส่งที่น้อยลงอีกด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเศษยางรถยนต์ โดยนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นร่วมทางเคมีกายภาพ ผสมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ผ่านกระบวนการอัดรีดแบบเป่า (blown film extrusion) เป็นฟิล์มแอคทีฟเพื่อประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์จากกระบวนการกระตุ้นร่วมทางเคมีกายภาพ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนของบรรจุภัณฑ์แอกทีฟที่เตรียมจากฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์เพื่อยืดอายุมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บเกี่ยว

การตรวจเอกสาร

1. ถ่านกัมมันต์

1.1 ความรู้เบื้องต้น

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่มีความพรุนตัวและสมบัติในการดูดซับสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้ โดยเฉพาะในระบบการบำบัดน้ำเสีย ด้วยสมบัติที่เป็นที่รู้จักกันมานาน โดยวัสดุที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบที่สูง ซึ่งวัสดุนั้นอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ วัสดุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์กันมากในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังนี้ มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง และมีราคาถูก (ธราพงษ์, 2553)



ภาพที่ 1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ความหมายของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน มอก. 900 - 2532 กล่าวว่าถ่านกัมมันต์คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน มาผ่านกรรมวิธี

ก่อกัมมันต์จนได้ถ่านสีดำเป็นผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆได้ดี (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532)

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ กระบวนการที่ทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นด้วยวิธีการกระตุ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว หรือเป็นการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น โดยในปัจจุบันมีวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์อยู่หลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น สมบัติ และลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการภายหลังการเตรียม โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนในเซชัน (carbonization) เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) โดยการให้ความร้อนทำให้สารระเหยที่แทรกตัวอยู่แตกตัวอยู่ภายในออกจากวัสดุที่เป็นวัตถุดิบ ทำให้เกิดของแข็งสีดำเป็นผลิตภัณฑ์ เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) ส่วนที่เหลือออกมาเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้คือ ก๊าซและน้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนในเซชันนั้นเป็นการเพิ่มปริมาณร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น การคาร์บอนในเซชันจะทำให้ถ่านมีสมบัติที่ต้องการในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการปรับภาวะในขั้นตอนต่างๆให้เหมาะสม โดยมีองค์ประกอบตัวแปรที่สำคัญดังนี้ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ส่วนขั้นตอนที่สอง คือ การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ผิวของถ่านชาร์เกิดรูพรุนขนาดต่างๆด้วยสารกระตุ้น ที่อาจเป็นได้ทั้งไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้หลายแบบตามเกณฑ์ดังนี้ แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดกระตุ้นทางเคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และถ่านกัมมันต์ชนิดกระตุ้นทางกายภาพ (physical activated carbon) ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ อาทิเช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ร่วมกับความร้อน ถ่านกัมมันต์ที่ได้ ส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ในกรณีที่แบ่งเกณฑ์ตามขนาดรูพรุน จะประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือสารระเหย ชนิดรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่ง (catalytic reaction) ใช้ดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ใช้ในการฟอกสี เป็นต้น และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร โดยปกติรูพรุนขนาดใหญ่ไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็น

ตัวช่วยสนับสนุนให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา กรณีที่แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง แบ่งได้เป็น ถ่านกัมมันต์ประเภทผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง มักนิยมใช้สำหรับฟอกและดูดกลิ่นในของเหลว ประเภทเกร็ด (pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด โดยอาจได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำให้เป็นเกร็ด มักใช้สำหรับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาของก๊าซ และสามารถใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ และประเภทขึ้นรูปเป็นแท่ง ใช้ในเบตนิ่งเพื่อการดูดซับสารปนเปื้อนที่ต้องการอัตราการดูดซับสูงๆ และสุดท้ายแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำจะใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกของสีน้ำตาลหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์ และถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย นอกจากนี้ยังมีถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่แบบอื่นๆซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง

สำหรับกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการฟื้นฟู โดยจะทำเมื่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง การฟื้นฟูทำได้โดยผ่านอากาศแห้ง หรือใช้สารละลายชะสารที่ถูกดูดซับหรือทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกดูดซับ อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่ได้ภายหลังจากกระบวนการฟื้นฟู จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ (ธราพงษ์, 2553)

1.2 วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

สำหรับการใช้ถ่านกัมมันต์ทั่วโลก มีการคาดการณ์ว่าจะมีการขยายตัวร้อยละ 5.2 ต่อปี ในปี ค.ศ. 2009 ถึงปี ค.ศ. 2012 โดยสอดคล้องกับการใช้ยางรถยนต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งก็เป็นอีกทางเลือก เนื่องจากเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในประเทศไทย ปัจจุบันมีปริมาณถึง 300,000 เส้นต่อปี หรือคิดเป็นน้ำหนัก 1,200 ตันต่อปี มีการทิ้งและการกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี ก่อให้เกิดมลภาวะอย่างมาก ปัจจุบันจึงเริ่มมีงานวิจัยที่นำเศษยางรถยนต์มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมันสำหรับเป็นเชื้อเพลิง โดยกระบวนการไพโรไลซิสสามารถที่จะ

ควบคุมปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ถ่านชาร์แล้วนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งศักยภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากเศษยางรถยนต์สามารถนำไปดูดซับสิ่งปนเปื้อนได้ดีมาก

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้สามารถกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยอาศัยปัจจัยที่ต้องพิจารณา คือ ความชื้น ซึ่งความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันนั้น ควรควบคุมให้มีค่าต่ำสุดที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาน้อยลงและลดมลภาวะในรูปของควัน อีกทั้งยังสามารถลดพลังงานในการคาร์บอนในเซชันอีกด้วย การลดความชื้นสามารถทำได้โดยการอบด้วยเตาอบได้โดยตรง อีกประการหนึ่งคือ การลดขนาด โดยการลดขนาดของวัตถุดิบบางประเภท ก่อนเข้ากระบวนการคาร์บอนในเซชันนั้นมีความจำเป็นมาก การลดขนาดจะให้ความร้อนกระจายตัวเข้าไปในวัตถุดิบอย่างทั่วถึง

1.3 กระบวนการคาร์บอนในเซชัน

กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันจะได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือจะกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันหาร์ท และก๊าซต่างๆ โดยใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นและสารระเหยต่างๆออกจากวัตถุดิบ ทำให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ โดยส่วนที่หลุดออกมา คือ ก๊าซและน้ำมันหาร์ท กระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณร้อยละของคาร์บอนเพื่อให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสมโดยมีตัวแปรสำคัญ คือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ตัวกลางของปฏิกิริยา และธรรมชาติของวัตถุดิบ

ขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในกระบวนการคาร์บอนในเซชันเป็นการเริ่มสร้างโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยในระหว่างการคาร์บอนในเซชันนั้น ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน รวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซและน้ำมันหาร์ท หลังจากขั้นตอนนี้จะได้ถ่านชาร์ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง

ผลึกที่ไม่เป็นระเบียบที่มีรูพรุนช่องว่างระหว่างผลึก โดยมีสารอินทรีย์คือน้ำมันทาร์ไปอุดช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งในส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย ขั้นตอนของการคาร์บอนในเซชันสามารถแบ่งได้ชัดเจนเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (1) มีการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 197 องศาเซลเซียส
- (2) ขั้นตอนการไฟโรไลซิสโดยเกิดก๊าซและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 ถึง 497 องศาเซลเซียส
- (3) มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497 ถึง 847 องศาเซลเซียส

จุดประสงค์หลักของกระบวนการคาร์บอนในเซชัน คือ เพื่อผลิตถ่านให้มีรูพรุนและการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากขึ้น โดยการคาร์บอนในเซชันให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการ ทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ก. อุณหภูมิ และเวลา

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด และเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของการคาร์บอนในเซชัน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น น้ำหนักถ่านชาร์ของผลิตภัณฑ์จะลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์พลอยได้เช่นน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มสารประกอบที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วยขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้ เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในของโครงสร้างวัตถุดิบนั้น

ข. อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อนจะมีผลต่อสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหยต่างๆ การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า

ถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่า เพราะถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันด้วยอัตราการให้ความร้อนที่สูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบต่ำ ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น

ค. ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยานั้นมีผลกระทบต่อการศึกษา ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างการผลิต ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นก๊าซในโตรเจน แต่จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

ง. ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนในเซชัน โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ต่างกันอาจมีวิธีการและภาวะในการกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด เหมาะกับการนำไปใช้ในระบบต่างๆต่อไป

1.4 กระบวนการกระตุ้น

กระบวนการกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สืบเนื่องมาจากการมีวิธีการกระตุ้นที่หลากหลายวิธีและประสิทธิภาพของการกระตุ้นนั้น ขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น รวมถึงวิธีการอื่นก่อนการกระตุ้นอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วการกระตุ้นมี 2 วิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ

1.4.1 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิวของคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) (Aygün *et al.*, 2003) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Stavropoulos and Zabaniotou, 2005) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) (Ahmedna *et al.*, 2004) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400 ถึง 600 องศาเซลเซียส) แต่ยังมีข้อเสียคือ จะมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มในการล้างสารเคมีดังกล่าวออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็จำเป็นต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารเคมีได้ โดยในการผลิตถ่านกัมมันต์ในทางการค้าจะใช้วิธีนี้ในการกระตุ้น

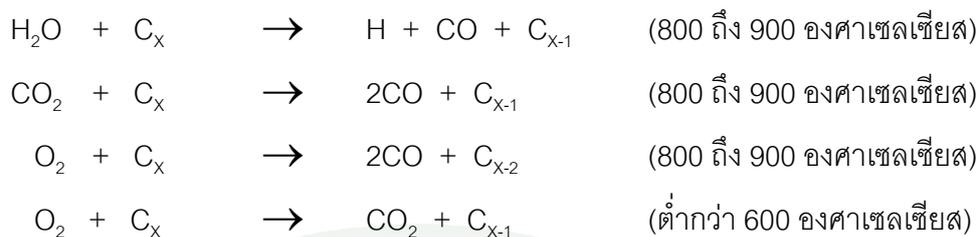
ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมีจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนพร้อมกัน คือ ขั้นตอนวัตถุดิบที่เป็นถ่านชาร์แล้วถูกผสมด้วยสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้น และขั้นตอนการถูกออกซิไดซ์เพื่อลดความชื้นและก่อให้เกิดรูพรุนที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะรวมขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นเป็นขั้นตอนเดียวกัน โดยเริ่มต้นจากวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการคาร์บอนในเซชันมาก่อน โดยกระบวนการนี้มีข้อดีคือ สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และทำให้การเกิดรูพรุนที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าสารเคมีจะมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม การเติมสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นประเภท ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกสามารถที่จะนำกลับคืนมาอย่างง่ายเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมได้

1.4.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยอาศัยปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน (gasification) ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ใช้โดยทั่วไปคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือรวมก๊าซดังกล่าวก็ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดี ต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ดังตัวอย่าง



ที่ผิวของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง โดยจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน ฏิกิริยาการกระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้ความร้อนสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ ร่วมกับความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการคาร์บอนในเซชัน และตามด้วยการกระตุ้นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิสูงภายใต้ก๊าซออกซิไดซ์ที่เหมาะสม เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน อากาศ หรือก๊าซผสม ในการกระตุ้นทางกายภาพปกติจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เพราะความสะดวก ง่ายในการใช้ และสามารถควบคุมขณะที่เกิดการกระตุ้นได้ง่าย ถ้าอัตราการกระตุ้นเกิดอย่างช้าๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้นคือ

- (1) โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
- (2) สารอินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
- (3) ชนิดของก๊าซออกซิไดซ์
- (4) อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- (5) ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ในกระบวนการกระตุ้นคาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกผิวของคาร์บอน เกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่าน ทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวน

มากเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูปพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยน้ำมันพาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนส่วนที่ไม่เป็นระเบียบหรือส่วนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูและการปิดรู และการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วยตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ

ก. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดี ดังนี้

- (1) โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน
- (2) เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้
- (3) มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่าที่ภาวะความดัน 10 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

รูปแบบของปฏิกิริยาในการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ คือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมุติเป็นปฏิกิริยาก๊าซซีฟิเคชันของถ่านชาร์ อาจเขียนอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) แบบ Langmuir-Hinshellwood ดังสมการนี้

$$r = \frac{k_1 P_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} + k_3 P_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

ซึ่ง	$P_{\text{H}_2\text{O}}$	คือ ความดันย่อยของไอน้ำ
	P_{H_2}	คือ ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน
	k_1, k_2, k_3	คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามในปฏิกิริยาของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จะมีการยับยั้งปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยเกิดจากการที่ไฮโดรเจนไปเกาะติดบนตำแหน่งว่างว่องไวที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงได้

ข. การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีกลไกในการเกิด คือ

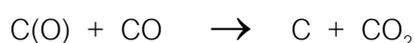


ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน เช่นเดียวกับไอน้ำ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา แสดงดังนี้

$$r = \frac{k_1 P_{\text{CO}_2}}{1 + k_2 P_{\text{CO}} + k_3 P_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

ซึ่ง	P_{CO_2}	คือ	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
	P_{CO}	คือ	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
	k_1, k_2, k_3	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ในปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีการศึกษากันอย่างมากภายในปฏิกิริยานี้มีการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาอันเกิดจาก คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาดังสมการ



การเกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นผลดี คือ มีการกระตุ้นที่ให้ความร้อนขนาดเล็กที่ดี แต่ในขณะเดียวกันอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง ซึ่งพบว่า การกระตุ้นโดย

ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นด้วยไอน้ำ แต่โดยทั่วไปมักใช้ก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำ

1.4.3 การไพโรลิซิสด้วยไอน้ำและการกระตุ้น (steam pyrolysis and activation)

การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบใช้ขั้นตอนเดียว มีชื่อเรียกว่าการไพโรลิซิสด้วยไอน้ำ (steam pyrolysis) โดยมีการใช้วัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางที่ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง หรือให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จะให้ปริมาณพื้นที่รูพรุนสูง มีการซังน้ำหนักมวลที่เหลือหลังจากการกระตุ้น จะแสดงในรูปของมวลที่ถูกเผา

มวลที่ถูกเผา (burn off) หมายถึง ความแตกต่างระหว่างมวลถ่านชาร์เริ่มต้น กับมวลถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนด้วยมวลถ่านชาร์เริ่มต้น โดยแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\% \text{ activation burn off} = 100 - \left[\frac{\text{มวลถ่านชาร์หลังการกระตุ้น (g)}}{\text{มวลถ่านชาร์เริ่มต้น (g)}} \times 100 \right] \quad (3)$$

$$\text{burn off} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่ W_0 คือ มวลถ่านชาร์เริ่มต้น
 W_1 คือ มวลถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น

1.5 การกระตุ้นถ่านชาร์ของยางรถยนต์

ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยปกติขั้นตอนการปฏิบัติจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ไพโรลิซิสที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนหรือฮีเลียม เพื่อจะตัดสายโซ่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนอะตอม และหลังจากนั้นกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำที่ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการพัฒนารูพรุนภายในเนื้อถ่านอย่างกว้างขวาง วิธีดังกล่าวทั้งหมดเหมือนเช่นเดียวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ขึ้นกับความรุนแรง การกระตุ้น

ที่มากขึ้นเพียงใด นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิดของก๊าซที่ใช้ในการกระตุ้นด้วย สำหรับการกระตุ้นที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอีก มักทำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลผลิตกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1,260 ตารางเมตรต่อกรัม ถึงแม้ว่าจะได้น้ำหนักตัวถ่านกัมมันต์เพียงร้อยละ 9 จากมวลเริ่มต้น และพบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างมากของพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิที่มากกว่า 770 องศาเซลเซียส

ยกตัวอย่างการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์โดยกระบวนการไพโรลิซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 45 นาที และตามด้วยขั้นตอนการกระตุ้น ที่ 850 ถึง 900 องศาเซลเซียส ด้วยก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอน้ำร้อยละ 50 ที่เวลา 0.5 ถึง 3 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,031 ตารางเมตรต่อกรัม โดยพบว่ามีแนวโน้มขนาดของรูพรุนเล็กลงเมื่อมีการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยลดลงจาก 335 ถึง 81 อังสตรอม และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส กระตุ้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่า 0.39 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม คิดเป็นร้อยละ 28 ของปริมาตรรวมของรูพรุนที่ 1.40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

องค์ประกอบของโลหะบางตัวในเถ้าของยางรถยนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดรูพรุนในกระบวนการกระตุ้นอันเนื่องมาจากการมีโลหะออกไซด์ในถ่านชาร์ เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของเถ้าในถ่านชาร์ที่มาจากเศษยางรถยนต์ การล้างถ่านชาร์ด้วยสารละลายกรดเพื่อพยายามที่จะกำจัดโลหะ เช่น สารประกอบแคลเซียมก่อนนำไปกระตุ้น พบว่าถ่านชาร์ที่ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลาร์ จะมีความว่องไวต่อการกระตุ้นด้วยไอน้ำลดลงร้อยละ 22 เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชาร์ที่ไม่มีการล้างด้วยกรด สืบเนื่องจากแคลเซียมไอออนช่วยเร่งปฏิกิริยาก๊าซซิปิเคชัน ซึ่งให้ผลการลดระดับของปฏิกิริยาออกเตอร่าซิปิฟที่ไอน้ำถูกใช้ไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ การล้างถ่านชาร์ด้วยกรดมีผลทำให้รูพรุนบางส่วนถูกอุดตันหลุดออกไปทำให้เกิดปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางเพิ่มมากขึ้น

ถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ 1,119 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางที่ 1.62 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เตรียมโดยถ่านชาร์มีการล้างและแช่ด้วยกรด

ไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำ ผสมก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วน 77:23 โดยปริมาตร

ขนาดอนุภาคของยางรถยนต์พบว่า มีผลต่อการเกิดความพรุนตัวของถ่านกัมมันต์หลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากผงยางรถยนต์ขนาดน้อยกว่า 0.42 มิลลิเมตร ให้ค่าสูงกว่าร้อยละ 5 และ 40 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า (น้อยกว่า 2.0 มิลลิเมตร) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเชื่อว่าอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถให้ไอน้ำแพร่ซึมผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้ง่ายกว่า จึงทำให้การกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นไปอย่างทั่วถึงภายในโครงสร้างถ่านชาร์ สำหรับกระบวนการที่ยางรถยนต์ถูกไพโรไลซ์ที่ 700 องศาเซลเซียส และตามด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำและก๊าซไนโตรเจนที่อัตราส่วน 80:20 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 640 นาที ให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กที่ 1,070 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดของขนาดอนุภาคเช่นกันที่มีผลของการทำให้เกิดการพัฒนาพรุนของถ่านกัมมันต์สำหรับการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาความสามารถในการออกซิไดซ์ก๊าซ 3 ชนิด คือ ไอน้ำ (135 มิลลิตรต่อ นาที ในบรรยากาศไนโตรเจน) คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนร้อยละ 2 ในบรรยากาศไนโตรเจนภายใต้การกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เริ่มจากนำยางรถยนต์มาคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการกระตุ้นด้วยก๊าซ 3 ชนิดดังกล่าว ปรากฏว่ากรณีใช้ออกซิเจนร้อยละ 2 ในบรรยากาศไนโตรเจนไม่มีผลในการพัฒนาพรุนแต่ถ้าใช้ไอน้ำกระตุ้นที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้พื้นที่ 302 ตารางเมตรต่อกรัม กรณีใช้คาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นที่ 900 องศาเซลเซียส เช่นกัน จะให้พื้นที่ผิว 813 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมวลที่หายไปจากการเผาคือร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันของก๊าซออกซิไดซ์ ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการกระตุ้นถ่านชาร์ของยางรถยนต์ด้วยไอน้ำ พื้นที่ผิวที่ได้จากการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะให้ผลเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของมวลหายไปจากการเผา ซึ่งเนื่องมาจากในช่วงแรกจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนในระดับที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามพื้นที่สูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่า 500 ตารางเมตรต่อกรัมเล็กน้อย ซึ่งน้อยกว่าการใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น (ที่มวลหายไปจากการเผาร้อยละ 65) ประมาณร้อยละ 28 อีกรายงานหนึ่งรายงานมวลที่หายไปจากการเผาร้อยละ

25.5 และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น โดยให้พื้นที่ 270 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ใช้ไอน้ำที่มวลงหายไปจากการเผาไหม้เดียวกัน (ร้อยละ 25.9) ให้ค่าพื้นที่ผิว 302 ตารางเมตรต่อกรัม

แต่สิ่งที่น่าสนใจคือมีรายงานว่าเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง รวมไปถึงปริมาณของรูพรุนขนาดเล็กและการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ก็ลดลงด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาแตกต่างกัน ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้น 5 ชั่วโมง ให้ค่าพื้นที่ผิว 431 ตารางเมตรต่อกรัม มากกว่าตัวอย่างที่ได้จากการกระตุ้น 7 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่า 284 ตารางเมตรต่อกรัม ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการสลายของมวลอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ผนังของรูพรุนที่ติดต่อกันของรูพรุนขนาดเล็กพังทลายลงกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ จึงส่งผลทำให้พื้นที่ผิวลดลง

ได้มีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านจากยางรถยนต์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้ความร้อนที่ 700 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของไนโตรเจนก่อนแล้วผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที แทนที่ไนโตรเจนและให้ความร้อนสูงขึ้นอีกในช่วงอุณหภูมิ 950 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ถึง 640 นาที ผลการทดลองปรากฏว่าการเพิ่มอุณหภูมิช่วงดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของถ่านกัมมันต์น้อยมาก ซึ่งสามารถอธิบายด้วยข้อจำกัดในการแพร่ผ่านโมเลกุลของก๊าซเข้าสู่ภายในโครงสร้างของถ่านที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น และยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ภาวะการกระตุ้นที่รุนแรง (มวลงหายไปจากการเผาร้อยละ 40) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่มากกว่า

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีเป็นทางเลือกวิธีหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วยการใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนรวมเป็นขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่าโดยไม่มีออกซิเจน ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะพบว่ามีสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นมากมายแต่การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นยางรถยนต์เป็นถ่านกัมมันต์ยังเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน โดยผสมยางรถยนต์กับกรดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 0.5 ถึง 1.5 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นได้อีกเพื่อลดเวลาในการกระตุ้นลง พบว่าเวลาการกระตุ้นที่ 1.5 ชั่วโมง ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 820 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กสูงถึง 0.274

ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และยังพบอีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก (0.4 มิลลิเมตร) ของยางรถยนต์ เหมาะสมที่จะให้สัมผัสกับเกร็ดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี และอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับยางรถยนต์ มีผลต่อการพัฒนาอนุภาคของถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลแสดงการเพิ่มพื้นที่ผิว เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อยางรถยนต์ และจะเข้าใกล้ค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วน เป็น 4 ถ้าหากใช้สูงกว่าอัตราส่วนนี้จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ได้สรุปได้ว่าถ้ากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่เวลาเริ่มต้น ถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิว 474 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเพิ่มเวลาการกระตุ้นเป็น 2 ชั่วโมง เกิดการเพิ่มรูพรุนขนาดกลางแต่ในทางกลับกันรูพรุนขนาดเล็กกลับลดลงเนื่องจากการสลายของกำแพงของรูพรุนขนาดเล็กเมื่อได้รับความร้อนที่ยาวนาน และเนื่องจากเป็นสมบัติการชอบน้ำของยางที่ป้องกันการแทรกตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้เข้าไปภายในโครงสร้างของยางรถยนต์ พื้นที่ผิวอาจได้เพิ่มมากขึ้นถ้าได้มีการปรับปรุงการสัมผัสระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับยางให้ดีขึ้น (ธราพงษ์, 2553)

2. ผักและผลไม้สด (fresh produce)

ภายหลังการเก็บผักและผลไม้สดแล้วนั้น ผักและผลไม้เหล่านั้นยังคงมีชีวิตอยู่ จึงมีการหายใจ การคายน้ำและกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) อื่นๆ ซึ่งหากสิ่งเหล่านี้เกิดในอัตราที่สูง จะทำให้ผักและผลไม้สดนั้นเน่าเสียเร็ว การเก็บรักษาเพื่อยืดอายุผักและผลไม้สด จึงต้องพยายามลดอัตราการหายใจและอัตราเมแทบอลิซึมต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปทำโดยการเก็บที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับการควบคุมสภาพบรรยากาศ นอกจากนี้สภาพของเซลล์ในผักและผลไม้สดยังมีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดด้วย เซลล์ที่กำลังเจริญเติบโต เช่น ข้าวโพดอ่อน หน่อไม้ ถั่วงอก จะมีการหายใจเร็วกว่าเซลล์ปกติ เซลล์ที่บอบช้ำจะหายใจเร็วขึ้นและถูกจุลินทรีย์ทำลายได้ง่ายขึ้น

อายุการเก็บรักษาและคุณภาพของผักและผลไม้สด นอกจากจะขึ้นกับสายพันธุ์และลักษณะการเก็บรักษาภายหลังการเก็บเกี่ยวแล้ว ยังขึ้นกับการบรรจุและการขนส่งอย่างมาก ฉะนั้นภาชนะบรรจุจึงมีบทบาทสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สด

2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด (respiration)

กระบวนการหายใจของพืชนั้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอาหารที่สะสมในเซลล์พืช ได้แก่ สตาร์ช แป้ง น้ำตาล และกรดอินทรีย์ เป็นต้น เพื่อสร้างพลังงานดังสมการ



พลังงานที่ได้จากการหายใจของพืชในสภาพที่มีออกซิเจนเพียงพอ (aerobic respiration) ส่วนหนึ่งนำไปใช้ในเซลล์พืช และอีกส่วนหนึ่งจะปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งถ้าหากไม่มีการกำจัดออกไป จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะเป็นผลเสียต่อคุณภาพการเก็บรักษาของผักและผลไม้สด การหายใจทำให้พืชสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 3 ถึง 5 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการหายใจของพืช มีดังต่อไปนี้

2.1.1 ความเข้มข้นของออกซิเจน

อัตราการหายใจของพืชจะแปรผันตามความเข้มข้นของออกซิเจน แบบสมการเอกซ์โพเนนเชียล (exponential equation) อัตราการหายใจของพืชจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง และถ้าหากความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงต่ำเกิน พืชจะหายใจแบบอับออกซิเจน (anaerobic respiration) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า การหมัก (fermentation) ซึ่งจะให้แอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ ทำให้กลิ่นรสผิดปกติ และได้พลังงานน้อยลง พืชจึงต้องหายใจเพิ่มขึ้น การใช้อาหารในเซลล์ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อายุการเก็บของพืชยิ่งสั้นลง

2.1.2 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงๆหรือตั้งแต่ร้อยละ 1 ขึ้นไป จะช่วยชะลอการหายใจของพืชได้ อย่างไรก็ตาม คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงเกินไป อาจทำให้เกิดเมแทบอลิซึมและการหายใจที่ผิดปกติได้ เป็นสาเหตุให้พืชเสื่อมและเน่าเสียเร็วยิ่งขึ้น

2.1.3 เอทิลีน

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่พืชสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุก และการเน่าเสีย เอทิลีนสามารถเร่งการหายใจและการสุกของพืชได้ แม้มีความเข้มข้นต่ำมาก ระดับ 0.1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) การสังเคราะห์เอทิลีนของพืชจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของ ออกซิเจนลดลง

2.1.4 อุณหภูมิ

กระบวนการหายใจและเมแทบอลิซึมต่างๆ ในพืชจะถูกควบคุมด้วยเอนไซม์หลายชนิด และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ อัตราการหายใจและเมแทบอลิซึมต่างๆในพืชจะลดลงที่อุณหภูมิก่อนการเก็บรักษาต่ำลง การเก็บรักษาสามารถยืดอายุได้นานมากขึ้น แต่ถ้าหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อผักและผลไม้ได้ โดยจะเกิดอาการบาดเจ็บจากอากาศเย็น (chilling injury) โดยจะมีลักษณะเป็นรอยช้ำ เนื้อชุ่มน้ำ ผิดปกติ สีผิดปกติ การสุกไม่สม่ำเสมอ และการเน่าเสียจะเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ในแต่ละชนิดด้วย

2.1.5 รอยช้ำ

รอยช้ำที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ เช่น แรงบีบ แรงกด แรงกระแทก เป็นต้น จะทำให้อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนในพืชสูงขึ้น ทำให้อายุการเก็บจึงลดลง ดังนั้น ขั้นตอนต่างๆตั้งแต่การเก็บเกี่ยว การขนส่งและการจัดจำหน่ายถึงผู้บริโภค จะต้องมีการบรรจุผักและผลไม้สดให้ดี สามารถป้องกันแรงกระทำต่างๆเหล่านี้ได้

2.2 การคายน้ำของผักและผลไม้สด (transpiration)

ในระหว่างการเก็บรักษานั้น ผักและผลไม้สดจะมีการคายน้ำตลอดเวลา ซึ่งทำให้น้ำหนักของผักและผลไม้ลดลง เกิดความเหี่ยวเฉา ความกรอบลดลง คุณภาพของรส กลิ่น เนื้อสัมผัส ลดลง น้ำหนักที่สูญเสียจากการคายน้ำของผักและผลไม้สดนั้น เมื่อมีค่าประมาณร้อยละ 3

ถึง 10 ของน้ำหนัก จะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดลดลงจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยมีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการคายน้ำของผักและผลไม้สด มีดังนี้

2.2.1 สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สด

สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สดนั้น จะส่งผลต่ออัตราการคายน้ำโดยตรง กล่าวคือ ถ้าสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผักและผลไม้สดเพิ่มขึ้น มวลผลทำให้อัตราการคายน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.2.2 สารเคลือบผิว

ผักและผลไม้สดหลายชนิดนั้นจะมีไขเป็นสารเคลือบผิวตามธรรมชาติ สารเคลือบตามธรรมชาติเหล่านี้ จะช่วยลดการคายน้ำของผักและผลไม้สดได้ จึงทำให้ผักและผลไม้เหล่านี้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น มะนาว แอปเปิล ส้ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามไขที่เป็นสารเคลือบตามธรรมชาติเหล่านี้ มักถูกทำลายไปบางส่วนระหว่างการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษา พืชบางชนิดมีสารเคลือบอยู่น้อยมาก ทำให้อัตราการคายน้ำของพืชยังอยู่ในระดับสูง จึงมีการใช้สารเคลือบหรือการห่อด้วยพลาสติก หรือฟิล์มธรรมชาติเพื่อการคายน้ำของผักและผลไม้ ทำให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น

2.2.3 รอยชำ

รอยชำที่เกิดจากการกระทำต่างๆ เช่น แรงบีบ แรงกระแทก แรงกด การตัด และการหั่น เป็นต้น แรงกระทำเหล่านี้อาจทำให้เกิดรอยชำของผักและผลไม้สดขึ้น รอยชำเหล่านี้จะไปช่วยเร่งอัตราการคายน้ำของพืช ทำให้การเก็บรักษามีอายุที่สั้นลง

2.2.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิความร้อน ส่งผลโดยตรงกับอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด ซึ่งความร้อนจากสภาวะแวดล้อม และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของพืช ความร้อนเหล่านี้จะไป

เร่งอัตราการคายน้ำของพืช ดังนั้นเราจึงควรเก็บรักษาผักและผลไม้สดไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการเร่งอัตราการคายน้ำ

2.2.5 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศนั้น จะส่งผลต่ออัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สด โดยอัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สดนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช ซึ่งโดยปกติควรเก็บรักษาผักและผลไม้สดไว้ในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงๆ และที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องระวังการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ง่าย ผักและผลไม้เหล่านั้นจะเน่าเสียเร็วขึ้น (งามทิพย์, 2550)

3. บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟหรือบรรจุภัณฑ์สมาร์ท (smart packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ (unwanted component) ภายในบรรจุภัณฑ์ เช่น ก๊าซเอทิลีนจากการหายใจของผักและผลไม้ หรือออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ อาจมีการเติมสารบางอย่างที่ต้องการเพื่อจุดประสงค์หนึ่งๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ หรือแม้แต่การเติมสารเคมีที่ป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ยังสามารถทำให้บรรจุภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงการซึมผ่านของก๊าซที่เพิ่มมากขึ้นกว่าบรรจุภัณฑ์ทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง บรรจุภัณฑ์แอคทีฟนั้นมีการนำไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงภาวะแวดล้อมภายในบรรจุภัณฑ์ การใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟมีจุดประสงค์หลักเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายใน บรรจุภัณฑ์แอคทีฟมีหลายรูปแบบ เช่น แบบถุง (pouche) แบบแผ่น (patche) แบบคูปอง (coupon) แบบฉลาก (label) และแบบที่ผสมเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ (integral to package)

ในตลอดระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัย สิทธิบัตร การนำเสนอผลงาน ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเป็นจำนวนมาก แต่มีผลงานเพียงน้อยชิ้นที่ได้ผลิตออกมาในเชิงการค้าออกสู่ตลาดอย่างแท้จริง บรรจุภัณฑ์แอคทีฟในเชิงการค้า ได้แก่ สารดูดออกซิเจน สารดูดเอทิลีน สารดูดความชื้น สารดูดกลิ่น สารดูดและสารปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 2 สมบัติของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟของอาหาร

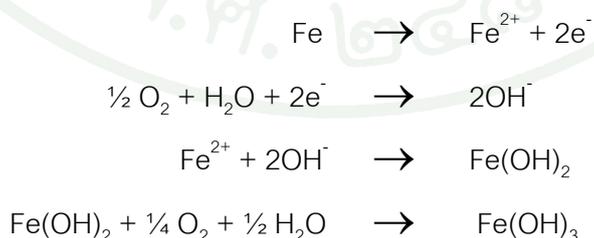
ที่มา: M.L. Rooney (1995)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่นิยมในช่วงแรก เริ่มจากการมีสารดูดความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยสารดูดความชื้นจะถูกบรรจุอยู่ในช่องขนาดเล็กที่ยอมให้น้ำซึมผ่านเข้าออกได้ สารที่อยู่ภายในช่องจะดูดซับน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์และน้ำที่ซึมผ่านจากด้านนอกเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ โดยในปัจจุบันมีการใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟอื่นๆ เช่น การใช้สารดูดซับออกซิเจน โดยจะบรรจุในช่องขนาดเล็กเช่นเดียวกับสารดูดความชื้น แต่ต่างตรงที่บรรจุภัณฑ์นี้ยอมให้อากาศผ่านเข้าออกได้ ภายในช่องอาจบรรจุผงเหล็กที่อยู่ในรูปรีดิวส์ หรือกรดแอสคอร์บิก ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ภายในลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ทั้งนี้การใช้สารดูดออกซิเจนมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ร่วมกับวัสดุบรรจุภัณฑ์อื่นๆ ที่มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดี และอีกประการหนึ่งคือบรรจุภัณฑ์จะต้องปิดสนิทด้วย ในปัจจุบันการใส่สารดูดออกซิเจนในรูปแบบอื่นๆ นอกจากรูปแบบซอง เช่นการใส่สารดูดออกซิเจนผสมเข้าไปในตัววัสดุบรรจุภัณฑ์โดยตรง ซึ่งในเชิงการค้ามีการใส่สารดูดออกซิเจนผสมในพลาสติกที่นำไปแปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ขวดเปียร์พลาสติก เนื่องจากเปียร์เป็นเครื่องดื่มที่มีการเสื่อมเสียจากก๊าซออกซิเจนได้ ดังนั้น ในอดีตจึงมีการบรรจุเปียร์ลงในขวดแก้ว ซึ่ง

แก้วเป็นวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านได้ดีมาก แต่มีน้ำหนักมากและแตกหักได้ง่าย จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง สารดูดซับออกซิเจนที่ผสมลงในขวดพลาสติก ทำให้สามารถเก็บรักษาคุณภาพของเบียร์ให้อยู่ในสภาพที่ดีได้เป็นระยะเวลาจนถึง 9 เดือน

3.1 สารดูดซับออกซิเจน (oxygen scavengers)

การเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งทางด้านเคมีและจุลินทรีย์ สาเหตุหนึ่ง คือ การมีปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ในบรรจุภัณฑ์ ฉะนั้นการลดปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ จะทำให้สามารถยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ได้ การใช้สารดูดซับออกซิเจนเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ โดยสารดูดซับออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจน เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับออกซิเจนและผลิตภัณฑ์ ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นว่าการใช้สารดูดซับออกซิเจนนั้น ต้องใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ที่สามารถกันออกซิเจนจากภายนอกบรรจุภัณฑ์ด้วย เพื่อไม่ให้ออกซิเจนจากภายนอกเข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์ได้มากเกินไป เพราะจะเป็นอีกหนึ่งสาเหตุให้สารดูดซับความชื้นเสื่อมประสิทธิภาพเร็วขึ้น ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายในสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็น โดยทั่วไปแล้วการใช้สารดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ทำให้สามารถลดปริมาณออกซิเจนในปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.01 ซึ่งเหลือน้อยกว่าออกซิเจนที่เหลือจากการดูดเอาก๊าซออกให้เป็นสุญญากาศ (vacuum) หรือการอัดก๊าซเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ (gas flush) โดยทั่วไปจะเหลือร้อยละ 0.3 ถึง 3 ส่วนใหญ่สารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นผงเหล็ก ผงเหล็กจะถูกนำมาใช้มากเนื่องจากให้พื้นที่ในการทำปฏิกิริยามาก โดยผลิตภัณฑ์จะทำปฏิกิริยาดังนี้



ปัจจุบันสารดูดซับออกซิเจนที่ผลิตออกมาขายในเชิงการค้ามีหลากหลายรูปแบบ ดังนี้ แบบซอง (sachets) แบบฉลากและแผ่นการ์ด (labels and cards) แบบผสมเข้าไปในตัววัสดุ

บรรจุภัณฑ์ (blended into the package material) แบบฝา (closure) และแบบผนังด้านข้าง (sidewall)

3.1.1 สารดูดซับออกซิเจนแบบซอง

สารดูดซับออกซิเจนแบบซองในเชิงการค้า มักจะมีการบรรจุผงเหล็กไว้ภายในซอง และซองจะต้องสามารถให้ออกซิเจนผ่านเข้าไปภายในซองที่มีสารดูดความชื้นได้ แต่ซองจะต้องป้องกันไม่ให้ผงเหล็กออกมาได้ด้วย ในการใช้สารดูดความชื้นแบบซองนั้น ภายในบรรจุภัณฑ์ต้องมีน้ำหรือความชื้นบางส่วน เพื่อเป็นการกระตุ้นการทำปฏิกิริยาในการดูดซับออกซิเจน นอกจากนี้ประสิทธิภาพของสารดูดซับออกซิเจนยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก ยกตัวอย่างเช่น ความชื้นในธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ ความหนาแน่น ขนาด รูปร่าง น้ำหนัก และพื้นผิว ล้วนแล้วแต่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารดูดความชื้นทั้งสิ้น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์นั้นมียกออกซิเจนที่ถูกจับอยู่ในผลิตภัณฑ์หรือละลายอยู่ภายในผลิตภัณฑ์มากเพียงใด (entrapped or solubilized O₂) ระดับของออกซิเจนเริ่มต้นที่มีอยู่ภายในช่องว่างในบรรจุภัณฑ์ (package headspace) มีเท่าใด ความสามารถการซึมผ่านของออกซิเจนของตัวบรรจุภัณฑ์ มากไปกว่านั้น สภาพวะการเก็บอุณหภูมิ และเวลาก็มีผลต่อประสิทธิภาพของสารดูดซับออกซิเจนในรูปแบบซอง ซึ่งการใช้สารดูดซับออกซิเจนในรูปแบบซองเป็นรูปแบบที่ง่ายและสะดวกที่สุด แต่ยังมีข้อเสีย คือ ถ้าผู้บริโภครู้เท่าไม่ถึงการณ์ ไปฉีกซองแล้วรับประทานเข้าไป อาจเป็นอันตรายได้ ดังนั้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาารูปแบบใหม่ๆของการใช้งาน เช่น การใส่ผงเหล็กเข้าไปในคูปองหรือฉลาก การผสมสารดูดซับออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ เป็นต้น

3.1.2 สารดูดซับออกซิเจนแบบฉลากและแผ่นการ์ด

บริษัท มิทซูบิชิ ก๊าซเคมีคอล จำกัด (Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.) ได้พัฒนาฉลากหรือแผ่นการ์ดที่สามารถดูดซับออกซิเจน โดยมีหลักการทำงานแบบเดียวกับสารดูดซับออกซิเจนแบบซอง ในการผลิต ผงเหล็กที่ใส่เข้าไปนั้นจะถูกกระจายตัวอยู่ในช่องว่างเล็กๆบนแถบพลาสติก ซึ่งติดอยู่บนฉลากที่มีกาวอยู่ในตัว หรือผสมผงเหล็กนี้ลงบนแผ่นการ์ด แต่ประสิทธิภาพของสารดูดซับออกซิเจนแบบฉลากหรือแผ่นการ์ด จะดีกว่าแบบซอง

3.1.3 สารดูดซับออกซิเจนแบบผสมเข้าไปในวัสดุบรรจุภัณฑ์

บริษัท เจแปนโตโยไซคัน (Japan's Toyo Seikan) และบริษัทมิตซูบิชิ ก๊าซเคมีคอล จำกัด (Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.) ได้พัฒนาสารดูดซับออกซิเจนแบบผสมเข้าไปในวัสดุบรรจุภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่จะผสมในพอลิเมอร์หรือพลาสติก ซึ่งสองบริษัทนี้ได้ผลิตถาดที่สามารถดูดซับออกซิเจน โดยถาดชั้นในจะมีผงเหล็กกระจายอยู่ และชั้นนอกจะเป็นวัสดุพอลิเมอร์ โดยหลักการทำงานก็เช่นเดียวกันกับแบบซอง คือผงเหล็กจะเริ่มทำการดูดซับออกซิเจนได้เมื่อมีน้ำและความชื้นเป็นตัวกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา การใช้ตัวดูดซับออกซิเจนชนิดอื่น เช่น กรดแอสคอร์บิก และใช้ตัวกระตุ้นอื่นๆให้สามารถดูดซับออกซิเจน เช่น แสงยูวี แสงอัลตราไวโอเลต กลิ่นของโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายบริษัทที่ผลิตสารดูดซับออกซิเจนที่ผสมกับเรซินของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) สำหรับการผลิตขวด โดยสามารถใช้ขวดชนิดนี้บรรจุเบียร์ หรือน้ำผลไม้ สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ แต่ปัญหาคือสารดูดซับออกซิเจนจะเริ่มทำงานหลังจากการผลิตขวด ดังนั้น หากผลิตขวดเปล่าเก็บไว้เป็นเวลานานก่อนใช้งานอาจทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับออกซิเจนต่ำลง นอกจากนี้ยังมีรูปแบบอื่น เช่น การนำสารดูดซับออกซิเจนใส่เข้าไปในแผ่นรองใต้ฝา เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาโดยการดูดซับออกซิเจนในขณะที่ขวดผิผิวแล้ว หลักการทำงานของสารดูดซับออกซิเจน ก็เหมือนกับแบบซอง

3.2 สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide scavengers)

สารที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวค่อนข้างหายาก ส่วนใหญ่จะเป็นสารดูดซับที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, Ca(OH)_2) และผงเหล็ก เป็นผลทำให้สามารถดูดซับได้ทั้งออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลาเดียวกัน โดยสารชนิดนี้ค่อนข้างมีตลาดที่เฉพาะเจาะจงสำหรับผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วหรืออบด กาแฟคั่วจะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นปริมาณมาก จากปฏิกิริยามิลลาร์ด (millard) ในระหว่างการคั่ว ถ้าไม่ได้กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออก จะทำให้ถุงบวมและระเบิดได้

3.3 สารดูดความชื้นและน้ำ (moisture and water remover)

สารดูดความชื้นจะปกป้องผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความชื้นและน้ำ โดยจะดูดความชื้นที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์และความชื้นเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้ชะลอการเสื่อมเสียของอาหารที่ไวต่อความชื้น สารดูดความชื้นสามารถทำได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล ดิน (clay) และสารที่โมเลกุลมีพื้นที่ผิวมาก (molecular sieves) โดยสารดูดความชื้นประเภทซิลิกาเจล สามารถดูดความชื้นได้ถึงร้อยละ 35 ของน้ำหนักตัว ละสามารถรักษาสภาพแห้งของบรรจุภัณฑ์อาหารแห้ง ให้มีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่าร้อยละ 0.2 และสารที่โมเลกุลมีพื้นที่ผิวมาก เช่น ซีโอไลท์สามารถดูดความชื้นได้ถึงร้อยละ 24 ของน้ำหนักตัว นอกจากนี้ในขณะที่ยังสามารถดูดกลับได้ด้วย

ส่วนสารดูดน้ำที่นิยมใช้จะเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับน้ำได้ดี คือ เกลือพอลิอะคริเลต (polyacrylate) และสตาร์ชโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (grafted copolymer starch) พอลิเมอร์เหล่านี้สามารถดูดซับน้ำได้ 100 ถึง 500 เท่า นอกจากนี้ยังมีการใช้แผ่นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) เป็นแผ่นที่รองอยู่ในถาดโฟม อยู่ใต้ผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์และผักผลไม้ โดยสามารถดูดน้ำที่ไหลออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้ มากไปกว่านั้นแผ่นเส้นใยเซลลูโลสยังสามารถใช้เพิ่มความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ได้ โดยการจุ่มน้ำแล้วนำไปใส่ในบรรจุภัณฑ์ก็ได้

3.3.1 สารดูดความชื้นที่อยู่ในรูปของฝาและบรรจุภัณฑ์

การใส่สารดูดความชื้นลงในฝา ทำให้สามารถดูดความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์หรือช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ได้ มักนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยา ชุดตรวจวินิจฉัยอย่างง่ายในทางการแพทย์ เป็นต้น บางครั้งมีการใช้วัสดุโปร่งแสง ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารดูดความชื้นเมื่อเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ การเติมสารดูดความชื้นเข้าไปในขณะขึ้นรูปพลาสติก ซึ่งสารดูดความชื้นจะไปผสมอยู่ในเนื้อพลาสติกขณะหลอมเหลว โดยที่สารดูดความชื้นและพลาสติกจะไม่เสื่อมสภาพเมื่อผสมเข้าด้วยกันและเมื่อโดนความร้อน เทคโนโลยีนี้จะเป็นต้องทำให้โครงสร้างของพลาสติกโปร่ง ซึ่งจะช่วยให้สารดูดความชื้นทำงานได้ภายในบรรจุภัณฑ์นั้นๆ ทั้งนี้ตัวบรรจุภัณฑ์เองจะต้องป้องกันความชื้นที่จะผ่านเข้ามาจากภายนอก วิธีนี้พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการบรรจุของดูดความชื้นขนาดเล็กไว้ภายในบรรจุภัณฑ์ โดยทำให้เกิดความยุ่งยากในการใส่ของดูดความชื้นเข้าไปในบรรจุภัณฑ์พร้อมทั้งอาหารก่อนการปิดผนึกอีกด้วย

3.4 สารดูดซับเอทิลีน (Ethylene scavenging)

เอทิลีนจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดที่ไม่อิ่มตัว มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรโมเลกุลเป็น C_2H_4 มีสมบัติในการเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของพืช เร่งการสุกของผลไม้และเป็นสารที่ถูกปล่อยออกมาจากผลไม้ขณะที่กำลังสุก เอทิลีนจึงถูกจัดให้เป็นฮอร์โมนพืชที่ทำให้เกิดการสุกของผลไม้ โดยปกติผักและผลไม้จะปลดปล่อยเอทิลีนออกมาเป็นปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับแอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และเอสเทอร์ การปลดปล่อยเอทิลีนแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช การผลิตเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสื่อมเสียทางเคมีและหรือกายภาพ หรือมีแบคทีเรียหรือราขึ้นบนผักและผลไม้ นอกจากนี้เมื่อปริมาณเอทิลีนในสภาวะบรรยากาศรอบๆ เพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของผักและผลไม้จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณเอทิลีนต่ำอัตราการหายใจจะช้าลง การกำจัดเอทิลีนออกจากสภาวะรอบๆ ผักและผลไม้ ทำให้กระบวนการสุกและการเสื่อมเสียของผักและผลไม้ช้าลง และทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาออกไปได้ สารดูดซับเอทิลีนที่มีการใช้ในเชิงการค้า มีทั้งแบบที่บรรจุลงในซองขนาดเล็ก และแบบที่ผสมเข้าไปในบรรจุภัณฑ์หรือโครงสร้างของฟิล์ม โดยมากมักใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารดูดซับเอทิลีน ซึ่งจะออกซิไดซ์และหยุดการทำงานของเอทิลีนที่เป็นสาเหตุให้ผักและผลไม้แก่เร็วขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ และในการใช้งานจริงจะใช้สารดูดซับเอทิลีนเพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นในการดูดซับเอทิลีนที่ผักและผลไม้สร้างขึ้น

3.4.1 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate, $KMnO_4$)

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือต่างทับทิม มีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) สามารถออกซิไดซ์สารต่างๆ ได้อย่างกว้าง และส่วนใหญ่มักจะเป็นจะเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของสารดูดซับเอทิลีนที่ใช้ทางการค้า โดยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ก๊าซเอทิลีนที่เกิดจากผักและผลไม้สด ทำให้เกิดสารแมงกานีสไดออกไซด์ขึ้น ซึ่งมีสีน้ำตาล รวมทั้งเอทิลีนไกลคอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วย ดังนี้



วิธีใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตดูดซับเอทิลีน จะต้องอาศัยตัวพา (carrier) หรือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเอาไว้ โดยสมบัติของตัวพานั้น จะต้องเฉื่อยปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากันเอง วัสดุที่เป็นตัวพาจะต้องมีพื้นที่มาก คือมีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้ดูดซับเอทิลีนได้มากขึ้น ตัวพาที่ใช้ทำสารดูดซับเอทิลีนในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายชนิด ได้แก่ ซอลค์ ซีโอไลท์ เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) เพอร์ไลต์ (perlite) แต่ที่มีขายในเชิงการค้านั้นมักจะเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide, Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ ในการใช้สารดูดซับเอทิลีนนั้น จะเกิดการกำจัดเอทิลีนที่อยู่รอบๆ ผลไม้ ส่งผลให้เอทิลีนในตัวผักและผลไม้แพร่ออกสู่ภายนอก มีผลทำให้เอทิลีนที่อยู่ภายในผลไม้ลดน้อยลง ซึ่งช่วยให้ชะลอการสุกของผลไม้ลงได้

อย่างไรก็ตามสารดูดซับเอทิลีนที่ใช้ในเมืองไทยส่วนใหญ่จะนำเข้าจากต่างประเทศ และยังมีราคาแพง จึงยังไม่เป็นที่นิยมใช้ ดังนั้นนักวิจัยไทยจึงได้มีการพยายามผลิตสารดูดซับเอทิลีนที่มีสารดูดซับเอทิลีนเป็นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และมีการใช้ตัวพาที่สามารถผลิตและหาซื้อได้ภายในประเทศ นอกจากนี้ยังต้องมีราคาที่ถูก เพื่อนำมาผลิตเป็นสารดูดซับเอทิลีน เช่น ไดอะตอมไมต์ (diatomite) และดินสอพอง (marl) โดยสารดูดซับเอทิลีนที่ผลิตได้จากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศนั้นจะต้องมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสารดูดซับเอทิลีนที่นำเข้าจากต่างประเทศ และยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลไม้ได้ดีด้วยต้นทุนที่ถูกกว่า อย่างไรก็ตามนักวิจัยดังกล่าว ยังไม่สามารถขยายผลไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

3.4.2 สารดูดซับเอทิลีนในรูปแบบอื่นๆ

สารดูดซับเอทิลีนในรูปแบบอื่นๆที่ไม่ได้ทำจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือต่างทับทิม คือ การใช้ถ่านกัมมันต์, ไดอะตอมไมท์, เบนโทไนท์ (bentonite), กีเซลกัวร์ (kieselguhr) และผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกต (crystalline aluminosilicate) มาเป็นสารดูดซับเอทิลีน ถึงแม้ว่าหลายประเทศในทวีปเอเชียได้รายงานว่ามีการใช้สารเหล่านี้ผสมลงในพลาสติกหรือกระดาษ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับเอทิลีนได้ดี แต่การใช้สารดูดซับเอทิลีนจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแบบเป็นซองขนาดเล็กก็ยังเป็นที่นิยมมากที่สุด

3.5 การปล่อยเอทานอล (ethanol emitter)

เอทานอลนั้นใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์มานานับร้อยปี ในประเทศอาหรับใช้เอทานอลในการป้องกันการเกิดเชื้อราบนผลไม้มามากกว่า 1.000 ปี แม้เพียงการใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นต่ำก็ยังมีผลในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ นวัตกรรมการสร้างไอของเอทานอลถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ถุงขนาดเล็กที่มีเอทานอลร้อยละ 55 และน้ำร้อยละ 10 ซึ่งถูกดูดซับอยู่ในผงของซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO₂) ที่ใส่อยู่ในถุงกระดาษผสมเอทิลีนโวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ เพื่อที่จะกลบกลิ่นของเอทานอล จึงมีการเติมวินิลีนหรือสารให้กลิ่นอื่น ๆ ลงไปในถุงด้วย สารปล่อยเอทานอลมีการใช้มากในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ในการยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ขนมอบ ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 20 เท่า อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียในการใช้ คือจะเกิดกลิ่นและรสในอาหารและการดูดซับเอทานอลยังเป็นปัญหาเรื่องข้อกฎหมาย ปัญหานี้จะหมดไปถ้าผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อนก่อนรับประทาน เนื่องจากเอทานอลจะระเหยไปหมด

3.6 การปล่อยสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial release)

บรรจุภัณฑ์ที่ปล่อยสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ เป็นรูปแบบหนึ่งของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ สารต้านเชื้อจุลินทรีย์นี้จะถูกผสมเข้าไปในบรรจุภัณฑ์หรือเคลือบที่ผิวก็ได้ มีจุดประสงค์เดียวกันคือเพื่อการลด ชะลอ หรือยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของอาหาร ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บ หรือเพิ่มคุณภาพความปลอดภัยในอาหารได้ การพัฒนาและวิจัยบรรจุภัณฑ์อาหารต้านเชื้อจุลินทรีย์นี้ ได้รับแรงขับเคลื่อนจากการที่ผู้บริโภคต้องการทานอาหารที่ตัดแต่งพร้อมบริโภค (minimally process) และอาหารที่ไม่มีสารกันบูด (preservative free food) โดยบรรจุภัณฑ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

- (1) บรรจุภัณฑ์ที่มีการเติมสารต้านจุลินทรีย์ โดยสารต้านจุลินทรีย์บางส่วนหรือทั้งหมดจะเคลื่อนที่จากพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับอาหาร อยู่บริเวณรอบอาหารหรือเข้าไปภายในอาหาร (migrating mechanism) และจะไปยับยั้งจุลินทรีย์ที่พื้นผิวของอาหาร
- (2) บรรจุภัณฑ์ซึ่งต่อต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของอาหารโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของสารต้านจุลินทรีย์เข้าสู่อาหาร (non migrating mechanism) เช่น ซีโอไลต์สังเคราะห์

โดยมีการแทนที่โซเดียมไอออนด้วยซิลเวอร์ไอออน ซึ่งสามารถเติมเข้าไปในฟิล์มที่สัมผัสกับอาหารโดยตรง ไม่ว่าจะมิกัดไบโอบรรจุภัณฑ์จะต้องสัมผัสกับผิวอาหาร

มีสารจำนวนมากมีถูกนำมาทดสอบ เพื่อที่จะใช้เป็นสารต้านจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ยังรวมไปถึง เอทานอล แอลกอฮอล์อื่นๆ กรดอินทรีย์ และเกลือของกรดนั้นๆ เช่น โซเดียมเบนโซเอท โพรพิโนเอต และซอบิท เป็นต้น สารยับยั้งเชื้อรา เช่น อิมาซาลิล (imazalil) และเบนโนมิล (benomyl) เป็นต้น สารยับยั้งเอนไซม์ เช่น ไลโซไซม์ เป็นต้น สารสกัดจากธรรมชาติและสมุนไพร ซิลิกอนออกไซด์ และแบคทีริโอซิน (bacteriocins)

มีการศึกษาทดลองวิจัยเป็นจำนวนมากเกี่ยวกับการใช้สารต้านเชื้อจุลินทรีย์ในวัสดุบรรจุภัณฑ์ แต่ยังคงมีการผลิตขายในเชิงการค้าจำนวนเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเสถียรภาพของสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อสารต้านจุลินทรีย์ถูกผสมเข้าไปในพอลิเมอร์ อาจเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือเกิดการเข้ากันไม่ได้ หรือแม้แต่ความสามารถในการทนความร้อนระหว่างกระบวนการอัดรีด (extrusion process) นอกจากนี้กฎหมายยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จำกัดการผลิตในเชิงการค้าอีกด้วย ฟิล์มต้านเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ผลิตในเชิงการค้าส่วนใหญ่จะเริ่มที่ประเทศญี่ปุ่น เช่น ฟิล์มซีโอไลท์สังเคราะห์ โดยการแทนที่โซเดียมไอออนด้วยซิลเวอร์ไอออน โดยการเคลือบซิลเวอร์ซีโอไลท์ (silver zeolite) บนแผ่นฟิล์มที่หนาประมาณ 3-6 ไมครอน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์

- (1) ผลของสารต้านเชื้อจุลินทรีย์
- (2) ปริมาตรหรือพื้นผิวที่มีผลต่อการทำงานของสารต้านเชื้อจุลินทรีย์
- (3) ชนิดของอาหารและอายุการเก็บที่ถูกต้อง
- (4) อัตราการเคลื่อนที่ของสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ออกจากบรรจุภัณฑ์
- (5) ลักษณะของการใช้งาน เช่น การพ่น การจุ่ม การผลิตเป็นฟิล์ม

3.7 บรรจุภัณฑ์ทำความร้อนและทำความเย็นด้วยตัวเอง (self heating and self cooling)

แนวคิดในการทำให้บรรจุภัณฑ์ร้อนได้ด้วยตนเองนั้นไม่ใช่แนวความคิดใหม่ ซึ่งในประเทศอังกฤษได้เริ่มคิดค้นการใช้กระป๋องที่ร้อนได้ด้วยตนเอง ตั้งแต่ ค.ศ. 1939 ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ทำความร้อนด้วยตนเองขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ส่วนใหญ่จะใช้แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) และน้ำ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาพื้นฐานทางเคมีจะเป็นที่ทราบกันดี แต่ความยุ่งยากในการออกแบบอยู่ตรงที่จะทำอย่างไรให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเหมาะสมที่สุด และออกแบบเรื่องความร้อนของภาชนะบรรจุเพื่อจะให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดปลอดภัยและต้นทุนต่ำที่สุด

บรรจุภัณฑ์ทำความร้อนด้วยตนเองมีขายมาหลายสิบปีแล้ว และเป็นที่นิยมมากในประเทศญี่ปุ่น สำหรับผลิตภัณฑ์สาเก กาแฟ น้ำชา และอาหารปรุงสุกพร้อมรับประทาน วิธีในการอุ่นผลิตภัณฑ์คือคว่ำกระป๋อง แล้วกดที่ก้นกระป๋อง ผงแคลเซียมออกไซด์จะผสมในน้ำ ทำปฏิกิริยากันประมาณ 3 นาที สาเกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวกระป๋องเองนั้นจะเป็นฉนวนความร้อน คือกระดาษ ทำให้ไม่ร้อนเวลาถือ ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ทำให้เกิดความร้อนด้วยตัวเองไม่ได้มีเพียงแค่รูปของกระป๋องเท่านั้น แต่ยังมีรูปแบบที่เป็นถาดพลาสติกที่สามารถเข้ารีทอร์คได้ ส่วนกระป๋องทำความเย็นด้วยตัวเองมีขายในเชิงการค้ามานานแล้วในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งจะใช้ปฏิกิริยาดูดความร้อนโดยผสมอะลูมิเนียมไนเตรท และอะลูมิเนียมคลอไรด์ในน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อน อุณหภูมิในระบบจะลดลงทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเย็นตัวได้ (พรชัย , 2552)

4. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในเชิงการค้า โดยมีความหนาแน่นต่ำประมาณ 0.910 ถึง 0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาออกมามาก จึงทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆและไม่เป็นระเบียบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีลักษณะค่อนข้างใส มีความเหนียวแต่ไม่มาก และมีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้งหรือเทียนไข (เสาวจรณ์, ม.ป.ป.) ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำได้ดี แต่

ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ไม่ดี และต้านทานการซึมผ่านของไขมันได้ไม่ดี (งามทิพย์, 2550)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในเชิงการค้าถูกผลิตด้วยกระบวนการที่มีความดันสูง (high pressure process) ประมาณ 150 ถึง 350 เมกะปาสคาล (MPa) หรือ 1,500 ถึง 3,500 บรรยากาศ (atm) และอุณหภูมิ 80 ถึง 300 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเริ่มปฏิกิริยาชนิดเรดิคอลลิสระ (free radical) เช่น อะโซ-ได-ไอโซบิวทีโรไนไตร (azo-di-isobutyronitrile), เบนซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) หรือถ้าใช้ออกซิเจน (ประมาณร้อยละ 0.03 ถึง 0.1) จะใช้ความดันประมาณ 1,500 บรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การพอลิเมอไรซ์ทำได้โดยการผ่านมอนอเมอร์และตัวเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งปฏิกิริยาจะคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีระบบทำความเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการใช้มอนอเมอร์ที่ความเข้มข้นมาก ๆ และความดันสูงจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขาเมื่อความดันลดลง พอลิเมอร์จะถูกแยกออกจากเอทิลีนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา (ซึ่งจะนำกลับมาใช้ใหม่) และพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดเป็นสายและถูกตัดให้เป็นเม็ดต่อไป

พอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวประมาณ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส จึงไม่ควรใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่เหมาะสำหรับทำถุงใส่ถ้วยเต๋ยว่น้ำร้อน ๆ หรือภาชนะบรรจุอาหารร้อน ๆ เหมาะสำหรับทำถุงเย็น นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เช่น ในตู้เย็นไม่ว่าจะเป็นช่องแช่แข็ง หรือช่องธรรมดา

ตลาดใหญ่ของพอลิเอทิลีนได้แก่ บรรจุภัณฑ์คิงตัว และบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว โดยสองในสามส่วนของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดนำไปแปรรูปเป็นฟิล์ม ใช้ทำถุงเย็น ถุงสินค้าทั่วไป ฟิล์มหดรูป (shrink film) และฟิล์มยืด (stretch film) เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดมีประมาณร้อยละ 13 ได้แก่ ขวด ถ้วย ถาดบรรจุอาหารและยา ของเด็กเล่น และของใช้ภายในบ้าน เป็นต้น ประมาณร้อยละ 10 ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ประมาณร้อยละ 10 ใช้ทำวัสดุเคลือบผิว และอีกร้อยละ 2 ใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่าขวดพลาสติกอ่อนชนิดบีบได้ (เสาวรจน์, ม.ป.ป.)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะยอมให้ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้าและไอน้ำ เนื่องจากแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำนี้ ยอมให้ความชื้นที่

เกิดขึ้นแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อของแผ่นฟิล์มแทนที่จะเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยทั่วไปความหนาของแผ่นฟิล์มจะอยู่ระหว่าง 25 ถึง 65 ไมโครเมตร ขึ้นกับกระบวนการแปรรูป การลดความหนาของแผ่นฟิล์มมักใช้สารพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำแทน ซึ่งทำให้ขยายตัวตามความหนาและความยาวใกล้เคียง คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นแผ่นฟิล์มชนิดยืดตัวได้ (दनัย และ นิธิยา, 2535)

5. กระบวนการอัดรีด (extrusion processes)

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติก โดยทั่วไปจะนิยามกระบวนการแปรรูปชนิดนี้ว่าเป็นการทำให้วัสดุมีรูปร่างตรงตามที่ต้องการโดยการอัดพลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดายที่มีรูปร่างที่เหมาะสม การแปรรูปพลาสติกโดยการอัดรีด จัดเป็นกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (continuous process) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semifinished product) ที่ต้องนำไปเข้ากระบวนการชนิดอื่นต่อ เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานขั้นสุดท้าย (finished product) ก่อนจะนำไปใช้งาน นอกจากอุตสาหกรรมการแปรรูปและการผลิตพอลิเมอร์แล้ว ยังมีการใช้เทคนิคการอัดรีดในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตเซรามิกส์ การผลิตอิฐสำหรับงานก่อสร้าง และการแปรรูปอาหาร เป็นต้น

การอัดรีดเทอร์โมพลาสติก ทำโดยการให้พลาสติกผง (powder) หรือเม็ด (pellet) หลอมเป็นเนื้อเดียว แล้วใช้แรงผลักดันโดยการหมุนของสกรูให้พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดาย ที่มีรูปร่างตามลักษณะชิ้นงานที่ต้องการผลิต พลาสติกหลอมจะแข็งตัวเมื่อออกจากหัวดาย เนื่องจากการหล่อเย็น การอัดรีดที่ยังไม่วัลคาไนซ์ นอกจากนี้พลาสติกในกลุ่มเทอร์โมเซตบางตัวก็สามารถกระทำได้เช่นเดียวกัน แต่พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกันภายในโมเลกุลหลังจากการให้ความร้อนในขณะที่ทำการอัดรีด

กระบวนการอัดรีดสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบต่างๆ เช่น ผลิตเส้นใย (fiber) ท่อขนาดเล็ก (tube) ท่อขนาดกลางและใหญ่ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) ฟิล์มพลาสติก (film) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโปรไฟล์ (profile) รูปแบบต่างๆ ซึ่งความหมายของชิ้นงานจากการอัดรีดที่เป็นโปรไฟล์ในเทคโนโลยียางและพลาสติก หมายถึงผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดแบบกึ่งสำเร็จรูปทั้งหมด ยกเว้นกลุ่มชิ้นงานที่ผลิตจากดาวยูปร่างวงแหวนในกรณีผลิตท่อ ดायกลม

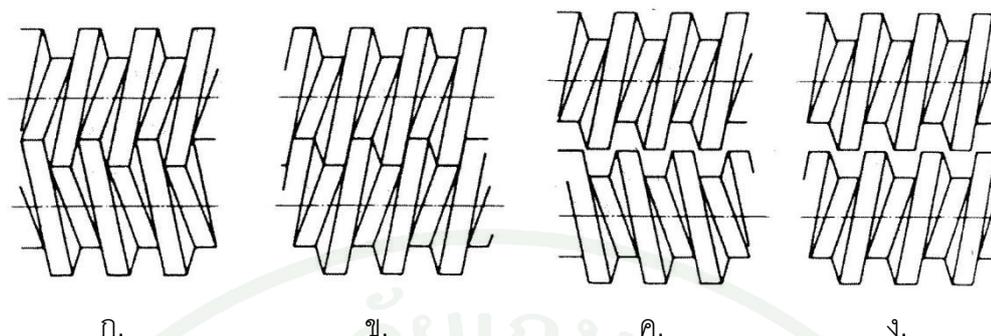
ซึ่งใช้ในการผลิตแท่งพลาสติกกลม ดายที่มีทางออกเป็นแท่งสี่เหลี่ยม และดายสำหรับผลิตแผ่น และฟิล์มพลาสติก

นอกจากเครื่องอัดรีดมีความสำคัญในการแปรรูปพลาสติกแล้ว ยังมีความสำคัญในการใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อเตรียมเม็ดเรซินผสม (compound resin) ซึ่งการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง (additive) และสารตัวเติม (filler) ชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน โดยเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปโดยเทคนิคต่างๆ

5.1 เครื่องอัดรีดสกรูเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดสกรูเกลียวหนอนคู่เป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรู 2 ตัว อยู่ในระบบอกเดียวกัน ซึ่งมีภาพตัดขวางเป็นรูปเลขแปด การแบ่งเครื่องอัดรีดสกรูเกลียวหนอนคู่จะแบ่งตามทิศทางการหมุน และระดับของการอินเทอร์เมท (intermeshing) ซึ่งหมายถึงการหมุนของสกรูในลักษณะที่สันเกลียวของสกรูตัวหนึ่งแทรกตัวอยู่ในร่องเกลียวของสกรูอีกตัวหนึ่ง ทิศทางการหมุนของสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูเกลียวหนอนคู่ สามารถหมุนได้สองแบบ คือหมุนในทิศตรงกันข้ามกันหรือหมุนสวนทางกัน (counter rotating) และการหมุนในทิศทางเดียวกัน (corotating) ส่วนระดับของการอินเทอร์เมทของการหมุนของสกรู แบ่งออกเป็น การอินเทอร์เมทเต็ม (fully intermeshing) การอินเทอร์เมทบางส่วน (partially intermeshing) และการหมุนแบบไม่อินเทอร์เมท ตัวอย่างลักษณะการหมุนแบบต่างๆของสกรู แสดงดังภาพที่ 3

การหมุนของสกรูในสกรูที่หมุนสวนทางกัน จะทำให้วัสดุถูกดันให้เข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุน ส่งผลทำให้เกิดการสะสมของตัววัสดุ (bank) ระหว่างสกรูทั้งสองคล้ายๆกับการบดผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ในขณะที่หมุนจะมีวัสดุจำนวนหนึ่งไหลผ่านช่องว่างระหว่างสกรูทั้งสองได้ แต่จะมีส่วนหนึ่งถูกกักเก็บเอาไว้เนื่องจากการอินเทอร์เมท วัสดุที่ไหลผ่านช่องว่างจะมีความเค้นสูงมาก การปรับระดับของการอินเทอร์เมทหรือระยะระหว่างสกรูสองตัว จะเป็นตัวกำหนดระดับความเค้นของวัสดุ กล่าวคือ ถ้าสกรูใกล้กันมาก วัสดุก็จะมีค่าความเค้นสูงมาก และมีช่องว่าง (blank) ขนาดใหญ่สะสมระหว่างสกรูทั้งสอง การเคลื่อนที่ของช่องว่างไปข้างหน้าเนื่องจากการหมุนของสกรู ทำให้เกิดการส่งพลาสติกเข้าหัวดาย



ภาพที่ 3 ลักษณะของสกรูเกลียวหนอนคู่ชนิดต่างๆ

- ก. ชนิดสกรูหมุนสวนทางกันและมีการอินเทอร์เมท
- ข. ชนิดสกรูหมุนในทิศทางเดียวกันและมีการอินเทอร์เมท
- ค. ชนิดสกรูหมุนสวนทางกันและไม่มีการอินเทอร์เมท
- ง. ชนิดสกรูหมุนในทิศทางเดียวกันและไม่มีการอินเทอร์เมท

ที่มา: เจริญ (2542)

การหมุนของสกรูในทิศเดียวกัน สกรูจะหมุนให้วัสดุเคลื่อนที่จากสกรูตัวแรกแล้วส่งผ่านไปยังสกรูตัวที่สอง โดยไม่เกิดช่องว่างที่ระหว่างสกรูทั้งสองตัว ทำให้วัสดุไหลเป็นลักษณะเส้นทางการไหลเป็นรูปเลขแปด ตลอดความยาวของกระบอก โดยมีข้อดีของการไหลในสกรูชนิดนี้คือ พอลิเมอร์ในกระบอกจะได้รับความเค้นใกล้เคียงกัน และควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมได้ดี มากไปกว่านั้นยังสามารถออกแบบให้สกรูทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่า (self wiping) ซึ่งนอกจากทำให้สกรูสะอาดตัวเองได้แล้ว สิ่งสำคัญที่สุดคือจะทำให้การควบคุมกระจายตัวของเวลาที่วัสดุอยู่ภายในเครื่องอัดรีด (residence time distribution) ได้ดีกว่าสกรูแบบอื่นๆ

5.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film processes)

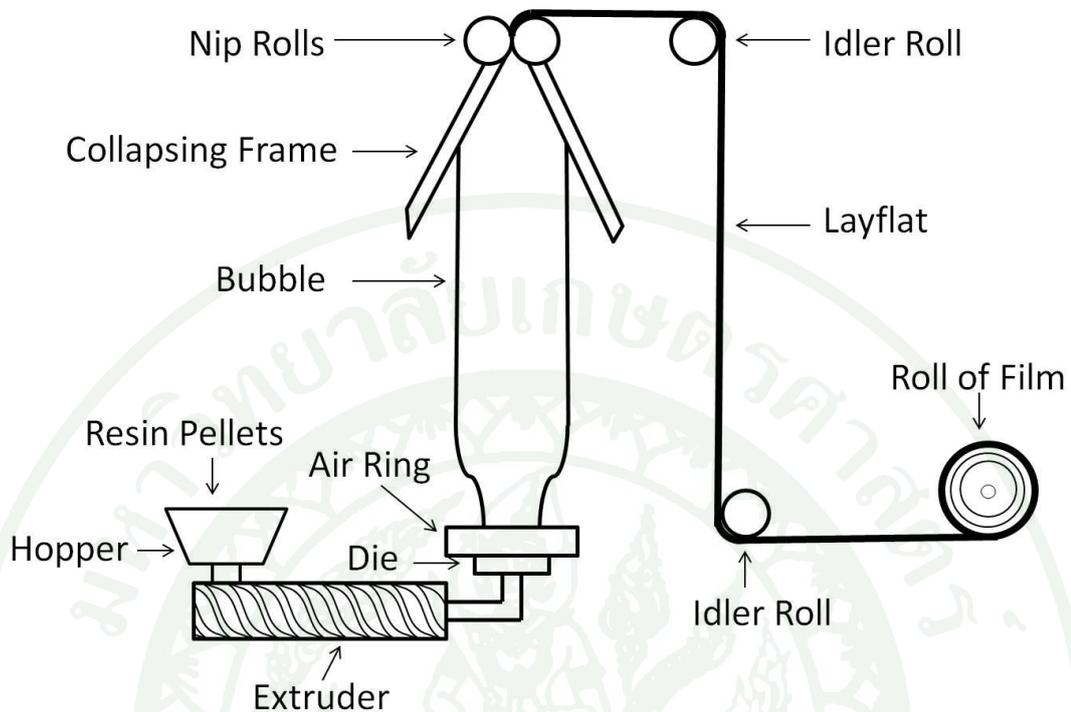
การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดแบบอื่นๆ การผลิตเริ่มต้นจากการอัดรีดท่อของเทอร์โมพลาสติกหลอม โดยอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีด หลังจากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อในขณะเดียวกัน จะทำให้พลาสติกหลอมพองออกในแนวรัศมี

(radial direction) เกิดเป็นลูกโป่ง ที่มีผนังบาง (thin walled bubble) เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยมีหัวเป่ามีลักษณะเป็นวงแหวนอยู่ด้านนอกของหัวตาย (เรียกว่า cooling ring) ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์ม แสดงดังภาพที่ 3 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดเหมาะสม และถูกกำจัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพยุ่งฟิล์ม (sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้น รวบลูกโป่ง โดยป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มกำมะหยี่ที่ตีบเข้า (collapsing board) ป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์ม โดยใช้หน่วยดึง (haul off unit) และตอนสุดท้ายฟิล์มจะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำเป็นถุง หรือนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นต่อไป

หลังจากที่กระบวนการผลิตเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว กล่าวคือปัจจัยสำคัญต่อการเป่า เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งเหมาะสมกับส่วนพยุ่งฟิล์ม ปิดอากาศที่ใช้เป่าฟิล์มขณะทำการผลิต โดยมีการใช้ส่วนในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยการเป่าฟิล์มหลายเทอม แต่เทอมที่สำคัญ เช่น อัตราการพองของลูกโป่ง (blow up ratio) และอัตราการดึง (draw down ratio) เป็นต้น

อัตราการพองของลูกโป่ง หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการพองของลูกโป่งของการเป่าฟิล์ม จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า ตายตัวหนึ่งสามารถทำถุงได้หลายขนาด

อัตราการดึง หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (หรือ โดยหน่วยดึง) กับความเร็วของการอัดรีด โดยความเร็วการอัดรีดสามารถคำนวณได้จาก น้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แล้วแปรให้เป็นปริมาตร แล้วค่อนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตาย (เจริญ, 2542; บรรณเลข, 2537)



ภาพที่ 4 กระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film process)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาก มีสมบัติในการดูดซับสูง สามารถนำมาประยุกต์ในการดูดซับของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ดี เช่น การดูดซับโลหะหนัก เม็ดสีต่างๆ เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีประจุ ทำให้สามารถดักจับโลหะที่มีประจุได้ โดยรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมี 3 ลักษณะ คือ 1. แมคโครพอร์ (macropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ 2. เมโซพอร์ (mesopore) เป็นลักษณะกึ่งเชื่อมระหว่างแมคโครพอร์ และ 3. ไมโครพอร์ (micropore) เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ภายในเมโซพอร์ (Ryoo and Kapila, 1997) โดยวัตถุดิบในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นจะเป็นวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สูง เช่น พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว และยางรถยนต์ เป็นต้น (ธราพงษ์, 2553) โดยในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการทิ้งเศษยางรถยนต์กว่า 280 ล้านชิ้นต่อปี ยางรถยนต์จำนวนมากนี้ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างมาก จึงได้มีวิธีการในการกำจัดเศษยางรถยนต์นี้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อ

เพิ่มมูลค่าเศษยางรถยนต์ กระบวนการไพโรไลซิสนี้เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยปราศจากก๊าซออกซิเจน และภายหลังกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งของแข็งนั้นถูกเรียกว่าถ่านชาร์ (char) และเมื่อนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการกระตุ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ได้เป็นถ่านกัมมันต์ (Wójtowicz and Serio, 1996) ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีพื้นที่ผิวสูง (มากกว่า 800 ตารางเมตรต่อกรัมของผลิตภัณฑ์ของแข็ง) โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่สูงถึง 900 องศาเซลเซียส จะให้ร้อยละผลผลิต (yield) ของถ่านชาร์ลดลงแต่ให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละผลผลิตจะเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ผิวจะลดลง โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากยางรถยนต์นั้นจะไม่เป็นพิษ เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนทำให้ซัลเฟอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางหายไปในช่วงกระบวนการไพโรไลซิส จึงสามารถนำเอาถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้งานต่างๆได้อย่างไม่มีความเป็นพิษเมื่อนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว (Teng *et al.*, 1995) ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากนั้น ในทางอุตสาหกรรมจึงได้มีการประยุกต์ใช้ในเชิงการค้าหลักๆอยู่ 3 แบบ คือ 1. ใช้ในการดูดซับก๊าซที่ปนเปื้อน 2. ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากการเปลี่ยนรูปมีเทนโดยการให้ไอน้ำ และ 3. ใช้ในการผลิตไนโตรเจนจากอากาศ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการแยกก๊าซและทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย 1. การแยกก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนจากไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่จากเยื่อเลือกผ่านถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดนาโน ซึ่งผลิตได้จากการคาร์บอนไนเซชันของพอลิเมอร์เมทริกซ์ 2. การทำก๊าซให้แห้งโดยใช้ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็กพร้อมทั้งใช้แรงดันในการแยกน้ำออก ซึ่งถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็กผลิตจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวหน้าของไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) คาร์บอน 3. การกำจัดก๊าซโดยการเลือกดูดซับของสารประกอบอินทรีย์โดยการใช้วัสดุเชิงประกอบของถ่านกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยา และ 4. การกักเก็บก๊าซธรรมชาติบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ จากที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์นั้นมีการใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการดูดซับและการกักเก็บก๊าซ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการผลิตถ่านกัมมันต์และมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในเชิงอุตสาหกรรม (Sircar *et al.*, 1996)

2. กระบวนการกระตุ้น (activation process)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์นั้น เป็นกระบวนการที่ทำให้ถ่านกัมมันต์นั้นมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นซึ่ง สามารถแบ่งกระบวนการกระตุ้นได้ 2 กระบวนการหลัก คือ

2.1 กระบวนการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation process)

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีนั้น คือการนำถ่านกัมมันต์มาผ่านการให้ความร้อนโดยใช้สารละลายกรด (Izquierdo *et al.*, 2011, Liu *et al.*, 2010, Molina-Sabio *et al.*, 2003) เบส (Vargas *et al.*, 2011) หรือโลหะคลอไรด์ (Yang and Qiu, 2010) พร้อมทั้งคนตลอดเวลา ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านกัมมันต์ ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น เช่น ได้มีการนำเศษยางรถยนต์มาทำการไพโรลิซิสในภาวะไนโตรเจน โดยใช้การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ให้ปริมาตรการดูดซับสูง และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์กับยางเท่ากับ 4 ให้พื้นที่ผิวมากที่สุด และยังพบว่าการไม่คงอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการกระตุ้นนั้น เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและร้อยละของผลผลิตที่สูงกว่าการคงอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสเอาไว้ (Teng *et al.*, 2000)

2.2 กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation process)

กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ คือ การนำถ่านกัมมันต์มาผ่านการให้ความร้อนในภาวะบรรยากาศต่างๆ เช่น ไนโตรเจน (Demiral *et al.*, 2011) คาร์บอนไดออกไซด์ (Arami-Niya *et al.*, 2011) เป็นต้น อาจมีการให้อิอน้ำ (Aranda *et al.*, In press) ร่วมด้วย เช่น มีการศึกษาการไพโรลิซิสยางที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในภาวะไนโตรเจน เป็นเวลา 45 นาที และได้ใช้กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์โดยใช้ไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการให้ความร้อนในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบว่า มีรูพรุนขนาดกลางหรือเมโซพอร์เป็นส่วนมาก (Zabaniotou *et al.*, 2004) ซึ่งการกระตุ้นถ่านกัมมันต์โดยให้ไอน้ำร่วมกับก๊าซถือเป็นกระบวนการทางกายภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยข้อดีของกระบวนการทางกายภาพ คือ มีความสะอาด และราคาต้นทุนที่ประหยัดกว่ากระบวนการทางเคมี เนื่องจากไม่ต้อง

มีการกำจัดสารเคมีตกค้างที่พื้นผิวอีกครั้งหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังจะมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เป็นกลาง จึงทำให้สามารถนำมาใช้งานได้ทันที อย่างไรก็ตาม กระบวนการทางกายภาพนี้มีข้อเสียคือ จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี เป็นผลทำให้มีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่าตามมา จึงเป็นเหตุผลทำให้การกระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมี (Ahmadpour and Do, 1996)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้กระบวนการกระตุ้นร่วมกันทั้งทางเคมีและทางกายภาพได้ด้วย โดยทำการไพโรลisis เศษยางรถยนต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งกระบวนการทางกายภาพนั้นทำโดยให้ออน้ำในภาวะก๊าซไนโตรเจนร่วมกับการให้ความร้อน และกระบวนการทางเคมีจะให้ความร้อนในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na₂S) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์และระยะเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนที่มีขนาดเล็กหรือไมโครพอร์จำนวนมาก (Yuan *et al.*, 2004) ด้วยเหตุนี้การกระตุ้นร่วมกันของทั้งสองกระบวนการจึงเป็นผลทำให้มีพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงมากขึ้น

3. การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

ก๊าซเอทิลีนถือเป็นฮอร์โมนพืชที่สำคัญ ซึ่งพืชได้ผลิตขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุก และการเน่าเสีย ของพืชต่างๆ ก๊าซเอทิลีนยังสามารถเร่งการหายใจและการสุกของพืชได้ แม้มีความเข้มข้นต่ำมากเพียง 0.1 ส่วนในล้านส่วน และการผลิตก๊าซเอทิลีนของพืชจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนลดลง (งามทิพย์, 2550) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) จากการนำตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนผสมในฟิล์มบรรจุผลไม้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) เพื่อยืดอายุแอปเปิล ซึ่งก๊าซเอทิลีนเป็นต้นเหตุทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างบรรจุภัณฑ์แอคทีฟฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนและฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ผสมตัวดูดซับก๊าซเอทิลีน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 70 พบว่าแอปเปิลที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมตัวดูดซับก๊าซเอทิลีน ทำให้อายุการเก็บรักษามากกว่าฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ผสมตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนถึง 10 วัน (Ponce *et al.*, 2009) นอกจากนี้ยังมีการนำถ่านกัมมันต์มาเป็นตัวดูดซับก๊าซจากการศึกษาคุณภาพของมะเขือเทศ โดยทำการบรรจุมะเขือเทศในกล่องสแตนเลสที่ใส่

ถ่านกัมมันต์ไว้ภายในกล่อง เก็บไว้ในห้องอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 พบว่าอัตราการหายใจและการผลิตก๊าซเอทิลีนของมะเขือเทศในกล่องที่มีถ่านกัมมันต์น้อยกว่ากล่องที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ ทั้งยังมีปริมาณกรดซิตริก (citric acid) และวิตามินซี (ascorbic acid) ที่มากกว่ากล่องที่ไม่ได้ใส่ถ่านกัมมันต์ รวมไปถึงมะเขือเทศในกล่องที่ไม่ได้ใส่ถ่านกัมมันต์นั้นมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าด้วย ทั้งหมดนี้ทำให้มะเขือเทศในกล่องที่มีถ่านกัมมันต์มีคุณภาพที่ดีกว่า (Martínez-Romero *et al.*, 2009) ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาพืชผักผลไม้ในยาวนานขึ้น

4. สารดูดซับก๊าซเอทิลีนในบรรจุภัณฑ์พลาสติก

สารดูดซับก๊าซเอทิลีนที่นิยมใช้มากคือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate, KMnO_4) โดยมีการศึกษาการดูดซับก๊าซเอทิลีนในฟิล์มพอลิเอทิลีนทางการค้า 5 ชนิด และฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในชื่อ “โปรเฟรช” (Profresh) โดยทำการฉีดก๊าซเอทิลีนในปริมาณ 4 ในล้านส่วน (ppm) จากนั้นทำการวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) ที่เวลา 1, 4, 8 และ 24 ชั่วโมง หลังการฉีดพบว่าฟิล์มทุกชนิดมีอัตราการลดลงของก๊าซเอทิลีนในช่วงแรกและลดน้อยลง เมื่อหลังจากการฉีด 8 ชั่วโมง ก๊าซเอทิลีนแทบไม่มีการลดลงเลย แต่ในกรณีของฟิล์มโปรเฟรช 1 ชั่วโมงหลังจากฉีดก๊าซเอทิลีนนั้น ปริมาณก๊าซเอทิลีนลดลงมากที่สุด และภายหลัง 8 ชั่วโมง แทบจะไม่เหลือก๊าซเอทิลีนอยู่เลย ฉะนั้นแล้ว จะเห็นได้ว่าการนำตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนมาผสมกับบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเอทิลีน ซึ่งแสดงถึงการดูดซับก๊าซเอทิลีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chairat and Kader, 1999) ทั้งนี้ ยังมีการศึกษาการเก็บรักษาอ่อนหน่าหลังการเก็บเกี่ยว โดยวางอ่อนหน่าไว้บนถาดพอลิเอทิลีนแล้วใช้ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) ทำการห่อ โดยในถาดจะมีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวดูดซับก๊าซ จากนั้นนำไปเก็บไว้ในห้องอุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 และ 100 โดยใน 1 ถาดมีอ่อนหน่า 4 ลูก ทำการสุ่มมาตรวจสอบ พบว่าเมื่อเวลาการเก็บนานขึ้น ค่าความเป็นกรดต่างลดลงเรื่อยๆและมีอัตราที่ลดลง การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น และการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตใส่ไว้ภายในได้บรรจุภัณฑ์ ทำให้คุณภาพของอ่อนหน่าหลังการเก็บเกี่ยวอยู่ได้นานขึ้น (Chaves *et al.*, 2007) และยังมีการยืดอายุกล้วยโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบรรจุไว้ภายในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำให้

สามารถลดการสึกของกล้วยได้นานขึ้น (Jiang *et al.*, 1999) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ ถ่านกัมมันต์บรรจุไว้ภายในบรรจุภัณฑ์โดยทำการศึกษาผลของการใช้สารดูดซับเอทิลีนภายใต้ บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) หนา 10 ไมครอน เปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้สารดูดซับเอทิลีนเป็น ชุดควบคุม เพื่อเปรียบเทียบอายุการเก็บของมะละกอดิบ โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส พบว่าความแน่นของเนื้อมะละกอที่มีการใส่สารดูดซับเอทิลีนภายใต้บรรจุภัณฑ์นั้น มีแนวโน้มที่ ลดลงน้อยกว่าชุดควบคุม และยังพบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลน้อยกว่าชุดควบคุม และ คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับที่มากกว่าชุดควบคุม แสดงว่าการใช้สารดูดซับเอทิลีนภายใต้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็น การยืดอายุการเก็บรักษาของมะละกอดิบได้ (Techavuthiporn *et al.*, 2002)

ในปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวดูดซับก๊าซ อาจเนื่องมาจาก ถ่านกัมมันต์มีสีดำ ทำให้ผู้บริโภคไม่มั่นใจในความสะดวก และอาจดูเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทั้งที่ จริงแล้ว ถ่านกัมมันต์ถือเป็นวัสดุที่ดูดซับก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังมีราคาที่ถูกและสะดวก เนื่องจากได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติ เป็นตัวดูดซับจากเศษยางรถยนต์โดยนำมาผ่านกระบวนการไพโรลิซิส และการกระตุ้นเพื่อเพิ่ม พื้นที่ผิวทั้งกระบวนการทางเคมีและกายภาพ และนำถ่านกัมมันต์นี้มาผสมกับฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว ปกติแล้ว บรรจุภัณฑ์ทั่วไปจะใช้สารดูดซับเอทิลีนบรรจุไว้ภายใต้บรรจุภัณฑ์ ซึ่งอาจมีโอกาสนในการปนเปื้อน กับผลิตภัณฑ์ได้ แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ผสมถ่านกัมมันต์ โดยโอกาสใน การหลุดออกของถ่านกัมมันต์นั้นมีน้อยมากหรือไม่มีโอกาสหลุดออกมาเลยก็ว่าได้ เนื่องจากใน กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกนั้นจะผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยความร้อนนั้นจะทำให้เกิด ไฮโดรเจนอิสระ (hydrogen radical) ทำให้ส่วนที่มีประจุเกิดพันธะโพลาร์ขึ้น (polar bond) ซึ่งจะมี ความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนจากเศษยางรถยนต์ผสมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่น ต่ำสำหรับบรรจุภัณฑ์ดูดซับก๊าซเอทิลีน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

- 1.1 เศษยางรถยนต์ (scrap tire) (Patomchai Hitech Co., Ltd., Nakornpathom, Thailand)
- 1.2 ก๊าซอาร์กอน (Argon gas, Ar) (grade 99.995%, Labgaz Co., Ltd., Pathumthani, Thailand)
- 1.3 ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas, N₂) (grade 99.995%, Labgaz Co., Ltd., Pathumthani, Thailand)
- 1.4 ก๊าซเอทิลีน (ethylene gas, C₂H₄) (3 ppm, BOC Scientific, Chachoengsao, Thailand)
- 1.5 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) (grade LD1905FA, MFI 5.0 g/10min at 190°C, 2.16 kg, SCG Plastic Co.,Ltd., Bangkok, Thailand)
- 1.6 มะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย (papaya cv. Pluk Mai Lie (*Carica papaya L.*), Thai Market, Pathumthani, Thailand))

2. สารเคมี

- 2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol, C₂H₆OH) (Mallinckrodt, analytical reagent, assay 99.9%, Mallinckrodt Baker, Missouri, USA)
- 2.2 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) (Merck, analytical reagent, assay 37%, Merck KGaA, Darmstadt, Germany)
- 2.3 กรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H₂SO₄) (Merck, analytical reagent, assay 95%, Merck KGaA, Darmstadt, Germany)
- 2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) (Mallinckrodt, analytical reagent, assay 98.5%, Mallinckrodt Baker, Missouri, USA)

2.5 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) (UNIVAR[®], analytical reagent, assay 85%, Ajax Finechem Pty Ltd., New South Wales, Australia)

2.6 ซิงค์คลอไรด์ (zinc chloride, ZnCl₂) (UNILAB[®], laboratory reagent, assay 95%, Ajax Finechem Pty Ltd., New South Wales, Australia)

2.7 แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride, MgCl₂) (UNIVAR[®], analytical reagent, assay 99%, Ajax Finechem Pty Ltd., New South Wales, Australia)

2.8 เมทิลีนบลู (methylene blue, C₁₆H₁₈N₃SCl) (UNILAB[®], laboratory reagent, Ajax Finechem Pty Ltd., New South Wales, Australia)

2.9 ไอโอดีน (iodine, I₂) (Sigma-Aldrich, assay 99.99%, Singapore)

3. อุปกรณ์

3.1 ปีกเกอร์ (beaker)

3.2 ขวดรูปชมพู่สุญญากาศ (vacuum flask)

3.3 กรวยกรองเซรามิกส์พร้อมยางรอง (buchner funnel)

3.4 กระดาษกรอง (filter paper) เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร

3.5 กระดาษวัดความเป็นกรด-ด่าง (universal indicator paper)

3.6 แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)

3.7 อะลูมินาบอลล (alumina balls) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

3.8 โกร่งบดเซรามิกส์ (ceramic mortars)

3.9 ตัวควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (flow controller)

3.10 เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

3.11 ถ้วยเซรามิกส์ (ceramic crucible)

3.12 ขวดพลาสติก (plastic bottle) ปริมาตร 635 มิลลิลิตร

3.13 กล่องกระดาษลูกฟูก (corrugated box) ลอน BC ขนาด 9×13×6 นิ้ว

4. เครื่องมือ

4.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (electronic balance) (BL320H, Shimadzu Corporation, Japan)

- 4.2 ฮอตเพลท สเตอริเซอร์ (hot plate stirrer) (Model D97T-HP204, LSM laboratory & Medical supplies, Tokyo, Japan)
- 4.3 ปั๊มลมสุญญากาศ (vacuum pump) (G588DX, Marathon Electric, Mexico)
- 4.4 ตู้อบ (heating oven) (Model FD-23, WTB Binder, New York, USA)
- 4.5 เครื่องบดบอลมิลล์ (planetary ball mill) (Model PWNV-15A, CAMSCO, Taipei, Taiwan)
- 4.6 เตาเผาชนิดท่อขนอน (horizontal tubular furnace) (Leton Furnaces, Leton Thermal Design, England)
- 4.7 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analyzer)
- 4.8 เครื่องวิเคราะห์แยกธาตุ (elemental analyzer) (Model VTF-900/CHNS-932, LECO[®], Michigan, USA)
- 4.9 เครื่องหาพื้นที่ผิวโดยรวม (Brunauer Emmett-Teller, BET) (Model ASAP 2020, Micromeritics, Georgia, USA)
- 4.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (Model JSM 5410, JEOL, Boston, USA)
- 4.11 เครื่องอัดรีดสกรูเกลียวขนอนคู่ (twin screw extruder) (Model T-20, Collin, Ebersberg, Germany)
- 4.12 เครื่องอัดรีดเป่าฟิล์ม (blown film extruder) (Model 2525, Betol, Netherland)
- 4.13 เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน (universal testing machine) (Model 5965, Instron, USA)
- 4.14 เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle instrument, CA) (Model OCA 15EC, DataPhysics, Germany)
- 4.15 เครื่องวัดการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen permeation analyzer) (Model Illinois 8500, Illinois Instrument, USA)
- 4.16 เครื่องวัดการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate analyzer, WVTR) (Permatran-W[®] Model 398, Mocon, USA)
- 4.17 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry analyzer, DSC) (DSC 822[°], Mettler Toledo, Switzerland)

4.18 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA) (TGA/SDTA 851^e, Mettler Toledo, Switzerland)

4.19 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) (Model 6890N, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)

4.20 เครื่องวัดสี (colorimeter) (Model CR-310, Minoita, Konica Minolta Sensing Americas, Inc, New Jersey, USA)

4.21 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) (Model micro 350, Testometric, England)

4.22 มาตรวัดดัชนีหักเหด้วยมือ (hand refractometer) (Model N-1 α , Atago, Japan)

วิธีการ

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

1.1 ไพโรลิซิสเศษยางรถยนต์

นำเศษยางรถยนต์มาผ่านการบดให้เป็นผง ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง และทำการสลายตัวแบบไพโรลิซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบแนวตั้ง โดยทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal condition) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรลิซิส โดยเริ่มจากการเปิดก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่ออนาที เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในระบบออก ตั้งอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการไพโรลิซิส 60 นาที นำมาวิเคราะห์ทดสอบต่อด้วยเครื่องตรวจจสอบแบบปริมาตร (proximate analyzer) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analyzer, TGA)

1.2 บดถ่านชาร์

ก่อนทำการกระแทกเคมีต้องนำถ่านชาร์ (ของแข็ง) ที่ได้จากระบวนไพโรลิซิสไปบดแบบเปียกโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) เป็นตัวกลางด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ (ball mill)

พร้อมอะลูมินาบอลเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระบายเอทิลแอลกอฮอล์ด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3 กระตุ้นด้วยสารเคมี

บดถ่านด้วยโรงแบบเซรามิกส์ก่อนทำการกระตุ้นทางเคมี โดยการใช้สารละลายกรด (กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก), ด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) และ โลหะคลอไรด์ (ซิงค์คลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์) โดยแต่ละสารละลายจะใช้อัตราส่วนโดย น้ำหนักของถ่านต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยให้ความ ร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งวัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมมิเตอร์ พร้อมทั้งใช้แท่งแม่เหล็กหมุน เหยี่ยงตลอดเวลาด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรอง, กรวยกรองเซรามิกส์, ขวดรูปชมพู่สุญญากาศ และปั๊มลมสุญญากาศ ล้างทำ ความสะอาดด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าความเป็นกรดต่าง (pH) คงที่ ซึ่งวัดโดยกระดาษวัดความ เป็นกรดต่าง นำถ่านซาร์ที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.4 การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization)

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นมาทำการคาร์บอนไนเซชัน คือ การเผา (furnace) โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที คงอุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียสไว้เป็นเวลา 30 นาที ทำการลดอุณหภูมิด้วยอัตราการหล่ อเย็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยภาพเตาเผาแสดงดังภาพที่ 5

1.5 การวิเคราะห์ทดสอบเพื่อหาภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์

1.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis)

1.5.2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (CHN analysis)

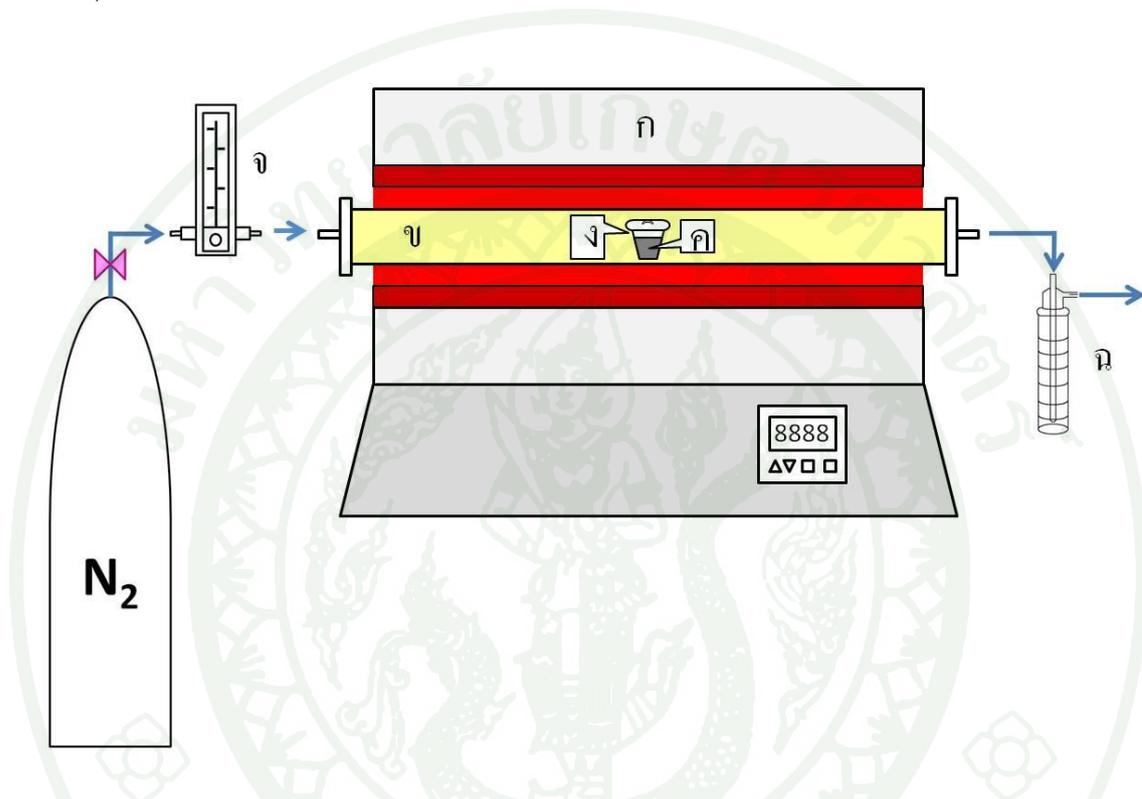
1.5.3 การหาพื้นที่ผิวโดยรวม (Brunauer Emmett Teller surface area, BET)

(ภาคผนวก ก)

1.5.4 การดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue adsorption, MB) (ภาคผนวก ก)

1.5.5 การดูดซับไอโอดีน (iodine number adsorption, I_2) (ภาคผนวก ก)

1.5.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)



ภาพที่ 5 แผนผังระบบการต่อชุดเตาเผา (furnace reactor)

ก. เตาเผาชนิดขดลวดนำความร้อนรูปทรงท่อนอน (horizontal tubular furnace)

ข. ท่ออะลูมินาทนความร้อน (alumina tube)

ค. ตัวอย่างถ่านชาร์ที่ต้องการเผา (sample)

ง. ถ้วยเซรามิกส์พร้อมฝา (crucible)

จ. ตัวควบคุมการไหลของก๊าซ (flow controller)

ฉ. เครื่องตรวจสอบการไหลของก๊าซ (condensers)

2. เตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

2.1 ทำการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคถ่านกัมมันต์ โดยนำอนุภาคถ่านกัมมันต์มากระตุ้น (activation) ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบข้อ 1.5

2.2 นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกับอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น (activation) และไม่ผ่านการกระตุ้น (non-activation) ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ (phr) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเกลียวหนอนคู่เพื่อให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เป็นเม็ดพลาสติก ที่มีปริมาณอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันคือ เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น 1, 3, 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ และเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น 1, 3, 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ ตามลำดับ

2.3 นำเม็ดพลาสติกที่มีปริมาณอนุภาคถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น และไม่ผ่านการกระตุ้น ในปริมาณที่ต่างกันและเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ (LDPE/activated carbon) และฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยกระบวนการอัดรีดเป่าได้เป็นฟิล์มตัวอย่าง LDPE (ตัวอย่างอ้างอิงที่ไม่มีการเติมอนุภาคถ่านกัมมันต์), A1, A3, A5, A7, A10, N1, N3, N5, N7 และ N10 ดังตารางที่ 1 โดยฟิล์มทุกตัวอย่างมีความหนา 25±3 ไมครอน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของฟิล์ม (พีเอชอาร์)

องค์ประกอบ	LDPE	A1	A3	A5	A7	A10	N1	N3	N5	N7	N10
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ถ่านกัมมันต์ (ผ่านการกระตุ้น)	-	1	3	5	7	10	-	-	-	-	-
ถ่านชาร์ (ไม่ผ่านการกระตุ้น)	-	-	-	-	-	-	1	3	5	7	10

หมายเหตุ phr (part per hundred resin) คือส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน

ฟิล์มที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดรีดแบบเป่าจะใช้สัญลักษณ์แทนดังนี้

ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	แทนด้วยสัญลักษณ์ LDPE
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ 1 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ A1
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ 3 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ A3
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ 5 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ A5
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ 7 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ A7
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์ 10 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ A10
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านชาร์ 1 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ N1
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านชาร์ 3 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ N3
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านชาร์ 5 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ N5
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านชาร์ 7 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ N7
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านชาร์ 10 พีเอชอาร์	แทนด้วยสัญลักษณ์ N10

2.4 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของฟิล์ม เพื่อหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/ถ่านกัมมันต์

2.4.1 สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) และร้อยละการยืดตัวออก (% elongation) ของฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซอล (universal testing machine) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882-03 (ภาคผนวก ข)

2.4.2 การวัดค่ามุมสัมผัส

ทำการทดสอบหาค่ามุมสัมผัสของฟิล์มด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle instrument, CA) (ภาคผนวก ข)

2.4.3 สมบัติการสกัดกั้นก๊าซ

ทำการทดสอบการต้านทานอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มด้วยเครื่องวัดการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen transmission rate analyzer, OTR) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3985-05 (ภาคผนวก ข)

2.4.4 สมบัติการสกัดกั้นความชื้น

ทำการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มด้วยเครื่องวัดการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate analyzer, WVTR) โดยใช้มาตรฐาน ASTM E96-00 (ภาคผนวก ข)

2.4.5 สมบัติทางความร้อน

ทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์แอนาไลเซอร์ (differential scanning calorimetry analyzer, DSC) และเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) (ภาคผนวก ข)

3. การวัดประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม

3.1 เตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์โดยการตัดให้ฟิล์มมีน้ำหนัก 1 ± 0.05 กรัม บรรจุไว้ในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตปริมาตร 635 มิลลิลิตร

3.2 บรรจุก๊าซเอทิลีนความเข้มข้น 3.0 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ลงไปในขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้ได้อากาศออกแล้วปิดฝา แล้วทำการทดสอบวัดความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป 0, 1, 3, 5, 7, 10 และ 14 วัน ตามลำดับ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC)

3.3 ศึกษาสมบัติจุลศาสตร์การดูดซับก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

3.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range tests (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19

4. ประยุกต์ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมถ่านกัมมันต์เพื่อชะลอการสุกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย (*Carica papaya L.*)

4.1 คัดเลือกผลไม้ให้ได้ขนาดและอายุตามต้องการจากตลาดไทย คือเลือกมะละกอจากจังหวัดเดียวกันทั้งหมด โดยเลือกมะละกอที่มีจำนวนแต้ม 1 (บริเวณส่วนท้ายของผลมะละกอมีสีเขียว 1 จุด) แต้มแต่ไม่เกิน 2 แต้ม (บริเวณส่วนท้ายของผลมะละกอมีสีเขียว 2 จุด) ในการทดลอง

4.2 บรรจุมะละกอจำนวน 2 ผลลงในกล่องกระดาษลูกฟูกชนิดลอน BC ขนาดกว้าง 9 นิ้ว ยาว 13 นิ้ว และสูง 6 นิ้ว โดยจะทำการทดสอบฟิล์มแต่ละสูตรไว้ด้านในของกล่องบริเวณก้นกล่อง 1 แผ่น และบริเวณฝากล่อง 1 แผ่น ฟิล์มแต่ละแผ่นขนาด 9×13 นิ้ว ซึ่งในการทดลองนี้จะมีชุดควบคุมเป็นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

4.3 เก็บกล่องที่บรรจุมะละกอไว้ในภาวะห้องเย็นที่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส

4.4 สุ่มผลไม้จากกล่องบรรจุฟิล์มแต่ละสูตรการทดลองมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีหลังการเก็บรักษาในวันที่ 0, 4, 8, 12, 16, 20 และ 24 ซึ่งจะสุ่มมาทดสอบครั้งละ 3 ลูก ในแต่ละสูตร โดยจะทำการศึกษา

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงสีผิวเปลือก (ภาคผนวก ค)

4.4.2 การเปลี่ยนแปลงสีเนื้อ (ภาคผนวก ค)

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นเนื้อ (ภาคผนวก ค)

4.4.4 การเปลี่ยนแปลงความหวาน (ภาคผนวก ค)

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range tests (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19



ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์จาก
เศษยางรถยนต์ สามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 ข้อหลักๆดังต่อไปนี้

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี
2. การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์
3. วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์
4. ประสิทธิภาพการยืดอายุมะละกอพันธุ์ปลัดไม้ลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความ
หนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี เพื่อเพิ่ม
ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งกระบวนการกระตุ้นทางเคมีสามารถแบ่งออกได้
ดังนี้

1.1 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยสารละลายกรด

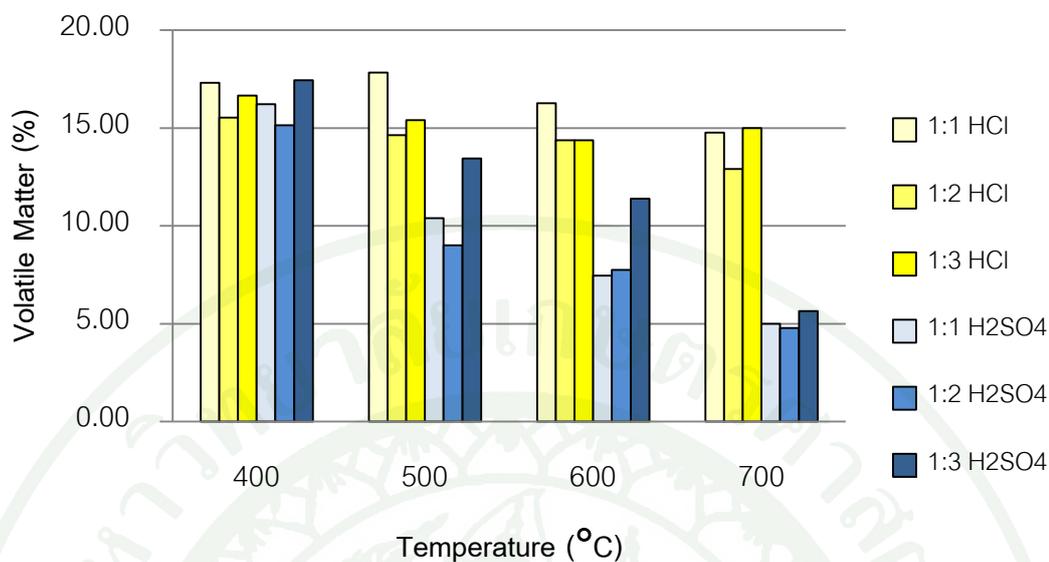
การกระตุ้นด้วยสารละลายกรดในงานวิจัยนี้ จะใช้สารละลายกรด 2 ชนิด คือ กรด
ไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก โดยมีการทดสอบในอัตราส่วนถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนักเท่ากับ
1:1, 1:2 และ 1:3 ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร การวิเคราะห์ธาตุ
คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis) ของถ่านกัมมันต์จาก
เศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้น
ด้วยสารละลายกรด ประกอบด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. สารระเหย (volatile matter)

จากการกระบวนกรกระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของสารระเหยของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นดังภาพที่ 6 โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกนั้นให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยปริมาณสารระเหยที่ต่ำจะแสดงถึงสมบัติที่ดีกว่าของถ่านกัมมันต์ (Derbyshire *et al.*, 1995) โดยสารละลายแต่ละชนิดให้ค่าร้อยละของสารระเหยต่ำสุดในภาวะเดียวกัน คือ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 โดยให้ค่าเท่ากับ 12.91 และ 4.78 ของสารละลายไฮโดรคลอริกและสารละลายซัลฟูริกตามลำดับ โดยมีต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับ 17.64 อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลาย โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารละลายกรดไฮโดรคลอริก พบว่าอัตราส่วนที่ให้ร้อยละของสารระเหยจากมากไปน้อยคือ 1:1, 1:3 และ 1:2 สารละลายกรดซัลฟูริกคือ 1:3, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นไปที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:1 มีค่าสูงที่สุด อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 มีค่าใกล้เคียงกัน สารละลายกรดซัลฟูริกในอัตราส่วน 1:3 ให้ค่าสูงที่สุด อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 700 องศาเซลเซียส สารละลายกรดไฮโดรคลอริกใน อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 นั้นให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วน อัตราส่วน 1:2 นั้นให้ค่าที่ต่ำกว่า ในกรณีของสารละลายกรดซัลฟูริกนั้นพบว่าอัตราส่วน 1:3 มีค่าลดลงจนเกือบใกล้เคียงค่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 (ภาคผนวก ง1)

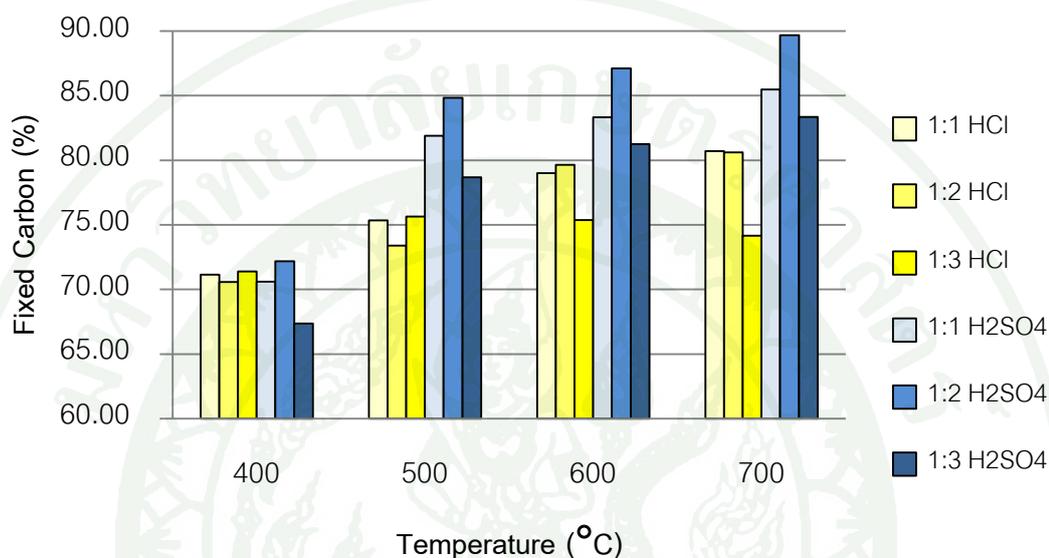


ภาพที่ 6 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ข. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

จากการระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นดังภาพที่ 7 โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกนั้นให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส แต่ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่ใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยสารละลายไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:1 มีค่าเท่ากับ 80.70 และสารละลายซัลฟูริกให้ค่าสูงสุดที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 มีค่าเท่ากับ 89.68 จากค่าที่แสดงนี้สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์เมื่อมีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงจะมีประสิทธิภาพสูง (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532) ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่ให้ค่าเท่ากับ 69.3 ถ่านกัมมันต์ภายหลังกระตุ้นนั้นจะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารละลายกรดไฮโดรคลอริก พบว่าทุกอัตราส่วนของสารละลายให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นไปที่ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

แต่ที่อัตราส่วน 1:3 ให้ค่าที่ต่ำกว่า และให้ค่าแนวโน้มที่ต่ำลงเล็กน้อย ส่วนกรณีการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกนั้น ในทุกๆอุณหภูมิจะให้ค่าแนวโน้มที่เหมือนกันคือ อัตราส่วน 1:2 ให้ค่ามากที่สุด ตามมาด้วยอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ (ภาคผนวก ง1)

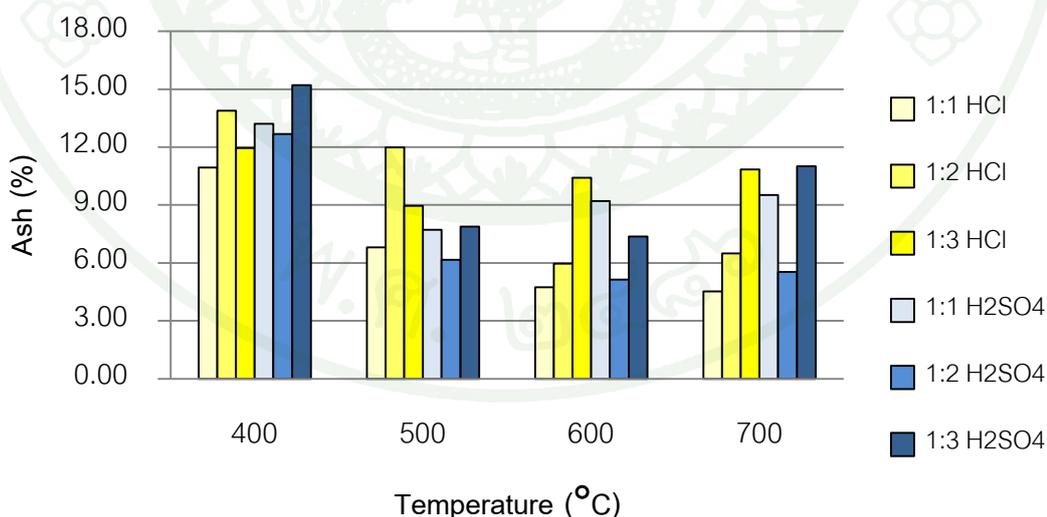


ภาพที่ 7 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ค. เถ้า (ash)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 600 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 700 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายกรดทั้งสองนั้นให้ค่าร้อยละของเถ้าในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1:1 ที่ทุกๆอุณหภูมิในการกระตุ้น พบว่าการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกให้ค่าร้อยละของเถ้าที่สูงกว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ในอัตราส่วน 1:1 ที่ทุกอุณหภูมิ ที่อัตราส่วน 1:2 ทุกอุณหภูมิในการกระตุ้น สารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละของเถ้ามากกว่าสารละลายซัลฟูริก และที่อัตราส่วน 1:3 กรดซัลฟูริกให้ค่าร้อยละของเถ้ามากกว่ากรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 400 และ 700 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันที่อุณหภูมิ 500

และ 600 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละของเถ้าที่มากกว่ากรดซัลฟิวริกดังภาพที่ 8 โดยสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมีอัตราส่วนที่ให้ค่าร้อยละของเถ้าจากมากไปน้อย คือ 1:2, 1:3 และ 1:1 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นเป็น 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วน 1:3, 1:2 และ 1:1 ให้ค่าร้อยละของเถ้าจากมากไปน้อยตามลำดับ และกรณีสารละลายกรดซัลฟิวริกพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้น อัตราส่วน 1:1 มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 1:2 มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส จนกระทั่งค่าเริ่มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 1:3 พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสนั้นมีแนวโน้มเดียวกับอัตราส่วน 1:2 คือลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและลดลงอย่างช้าๆในเวลาต่อมา และในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละของเถ้า แต่ยังไม่ยอกกว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง1)

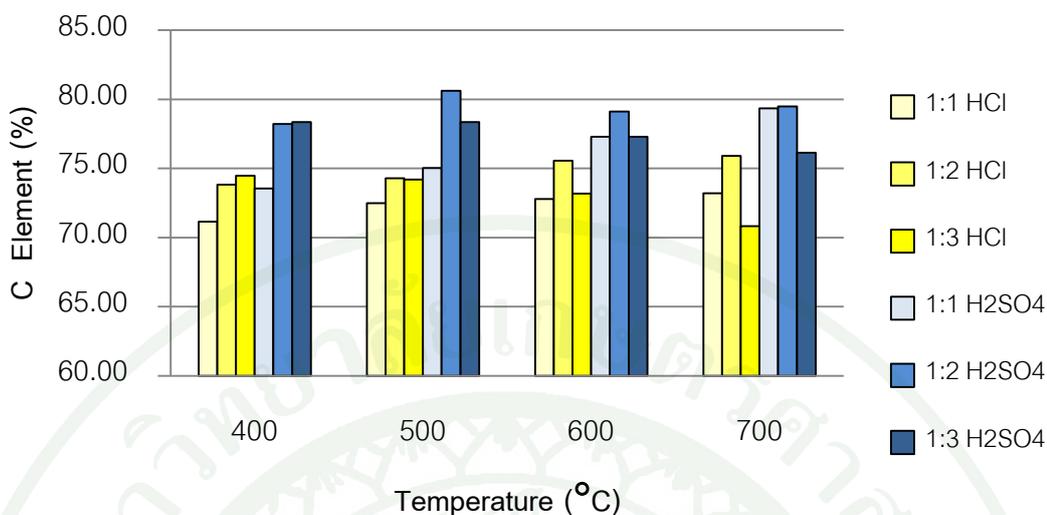


ภาพที่ 8 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

1.1.2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (CHN analysis) ของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ก. ธาตุคาร์บอน (C element)

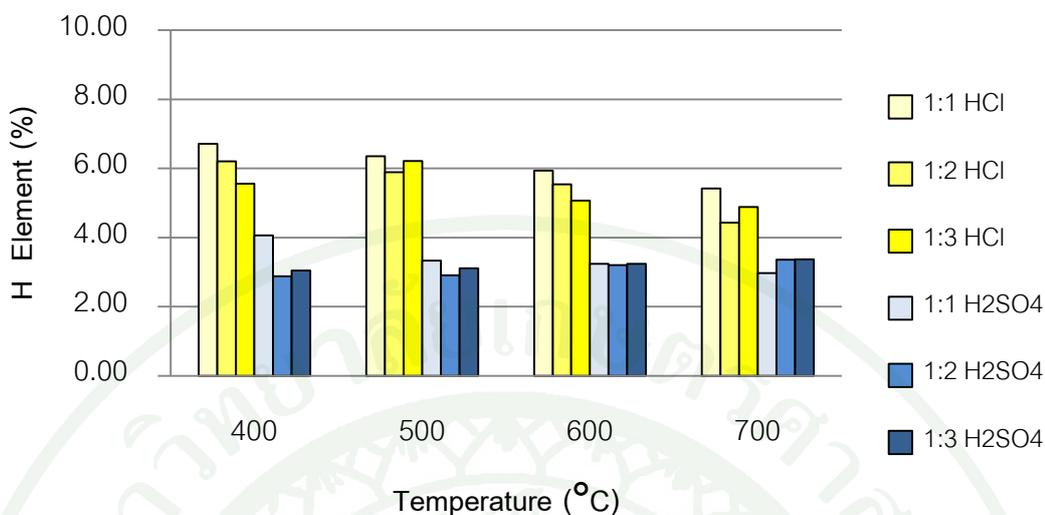
จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายกรดซัลฟูริกให้ค่าร้อยละของธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าในทุกอุณหภูมิและอัตราส่วนดังภาพที่ 9 และสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 นั้นให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่อัตราส่วน 1:3 นั้นให้แนวโน้มที่ลดต่ำลง โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิมีค่าร้อยละของธาตุคาร์บอนสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และลดลงจนมีค่าต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ส่วนกรณีของสารละลายกรดซัลฟูริกนั้น แต่ละอัตราส่วนให้แนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสให้ค่าร้อยละของคาร์บอนสูงที่สุด และอัตราส่วน 1:3 นั้นให้แนวโน้มที่ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้น (ภาคผนวก ง2)



ภาพที่ 9 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ข. ธาตุไฮโดรเจน (H element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นี้มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่สูงกว่าในทุกอุณหภูมิและอัตราส่วนดังภาพที่ 10 และสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ให้แนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ส่วนสารละลายกรดซัลฟูริกให้แนวโน้มที่แตกต่างกันดังนี้ ที่อัตราส่วน 1:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่ลดลง ส่วนอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ให้ค่าที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยแนวโน้มดังกล่าวของสารละลายกรดซัลฟูริกทำให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:1 จะให้ค่าที่ต่ำที่สุด ในขณะที่ อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน (ภาคผนวก 2)

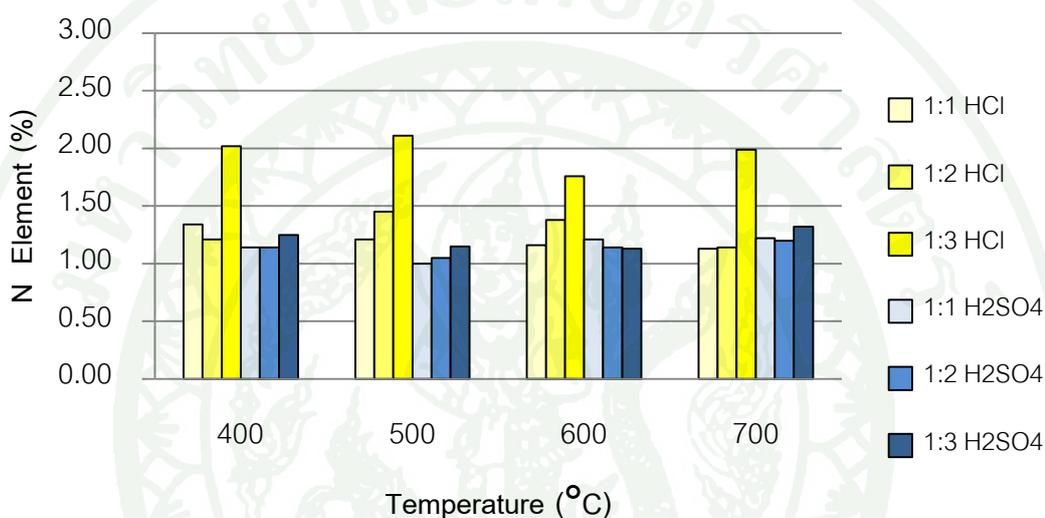


ภาพที่ 10 ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ค. ธาตุไนโตรเจน (N element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนที่สูงกว่าสารละลายกรดซัลฟูริกในทุกอัตราส่วนเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าสูงกว่าสารละลายกรดซัลฟูริก และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าสูงกว่าสารละลายกรดซัลฟูริกที่อัตราส่วน 1:3 ดังภาพที่ 11 และเมื่ออธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วน 1:1 นั้นให้แนวโน้มที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตลอดการทดลอง อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ให้แนวโน้มเดียวกันคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราส่วน 1:3 จะให้ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนสูงที่สุดตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ ส่วนกรณีของสารละลายกรดซัลฟูริกนั้นให้แนวโน้มที่คล้ายกันในทุกอัตราส่วน คือให้แนวโน้มที่ลดลงในช่วง

อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีเพียงอัตราส่วนที่ 1:3 เท่านั้นที่ช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนที่อัตราส่วน 1:3 ให้ค่าสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิ ยกเว้นเพียงอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 1:1 ให้ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนสูงที่สุด (ภาคผนวก 2)

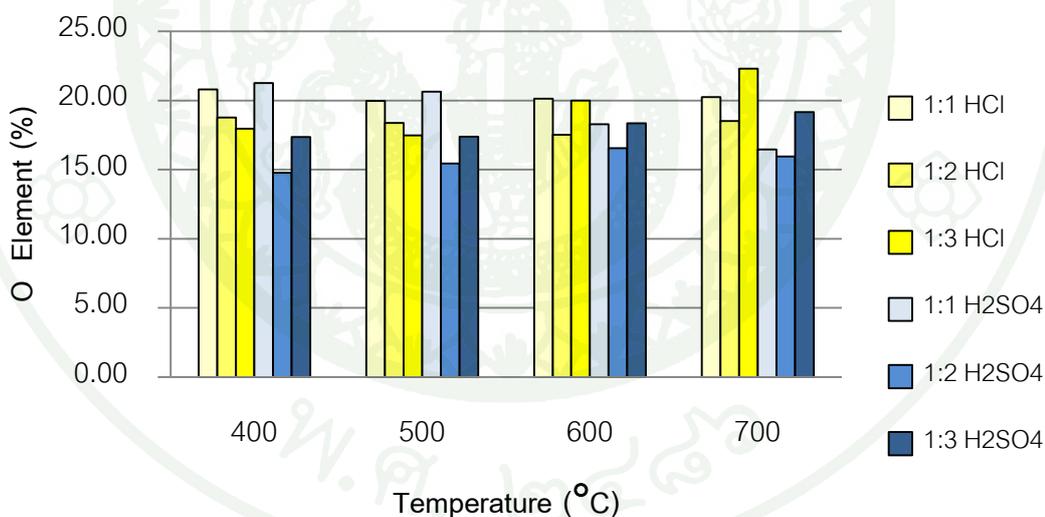


ภาพที่ 11 ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ง. ธาตุออกซิเจน (O element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ซึ่งหาได้โดยความแตกต่างผลรวมของร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยค่าร้อยละของออกซิเจนที่หาได้นั้น มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าร้อยละของธาตุออกซิเจนที่สูงกว่าสารละลายกรดซัลฟูริกทุกช่วงอุณหภูมิที่อัตราส่วน 1:2 โดยที่อัตราส่วน 1:3 ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับสารละลายกรดซัลฟูริก และช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าที่สูงกว่าในทุกช่วงอุณหภูมิ ทางกลับกัน สารละลายกรดซัลฟูริกมีค่าร้อยละของธาตุออกซิเจนที่อัตราส่วน 1:1 ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500

องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 12 และเมื่ออธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายไฮโดรคลอริกที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยในอัตราส่วน 1:1 จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มขึ้นในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:3 จะให้แนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสและจะเพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ส่วนกรณีของสารละลายกรดซัลฟิวริกนั้นจะให้แนวโน้มค่าร้อยละของธาตุออกซิเจนที่ลดลงทุกช่วงอุณหภูมิที่อัตราส่วน 1:1 ในอัตราส่วนที่ 1:2 จะให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสและจะลดลงเล็กน้อยที่ 700 องศาเซลเซียส และในอัตราส่วน 1:3 จะให้แนวโน้มคงที่ในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสและจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก 2)



ภาพที่ 12 ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

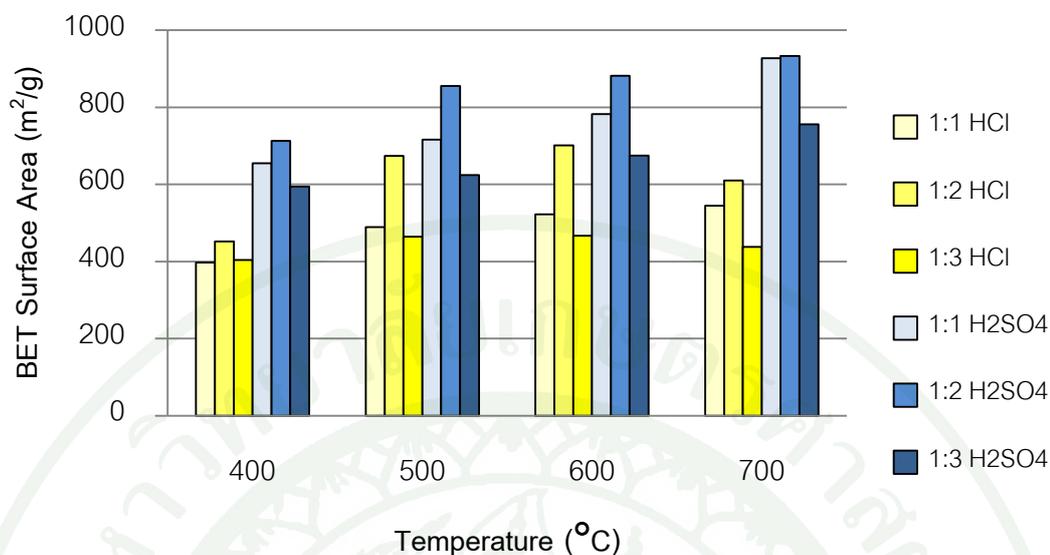
1.1.3 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย

กรด

สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดนั้นสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น การหาพื้นที่ผิวโดยรวม การดูดซับเมทิลีนบลู การดูดซับไอโอดีน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. พื้นที่ผิวโดยรวม (BET surface area)

พื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟูริกนั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังภาพที่ 13 มีเพียงถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 เท่านั้น ที่มีแนวโน้มค่าพื้นที่ผิวโดยรวมที่ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ คือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงขึ้นนั้น จะเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์ เป็นผลทำให้ผนังหรือโครงสร้างภายในพังทลายลง จึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมลดต่ำลง (Sirimuangjinda *et al.*, 2013) โดยสารละลายกรดซัลฟูริกจะให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงกว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในทุกอัตราส่วนเนื่องจากกรดซัลฟูริกเป็นกรดแก่และสามารถแตกตัวให้โปรตรอน (H^+) ได้สองครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นกรดแก่เช่นกัน แต่สามารถแตกตัวให้โปรตรอนได้เพียงครั้งเดียว (Grisham and Garrett., 2005) และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายในการกระตุ้นเดียวกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:2 ให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุด ในทุกอุณหภูมิการกระตุ้น ซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุดถึง 933 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส และในกรณีของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนั้นพบว่าอัตราส่วน 1:2 ให้พื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิการกระตุ้นเช่นกัน โดยให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดที่ 701 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 600 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง3)

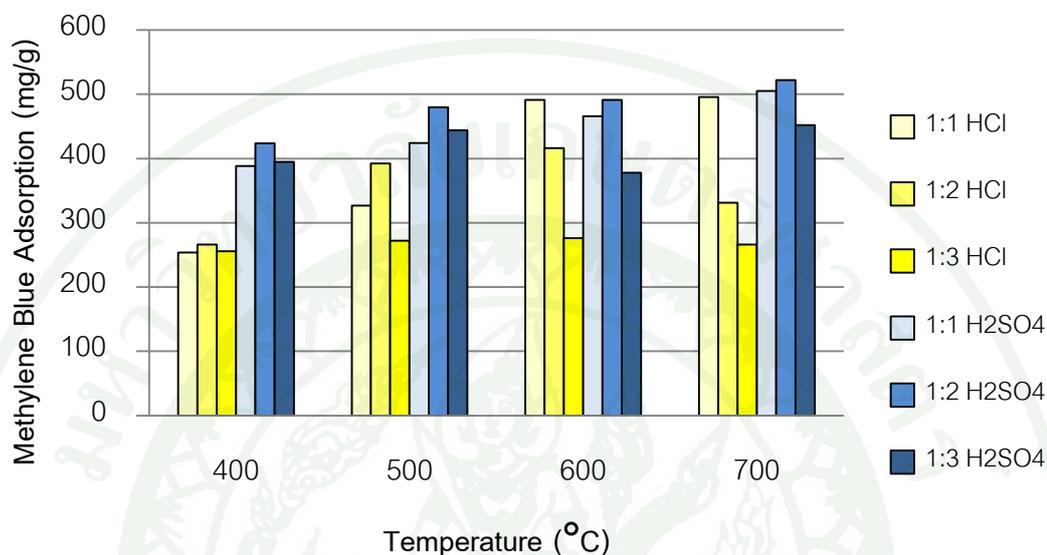


ภาพที่ 13 ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ข. การดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue adsorption)

การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟูริกนั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังภาพที่ 14 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวม และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกันนั้นพบว่า สารละลายกรดซัลฟูริกมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดในอัตราส่วน 1:2 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมดังที่รายงานไปก่อนหน้านี้ โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุดเท่ากับ 522 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่ไม่สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมในอัตราส่วน 1:1 ที่ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าสูงกว่าอัตราส่วน 1:2 ที่เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมสูงสุด อันเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นนั้น จะมีรูพรุนขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร) จำนวนมาก การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูนั้นอาจได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากโมเลกุลของเมทิลีนบลูมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน (ธราพงษ์, 2553) ด้วยสาเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีรูพรุนขนาดกลาง (1.5 ถึง 200 นาโนเมตร) อยู่จำนวนที่มากกว่า อัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้ได้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่ไม่สอดคล้องกับค่า

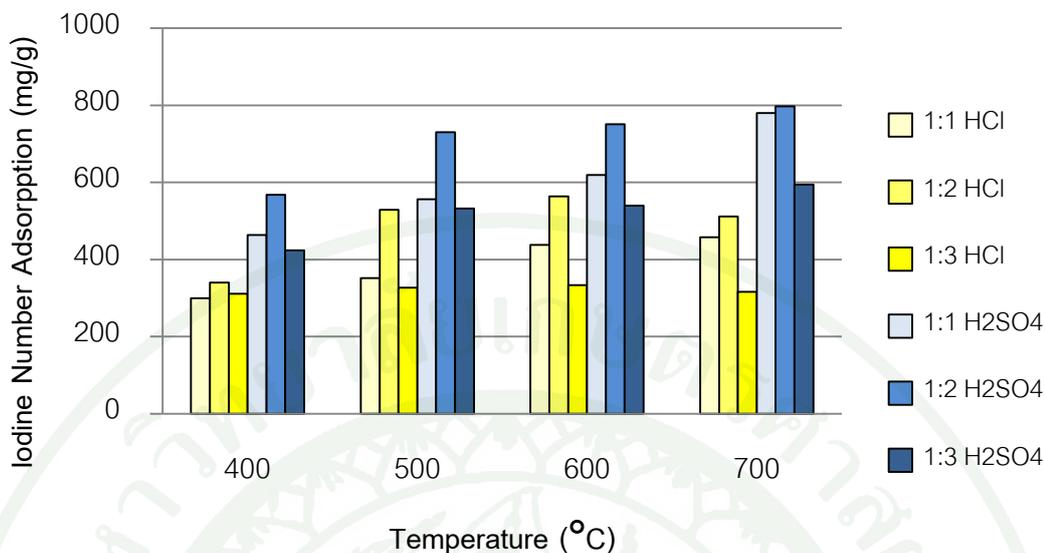
พื้นที่ผิวโดยรวม ซึ่งสารละลายไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 496 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ง3)



ภาพที่ 14 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

ค. การดูดซับไอโอดีน (iodine number adsorption)

การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟูริกนั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังภาพที่ 15 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกันนั้นพบว่า สารละลายกรดซัลฟูริกมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดในอัตราส่วน 1:2 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลูดังที่รายงานไปก่อนหน้านี้ โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 797 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนั้นให้ค่าที่สอดคล้องกับพื้นที่ผิวโดยรวม โดยอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 564 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ง3)



ภาพที่ 15 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด

จากการรายงานสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด พบว่าสารละลายกรดซัลฟูริกให้สมบัติในการดูดซับสูงสุดในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักรที่ 1:2 อุณหภูมิการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวม, การดูดซับเมทิลีนบลู และการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 933 ตารางเมตรต่อกรัม, 522 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 797 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาคผนวก 3)

1.2 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยสารละลายต่าง

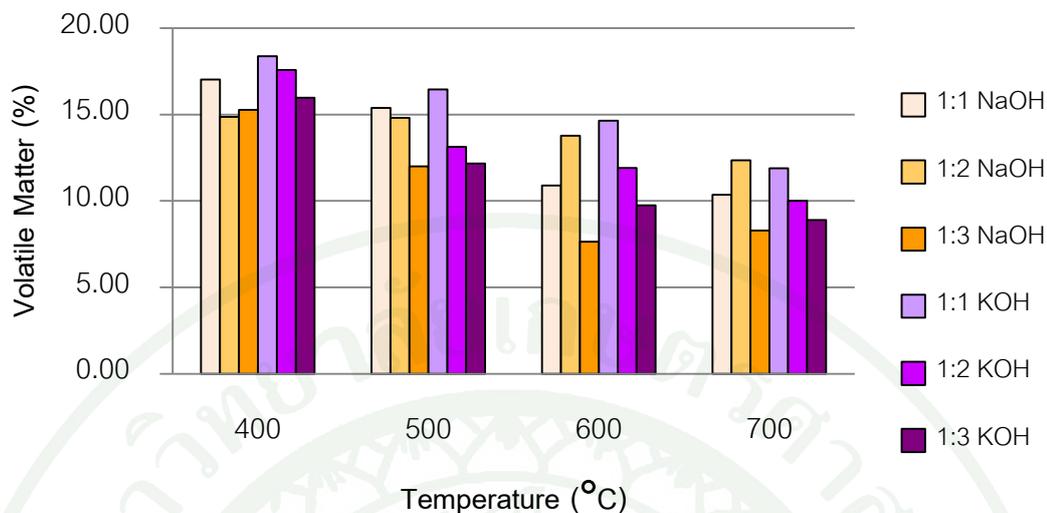
การกระตุ้นด้วยสารละลายต่างในงานวิจัยนี้ จะใช้สารละลายต่าง 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีการทดสอบในอัตราส่วนถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนักรเท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง ประกอบด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. สารระเหย (volatile matter)

จากกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของสารระเหยของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงในทุกอัตราส่วนการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นดังภาพที่ 16 ซึ่งจะให้ค่าร้อยละสารระเหยที่ต่ำที่สุด ที่อัตราส่วน 1:3 ของทั้งสองสารละลาย โดยสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าต่ำสุดที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 7.65 และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าต่ำสุดที่ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 8.90 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่มีค่า 17.64 เมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนถ่านต่อสารละลายที่ 1:1 และ 1:3 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่สูงกว่าสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ แต่ในอัตราส่วน 1:3 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน อัตราส่วน 1:2 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่สูงกว่าในอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส สารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายเดียวกันพบว่าสารละลายแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารละลาย ส่งผลให้มีค่าร้อยละของสารระเหยต่ำลงในทุกอุณหภูมิ การกระตุ้น การกระตุ้นโดยสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ เมื่ออุณหภูมิจะให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่ลดลงในทุกอัตราส่วน แต่อัตราส่วนที่ 1:2 นั้น มีการลดลงช้ากว่าอัตราส่วนอื่น ทำให้ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศา อัตราส่วน 1:2 ให้ค่าร้อยละของสารระเหยสูงกว่าอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ (ภาคผนวก ง4)

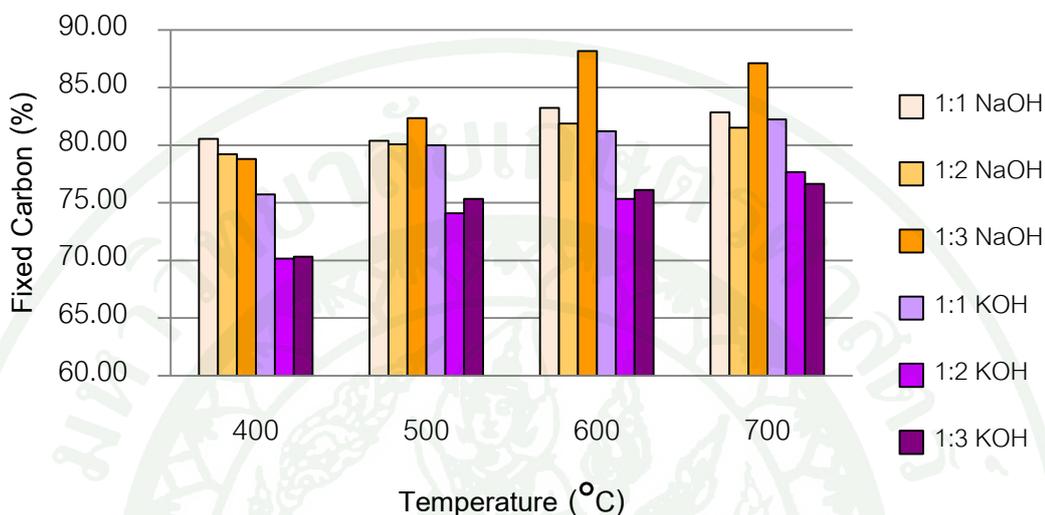


ภาพที่ 16 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ข. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ดังภาพที่ 17 นั้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่ 69.3 โดยแต่ละสารละลายจะให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่ 88.17 ที่ 600 องศาเซลเซียสในอัตราส่วน 1:3 ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และให้ค่า 82.23 ที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:1 ของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงถึงประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น (Bagheri and Abedi, 2009) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มคงที่ถึงลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนักและอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วน 1:3 มีค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวต่ำที่สุด แต่ช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียสนั้นกลับมีค่าสูงที่สุด อัตราส่วนอื่นมีค่ารองลงมาคือ 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ และกรณีของสารละลายโพแทสเซียม

ไฮดรอกไซด์นั้น อัตราส่วน 1:1 มีค่าสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิการกระตุ้น โดยอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงอุณหภูมิ (ภาคผนวก 4)

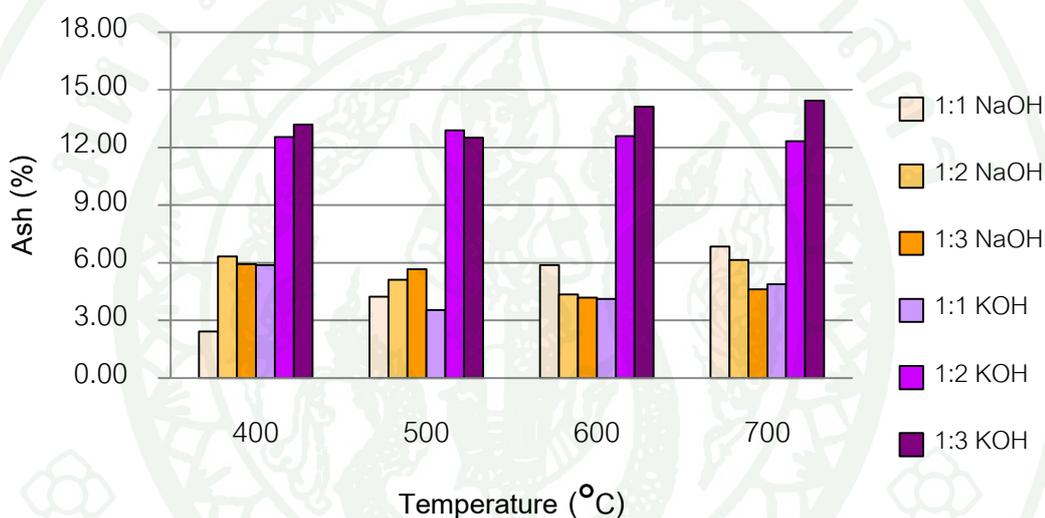


ภาพที่ 17 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ค. เถ้า (ash)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของถ่านในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วนถ่านต่อสารละลายที่ 1:2 และ 1:3 ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าที่สูงกว่าในทุกอุณหภูมิการกระตุ้น ในอัตรา 1:1 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 400 องศาเซลเซียส สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของถ่านที่สูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ในทางกลับกัน ที่ช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าร้อยละของถ่านที่สูงกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังภาพที่ 18 และสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตลอดทุกอุณหภูมิการทดลอง อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ให้แนวโน้มที่ลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะให้แนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วน 1:3

นั่นจะให้ค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 จะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราส่วน 1:3 มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:1 และที่อัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และจะลดลงในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส แต่การเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนที่ 1:2 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และค่าร้อยละของเถ้าที่อัตราส่วน 1:1 นั้นให้ค่าที่ต่ำกว่า อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 มาก (ภาคผนวก ง4)



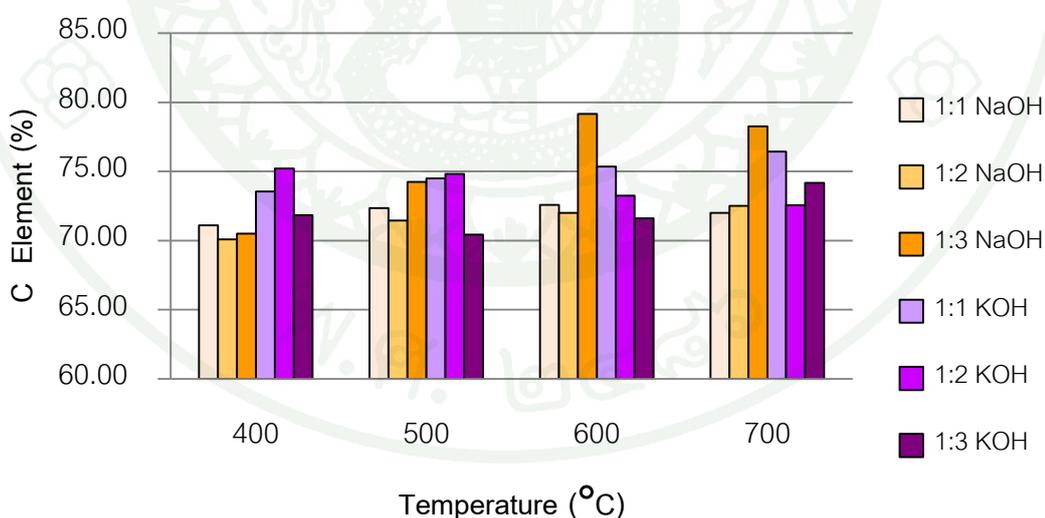
ภาพที่ 18 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

1.2.2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ก. ธาตุคาร์บอน (C element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในทุกช่วงอุณหภูมิที่อัตราส่วน 1:1 ซึ่งที่

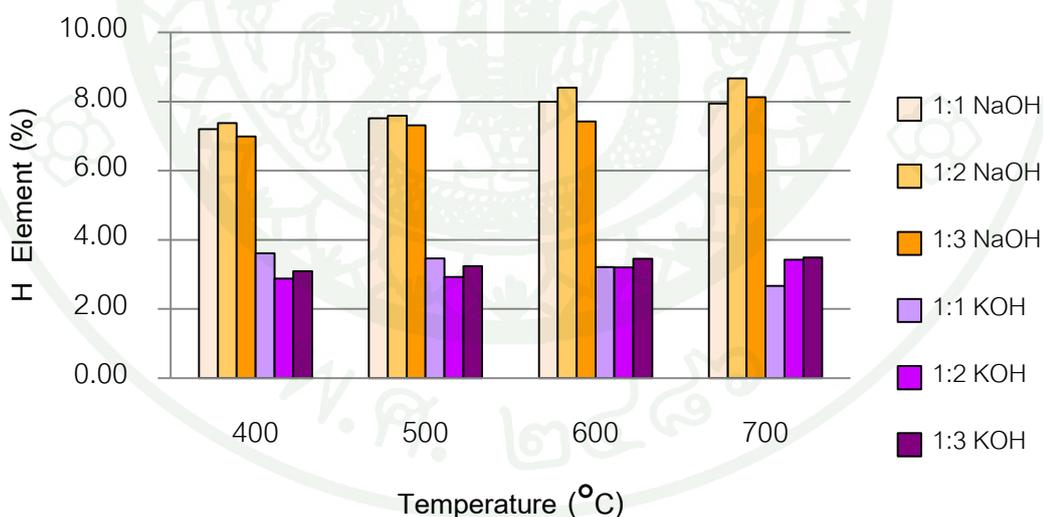
อัตราส่วน 1:2 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าที่สูงกว่าในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยที่ 700 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าที่สูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ให้ค่าที่น้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 19 โดยสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:3 มีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส แตกต่างกันเพียงอัตราส่วน 1:1 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่อัตราส่วน 1:3 มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด ส่วนกรณีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งตรงข้ามกับอัตราส่วน 1:2 ที่มีแนวโน้มลดลงตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ และในอัตราส่วนที่ 1:3 ที่มีแนวโน้มที่ลดลงในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง5)



ภาพที่ 19 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ข. ธาตุไฮโดรเจน (H element)

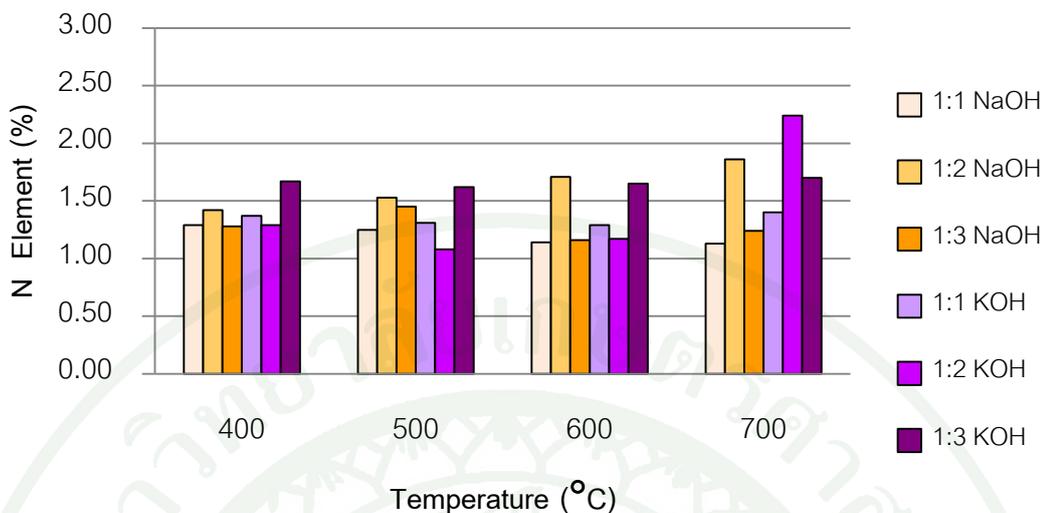
จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่สูงกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในทุกอัตราส่วน และทุกอุณหภูมิดังภาพที่ 20 ซึ่งสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนและทุกอุณหภูมิ ซึ่งมีอัตราส่วน 1:2 ให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่มากที่สุด ส่วนกรณีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยดังนี้ ในอัตราส่วน 1:1 มีแนวโน้มที่เพิ่มตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 มีแนวโน้มที่ลดต่ำลงในทุกช่วงอุณหภูมิ เช่นเดียวกัน (ภาคผนวก ง5)



ภาพที่ 20 ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ค. ธาตุไนโตรเจน (N element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มแตกต่างกัน โดยสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนที่สูงกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:2 ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของไนโตรเจนที่สูงกว่าสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ทุกช่วงอุณหภูมิ รวมถึงอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 21 นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มที่ลดลงตลอดทุกอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ และอัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ลดลงในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยในกรณีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ค่อนข้างมีแนวโน้มคงที่ นอกจากนี้อัตราส่วนที่ 1:2 ให้แนวโน้มที่ลดลงในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส คงที่ในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก 5)

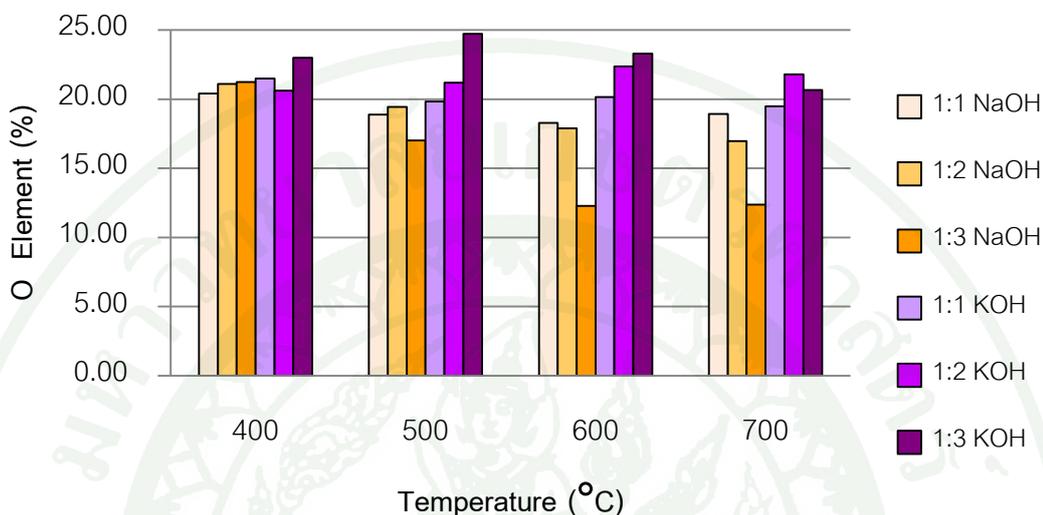


ภาพที่ 21 ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ง. ธาตุออกซิเจน (O element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ซึ่งหาได้โดยความแตกต่างผลรวมของร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยค่าร้อยละของออกซิเจนที่หาได้นั้น มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าร้อยละของธาตุออกซิเจนที่มากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทุกอัตราส่วนและทุกช่วงอุณหภูมิ ยกเว้นอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 22 และเมื่ออธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสจะให้แนวโน้มที่ลดลงในทุกอัตราส่วน และช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วน 1:1 จะให้แนวโน้มเพิ่มขึ้น อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มที่ลดลง และอัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มคงที่ กรณีสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้แนวโน้มที่แตกต่างกัน คือ อัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มลดลงที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และคงที่ในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส

และจะคงที่ในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง5)



ภาพที่ 22 ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

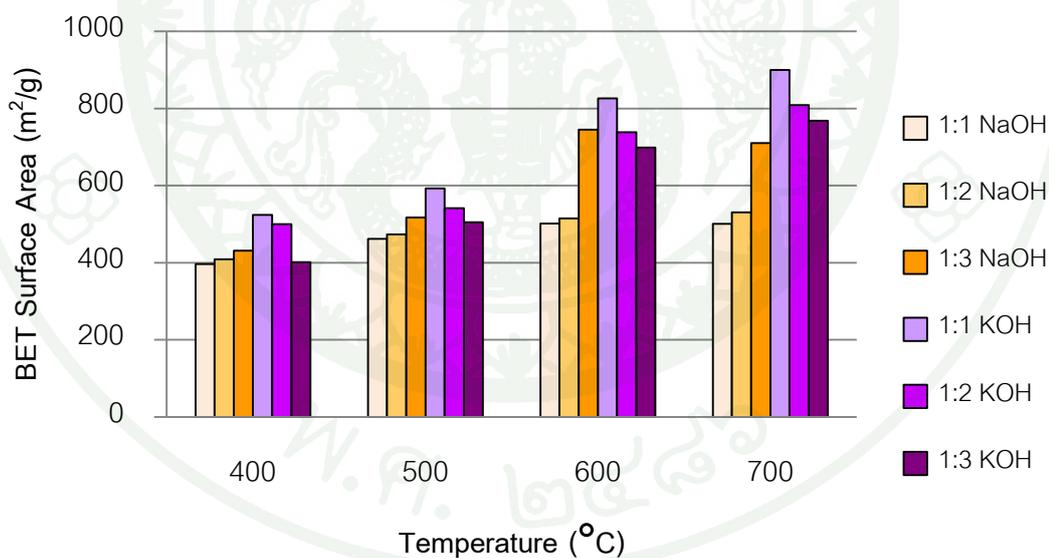
1.2.3 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างนั้นสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น การหาพื้นที่ผิวโดยรวม การดูดซับเมทิลีนบลู การดูดซับไอโอดีน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. พื้นที่ผิวโดยรวม (BET surface area)

พื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังภาพที่ 23 มีเพียงถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:3 เท่านั้น ที่มีแนวโน้มค่าพื้นที่ผิวโดยรวมที่ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ คือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงขึ้นนั้น

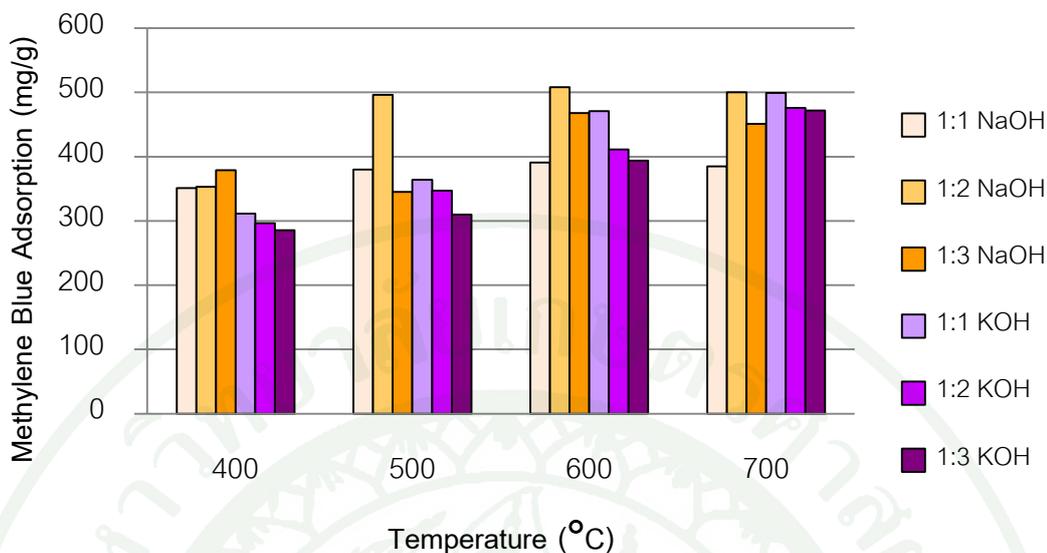
จะเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์ เป็นผลทำให้ผนังหรือโครงสร้างภายในพังทลายลง จึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมลดต่ำลง (Sirimuangjinda *et al.*, 2013) โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในทุกอัตราส่วน เนื่องจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Lillo-Ródenas *et al.*, 2004) และเมื่อเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:3 ให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุดทุกอุณหภูมิการกระตุ้น ซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุดถึง 745 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส และในกรณีของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้นพบว่าอัตราส่วน 1:1 ให้พื้นที่ผิวโดยรวมสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิการกระตุ้น เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีการทำปฏิกิริยาที่เร็ว แม้ปริมาณต่ำ (Sun *et al.*, 1997) โดยให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดที่ 900 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง6)



ภาพที่ 23 ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ข. การดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue adsorption)

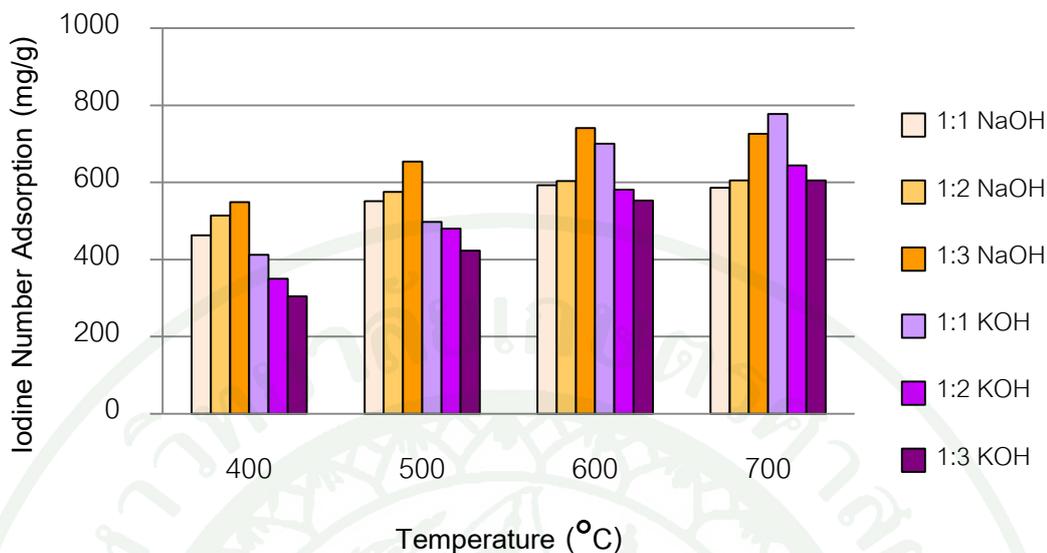
การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังภาพที่ 24 มีเพียงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เท่านั้นที่มีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีสาเหตุจากมีการสลายตัวเพื่อสร้างรูพรุนอย่างต่อเนื่อง จนเกิดการพังลงของรูพรุนขนาดเล็กภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Bansal *et al.*, 1988) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวม และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกัน นั้นพบว่า สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ให้แนวโน้มเดียวกับพื้นที่ผิวโดยรวม โดยมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด เท่ากับ 499 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดไม่สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวม โดยอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 600 องศาเซลเซียส จะให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุดเท่ากับ 508 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยต่างจากค่าพื้นที่ผิวโดยรวมที่มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 1:3 เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นนั้น จะมีรูพรุนขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร) จำนวนมาก การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูนั้นอาจได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากโมเลกุลของเมทิลีนบลูมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน (ธราพงษ์, 2553) จึงทำให้สรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีรูพรุนขนาดกลาง (1.5 ถึง 200 นาโนเมตร) มากกว่าอัตราส่วน 1:3 (ภาคผนวก 6)



ภาพที่ 24 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

ค. การดูดซับไอโอดีน (iodine number adsorption)

การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังภาพที่ 25 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกันนั้นพบว่า สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลูดังที่รายงานไปก่อนหน้านี้ โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 777 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นให้ค่าที่สอดคล้องกับพื้นที่ผิวโดยรวม โดยอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 741 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ง6)



ภาพที่ 25 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

จากการรายงานสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง พบว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้สมบัติในการดูดซับสูงที่สุดในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักรที่ 1:1 อุณหภูมิการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวม, การดูดซับเมทิลีนบลู และการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 900 ตารางเมตรต่อกรัม, 499 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 777 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาคผนวก 6)

1.3 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

การกระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์ในงานวิจัยนี้ จะใช้สารละลายโลหะคลอไรด์ 2 ชนิด คือ ซิงค์คลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยมีการทดสอบในอัตราส่วนถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์

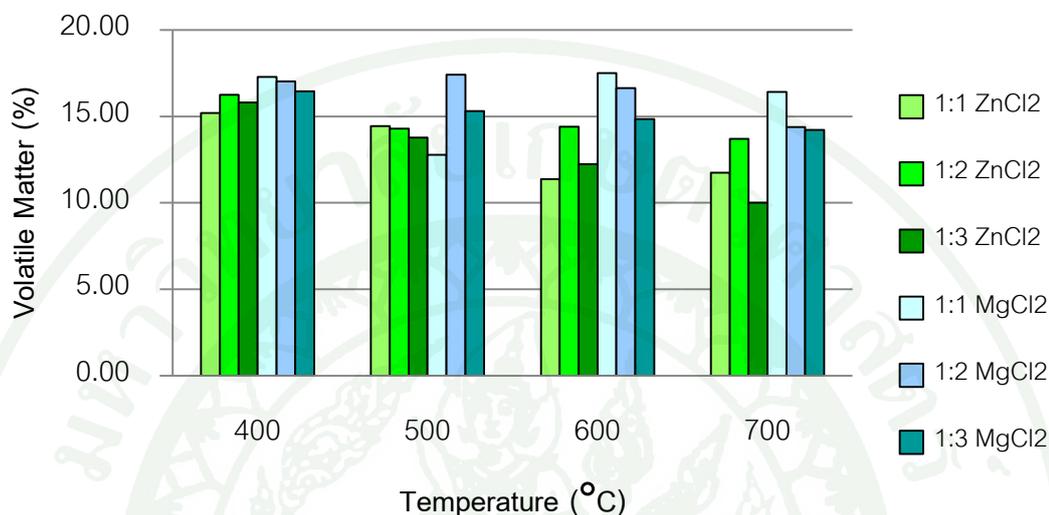
1.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์ ประกอบด้วย สารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. สารระเหย (volatile matter)

จากกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของสารระเหยของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกันในทุกอัตราส่วนการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นดังภาพที่ 26 โดยส่วนใหญ่สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์จะให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่สูงกว่าในทุกอัตราส่วนและทุกอุณหภูมิ มีเพียงอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเท่านั้น ที่สารละลายซิงค์คลอไรด์ให้ค่าร้อยละของสารระเหยที่สูงกว่า โดยปริมาณสารระเหยที่ต่ำ สามารถบ่งบอกถึงสมบัติที่ดีและยั่งยืนของถ่านกัมมันต์ได้ (Cui *et al.*, 2007) โดยสารละลายทั้งสองให้ค่าร้อยละของสารระเหยในภาวะเดียวกันคือ อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 10.01 และ 14.21 ของสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่มีค่าร้อยละของสารระเหยเท่ากับ 17.64 ภายหลังการกระตุ้นนั้นเมื่อเปรียบเทียบสารละลายเดียวกันพบว่าสารละลายแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเช่นกัน แต่มีการลดลงที่ไม่เท่ากัน โดยอัตราส่วน 1:1 จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มเริ่มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:3 แนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดทุกอุณหภูมิ ส่วนสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ อัตราส่วน 1:1 มีการลดลงของค่าร้อยละของสารระเหยในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีค่าที่เพิ่มขึ้น และลดลงอีกครั้งที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700

องศาเซลเซียส และอัตราส่วน 1:3 มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกช่วงอุณหภูมิ (ภาคผนวก ง7)

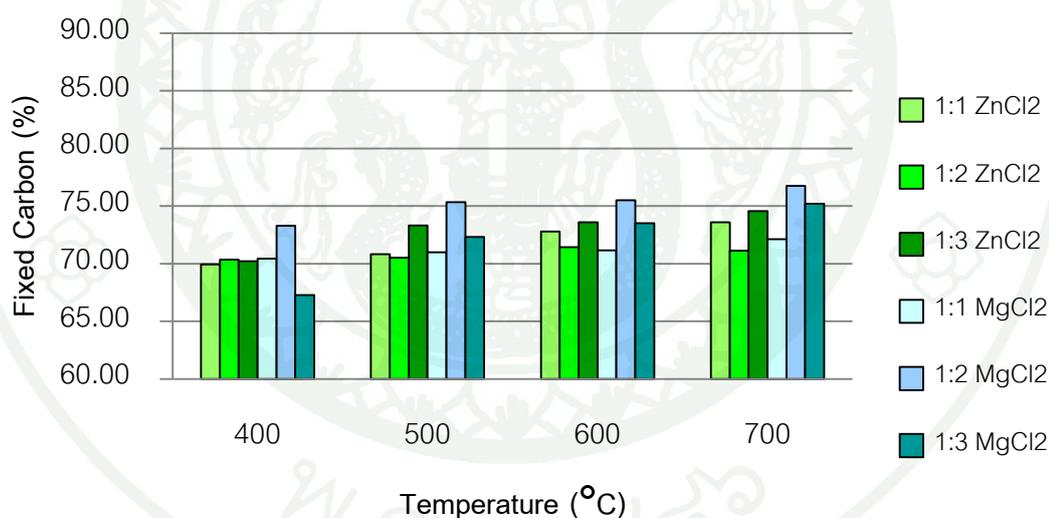


ภาพที่ 26 ร้อยละของสารระเหยในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ข. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ดังภาพที่ 27 นั้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นกว่าถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นที่ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 69.3 โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ให้ค่าสูงที่สุดในอัตราส่วน 1:3 ที่ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 74.56 และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ให้ค่าให้ค่าสูงสุดในอัตราส่วน 1:2 ที่ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 76.76 โดยถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้น (Putun *et al.*, 2005) ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นในแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 ซิงค์คลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์มีค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสสารละลายซิงค์คลอไรด์ให้ค่าที่สูงกว่าสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:2 สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่สูงกว่าทุกช่วงอุณหภูมิ และที่อัตราส่วน 1:3 สารละลายซิงค์คลอไรด์ให้

ค่าที่สูงกว่าในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ให้ค่าที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนักที่สารละลายเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สารละลายซิงค์คลอไรด์ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และอัตราส่วน 1:3 มีค่าสูงกว่า และที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสอัตราส่วน 1:3 ให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ ส่วนสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ อัตราส่วน 1:2 ให้ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวที่สูงที่สุดทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสนั้นให้ค่ารองลงมาและสูงกว่าอัตราส่วน 1:3 แต่ในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:3 ให้ค่าสูงกว่าอัตราส่วน 1:1 แต่ยังไม่ยกกว่าอัตราส่วน 1:2 (ภาคผนวก 7)

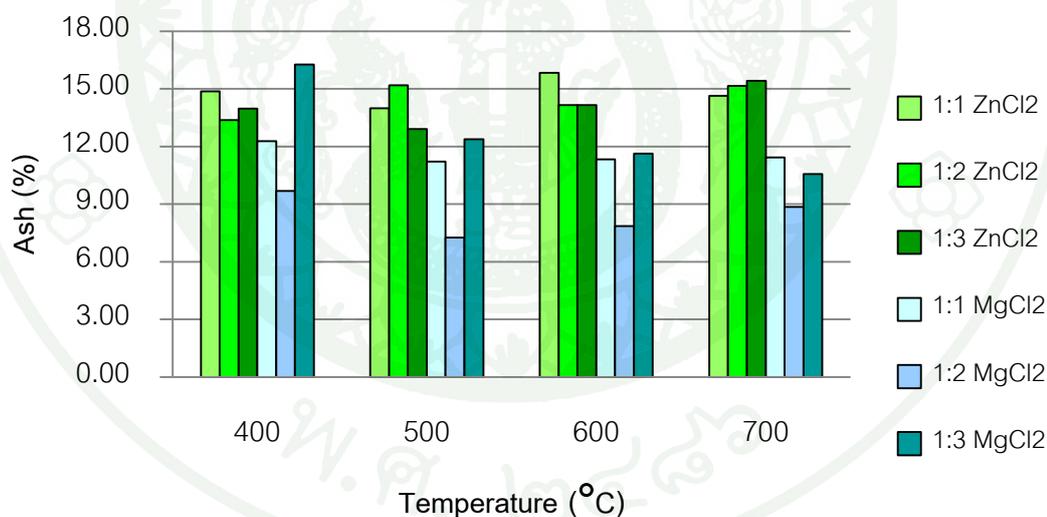


ภาพที่ 27 ร้อยละของคาร์บอนคงตัวในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ค. เถ้า (ash)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมี

แนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่สารละลายซิงค์คลอไรด์จะให้ค่าร้อยละของเถ้าที่สูงกว่า สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ยกเว้นอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์จะให้ค่าที่สูงกว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์ดังภาพที่ 28 และเมื่อเปรียบเทียบใน สารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าร้อยละ ของเถ้าลดลงในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ต่อมาแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และลดลงอีกครั้งในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:2 มีแนวโน้มที่ เพิ่มขึ้นในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และลดลงในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส สุดท้าย เพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ส่วนสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 1:1 ต่อมาอุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 1:1 ให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 1:3 โดยอัตราส่วน 1:2 ให้ค่าน้อยที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ (ภาคผนวก ง7)

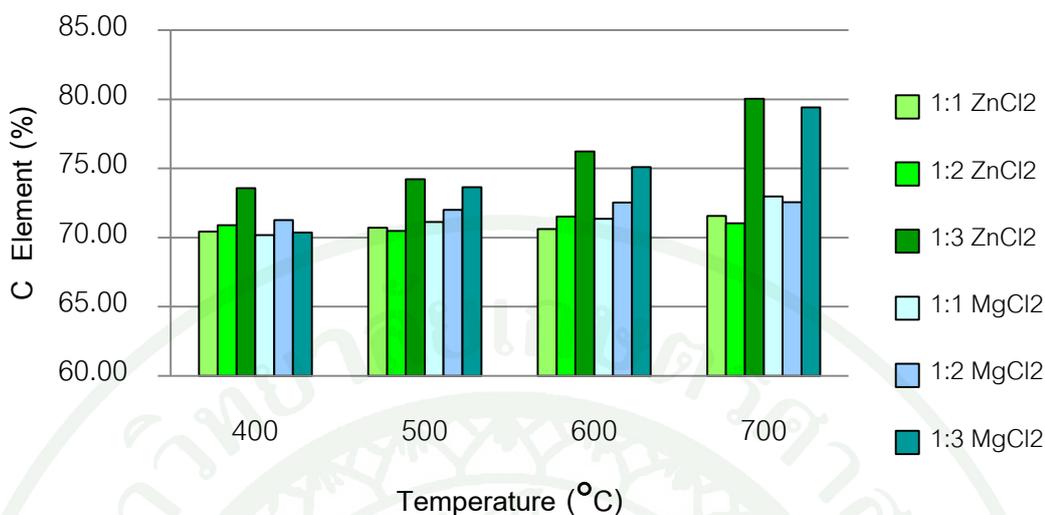


ภาพที่ 28 ร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะ คลอไรด์

1.3.2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ก. ธาตุคาร์บอน (C element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยในอัตราส่วน 1:3 สารละลายซิงค์คลอไรด์จะให้ค่าร้อยละของธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าในทุกช่วงอุณหภูมิ ในทางกลับกัน ในอัตราส่วน 1:2 สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ให้ค่าร้อยละของธาตุคาร์บอนสูงกว่าเพียงเล็กน้อยตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ และที่อัตราส่วน 1:1 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส และให้ค่าใกล้เคียงกันที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 29 และสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ ส่วนอัตราส่วน 1:2 จะให้แนวโน้มที่คงที่ในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และลดลงเล็กน้อยที่ช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส กรณีของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ เกือบทุกภาวะจะให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีเพียงอัตราส่วน 1:1 ที่ช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน 1:2 ที่ช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ที่ให้แนวโน้มคงที่ (ภาคผนวก 8)

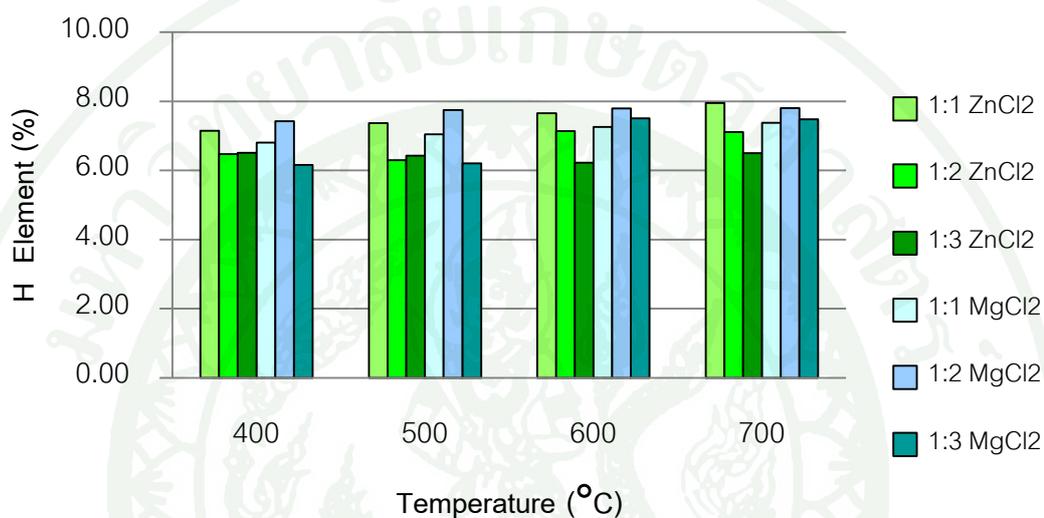


ภาพที่ 29 ร้อยละของธาตุคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์

ข. ธาตุไฮโดรเจน (H element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยในอัตราส่วน 1:1 สารละลายซิงค์คลอไรด์ให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่สูงกว่าสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งตรงกันข้ามกับอัตราส่วน 1:2 สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ให้ค่าที่สูงกว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์ในทุกช่วงอุณหภูมิ และอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซิงค์คลอไรด์ให้ค่าร้อยละของธาตุไฮโดรเจนที่สูงกว่าแมกนีเซียมคลอไรด์ แต่ซิงค์คลอไรด์ให้ค่าที่ต่ำกว่าแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 30 นอกจากนี้ ยังสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มคงที่ทุกช่วงอุณหภูมิ และอัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 และ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส กรณีของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ อัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกช่วง

อุณหภูมิ อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และคงที่ในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน 1:3 ให้แนวโน้มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 และ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ส่วนในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (ภาคผนวก ง8)

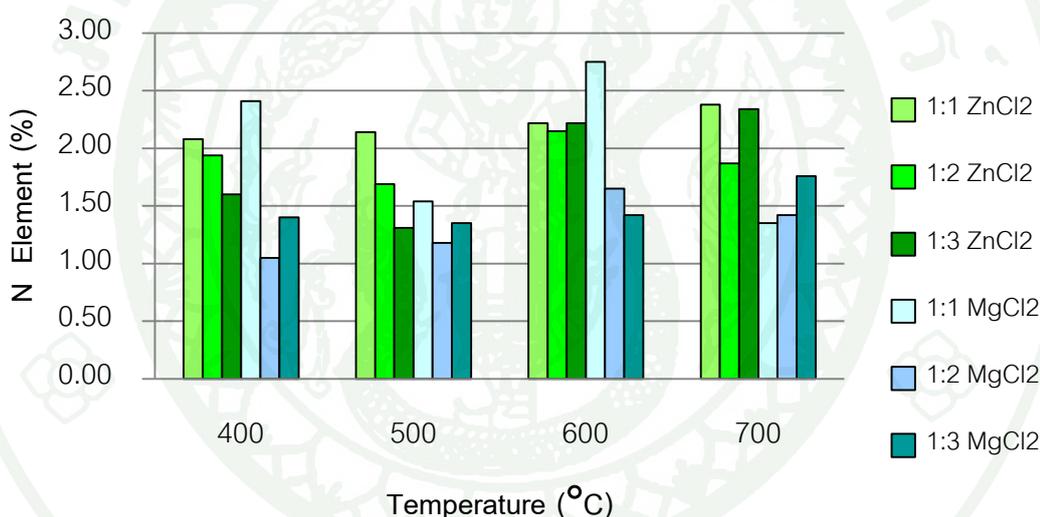


ภาพที่ 30 ร้อยละของธาตุไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ค. ธาตุไนโตรเจน (N element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์นั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:2 แสดงค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนที่สูงกว่าสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เกือบทุกภาวะ ยกเว้นอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ที่ให้ค่าร้อยละของธาตุไนโตรเจนน้อยกว่า นอกจากนี้ อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันดังภาพที่ 31 และยังสามารถอธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ

อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นช่วง 400 ถึง 500 และ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยที่ช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มที่ลดลง อัตราส่วนที่ 1:3 ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยที่ช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กรณีสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:1 ช่วง 400 ถึง 500 และ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มที่ลดลง ส่วนช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่ 1:2 ให้แนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และให้แนวโน้มที่ลดลงในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส สุดท้ายที่อัตราส่วน 1:3 โดยในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ให้แนวโน้มคงที่ ส่วนช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (ภาคผนวก ง8)

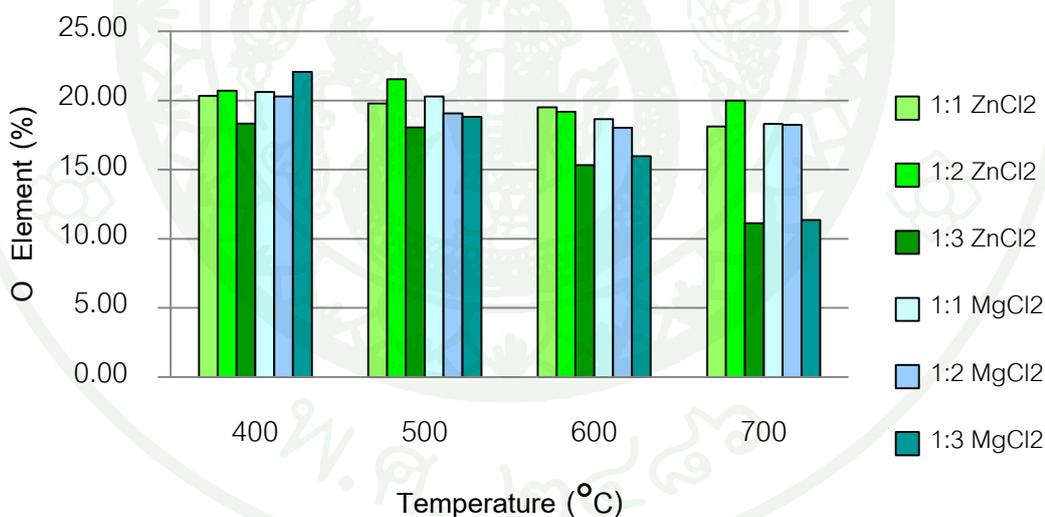


ภาพที่ 31 ร้อยละของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ง. ธาตุออกซิเจน (O element)

จากกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่าร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ซึ่งหาได้โดยความแตกต่างผลรวมของร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยค่าร้อยละของออกซิเจนที่หาได้นั้น มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วน 1:1 ทุกอุณหภูมิมีค่าร้อยละ

ของธาตุออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน อัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 สารละลายซิงค์คลอไรด์มีแสดงค่าที่สูงกว่าสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ส่วนอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์มีค่าร้อยละของธาตุออกซิเจนที่สูงกว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์ และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 32 และเมื่ออธิบายเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารละลายโดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการกระตุ้น โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 ให้แนวโน้มต่ำลงในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราส่วน 1:2 ให้แนวโน้มคงที่ในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ลดลงในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นในช่วง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน 1:3 ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียสให้แนวโน้มคงที่ ส่วนสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ เกือบทุกภาวะให้แนวโน้มที่ลดลงทั้งหมด มีเพียงอัตราส่วน 1:2 ที่ช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มคงที่ (ภาคผนวก ง8)



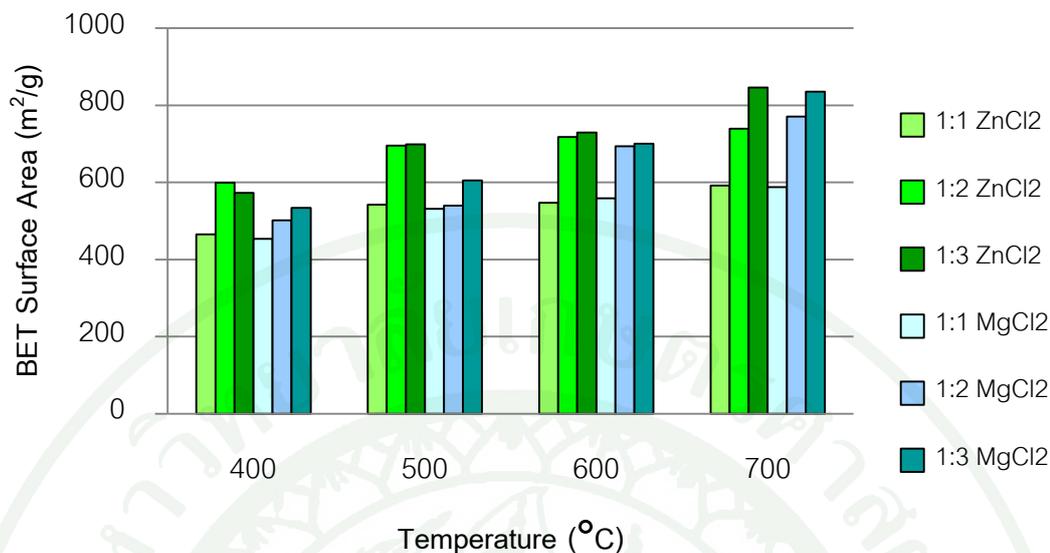
ภาพที่ 32 ร้อยละของธาตุออกซิเจนในถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

1.3.3 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์นั้นสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น การหาพื้นที่ผิวโดยรวม การดูดซับเมทิลีนบลู การดูดซับไอโอดีน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ก. พื้นที่ผิวโดยรวม (BET surface area)

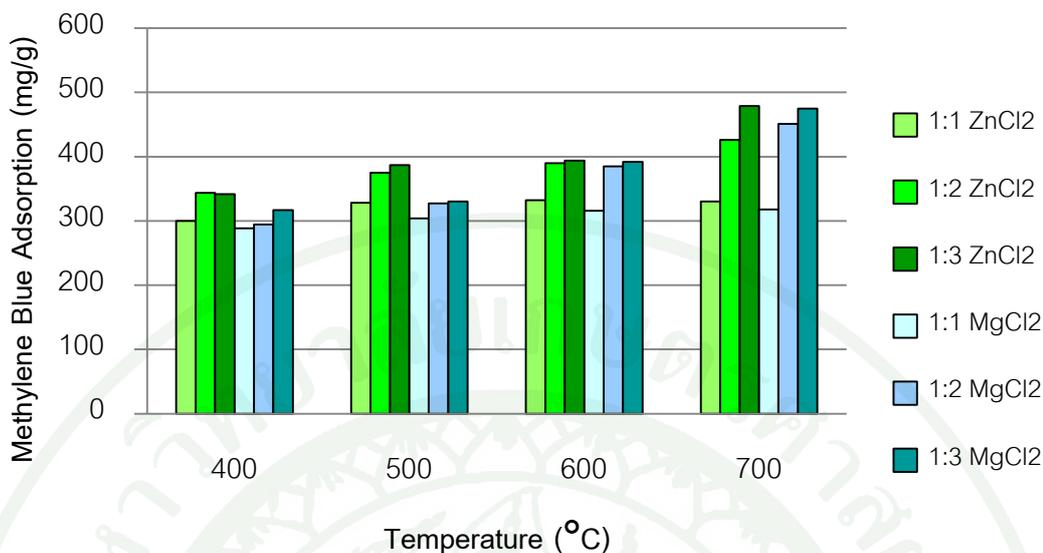
พื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังภาพที่ 33 โดยสารละลายทั้งสองชนิดจะให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกันที่อัตราส่วน 1:1 ในทุกอุณหภูมิ การกระตุ้น และในอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 สารละลายซิงค์คลอไรด์มีพื้นที่ผิวโดยรวมที่สูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากธาตุซิงค์คลอไรด์มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าแมกนีเซียมคลอไรด์ ทำให้ซิงค์คลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้มากกว่าเล็กน้อย (Mcweeny., 2011) และเมื่อเปรียบเทียบในสารละลายเดียวกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ มีแนวโน้มค่าพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยสารละลายซิงค์คลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 846 และ 835 ตารางเมตรต่อกรัม (ภาคผนวก 9)



ภาพที่ 33 ค่าพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ข. การดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue adsorption)

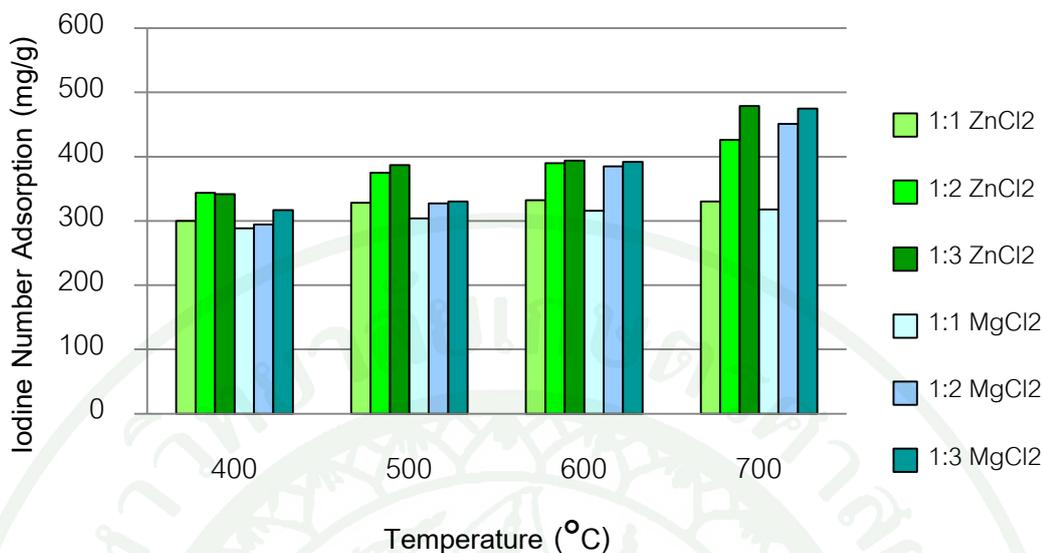
การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังภาพที่ 34 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวม และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกันนั้นพบว่า สารละลายซิงค์คลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ ให้แนวโน้มเดียวกับพื้นที่ผิวโดยรวม คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์กับสารละลายโดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงขึ้น โดยมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 479 และ 475 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาคผนวก 9)



ภาพที่ 34 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

ค. การดูดซับไอโอดีน (iodine number adsorption)

การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดังภาพที่ 35 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนในสารละลายเดียวกันนั้นพบว่า สารละลายซิงค์คลอไรด์มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดในอัตราส่วน 1:3 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลูดังที่รายงานไปก่อนหน้านี้ โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส จะให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 709 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์นั้นให้ค่าที่สอดคล้องกับพื้นที่ผิวโดยรวมและการดูดซับเมทิลีนบลูเช่นกัน โดยอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก 9)



ภาพที่ 35 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์

จากการรายงานสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคลอไรด์ พบว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์ให้สมบัติในการดูดซับสูงที่สุดในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักที่ 1:3 อุณหภูมิการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าพื้นที่ผิวโดยรวม, การดูดซับเมทิลีนบลู และการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 846 ตารางเมตรต่อกรัม, 479 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 709 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ภาคผนวก ง9)

2. การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

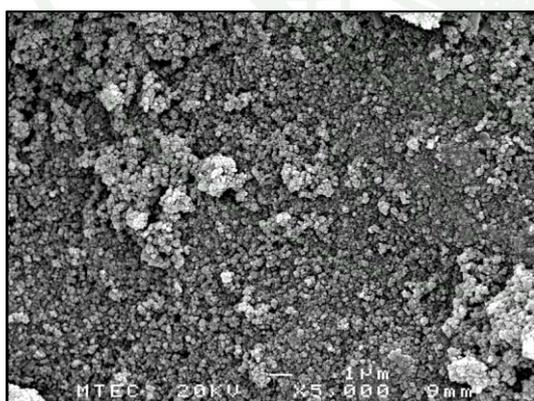
2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์

จากการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ในหัวข้อที่ 1 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ในภาวะการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักร้อยละ 1:2 ให้ค่าการทดสอบดังนี้ การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร ได้แก่ สารระเหยร้อยละ 4.78, คาร์บอนคงตัวร้อยละ 89.68 และเถ้าร้อยละ 5.54 (ภาคผนวก ง1) การวิเคราะห์ธาตุ ได้แก่ ธาตุคาร์บอนร้อยละ 79.49,

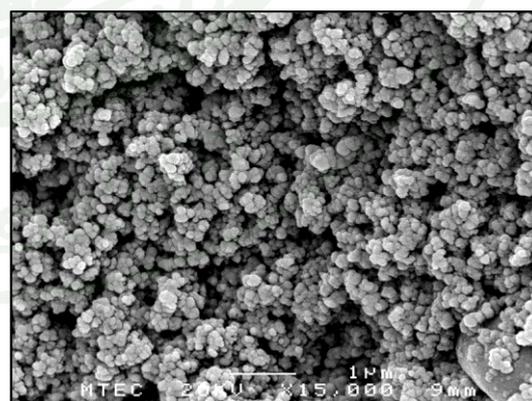
ธาตุไฮโดรเจนร้อยละ 3.36 ,ธาตุไนโตรเจนร้อยละ 1.20 และธาตุออกซิเจนร้อยละ 15.95 (ภาคผนวก ง2) และสมบัติการดูดซับสมบัติการดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิวโดยรวม 933 ตารางเมตรต่อกรัม, การดูดซับเมทิลีนบลู 522 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับไอโอดีน 797 มิลลิกรัมต่อกรัม (ภาคผนวก ง3) โดยจะเห็นได้ว่ามีปริมาณสารระเหยที่ต่ำที่สุดและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกภาวะการทดลอง ซึ่งสามารถชี้เฉพาะถึงประสิทธิภาพที่ดีของถ่านกัมมันต์ (Jankowska *et al.*, 1991) และยังสนับสนุนด้วยสมบัติการดูดซับที่ให้ค่าที่สูงที่สุดทุกประเภทในทุกภาวะการทดลอง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ภาวะการกระตุ้นด้วยสารละลายซัลฟูริกที่อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด

2.2 สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์

จากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ภาวะการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าถ่านกัมมันต์มีความพรุนตัวสูง โดยจะเห็นได้ชัดที่กำลังขยายสูงถึง 15,000 เท่า ซึ่งจะเห็นรูพรุนช่องว่างของถ่านกัมมันต์ แสดงให้เห็นถึงสมบัติในการดูดซับที่ดีของถ่านกัมมันต์ (Ucar *et al.*, 2005)



5,000 เท่า



15,000 เท่า

ภาพที่ 36 สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ภาวะการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้น ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเกลียวหนอนคู่ โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 53 มิลลิเมตร พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูป 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำเม็ดพลาสติกไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

ตารางที่ 2 อุณหภูมิในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป									
โซน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	150	155	160	160	165	170	165	165	170	170

ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเป่า ที่มีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร และความเร็วรอบที่เหมาะสมในการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 155 ถึง 165 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 3 โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ได้หลังจากการขึ้นรูปจะถูกนำไปทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป

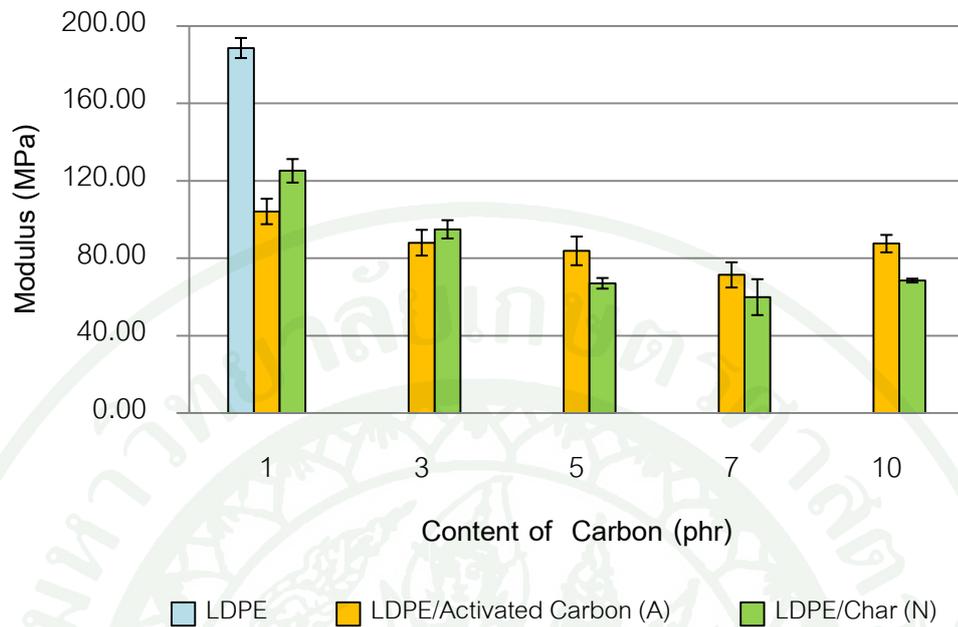
ตารางที่ 3 อุณหภูมิในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป				
โซน	1	2	3	4	ตายด์
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	155	160	160	165	165

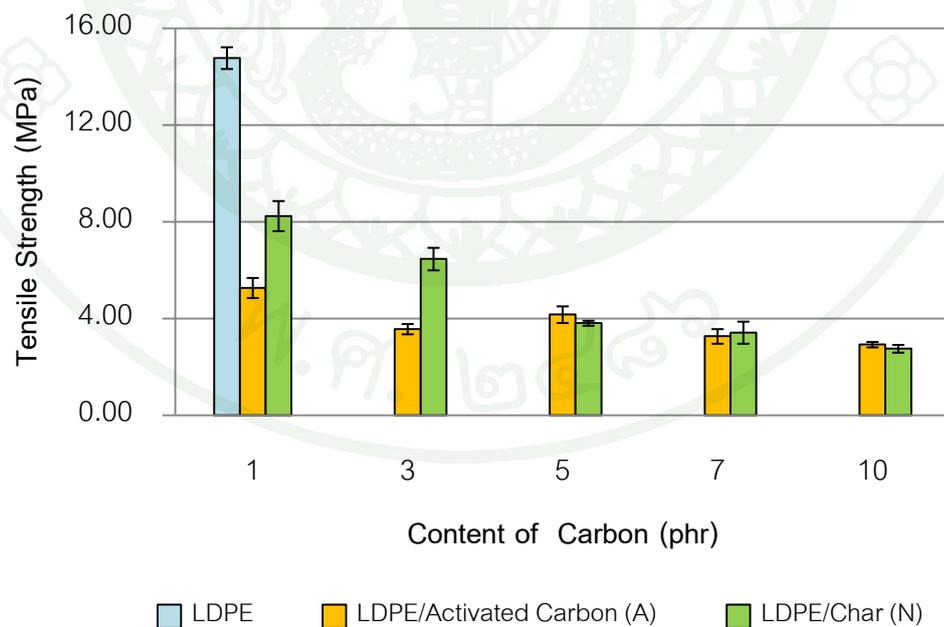
3. วิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

3.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ พบว่า ค่ามอดุลัส (modulus) ในภาพที่ 37 และความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ในภาพที่ 38 พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมถ่านกัมมันต์นั้น จะเกิดการรวมตัวกันเองของสารเติมหรือถ่านกัมมันต์ การกระจายตัวได้ยากในเนื้อพลาสติกอันเนื่องจากการขึ้นรูปพลาสติกนั้นใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปอย่างมาก (อรอุษา, 2546) ส่งผลให้เกิดการขาดช่วงการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานแรงดึงลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้ค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 188.64 และ 14.77 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ทั้งที่ผ่านการกระตุ้น (A) และไม่ผ่านการกระตุ้น (N) พบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นนั้นให้ค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าในช่วงปริมาณการเติมผงถ่านกัมมันต์ที่ 1 และ 3 พีเอชอาร์ อันเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นนั้นสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าเมื่อมีปริมาณการเติมที่น้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ ปัจจัยด้านการกระจายตัวของถ่านกัมมันต์นั้นหายไปเนื่องจากถ่านกัมมันต์กระจายตัวได้ยาก จึงพบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นให้ค่ามอดุลัสและความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าเนื่องจากมีความแข็งที่มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น (ธราพงษ์, 2553) โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ผสมถ่าน กัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้นให้ค่ามอดุลัสในช่วง 71.38 ถึง 104.15 และ 59.88 ถึง 125.16 เมกะปาสคาล และให้ค่าความต้านทานแรงดึงในช่วง 5.27 ถึง 2.93 และ 8.24 ถึง 2.76 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยให้ความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง10) อย่างไรก็ตาม ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์นี้จะประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองหรือห่อหุ้ม จึงอาจไม่จำเป็นต้องการความแข็งแรงที่มากนัก

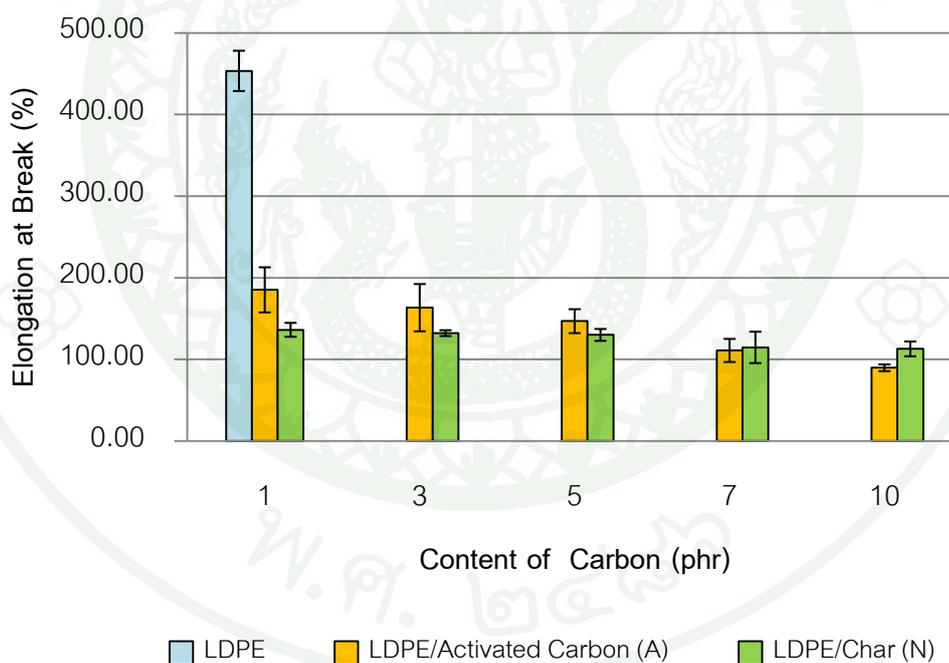


ภาพที่ 37 ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 38 ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

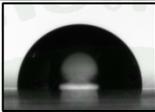
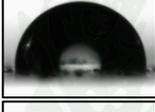
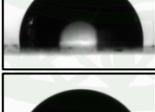
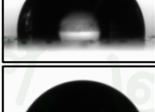
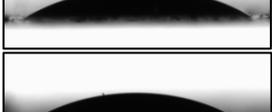
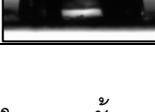
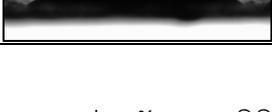
ค่าร้อยละการยืดตัวออก (% elongation) จากภาพที่ 39 ให้แนวโน้มที่ลดต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จากการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้ค่าร้อยละการยืดตัวออกที่ 453.55 และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้นพบว่า ในปริมาณ 1,3 และ 5 พีเอชอาร์ พบว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นให้ค่าร้อยละการยืดตัวออกที่สูงกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 7 และ 10 พีเอชอาร์ กลับมีค่าร้อยละการยืดตัวออกที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นจะมีความแข็งที่สูงกว่า (ธราพงษ์, 2553) ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดตัวออกมีแนวโน้มลดลงที่เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น โดยมีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง10)



ภาพที่ 39 ค่าร้อยละการยืดตัวออกของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

3.2 การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4 ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	น้ำ		น้ำมัน	
	มุมสัมผัส (เซตี่า)	ภาพ	มุมสัมผัส (เซตี่า)	ภาพ
LDPE	$92.02^a \pm 0.11$		$25.58^a \pm 0.70$	
A1	$92.57^a \pm 0.12$		$26.71^a \pm 0.40$	
A3	$93.41^b \pm 0.70$		$27.83^a \pm 0.28$	
A5	$94.06^b \pm 0.59$		$26.70^a \pm 1.73$	
A7	$94.77^c \pm 0.23$		$27.77^a \pm 1.93$	
A10	$96.17^d \pm 0.72$		$27.77^a \pm 0.98$	
N1	$95.17^c \pm 0.66$		$31.61^b \pm 0.60$	
N3	$95.75^{cd} \pm 0.56$		$32.09^b \pm 1.91$	
N5	$97.50^e \pm 0.25$		$31.41^b \pm 0.37$	
N7	$98.07^{ef} \pm 0.56$		$31.76^b \pm 1.40$	
N10	$98.44^f \pm 0.56$		$33.46^b \pm 2.16$	

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-f} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

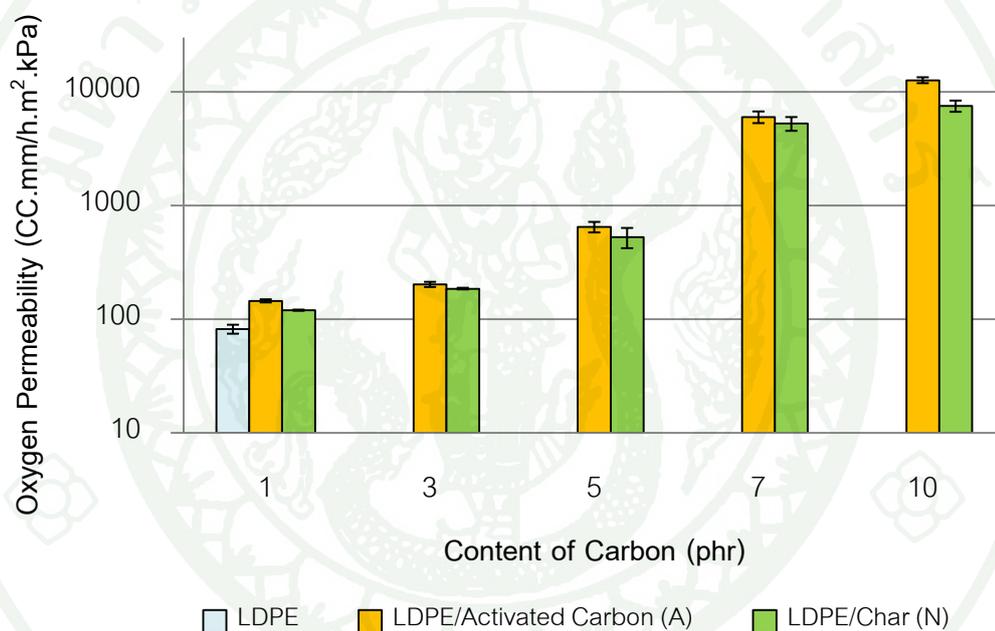
จากตารางที่ 4 พบว่าค่ามุมสัมผัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีต่อน้ำและน้ำมันนั้น ให้ค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับสมบัติความชอบน้ำ (hydrophobic) ที่ต่างกัน โดยจะเห็นว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ให้มุมสัมผัสกับน้ำและน้ำมันที่ 92.02 และ 25.58 เซต้า ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าที่ต่ำกว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ทั้งที่ผ่านการกระตุ้น (A) และไม่ผ่านการกระตุ้น (N) เนื่องมาจากการเติมปริมาณถ่านกัมมันต์จะส่งผลให้พลังงานพื้นผิว (surface energy) ของฟิล์มต่ำลง (Schulz *et al.*, 2005) ทำให้น้ำและน้ำมันมีความสามารถในการเปียกตัว (wettability) น้อยลง มุมสัมผัสของน้ำและน้ำมันต่อพื้นผิวฟิล์มจึงสูงขึ้นตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ใส่ถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้น พบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น (A) นั้นมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าทั้งน้ำและน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบในปริมาณถ่านกัมมันต์เดียวกัน เนื่องมาจากรอยต่อระหว่างฟิล์มและของเหลวนั้นมีมีอากาศแทรกตัวอยู่ (Holmberg *et al.*, 2002) ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีการกระตุ้นจะมีรูพรุนและความขรุขระสูง น้ำและน้ำมันเป็นของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำอาจแทรกตัวลงไปได้ ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของฟิล์ม A นั้นต่ำกว่าฟิล์ม N (นฤทธิ, 2556) โดยฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น (A) และไม่ผ่านการกระตุ้น (N) ให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดกับน้ำที่ 96.17 และ 98.44 เซต้า และให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดกับน้ำมันที่ 27.83 และ 33.46 เซต้า ตามลำดับ โดยให้ความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

3.3 การวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

3.3.1 สมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนดังภาพที่ 40 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (oxygen permeability) เท่ากับ 82 ซีซี.มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตารางเมตร.กิโลปาสกาล ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมถ่านกัมมันต์ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จะส่งผลให้มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มรูพรุนและช่องว่างภายในเนื้อฟิล์มทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงขึ้น (Ballinas *et al.*, 2004) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น (A) และไม่ผ่านการกระตุ้น (N) นั้น สามารถเปรียบเทียบได้ว่าฟิล์มพอลิเอ

ที่สิ้นความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นนั้นให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่สูงกว่าในทุกๆปริมาณการเติม เพราะว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นจะมีความพรุนตัวที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่กระตุ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (ภาคผนวก ง3) จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้น มีค่าสูงสุดที่ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ โดยมีค่า 12,645 และ 7,505 ซีซี.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตารางเมตร.กิโลปาสคาล และยังพบว่าปริมาณการเติมปริมาณถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง11)

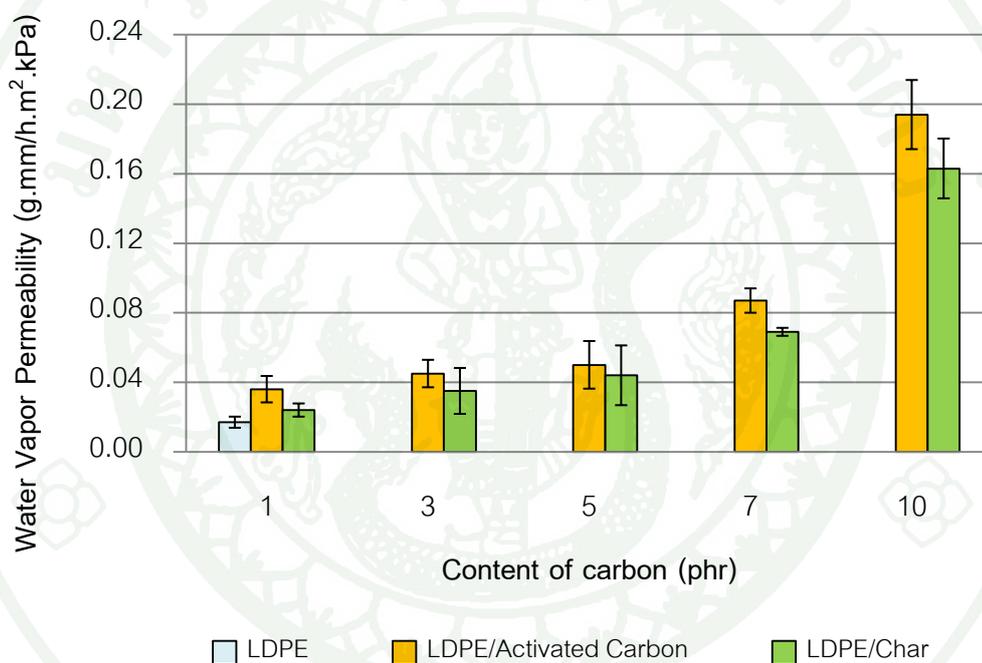


ภาพที่ 40 ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

3.3.2 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

จากการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ ดังภาพที่ 41 พบว่าเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นและสูงกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่ 0.017 กรัม.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตารางเมตร.กิโล

พลาสติก ในขณะที่ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการกระตุ้นจะให้ค่าการซึมผ่านที่สูงกว่า (Hwang *et al.*, 2013) นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นนั้นให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่าในทุกๆปริมาณการเติม ซึ่งที่ปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ที่ 10 พีเอชอาร์ นั้น ให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงที่สุดของฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการกระตุ้น คือ 0.194 และ 0.163 กรัม.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตารางเมตร.กิโล Pascal โดยให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง11)



ภาพที่ 41 ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

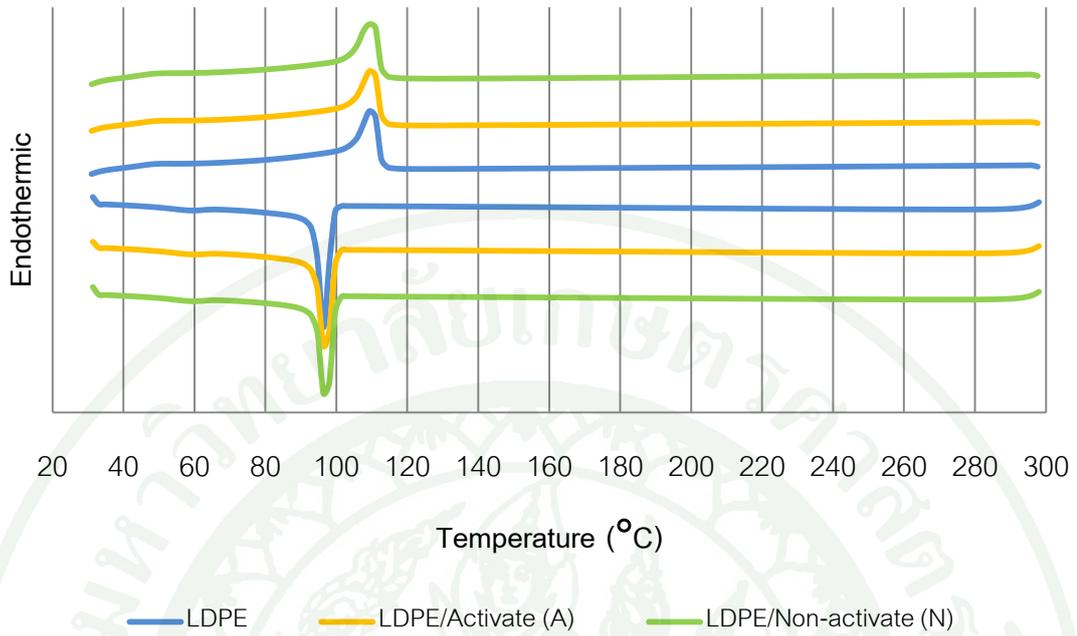
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ทำการทดสอบด้วยเครื่องดีฟฟาเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์แอนาไลเซอร์ (differential scanning calorimetry analyzer, DSC) เพื่อทำการหาอุณหภูมิที่ก่อผลึก (T_c) และ อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ดังภาพที่ 42

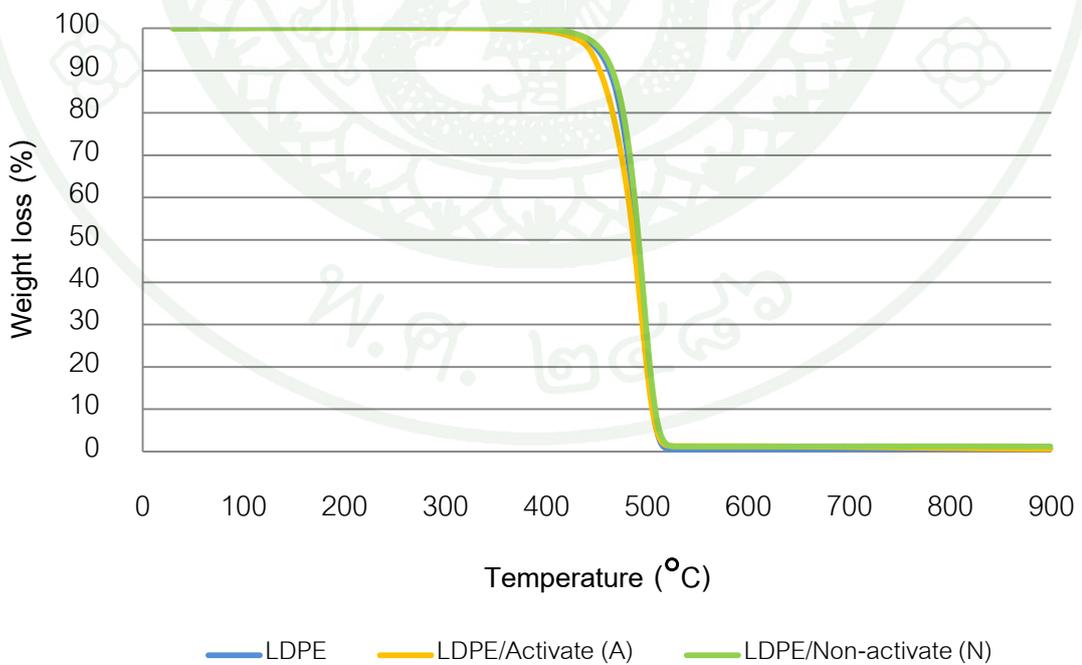
และทดสอบด้วยเครื่องเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) เพื่อทำการหาอุณหภูมิในการเสื่อมสลาย (T_d) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ดังภาพที่ 43 พบว่าสมบัติทางความร้อนของฟิล์มทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงให้เห็นถึงการเติมผงถ่านกัมมันต์ในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไม่ได้มีผลต่ออุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปและการสลายตัวของฟิล์มแต่อย่างใดเนื่องด้วยถ่านกัมมันต์และพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำไม่ได้ทำปฏิกิริยากัน (Hulicova and Oya, 2003) ดังตารางที่ 5 โดยฟิล์มให้ค่าอุณหภูมิก่อนผลึก, อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเสื่อมสลายในช่วง 100 ถึง 101, 112 ถึง 113 และ 491 ถึง 493 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิก่อนผลึก	อุณหภูมิหลอมเหลว	อุณหภูมิเสื่อมสลาย
LDPE	100	112	493
A1	100	113	493
A3	101	112	493
A5	101	112	491
A7	101	112	491
A10	101	112	492
N1	100	113	493
N3	101	112	492
N5	101	112	491
N7	101	112	492
N10	101	112	492



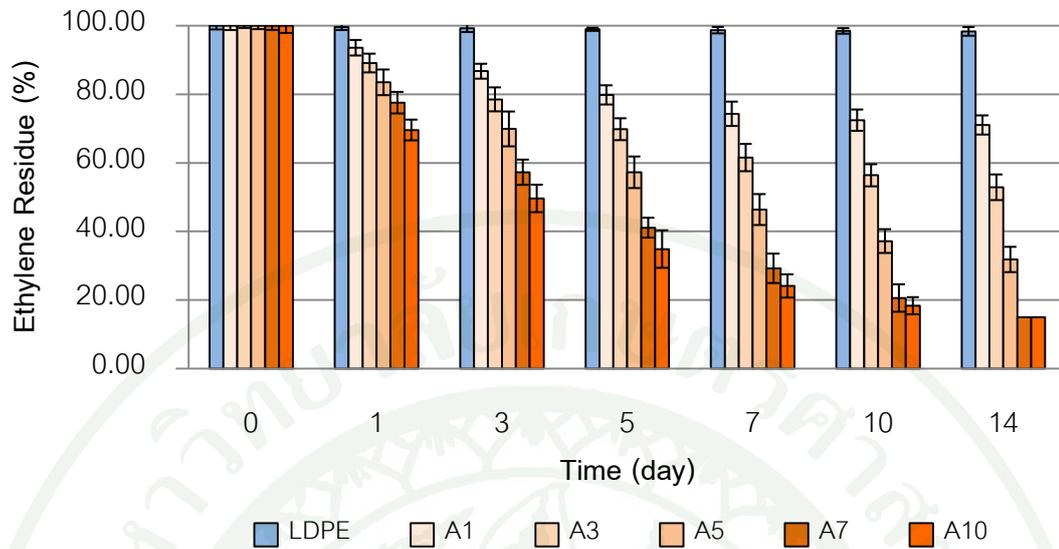
ภาพที่ 42 คุณสมบัติการผลึกและคุณสมบัติหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 43 คุณสมบัติเสื่อมสลายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

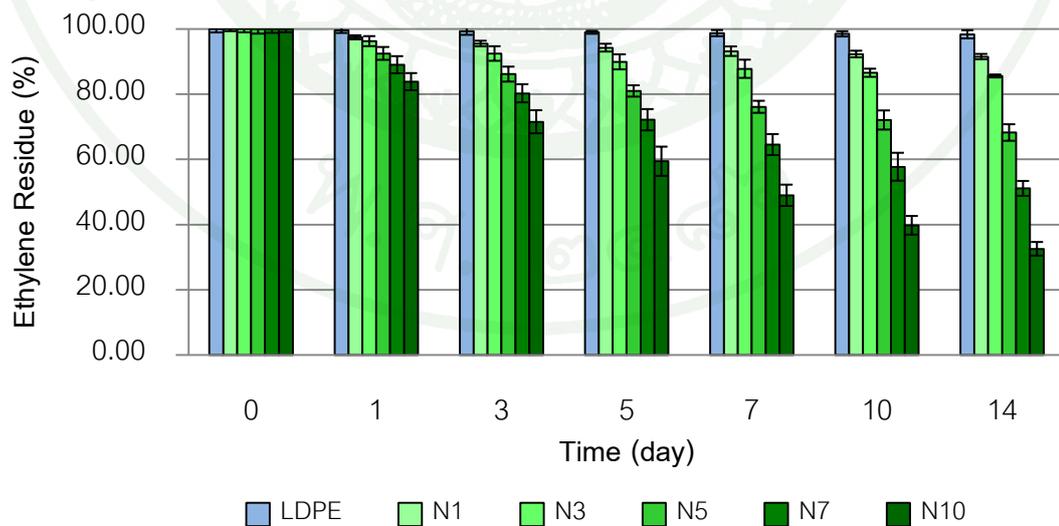
3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากภาพที่ 44 และ 45 ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ส่งผลให้สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) หรือชุดควบคุม ที่ให้ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในระบบในวันที่ 14 เท่ากับ 98.35 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น (A) และฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น (N) พบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ดีกว่า (Hajizadeh *et al.*, 2011) กำจัดก๊าซเอทิลีนได้เร็วกว่า โดยในวันที่ 14 ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นปริมาณ 7 และ 10 พีเอชอาร์ พบว่าเครื่องมือทดสอบไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากเหลือปริมาณก๊าซเอทิลีนในระบบน้อยจนเกินไป ซึ่งบอกได้เพียงมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 15 เท่านั้น สามารถแสดงเป็นภาพเปรียบเทียบฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ผสมถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ที่ชัดเจนในภาพที่ 46 ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมถ่านกัมมันต์นั้น จะมีการกำจัดเอทิลีนได้ในอัตราที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จะสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟลดลง ซึ่งฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น ในวันที่ 14 แสดงค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในระบบน้อยกว่าร้อยละ 15 และฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น แสดงค่าร้อยละ 32.54 ในวันที่ 14 ฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ดีกว่าอย่างมีความแตกต่างในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง12)

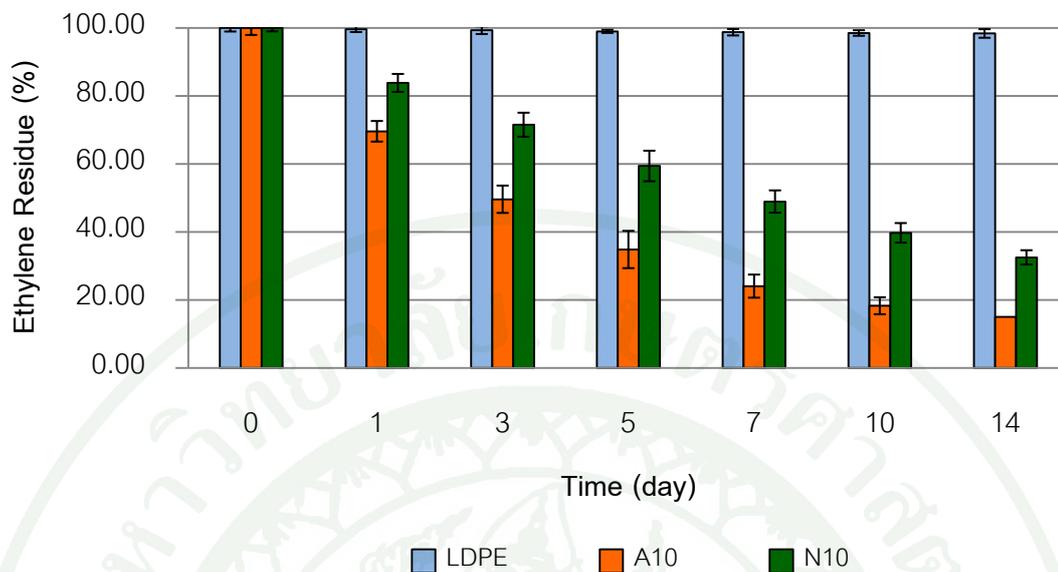


ภาพที่ 44 ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น

หมายเหตุ แผนภูมิแท่ง A7 และ A10 ในวันที่ 14 ไม่แสดงค่าความคลาดเคลื่อน เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ ทราบเพียงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15



ภาพที่ 45 ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



ภาพที่ 46 ค่าร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในขวดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

หมายเหตุ แผนภูมิแท่ง A10 ในวันที่ 14 ไม่แสดงค่าความคลาดเคลื่อน เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ ทราบเพียงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15

4. ประสิทธิภาพการยืดอายุมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

4.1 การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

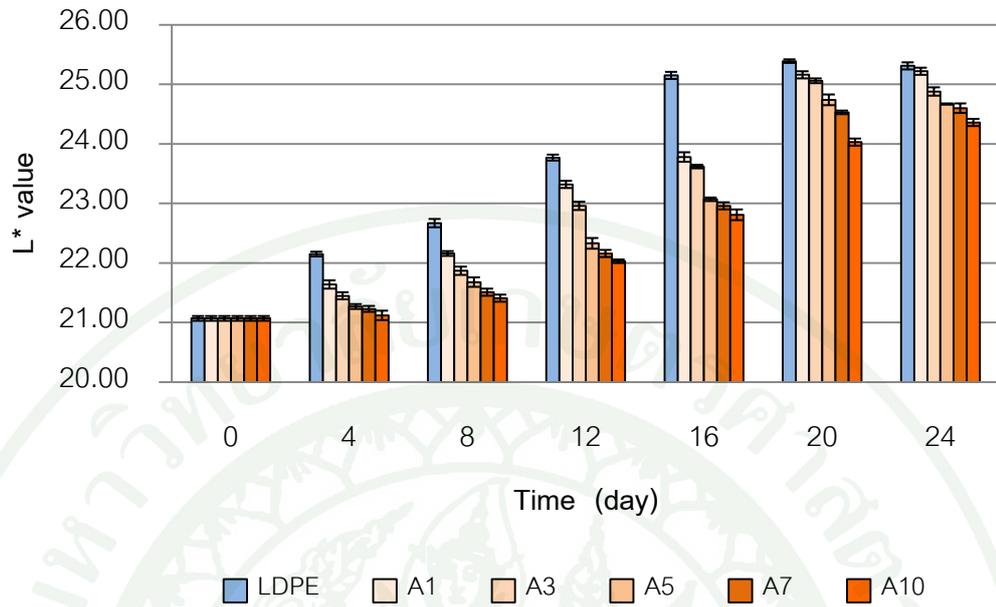
การวัดการเปลี่ยนแปลงสีของสีเปลือกของมะละกอนั้น สามารถบ่งบอกระยะเวลาการสุกตัวของมะละกอได้ โดยสามารถวัดและแสดงออกมาในรูปแบบค่า L^* , a^* และ b^* โดยแต่ละค่านี้แสดง ความหมายของสีที่แตกต่างกันดังนี้

ค่า L^* นั้นแสดงถึงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่า 0 คือสีดำ และ ค่า 100 คือมีความสว่างที่สุด ค่า a^* นั้นแสดงค่าความเป็นสีเขียว-แดง เมื่อเป็นค่าลบจะแสดงเป็นสีเขียว และเมื่อเป็นค่าบวก จะแสดงเป็นสีแดง หากค่าเป็น 0 นั้นจะแสดงเป็นสีเทา และค่า b^* แสดงค่า

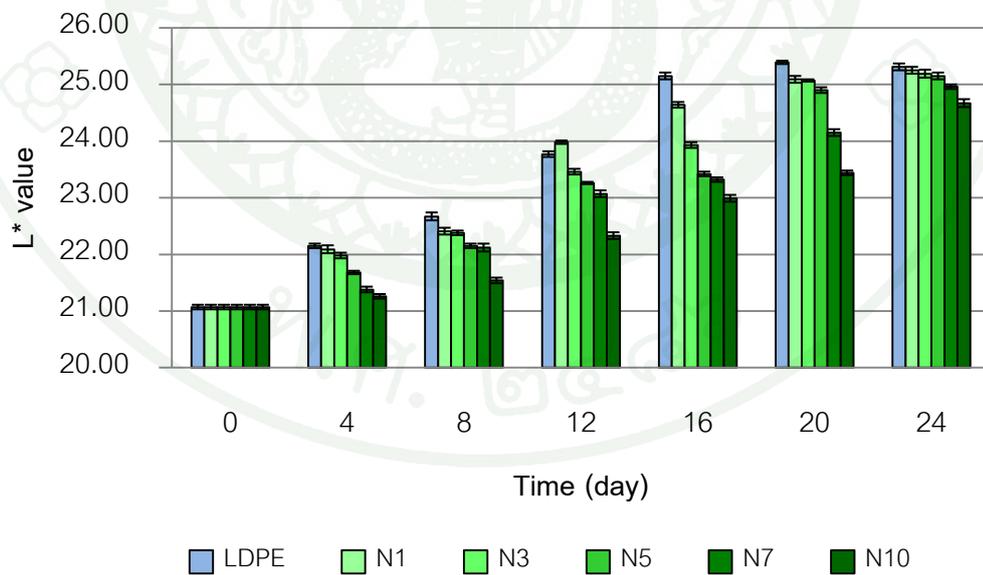
ความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง โดยจะแสดงค่าความเป็นสีเหลืองเมื่อมีค่าลบ เมื่อแสดงค่าเป็นบวกจะแสดงค่าความเป็นสีเหลือง หากมีค่าเป็น 0 จะแสดงสีเทา โดยค่า a^* และ b^* จะมีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 128 (Javad *et al.*, 2010)

4.1.1 ค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

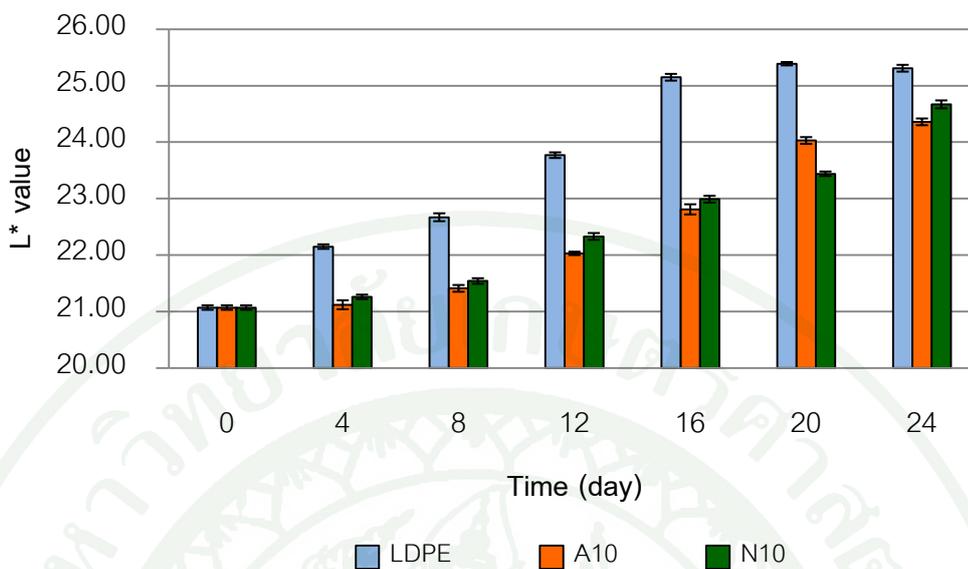
ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 47 และ 48 โดยจะเห็นว่าค่าความสว่างของเปลือกมะละกอนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดในชุดควบคุม (LDPE) ซึ่งค่าความสว่างจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดลอง และมีแนวโน้มคงที่ถึงลดลงเล็กน้อยในระยะเวลาต่อมา ซึ่งสาเหตุที่ค่าความสว่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกของการทดลองนั้นมาจากการสุกตัวของมะละกอ สีเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีเหลืองส้ม ต่อมามีแนวโน้มคงที่ถึงลดต่ำลงในระยะเวลาคือเนื่องจากเอนไซม์ในมะละกอมีการผลิตเม็ดสีน้ำตาลที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสว่างของมะละกอนั้นมีแนวโน้มที่คงที่จนถึงลดต่ำลง (Guerrero-Beltrana *et al.*, 2004) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมลงไปฟิล์มนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ จะส่งผลให้มีการชะลอการเพิ่มขึ้นของค่าความสว่างโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ให้ค่าความสว่างในช่วง 21.07 ถึง 25.39 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีการชะลอตัวของค่าความสว่างที่มากที่สุดคือ 10 พีเอชอาร์ ดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ 49 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นมาแล้วจะสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มะละกอได้ปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าดังกล่าวในหัวข้อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในปริมาณ 10 พีเอชอาร์ จะให้ค่าความสว่างในช่วง 21.07 ถึง 24.36 และฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ให้ค่าความสว่างในช่วง 21.07 ถึง 24.67 ซึ่งสรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง 13)



ภาพที่ 47 ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



ภาพที่ 48 ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น

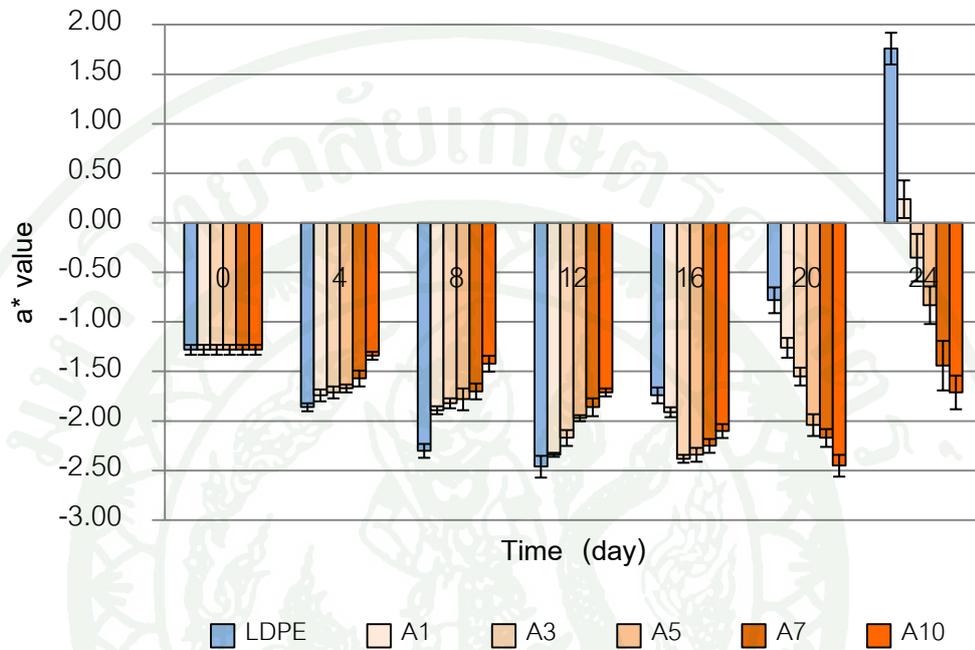


ภาพที่ 49 ค่าความสว่างของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

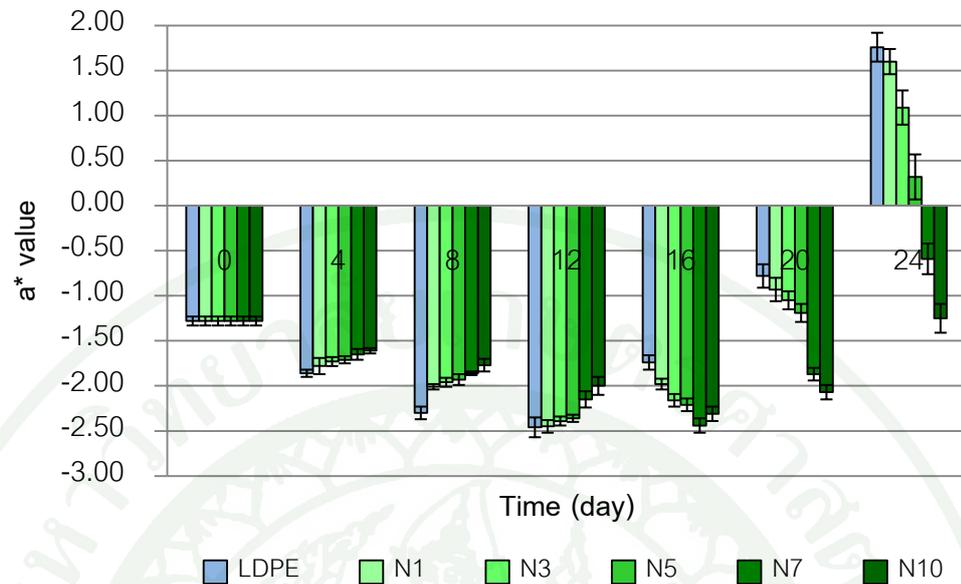
4.1.2 ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายนั้นแสดงดังภาพที่ 50 และ 51 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกจะมีค่าลบที่มากขึ้น แสดงถึงค่าความเป็นสีเขียวในช่วงแรก และมีค่าที่เพิ่มขึ้นจนเป็นค่าบวกที่แสดงค่าความเป็นสีแดง ทั้งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสีของสีเปลือกมะละกอจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน เหลือง เหลืองส้ม และเข้าสู่สีส้มในที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากชุดควบคุม (LDPE) ในช่วงหลังนั้นมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากมะละกอมีการสร้างเม็ดสีแดงหรือแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ขึ้นทดแทนสีเขียว โดยเกิดจากการสุกตัวของมะละกอ (Fuggate *et al.*, 2010) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ลงในฟิล์ม สามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเขียว-แดงได้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งแสดงค่าความเป็นสีเขียว-แดงในช่วง -2.46 ถึง 1.76 และเมื่อเปรียบเทียบกันปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการชะลอค่าความเป็นสีเขียว-แดงมากที่สุด คือ ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ดังภาพที่ 52 พบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ นั้น แสดงค่าในช่วง -2.45 ถึง -1.28 โดยให้ประสิทธิภาพในการชะลอค่าความเป็นสีเขียว-แดงได้ดีกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์

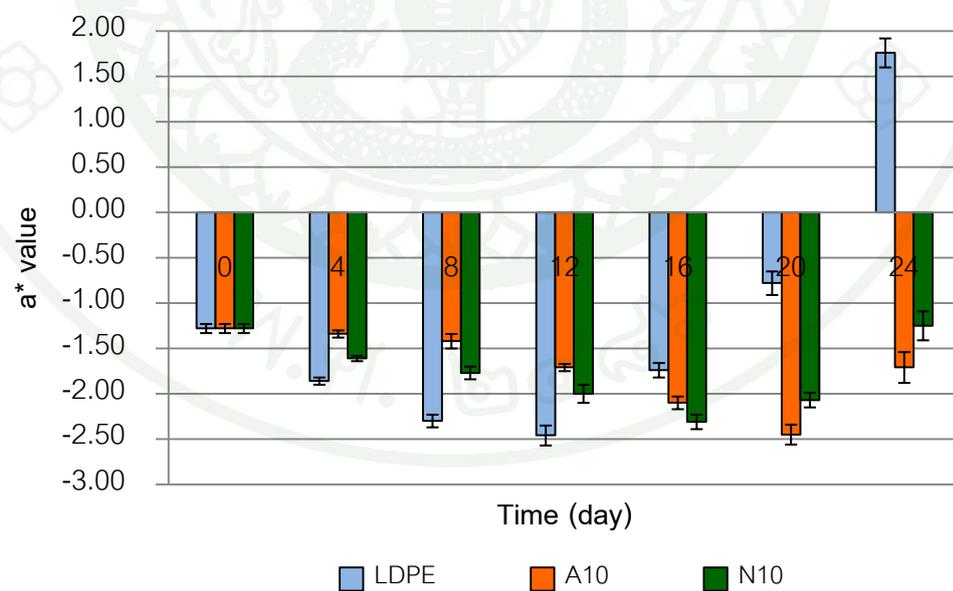
ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ที่ให้ค่าในช่วง -2.31 ถึง -1.25 ซึ่งให้ความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง14)



ภาพที่ 50 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอฟันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



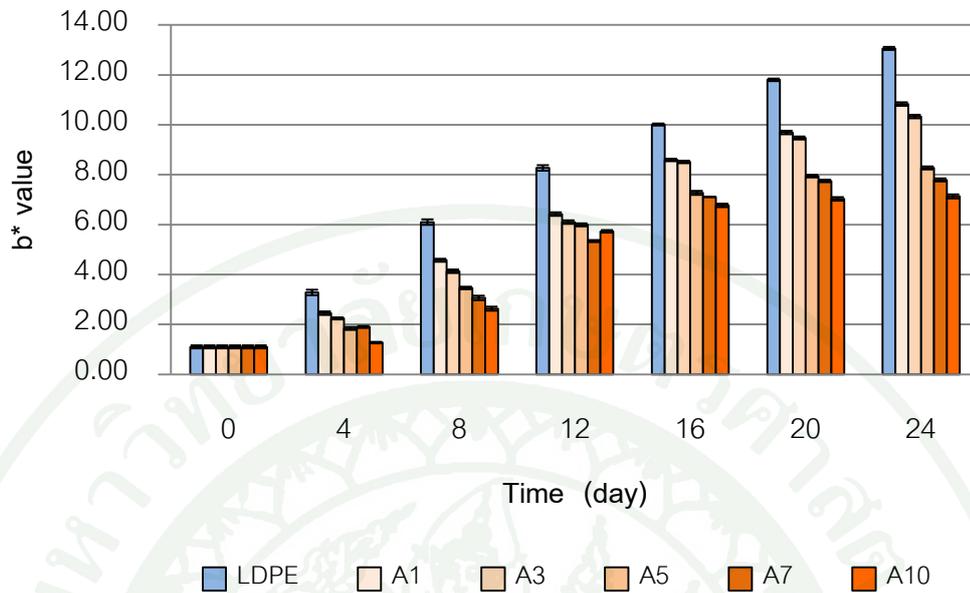
ภาพที่ 51 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



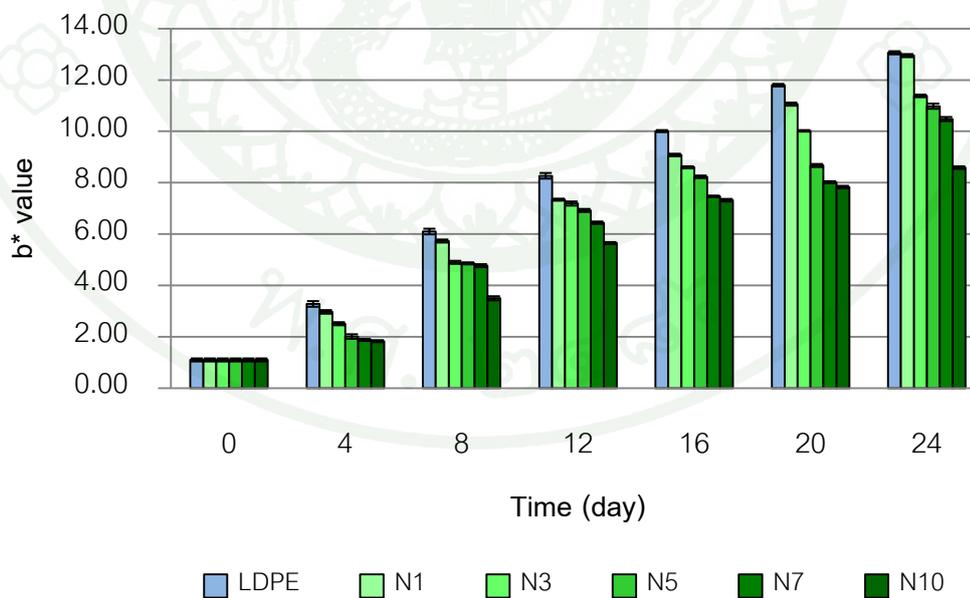
ภาพที่ 52 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

4.1.3 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

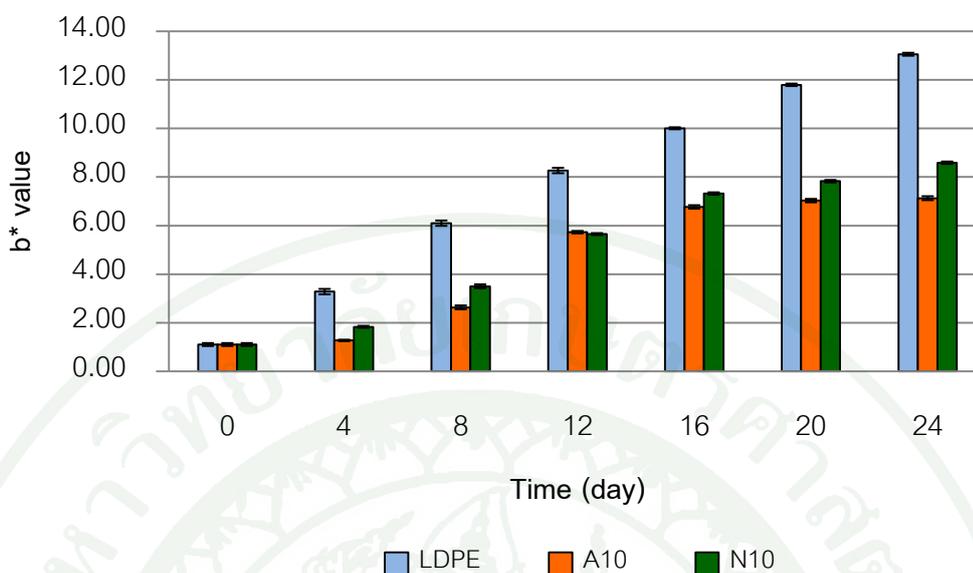
จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ดังภาพที่ 53 และ 54 พบว่าค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเจนในชุดควบคุม (LDPE) ที่แสดงค่าในช่วง 1.10 ถึง 13.06 ซึ่งเป็นเหตุผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสีของมะละกอ โดยปกติแล้วผลไม้มักจะมีการสร้างเม็ดสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ขึ้นมา แต่เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจะมีการสร้างเม็ดสีอื่นขึ้นมาทดแทน และยังเป็นการกระตุ้นการทำลายคลอโรฟิลล์อีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงสีเขียวเป็นสีเหลืองและส้ม ค่าความเป็นสีน้ำเงินและสีเหลืองจึงเพิ่มขึ้น (दनัย, 2547) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมในฟิล์ม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ในฟิล์มส่งผลให้ชะลอการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองตามปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เติม และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ดังภาพที่ 55 พบว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นนั้นช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองได้มากกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น โดยฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ให้ค่าความเป็นสีน้ำเงินเหลืองในช่วง 1.10 ถึง 7.13 และฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ แสดงค่าในช่วง 1.10 ถึง 8.59 และสามารถสรุปได้ว่าการชะลอการสุกตัวของมะละกอมีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง15)



ภาพที่ 53 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



ภาพที่ 54 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



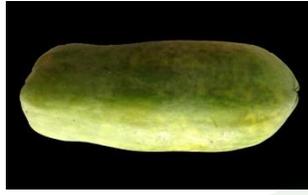
ภาพที่ 55 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

4.1.4 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

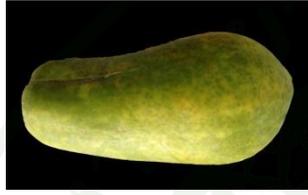
ลักษณะปรากฏของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่า เปลือกมะละกอมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่เขียว เขียวอ่อน เหลือง เหลืองส้ม จนกระทั่งเป็นสีส้ม และเกิดการเน่าตัวในที่สุด โดยในวันที่ 16 ของการเก็บรักษา เริ่มมีการเกิดราขาวและราดำขึ้นในมะละกอที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) อย่างชัดเจน ในทางกลับกันพบว่ามะละกอที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษามะละกอได้นานที่สุด ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของมะละกอโดยลักษณะปรากฏยังเป็นที่ยอมรับได้นานถึง 20 วัน ในขณะที่ชุดควบคุมนั้นให้อายุการเก็บรักษาโดยลักษณะปรากฏยังเป็นที่ยอมรับเพียง 12 วันเท่านั้น



ภาพที่ 56 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายในวันที่ 0 (ก่อนการเก็บรักษา)



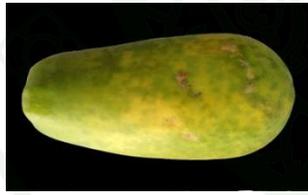
A10



A7



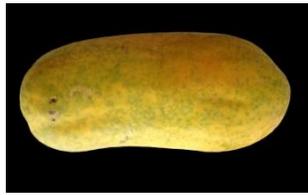
A5



A3



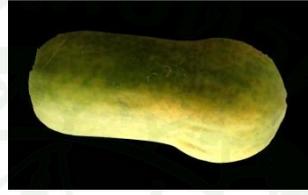
A1



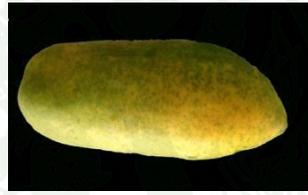
LDPE



N10



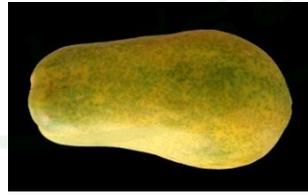
N7



N5

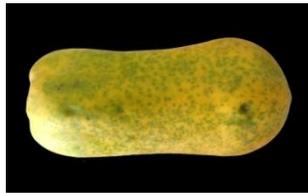


N3



N1

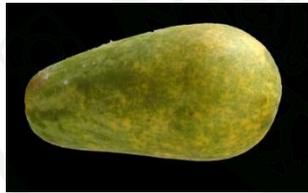
ภาพที่ 57 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลัดังได้โดย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 4 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



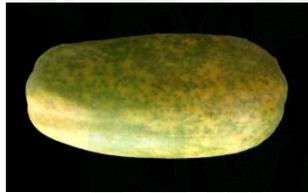
LDPE



A1



A3



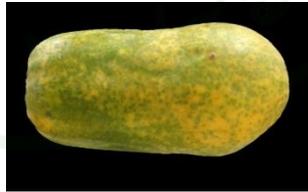
A5



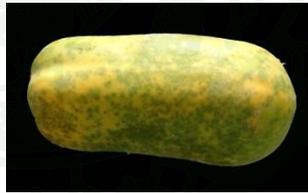
A7



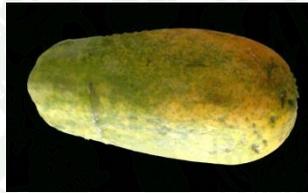
A10



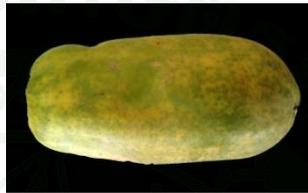
N1



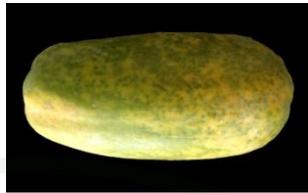
N3



N5



N7



N10

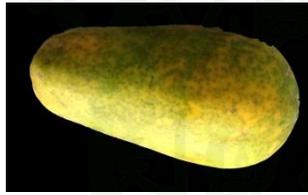
ภาพที่ 58 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ได้ยว ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 8 ที่เก็บร่วมกับพีดีเอ็ม



A10



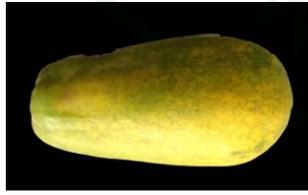
A7



A5



A3



A1



LDPE



N10



N7



N5



N3



N1

ภาพที่ 59 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ได้ฉาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 12 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



LDPE



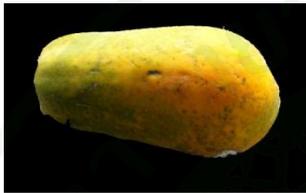
A1



A3



A5



A7



A10



N1



N3



N5



N7



N10

ภาพที่ 60 ลักษณะปรากฏสีเปลือกของมะละกอฟันธุ์ปลูกไม่ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 16 ที่เก็บร่วมกับพีดีเอ็ม



A10



A7



A5



A3



A1



LDPE



N10



N7



N5



N3



N1

ภาพที่ 61 ลักษณะปรากฏวัสดุเปลือกของมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 20 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



A10



A7



A5



A3



A1



LDPE



N10



N7



N5



N3



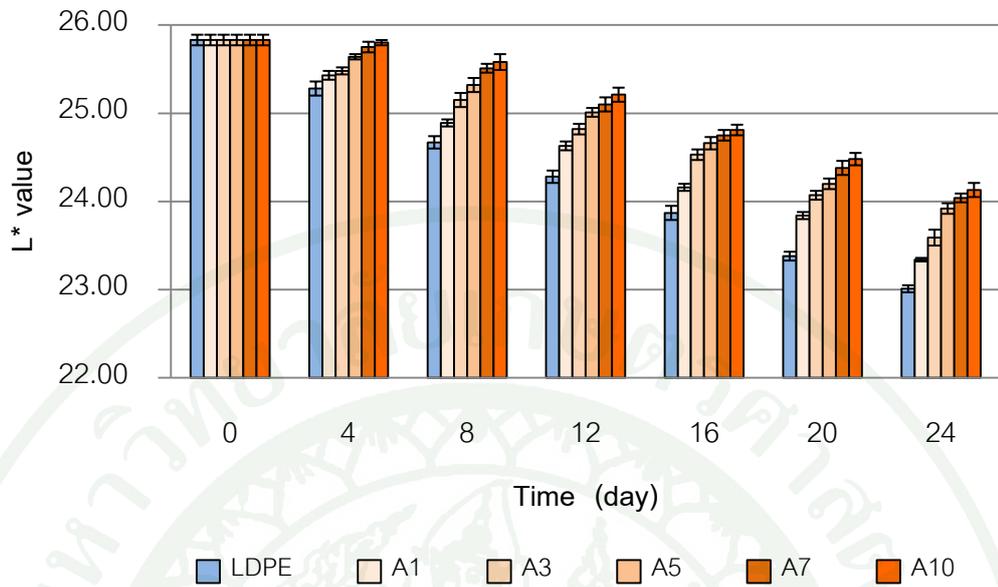
N1

ภาพที่ 62 ลักษณะปรากฏเมื่อสังเกตของมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ได้ย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 24 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม

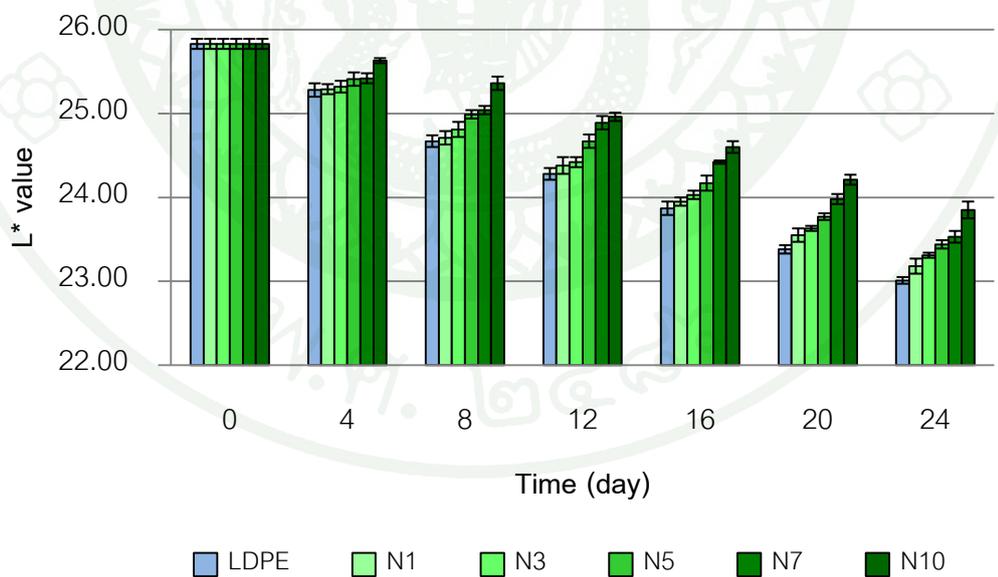
4.2 การเปลี่ยนแปลงสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

4.2.1 ค่าความสว่าง (L*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

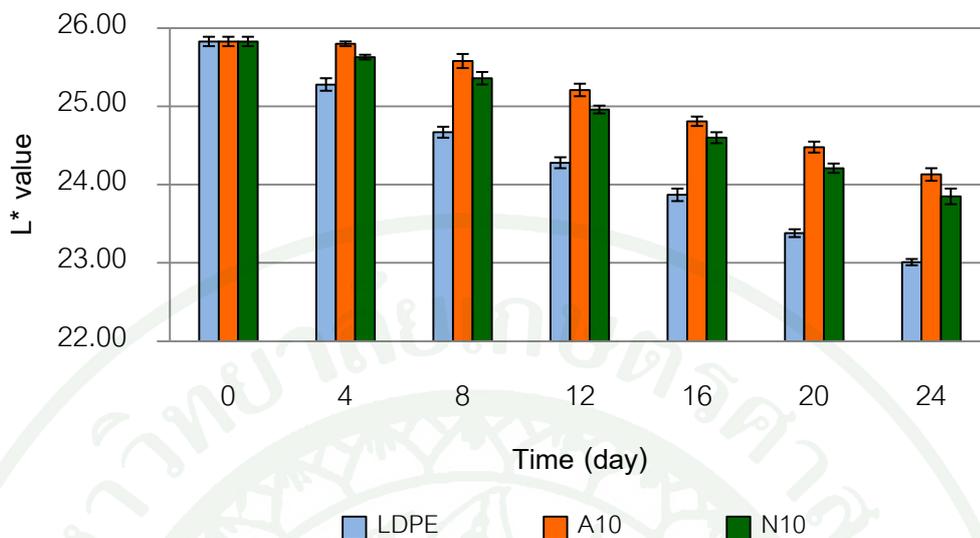
ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 63 และ 64 โดยจะเห็นว่าค่าความสว่างของเปลือกมะละกอนั้นมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดในชุดควบคุม (LDPE) ที่แสดงค่าความสว่างในช่วง 23.01 ถึง 25.83 โดยค่าความสว่างจะลดลงตลอดการทดลอง ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าความสว่างของสีเปลือกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสุกตัวของมะละกอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปิยนากและคณะ (2553) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมลงไปนั้นพบว่า เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่ม ส่งผลให้ชะลอการลดลงของค่าความสว่าง โดยเมื่อเปรียบเทียบการชะลอการลดลงของค่าความสว่างที่มากที่สุด อยู่ที่ปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ที่ 10 พีเอชอาร์ ดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ 65 โดยให้เหตุผลเดียวกับค่าความสว่างของเปลือกคือถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นมาแล้วจะสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มะละกอได้ปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ดังกล่าวในหัวข้อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ แสดงค่าความสว่างในช่วง 24.13 ถึง 25.83 และฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ แสดงค่าในช่วง 23.85 ถึง 25.83 ซึ่งแสดงความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง 16)



ภาพที่ 63 ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลัดขังไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



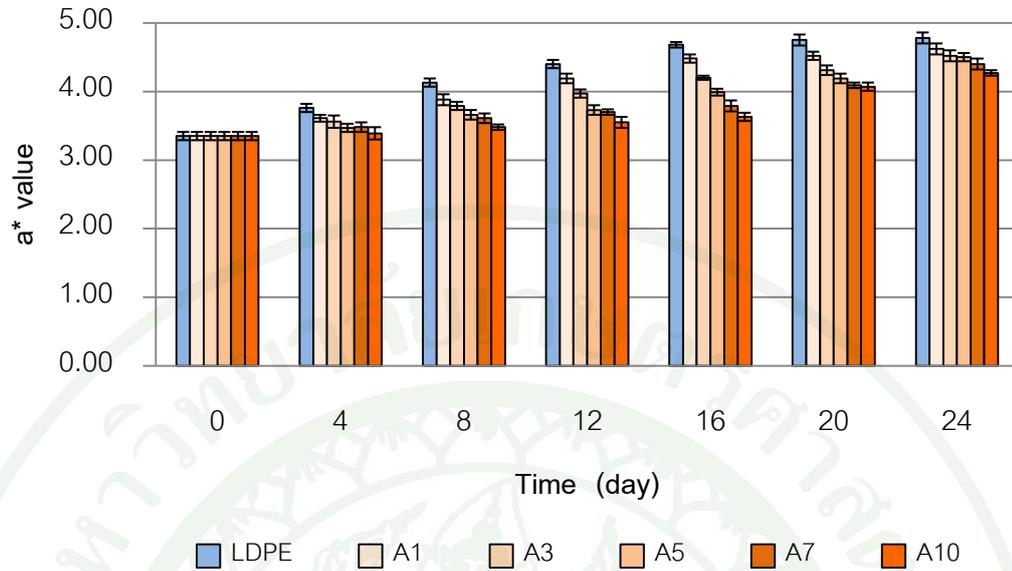
ภาพที่ 64 ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลัดขังไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



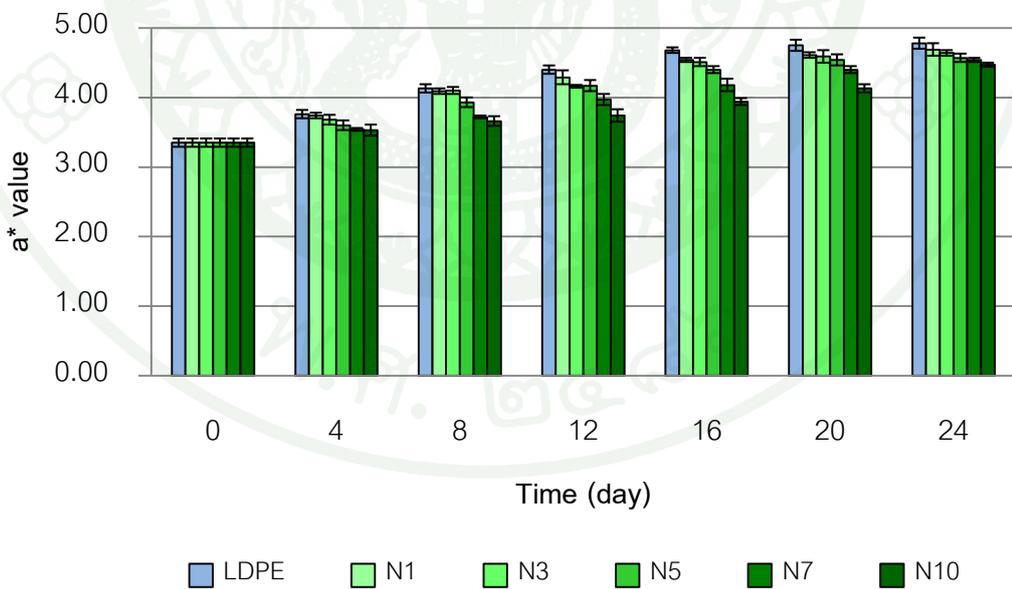
ภาพที่ 65 ค่าความสว่างของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

4.2.2 ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

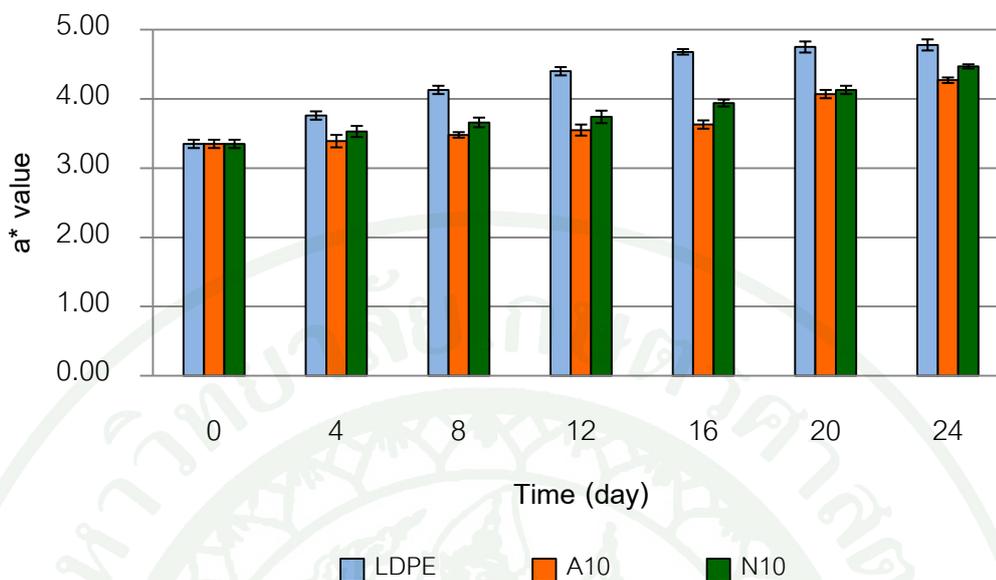
ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายนั้นแสดงดังภาพที่ 66 และ 67 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่าความเป็นสีเขียว-แดงมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นในทุกชุดการทดลอง แสดงถึงการสุกตัวของเนื้อมะละกอที่มีความสัมพันธ์มากขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของปิยนาดและคณะ (2553) อีกเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ลงในฟิล์ม สามารถช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นค่าความเป็นสีเขียว-แดงได้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ให้ค่าความเป็นสีเขียว-แดงในช่วง 3.35 ถึง 4.78 อีกประการหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการชะลอค่าความเป็นสีเขียว-แดงมากที่สุดคือ ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ดังภาพที่ 68 พบว่าฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นนั้นให้ค่าความเป็นสีเขียว-แดงในช่วง 3.35 ถึง 4.27 ซึ่งให้การเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นในช่วง 3.35 ถึง 4.47 ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ให้ประสิทธิภาพในการชะลอการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีเขียว-แดงหรือการสุกตัวได้ดีกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ อย่างแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง17)



ภาพที่ 66 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



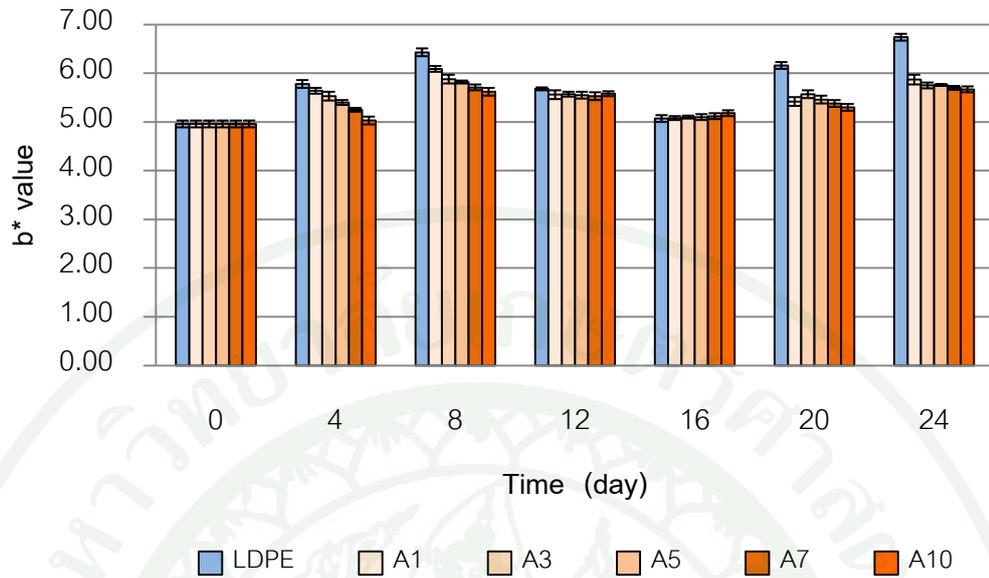
ภาพที่ 67 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



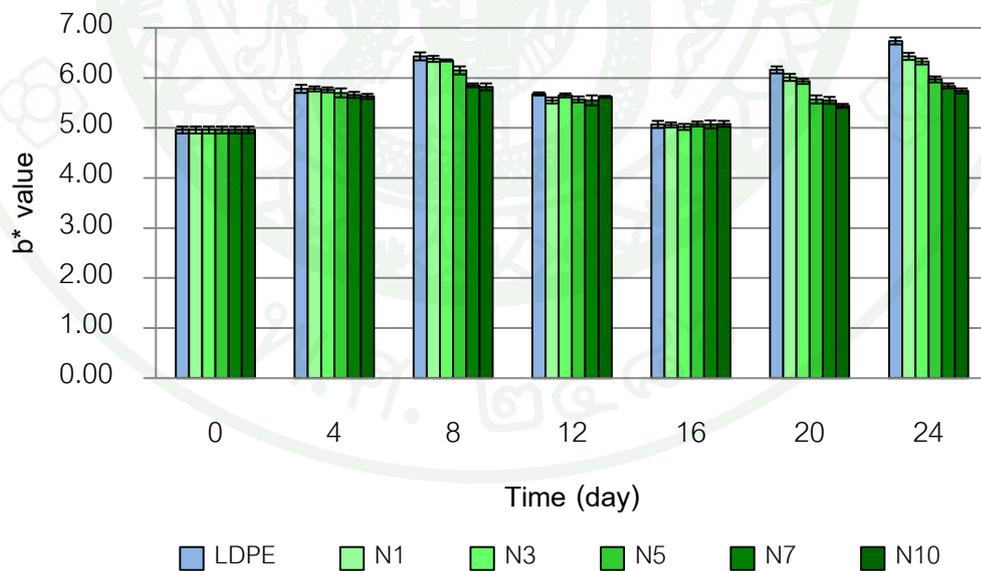
ภาพที่ 68 ค่าความเป็นสีเขียว-แดงของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

4.2.3 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

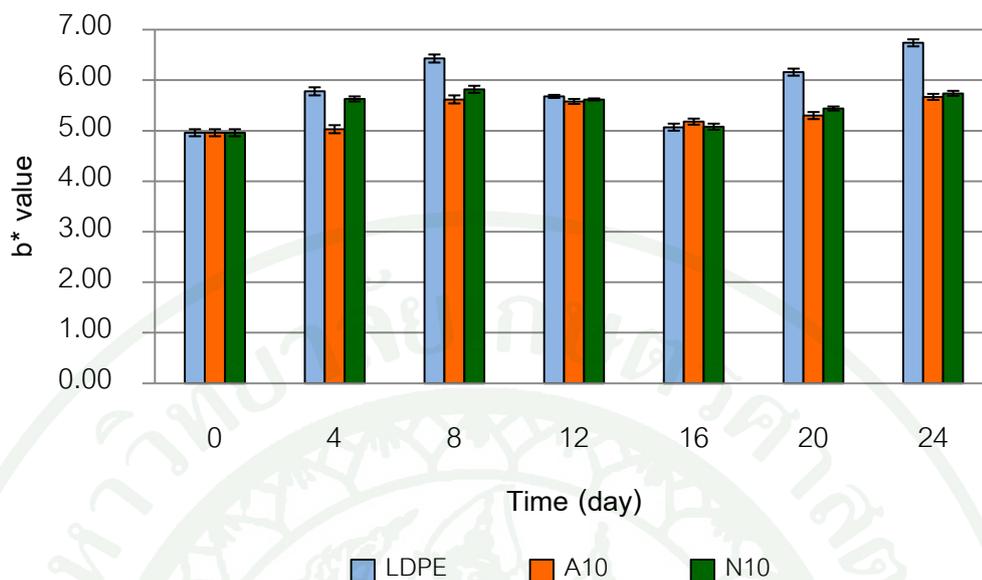
จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย ดังภาพที่ 69 และ 70 พบว่าค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ลดลงในช่วงที่สอง และกลับมาเพิ่มขึ้นอีกในช่วงสุดท้าย ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐวดี (2555) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมในฟิล์ม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ในฟิล์ม ส่งผลให้ชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองตามปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เติมโดยเทียบจากชุดควบคุมที่ให้ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองในช่วง 4.96 ถึง 6.74 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ ดังภาพที่ 71 พบว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นนั้นให้ค่าในช่วง 4.96 ถึง 5.67 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองน้อยกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นที่ให้ค่าในช่วง 4.96 ถึง 5.82 แสดงถึงฟิล์มที่ผสมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 พีเอชอาร์ มีการชะลอการสุกตัวของมะละกอได้แตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง18)



ภาพที่ 69 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



ภาพที่ 70 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



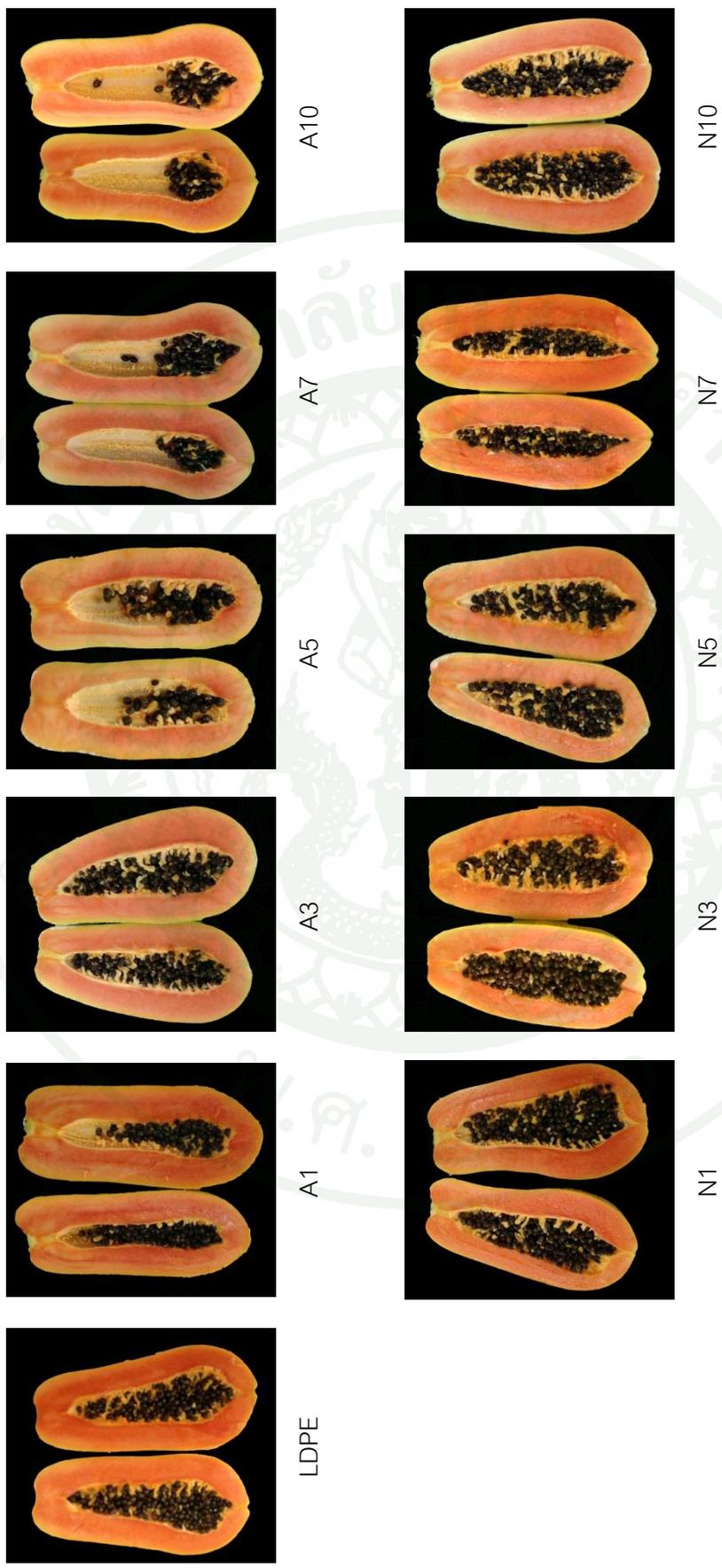
ภาพที่ 71 ค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

4.2.4 ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

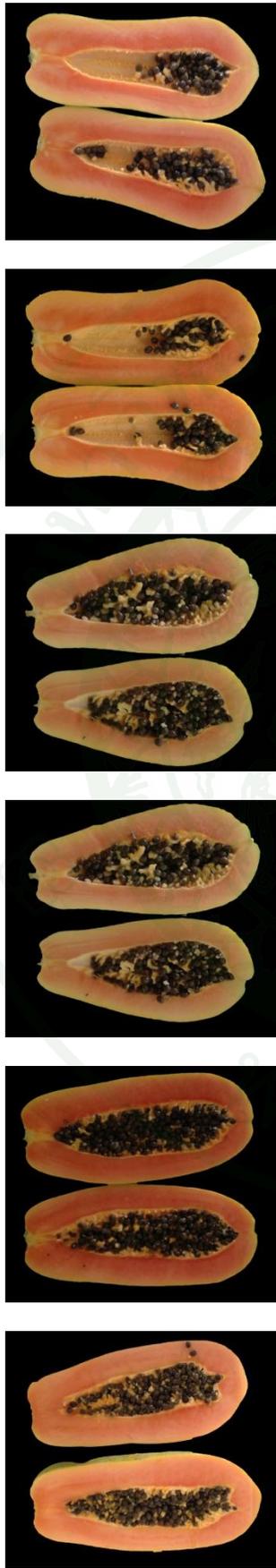
ลักษณะปรากฏของสีเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่า เนื้อมะละกอมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่เขียว ส้มขาว ส้มอ่อน จนกระทั่งเป็นสีส้ม และเกิดการเน่าตัวในที่สุด โดยในวันที่ 12 ของการเก็บรักษาเริ่มมีการเกิดราขาวและราดำขึ้นในเนื้อมะละกอ ทั้งยังมีเนื้อที่มีลักษณะสุกมาก ที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE), ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นปริมาณ 1 และ 3 พีเอชอาร์ บริเวณข้ออย่างชัดเจน ในทางกลับกันพบว่ามะละกอที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์ มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษามะละกอได้นานที่สุด ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของมะละกอโดยลักษณะปรากฏยังเป็นที่ยอมรับได้นานถึง 20 วัน ในขณะที่ชุดควบคุมนั้นให้อายุการเก็บรักษาโดยลักษณะปรากฏยังเป็นที่ยอมรับเพียง 8 วันเท่านั้น



ภาพที่ 72 ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายในวันที่ 0 (ก่อนการเก็บรักษา)



ภาพที่ 73 ลักษณะปลากุ้งสีเนื้อของมะละกอดกพันธุ์ปลัดังไม่ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 4 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



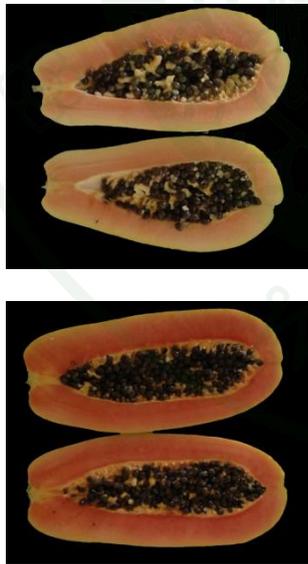
LDPE

A10



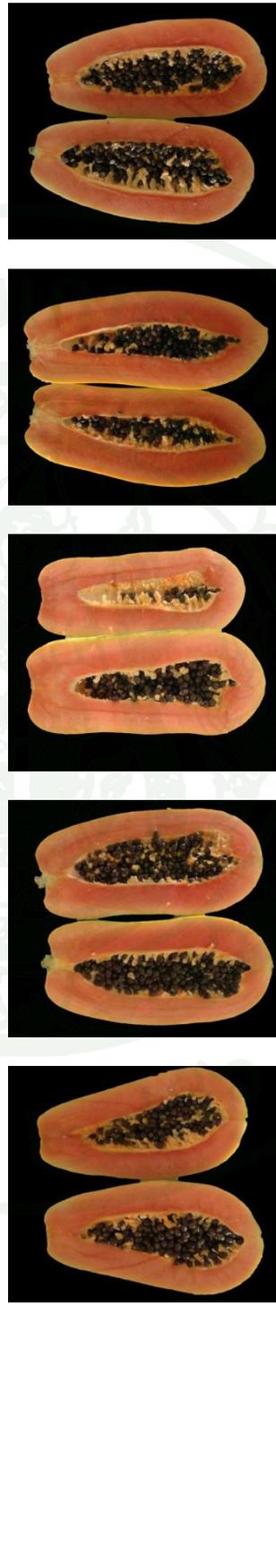
A1

A7



A3

A5



N1

N3

N5

N7

N10

ภาพที่ 74 ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 8 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



A10



A7



A5



A3



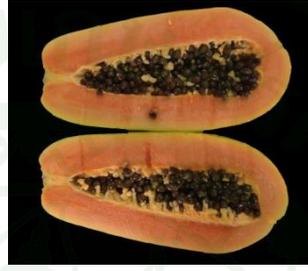
A1



LDPE



N10



N7



N5



N3



N1

ภาพที่ 75 ลักษณะเปลือกไม้ของมะเดื่อภาคพื้นรูปได้ 1 ไม่ได้ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 12 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



A10



A7



A5



A3



A1



LDPE



N10



N7



N5



N3



N1

ภาพที่ 76 ลักษณะเปลือกไม้ของมะเดื่อภาคพื้นรูปได้ 1 ไม่ได้ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้ง 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 16 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



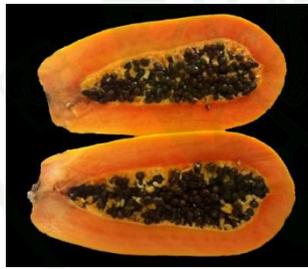
A10



A7



A5



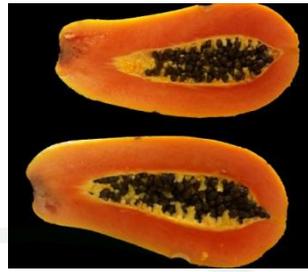
A3



A1



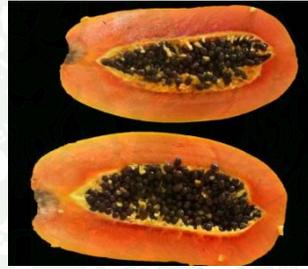
LDPE



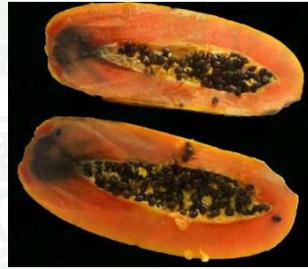
N10



N7



N5

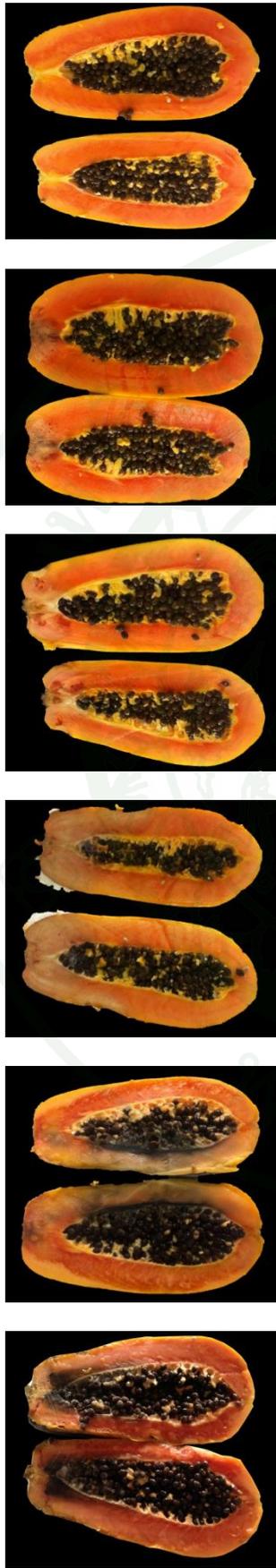


N3



N1

ภาพที่ 77 ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปดักไม่ตาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 20 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม



A10

A7

A5

A3

A1

LDPE

N10

N7

N5

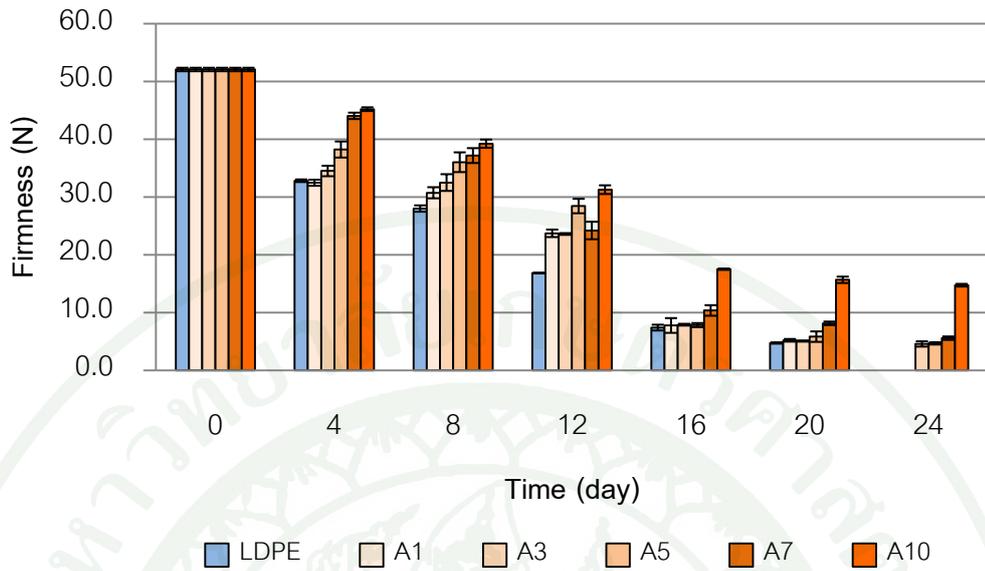
N3

N1

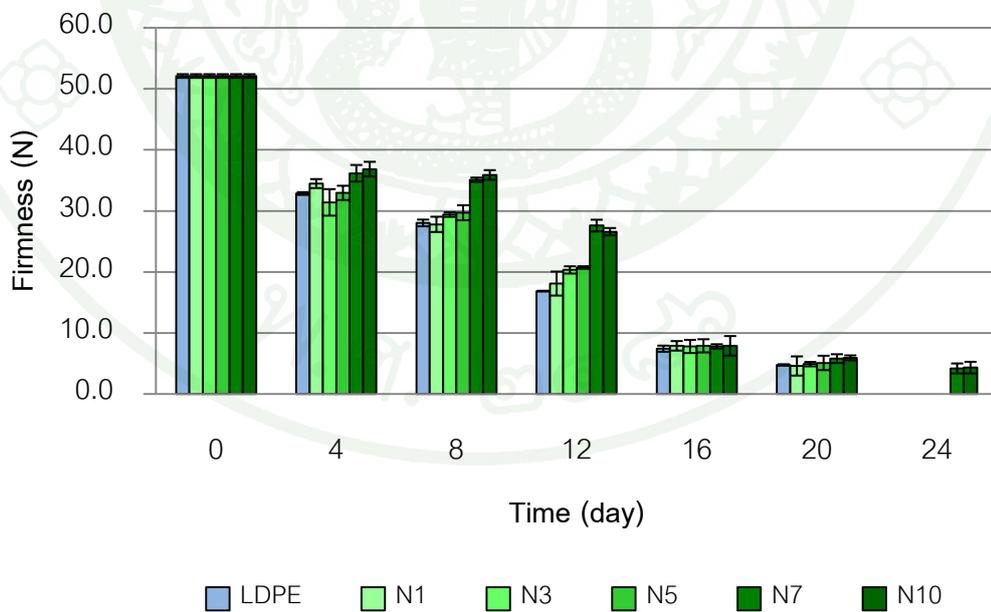
ภาพที่ 78 ลักษณะปรากฏสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม่ลาย ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 24 ที่เก็บร่วมกับฟิล์ม

4.3 ความแน่นเนื้อ (firmness) ของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

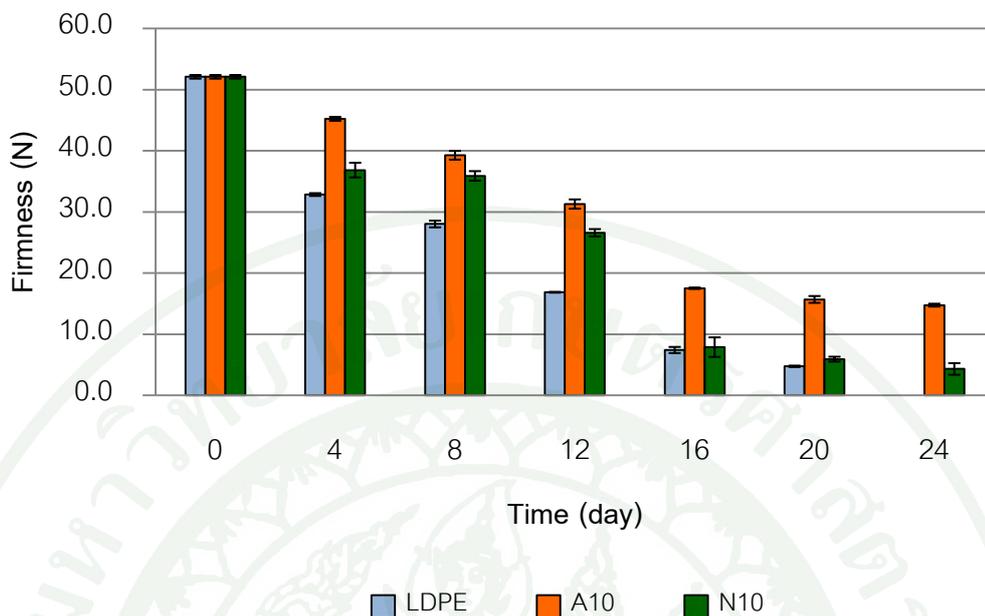
จากการศึกษาความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 79 และ 80 พบว่าค่าความแน่นเนื้อมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงในทุกชุดการทดลองเมื่อเวลาในการเก็บรักษาผ่านไป สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่การทดลองชุดควบคุม (LDPE) ซึ่งความนุ่มตัวของมะละกอเป็นผลมาจากการสลายตัวของเพคติน (pectin) ในกระบวนการสุกของมะละกอ (Ali *et al.*, 2004) โดยมีกลไกจากการเพิ่มปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผนังของเพคตินนั่นเอง (Ali *et al.*, 2011) ด้วยเหตุนี้การเก็บรักษาในวันที่ 24 นั้นไม่สามารถวัดค่าความแน่นเนื้อได้บางชุดการทดลอง คือ มะละกอที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ, ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นปริมาณ 1 พีเอชอาร์ และฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นปริมาณ 1, 3 และ 5 พีเอชอาร์ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอมีการลดลงที่น้อยกว่า โดยปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมเท่ากับ 10 พีเอชอาร์ แสดงค่าความแน่นเนื้อสูงสุดที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบเมื่อนำปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 10 พีเอชอาร์เปรียบเทียบกันดังภาพที่ 81 ผลคือฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นให้ค่าความแน่นเนื้อในวันที่ 24 เท่ากับ 14.8 นิวตัน ซึ่งให้ค่าสูงกว่าฟิล์มผสมถ่านที่ไม่กระตุ้นในวันที่ 24 ที่แสดงค่า 4.3 นิวตัน โดยแสดงความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง19)



ภาพที่ 79 ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



ภาพที่ 80 ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น

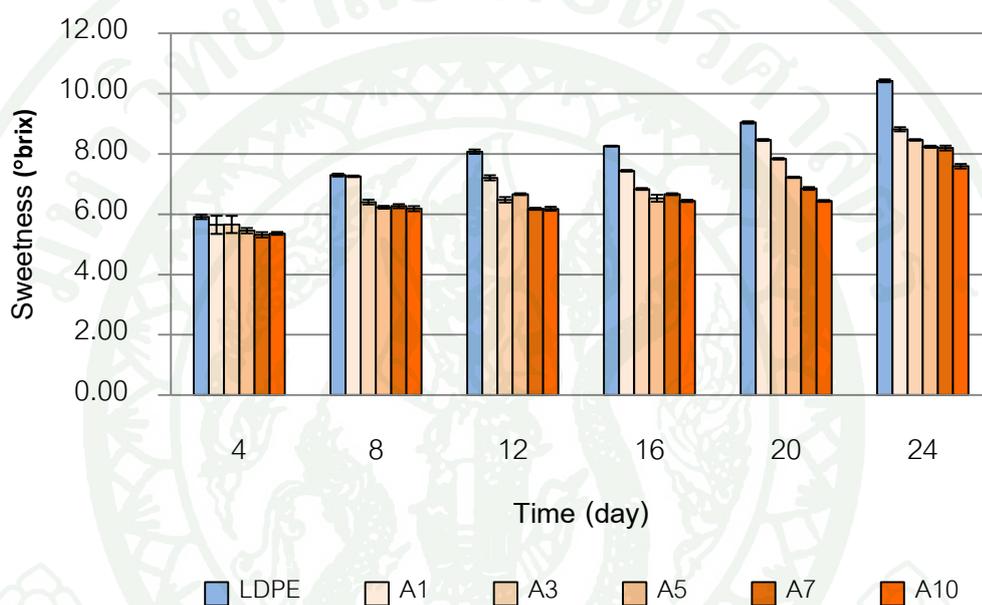


ภาพที่ 81 ค่าความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

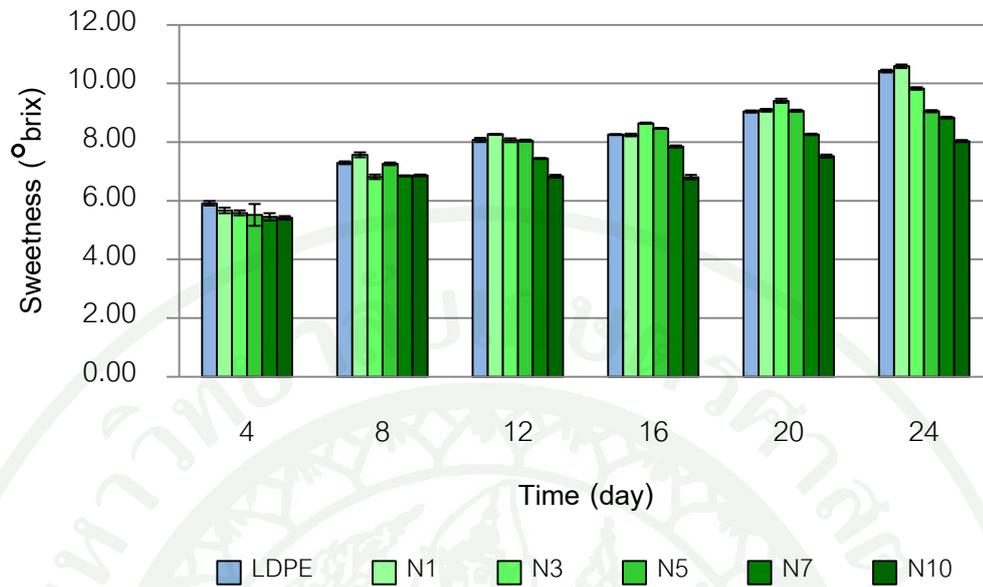
4.4 ความหวาน (sweetness) ของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

จากการศึกษาความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 82 และ 83 พบว่าค่าความหวานมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในทุกชุดการทดลองเมื่อเวลาในการเก็บรักษาผ่านไป สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่การทดลองชุดควบคุม (LDPE) โดยค่าความหวานนั้นเป็นสัดส่วนระหว่างของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดในเนื้อผลไม้ (Camargo *et al.*, 2007) และเมื่อเวลาในการเก็บรักษาของมะละกอเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมากขึ้นตามกลไกเดียวกับค่าความแน่นเนื้อ นอกจากนี้ยังมีปริมาณกรดในเนื้อมะละกอเพิ่มขึ้นด้วย (González-Aguilar *et al.*, 2003) ซึ่งในวันที่ 0 (ก่อนการเก็บรักษา) ไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากไม่สามารถบีบคั้นน้ำได้ โดยสามารถวัดค่าได้ตั้งแต่วันที่ 4 เป็นต้นไป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ค่าความหวานของมะละกอนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นที่ช้าลง โดยปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมเท่ากับ 10 พีเอชอาร์ แสดงค่าความหวานที่ต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ให้ค่าความหวานในช่วง 5.91 ถึง 10.42 องศาบริกซ์ และเมื่อนำปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 10 พีเอช

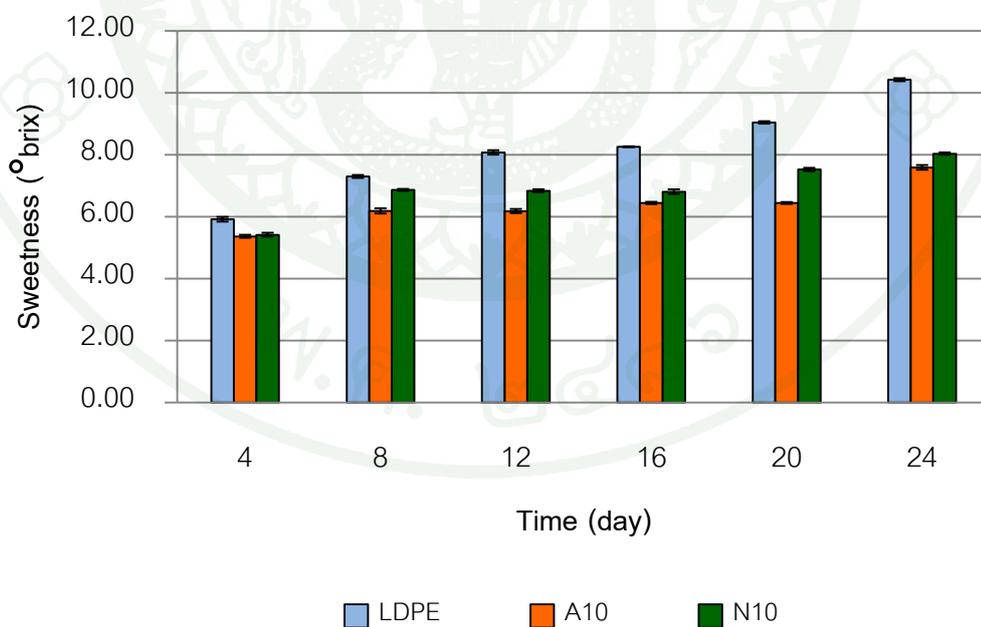
อาร์เปรียบเทียบกับดังภาพที่ 84 ผลคือมะละกอที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสม ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นให้ค่าความหวานในช่วง 5.36 ถึง 7.59 องศาบริกซ์ ซึ่งต่ำกว่า ฟิล์ม พอลิเอทิลีนผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นในช่วง 5.42 ถึง 8.04 องศาบริกซ์ แสดงถึง ความสามารถในการชะลอความสุกตัวของมะละกอได้อย่างแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) (ภาคผนวก ง20)



ภาพที่ 82 ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น



ภาพที่ 83 ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลูกไม้ตายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้น



ภาพที่ 84 ค่าความหวานของมะละกอพันธุ์ปลูกไม้ตายที่ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์หลังและก่อนการกระตุ้นปริมาณ 10 พีเอชอาร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีคือ กรด ต่าง และโลหะคลอไรด์ ในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์นั้นประเมินได้จาก การมีปริมาณสารระเหยที่ต่ำและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูง จากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร การมีธาตุคาร์บอนที่สูงจากการวิเคราะห์แยกธาตุ และมีค่าการดูดซับต่างๆที่สูง จากการศึกษาพบว่าพบว่าสารละลายกรดซัลฟูริก ในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายโดยน้ำหนักเท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิการกระตุ้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด โดยให้ค่าจากการทดลองดังนี้ การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร ให้ค่าสารระเหย, คาร์บอนคงตัว และเถ้า ร้อยละ 4.78, 89.68 และ 5.54 ตามลำดับ การวิเคราะห์แยกปริมาณธาตุ ให้ค่าธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 79.49, 3.36, 1.20 และ 15.95 ตามลำดับ และสมบัติการดูดซับให้ค่า พื้นที่ผิวโดยรวม, การดูดซับเมทิลีนบลู และการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 933 ตารางเมตรต่อกรัม, 522 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 797 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับความพรุนตัว โดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ได้อย่างชัดเจน

2. การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มมีแนวโน้มลดต่ำลง มีสาเหตุจากถ่านกัมมันต์เกิดการขัดขวางการสร้างพันธะของสารโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ รวมถึงการรวมตัวกันเองและการกระจายตัวที่ยากของถ่านกัมมันต์ในเนื้อฟิล์มอีกด้วย การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ยังส่งผลให้พลังงานพื้นผิวของฟิล์มต่ำลงทำให้ความสามารถในการเปียกตัวลดลง จึงส่งผลให้มีมุมสัมผัสกับน้ำและน้ำมันมีค่าสูงขึ้น มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้น อันเนื่องจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผสม นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ลงในฟิล์ม ยังส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเอทิลีนสูงขึ้น แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติทางความร้อนแต่อย่างใด และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้นนั้น พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าในช่วงปริมาณการเติมที่ 1 และ 3 พีเอชอาร์ แต่ในปริมาณการเติมที่ 5, 7 และ 10 พีเอชอาร์ ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นให้ค่าที่สูงกว่า ค่ามอดุลัสฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นให้ค่ามอดุลัสที่ต่ำกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น เนื่องจากความขรุขระและความพรุนตัวของถ่านกัมมันต์ที่เติม ส่งผลให้การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและการซึมผ่านของไอน้ำ รวมไปถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นมีค่าสูงกว่าฟิล์มผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้น และไม่มีความแตกต่างทางด้านสมบัติทางความร้อน

3. การยืดอายุมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ จากการเก็บรักษามะละกอเป็นเวลา 0, 4, 8, 12, 16, 20 และ 24 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่าสีเปลือกของมะละกอมีแนวโน้มค่าความสว่าง (L^*) ที่เพิ่มขึ้นจากการสุกของมะละกอและมีค่าคงที่ถึงลดลงเล็กน้อยในเวลาต่อมาจากการสร้างเม็ดสีน้ำตาลโดยเอนไซม์ในมะละกอ ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) มีค่าลดลงในช่วงแรก ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีเขียวของมะละกอในช่วงแรกและสูงขึ้นในเวลาต่อมาจากการสร้างเม็ดสีแดงของแคโรทีนอยด์ และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) มีค่าสูงขึ้นจากการทำลายคลอโรฟิลล์ในเปลือกมะละกอ และการเปลี่ยนแปลงของเนื้อมะละกอนั้น ให้ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อมะละกอมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) ที่สูงขึ้น และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ที่สูงขึ้น จากการสุกตัวของมะละกอ ความหวานของมะละกอมีแนวโน้มที่สูงขึ้นซึ่งสวนทางกับความแน่นเนื้อของมะละกอที่มีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น มากไปกว่านั้นการเปรียบเทียบปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มากขึ้น สามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์เดียวกัน ระหว่างฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นและไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นสามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่าการทดสอบได้มากกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและอายุของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ หลังการขึ้นรูปฟิล์ม
2. ศึกษาเพิ่มเติมเรื่องสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์
3. ศึกษาเปรียบเทียบวัตถุดิบอื่นในการผลิตถ่านกัมมันต์นอกจากเศษยางรถยนต์ เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พลาสติกรีไซเคิล เป็นต้น
4. ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกเพิ่มเติม เพื่อหาความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป
5. ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของผลไม้ในการทดลองเพิ่มเติม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยืดอายุของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2532. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์**. สำนักงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. **การบรรจุอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- เจริญ นาคะสรรค์. 2542. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ม.ป.ท.
- ณัฐวดี ทองจันทร์. 2555. **แผ่นดูดซับเอทิลีนจากทางใบปาล์มน้ำมันผสมผงถ่านกัมมันต์สำหรับมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย (*Carica papaya L.*)**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- दनัย บุญเกียรติ และ นิธิยา รัตนานนท์. 2535. **การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยว ผักและผลไม้**. พิมพ์ครั้งที่ 3. โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.
- दनัย บุญเกียรติ. 2547. **การสุกของผลไม้**. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- ธราพงษ์ วิจิตรานต์. 2553. **ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นฤทธิ ฝ้ายบุตร และ วิทยา อมรกิจบำรุง. 2556. ผลของความขรุขระเชิงผิวต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร, น. 323-329. ใน **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 14**. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

บรรณเลข ศรีนิล. 2537. **เทคโนโลยีพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 9. บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, กรุงเทพฯ.

ปิยนาก จิตอารีรัตน์, อนุวัตร แจ่มชัด และกมลวรรณ แจ่มชัด. 2553. ดัชนีคุณภาพของมะละกอพันธุ์สาวายโดยใช้เทคนิคแผนภาพความชอบ. **ว. วิทย์. กษ.** 41(1) (พิเศษ): 239-242.

พรชัย ราชตะนะพันธุ์. 2552. **บรรจุภัณฑ์สำคัญไฉน?**. พิมพ์ครั้งที่ 1. วนิดาการพิมพ์, เชียงใหม่.

เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์. ม.ป.ป. **สมบัติของโพลีเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Ahmedna, M., W.E. Marshall, A.A. Husseiny, R.M. Rao and I. Goktepe. 2004. The use of nutshell carbons in drinking water filters for removal of trace metals. **Water Res.** 38: 1062-1068.

Ali, A., M.T.M. Muhammad, K. Sijam and Y. Siddiqui. 2011. Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica Papaya L.*) fruit during cold storage. **Food Chemistry.** 124: 620-626.

Ali, Z.M., L. Chin and H. Lazan. 2004. A comparative study on wall degrading enzymes, pectin modifications and softening during ripening of selected tropical fruits. **Plant Science.** 167: 317-327.

Aygun, A., S. Yenisoy-Karakas and I. Duman. 2004. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Micropor Mesopor Mater.** 66: 189-195.

- Bagheri, N. and J. Abedi. 2009. Preparation of high surface area activated carbon from corn by chemical activation using potassium hydroxide. **Chemical Engineering Research and Design**. 87: 1059-1064.
- Ballinas, L., C. Torras, V. Fierro and R. Garcia-Valls. 2004. Factors influencing activated carbon-polymeric composite membrane structure and performance. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**. 65: 633-637.
- Bansal, R.C., J.B. Donnet and H.F. Stoeckli. 1988. **Active Carbon**. Marcel Dekker, New York.
- Camargo, R.J., C.C. Tadini and S.F. Sabato. 2007. Physical-chemical analyses of irradiated papayas (*Carica papaya L.*). **Radiation Physics and Chemistry**. 76: 1866-1868.
- Chairat, R. and A. Kader. 1999. Evaluation of ethylene absorption capacity of "Profresh"-based films. **Perishables Handling Quarterly Issue** 97: 27.
- Chaves, M. A., R. C. F. Bonomo, A. A. L. Silva, L. S. Santos, B. M. A. Carvalho, T. S. Souza, G. M. S. Gomes and R. D. Soares. 2007. Use of potassium permanganate in the sugar apple post-harvest preservation. **Cienc. Technol. Aliment.** 5 (5): 346-351.
- Cui, H., Y. Cao and W. Pan. 2007. Preparation of activated carbon for mercury capture from chicken waste and coal. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**. 80: 319-324.
- Derebyshire, F., M. Jagtoyen and M. Thwaites. 1995. **Activated Carbons – Production and Application**. Edward Arnold, Great Britain.

- Fuggate, P., C. Wongs-Aree, S. Noichinda and S. Kanlayanarat. 2010. Quality and volatile attributes of attached and detached 'Pluk Mai Lie' papaya. **Scientia Horticulturae**. 126: 120-129.
- González-Aguilar, G.A., J.G. Buta and C.Y. Wang. 2003. Methyl jasmonate and modified atmosphere packaging (MAP) reduce decay and maintain postharvest quality of papaya 'Sunrise'. **Postharvest Biology and Technology**. 28: 361-370.
- Grisham, C.M. and R.H. Garrett. 2005. **Biochemistry Third Edition**. Thomas Learning Inc., California.
- Guerrero-Beltrana, J.A., B.G. Swansonb and G.V. Barbosa-Canovasa. 2004. Inhibition of polyphenoloxidase in mango puree with 4- hexylresorcinol, cysteine and ascorbic Acid. **LWT-Food Science and Technology**. 38: 625-630.
- Hajizadeh, Y., J.A. Onwudili and P.T. Williams. 2011. Removal potential of toxic 2378-substituted PCDD/F from incinerator flue gases by waste-derived activated carbons. **Waste Management**. 31: 1194-1201.
- Holmberg, K., D.O. Shah and M.J.Schwuger. 2002. **Handbook of Applied Surface and Colloid Chemistry Vol.1-2**. John Wiley & Sons, New York.
- Hulicova, D. and A. Oya. 2003. The polymer blend technique as a method for designing fine carbon materials. **Carbon**. 41: 1443-1450.
- Hwang, L., J. Chen and M. Wey. 2013. The properties and filtration efficiency of activated carbon polymer composite membranes for the removal of humic acid. **Desalination**. 313: 166-175.

- Jankowska, H., A. Swiatkowski and J. Choma. 1991. **Active Carbon**. Ellis Horwood Limited, Poland.
- Javad, F., F. Reza and B. Maryeh. 2010. Postharvest quality of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) affected by pre-storage application of salicylic acid. **South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment**. 1(2): 175-186.
- Lillo-Ródenas, M.A., J. Juan-Juan, D. Cazorla-Amorós and A. Linares-Solano. 2004. About reactions occurring during chemical activation with hydroxides. **Carbon**. 42: 1371-1375.
- Martínez-Romero, D., F. Guillén, S. Castillo and P.J. Zapata. 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.
- Mcweeny, R.. 2011. **Atom, Molecules, Master-The Stuff of Chemistry. Book 5**. Creative Commons.
- Ponce, P., G.L.R. Carbonari and A.B. Lugão. 2009. Active packaging using ethylene absorber to extend shelf-life, ISBN: 978-85-99141-03-8. In **International Nuclear Atlantic Conference (INAC)**. 27 September to 2 October 2009, Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN). Rio de Janeiro, Brazil.
- Putun, A.E., N. Ozbay, E.P. Onal and E. Putun. 2005. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. **Fuel Process Technology**. 86: 1207-1219.

- Rooney, M.L. 1995. **Active Food Packaging**. St Edmundsbury Ltd., Suffolk, Great Britain.
- Ryoo, K.S. and S. Kapila. 1997. Conversion of scrap tire to granular activated carbon and its evaluation as an adsorbent. **Environ. Eng, Res.** 2 (2): 141-150.
- Schulz, H., M. Leonhardt, H.J. Scheibe and B. Schultrich. 2005. Ultra hydrophobic wetting behaviour of amorphous carbon films. **Surface & Coatings Technology**. 200: 1123-1126.
- Sircar, S., T.C. Golden and M.B. Rao. 1996. Activated carbon for gas separation and storage. **Carbon** 34 (1): 1-12.
- Sirimuangjinda, A., D. Atong and C. Pechyen. 2013. Comparison on pore development of activated carbon produced from scrap tire by hydrochloric acid and sulfuric acid. **Advanced Materials Research**. 626: 706-710.
- Stavropoulos, G.G. and A.A. Zabaniotou. 2005. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Micropor Mesopor Mater.** 82: 79-85.
- Sun, J., T.A. Brady, M.J. Rood, C.M. Lehmann, M. Rostam-Abadi and A.A. Lizzio. 1997. Adsorbed natural gas storage with activated carbon made from illinois coals and scrap tires. **Energy Fuels**. 11: 316-322.
- Techavuthiporn, C., I. Lichanporn, K. Wimonwat and S. Kanlayanarat. 2002. Effect of ethylene absorber on quality acceptance score of fresh cut green papaya. **Agricultural Sci. J.** 33 (6): 111-114.

- Teng, H., M.A. Serio, R. Bassilakis, P.W. Morrison, J.R. Solomon and P.R. Solomon. 1995. Reprocessing of use tires into activated carbon and other products. *Ind. Eng. Chem. Res.* 34: 3102-3111.
- Teng, H., Y. Lin and L. Hsu. 2000. Production of activated carbons from pyrolysis of waste tires impregnated with potassium hydroxide. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 50: 1940-1946.
- Ucar, S., S. Karagoz, A.R. Ozkan and J. Yanik. 2005. Evaluation of two different scrap tires as hydrocarbon source by pyrolysis. *Fuel.* 84: 1884-1892.
- Wójtowicz, M.A. and M.A. Serio. 1996. Pyrolysis of scrap tires : Can it be profitable?. *Chemtech* 26 (10): 48-53.
- Yuan, C., H. Lin, C. Wu, M. Liu and C. Hung. 2004. Preparation of sulfurized powdered activated carbon from waste tires using an innovative compositive impregnation process. *J. Air & Waste Manage Assoc.* 54: 862-870.
- Zabaniotou, A., P. Madau, P.D. Oudenne, C.G. Jung, M.P. Delplancke and A. Fontana. 2004. Active carbon production from used tire in two-stage procedure : industrial pyrolysis and bench scale activation with H₂O-CO₂ mixture. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 72: 289-297.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การทดสอบสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1. การทดสอบหาพื้นที่ผิวโดยรวมของถ่านกัมมันต์ (B.E.T. surface area)

1.1 การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

สมการแลงเมียร์มีสมมุติฐาน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกันเอง และแต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะที่เหมือนกันทั้งหมด

สามารถหาพื้นที่ผิวได้จากสมการแลงเมียร์ โดยมีรูปแบบจากไอโซเทอมชนิดที่ 1 สมการมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{P}{V} = \frac{P}{V_m} + \frac{1}{BV_m}$$

โดย	V	คือ ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับ (mmol/g) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ (p/p ₀)
	V _m	คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer capacity, mmol/g)
	B	คือ ค่าคงที่
	P	คือ ความดัน

ค่าพื้นที่ผิวจะได้ความสัมพันธ์จากสมการ ดังนี้

$$S = V_m L \sigma$$

โดย	S	คือ พื้นที่ผิว (m ² /g)
	L	คือ เลขอโวกาโดร (Avogadro's number, 6.02 × 10 ²³)
	σ	คือ พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (m ² /molecule)

1.2 การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

แรงในการดูดซับทางกายภาพ คล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น (liquefaction) คือ เป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ ทั้งบนพื้นผิวแบนและพื้นผิวโค้ง จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monomolecular layer) แต่สามารถเกิดต่อเนื่องได้จนเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multimolecular layer) ของของเหลวที่ปกคลุมพื้นผิวได้

ทฤษฎีของบีอีที (Braunauer Emmett and Teller, BET) เป็นการเพิ่มเติมทฤษฎีของ แลงเมียร์ คือสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุนได้ โดยสมการบีอีทีจะมีสมมุติฐานว่า ชั้นการดูดซับชั้นบนสุดจะไม่มีอยู่ในสภาพสมดุลกับไอของก๊าซ หมายถึงอัตราการระเหยของชั้นโมเลกุลต่างๆ เท่ากับอัตราการควบแน่น และมีสมมุติฐานอย่างง่าย สำหรับการดูดซับชั้นแรก (first monolayer) โดยจะใช้พลังงานการดูดซับ (heat of adsorption, ΔH_1) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไปจะใช้พลังงานการควบแน่น (heat of liquefaction, ΔH_L) ซึ่งสมการโดยทั่วไปของบีอีที มีดังนี้

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C - 1)P}{V_m C P_0}$$

โดย	P_0	คือ ความดันไออิ่มตัว
	V_m	คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer capacity)
	C	คือ ค่าคงที่ ($C \approx \exp[(\Delta H_L - \Delta H_1) / RT]$)

2. การทดสอบสมบัติการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ (methylene blue adsorption)

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน JIS 1470-1975

2.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

อบแห้งโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) และโซเดียมโมโนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที จึงชั่งสารโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 9.0 กรัม มาละลายน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย A และชั่งโซเดียมโมโนฟอสเฟต 23.88 กรัม มาละลายน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย B

นำสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 400 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมโมโนฟอสเฟต 600 มิลลิลิตร จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

2.2 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

อบแห้งสารเมทิลีนบลูที่ช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงชั่งสารเมทิลีนบลู 1.206 กรัม (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียม จนได้ปริมาตร 4,000 มิลลิลิตร โดยสารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นคนสารละลายตลอดเวลาอย่างน้อยเป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำไปใช้

2.3 การวิเคราะห์

อบถ่านกัมมันต์ที่ช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์และจดบันทึกค่า (D) โดยให้มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ในขวดรูปชมพู่ซึ่งมีจุกปิด ใส่สารละลายเมทิลีนบลู 50 มิลลิลิตร

ปิดจุกแล้วเขย่าอย่างแรงประมาณ 10 วินาที สังเกตดูสีของสารละลาย หากมีการเจือจางให้ใส่สารละลายเพิ่มอีกครั้งละ 50 มิลลิลิตร จนสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับ เท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที จากนั้นเทสารละลายส่วนบนไปทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 100 มิลลิลิตร (ค่าคงที่ของการเจือจาง; $C = 100/0.5 = 200$) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร โดยใช้สมการดังนี้

$$MB \text{ (mg/g)} = [0.3A/D] - [ABC/100D \tan \theta]$$

- โดย
- A = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น (มิลลิลิตร)
 - B = ค่าการดูดกลืนแสง
 - C = ค่าคงที่ของการเจือจาง

3. การทดสอบสมบัติการดูดซับไอโอดีน (iodine number adsorption)

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D4607

3.1 การวิเคราะห์

บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร อบแห้งตัวอย่างที่ช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ตั้งไว้ในโถดูดความชื้น ซึ่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า (M) โดยความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ในขวดชมพู ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟตออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตร ปิดจุกขวดอย่างแรง เป็นเวลา 30 วินาที กรองด้วยกระดาษกรอง ที่สารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตร แรก จากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ไปไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือจุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S) คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X / M \text{ (mg/g)} = [A - (22.2 \text{ BS})] / W$$

$$C = (N_2 \cdot S) / 50$$

โดย	X/M	คือ มิลลิลิตรของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ
	N ₁	คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน
	N ₂	คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต
	A	คือ N ₁ × 1269.30
	B	คือ N ₂ × 12.693
	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้
	W	คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้
	S	คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้



ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบและการคำนวณค่าการทดสอบของ
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

การทดสอบสมบัติเชิงกล

มาตรฐานการทดสอบ

ASTM D 882-03

อุปกรณ์

เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน (Universal Testing Machine, Model 5965, Instron, สหรัฐอเมริกา)

วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่าง ความกว้าง 15 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และวัดความหนา
2. เปิดเครื่องทดสอบแล้วปรับระยะที่หนีบตัวอย่างให้อยู่ในระยะ 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที
3. ใส่ตัวอย่างในเครื่องทดสอบ พร้อมใส่ความหนาของฟิล์ม
4. เลือกค่าและหน่วยที่ต้องการได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa), มอดุลัส (MPa) และร้อยละการยืดตัว จากนั้นปรับค่าแรงดึงและค่าความคลาดเคลื่อนให้เท่ากับศูนย์
5. กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ
6. บันทึกค่าการทดสอบ

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1. การวิเคราะห์อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลว

อุปกรณ์

เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC 822^e, Mettler Toledo, สวิตเซอร์แลนด์)

วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่างใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างน้ำหนัก 5 ± 0.5 มิลลิกรัม แล้วปิดฝาถ้วย
2. ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่องพร้อมปรับค่าดังนี้
 - ตั้งค่าการให้ความร้อนสองครั้ง
 - อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
 - อัตราการหล่อเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
 - เริ่มทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 300 องศาเซลเซียส
 - ทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
3. บันทึกค่าการทดสอบ

2. วิเคราะห์อุณหภูมิในการเสื่อมสลาย

อุปกรณ์

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA/SDTA 851°, Mettler Toledo, สวิตเซอร์แลนด์)

วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่างใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างน้ำหนัก 5 ± 0.5 มิลลิกรัม แล้วปิดฝาถ้วย
2. ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่องพร้อมปรับค่าดังนี้
 - อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
 - เริ่มทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 900 องศาเซลเซียส
 - ทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
3. บันทึกค่าการทดสอบ

การทดสอบสมบัติการสกัดกั้น

1. การทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

มาตรฐานการทดสอบ

ASTM D 3985-05

อุปกรณ์

เครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeation analyzer, Model Illinois 8500, Illinois Instrument, สหรัฐอเมริกา)

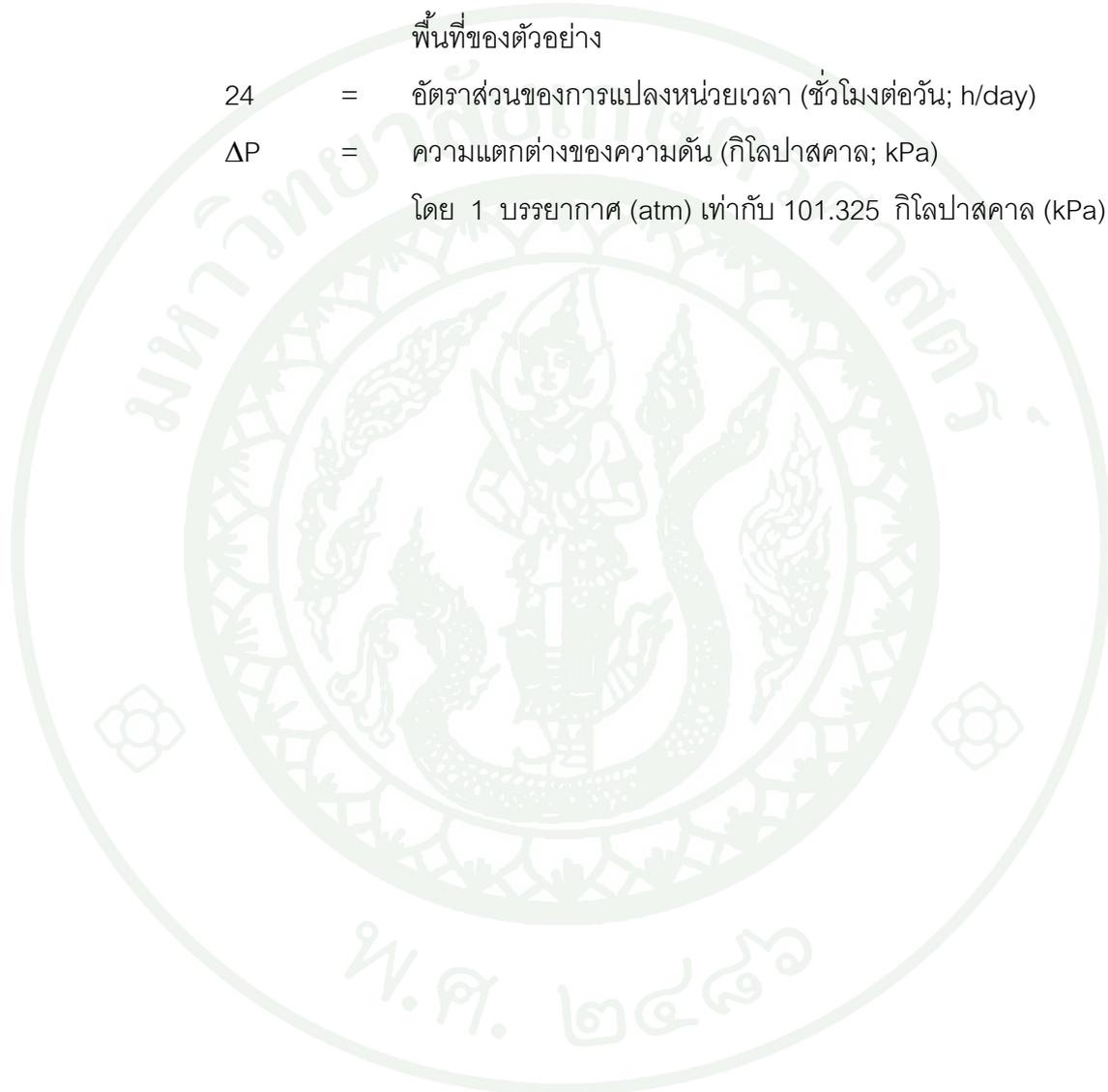
วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่างเป็นรูปวงกลม วัดความหนาของฟิล์มตัวอย่าง จากนั้นติดตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์ลูมิเนียมที่เจาะรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
2. กดปุ่มที่เครื่องทดสอบ รอจนเครื่องทดสอบเสร็จ
3. บันทึกค่าการทดสอบเป็นค่า OTR
4. คำนวณเปลี่ยนหน่วยเป็นระบบ SI ตามสูตรด้านล่างดังนี้

$$OP = \frac{OTR \times \Delta X \times 5.1076 \times 24}{\Delta P}$$

โดย OP = Oxygen Permeability (ซีซี.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตารางเมตร.กิโลปาสคาล; cc.mm/h.m².kPa)

- OTR = Oxygen Transmission Rate (ซีซีต่อตารางเมตร.วัน;
cc/m².day)
- ΔX = ความหนาของฟิล์ม (มิลลิเมตร; mm)
- 5.1076 = อัตราส่วนของพื้นที่การแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจนของเครื่องต่อ
พื้นที่ของตัวอย่าง
- 24 = อัตราส่วนของการแปลงหน่วยเวลา (ชั่วโมงต่อวัน; h/day)
- ΔP = ความแตกต่างของความดัน (กิโลปาสคาล; kPa)
โดย 1 บรรยากาศ (atm) เท่ากับ 101.325 กิโลปาสคาล (kPa)



2. การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

มาตรฐานการทดสอบ

ASTM E96-00

อุปกรณ์

เครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Permatran-W[®] Model 398, Mocon, สหรัฐอเมริกา)

วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่างขนาด 7×7 เซนติเมตร วัดความหนาของฟิล์มตัวอย่าง จากนั้นตัดตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์ลูมิเนียมที่ได้ตัดตามรูปร่างสำหรับการวัดค่าการซึมผ่านของไอน้ำ
2. กดปุ่มที่เครื่องทดสอบ รอจนค่าที่ได้คงที่
3. บันทึกค่าการทดสอบเป็นค่า WVTR
4. คำนวณเปลี่ยนหน่วยเป็นระบบ SI ตามสูตรด้านล่างดังนี้

$$WVP = \frac{WVTR \times \Delta X \times 24}{\Delta P}$$

โดย WVP = Water Vapor Permeability (กรัม.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตารางเมตร.กิโลปาสกาล; g.mm/h.m².kPa)

WVTR = Water Vapor Transmission Rate (กรัมต่อตารางเมตร.วัน; g/m².day)

ΔX = ความหนาของฟิล์ม (มิลลิเมตร; mm)

24 = อัตราส่วนของ การแปลงหน่วยเวลา (ชั่วโมงต่อวัน; h/day)

ΔP = ความแตกต่างของความดัน (กิโลปาสคาล; kPa)
โดย 1 บรรยากาศ (atm) เท่ากับ 101.325 กิโลปาสคาล (kPa)



การทดสอบสมบัติทางพื้นผิวของฟิล์ม

อุปกรณ์

เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Instrument, Model OCA 15EC, DataPhysics, เยอรมนี)

วิธีการทดสอบ

1. ตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 4×7 เซนติเมตร ใส่ในที่ตึ่งตัวอย่างแล้ววางบนแท่นทดสอบ
2. หยดของเหลวที่ต้องการทดสอบ (น้ำกลั่นหรือน้ำมัน) ลงบนพื้นผิวของฟิล์มปริมาตร 3 ไมโครลิตร พร้อมถ่ายภาพในทันที
3. วัดมุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิวของฟิล์มด้วยซอฟต์แวร์ในการวัดมุม
4. บันทึกค่าการทดสอบ

การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนของฟิล์ม

อุปกรณ์

เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, Model 6890N, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, สหรัฐอเมริกา)

ขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ปริมาตร 635 มิลลิลิตร

ซีลและกระบอกฉีดยา

ปืนกาว, ซิลิโคนยาง และเทป

วิธีการทดสอบ

1. บีบซิลิโคนยางลงบนเทป รอให้ซิลิโคนแห้ง 48 ชั่วโมง
2. เจาะรูบนฝาขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แล้วติดเทปซิลิโคนที่เตรียมไว้บนรูที่เจาะ
3. ชั่งน้ำหนักฟิล์มตัวอย่าง 1 ± 0.03 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
4. บรรจุก๊าซเอทิลีนลงในขวดพลาสติกค้างไว้เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อไล่อากาศภายในขวด แล้วปิดฝาขวดอย่างรวดเร็ว
5. ยิงปืนกาวให้รอบฝาขวดเพื่อป้องกันการซึมออกของก๊าซเอทิลีน
6. ตั้งสภาวะเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

Column:	HayeSep S 100/120 (2 m x 0.75 nm)
Carrier gas:	He, Flow rate = 5 ml/min
Oven temperature:	40°C
Detector temperature:	Thermal conduct detector (FID) 250°C

7. ใช้กระบอบอกและเข็มฉีดยาดูดก๊าซเอทิลีนในขวดหลังการเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 7, 10 และ 14 วัน ไปตรวจวัดด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

8. บันทึกค่าการทดสอบ

9. คำนวณเป็นร้อยละของปริมาณก๊าซเอทิลีนที่เหลือ

$$\% \text{ Ethylene residue} = \frac{C_n}{C_0} \times 100$$

โดย C_n = ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนในวันที่ n (ส่วนในล้านส่วน; ppm)
 C_0 = ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเริ่มต้น (ส่วนในล้านส่วน; ppm)



ภาคผนวก ค

การตรวจวัดคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

การตรวจวัดคุณภาพของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

1. การคัดเลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

ทำการคัดเลือกมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายจากแหล่งที่มาเดียวกัน เวลาเดียวกันเพื่อลดปัจจัยทางความแตกต่างทางกายภาพจากแหล่งที่มา และทำการเลือกแต้มนะละกอ โดยเลือกมะละกอที่มีลักษณะแต้มน้อยที่ระดับ 1 แต่ไม่เกิน 2 แต้ม

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกและสีเนื้อของมะละกอด้วยการวัดโดยใช้เครื่องวัดสี Colorimeter, Model Minolta CR- 310 ในระบบ Hunter lab ซึ่งรายงานผลเป็นค่า L^* , a^* และ b^*

โดยค่า	L^*	แสดงถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 จากสีดำถึงสีขาว
	a^*	แสดงถึง ค่าความเป็นสีเขียวถึงแดง มีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 128
	b^*	แสดงถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงินถึงเหลือง มีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 128

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงกดของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

วัดการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อหรือค่าความต้านทานแรงกด โดยนำมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายวางบนเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model micro 350, Testometric, อังกฤษ) โดยใช้หัวกดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 มิลลิเมตร หรือหัวกดเบอร์ 5 ทดสอบกดบริเวณตรงกลางลูก ลึกลงไป 5 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อวินาที บันทึกค่าการทดสอบเป็นค่าความแน่นเนื้อในหน่วยนิวตัน (N)

4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหวานของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย

จัดการเปลี่ยนแปลงความหวาน โดยคั้นน้ำมะลกอประมาณ 1-3 มิลลิลิตร หยดลงบน
มาตรวัดดัชนีหักเหด้วยมือ (hand held refractometer, Model N-1 α , Atago, ญี่ปุ่น) บันทึกค่า
การทดสอบเป็นค่าความหวานในหน่วยของศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix)





ภาคผนวก ง
ตารางแสดงค่าจากการทดลอง

ตารางผนวกที่ ๑1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ด้วยสารถะลายกรด (ร้อยละ)

ประเภทของสาร	คุณสมบัติในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น	ไฮโดรคลอริก			ซัลฟูริก		
			1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
สารระเหย	400		17.31	15.54	16.65	16.21	15.14	17.44
	500	17.64	17.84	14.63	15.41	10.39	9.01	13.44
	600		16.26	14.38	14.38	7.46	7.75	11.39
	700		14.77	12.91	14.99	4.99	4.78	5.65
คาร์บอนคงตัว	400		71.74	70.58	71.40	70.59	72.18	67.35
	500	69.3	75.35	73.39	75.64	81.90	84.83	78.67
	600		79.00	79.65	75.38	83.33	87.11	81.26
	700		80.70	80.60	74.16	85.49	89.68	83.35
เถ้า	400		10.95	13.88	11.95	13.20	12.68	15.21
	500	7.34	6.81	11.98	8.95	7.71	6.16	7.89
	600		4.74	5.97	10.42	9.21	5.14	7.37
	700		4.53	6.49	10.82	9.52	5.54	11.00

ตารางผนวกที่ ๖2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง
รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรด (ร้อยละ)

ธาตุ	คุณสมบัติในการ		ไฮโดรคลอริก			ซัลฟูริก		
	กระตุ้น	ไม่กระตุ้น	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
	(องศาเซลเซียส)							
คาร์บอน	400		71.14	73.82	74.47	73.54	78.22	78.35
	500		72.48	74.29	74.20	75.03	80.61	78.35
	600	70.07	72.78	75.55	73.18	77.28	79.12	77.28
	700		73.21	75.91	70.82	79.35	79.49	76.14
ไฮโดรเจน	400		6.71	6.20	5.56	4.06	2.88	3.04
	500		6.35	5.89	6.21	3.33	2.91	3.11
	600	6.20	5.94	5.54	5.07	3.24	3.20	3.24
	700		5.42	4.43	4.88	2.97	3.36	3.37
ไนโตรเจน	400		1.34	1.21	2.02	1.14	1.14	1.25
	500		1.21	1.45	2.11	1.00	1.05	1.15
	600	1.00	1.16	1.38	1.76	1.21	1.14	1.13
	700		1.13	1.14	1.99	1.22	1.20	1.32
ออกซิเจน*	400		20.81	18.77	17.95	21.26	14.76	17.36
	500		19.96	18.37	17.48	20.64	15.43	17.39
	600	22.80	20.12	17.53	19.99	18.27	16.54	18.35
	700		20.24	18.52	22.31	16.46	15.95	19.17

หมายเหตุ *ธาตุออกซิเจน คำนวณได้จากปริมาณร้อยละที่เหลือ

ตารางผนวกที่ 33 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายลายกรด

ประเภทของสาร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น			ไฮโดรคลอริก			ซัลฟูริก		
		ไม่กระตุ้น			ไฮโดรคลอริก			ซัลฟูริก		
		1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
พื้นที่ผิวโดยรวม (ตารางเมตรต่อกรัม)	400	397	452	404	654	713	594			
	500	490	674	464	716	855	624			
	600	152	522	701	466	782	685			
	700	545	610	438	927	933	756			
การดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	253	266	256	389	424	395			
	500	327	393	272	424	480	444			
	600	109	491	276	466	491	378			
	700	496	331	266	505	522	452			
การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	300	340	311	464	567	424			
	500	351	529	327	556	730	532			
	600	212	438	334	649	751	540			
	700	457	511	316	780	797	594			

ตารางผนวกที่ 4 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระจัดด้วยสารละลายต่าง (ร้อยละ)

ประเภทของสาร	คุณสมบัติในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น	โซเดียมไฮดรอกไซด์			โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์		
			1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
สารระเหย	400		17.02	14.86	15.27	18.38	17.59	15.97
	500		15.38	14.81	12.00	16.45	13.12	12.16
	600	17.64	10.89	13.78	7.65	14.65	11.90	9.75
	700		10.35	12.35	8.28	11.89	10.01	8.90
คาร์บอนคงตัว	400		80.55	79.22	78.80	75.74	70.16	70.33
	500		80.39	80.08	82.34	80.01	74.09	75.33
	600	69.3	83.23	81.87	88.17	81.23	75.34	76.12
	700		82.84	81.51	87.11	82.23	77.66	76.65
เถ้า	400		2.42	6.32	5.93	5.88	12.55	13.20
	500		4.23	5.11	5.66	3.54	12.90	12.51
	600	7.34	5.88	4.35	4.18	4.12	12.60	14.13
	700		6.85	6.14	4.61	4.88	12.33	14.45

ตารางผนวกที่ 5 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง
รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่าง (ร้อยละ)

ธาตุ	คุณสมบัติในการ		โซเดียมไฮดรอกไซด์			โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์		
	กระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
คาร์บอน	400		71.11	70.09	70.49	73.54	75.22	71.84
	500		72.34	71.45	74.23	74.50	74.82	70.42
	600	70.07	72.58	71.99	79.15	75.34	73.25	71.60
	700		72.00	72.51	78.26	76.44	72.55	74.16
ไฮโดรเจน	400		7.20	7.38	6.99	3.61	2.88	3.09
	500		7.52	7.59	7.31	3.46	2.92	3.24
	600	6.20	8.00	8.40	7.42	3.21	3.20	3.45
	700		7.94	8.67	8.13	2.67	3.42	3.49
ไนโตรเจน	400		1.29	1.42	1.28	1.37	1.29	1.67
	500		1.25	1.53	1.45	1.31	1.08	1.62
	600	1.00	1.14	1.71	1.16	1.29	1.17	1.65
	700		1.13	1.86	1.24	1.40	2.24	1.70
ออกซิเจน*	400		20.40	21.11	21.24	21.48	20.61	23.00
	500		18.89	19.43	17.01	19.83	21.18	24.72
	600	22.80	18.28	17.90	12.27	20.16	22.38	23.30
	700		18.93	16.96	12.37	19.49	21.79	20.65

หมายเหตุ *ธาตุออกซิเจน คำนวณได้จากปริมาณร้อยละที่เหลือ

ตารางผนวกที่ ๖6 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างๆ

ประเภทของสาร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น			โซเดียมไฮดรอกไซด์			โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์		
		1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
พื้นที่ผิวโดยรวม (ตารางเมตรต่อกรัม)	400	397	408	431	524	500	524	500	401	
	500	462	474	518	593	541	593	541	505	
	600	501	515	745	826	738	826	738	699	
	700	500	531	710	900	809	900	809	768	
การดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	351	353	379	311	297	311	297	285	
	500	380	496	345	364	347	364	347	310	
	600	391	508	468	471	411	471	411	394	
	700	385	500	451	499	476	499	476	472	
การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	463	514	549	412	350	412	350	304	
	500	551	575	654	497	480	497	480	423	
	600	593	603	741	700	581	700	581	553	
	700	586	605	726	777	644	777	644	605	

ตารางผนวกที่ ๗ การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮโดรคลอไรด์ (ร้อยละ)

ประเภทของสาร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น	ซิงค์คลอไรด์			แมกนีเซียมคลอไรด์		
			1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
สารระเหย	400		15.19	16.26	15.81	17.28	17.03	16.45
	500		14.44	14.30	13.77	17.78	17.41	15.31
	600	17.64	11.38	14.40	12.25	17.51	16.64	14.84
	700		11.75	14.71	10.01	16.42	14.38	14.21
คาร์บอนคงตัว	400		69.94	70.36	70.21	70.44	73.28	67.28
	500		70.83	70.51	73.31	71.00	75.33	72.31
	600	69.3	72.78	71.44	73.59	71.15	75.51	73.52
	700		73.60	71.13	74.56	72.14	76.76	75.19
เถ้า	400		14.87	13.38	13.98	12.28	9.69	16.27
	500		14.00	15.19	12.92	11.22	7.26	12.38
	600	7.34	15.84	14.16	14.16	11.34	7.85	11.64
	700		14.65	15.43	15.43	11.44	8.86	10.57

ตารางผนวกที่ ๘ การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของถ่านกัมมันต์จากเศษยาง
รถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโลหะคอลลอยด์ (ร้อยละ)

ธาตุ	คุณสมบัติในการ		ซิงค์คอลลอยด์			แมกนีเซียมคอลลอยด์		
	กระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
คาร์บอน	400		70.43	70.89	73.56	70.18	71.25	70.37
	500		70.71	70.47	74.22	71.12	72.00	73.64
	600	70.07	70.62	71.52	76.23	71.35	72.54	75.09
	700		71.26	71.04	80.04	72.97	72.55	79.41
ไฮโดรเจน	400		7.15	6.47	6.51	6.80	7.42	6.16
	500		7.37	6.30	6.43	7.04	7.75	6.20
	600	6.20	7.65	7.14	6.22	7.26	7.79	7.51
	700		7.95	7.11	6.50	7.38	7.80	7.48
ไนโตรเจน	400		2.08	1.94	1.60	2.41	1.05	1.40
	500		2.14	1.69	1.31	1.54	1.18	1.35
	600	1.00	2.22	2.15	2.22	2.75	1.65	1.42
	700		2.38	1.87	2.34	1.35	1.42	1.76
ออกซิเจน*	400		20.34	20.70	18.33	20.61	20.28	22.07
	500		19.78	21.54	18.04	20.30	19.07	18.81
	600	22.80	19.51	19.19	15.33	18.64	18.02	15.98
	700		18.11	19.98	11.12	18.30	18.23	11.35

หมายเหตุ *ธาตุออกซิเจน คำนวณได้จากปริมาณร้อยละที่เหลือ

ตารางผนวกที่ 99 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเศษยางรถยนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮโดรคลอไรด์

ประเภทของสาร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ไม่กระตุ้น			ซิงค์คลอไรด์			แมกนีเซียมคลอไรด์		
		ไม่กระตุ้น			ซิงค์คลอไรด์			แมกนีเซียมคลอไรด์		
		1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
พื้นที่ผิวโดยรวม (ตารางเมตรต่อกรัม)	400	465	600	572	454	501	533			
	500	542	695	699	531	540	605			
	600	547	718	729	559	694	700			
	700	592	739	846	588	771	835			
การดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	300	344	342	289	294	317			
	500	328	375	387	304	327	330			
	600	332	390	394	316	385	392			
	700	330	426	479	318	451	475			
การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	400	375	444	518	352	437	489			
	500	473	474	542	469	470	504			
	600	476	540	550	476	550	560			
	700	481	592	709	497	602	700			

ตารางผนวกที่ 10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	ความต้านทานแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละการยืดตัวออก (%)
LDPE	188.64 ^g ± 5.18	14.77 ⁱ ± 0.45	453.55 ^g ± 24.67
A1	104.15 ^e ± 6.57	5.27 ^f ± 0.41	185.29 ^f ± 27.65
A3	88.01 ^c ± 6.65	3.57 ^{cd} ± 0.21	163.43 ^e ± 28.96
A5	83.79 ^c ± 7.41	4.17 ^e ± 0.34	146.92 ^{de} ± 14.64
A7	71.38 ^b ± 6.52	3.27 ^{bc} ± 0.30	111.03 ^b ± 14.15
A10	87.54 ^c ± 4.50	2.93 ^{ab} ± 0.11	89.77 ^a ± 4.11
N1	125.16 ^f ± 6.08	8.24 ^h ± 0.62	136.30 ^d ± 8.54
N3	94.94 ^d ± 4.73	6.47 ^g ± 0.47	132.24 ^{cd} ± 3.61
N5	67.03 ^b ± 2.75	3.81 ^{de} ± 0.10	130.07 ^{bcd} ± 7.28
N7	59.88 ^a ± 9.28	3.42 ^{cd} ± 0.46	114.75 ^{bc} ± 19.25
N10	68.44 ^b ± 0.99	2.76 ^a ± 0.16	112.94 ^{bc} ± 9.09

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-i} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p ≤ 0.05)

ตารางผนวกที่ 11 สมบัติการซึมผ่านของของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่าน
กัมมันต์

ตัวอย่าง	ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ซีซี.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตาราง เมตร.กิโลปาสคาล)	ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม.มิลลิเมตรต่อชั่วโมง.ตาราง เมตร.กิโลปาสคาล)
LDPE	82 ^a ± 7	0.017 ^a ± 0.003
A1	145 ^a ± 5	0.036 ^{ab} ± 0.008
A3	202 ^a ± 10	0.045 ^{ab} ± 0.008
A5	646 ^a ± 69	0.050 ^{ab} ± 0.014
A7	5996 ^b ± 705	0.087 ^b ± 0.007
A10	12645 ^d ± 755	0.194 ^c ± 0.020
N1	120 ^a ± 1	0.024 ^a ± 0.004
N3	185 ^a ± 3	0.035 ^{ab} ± 0.013
N5	526 ^a ± 107	0.044 ^{ab} ± 0.017
N7	5255 ^b ± 728	0.069 ^{ab} ± 0.002
N10	7505 ^c ± 848	0.163 ^c ± 0.017

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-c} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ
(p ≤ 0.05)

ตารางผนวกที่ 12 ร้อยละของก๊าซเอทิลีนที่เหลือในระบบปิดที่บรรจุฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการทดสอบ (วัน)													
	0	1	3	5	7	10	14							
LDPE	100.00 ^a ± 1.08	99.63 ^g ± 0.87	99.31 ^g ± 1.13	98.97 ^g ± 0.46	98.71 ^f ± 0.94	98.49 ^g ± 0.81	98.35 ^g ± 1.26							
A1	100.00 ^a ± 1.26	93.59 ^{ef} ± 2.27	86.74 ^e ± 2.18	79.83 ^e ± 2.80	74.31 ^d ± 3.55	72.46 ^d ± 3.11	71.06 ^d ± 2.80							
A3	100.00 ^a ± 0.63	89.13 ^d ± 2.73	78.53 ^d ± 3.50	69.82 ^d ± 3.19	61.54 ^c ± 3.98	56.38 ^c ± 3.23	52.88 ^c ± 3.75							
A5	100.00 ^a ± 0.99	83.50 ^c ± 3.75	69.90 ^c ± 5.09	57.25 ^c ± 4.61	46.38 ^b ± 4.52	37.18 ^b ± 3.47	31.81 ^b ± 3.69							
A7	100.00 ^a ± 1.24	77.57 ^b ± 3.15	57.28 ^b ± 3.68	41.09 ^b ± 2.90	29.23 ^a ± 4.29	20.57 ^a ± 4.02	< 15.00 ^a							
A10	100.00 ^a ± 2.09	69.59 ^a ± 3.03	49.62 ^a ± 4.02	34.85 ^a ± 5.48	24.09 ^a ± 3.40	18.32 ^a ± 2.50	< 15.00 ^a							
N1	100.00 ^a ± 0.69	97.42 ^g ± 0.62	95.52 ^g ± 0.86	94.26 ^g ± 1.20	93.17 ^e ± 1.47	92.30 ^f ± 1.02	91.50 ^f ± 0.83							
N3	100.00 ^a ± 1.04	96.25 ^{efg} ± 1.54	92.46 ^f ± 2.23	89.90 ^f ± 2.32	87.78 ^e ± 2.80	86.55 ^e ± 1.25	85.57 ^e ± 0.45							
N5	100.00 ^a ± 1.45	92.49 ^{de} ± 1.97	86.14 ^e ± 2.30	80.97 ^e ± 1.74	76.11 ^d ± 1.85	72.06 ^d ± 2.94	68.22 ^d ± 2.54							
N7	100.00 ^a ± 1.22	89.01 ^d ± 2.63	80.26 ^d ± 2.78	72.14 ^d ± 3.27	64.52 ^c ± 3.23	57.71 ^c ± 4.29	51.07 ^c ± 2.29							
N10	100.00 ^a ± 1.04	83.82 ^c ± 2.64	71.52 ^c ± 3.54	59.40 ^c ± 4.49	48.96 ^b ± 3.27	39.75 ^b ± 2.87	32.54 ^b ± 2.10							

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-g} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ 13 ค่าความสว่าง (L*) ของเบ็ดอกมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ตายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	21.07 ^a ± 0.04	22.15 ^f ± 0.04	22.67 ^g ± 0.07	23.77 ^h ± 0.05	25.15 ⁱ ± 0.06	25.39 ^j ± 0.03	25.31 ^e ± 0.06			
A1	21.07 ^a ± 0.04	21.64 ^d ± 0.07	22.16 ^e ± 0.04	23.32 ^f ± 0.06	23.78 ^g ± 0.08	25.16 ^h ± 0.06	25.22 ^{de} ± 0.06			
A3	21.07 ^a ± 0.04	21.45 ^c ± 0.06	21.87 ^d ± 0.07	22.96 ^d ± 0.07	23.62 ^f ± 0.03	25.06 ^g ± 0.04	24.88 ^c ± 0.07			
A5	21.07 ^a ± 0.04	21.27 ^b ± 0.04	21.68 ^c ± 0.08	22.33 ^c ± 0.09	23.07 ^c ± 0.03	24.74 ^e ± 0.09	24.67 ^b ± 0.01			
A7	21.07 ^a ± 0.04	21.23 ^b ± 0.05	21.51 ^{ab} ± 0.06	22.16 ^b ± 0.06	22.96 ^b ± 0.06	24.53 ^d ± 0.03	24.60 ^b ± 0.08			
A10	21.07 ^a ± 0.04	21.12 ^a ± 0.08	21.41 ^a ± 0.06	22.03 ^a ± 0.03	22.81 ^a ± 0.09	24.03 ^b ± 0.06	24.36 ^a ± 0.06			
N1	21.07 ^a ± 0.04	22.09 ^f ± 0.07	22.41 ^f ± 0.06	23.98 ⁱ ± 0.03	24.64 ⁱ ± 0.05	25.09 ^{gh} ± 0.06	25.25 ^{de} ± 0.06			
N3	21.07 ^a ± 0.04	21.98 ^e ± 0.05	22.38 ^f ± 0.04	23.46 ^g ± 0.05	23.93 ^h ± 0.05	25.07 ^{gh} ± 0.02	25.19 ^d ± 0.07			
N5	21.07 ^a ± 0.04	21.68 ^d ± 0.03	22.15 ^e ± 0.04	23.26 ^f ± 0.02	23.42 ^e ± 0.04	24.90 ^f ± 0.05	25.15 ^d ± 0.06			
N7	21.07 ^a ± 0.04	21.38 ^c ± 0.05	22.12 ^e ± 0.07	23.07 ^e ± 0.06	23.32 ^d ± 0.04	24.15 ^c ± 0.06	24.96 ^c ± 0.04			
N10	21.07 ^a ± 0.04	21.26 ^b ± 0.04	21.54 ^b ± 0.05	22.33 ^c ± 0.06	22.99 ^{bc} ± 0.06	23.44 ^a ± 0.04	24.67 ^b ± 0.07			

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-j} ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ 14 ค่าความเป็นอิสระเชิงบวก (a*) ของเบ็ดอกมะละกอพันธุ์ปลูกไม่ตายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพลาสติกที่ลดความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	-1.28 ^a ± 0.05	-1.86 ^a ± 0.04	-2.30 ^a ± 0.07	-2.46 ^a ± 0.11	-1.74 ^h ± 0.08	-0.78 ^h ± 0.13	1.76 ^h ± 0.16			
A1	-1.28 ^a ± 0.05	-1.74 ^{bc} ± 0.06	-1.89 ^{cde} ± 0.04	-2.34 ^a ± 0.02	-1.91 ^g ± 0.05	-1.26 ^e ± 0.10	0.24 ^e ± 0.19			
A3	-1.28 ^a ± 0.05	-1.71 ^{bcd} ± 0.06	-1.82 ^{de} ± 0.05	-2.17 ^b ± 0.08	-2.38 ^{ab} ± 0.04	-1.55 ^d ± 0.09	-0.35 ^d ± 0.24			
A5	-1.28 ^a ± 0.05	-1.67 ^{cde} ± 0.04	-1.78 ^{ef} ± 0.11	-1.97 ^{cd} ± 0.03	-2.34 ^{abc} ± 0.07	-2.04 ^{bc} ± 0.11	-0.83 ^c ± 0.19			
A7	-1.28 ^a ± 0.05	-1.57 ^e ± 0.08	-1.70 ^f ± 0.08	-1.86 ^d ± 0.09	-2.25 ^{cde} ± 0.07	-2.17 ^b ± 0.09	-1.44 ^{ab} ± 0.25			
A10	-1.28 ^a ± 0.05	-1.34 ^f ± 0.04	-1.42 ^g ± 0.08	-1.71 ^e ± 0.04	-2.10 ^f ± 0.07	-2.45 ^a ± 0.11	-1.71 ^a ± 0.17			
N1	-1.28 ^a ± 0.05	-1.78 ^{ab} ± 0.09	-2.01 ^b ± 0.03	-2.45 ^a ± 0.07	-1.98 ^g ± 0.06	-0.93 ^{gh} ± 0.13	1.60 ^h ± 0.14			
N3	-1.28 ^a ± 0.05	-1.73 ^{bc} ± 0.05	-1.96 ^{bc} ± 0.05	-2.39 ^a ± 0.05	-2.16 ^{ef} ± 0.07	-1.05 ^{fg} ± 0.10	1.09 ^g ± 0.19			
N5	-1.28 ^a ± 0.05	-1.71 ^{bcd} ± 0.04	-1.93 ^{bcd} ± 0.06	-2.36 ^a ± 0.04	-2.21 ^{def} ± 0.07	-1.19 ^{ef} ± 0.10	0.32 ^{ef} ± 0.25			
N7	-1.28 ^a ± 0.05	-1.65 ^{cde} ± 0.06	-1.86 ^{cde} ± 0.02	-2.15 ^b ± 0.09	-2.44 ^a ± 0.08	-1.87 ^c ± 0.07	-0.59 ^f ± 0.17			
N10	-1.28 ^a ± 0.05	-1.61 ^{de} ± 0.03	-1.77 ^{ef} ± 0.07	-2.00 ^c ± 0.10	-2.31 ^{bcd} ± 0.08	-2.07 ^b ± 0.08	-1.25 ^b ± 0.16			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-h} ที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p ≤ 0.05)

ตารางผนวกที่ 15 ค่าความเป็นอิสระเงิน-เหลือง (b*) ของเปลือกมะละกอพันธุ์ปลูกในภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพลาสติกที่ลดความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	1.10 ^a ± 0.06	3.28 ^g ± 0.11	6.10 ⁱ ± 0.11	8.27 ^j ± 0.11	10.01 ^h ± 0.04	11.80 ⁱ ± 0.05	13.06 ^k ± 0.06			
A1	1.10 ^a ± 0.06	2.45 ^e ± 0.07	4.57 ^e ± 0.06	6.42 ^e ± 0.07	8.59 ^f ± 0.05	9.69 ^f ± 0.07	10.83 ^g ± 0.07			
A3	1.10 ^a ± 0.06	2.24 ^d ± 0.04	4.13 ^d ± 0.07	6.10 ^d ± 0.07	8.51 ^f ± 0.05	9.47 ^e ± 0.06	10.33 ^e ± 0.07			
A5	1.10 ^a ± 0.06	1.84 ^b ± 0.06	3.46 ^c ± 0.05	5.99 ^c ± 0.06	7.27 ^c ± 0.08	7.94 ^c ± 0.05	8.27 ^c ± 0.06			
A7	1.10 ^a ± 0.06	1.90 ^b ± 0.04	3.06 ^b ± 0.09	5.34 ^a ± 0.04	7.11 ^b ± 0.01	7.75 ^b ± 0.05	7.79 ^b ± 0.06			
A10	1.10 ^a ± 0.06	1.27 ^a ± 0.03	2.63 ^a ± 0.08	5.73 ^b ± 0.05	6.77 ^a ± 0.07	7.03 ^a ± 0.07	7.13 ^a ± 0.08			
N1	1.10 ^a ± 0.06	2.97 ^f ± 0.07	5.73 ^h ± 0.06	7.34 ^h ± 0.04	9.08 ^g ± 0.05	11.06 ^h ± 0.06	12.95 ⁱ ± 0.06			
N3	1.10 ^a ± 0.06	2.51 ^e ± 0.06	4.90 ^g ± 0.06	7.19 ^g ± 0.08	8.60 ^f ± 0.04	10.02 ^g ± 0.03	11.38 ^f ± 0.05			
N5	1.10 ^a ± 0.06	2.01 ^c ± 0.09	4.86 ^{fg} ± 0.04	6.92 ^f ± 0.06	8.23 ^e ± 0.05	8.67 ^d ± 0.06	10.98 ^h ± 0.10			
N7	1.10 ^a ± 0.06	1.88 ^b ± 0.04	4.77 ^f ± 0.06	6.44 ^e ± 0.05	7.47 ^d ± 0.03	8.02 ^c ± 0.04	10.48 ^f ± 0.08			
N10	1.10 ^a ± 0.06	1.83 ^b ± 0.04	3.50 ^c ± 0.08	5.65 ^b ± 0.04	7.32 ^c ± 0.05	7.83 ^b ± 0.05	8.59 ^d ± 0.05			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-k} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p ≤ 0.05)

ตารางผนวกที่ 16 ค่าความสว่าง (L*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลัดังไม่ตายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	25.83 ^a ± 0.06	25.28 ^a ± 0.08	24.67 ^a ± 0.07	24.28 ^a ± 0.07	23.87 ^a ± 0.08	23.38 ^a ± 0.05	23.01 ^a ± 0.04			
A1	25.83 ^a ± 0.06	25.43 ^c ± 0.05	24.89 ^{cd} ± 0.04	24.63 ^c ± 0.05	24.16 ^c ± 0.04	23.84 ^c ± 0.04	23.34 ^{cd} ± 0.02			
A3	25.83 ^a ± 0.06	25.48 ^c ± 0.04	25.15 ^f ± 0.08	24.82 ^d ± 0.06	24.53 ^e ± 0.06	24.07 ^d ± 0.05	23.59 ^f ± 0.09			
A5	25.83 ^a ± 0.06	25.64 ^d ± 0.03	25.32 ^g ± 0.08	25.01 ^{ef} ± 0.05	24.66 ^g ± 0.07	24.20 ^e ± 0.06	23.92 ^g ± 0.06			
A7	25.83 ^a ± 0.06	25.75 ^e ± 0.06	25.51 ^h ± 0.05	25.10 ^{fg} ± 0.08	24.75 ^{gh} ± 0.06	24.38 ^f ± 0.08	24.04 ^h ± 0.05			
A10	25.83 ^a ± 0.06	25.80 ^e ± 0.03	25.58 ^h ± 0.09	25.21 ^g ± 0.08	24.81 ^h ± 0.06	24.48 ^g ± 0.07	24.13 ^h ± 0.08			
N1	25.83 ^a ± 0.06	25.29 ^a ± 0.06	24.71 ^{ab} ± 0.08	24.38 ^{ab} ± 0.10	23.95 ^{ab} ± 0.05	23.55 ^b ± 0.08	23.18 ^b ± 0.09			
N3	25.83 ^a ± 0.06	25.32 ^{ab} ± 0.07	24.81 ^{bc} ± 0.09	24.42 ^b ± 0.06	24.03 ^b ± 0.05	23.63 ^b ± 0.03	23.31 ^c ± 0.03			
N5	25.83 ^a ± 0.06	25.41 ^{bc} ± 0.08	24.99 ^{de} ± 0.05	24.67 ^c ± 0.08	24.17 ^c ± 0.09	23.77 ^c ± 0.04	23.44 ^{de} ± 0.05			
N7	25.83 ^a ± 0.06	25.42 ^c ± 0.06	25.04 ^{ef} ± 0.05	24.89 ^{de} ± 0.08	24.42 ^d ± 0.02	23.98 ^d ± 0.06	23.53 ^{ef} ± 0.07			
N10	25.83 ^a ± 0.06	25.63 ^d ± 0.03	25.36 ^d ± 0.08	24.96 ^e ± 0.05	24.60 ^{ef} ± 0.07	24.21 ^e ± 0.06	23.85 ^g ± 0.10			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-h} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ 17 ค่าความเป็นอิสระเชิงคว-แดง (α^*) ของโมเดลประกอบพันธุ์ปลูกไม่ตายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	3.35 ^a ± 0.06	3.76 ^e ± 0.06	4.13 ^g ± 0.06	4.40 ^f ± 0.06	4.68 ^g ± 0.04	4.75 ^d ± 0.08	4.78 ^g ± 0.08			
A1	3.35 ^a ± 0.06	3.61 ^{cd} ± 0.05	3.88 ^{ef} ± 0.08	4.19 ^{de} ± 0.07	4.48 ^{ef} ± 0.06	4.52 ^c ± 0.06	4.62 ^{def} ± 0.08			
A3	3.35 ^a ± 0.06	3.56 ^{bcd} ± 0.09	3.79 ^{de} ± 0.06	3.97 ^c ± 0.06	4.20 ^d ± 0.03	4.31 ^b ± 0.07	4.52 ^{bcd} ± 0.08			
A5	3.35 ^a ± 0.06	3.47 ^{ab} ± 0.06	3.66 ^{bc} ± 0.07	3.73 ^b ± 0.07	3.99 ^c ± 0.05	4.19 ^a ± 0.07	4.50 ^{bcd} ± 0.06			
A7	3.35 ^a ± 0.06	3.48 ^{ab} ± 0.07	3.61 ^b ± 0.07	3.70 ^b ± 0.04	3.79 ^b ± 0.08	4.09 ^a ± 0.04	4.40 ^b ± 0.08			
A10	3.35 ^a ± 0.06	3.39 ^a ± 0.09	3.48 ^a ± 0.04	3.55 ^a ± 0.08	3.63 ^a ± 0.06	4.07 ^a ± 0.06	4.27 ^a ± 0.04			
N1	3.35 ^a ± 0.06	3.74 ^e ± 0.04	4.09 ^g ± 0.04	4.29 ^{ef} ± 0.10	4.54 ^f ± 0.03	4.61 ^c ± 0.04	4.69 ^{fg} ± 0.09			
N3	3.35 ^a ± 0.06	3.68 ^{de} ± 0.07	4.10 ^g ± 0.05	4.16 ^d ± 0.02	4.51 ^f ± 0.06	4.59 ^c ± 0.09	4.64 ^{ef} ± 0.04			
N5	3.35 ^a ± 0.06	3.60 ^{cd} ± 0.07	3.93 ^f ± 0.07	4.17 ^d ± 0.08	4.40 ^e ± 0.05	4.54 ^c ± 0.08	4.57 ^{cde} ± 0.06			
N7	3.35 ^a ± 0.06	3.54 ^{bc} ± 0.02	3.72 ^{cd} ± 0.02	3.97 ^c ± 0.08	4.18 ^d ± 0.09	4.40 ^b ± 0.05	4.54 ^{cde} ± 0.03			
N10	3.35 ^a ± 0.06	3.53 ^{bc} ± 0.08	3.66 ^{bc} ± 0.07	3.74 ^b ± 0.09	3.94 ^c ± 0.05	4.13 ^a ± 0.06	4.47 ^{bc} ± 0.03			

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-g} ที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ 18 ค่าความเป็นเงิน-เหลือง (b*) ของเนื้อมะละกอพันธุ์ปลักไม่ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพลาสติกใสความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	4.96 ^a ± 0.07	5.78 ^g ± 0.08	6.43 ^d ± 0.08	5.68 ^c ± 0.03	5.07 ^a ± 0.07	6.16 ^g ± 0.07	6.74 ^g ± 0.07			
A1	4.96 ^a ± 0.07	5.64 ^{de} ± 0.06	6.09 ^c ± 0.06	5.56 ^{ab} ± 0.09	5.08 ^{ab} ± 0.04	5.42 ^{bc} ± 0.09	5.87 ^c ± 0.10			
A3	4.96 ^a ± 0.07	5.53 ^d ± 0.09	5.88 ^b ± 0.09	5.57 ^{abc} ± 0.05	5.10 ^{ab} ± 0.03	5.57 ^{de} ± 0.08	5.75 ^{ab} ± 0.06			
A5	4.96 ^a ± 0.07	5.40 ^c ± 0.05	5.82 ^b ± 0.03	5.55 ^{ab} ± 0.07	5.10 ^{ab} ± 0.06	5.46 ^{bcd} ± 0.08	5.76 ^{abc} ± 0.02			
A7	4.96 ^a ± 0.07	5.25 ^b ± 0.04	5.71 ^a ± 0.06	5.53 ^a ± 0.08	5.12 ^{ab} ± 0.06	5.38 ^{ab} ± 0.07	5.70 ^a ± 0.04			
A10	4.96 ^a ± 0.07	5.03 ^a ± 0.08	5.62 ^a ± 0.08	5.58 ^{abc} ± 0.05	5.18 ^b ± 0.06	5.30 ^a ± 0.07	5.67 ^a ± 0.06			
N1	4.96 ^a ± 0.07	5.78 ^g ± 0.05	6.38 ^d ± 0.06	5.55 ^{ab} ± 0.06	5.06 ^a ± 0.05	6.01 ^f ± 0.07	6.43 ^f ± 0.07			
N3	4.96 ^a ± 0.07	5.76 ^{fg} ± 0.05	6.35 ^d ± 0.02	5.65 ^{bc} ± 0.04	5.02 ^a ± 0.06	5.93 ^f ± 0.05	6.33 ^e ± 0.06			
N5	4.96 ^a ± 0.07	5.70 ^{efg} ± 0.09	6.15 ^c ± 0.08	5.57 ^{abc} ± 0.06	5.08 ^{ab} ± 0.05	5.57 ^e ± 0.08	5.97 ^d ± 0.06			
N7	4.96 ^a ± 0.07	5.66 ^{ef} ± 0.06	5.85 ^b ± 0.04	5.55 ^{ab} ± 0.10	5.07 ^a ± 0.08	5.55 ^{cde} ± 0.07	5.84 ^{bc} ± 0.05			
N10	4.96 ^a ± 0.07	5.63 ^{de} ± 0.05	5.82 ^b ± 0.07	5.62 ^{abc} ± 0.02	5.08 ^{ab} ± 0.06	5.44 ^{bcd} ± 0.04	5.74 ^{ab} ± 0.05			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-g} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p ≤ 0.05)

ตารางผนวกที่ 19 ความแน่นเนื้อของมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (นิวตัน)

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	52.1 ^a ± 0.3	32.9 ^{ab} ± 0.2	28.0 ^a ± 0.6	16.9 ^a ± 0.1	7.4 ^a ± 0.5	4.8 ^a ± 0.1	NA			
A1	52.1 ^a ± 0.3	32.5 ^{ab} ± 0.5	30.8 ^{bc} ± 1.0	23.8 ^c ± 0.7	7.8 ^a ± 1.3	5.2 ^a ± 0.2	NA			
A3	52.1 ^a ± 0.3	34.5 ^{bc} ± 0.9	32.5 ^c ± 1.4	23.6 ^c ± 0.2	7.9 ^a ± 0.2	5.1 ^a ± 0.1	4.6 ^a ± 0.5			
A5	52.1 ^a ± 0.3	38.3 ^b ± 1.4	36.1 ^{de} ± 1.7	28.5 ^e ± 1.3	7.9 ^a ± 0.4	5.9 ^a ± 0.9	4.7 ^a ± 0.2			
A7	52.1 ^a ± 0.3	44.1 ^f ± 0.6	37.2 ^e ± 1.3	24.2 ^c ± 1.5	10.4 ^b ± 0.9	8.2 ^b ± 0.3	5.6 ^a ± 0.3			
A10	52.1 ^a ± 0.3	45.2 ^f ± 0.3	39.3 ^f ± 0.7	31.3 ^f ± 0.8	17.5 ^c ± 0.1	15.7 ^c ± 0.6	14.8 ^b ± 0.2			
N1	52.1 ^a ± 0.3	34.5 ^{bc} ± 0.7	27.8 ^a ± 1.2	18.1 ^a ± 2.0	7.9 ^a ± 0.8	4.6 ^a ± 1.6	NA			
N3	52.1 ^a ± 0.3	31.4 ^a ± 2.2	29.4 ^{ab} ± 0.4	20.3 ^b ± 0.6	7.8 ^a ± 1.1	4.9 ^a ± 0.4	NA			
N5	52.1 ^a ± 0.3	33.0 ^{ab} ± 1.2	29.7 ^{ab} ± 1.2	20.7 ^b ± 0.2	7.9 ^a ± 1.1	5.1 ^a ± 1.2	NA			
N7	52.1 ^a ± 0.3	36.2 ^{cd} ± 1.4	35.1 ^d ± 0.4	27.6 ^{de} ± 1.0	7.8 ^a ± 0.4	5.8 ^a ± 0.7	4.2 ^a ± 0.8			
N10	52.1 ^a ± 0.3	36.9 ^{de} ± 1.2	35.9 ^{de} ± 0.8	26.6 ^d ± 0.6	7.9 ^a ± 1.6	5.9 ^a ± 0.4	4.3 ^a ± 1.0			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-f} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ 20 ความหวานของมะละกอพันธุ์ปลัดขิกไม่ลายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ร่วมกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมถ่านกัมมันต์ (องศาปริกซ์)

ตัวอย่าง	เวลาในการเก็บรักษา (วัน)									
	0	4	8	12	16	20	24			
LDPE	NA	5.91 ^b ± 0.08	7.30 ^d ± 0.05	8.07 ^g ± 0.07	8.26 ^g ± 0.02	9.04 ^h ± 0.04	10.42 ^h ± 0.05			
A1	NA	5.65 ^{ab} ± 0.30	7.26 ^d ± 0.03	7.21 ^e ± 0.08	7.44 ^e ± 0.03	8.46 ^g ± 0.03	8.82 ^e ± 0.07			
A3	NA	5.66 ^{ab} ± 0.29	6.40 ^b ± 0.08	6.48 ^b ± 0.09	6.84 ^d ± 0.03	7.84 ^e ± 0.03	8.46 ^d ± 0.03			
A5	NA	5.45 ^a ± 0.09	6.23 ^a ± 0.05	6.66 ^c ± 0.03	6.53 ^b ± 0.12	7.22 ^c ± 0.02	8.24 ^c ± 0.04			
A7	NA	5.32 ^a ± 0.09	6.27 ^a ± 0.07	6.18 ^a ± 0.03	6.66 ^c ± 0.03	6.85 ^b ± 0.05	8.19 ^c ± 0.08			
A10	NA	5.36 ^a ± 0.05	6.18 ^a ± 0.08	6.18 ^a ± 0.07	6.44 ^a ± 0.04	6.44 ^a ± 0.03	7.59 ^a ± 0.08			
N1	NA	5.67 ^{ab} ± 0.10	7.57 ^e ± 0.08	8.27 ^h ± 0.01	8.24 ^g ± 0.05	9.09 ^h ± 0.05	10.59 ⁱ ± 0.06			
N3	NA	5.59 ^{ab} ± 0.09	6.82 ^c ± 0.08	8.06 ^g ± 0.07	8.65 ⁱ ± 0.02	9.41 ⁱ ± 0.07	8.83 ^g ± 0.04			
N5	NA	5.52 ^a ± 0.37	7.26 ^d ± 0.05	8.05 ^g ± 0.04	8.47 ^h ± 0.02	9.07 ^h ± 0.04	9.05 ^f ± 0.04			
N7	NA	5.45 ^a ± 0.13	6.85 ^c ± 0.02	7.44 ^f ± 0.02	7.85 ^f ± 0.04	7.26 ^f ± 0.03	8.84 ^e ± 0.03			
N10	NA	5.42 ^a ± 0.06	6.86 ^c ± 0.03	6.84 ^d ± 0.05	6.81 ^d ± 0.08	7.52 ^d ± 0.05	8.04 ^b ± 0.04			

หมายเหตุ ตัวอักษร^{a-i} ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายอิทธิวัชร สิริเมืองจินดา
เกิดวันที่	10 พฤศจิกายน 2531
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีการบรรจุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	<ol style="list-style-type: none"> 1. โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration, NUI-RC) จากสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประจำปี 2554 2. ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554 3. ทุนการศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2554 4. ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าทางวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2555