บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีต่างๆ ของสารสกัดพืช

สารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิดนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีต่างๆ 4 วิธี คือ วิธี DPPH คำนวนในค่า IC_{50} (พีพีเอ็ม) และ วิธี TEAC FRAP และ ORAC คำนวณโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox (ไมโครกรัม หรือมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืช

	TPC* (µg GAE/ml)	IC_{50} (ppm)	TEAC* (µg TE/ml)	FRAP* (µg TE/ml)	ORAC** (mg TE/ml)
ตะไคร้ต้น	14.87±0.26^{b}	1,558±21^{g}	14.42±0.18^{a}	8.687±0.030^{a}	0.840±0.020^{cd}
ส้มกุ่ย	15.56±0.05^{b}	392±14^{f}	24.82±0.18^{bc}	6.047±0.385^{a}	0.779±0.086^{cd}
ผักสมุย	11.18±1.06^{a}	278±1^{e}	20.03±0.35^{ab}	13.58±0.16^{b}	0.676±0.107^{d}
ผักฮ้านน้ำ	19.91±1.15^{c}	133±8^{c}	39.58±0.54^{e}	26.70±0.33^{c}	1.920±0.125^{ab}
ติ้วเกลี้ยง	23.05±0.94^{d}	158±3^{d}	30.14±1.54	32.10±1.48^{d}	0.760±0.035^{cd}
ราชาวดีป่า	18.67±0.17^{c}	158±12^{d}	22.97±0.21^{b}	30.98±4.47^{d}	1.929±0.109^{ab}
ผักไผ่	32.10±0.58^{f}	88.4±1.8^{b}	126.2±6.2^{g}	46.64±3.66^{f}	2.041±0.108^{a}
หมีเหม็น	42.94±0.57^{h}	48.4±0.4^{a}	122.1±2.3^{f}	57.23±1.58^{g}	2.077±0.025^{a}
หญ้าเอ็นเสือ	28.85±1.77^{e}	40.0±1.5^{a}	38.08±0.82^{d}	40.37±1.99^{e}	1.810±0.104^{b}
ทะโล้	38.60±0.64^{g}	38.2±0.3^{a}	141.4±5.1^{h}	54.40±0.88^{g}	0.943±0.030^{c}

หมายเหตุ * ,** หมายถึง สารสกัดพืชมีความเข้มข้นเท่ากับ 100 และ 500 พีพีเอ็ม (ppm) ตามลำดับ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวคอลัมน์ แสดงถึง ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Ducan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$)

TPC หมายถึง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดแสดงค่าในหน่วยไมโครกรัมสมมูลย์ของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร

IC_{50} หมายถึง ความเข้มข้น(ในหน่วยพีพีเอ็ม)ของสารสกัดพืชที่ใช้ทำลายอนุมูลอิสระ DPPH ลง 50 เปอร์เซ็นต์

TEAC หมายถึง ความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ $ABTS^{+}$ แสดงค่าในหน่วยไมโครกรัมสมมูลย์ของ Trolox ต่อมิลลิลิตร

FRAP หมายถึง ความสามารถในการรีดิวซ์ทั้งหมด แสดงค่าในหน่วยไมโครกรัมสมมูลย์ของ Trolox ต่อมิลลิลิตร

ORAC หมายถึง ความสามารถในการชะลอการออกซิเดชันของฟลูออเรสซีนของตัวอย่าง หน่วยมิลลิกรัมสมมูลย์ของ Trolox ต่อมิลลิลิตร

สารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม จำนวน 10 ชนิด มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 11.18-42.38 มิลลิกรัม (สมมูลย์ของกรดแกลลิก) ต่อมิลลิลิตร โดยพบสารสกัดพืช 3 ชนิดที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่า 30 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ได้แก่ ผักไผ่ (32.1) ทะโล้ (38.6) และหมีเหม็น (42.94) ส่วนสารสกัดพืชที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดต่ำที่สุด คือ ผักสมุย (11.18)

สารสกัดพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ DPPH ด้วยกลไกการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอมแตกต่างกัน และมีค่า IC_{50} ตั้งแต่ 38.2-1,558 พีพีเอ็ม โดยสารสกัดพืชที่มีค่า IC_{50} ต่ำแสดงว่ามีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ DPPH ที่ดี ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้จะให้ผลตรงข้ามกับวิธีทดสอบอื่นๆ จากผลการทดลองพบสารสกัดพืช 3 ชนิดที่มีค่า IC_{50} ต่ำกว่า 50 พีพีเอ็ม ได้แก่ ทะโล้ (38.2) หญ้าเอ็นเสือ (40) และหมีเหม็น (48.4) ส่วนสารสกัดตะไคร้ต้นมีค่า IC_{50} สูงที่สุด (1,558) หรือมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีนี้ต่ำที่สุด สำหรับความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ หรือวิธี TEAC พบว่าสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็มจำนวน 3 ชนิดได้แก่ สารสกัดทะโล้ ผักไผ่ และ หมีเหม็น มีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1- 3 อันดับแรก โดยมีค่า TEAC เท่ากับ 141.4, 126.2 และ 121.1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ ในขณะที่สารสกัดตะไคร้ต้นมีค่า TEAC ต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 14.42 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับ ผลการทดลองความสามารถในการรีดิวซ์ทั้งหมดด้วยวิธี FRAP พบว่า สารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิดมีค่า FRAP อยู่ระหว่าง 6.047-57.23 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยสารสกัดหมีเหม็น ทะโล้ และผักไผ่มีค่า FRAP สูงกว่าสารสกัดพืชอื่นๆ ส่วนสารสกัดส้มกุ่ยพบว่า มีค่า FRAP ต่ำที่สุด คือ 6.048 มิลลิกรัมสมมูลย์ สำหรับวิธี ORAC ใช้สารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม พบว่ามีค่า ORAC อยู่ระหว่าง 0.676-2.077 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยสารสกัดหมีเหม็น ผักไผ่ ผักฮ้านน้ำ และ ราชาวดีป่ามีค่า ORAC สูงที่สุดและไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

จากผลการทดลองพบว่า สารสกัดพืชมีความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกลไกที่แตกต่างกัน เนื่องจาก วิธี DPPH และ TEAC นั้น แม้ว่าจะทดสอบการทำลายอนุมูลอิสระ $DPPH^{\bullet}$ และ $ABTS^{\bullet+}$ ตามลำดับ แต่กลไกการทำลายอนุมูลอิสระทั้งสองมีความแตกต่างกัน โดยวิธี DPPH จะทดสอบความสามารถในการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอม ส่วน วิธี TEAC นั้นจะทดสอบความสามารถในการเคลื่อนย้ายอิเลคตรอน จากผลการทดลองพบว่า สารสกัดทะโล้และหมีเหม็นนั้นมีค่า IC_{50} ต่ำ แต่มีค่า TEAC สูง แสดงว่า สารพฤกษเคมีในพืชทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถทำลายอนุมูลอิสระทั้งสองชนิดผ่านกลไกทั้งสองแบบได้ดี ส่วนสารสกัดตะไคร้ต้นมีค่า IC_{50} สูงและมีค่า TEAC ต่ำที่สุด แสดงว่า สารสารพฤกษเคมีของตะไคร้ต้นมีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระผ่านกลไกทั้ง 2 ได้ไม่ดี สำหรับสารสกัดผักไผ่ มีค่า IC_{50} ปานกลางและมีค่า TEAC สูง แสดงว่าสารสารพฤกษเคมีของผักไผ่มีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระผ่านกลไกการเคลื่อนย้ายอิเลคตรอนได้ดีกว่าการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอม

แม้ว่าวิธี TEAC และ FRAP จะใช้กลไกการเคลื่อนย้ายอิเลคตรอนเหมือนกัน แต่มีความจำเพาะต่อการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน ค่าที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละวิธีจึงมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่า TEAC และค่า FRAP มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ หากสารสกัดพืชมีค่า TEAC สูง ก็มีแนวโน้มว่าจะมีค่า FRAP สูงเช่นกัน แสดงว่า สารพฤกษเคมีอาจเป็นกลุ่มเดียวกันที่มีความสามารถในการเคลื่อนย้าย สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี ORAC เป็นการทดสอบความสามารถของสารต้านออกซิเดชันในการชะลอการเกิดอนุมูล $AAPH^{\bullet}$ โดยใช้กลไกการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอมเป็นกลไกหลักในการทำปฏิกิริยา วิธีการนี้จึงมีความ

แตกต่างจากวิธีทดสอบอื่นๆ เป็นอย่างมาก ทำให้พบว่า สารสกัดพืชที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีอื่นๆอยู่ในระดับปานกลาง มีค่า ORAC สูง เช่น ผักฮ้านน้ำ ราชาวดีป่า และหญ้าเอ็นเสือ โดยมีค่า ORAC สูงกว่า 1.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสารสกัดพืชที่มีค่า ORAC สูงที่สุดได้แก่ สารสกัดหมีเหม็นและผักไผ่ (มีค่า 2.077 และ 2.041 มิลลิกรัมสมมูลย์ของ Trolox ตามลำดับ) ส่วนสารสกัดที่มีค่า ORAC ต่ำที่สุด คือ ผักสมุย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไปตามกลไกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา การบ่งชี้ความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงไม่สามารถใช้วิธีวิเคราะห์วิธีใดวิธีหนึ่งในการบ่งชี้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันทั้งหมดได้ ดังนั้น พืชแต่ละชนิดจึงมีความเหมาะสมต่อวิธีวิเคราะห์ที่มีกลไกแตกต่างกันนอกเหนือไปจาก ความแตกต่างของชนิดและองค์ประกอบของพืช

เมื่อพิจารณาความสอดคล้องระหว่างปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านออกซิเดชันทุกวิธี พบว่า สารสกัดพืชที่มีปริมาณฟีนอลิกสูง เช่น ทะโล้ หมีเหม็นและผักไผ่ มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ดีในทุกวิธีทดสอบ จึงมีความเป็นไปได้ว่า สารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืช มีบทบาทสำคัญในการต้านออกซิเดชันดังที่พบรายงานในพืชหลายชนิด อย่างไรก็ดี ค่าที่วิเคราะห์ได้ในทุกวิธีทดสอบมีความแตกต่างจากผลการวิเคราะห์สารสกัดพืชแห้งที่เคยทำมาก่อน อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกพืชตัวอย่าง ทั้งอายุ ฤดูกาลสภาพดิน และสภาพอากาศ เป็นต้น รวมทั้งปัจจัยที่เกิดจากการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกและสารต้านออกซิเดชันในระหว่างการอบแห้งและการทำให้เข้มข้น ซึ่งจะทำลายสารในกลุ่มที่ไม่ทนความร้อนหลายชนิด ดังรายงานของ Katsube และ คณะ (2009) ที่พบการสูญเสีย quercetrin 3-(6-malonylglucoside) ไอโซเคอวซีติน (isoquercitrin) รูทิน และ กรดคลอโรจีนิก และสารอื่นๆ อีกหลายชนิดภายหลังการทำแห้งใบหม่อน รวมทั้งยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารที่ไม่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน หรือมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาลดลงได้อีกด้วย (Cai และ คณะ, 2006; Roy และ คณะ, 2007) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ทะโล้ หมีเหม็นและผักไผ่เป็นพืชที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงและมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่ดี มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ในด้านต่างๆต่อไปได้

4.2 ผลของการใช้สารสกัดจากพืชในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชันประเภทน้ำในน้ำมันที่มีสัดส่วนน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์

สารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิด ถูกเติมลงในอิมัลชันประเภทน้ำในน้ำมัน (water-in-oil, W/O) ที่มีสัดส่วนน้ำมัน 90 และ 70 เปอร์เซ็นต์ที่เตรียมขึ้นจากฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (พีเอช 5.4) ผสมกับน้ำมันถั่วเหลือง โดยกำหนดความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่ 200 และ 500 พีพีเอ็ม ตัวอย่างอิมัลชันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 56 และ 32 วัน ตามลำดับ มาวิเคราะห์การออกซิเดชันของไขมันด้วยวิธี TBARS หาค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) ค่า p-Anisidine (p-AV) และปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox V) โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างอิมัลชันควบคุมและอิมัลชันเติม BHT ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

- **ความคงตัวของอิมัลชัน**
  - **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์**

อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สีขาวขุ่นทึบแสง มีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ค่าดัชนีการหักเหแสงของเฟสทั้งสองต่างกันและเกิดการกระจายแสงจึงมองเห็นเป็นสีขาว (พิมพา ลีลาพรพิสิฐ, 2540) การเติมสารสกัดพืชลงในตัวอย่าง ทำให้สีของอิมัลชันเปลี่ยนไปตามสีของสารสกัดพืช เนื่องจาก ในพืชมีรงควัตถุที่ให้สีหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ เช่น คลอโรฟิลล์ ฟลาโวนอยด์ คาร์โรทีนอยด์ เป็นต้น ซึ่งรงควัตถุแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายแต่ละชนิดแตกต่างกัน (Kays, 1991) ส่งผลให้อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิด มีสีและความเข้มของสีต่างกันไปตามชนิดและความสามารถในการละลายของรงควัตถุในพืช โดยสามารถแยกสีของอิมัลชันออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสีเขียวจางๆ ได้แก่ อิมัลชันที่เติมสารสกัดตะไคร้ต้น ผักสมุยและหญ้าเอ็นเสือ และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสีเหลืองจางๆ ได้แก่อิมัลชันที่เติมสารสกัดราชาวดีป่า ติ้วเกลี้ยง ส้มกุ่ย หมีเหม็น ผักฮ้านน้ำ ผักไผ่ และทะโล้ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชจาก 200 เป็น 500 พีพีเอ็ม ส่งผลให้สีของอิมัลชันเข้มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม อิมัลชันที่ความเข้มข้นของสารสกัดพืช 500 พีพีเอ็ม สีของอิมัลชันยังคงใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม เมื่อมองด้วยตาเปล่า

ภายหลังทำการเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 56 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น อิมัลชันมีการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะใหญ่ๆ กล่าวคือ เกิดการเสียสภาพแบบต่างๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบอิมัลชันเป็นระบบที่ไม่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิค (thermodynamically unstable systems) มีพลังงานอิสระในระบบที่เพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างเฟสน้ำและเฟสน้ำมัน นำไปสู่การแยกชั้นระหว่างน้ำและน้ำมัน รวมทั้งส่งผลให้ระบบอิมัลชันเสียสภาพในที่สุด (Dickinson, 1992) ในการทดลองนี้ ตรวจพบการเสียสภาพของอิมัลชันในอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชเท่านั้น โดยสามารถแบ่งลักษณะการเสียสภาพออกเป็น 4 แบบ คือ flocculation, coalescence, oiling off และ เกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความคงตัวของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ภายหลังเก็บรักษานาน 56 วัน

ตัวอย่าง*	ppm	ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)								
		0	7	14	21	28	35	42	49	56
Control		-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R	200	-	-	-	-	-	-	-	-	O
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TK	200	-	-	-	-	-	-	-	F	C
	500	-	-	-	F	F	C	C	C	S
SK	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MM	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TT	200	-	-	-	-	-	-	-	-	O
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง*	ppm	ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)								
		0	7	14	21	28	35	42	49	56
Control		-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HN	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SM	200	-	-	-	-	-	-	-	-	O
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	O
PP	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TA	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	O
YE	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	-	-	-	-	-	-	-	O

หมายเหตุ * หมายถึง สารสกัดพืช 10 ชนิด ได้แก่ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

- หมายถึง ไม่พบการเสียสภาพ

F หมายถึง การเสียสภาพแบบ flocculation

C หมายถึง การเสียสภาพแบบ coalescence

O หมายถึง การเสียสภาพแบบ oiling off

S หมายถึง การเสียสภาพแบบเกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation)

จากตารางที่ 4.2 พบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีการเสียสภาพแบบ oiling off มากที่สุด โดยพบชั้นน้ำมันลอยอยู่บนผิวหน้าของตัวอย่างอิมัลชันเมื่อเก็บรักษานาน 56 วัน ซึ่งการเสียสภาพแบบ oiling off นี้ จะเกิดต่อเนื่องมาจากการเสียสภาพแบบ coalescence ที่มีสาเหตุจากการรวมตัวของหยดน้ำมัน โดยในระหว่างการเก็บรักษา หยดน้ำมันมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันแล้วเกิดรวมตัวกันเป็นหยดขนาดใหญ่หรือชั้นฟิล์มน้ำมันแยกตัวออกมา ซึ่งการรวมตัวแบบ coalescence นี้ส่งผลให้ พื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่จับกับสารอิมัลซิ-ไฟเออร์มีค่าลดลง จึงกลับมารวมตัวกันเองด้วยแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมัน (droplet-droplet interaction potential) นอกจากนี้ ความแข็งแรงของชั้นฟิล์มระหว่างสารอิมัลซิไฟเออร์กับเฟสทั้งสอง ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราเร็วของการเสียสภาพแบบนี้ด้วยเช่นกัน (Dickinson, 1992; McClements, 2002)

ส่วนการเสียสภาพแบบ flocculation นั้น เกิดจากการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันของหยดน้ำมัน และคงสภาพอยู่ในลักษณะนี้ โดยไม่มีการรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่เหมือนกับกรณีของ coalescence (McClements, 2002) และตามรายงานของ Sjöblom (1996) ยังพบว่า อิมัลชันที่มีการเสียสภาพแบบนี้สามารถผันกลับได้เมื่อนำไปผสมโดยใช้แรงเฉือนต่ำ (low shear forces) อย่างไรก็ดี การเกิด flocculation สามารถเร่งให้เกิดการเสียสภาพแบบ creaming ได้เร็วขึ้น รวมทั้งยังส่งผลต่อความหนืดของอิมัลชันด้วยเช่นกัน (Serra และ Casamitjana, 1998) จึงเห็นได้ว่า การเสียสภาพของอิมัลชัน ไม่เพียงส่งผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ แต่ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพบางประการอีกด้วย

เมื่อพิจารณาความคงตัวของอิมัลชันเติมพืชทั้ง 10 ชนิด พบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดติ้วเกลี้ยงทั้ง 2 ความเข้มข้นมีความคงตัวต่ำที่สุด โดยการเติมสารสกัดติ้วเกลี้ยงที่ความเข้มข้นสูง (500 พีพีเอ็ม) อิมัลชันมีความคงตัวต่ำกว่าการเติมสารสกัดที่ความเข้มข้นต่ำหรือ 200 พีพีเอ็ม อีกทั้งยังพบการเสียสภาพแบบ flocculation และ coalescence เมื่อเก็บรักษาได้เพียง 21 และ 35 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อครบ 56 วัน อิมัลชันที่เติมสารสกัดติ้วเกลี้ยง 500 พีพีเอ็ม เกิดการแยกชั้นของน้ำมันหรือเกิดการเสียสภาพอิมัลชันอย่างสมบูรณ์ ส่วนการเติมสารสกัดติ้วเกลี้ยง 200 พีพีเอ็มนั้น พบการเสียสภาพตั้งแต่วันที่ 49 ในขณะที่การใช้สารสกัดพืชอื่นๆ พบการเสียสภาพในวันที่ 56 แสดงให้เห็นว่า ระบบอิมัลชันที่ติมสารสกัดติ้วเกลี้ยงมีความสมดุลต่ำกว่าพืชชนิดอื่นๆ อาจเนื่องมาจาก องค์ประกอบที่พบในติ้วเกลี้ยงเอง หรือชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ไม่มีความเหมาะสมต่อสารสกัดชนิดนี้ รวมไปถึง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระดับโมเลกุล เช่น การเกิดการออกซิเดชัน และ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งให้เกิดการเสียสภาพของอิมัลชัน (McClements, 2009) ดังนั้น สารสกัดติ้วเกลี้ยงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารต้านการหืนในอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีความคงตัวต่ำ

- อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์

ส่วนอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมันที่มีสัดส่วนน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เตรียมขึ้นมีสีขาวขุ่น มีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ยังมีลักษณะเป็นของเหลว โดยตลอดระยะการเก็บรักษานาน 32 วัน อิมัลชันทดสอบทุกชนิดไม่พบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทั้งด้านความคงตัวของผลิตภัณฑ์และสีของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ ไม่พบการเสียสภาพทั้ง 4 แบบ คือ oiling off, flocculation, coalescence และการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation) รวมทั้งการเติมสารสกัดพืชทั้งสองระดับความเข้มข้น (200 และ 500 พีพีเอ็ม) ก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์ในพืชทั้งสองกลุ่ม คือ พืชที่มีสีเขียว ได้แก่ ตะไคร้ต้น ผักสมุยและหญ้าเอ็นเสือ และพืชที่มีสีเหลือง ได้แก่ ราชาวดีป่า ติ้วเกลี้ยง ส้มกุ่ย หมีเหม็น ผักฮ้านน้ำ ผักไผ่ และทะโล้

ปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญต่อความคงตัวของอิมัลชันชนิดนี้ตลอดการเก็บรักษา 32 วัน ได้แก่ การลดขนาดหยดน้ำมันในระบบอิมัลชันในขั้นตอนโฮโมจีไนเซชัน เนื่องจาก เฟสน้ำมันและเฟสน้ำมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (droplet-droplet interaction) เฉพาะตัว ส่งผลให้อนุภาคในแต่ละเฟสมีแนวโน้มรวมตัวกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวในระบบอิมัลชัน ทำให้อิมัลชันเสียสภาพ แต่การโฮโมจีไนเซชันส่งผลโดยตรงต่อการลดขนาดอนุภาคของเฟสทั้งสองลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดขนาดของหยดน้ำมันทำให้สามารถจับตัวกับสารอิมัลซิไฟเออร์และเฟสน้ำได้มากขึ้น ความคงตัวของระบบจึงเพิ่มมากขึ้นไปด้วย โดยขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวดีอยู่ในช่วงไม่เกิน 1 ไมโครเมตร(Decker และคณะ, 2005) อีกทั้งยังพบว่า ความเร็วรอบ (rpm) และระยะเวลาในการโฮโมจีไนซ์ตัวอย่าง มีความเกี่ยวข้องกับความคงตัวของระบบอิมัลชันอีกด้วย โดยในการศึกษาครั้งนี้พบว่า การโฮโมจีไนซ์ตัวอย่างอิมัลชันที่ความเร็วรอบ 13,500 rpm เป็นเวลานาน 5 นาที จึงจะเพียงพอต่อการรักษาระบบอิมัลชันดังกล่าวให้มีความคงตัวตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 32 วัน นอกจากนี้ การโฮโมจีไนซ์ตัวอย่างยังมีส่วนช่วยด้านสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอนุภาคของระบบมีขนาดเล็กลง จึงสามารถสะท้อนแสงได้มากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสว่างมากขึ้นตามไปด้วย จึงไม่เห็นความแตกต่างระหว่างอิมัลชันควบคุมกับอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช

ถึงแม้ว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิดไม่มีการเสียสภาพตลอด 32 วัน แต่ช่วงท้ายของการทดสอบ อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชบางชนิด เช่น หมีเหม็น ผักฮ้านน้ำ ติ้วเกลี้ยง สังเกตุเห็นการรวมตัวกันเป็นชั้นครีมที่จะนำไปสู่การแยกชั้น หรือการเสียสภาพแบบ creaming ได้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษาให้นานขึ้น ในขณะที่อิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิดไม่พบลักษณะดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การเติมสารสกัดพืชมีผลต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบที่พบในพืช

- **การเปลี่ยนแปลงสี**

- อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงของสีอิมัลชันในระหว่างการเก็บรักษา ของกลุ่มอิมัลชันที่มีสีเขียวสามารถตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า โดยอิมัลชันเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนๆ เป็นสีเหลืองคล้ำ หรือสีน้ำตาลคล้ำ (olive brown) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสลายตัวของรงควัตถุคลอโรฟิลล์ผ่านวิถีทั้งสองวิถี คือ Type I และ Type II (Toivonen และ Brummell, 2008) โดยการสลายตัวของคลอโรฟิลล์แบบ Type I นั้น คลอโรฟิลล์เอ (chlorophll a) ซึ่งให้สีเขียวแกมน้ำเงิน สลายตัวเป็นฟีโอไฟติน เอ (pheophytin a) และสลายต่อเป็นฟีโอพอร์ไบด์ เอ (pheophorbide a) ซึ่งสารทั้งสองมีสีน้ำตาลคล้ำ (Matile, 1999) แต่การสลายตัวผ่านวิถี Type II นั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอโรฟิลล์กับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการออกซิเดชัน เช่น อนุมูลเปอร์ออกซิล หรืออนุมูลฟีนอกซิล (phenoxyl radicals) รวมถึงอนุมูลอื่นๆ การสลายตัวของคลอโรฟิลล์ผ่านวิถีทั้งสองนี้ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเปลี่ยนไปในที่สุด (Toivonen และ Brummell, 2008) สำหรับกลุ่มอิมัลชันที่มีสีเหลืองพบว่ามีสีซีดจางลงเล็กน้อย คาร์โรทีนอยด์เป็นรงควัตถุกลุ่มที่ให้สีเหลืองและพบได้มากในพืชเกือบทุกชนิด สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และคาร์โรทีนอยด์ที่ละลายในน้ำมันมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำมาก (Tsimidou และ Biliaderis, 1997) ในการทดลองครั้งนี้ พืชหลายชนิด เช่น ผักสมุย ติ้วเกลี้ยง ทะโล้ หมีเหม็น และหญ้าเอ็นเสือ มีรายงานการตรวจพบเทอร์ปีนซึ่งสารประกอบในกลุ่มคาร์โรทีนอยด์ ด้วยเทคนิคเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thin layer chromatography (นราพร พรหมไกรวร, 2552) สอดคล้องสีเหลืองของอิมัลชันเติมติ้วเกลี้ยง ทะโล้ และหมีเหม็น อย่างไรก็ดี เมื่อครบ 56 วัน พบการซีดจางลงของสีเหลืองเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า คาร์โรทีนอยด์มีความคงตัวมากกว่าคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของรงควัตถุชนิดนี้

การเติมสารสกัดพืชลงในอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญด้านกายภาพ คือ สีและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 56 วัน ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่ใช้เป็นสำคัญ โดยการเติมสารสกัดส้มกุ่ย หมีเหม็น ผักฮ้านน้ำ และ ผักไผ่ ที่ความเข้มข้นทั้ง 2 ระดับ ไม่มีผลต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์และการเปลี่ยนแปลงสี ส่วนการเติมสารสกัดติ้วเกลี้ยงทุกระดับความเข้มข้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวต่ำที่สุด

- อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน70 เปอร์เซ็นต์

อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ ที่เติมสารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้นต่ำและสูง สังเกตุไม่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ทั้งทางด้านความคงตัวและสีของผลิตภัณฑ์ตลอดอายุการเก็บรักษา 32 วันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

- **ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value, PV)**

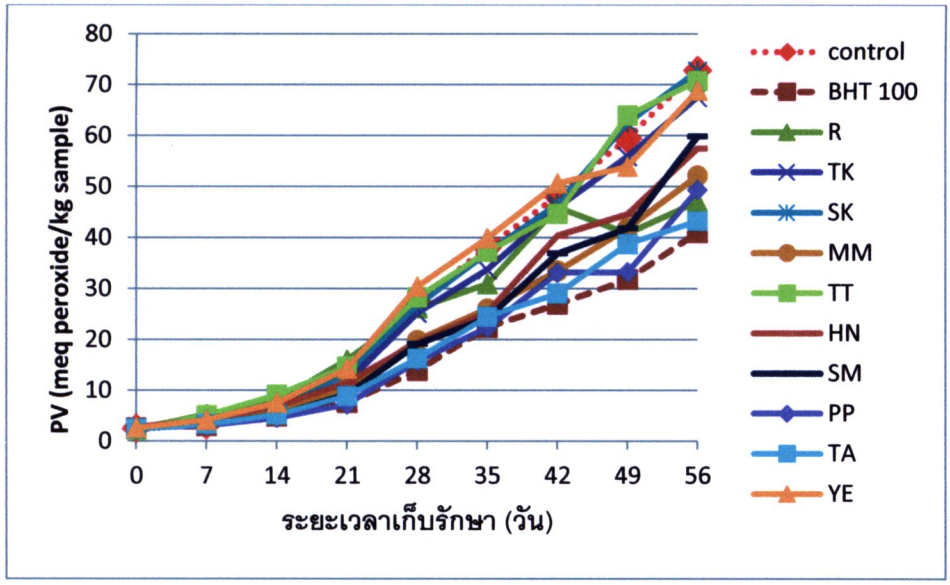
การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) เป็นการวัดปริมาณไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (primary oxidation products) ที่ได้จากการออกซิเดชันของไขมัน และวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือ iodometric assay โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเปอร์ออกไซด์กับไอโอไดด์ไอออน (iodide ion) ได้เป็นไอโอดีน จากนั้นไตเตรตหาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้น (Laguerre และ คณะ, 2007) ค่าเปอร์ออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้ แสดงในรูป milliequivalent (meq) peroxide ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์**

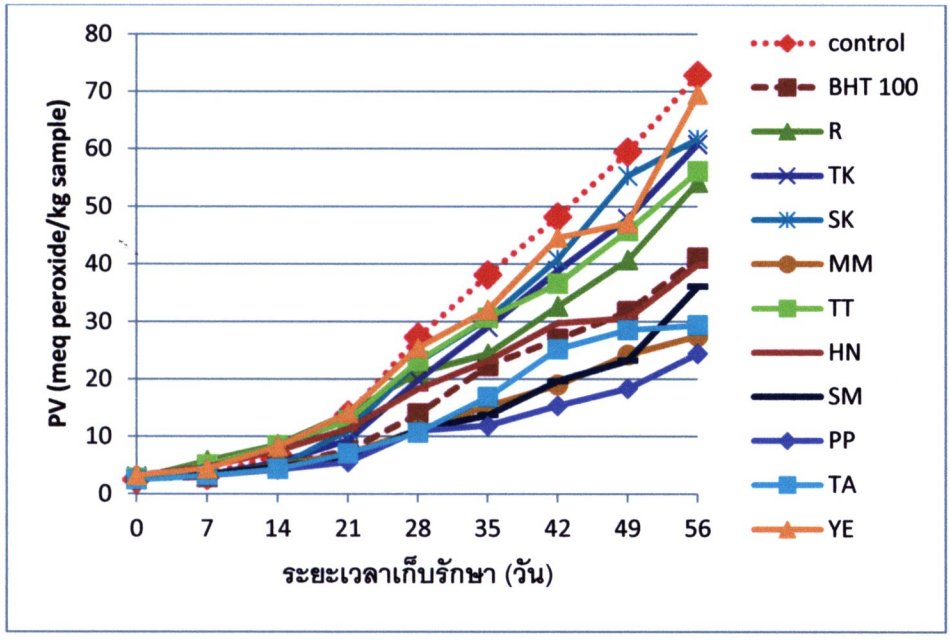
ค่า PV ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ ที่เติมสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 200 และ 500 พีพีเอ็ม (ภาพที่ 4.1) ผลการทดลองแสดงว่า ตัวอย่างควบคุมทั้งสองชนิด (ไม่เติม BHT และเติม BHT 100 พีพีเอ็ม) มีค่า PV เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยตัวอย่างควบคุมมีค่า PV ในแต่ละวันของเก็บรักษา โดยมีค่าเริ่มต้น (วันที่ 0) และค่าสุดท้าย (วันที่ 56) สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ คือ 2.5 และ 72.8 meq peroxide ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ การเติม BHT ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเปอร์ออกไซด์ลดลง และมีค่า PV ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยมีค่าสุดท้ายเท่ากับ 41 meq peroxide ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง แสดงว่า BHT สามารถยับยั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในระหว่างการเก็บรักษาได้

ถึงแม้ว่า ค่า PV ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทุกชนิดที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม แต่มีค่าที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าในอิมัลชันที่เติม BHT โดยมีความแตกต่างระหว่างตัวอย่างทั้งหมดอย่างชัดเจนตั้งแต่การเก็บรักษาในวันที่ 28 เป็นต้นไป (ภาพที่ 4.1A) แสดงว่า สารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิดนี้ มีฤทธิ์ในการยับยั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ใกล้เคียงกันในช่วงวันที่ 0-21 วันของการเก็บรักษา แต่เมื่อเพิ่มระบะเวลาการเก็บรักษาจาก 21 เป็น 56 วัน พบว่า การใช้สารสกัดพืชที่ความเข้มข้นนี้ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ BHT (100 พีพีเอ็ม) อย่างไรก็ตาม อิมัลชันที่เติมสารสกัดตะไคร้ต้น หญ้าเอ็นเสือ และติ้วเกลี้ยง มีค่า PV ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมตลอดอายุการเก็บรักษา โดยมีค่าสุดท้ายเท่ากับ 70.8, 68.8 และ 67.5 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ แสดงว่า สารสกัดพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันต่างกัน ทั้งที่เกิดจากปัจจัยด้านการสกัดที่มีผลต่อสารออกฤทธิ์ของสารต้านออกซิเดชันที่พบในพืช รวมถึง ความเหมาะสมต่อระบบอิมัลชัน

การเติมสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ดังภาพที่ 4.1B โดยอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทุกชนิดมีค่า PV ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดผักไผ่ หมีเหม็น และทะโล้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่า PV ตลอดอายุการเก็บรักษาต่ำกว่าอิมัลชันที่เติม BHT 100 พีพีเอ็ม ประมาณ 1.6 เท่า นอกจากนี้ การเติมสารสกัดผักฮ้านน้ำที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มีประสิทธิภาพเทียบเท่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม การเพิ่มปริมาณของสารสกัดพืชนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณสารต้านออกซิเดชันที่เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับ Mattia และ คณะ (2009) ที่พบว่า สารประกอบฟีนอลิกมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นจาก 250 เป็น 500 ไมโครโมลาร์



(A)



(B)

ภาพที่ 4.1 ค่าเปอร์ออกไซด์ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิของสารสกัดพืชทั้งหมด พบว่า การใช้สารสกัดผักไผ่ หมีเหม็น และ ทะโล้เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านการหืน คือ ชนิดของพืชและความเข้มข้นที่เลือกใช้

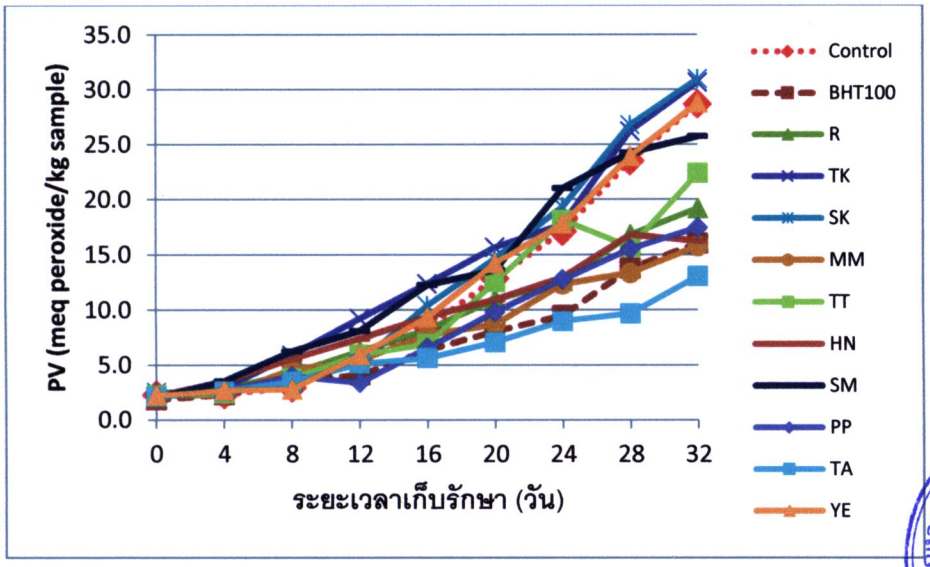
- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน70 เปอร์เซ็นต์**

อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน70 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า PV ตลอดอายุการเก็บรักษาเช่นเดียวกับอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ โดยอิมัลชันควบคุมมีค่า PV สูงกว่าอิมัลชันเติม BHT 100 พีพีเอ็ม และมีค่า PV ต่ำกว่าอิมัลชันควบคุมประมาณ 2 เท่า แสดงว่า การเติม BHT ที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็มนั้น มีประสิทธิภาพที่ดีในการชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันในอิมัลชันทดสอบ (ภาพที่ 4.2)

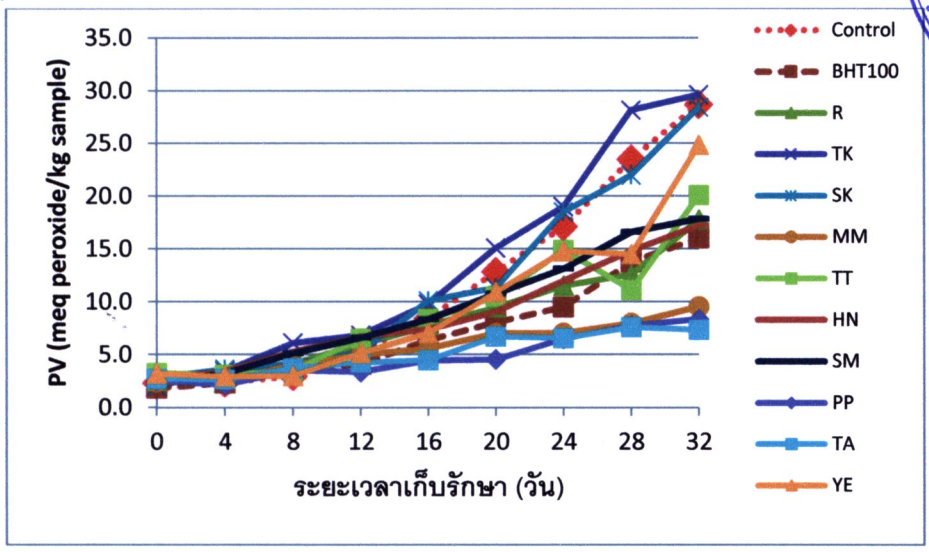
การเติมสารสกัดพืชแต่ละชนิดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า PV ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเข้มข้น โดยการเติมสารสกัดพืช 200 พีพีเอ็ม มีฤทธิ์ยับยั้งการออกซิเดชันของไขมันได้ ยกเว้นการเติมสารสกัดพืช 4 ชนิด ได้แก่ ติ้วเกลี้ยง ส้มกุ่ย หญ้าเอ็นเสือ และผักสมุย ที่มีค่า PV ใกล้เคียงหรือมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม (ภาพที่ 4.2A) อย่างไรก็ดีพบว่า การเติมสารสกัดทะโล้ 200 พีพีเอ็มในอิมัลชัน มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน และมีประสิทธิภาพดีกว่าอิมัลชันที่เติม BHT 100 พีพีเอ็มตลอดอายุการเก็บรักษา ส่วนการเติมสารสกัดหมีเหม็นก็มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ BHT 100 พีพีเอ็ม ดังนั้น การเติมสารสกัดพืชที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าว สารสกัดทะโล้ และหมีเหม็นจึงมีประสิทธิภาพที่ดีในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน70 เปอร์เซ็นต์

การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชจาก 200 เป็น 500 พีพีเอ็ม พบว่า อิมัลชันทุกชนิดมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ยกเว้นสารสกัดติ้วเกลี้ยงและส้มกุ่ยที่ยังคงมีค่า PV ตลอดอายุการเก็บรักษาใกล้เคียงตัวอย่างควบคุม (ภาพที่ 4.2B) สารสกัดพืชทั้งสองชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในระบบอิมัลชัน รวมถึงอาจแสดงสมบัติเป็นสารโปร-ออกซิแดนซ์ (pro-oxidant) ที่สามารถเร่งการออกซิเดชันของไขมันได้ (Sahu และคณะ, 1993; Cao และคณะ, 1997) นอกจากนี้ การเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่ใช้ ส่งผลให้อิมัลชันที่เติมสารทะโล้ ผักไผ่ และหมีเหม็นมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่า PV ตลอดอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 10 meq peroxide อีกทั้งการเติมสารสกัดพืชทั้งสามชนิด ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการเติม BHT 100 พีพีเอ็มอีกด้วย

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของการเติมสารสกัดพืชที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ความสามารถดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัดพืช จึงกล่าวได้ว่า ชนิดและองค์ประกอบที่พบในพืชมีบทบาทสำคัญต่อฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน นอกเหนือไปจากปัจจัยอื่นๆ เช่นชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมัน อุณหภูมิ แสง ออกซิเจน สภาวะทดสอบ เป็นต้น (McClements และ Decker, 2000) จากผลการวิเคราะห์ค่า PV แสดงว่า การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน



(A)



(B)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ภาพที่ 4.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

- **ค่า TBARS**

การวิเคราะห์ด้วยวิธี TBARS ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างรีเอเจนต์ Thiobarbituric acid กับผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (secondary oxidation products) ที่ได้จากการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้แก่ สารในกลุ่มอัลดีไฮด์ คีโตน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งสารในกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ (Gray,

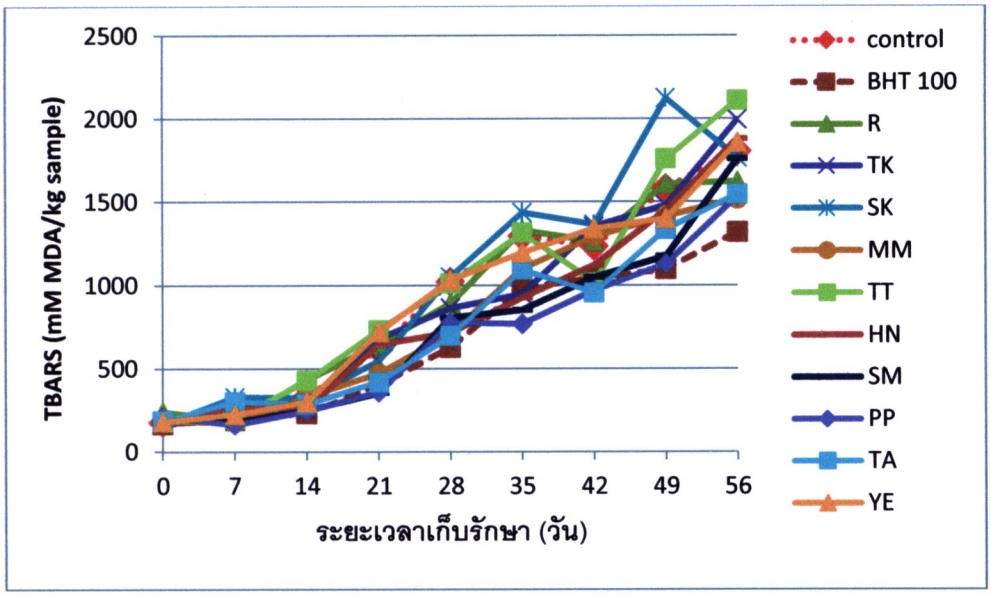
1978; Hawrysh, 1990) อีกทั้ง วิธีนี้ยังถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์การออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัว (Laguerre และ คณะ, 2007)

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

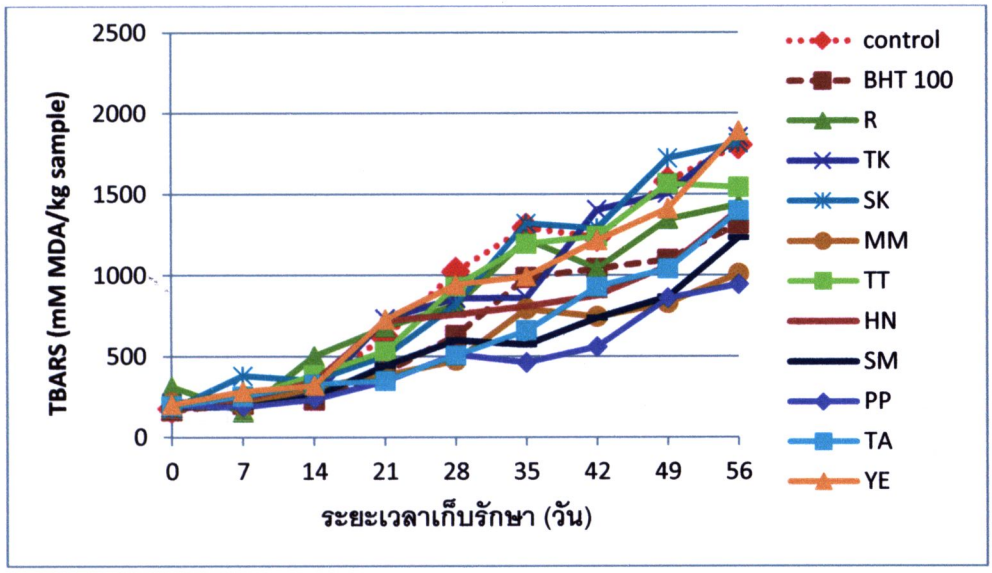
ค่า TBARS ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชจำนวน 10 ชนิด ที่อายุการเก็บรักษา 56 วัน แสดงค่าในรูปมิลลิโมลาร์มาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง (mM MDA/kg sample) ผลการทดลองสอดคล้องกับการวัดปริมาณ PV ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นปฐมภูมิ โดยค่า TBARS จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 4.3)

เมื่อพิจารณาตัวอย่างอิมัลชันควบคุม (Control; ไม่เติม BHT) และอิมัลชันที่เติม BHT เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม (BHT 100) พบว่า มีค่า TBARS ตลอดอายุการเก็บรักษานาน 56 วัน โดยมีค่าเริ่มต้น (วันที่ 0) และค่าสุดท้าย (วันที่ 56) เท่ากับ 179 และ 1,804 กับ 166 และ 1,319 มิลลิโมลาร์มาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ (ภาพที่ 4.3A) โดยการเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษา มีผลให้ค่า TBARS เพิ่มสูงขึ้น แต่การเติม BHT ซึ่งเป็นสารกันหืนสังเคราะห์ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ทำให้ค่า TBARS ในอิมัลชันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอิมัลชันควบคุม แสดงว่า BHT มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของอิมัลชันทดสอบได้

การเติมสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็มลงในอิมัลชัน (ภาพที่ 4.3A) พบว่า สารสกัดพืชทั้ง 10 ชนิด มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนใกล้เคียงกับ BHT ในช่วง 14 วันแรกเท่านั้น ส่วนการเพิ่มการเก็บรักษาจากวันที่ 14 ไป จนถึงวันที่ 56 นั้น พบว่า การเติมสารสกัดพืชทุกชนิดในอิมัลชันค่า TBARS สูงกว่าอิมัลชันที่เติม BHT แสดงว่า สารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพต่ำกว่า BHT 100 พีพีเอ็ม อีกทั้งยังพบสารสกัดพืชจำนวน 4 ชนิด คือ หญ้าเอ็นเสือ ตะไคร้ต้น ส้มกุ่ย และติ้วเกลี้ยง มีค่า TBARS สูงกว่าตัวอย่างควบคุม (Control) ซึ่งความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่างกันนี้อาจเนื่องมาจาก สารต้านออกซิเดชันที่เป็นองค์ประกอบในพืช มีความแตกต่างกันทั้งในแง่ของชนิด สารประกอบ ปริมาณที่พบ ลักษณะโครงสร้างและความไวของสารต่อการทำปฏิกิริยา (Silva และ คณะ, 2007; Matkowski, 2008) ตลอดจน ความเหมาะสมต่อระบบที่นำไปใช้ (McClement และ Decker, 2000) เมื่อเพิ่มสารสกัดพืชจากความเข้มข้น 200 เป็น 500 พีพีเอ็ม พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชส่งผลให้อิมัลชันที่ประกอบด้วยสารสกัดพืชทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีขึ้น โดยมีค่า TBARS ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม และยังพบสารสกัดพืชหลายชนิดที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพสูงกว่า BHT สารสกัดพืชที่มีศักยภาพในการกันหืนในอิมัลชัน โดยพิจารณาจากค่า TBARS ที่ต่ำที่สุดตลอดอายุการเก็บรักษา ได้แก่ ผักไผ่ รองลงมาได้แก่ หมีเหม็น และ ผักสมุย (ภาพที่ 4.3B) อย่างไรก็ดี การเพิ่มปริมาณสารสกัดหญ้าเอ็นเสือ ตะไคร้ต้น ส้มกุ่ย และติ้วเกลี้ยงในอิมัลชันไม่มีผลต่อการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่า TBARS ที่วิเคราะห์ได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่า สารต้านออกซิเดชันที่เป็นองค์ประกอบในพืชทั้ง 4 ชนิดนี้ มีค่า TBARS ต่ำ หรืออีกนัยหนึ่งคือ มีฤทธิ์ยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ต่ำ และไม่เหมาะสมต่อระบบอิมัลชันนี้



(A)



(B)

ภาพที่ 4.3 ค่า TBARS ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน90 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

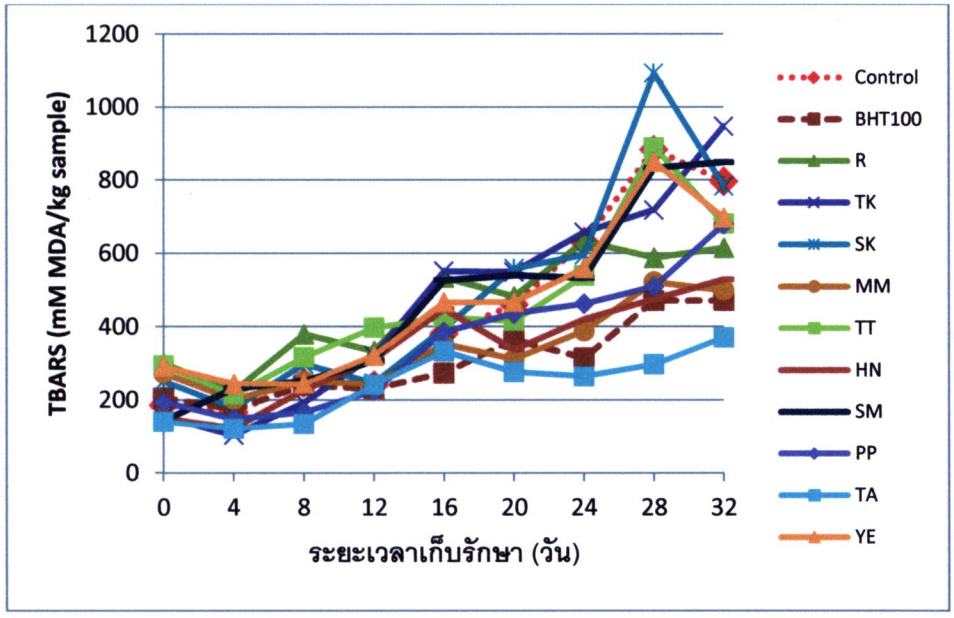
การเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ตลอดการเก็บรักษา 32 วัน ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน70 เปอร์เซ็นต์ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่า PV ที่พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลให้ค่า TBARS เพิ่มสูงตามไปด้วย (ภาพที่ 4.4) โดยอิมัลชันควบคุมมีค่า TBARS ในวันที่ 0-32 อยู่

ระหว่าง 187-796 มิลลิโมลาร์มาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง แต่การเติม BHT 100 พีพีเอ็มทำให้การออกซิเดชันของไขมันลดลง มีค่า TBARS อยู่ระหว่าง 183-471 มิลลิโมลาร์มาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า การเติม BHT สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้ทั้งสองแบบ คือ การสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และการสลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิต่างๆ

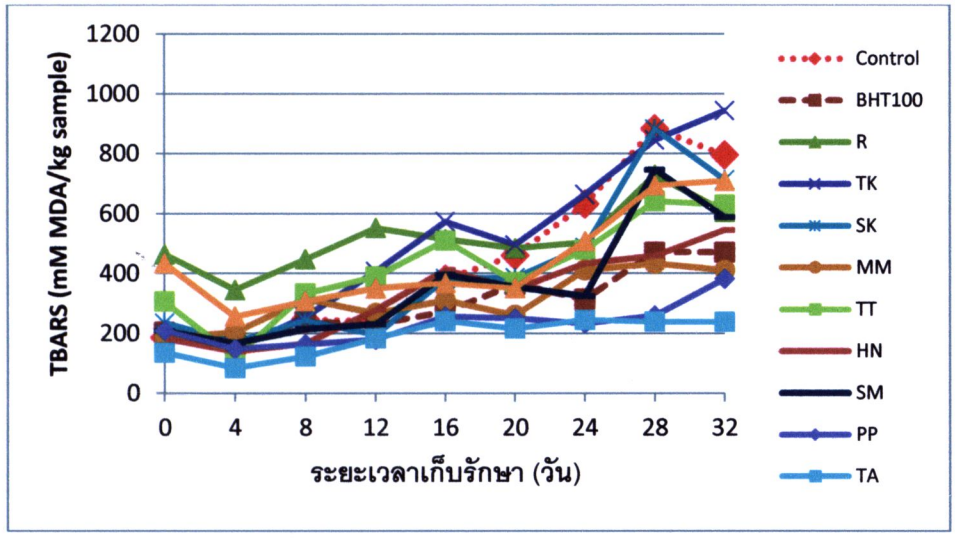
การเติมสารสกัดพืชที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ อิมัลชันมีค่า TBARS แตกต่างกันตามไป โดยพบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ 200 พีพีเอ็ม ค่า TBARS ต่ำที่สุด หรือมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ การใช้สารสกัดหมีเหม็นและผักฮ้านน้ำ ตามลำดับ (ภาพที่ 4.4A) ในทางตรงกันข้าม การเติมสารสกัดติ้วเกลี้ยงและผักสมุยที่ความเข้มข้นเดียวกันนี้ อิมันชันทั้ง 2 มีค่า TBARS สูงกว่าอิมัลชันควบคุม ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างชนิดของพืชส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชในอิมัลชันให้เป็น 500 พีพีเอ็ม (ภาพที่ 4.4B) พบว่า อิมัลชันทุกๆ ชนิดของสารสกัดพืชมี มีค่า TBARS ลดลงตลอดอายุการเก็บรักษา ยกเว้น การเติมสารสกัดติ้วเกลี้ยง หญ้าเอ็นเสือ และตะไคร้ต้นที่มีค่า TBARS ใกล้เคียงกันระหว่างการใช้ที่ความเข้มข้น 200 และ 500 พีพีเอ็ม ซึ่งความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากองค์ประกอบที่ต่างกันไปในพืชแต่ละชนิด รวมถึง ความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบทดสอบประสิทธิภาพในการต้านการหืนเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้น (200 และ 500 พีพีเอ็ม) ในอิมัลชันนั้น มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงที่สุด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็มอีกด้วย ส่วนการใช้สารสกัดหมีเหม็น มีประสิทธิภาพรองลงมาโดยมีความสามารถใกล้เคียงกับการใช้ BHT

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านการหืนของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช ในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธี TBARS พบว่า สารสกัดพืชแต่ละชนิดมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่แตกต่างกัน และการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืช ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม โดยการใช้สารสกัดผักไผ่ หมีเหม็น และ ผักสมุยที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนด้วยวิธีนี้สูงที่สุด



(A)



(B)

ภาพที่ 4.4 ค่า TBARS ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

- **ค่า p-Anisidine (p-Anisidine Value, p-AV)**

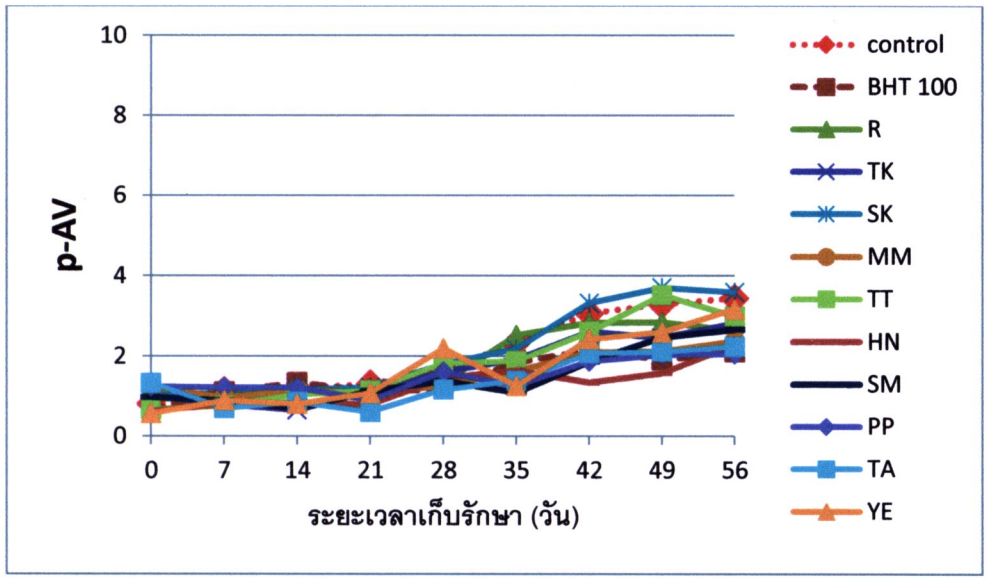
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (secondary oxidation products) อีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยม คือ การหาค่า p-Anisidine (p-AV) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลของอัลดีไฮด์กับหมู่เอมีนของ p-Anisidine ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์สารประกอบอัลดีไฮด์ที่ไม่ระเหย ในกลุ่ม 2-

อัลคีนัล และ 2,4 แอลคาไดอีนัล (Shahidi และ Wanasundara, 2007) รวมถึงยังเป็นการวัดปริมาณสารประกอบอัลดีไฮด์ ทั้งหมด เนื่องจากเป็นการทำปฏิกิริยาโครงสร้างของอัลดีไฮด์โดยตรง (Laguerre และคณะ, 2007)

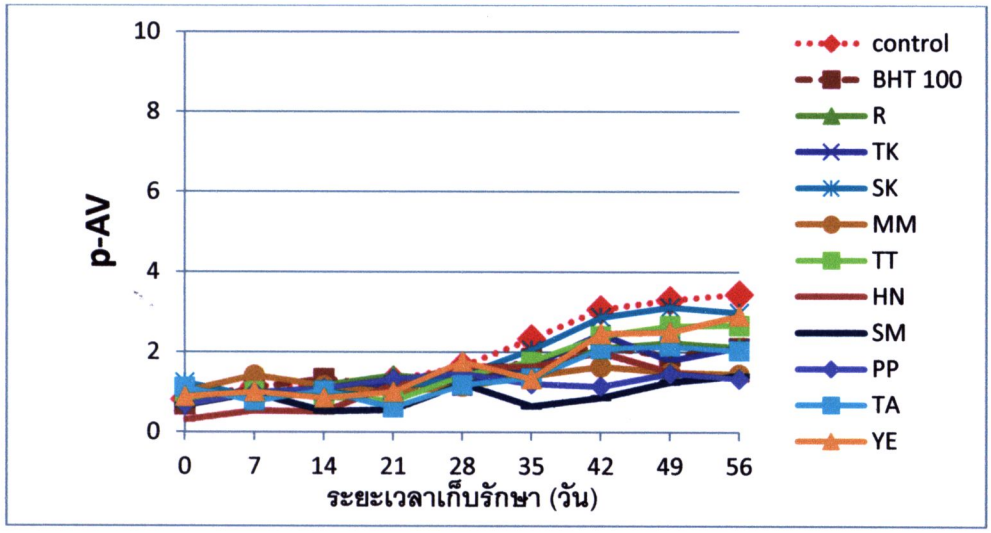
- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

การเปลี่ยนแปลงค่า p-AV ของอิมัลชันทดสอบทุกชนิดตลอดอายุการเก็บรักษา 56 วัน พบ การเปลี่ยนแปลงค่า p-AV น้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์อื่นๆ โดยค่า p-AV ของตัวอย่างควบคุม (ไม่เติม BHT) ตลอดระยะเวลา 56 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.816 เป็น 3.44 ในขณะที่การเติม BHT 100 พีพีเอ็ม ในอิมัลชัน ทำให้ค่า p-AV ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.682 เป็น2.11 แสดงว่า BHT เป็นสารต้านการหืนที่สามารถออกฤทธิ์ได้ดี ทั้งการยับยั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ) และการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ)

ผลการเติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็มลงในอิมัลชัน (ภาพที่ 4.5A) พบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีค่า p-AV ใกล้เคียงกันตลอดการเก็บนาน 35 วัน และสารสกัดพืชเกือบทุกชนิด ยกเว้น สารสกัดส้มกุ่ย มีค่า p-AV ต่ำกว่า หรือ สามารถยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม สารสกัดส้มกุ่ย มีค่า p-AV เพิ่มขึ้นจาก 1.11 เป็น 3.59 ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมและสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆที่นำมาศึกษา เมื่อพิจารณาค่า p-AV ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชเปรียบเทียบกับการเติม BHT 100 พีพีเอ็ม พบว่า มีแนวโน้มแบบเดียวกับที่พบในวิธีวิเคราะห์อื่นๆ กล่าวคือ การเติมสารสกัดพืชที่ความเข้มข้นต่ำนี้ มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนต่ำกว่าการใช้ BHT เมื่อเพิ่มสารสกัดพืชเป็น 500 พีพีเอ็มในอิมัลชัน พบว่า สารสกัดพืชทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนเพิ่มสูงขึ้น(ภาพที่ 4.5B) อีกทั้งมีค่า p-AV แตกต่างกันอย่างชัดเจนในวันที่ 42 ส่วนการใช้สารสกัดผักไผ่ หมีเหม็น และผักสมุยที่ความเข้มข้นนี้ มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็มอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ค่า p-AV ของสารสกัดส้มกุ่ยทั้งสองความเข้มข้น มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มพืชที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า สารสกัดส้มกุ่ยไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ระบบอิมัลชันนี้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิด้วยวิธี TBARS และวิธี p-AV ให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยสารสกัดผักไผ่ หมีเหม็น และ ผักสมุยที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนด้วยวิธีนี้สูงที่สุด



(A)



(B)

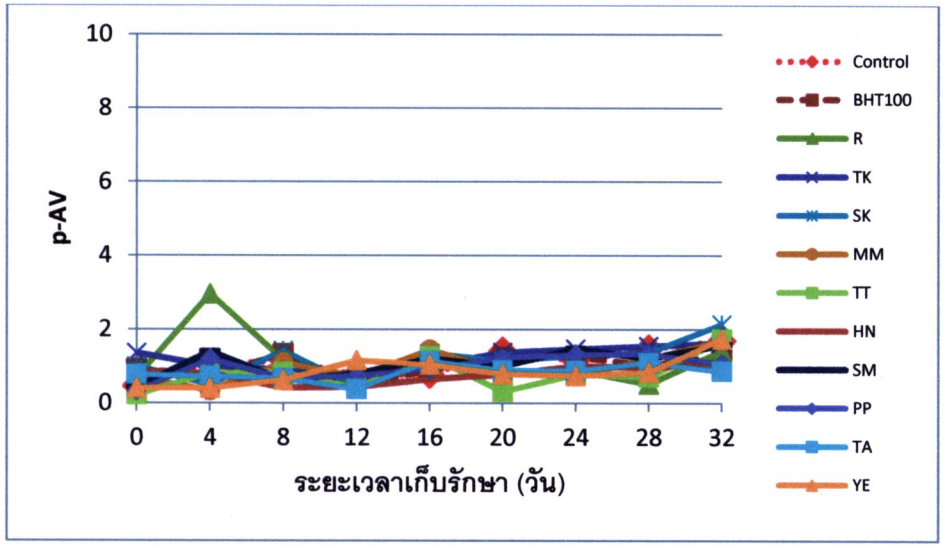
ภาพที่ 4.5 ค่า p-AV ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

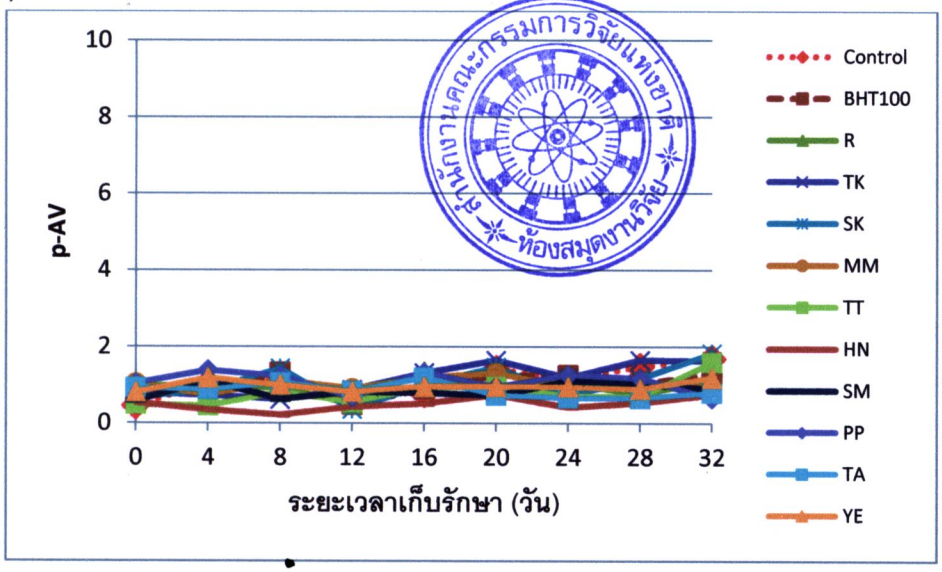
- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การเปลี่ยนแปลงค่า p-AV ในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 32 วัน โดยค่า p-AV ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทุกตัวอย่างที่ความเข้มข้น 200 และ 500 พีพีเอ็ม ให้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.6 อย่างไรก็ดี การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชให้สูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยตรง ส่งผลให้ ค่า p-AV ของอิมัลชันที่

เติมสารสกัดพืช 500 พีพีเอ็มมีค่าต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (ภาพที่ 4.6A และ 4.6B) แต่อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชบางชนิด เช่น ส้มกุ่ย และ ติ้วเกลี้ยงนั้น มีค่า p-AV สูงกว่าอิมัลชันควบคุม แสดงว่า การเพิ่มปริมาณของสารสกัดพืชที่ใช้มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงใดๆก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัดพืชที่เลือกใช้ จากผลการทดลอง สารสกัดทะโล้ เป็นสารสกัดที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในอิมัลชัน ทั้งที่ความเข้มข้น 200 และ 500 พีพีเอ็ม โดยสามารถยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ดีที่สุด รวมทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า BHT 100 พีพีเอ็มอีกด้วย



(A)



(B)

ภาพที่ 4.6 ค่า p-AV ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

• การเปลี่ยนแปลงค่า ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox Value)

การคำนวณปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox Value, Totox V) ทำได้โดยการหาผลรวมระหว่าง ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) และค่า p-AV สามารถนำมาใช้ประเมินการเสื่อมสภาพของไขมันจากการออกซิเดชันได้ (Laguerre และ คณะ, 2007) ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดหรือค่า Totox V ที่คำนวณได้ตลอดระยะเวลา 0-56 วัน แสดงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8

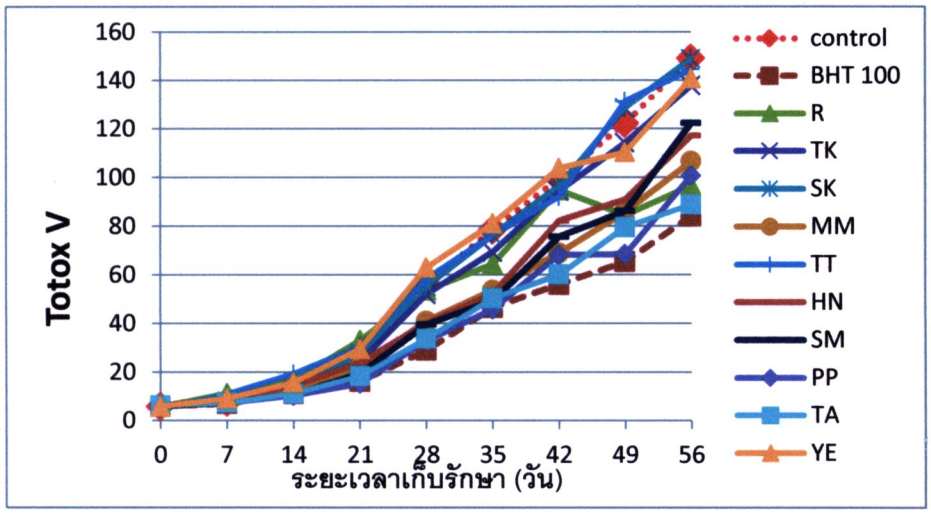
- อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงของค่า Totox V มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับที่พบในค่า PV โดยปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มตลอดอายุการเก็บรักษา โดยค่า Totox V ของตัวอย่างควบคุมเพิ่มขึ้นจาก 5.86 เป็น 149 แต่การเติม BHT 100 พีพีเอ็มในอิมัลชัน ทำให้ค่า Totox V เพิ่มขึ้นเป็น 84.13 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ภาพที่ 4.7B) ส่งผลให้ค่า Totox V ต่ำกว่าการใช้ที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (ภาพที่ 4.7A) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดหมีเหม็น ผักไผ่ ผักสมุย และผักฮ้านน้ำ ทำให้ค่า Totox V ลดลงประมาณ 2 เท่า อีกทั้งยังทำให้สารสกัดพืชกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม นอกจากนี้ยังพบอีกด้วยว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ที่ความเข้มข้น 200 และ 500 พีพีเอ็มมีปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 88.7 และ 60.8 แสดงว่า สารสกัดทะโล้มีประสิทธิภาพโดยรวมในการต้านการหืน เนื่องจากสารสกัดทะโล้เป็นสารมีความเป็นขั้วสูง สามารถละลายได้ดีในเฟสน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติ polar paradox ที่พบว่าสารต้านออกซิเดชันที่มีขั้วสูงจะมีประสิทธิภาพที่ดีในการต้านออกซิเดชันส่วนของน้ำมัน (Porter และ คณะ, 1989)

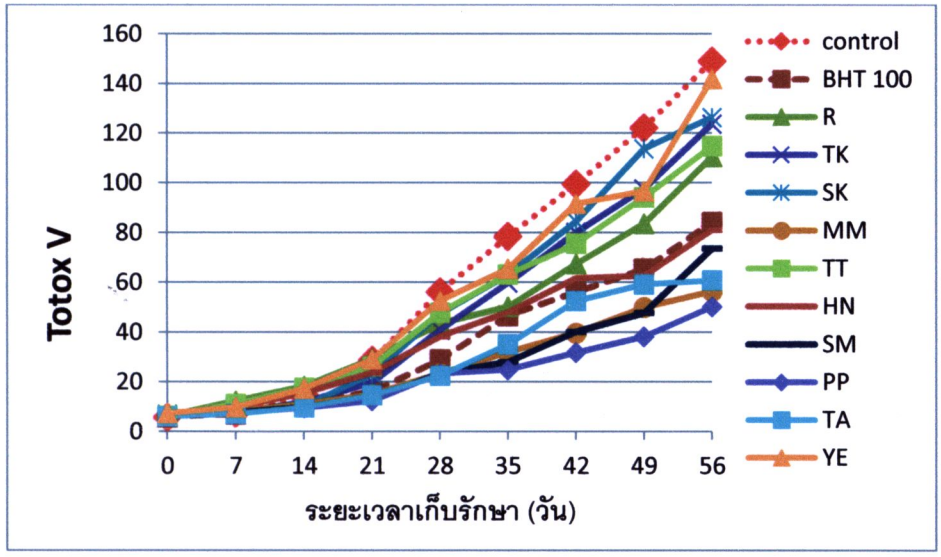
- อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ของสารสกัดพืชทุกชนิด จะแปรผันตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.8) โดยเมื่อครบกำหนด 32 วัน อิมัลชันควบคุมมีค่า Totox V สูงกว่าอิมัลชันที่เติม BHT 100 พีพีเอ็ม ประมาณ 2 เท่า ส่วนค่า Totox V ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชไม่เพียงแต่แปรผันตามระยะเวลาเก็บรักษายังขึ้นอยู่กับชนิดของพืชอีกด้วย ซึ่งการเติมสารสกัดพืชทั้งสองความเข้มข้นส่งผลให้มีค่า Totox V ต่ำกว่าอิมัลชันควบคุม แต่สารสกัดพืชหลายชนิด เช่น สารสกัดติ้วเกลี้ยง ส้มกุ่ย และหญ้าเอ็นเสือ ไม่มีฤทธิ์ต้านการหืน โดยมีค่า Totox V สูงกว่าหรือเทียบเท่ากับอิมัลชันควบคุม เมื่อเปรียบเทียบผลของการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชจาก 200 เป็น 500 พีพีเอ็ม พบว่า สารสกัดพืชทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ ผักไผ่ และหมีเหม็น ที่มีค่า Totox V ลดลงประมาณ 2 เท่า อีกทั้งการใช้สารสกัดพืชทั้ง 3 ชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารสกัดทะโล้เป็นสารสกัดพืชที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในทุกวิธีวิเคราะห์ มีประสิทธิภาพที่ดีในการยับยั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์และการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ



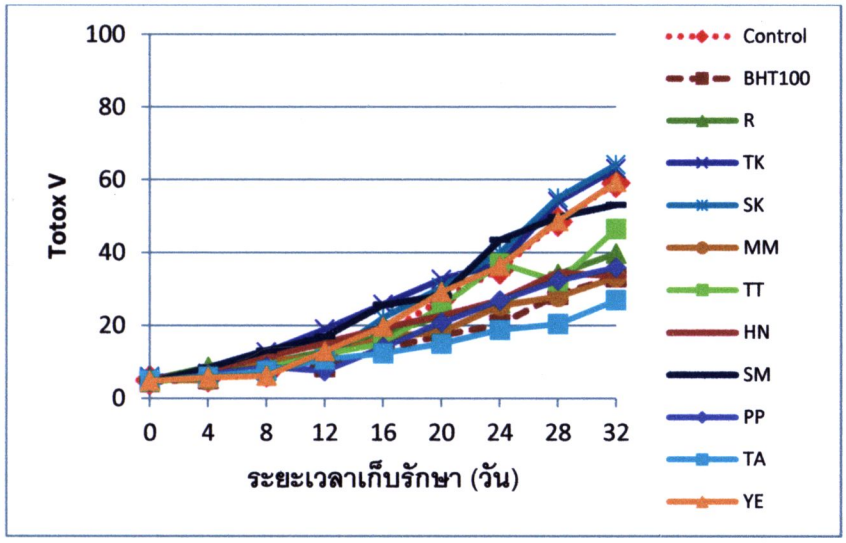
(A)



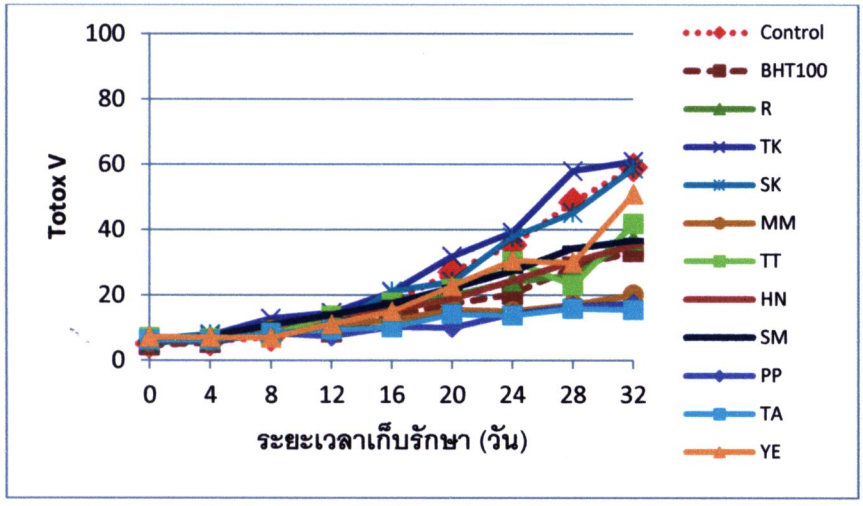
(B)

ภาพที่ 4.7 ค่า Totox V ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ



(A)



(B)

ภาพที่ 4.8 ค่า Totox V ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เติมสารสกัดพืชเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (A) และ 500 พีพีเอ็ม (B)

หมายเหตุ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

4.2.3 อัตราการเกิดออกซิเดชันในอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมันที่เติมสารสกัดพืช

การคัดเลือกสารสกัดพืชที่เหมาะสมในการต้านออกซิเดชันของอิมัลชัน ในแต่ละความเข้มข้น จะพิจารณาจากค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันของไขมัน (C) กับระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) พบว่า การออกซิเดชันของไขมันเป็นไปตามความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First order reaction) และมีค่า k และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธีวิเคราะห์

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

เมื่อพิจารณาค่า k ของวิธีวิเคราะห์ต่างๆ (ตารางที่ 4.3) พบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีค่าอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม สอดคล้องกับความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืชดังที่อภิปรายในแต่ละวิธีวิเคราะห์ นอกจากนี้ การเติมสารสกัดพืชหลายชนิด ได้แก่ หมีเหม็น ผักสมุย ผักไผ่และทะโล้ทั้งสองระดับความเข้มข้น มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีกว่าหรือเทียบเท่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม โดยพบว่า ค่า k ของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้ง 4 ชนิดนี้ที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มมีค่าต่ำกว่าค่าของ k อิมัลชันเติม BHT

การเติมสารสกัดทะโล้ที่ระดับความเข้มข้นทั้งสอง มีอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาต่ำที่สุด และยังมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างเติม BHT รวมไปถึง อิมัลชันที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี มีสีเหลืองอ่อนใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม และมีผลิตภัณฑ์มีความคงตัวดีตลอดอายุการเก็บรักษา 56 วัน เช่นเดียวกับสารสกัดผักไผ่ ที่ไม่เพียงแต่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่ดีเท่านั้น ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ยังใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม และมีความคงตัวดีตลอดอายุการเก็บรักษาอีกด้วย ในขณะที่การใช้สารสกัดหมีเหม็นและผักสมุย ส่งผลให้สีของอิมัลชันเข้มขึ้น อีกทั้งอิมัลชันเติมผักสมุยตรวจพบการเสียสภาพแบบ oiling off ในวันที่ 56 ของการเก็บรักษาและอิมัลชันมีสีเขียวซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคอีกด้วย (Batista และคณะ, 2006) ดังนั้น สารสกัดพืช 2 ชนิด ที่เหมาะสมต่ออิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ สารสกัดทะโล้และผักไผ่ โดยกำหนดความเข้มข้นสำหรับการศึกษาขั้นต่อไป คือ สารสกัดทะโล้ที่ความเข้มข้น 300 และ 500 พีพีเอ็ม ตามลำดับ และสารสกัดผักไผ่ที่ความเข้มข้น 250 และ 500 พีพีเอ็ม ตามลำดับ การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดพืชทั้งสองชนิดจาก 200 เป็น 300 และ 250 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ได้จากการคำนวณค่าความเข้มข้น โดยอ้างอิงจากประสิทธิภาพการต้านการหืนออกซิเดชันของ BHT 100 พีพีเอ็ม เนื่องจากการใช้สารสกัดทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นระดับต่ำให้ผลการต้านออกซิเดชันต่ำกว่าการใช้ BHT ในบางวิธีวิเคราะห์

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ของผลิตภัณฑ์จากการหืนของไขมันในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์

		PV			TBARS			p-AV			Totox V		
ตัวอย่าง*	ppm	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)
Control		0.065	0.949	10.7	0.045	0.922	15.6	0.027	0.964	25.5	0.062	0.954	11.1
BHT	100	0.054	0.971	12.9	0.041	0.943	16.9	0.018	0.816	38.4	0.051	0.974	13.5
SK	200	0.064	0.957	10.8	0.045	0.920	15.5	0.027	0.918	26.1	0.061	0.960	11.3
	500	0.062	0.954	11.2	0.042	0.942	16.7	0.024	0.821	28.8	0.059	0.955	11.7
MM	200	0.056	0.967	12.3	0.043	0.945	16.0	0.016	0.822	44.2	0.054	0.971	13.0
	500	0.045	0.982	15.4	0.031	0.942	22.5	0.006	0.443	111.7	0.042	0.986	16.5
R	200	0.053	0.900	13.0	0.040	0.899	17.2	0.025	0.853	28.3	0.051	0.908	13.6
	500	0.050	0.955	13.7	0.035	0.801	20.0	0.017	0.859	41.3	0.048	0.963	14.3
YE	200	0.061	0.938	11.3	0.043	0.911	15.9	0.029	0.872	23.5	0.060	0.940	11.6
	500	0.056	0.963	12.4	0.040	0.940	17.4	0.024	0.859	29.5	0.054	0.966	12.8

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ตัวอย่าง*	ppm	PV			TBARS			p-AV			Totox V		
		k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)
TT	200	0.061	0.946	11.4	0.044	0.913	15.8	0.031	0.959	22.6	0.059	0.950	11.7
	500	0.054	0.957	12.9	0.040	0.937	17.1	0.025	0.854	28.3	0.052	0.962	13.3
SM	200	0.060	0.975	11.5	0.043	0.941	16.3	0.021	0.780	32.3	0.058	0.976	12.0
	500	0.046	0.990	15.0	0.034	0.954	20.2	0.012	0.366	59.3	0.044	0.988	15.6
PP	200	0.057	0.970	12.1	0.041	0.930	16.9	0.011	0.582	61.4	0.054	0.970	12.9
	500	0.041	0.975	16.8	0.031	0.957	22.5	0.009	0.535	75.1	0.039	0.977	17.7
TA	200	0.055	0.968	12.5	0.039	0.953	17.9	0.019	0.565	36.5	0.053	0.970	13.2
	500	0.050	0.971	14.0	0.035	0.991	19.6	0.018	0.619	38.1	0.047	0.971	14.7
HN	200	0.056	0.976	12.3	0.042	0.957	16.4	0.021	0.866	32.8	0.055	0.978	12.7
	500	0.046	0.958	15.2	0.036	0.899	19.5	0.029	0.689	24.2	0.045	0.955	15.4
TK	200	0.063	0.958	11.0	0.047	0.937	14.9	0.026	0.833	27.0	0.061	0.959	11.4
	500	0.060	0.969	11.6	0.042	0.927	16.5	0.018	0.848	38.4	0.058	0.971	12.1

หมายเหตุ * หมายถึง สารสกัดพืช 10 ชนิด ได้แก่ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ ที่วิเคราะห์ได้เป็นไปตามความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First order reaction) มีค่า k และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธีวิเคราะห์ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ของผลิตภัณฑ์จากการหืนของไขมันในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่าง*	ppm	PV			TBARS			p-AV			Totox V		
		k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)
Control		0.0890	0.977	7.8	0.0555	0.946	12.5	0.029	0.601	24.0	0.0845	0.985	8.2
BHT	100	0.0883	0.977	7.9	0.0587	0.959	11.8	0.024	0.860	28.6	0.0840	0.979	8.3
SK	200	0.0693	0.991	10.0	0.0304	0.888	22.8	0.013	0.189	53.6	0.0640	0.987	10.8
	500	0.0653	0.979	10.6	0.0426	0.946	16.3	0.027	0.487	25.4	0.0629	0.973	11.0
MM	200	0.0902	0.970	7.7	0.0508	0.851	13.7	0.028	0.373	24.5	0.0855	0.967	8.1
	500	0.0765	0.980	9.1	0.0476	0.827	14.6	0.021	0.213	33.3	0.0731	0.979	9.5
R	200	0.0648	0.959	10.7	0.0266	0.791	26.1	0.029	0.427	24.3	0.0621	0.952	11.2
	500	0.0437	0.937	15.9	0.0247	0.787	28.0	0.004	0.052	197.3	0.0398	0.931	17.4
YE	200	0.0696	0.982	10.0	0.0298	0.797	23.3	0.010	0.034	72.0	0.0619	0.983	11.2
	500	0.0600	0.987	11.6	0.0142	0.566	48.7	0.002	0.008	298.3	0.0557	0.988	12.5

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ตัวอย่าง*	ppm	PV			TBARS			p-AV			Totox V		
		k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)	k ($days^{-1}$)	r^2	$t_{1/2}$ (days)
TT	200	0.0887	0.969	7.8	0.0385	0.866	18.0	0.033	0.586	21.1	0.0861	0.972	8.1
	500	0.0705	0.945	9.8	0.0248	0.602	27.9	0.003	0.075	203.4	0.0659	0.947	10.5
SM	200	0.0778	0.963	8.9	0.0363	0.836	19.1	0.031	0.264	22.5	0.0752	0.971	9.2
	500	0.0605	0.919	11.5	0.0355	0.599	19.5	0.026	0.540	26.5	0.0587	0.923	11.8
PP	200	0.0783	0.952	8.9	0.0542	0.945	12.8	0.028	0.495	24.5	0.0750	0.953	9.2
	500	0.0630	0.978	11.0	0.0410	0.809	16.9	0.010	0.245	67.3	0.0597	0.982	11.6
TA	200	0.0703	0.962	9.9	0.0476	0.891	14.6	0.028	0.479	24.6	0.0672	0.962	10.3
	500	0.0425	0.943	16.3	0.0214	0.664	32.5	0.008	0.099	88.1	0.0368	0.938	18.8
HN	200	0.0558	0.984	12.4	0.0335	0.760	20.7	0.013	0.188	53.8	0.0523	0.990	13.3
	500	0.0364	0.934	19.0	0.0287	0.680	24.1	0.010	0.322	66.8	0.0324	0.937	21.4
TK	200	0.0616	0.935	11.3	0.0434	0.829	16.0	0.016	0.246	44.1	0.0582	0.951	11.9
	500	0.0574	0.984	12.1	0.0418	0.855	16.6	0.019	0.288	36.6	0.0558	0.987	12.4

หมายเหตุ * หมายถึง สารสกัดพืช 10 ชนิด ได้แก่ R=ราชาวดีป่า, TK=ติ้วเกลี้ยง, SK=ส้มกุ่ย, MM=หมีเหม็น, TT=ตะไคร้ต้น, HN=ผักฮ้านน้ำ, SM=ผักสมุย, PP=ผักไผ่, TA=ทะโล้, YE=หญ้าเอ็นเสือ

เมื่อพิจารณาค่า k ของผลิตภัณฑ์จากการหืนของไขมันทั้ง 4 พบว่า การเติมสารสกัดพืชลงในอิมัลชันส่วนใหญ่ส่งผลต่ออัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ให้มีค่าลดลง (มีค่า k ลดลง) ในทางตรงกันข้าม ค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า k จะแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมมากหรือน้อยนั้นเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่เติมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเติมสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าที่ระดับ 200 พีพีเอ็มในทุกวิธี

การเติมสารสกัดพืชในระดับความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม พบว่า ค่า k ในทุกวิธีวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ระหว่างอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชกับอิมัลชันควบคุม อีกทั้งยังพบว่า สารสกัดพืชหลายชนิดที่มีค่า k และค่าครึ่งชีวิตต่ำกว่าอิมัลชันควบคุม เช่น ส้มกุ่ย ราชาวดีป่า หญ้าเอ็นเสือ เนื่องจากสารสกัดพืชที่มีค่าต่างๆ จากการทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสูงกว่าค่าที่ได้จากอิมัลชันควบคุมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ด้วยเหตุนี้ การเติมสารสกัดพืชกลุ่มนี้จึงไม่มีความเหมาะสม เนื่องจาก การเติมสารสกัดพืชอาจเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ทั้งในขั้นปฐมภูมิและขั้นทุติยภูมิในปริมาณมากกว่าอิมัลชันควบคุม ซึ่งการพิจาณาคัดเลือกสารสกัดพืชจึงเน้นไปที่สารสกัดพืชที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ BHT 100 พีพีเอ็มและมีค่าที่วิเคราะห์ได้ในทุกวิธีทดสอบต่ำ ได้แก่ สารสกัดทะโล้และผักไผ่ ส่วนการคัดเลือกสารสกัดพืชที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มนั้น พบว่า การใช้สารสกัดผักฮ้านน้ำ ทะโล้และผักไผ่มีความเหมาะสมต่อระบบอิมัลชันนี้ เนื่องจากมีอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ต่ำและมีค่าครึ่งชีวิตเป็นระยะเวลานานกว่าอิมัลชันควบคุม รวมถึงยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารสกัดผักฮ้านน้ำพบว่า เกิดการรวมตัวเป็นชั้นครีมสะสมที่ผิวหน้าในช่วงท้ายของการทดสอบ ซึ่งนำไปสู่การเสียสภาพ

แบบ creaming ได้ ดังนั้น การใช้สารสกัดทะโล้และผักไผ่ จึงมีความเหมาะสมมากกว่าผักฮ้านน้ำในแง่ของลักษณะปรากฏและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตาม การนำสารสกัดพืชทั้งสองชนิดมาใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนความเข้มข้นให้เหมาะสม โดยพิจารณาค่าจากความเข้มข้นที่คำนวณขึ้นมาอ้างอิงกับประสิทธิภาพของ BHT 100 พีพีเอ็ม ในทุกวิธีวิเคราะห์ ซึ่งความเข้มข้นของสารสกัดทะโล้ที่เหมาะสม คือ 300 และ 500 พีพีเอ็ม ส่วนสารสกัดผักไผ่ทำการทดสอบที่ความเข้มข้น 250 และ 500 พีพีเอ็ม สารสกัดพืชที่คัดเลือกได้ทั้งชนิดนี้จะถูกนำไปทดสอบผลของอุณหภูมิและพีเอชที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชันต่อไป

4.3 ผลของพีเอช และอุณหภูมิต่อการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมันที่เติมสารสกัดพืช

นำสารสกัดพืชที่คัดเลือกทั้งสองชนิดได้แก่ ทะโล้ (300 และ 500 พีพีเอ็ม) และผักไผ่ (250 และ 500 พีพีเอ็ม) มาเติมในอิมัลชันที่เตรียมในขึ้นในสภาวะแตกต่างกัน คือ พีเอชเท่ากับ 3, 5.4 และ 7 แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส วิเคราะห์การออกซิเดชันของไขมันด้วยวิธี TBARS, PV, p-AV และ Totox V โดยเปรียบเทียบตัวอย่างอิมัลชันควบคุม (ไม่เติม BHT) และอิมัลชันที่เติม BHT 100 พีพีเอ็ม

4.3.1 ผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอิมัลชันที่พีเอชต่างๆ

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

การเก็บรักษาอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมันที่มีพีเอช 3-7 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าอิมัลชันทุกชนิดที่เตรียมขึ้นจากพีเอชทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างเติม BHT100 พีพีเอ็ม อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (TA300) และ 500 พีพีเอ็ม (TA500) และอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (PP250) และ 500 พีพีเอ็ม (PP500) นั้น ทุกตัวอย่างมีความคงตัวดีตลอดการเก็บรักษา 68 วัน มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สีขาวขุ่นไม่พบการเสียสภาพใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลชันในวันที่ 0 นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชเป็น 500 พีพีเอ็ม ไม่ส่งผลต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ แต่การเติมสารสกัดผักไผ่ทั้งสองระดับความเข้มข้นส่งผลให้อิมัลชันมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

การเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 56 วัน พบ การเสียสภาพของอิมัลชันแตกต่างกันไปในอิมัลชันที่พีเอชต่างๆ ทั้ง 3 ระดับ และมีความแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารสกัดพืชอีกด้วย (ตารางที่ 4.5) โดยเมื่อเปรียบเทียบการเสียสภาพของอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด (ไม่เติม BHT และเติม BHT 100 พีพีเอ็ม) พบว่า เมื่อค่าพีเอชลดลง การเสียสภาพของอิมัลชันจะเพิ่มมากขึ้นโดยอิมัลชันควบคุมที่มีพีเอช 3 ตรวจพบการเสียสภาพแบบ oiling off ได้ตั้งแต่วันที่ 28 แต่อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้ง 4 ยังมีความคงตัวจนถึงวันที่ 35 จึงตรวจพบการเสียสภาพแบบ oiling off เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอชสูงกว่า มีความคงตัวไม่น้อยกว่า 42 วัน ส่วนการเสียสภาพของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชนอกจากกับค่าพีเอชของอิมัลชันแล้ว ยังขึ้นกับความเข้มข้นที่ใช้อีกด้วย โดยที่พีเอชเดียวกัน อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ในระดับสูงมีความคงตัวดีกว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ในระดับต่ำ ในทางตรงกันข้าม พบว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ในระดับต่ำมีความคงตัวดีกว่าอิมัลชันที่ความเข้มข้นสารสกัดสูงกว่า และเมื่อ

เปรียบเทียบระหว่างพีเอชทั้งสาม พบว่า การเตรียมอิมัลชันที่พีเอชต่ำ (พีเอช เท่ากับ 3) ส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชันมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชส่งผลต่อ ζ-potential ของหยดน้ำมัน และเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันของหยดน้ำมันซึ่งนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุด (Aoki และ คณะ, 2005)

ผลการเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.5) พบว่า เมื่อครบ 56 วัน อิมัลชันทดสอบทั้งหมด เกิดแยกชั้นของน้ำมันหรือการเสียสภาพอย่างสมบูรณ์ และอิมัลชันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ ตรวจพบการเสียสภาพหลายแบบทั้ง flocculation, coalescence, oiling off และ เกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation) รวมทั้งการเสียสภาพยังเกิดขึ้นเร็วที่สุดในอุณหภูมิทดสอบทั้งหมด โดย ตรวจพบตั้งแต่วันที่ 14 หรือ 21 ของการเก็บรักษา แม้ว่า การเสียสภาพของอิมัลชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์เมื่อครบ 56 วัน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชทั้ง 3 ระดับ ส่งผลต่อการเสียสภาพแตกต่างกัน โดยอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีความคงตัวดีกว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ อีกทั้งอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ที่พีเอช 3 ตรวจพบการเสียสภาพช้าที่สุด (วันที่ 42) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของอิมัลชัน ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อแนวโน้มการเสียสภาพของอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิดและอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ โดยความคงตัวของอิมัลชันที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียสสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความคงตัวของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ภายหลังเก็บรักษานาน 56 วัน

	pH	ตัวอย่าง*	ppm	ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)								
				0	7	14	21	28	35	42	49	56
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	3	Control		-	-	-	-	O	O	O	C	-
		BHT	100	-	-	-	-	O	O	O	O	O
		TA	300	-	-	-	-	-	O	O	-	-
			500	-	-	-	-	-	-	-	O	O
		PP	250	-	-	-	-	-	-	-	O	-
			500	-	-	-	-	-	O	O	O	C
	5	Control		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		TA	300	-	-	-	-	-	-	O	-	-
			500	-	-	-	-	-	-	-	O	O
		PP	250	-	-	-	-	-	-	-	O	-
			500	-	-	-	-	-	-	-	-	O
	7	Control		-	-	-	-	-	-	O	-	-
		BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		TA	300	-	-	-	-	-	-	O	-	-
			500	-	-	-	-	-	-	-	O	O
		PP	250	-	-	-	-	-	-	-	-	O
			500	-	-	-	-	-	-	O	O	O

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	pH	ตัวอย่าง*	ppm	ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)								
				0	7	14	21	28	35	42	49	56
	3	Control		-	-	O	O	F	F	F	C	S
		BHT	100	-	-	-	O	O	F	C	S	S
		TA	300	-	-	-	-	-	-	F	S	S
			500	-	-	-	-	-	-	C	C	S
		PP	250	-	-	O	O	F	F	F	C	S
			500	-	-	O	F	F	C	C	C	S
	5	Control		-	-	-	O	F	C	S	S	S
		BHT	100	-	-	-	O	O	C	C	S	S
		TA	300	-	-	-	-	-	-	C	C	S
			500	-	-	-	O	O	F	C	C	S
		PP	250	-	-	-	O	O	C	C	C	S
			500	-	-	-	O	O	C	C	S	C
	7	Control		-	-	F	F	F	F	C	C	S
		BHT	100	-	-	-	-	O	F	F	C	S
		TA	300	-	-	-	-	F	F	C	C	S
			500	-	-	O	O	F	C	S	S	S
		PP	250	-	-	-	O	O	C	C	S	S
			500	-	-	O	O	O	O	F	S	S

หมายเหตุ * หมายถึง สารสกัดพืช TA=ทะโล้, PP=ผักไผ่, - หมายถึง ไม่พบการเสียสภาพ

F หมายถึง การเสียสภาพแบบ flocculation, C หมายถึง การเสียสภาพแบบ coalescence

O หมายถึง การเสียสภาพแบบ oiling off , S หมายถึง การเสียสภาพแบบเกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation)

การเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาอิมัลชัน ส่งผลโดยตรงต่อความคงตัวของอิมัลชันทดสอบทั้งหมด เนื่องมาจาก การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานอิสระแก่ระบบ ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ทำให้หยดน้ำมันมีแนวโน้มรวมตัวกันมากขึ้น การเสียสภาพจึงเกิดได้เร็วขึ้น (Frankel, 1993; Guzey และ McCements, 2006) นอกเหนือจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมของการเปลี่ยนแปลงพีเอชของระบบอิมัลชัน ที่ทำให้ ζ-potential เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น การเสียสภาพจึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิอื่นๆ อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอิมัลชันทั้งหมด พบว่า การเติมสารสกัดทะโล้ที่ความเข้มข้นต่ำ (300 พีพีเอ็ม) ทำให้อิมัลชันที่ได้มีความคงตัวสูงที่สุด

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ไม่ส่งผลต่อความคงตัวและลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ แต่การเปลี่ยนแปลงพีเอชของอิมัลชัน และอุณหภูมิในการเก็บรักษาอาจส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพได้ โดยในวันที่ 0 อิมัลชันทดสอบทั้งหมดทุกระดับพีเอชไม่มีความแตกต่างกันด้านลักษณะกายภาพ และการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชทั้ง 2 ชนิดก็ไม่ส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์เช่นกัน เมื่อ

ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 32 วัน พบว่า ความคงตัวของอิมัลชันทดสอบก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าการเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ มีสีของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเก็บรักษาเป็น 45 องศาเซลเซียส ตรวจพบการเสียสภาพของอิมัลชันทดสอบในทุกระดับพีเอช (ตารางที่ 4.6) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอิมัลชันที่มีพีเอชต่ำ ตรวจพบการเสียสภาพมากที่สุด รองลงมาคือ พีเอช 7 ส่วนอิมัลชันที่พีเอช 5.4 พบการเสียสภาพน้อยที่สุด แสดงว่า ค่าพีเอชของระบบและอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานอิสระให้แก่ระบบ ส่วนค่าพีเอชที่ต่ำลงสามารถเร่งให้เกิดการเสียสภาพได้รวดเร็วขึ้น โดยอาจเร่งการไฮโดรไลซิสของไขมัน และทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติของอิมัลซิไฟเออร์เปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น เมื่อปัจจัยทั้งสองประกอบกันจึงทำให้อิมัลชันที่มีพีเอชต่ำเกิดการเสียสภาพมากกว่าที่พีเอชอื่นๆ เมื่อพิจารณาลักษณะการเสียสภาพที่ตรวจพบในอิมัลชันทดสอบ พบว่ามี 3 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ oiling off, flocculation และ coalescence อีกทั้งยังพบการแยกชั้นของน้ำมันในอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็มที่พีเอช 3 อีกด้วย

ตารางที่ 4.6 ความคงตัวของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ภายหลังเก็บรักษานาน 32 วัน

	pH	ตัวอย่าง*	ppm	ระยะเวลาเก็บรักษา(วัน)								
				0	4	8	12	16	20	24	28	32
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส				ตัวอย่างทุกชนิดไม่พบการเสียสภาพ								
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส				ตัวอย่างทุกชนิดไม่พบการเสียสภาพ								
อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	3	Control		-	-	-	-	-	-	-	-	C
		BHT	100	-	-	-	-	-	-	F	C	C
		TA	300	-	-	-	-	-	-	-	O	C
			500	-	-	-	-	-	-	O	O	C
		PP	250	-	-	-	-	-	C	C	C	S
			500	-	-	-	-	-	-	C	C	C
	5	Control		-	-	-	-	-	-	-	-	C
		BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	O
		TA	300	-	-	-	-	-	-	O	F	C
			500	-	-	-	-	-	-	-	O	O
		PP	250	-	-	-	-	-	-	-	-	O
			500	-	-	-	-	-	-	O	O	C
	7	Control		-	-	-	-	-	-	-	-	C
		BHT	100	-	-	-	-	-	-	-	-	O
		TA	300	-	-	-	-	-	-	F	O	-
			500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		PP	250	-	-	-	-	-	-	-	O	O
			500	-	-	-	-	-	-	O	O	O

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

หมายเหตุ * หมายถึง สารสกัดพืช TA=ทะโล้, PP=ผักไผ่, - หมายถึง ไม่พบการเสียสภาพ

F หมายถึง การเสียสภาพแบบ flocculation, C หมายถึง การเสียสภาพแบบ coalescence

O หมายถึง การเสียสภาพแบบ oiling off , S หมายถึง การเสียสภาพแบบเกิดการแยกชั้นของน้ำมัน (oil separation)

การเสียสภาพของอิมัลชันในการศึกษาครั้งนี้ตรวจพบในอิมัลชันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเท่านั้น โดยอิมัลชันที่มีพีเอช 3 พบการเสียสภาพแบบผันกลับไม่ได้มากที่สุด และการเติมสารสกัดผักไผ่ที่ทั้งสองความเข้มข้น มีความคงตัวต่ำกว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ โดยพบการเสียสภาพแบบ coalescence ตั้งแต่วันที่ 20 ของการเก็บรักษา ในขณะที่การเก็บรักษาอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ที่เวลาดังกล่าวพบการเสียสภาพแบบ oiling off ซึ่งเป็นการเสียสภาพในเบื้องต้นเพียงเท่านั้น เมื่อพีเอชของระบบอิมัลชันเพิ่มขึ้นเป็น 5.4 และ 7 อิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ยังคงตรวจพบการเสียสภาพสูงกว่าการเติมสารสกัดทะโล้เช่นเดียวกับที่พบในพีเอช 3 แสดงว่า สารสกัดทะโล้มีความเหมาะสมต่อระบบอิมัลชันมากกว่า เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพีเอชที่มีช่วงกว้างกว่าสารสกัดผักไผ่ ส่วนการเสียสภาพของอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่า อิมัลชันที่เติม BHT และอิมัลชันควบคุม พบการเสียสภาพในช่วงสุดท้ายของการเก็บรักษา คือ วันที่ 24 และ 32 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการเสียสภาพน้อยกว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอชเดียวกัน จึงเป็นไปได้ว่า ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปอาจส่งผลบางประการต่อโครงสร้างขององค์ประกอบในสารสกัดพืช ทำให้เกิดการแยกตัวออกจากระบบอิมัลชัน นอกจากนี้ยังพบว่า อิมัลชันเติม BHT 100 พีพีเอ็มที่พีเอช 3 มีการเสียสภาพมากกว่าที่พีเอชอื่นๆ แสดงว่า การเตรียมอิมัลชันที่พีเอชดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับความคงตัวของระบบโดยตรง อย่างไรก็ดี สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้น มีความเหมาะสมที่สุดต่อลักษณะทางกายภาพของอิมัลชันที่พีเอชต่างๆ

4.3.2 ผลของพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชันที่เก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส

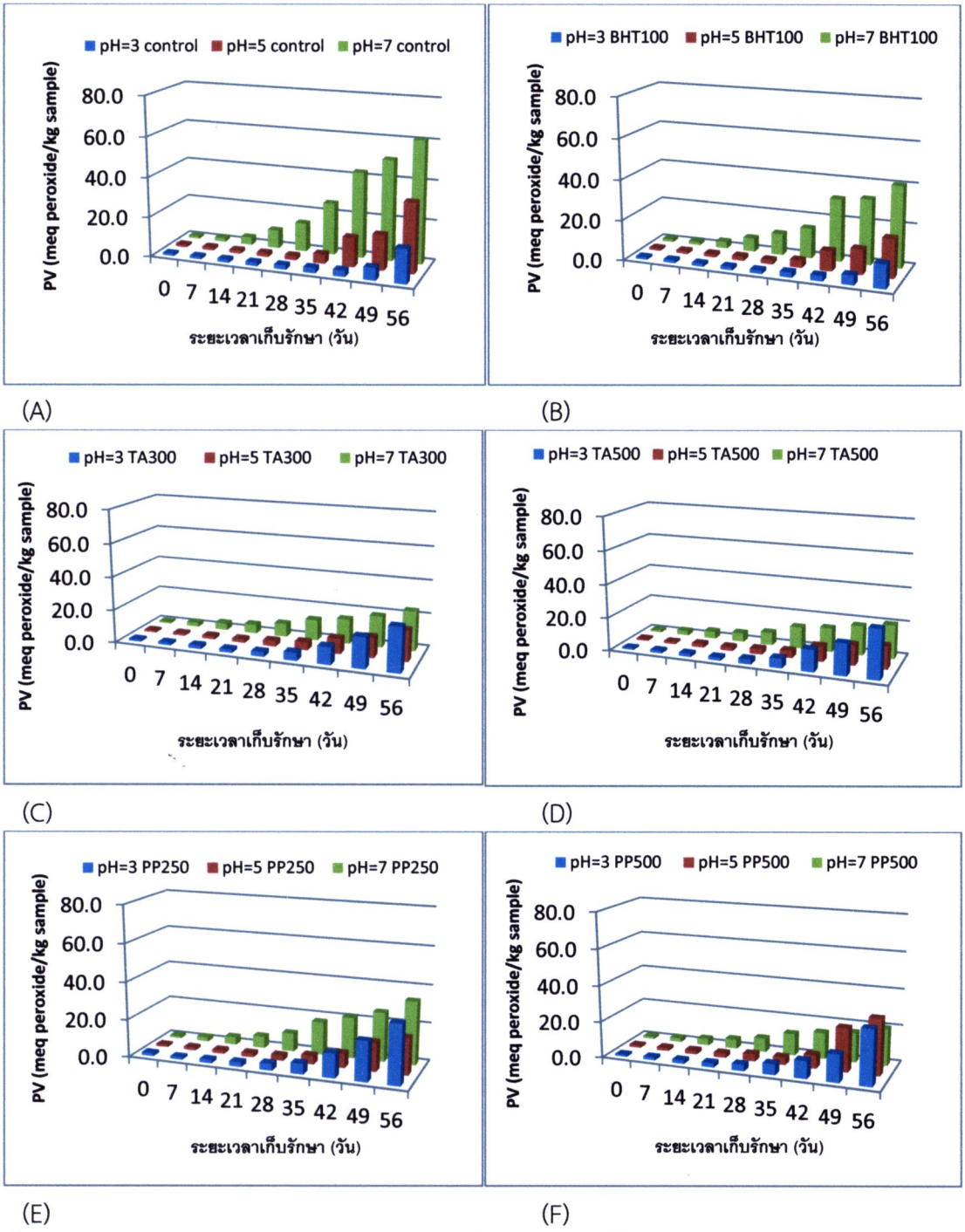
การเปลี่ยนแปลงพีเอชของอิมัลชันทดสอบ(มีค่าตั้งแต่ 3, 5.4 และ 7) ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทั้งในกลุ่มของผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (ค่าเปอร์ออกไซด์, PV) และขั้นทุติยภูมิ (ค่า TBARS และค่า p-AV) ตลอดจน ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (ค่า Totox V) มีรายละเอียด ดังนี้

- **ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value, PV)**

การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) การวัดปริมาณไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิของการเกิดออกซิเดชันของไขมัน

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงพีเอชจากต่ำไปสูง (3 เป็น 7) ในอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด (ไม่เติม BHT และ เติม BHT 100 พีพีเอ็ม) ทำให้ค่า PV เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (ภาพที่ 4.9A และ 4.9B) โดยอิมัลชันควบคุมที่พีเอช 3, 5.4 และ 7 มีค่า PV อยู่เพิ่มขึ้นเป็น17, 35 และ 61 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ส่วนการเติม BHT 100 พีพีเอ็มในอิมัลชัน แม้ว่าทำให้ค่า PV เพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น แต่สามารถค่า PV ในตัวอย่างอิมัลชันได้ โดยอิมัลชันที่พีเอช 3, 5.4 และ 7 มีค่า PV เพิ่มขึ้นดังนี้ 12, 19 และ 40 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง แสดงว่า BHT มีฤทธิ์ยับยั้งการหืนในอิมัลชันได้ที่พีเอชต่างๆ การเพิ่มขึ้นของค่า PV เมื่อเพิ่มพีเอชนี้ เป็นผลจากประจุที่ผิวหน้าของหยดน้ำมัน โดยที่พีเอชต่ำมีประจุเป็นบวก จึงเกิดแรงผลักระหว่างหยดน้ำมันกับสารโปร-ออกซิแดนซ์ จึงทำให้อัตราเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำกว่าที่พีเอชสูง (Horn และ คณะ, 2011) ในขณะเดียวกันที่พีเอชต่ำ ยังสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของไขมันผ่านกลไกการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอมแก่อนุมูลเปอร์ออกซิลและอัลคอกซิลได้อีกด้วย (Antolovich และ คณะ, 2001)



ภาพที่ 4.9 ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

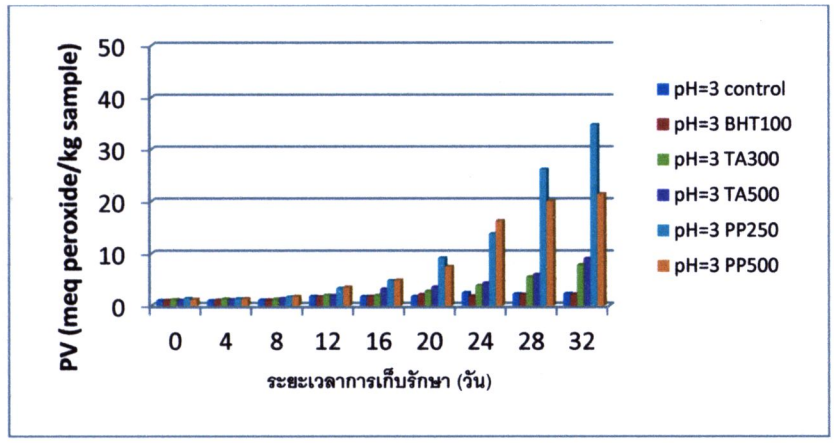
หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้งสองชนิด ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่า PV ที่วิเคราะห์ได้ โดยการเติมสารสกัดทะโล้ที่ 300 และ 500 พีพีเอ็ม ในอิมัลชันที่มีพีเอช 3 และ 5.4 นั้นมีค่า PV ใกล้เคียงกันในช่วง 42 วันแรกของการเก็บรักษา และมีค่าน้อยกว่า 10 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ส่วนอิมัลชันที่มีพีเอช 7 มีค่า PV เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 14 และเมื่อพิจารณาตลอดอายุการเก็บรักษา 56 วัน กลับพบว่า อิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นในอิมัลชันพีเอช 5.4 สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ดีที่สุด รองลงมา คือ ที่พีเอช 7 และพีเอช 3 ดังภาพที่ 4.9 (C) และ(D) ส่วนการใช้สารสกัดผักไผ่ในอิมัลชันที่พีเอชต่างๆ พบว่า ความเข้มข้นที่ใช้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดเปอร์ออกไซด์อย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.9E และ 4.9F) โดยพบว่า ที่ความเข้มข้นระดับต่ำอิมัลชันที่พีเอช 5.4 มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่า PV สูงสุดเท่ากับ 19 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง แต่การใช้สารสกัดผักไผ่ที่ความเข้มข้นระดับสูงมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในอิมัลชันที่พีเอช 7 โดยมีค่า PV สูงที่สุดเท่ากับ 20 meq peroxide ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา การใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิดในการต้านออกซิเดชันของอิมัลชันที่พีเอช 3 นั้น พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก สารประกอบฟีนอลิกในพืชมีโครงสร้างวงแหวนที่สามารถคีเลทโลหะได้ ซึ่งมีศักยภาพในการรีดิวซ์ที่สูงและทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีสมบัติเป็นโปร-ออกซิแดนซ์ได้ (Bros และคณะ, 1995) นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเป็นขั้วของสารต้านออกซิเดชัน ความสามารถในการกระจายตัวเฟสทั้งสอง รวมทั้งปริมาณที่ใช้ก็ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชัน (Maqsood และ Benjakul, 2010)

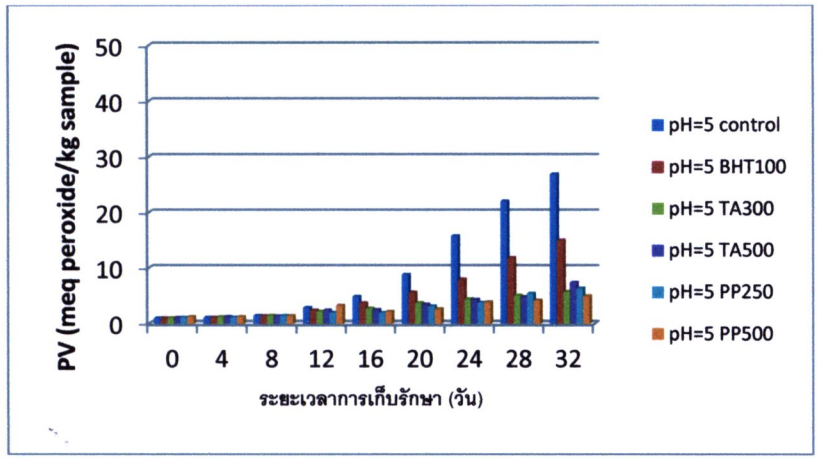
ผลการเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิด พบว่า สารสกัดทะโล้ทั้งสองระดับความเข้มข้น (300 และ 500 พีพีเอ็ม) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิด PV หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์สูงกว่าสารสกัดผักไผ่ อีกทั้งการเติมสารสกัดทะโล้ในอิมัลชันพีเอช 5.4 และ 7 ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT แสดงว่า สารสกัดทะโล้มีประสิทธิภาพที่ดีในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์อยู่ช่วงพีเอช 5.4-7

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

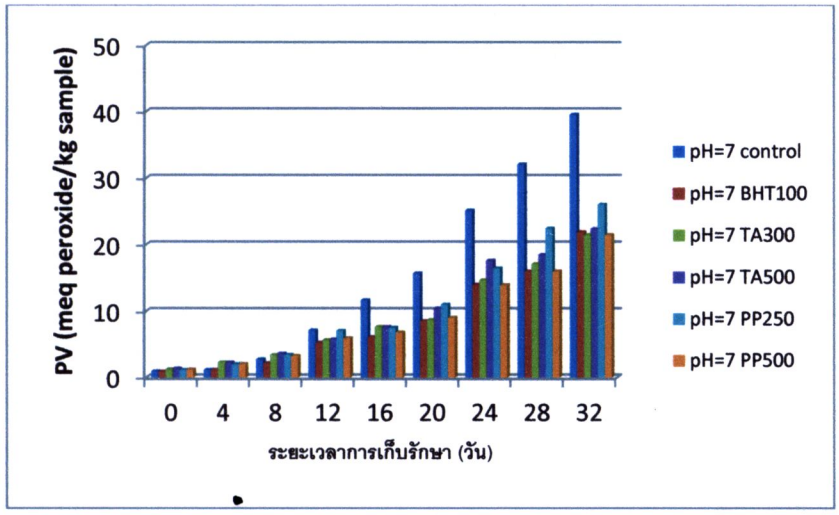
อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอช 3 มีค่า PV สูงกว่าอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด โดยการเติมสารสกัดผักไผ่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้สารสกัดทะโล้ ประมาณ 3 เท่า แต่การเพิ่มปริมาณสารสกัดผักไผ่จาก 250 เป็น 500 พีพีเอ็ม ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงข้าม การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดทะโล้ที่ 300 เป็น 500 พีพีเอ็ม ไม่มีความแตกต่างdyo (ภาพที่ 4.10A) ในขณะที่อิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด (ไม่เติม และ เติม BHT 100 พีพีเอ็ม) มีค่า PV คงที่ตลอดการเก็บรักษา 32 วัน หรือมีค่าต่ำกว่า 2.5 meq peroxide แสดงว่า ระบบที่มีพีเอชต่ำส่งผลต่ออิมัลชันต่างๆแตกต่างกัน โดยจะช่วยชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันในอิมัลควบคุมทั้งสองชนิด แต่จะเร่งการเกิดออกซิเดชันในอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ไฮโดรเจนอะตอมในระบบ สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันผ่านกลไกการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนอะตอมได้ แต่ในขณะที่เดียวกัน ไฮโดรเจนอะตอมดังกล่าวอาจเร่งให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบในสารสกัดพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไอออนของโลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในพืชจึงเร่งให้เกิดการออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.10 ค่า PV ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่พีเอชต่างๆ คือ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และ พีเอช 7 (C)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500==สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นเป็น 5.4 และ 7 พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า PV แตกต่างจากที่พีเอช 3 อย่างสิ้นเชิง โดยที่พีเอช 5.4 อิมัลชันควบคุมมีค่า PV เพิ่มขึ้นในวันที่ 16 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตลอดอายุการเก็บรักษา ส่วนการเติม BHT 100 พีพีเอ็ม และสารสกัดพืชทั้งสองชนิดสามารถยับยั้งการออกซิเดชันของไขมันได้เป็นอย่างดี ส่วนที่พีเอช 7 นั้นพบว่า อิมัลชันควบคุมเกิดการออกซิเดชันของไขมันสูงที่สุด รองลงมา คือ อิมัลชันเติม BHT แต่การเติมสารสกัดทะโล้และผักไผ่ยังคงมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีกว่าการเติม BHT คล้ายคลึงกับที่พบในพีเอช 5.4 (ภาพที่ 4.10B และ 4.10C)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่ใช้ของสารสกัดพืชทั้งสองชนิด พบว่า ประสิทธิภาพในการต้านการหืนขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและความเหมาะสมของระบบที่ใช้ โดยพืชต่างชนิดกันก็มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันแตกต่างกัน เช่น การเติมสารสกัดทะโล้เข้มข้น 300 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับความเข้มข้น 500 พีพีเอ็มในทุกพีเอชทดสอบ ในขณะที่ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม จะมีประสิทธิภาพดีกว่า 250 พีพีเอ็ม และเมื่อพีเอชของระบบลดลงเท่ากับ 3 สารสกัดผักไผ่แสดงสมบัติเป็นสารโปร-ออกซิแดนซ์ เร่งการสลายตัวของไขมันให้กลายเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ การนำสารสกัดพืชมาประยุกต์ในระบบอิมัลชันใช้ย่อมต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆเหล่านี้ด้วย โดยสารสกัดทะโล้ที่ความเข้มข้นทั้งสอง (300 และ 500 พีพีเอ็ม) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ดีกว่าสารสกัดผักไผ่และสามารถใช้ได้ในทุกระดับพีเอช

- **ค่า TBARS**

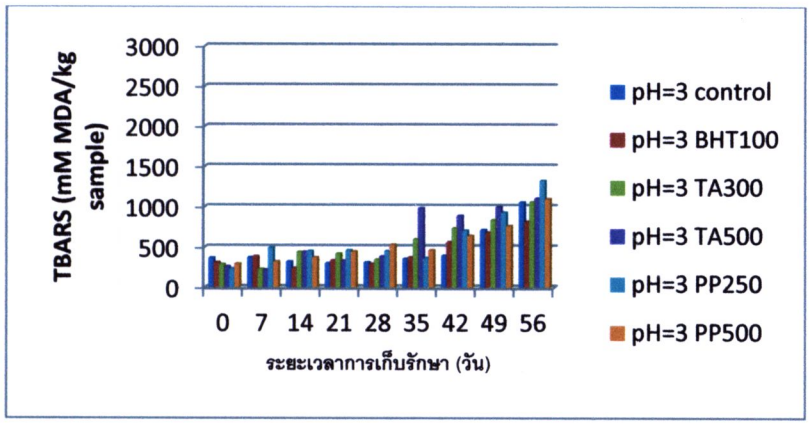
การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี TBARS เป็นการหาปริมาณผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (secondary oxidation products) ที่ได้จากการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในกลุ่มของอัลดีไฮด์ และ คีโตน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

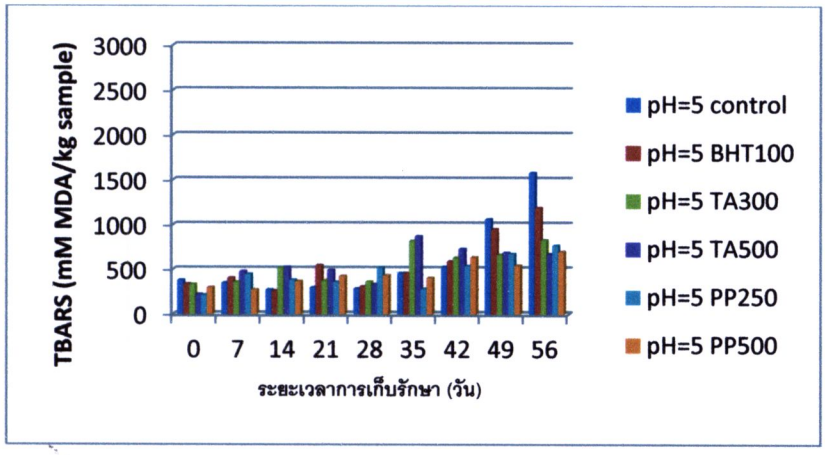
การเปลี่ยนแปลงพีเอชตั้งแต่ 3 ถึง 7 ส่งผลให้ค่า TBARS ของตัวอย่างควบคุมทั้งสองเพิ่มขึ้นคล้ายคลึงกับที่พบในค่า PV ดังภาพที่ 4.11A- 4.11C โดยอิมัลชันที่พีเอช 7 ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา มีค่า TBARS สูงที่สุด คือ 2,482 และ 1,734 มิลลิโมลาร์มาลอนไดอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ในตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

ผลการทดลองในภาพที่ 4.11 แสดงว่า การเพิ่มพีเอชของตัวอย่างอิมัลชัย สามารถเร่งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ รวมถึงการใช้ BHT ในอิมัลชันยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีทั้งในระบบที่มีพีเอชต่ำและมีพีเอชสูง สำหรับสารสกัดพืชทั้งสองชนิดนั้น มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนในอิมัลชันที่พีเอชต่างๆแตกต่างกัน โดยการใช้สารสกัดพืชเป็นสารต้านออกซิเดชันที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ส่วนที่พีเอช 5.4 สารสกัดทั้งสองจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่พีเอช 7 (ภาพที่ 4.11A-4.11C) อย่างไรก็ดี การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชัน มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม ประมาณ 1.4-2 เท่า ยกเว้นระบบที่มีพีเอชเท่ากับ 3 ที่เกิดสมบัติโปร-ออกซิแดนซ์ จึงเร่งให้การเกิดออกซิเดชันของไขมันสูงขึ้นอีกด้วย (Bros และคณะ, 1995)

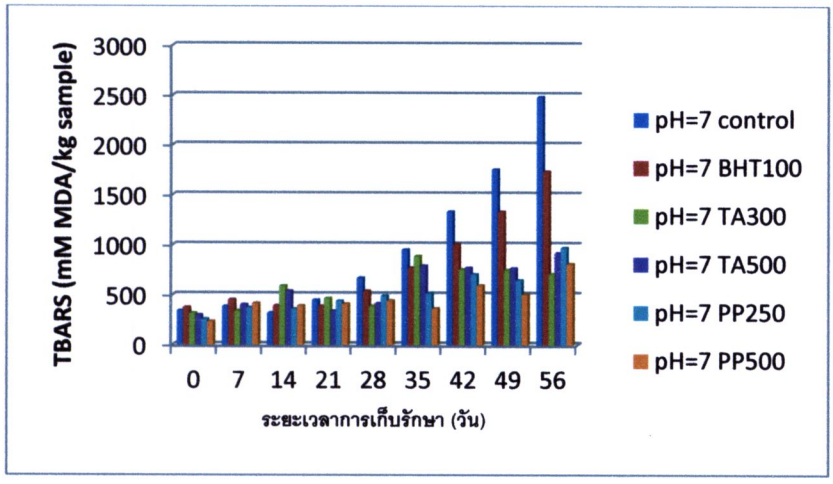
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.11 ค่า TBARS ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสที่พีเอชต่างๆ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และพีเอช 7 (C)

หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

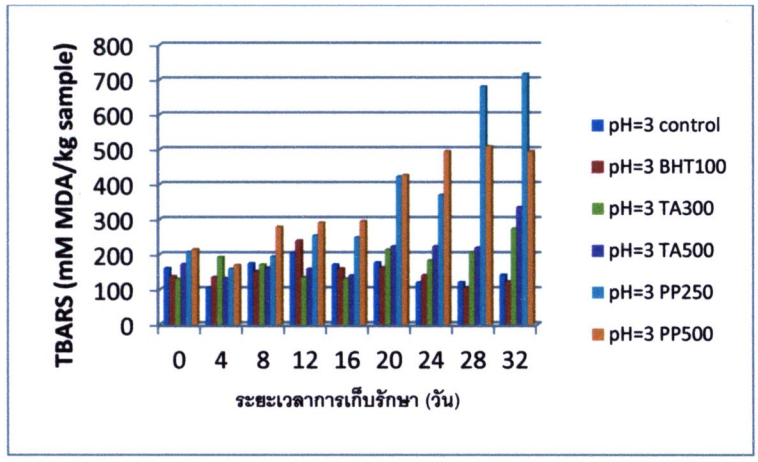
เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่ใช้ทดสอบ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดผักไผ่จาก 250 เป็น 500 พีพีเอ็ม ส่งผลให้มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่า TBARS ที่วิเคราะห์ได้จากอิมัลชันทดสอบทั้งสามพีเอชนั้น มีค่าลดลงตลอดอายุการเก็บรักษา แต่ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในอิมัลชันที่เติมสารสกัดทะโล้ทุกพีเอช แสดงว่า ประสิทธิภาพในการต้านการหืนของสารสกัดพืชเป็นลักษณะเฉพาะตัวของพืชแต่ละชนิด อีกทั้งปัจจัยด้านต่างๆ ทั้งที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบในพืช กลไกการเข้าปฏิกิริยา ระบบทดสอบ รวมไปถึงวิธีวิเคราะห์ที่เลือกใช้ ก็มีบทบาทต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันเช่นกัน

ผลการทดลองพบว่า สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็มและสารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม มีฤทธิ์ยับยั้งการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์สูงที่สุดที่พีเอช 5.4 และ 7 อีกทั้งการใช้สารสกัดทพืชทั้งสองยังมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงกว่า BHT

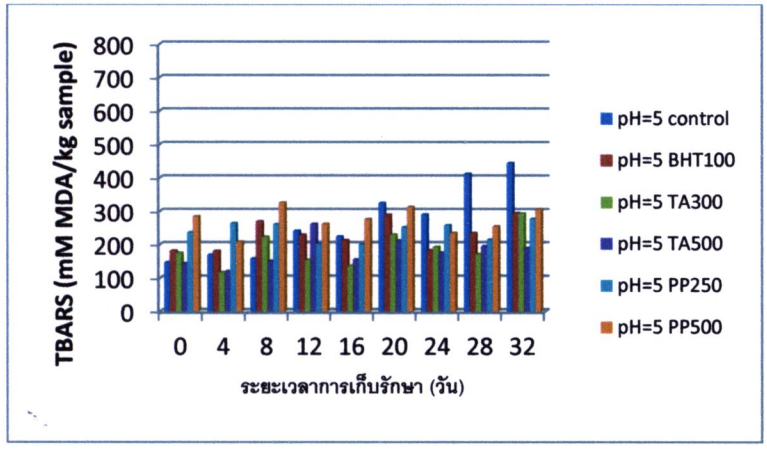
- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การประเมินความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี TBARS ของอิมัลชันที่พีเอชต่างๆ พบว่า ค่าพีเอชแต่ละระดับส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ที่แตกต่างกัน โดยที่พีเอช 3 อิมัลเติมสารสกัดพืชมีค่า TBARS สูงกว่าอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด ซึ่งอิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็มมีค่า TBARS สูงที่สุด รองลงมาคือ อิมัลชันที่เติมสารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม ส่วนอิมัลชันควบคุมมีค่า TBARS ต่ำกว่าอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชในทุกวันทดสอบ (ภาพที่ 4.12A) เมื่อพีเอชของระบบเพิ่มเป็น 5.4 (ภาพที่ 4.12B) พบว่า อิมัลชันควบคุมมีค่า TBARS เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทุกความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีกว่าอิมัลชันควบคุม แต่ทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษายังไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ส่วนอิมัลชันที่พีเอช 7 (ภาพที่ 4.12C) พบว่า การเพิ่มขึ้นของพีเอชไม่ส่งผลต่อการออกซิเดชันของอิมัลชันควบคุม เนื่องจาก ค่า TBARS ที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่พีเอช 5.4 แต่พีเอชที่เพิ่มขึ้นนี้กลับส่งผลให้สารสกัดพืชมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนลดลง รวมทั้งไม่พบความแตกต่างของการใช้สารสกัดพืชที่ความเข้มข้นต่างกันอีกด้วย

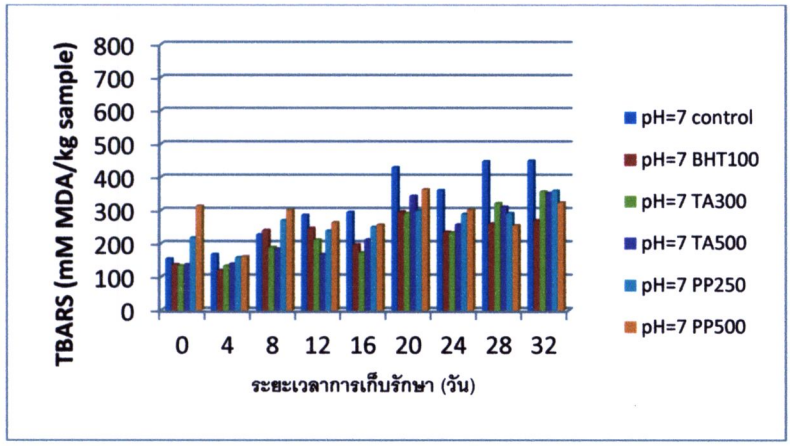
ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีนี้ของสารสกัดพืชทั้ง 2 ชนิด พบว่า การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีประสิทธิภาพดีกว่าผักไผ่ในทุกพีเอชทดสอบ แต่การใช้สารสกัดผักไผ่มีความได้เปรียบเมื่อพีเอชของระบบเพิ่มจาก 5.4 เป็น 7 เนื่องจาก มีค่า TBARS ที่พีเอชทั้งสองใกล้เคียงกันตลอดอายุการเก็บรักษา แสดงว่า พีเอชที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อองค์ประกอบในผักไผ่ที่อาจก่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน หรือลดความสามารถในการต้านออกซิเดชันของพืชลง อย่างไรก็ดี การเติมสารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็มลงในอิมัลชันที่พีเอช 5.4 สามารถต้านออกซิเดชันได้สูงที่สุด และมีประสิทธิภาพดีกว่าการเติม BHT 100 พีพีเอ็ม



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.12 ค่า TBARS ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่พีเอชต่างๆ คือ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และ พีเอช 7 (C)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

- **ค่า p-Anisidine (p-Anisidine Value, p-AV)**

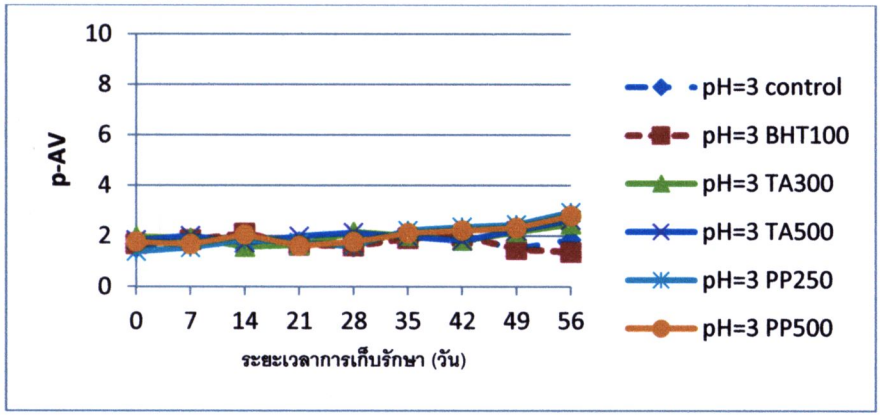
การวิเคราะห์ค่า p-Anisidine (p-AV) เป็นการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (secondary oxidation products) เช่นเดียวกับวิธี TBARS แต่วิธีนี้เป็นวัดปริมาณสารประกอบอัลดีไฮด์ทั้งหมด โดยมีความจำเพาะต่อสารประกอบอัลดีไฮด์กลุ่มที่ไม่ระเหย

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

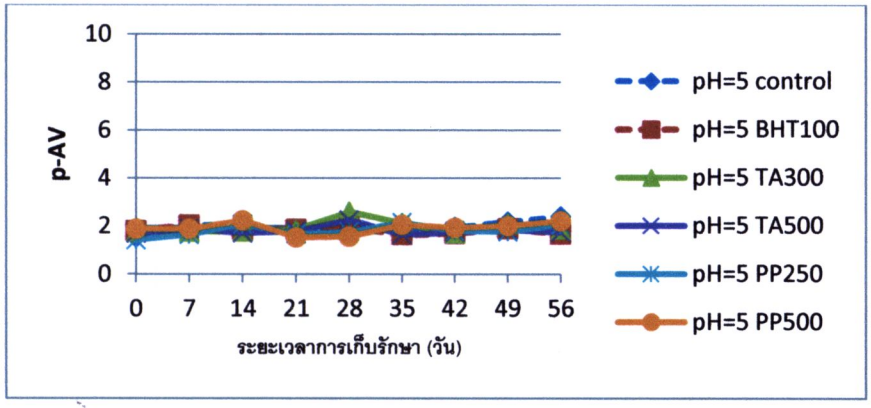
ค่า p-AV ของอิมัลชันทั้งหมดตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 56 วัน พบการเปลี่ยนแปลงของค่า p-AV ในอิมัลชันที่มีพีเอชต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยมาก ยกเว้น อิมัลชันทดสอบที่พีเอช 7 ที่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดในวันที่ 42 (ภาพที่ 4.13)

การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันที่พีเอช 3 พบว่า ความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่วิเคราะห์ด้วยวิธี p-AV สอดคล้องผลที่ได้จากวิธีอื่นๆ โดยอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้งสองชนิด ที่ระดับความเข้มข้นที่กำหนด มีค่า p-AV สูงกว่าตัวอย่างควบคุมทั้งสอง ดังภาพที่ 4.13A

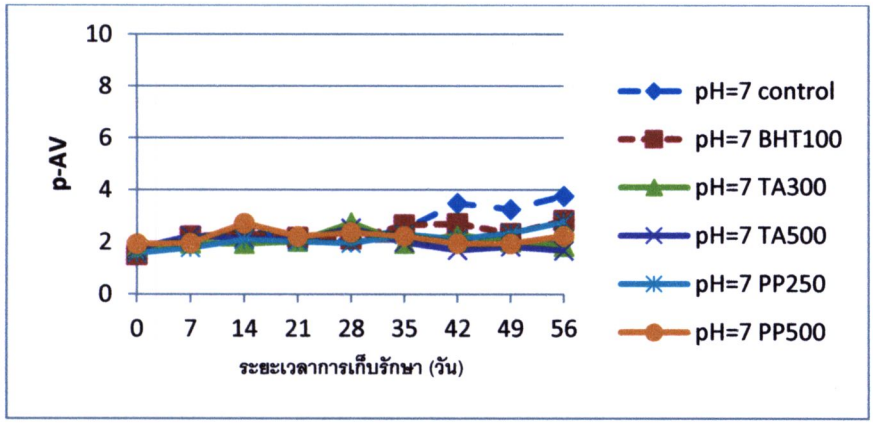
ในขณะที่พีเอช 5.4 ไม่พบความแตกต่างกันของค่า p-AV ที่วิเคราะห์ได้ระหว่างตัวอย่างทดสอบทุกชนิด (ภาพที่ 4.13B) ส่วนที่พีเอช 7 ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่า p-AV ของตัวอย่างควบคุม (ไม่เติม BHT และ เติม BHT 100 พีพีเอ็ม) ในระหว่างการเก็บรักษานาน 42 วัน (ภาพที่ 4.13C) ถึงแม้ว่า การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันทดสอบทุกพีเอช ตรวจพบค่า p-AV ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนด้วยวิธีนี้ต่ำกว่าการเติม BHT 100 พีพีเอ็ม ยกเว้นที่อิมลัชันที่พีเอช 7 ที่พบว่า การใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิดเป็นสารต้านออกซิเดชันมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธี p-AV นี้ ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืช แปรผันตามความเข้มข้น(พีพีเอ็ม)และค่าพีเอชของระบบที่ใช้ทดสอบ โดยค่าพีเอชมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการเร่งปฏิกิริยาสลายตัวของผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิให้เป็นขั้นทุติยภูมิ (Wang และ Wang, 2008) อย่างไรก็ดี สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารต้านออกซิเดชันในระบบอิมัลชันที่พีเอช 5.4 และ 7 มากที่สุด



(A)



(B)



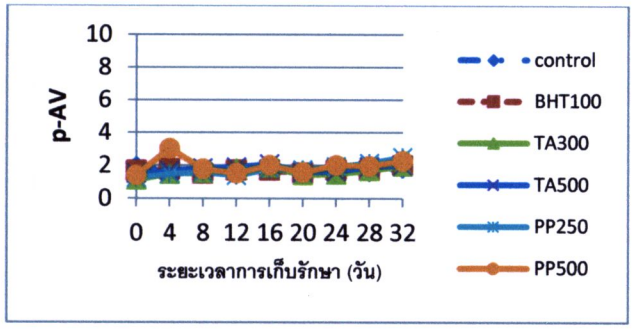
(C)

ภาพที่ 4.13 ค่า p-AV ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสที่พีเอชต่างๆ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และพีเอช 7 (C)

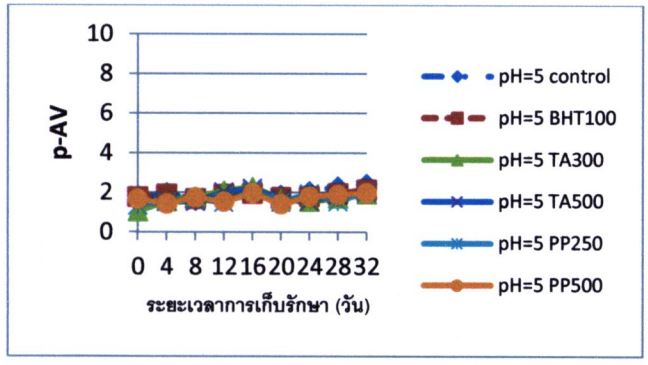
หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D) สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

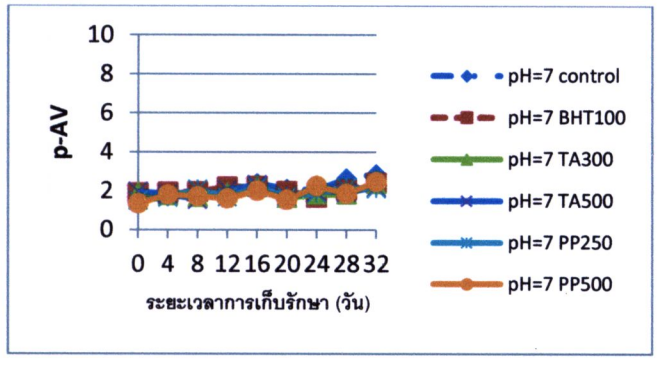
การเปลี่ยนแปลงค่า p-AV ของอิมัลชันทดสอบที่พีเอชต่างๆตลอดอายุการเก็บรักษา 32 วัน พบว่า อิมัลชันที่พีเอชต่างๆ มีค่า p-AV คงที่ แต่เมื่อเพิ่มพีเอช จาก 3 เป็น 5.4 และ 7 ส่งผลให้ค่า p-AV ของตัวอย่างควบคุมเพิ่มสูงขึ้นด้วย แสดงว่า การเพิ่มระดับพีเอชของระบบส่งผลให้การสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น คล้ายคลึงกับที่พบในวิธี TBARS ดังภาพที่ 4.14



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.14 ค่า p-AV ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่พีเอชต่างๆ คือ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และ พีเอช 7 (C)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

ในทางตรงกันข้าม อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอช 5.4 และ 7 สามารถต้านการเกิดออกซิเดชันได้ดี มีค่า p-AV ต่ำกว่าอิมัลชันควบคุม รวมทั้งมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็มที่พีเอชทั้งสอง (ภาพที่ 4.14B และ 4.14C) แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของสารสกัดพืชที่ใช้ พบว่า การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่การใช้สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม กลับมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ 500 พีพีเอ็ม แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการต้านการหืนขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอช 3 พบว่า พีเอชต่ำเร่งการเกิดออกซิเดชันของอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืช ทำให้มีค่า p-AV สูงกว่าอิมัลชันควบคุม (ภาพที่ 4.14A)

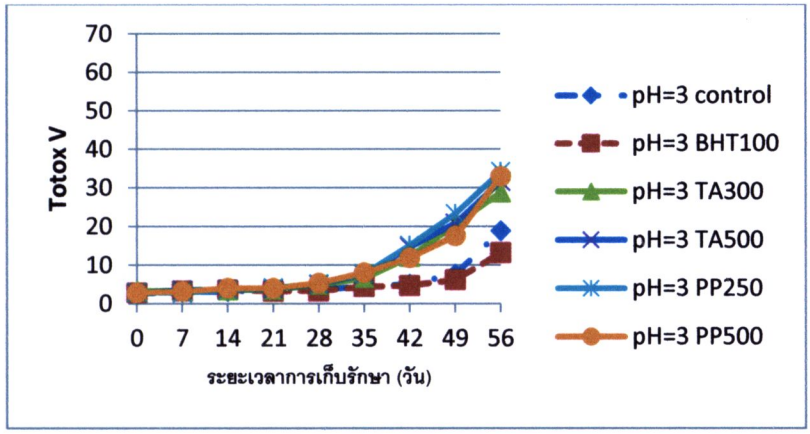
ถึงแม้ว่า การใช้สารสกัดพืชเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ให้ผลดีในระบบอิมัลชัน แต่การนำไปใช้จำเป็นต้องคำนึงปัจจัยพื้นฐานของระบบทดสอบ เช่น พีเอช ควบคู่ไปด้วย เนื่องจากสารสกัดพืชทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพดีที่พีเอช 5.4 ถึง 7 และการวิเคราะห์ค่า p-AV ยังแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของสารสกัดทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

- **ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox V)**

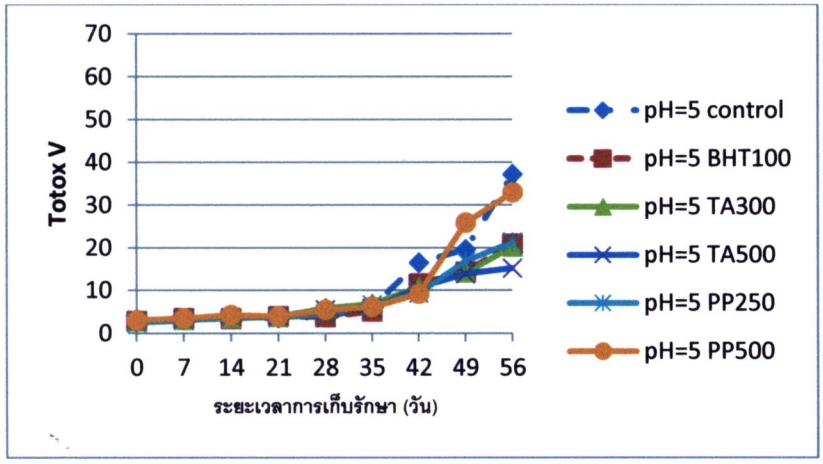
ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox Value, Totox V) คำนวณจากผลรวมของค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) และค่า p-AV สามารถนำมาใช้ประเมินการเสื่อมสภาพของไขมันจากการออกซิเดชัน โดยอิมัลชันที่มีพีเอชต่างกัน ย่อมมีปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดหรือค่า Totox V แตกต่างกันตามไปด้วย

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

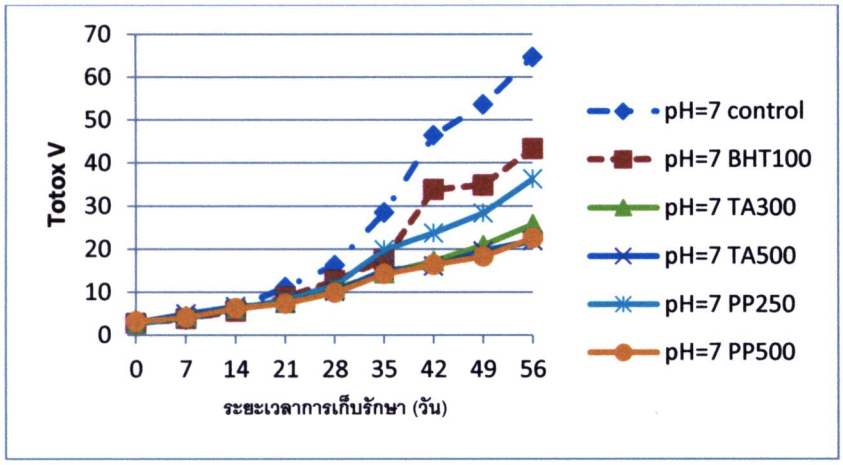
เมื่อพิจารณาตลอดอายุการเก็บรักษา 56 วัน พบว่า ค่า Totox V ของตัวอย่างควบคุมที่พีเอช 3, 5.4 และ 7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยที่ ตัวอย่างควบคุมที่พีเอช 7 ตรวจพบปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมาคือ พีเอช 5.4 ส่วนที่พีเอช 3 มีปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดต่ำที่สุด (ภาพที่ 4.15) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พีเอชของระบบทดสอบมีความสัมพันธ์กับการเกิดออกซิเดชันของไขมันดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ การใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม สามารถต้านการออกซิเดชันในอิมัลชันทดสอบทุกพีเอชได้ดี ในทางตรงกันข้าม การเติมสารสกัดพืชทั้งสองชนิด ส่งผลต่อการออกซิเดชันของไขมันแตกต่างกันไปตามพีเอชของระบบ โดยอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชที่พีเอช 3 มีค่า Totox V สูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมภายหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 32 วัน แต่เมื่อระบบมีพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5.4 อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนใกล้เคียงกับ BHT ยกเว้นสารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็มที่มีค่า Totox V เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในวันที่ 49 ส่วนอิมัลชันที่พีเอช 7 พบว่า มีค่า Totox V สูงกว่าที่พีเอชอื่นๆ แต่สารสกัดพืชทั้งหมดยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการต้านออกซิเดชัน รวมถึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ BHT



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.15 ปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสที่พีเอชต่างๆ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และพีเอช 7 (C)

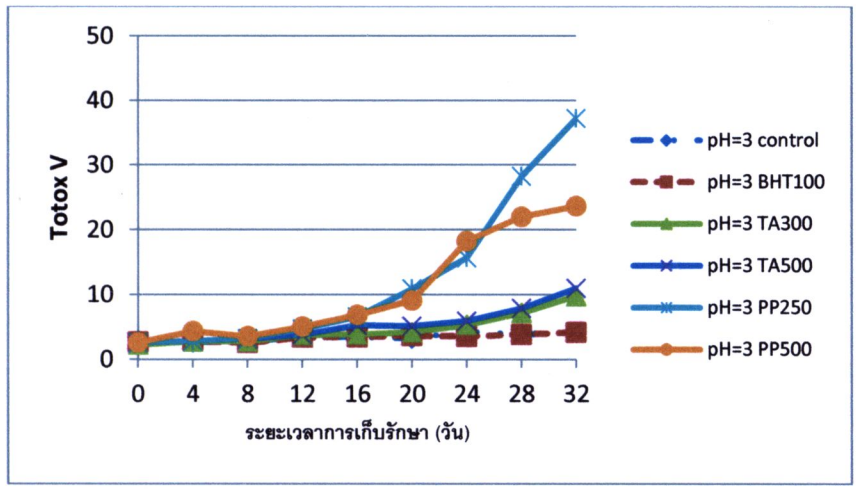
หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พีเอชมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันอย่างยิ่ง การเพิ่มพีเอชส่งผลให้การออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่สารสกัดพืชมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันแตกต่างกันไปในแต่ละพีเอชที่ทดสอบ โดยเฉพาะอิมัลชันที่พีเอช 3 สารสกัดพืชมีแนวโน้มแสดงสมบัติเป็นสารโปร-ออกซิแดนซ์ ที่เร่งการปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ส่วนอิมัลชันที่พีเอช 5.4 และ 7 สารสกัดพืชมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม และสารสกัดพืชที่มีความเข้มข้นที่ความเข้มข้นสูง (500 พีพีเอ็ม) มีฤทธิ์ต้านการหืนได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

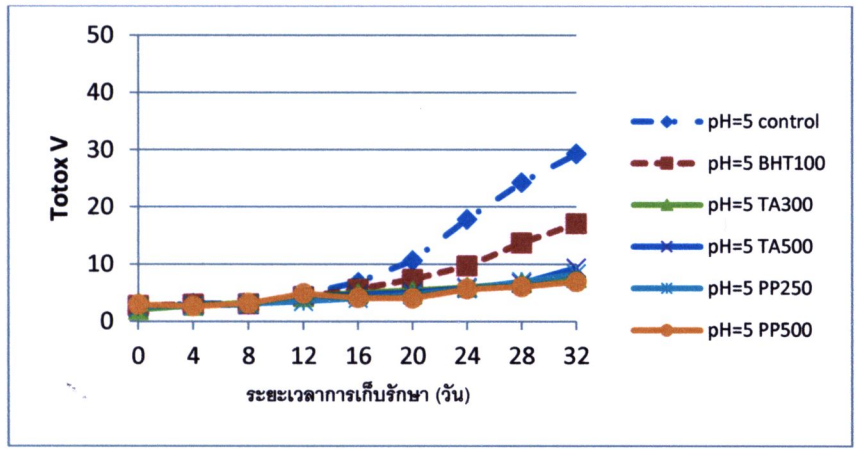
- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การเปลี่ยนแปลงพีเอชของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Totox V อย่างเด่นชัด (ภาพที่ 4.16) โดยอิมัลชันที่พีเอช 3 มีความแตกต่างจากอิมัลชันที่พีเอชอื่นๆมากที่สุด โดยพบว่าอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิดมีค่า Totox V ต่ำกว่า 5 ตลอดการเก็บรักษา 32 วัน ส่วนอิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชกลับมีค่า Totox V สูงกว่าอิมัลชันทั้งสองชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเติมสารสกัดผักไผ่ทั้งสองระดับความเข้มข้นคือ 250 และ 500 พีพีเอ็ม ส่งผลให้ค่า Totox V เพิ่มขึ้นเป็น 37.2 และ 23.6 ตามลำดับ (สูงกว่าอิมัลชันควบคุมประมาณ 7 และ 4 เท่า) ส่วนส่วนสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้น มีค่า Totox V สูงกว่าอิมัลชันควบคุมประมาณ 2 เท่า การที่อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดสูงกว่าอิมัลชันควบคุม เนื่องมาจาก ที่พีเอชต่ำอาจทำให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นการเร่งการเกิดออกซิดัน หรือแสดงสมบัติเป็นโปร-ออกซิแดนซ์แทน แต่อย่างไรก็ดีพบว่า สารสกัดทะโล้มีความทนทานต่ออิมัลชันที่มีพีเอชต่ำได้ดีกว่าสารสกัดผักไผ่

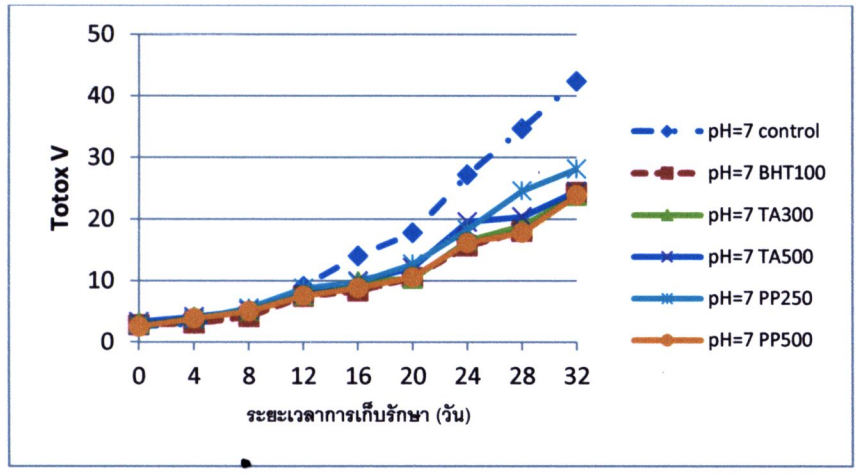
ในขณะที่ อิมัลชันที่พีเอช 5.4 นั้น อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชมีปริมาณออกซิเดชันทั้งหมดต่ำกว่าอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด ซึ่งการเติมสารสกัดทะโล้และผักไผ่ที่ 500 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนดีกว่าการเติมสารสกัดพืชในระดับต่ำ (ภาพที่ 4.16B) นอกจากนี้ การเติมสารสกัดพืชที่พีเอชนี้ มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูงกว่า BHT 100 พีพีเอ็มประมาณ 1 เท่า ส่วนอิมัลชันที่พีเอช 7 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอิมัลชันที่พีเอช 5.4 โดยสารสกัดพืชที่ความเข้มข้นสูงสามารถต้านการเกิดออกซิเดชันดีกว่าความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสารสกัดพืชกับ BHT กลับพบว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 4.16C) แสดงว่า การเพิ่มค่าพีเอชในอิมัลชัน อาจเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ รวมถึง ยังมีผลถึงประสิทธิภาพของสารสกัดพืชที่ใช้อีกด้วย



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 4.16 ค่า Totox V ในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่พีเอชต่างๆ คือ พีเอช 3 (A) พีเอช 5.4 (B) และ พีเอช 7 (C)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในอิมัลชัน มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทั้งการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (เกิดผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ) และการสลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (เกิดผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ) โดยพบว่า การเพิ่มพีเอชของอิมัลชัน ทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเพิ่มขึ้นด้วย แต่พีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปมีผลต่อประสิทธิภาพของสารสกัดพืช เช่น อิมัลชันที่พีเอช 3 ของสารสกัดพืชทุกชนิดแสดงสมบัติโปร-ออกซิแดนซ์ในการเร่งการออกซิเดชันของไขมัน อย่างไรก็ตาม สารสกัดพืชที่มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นสารต้านออกซิเดชันในอิมัลชัน คือ สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม ที่มีประสิทธิภาพดีกว่า BHT และทนต่อค่าพีเอชในช่วงกว้าง

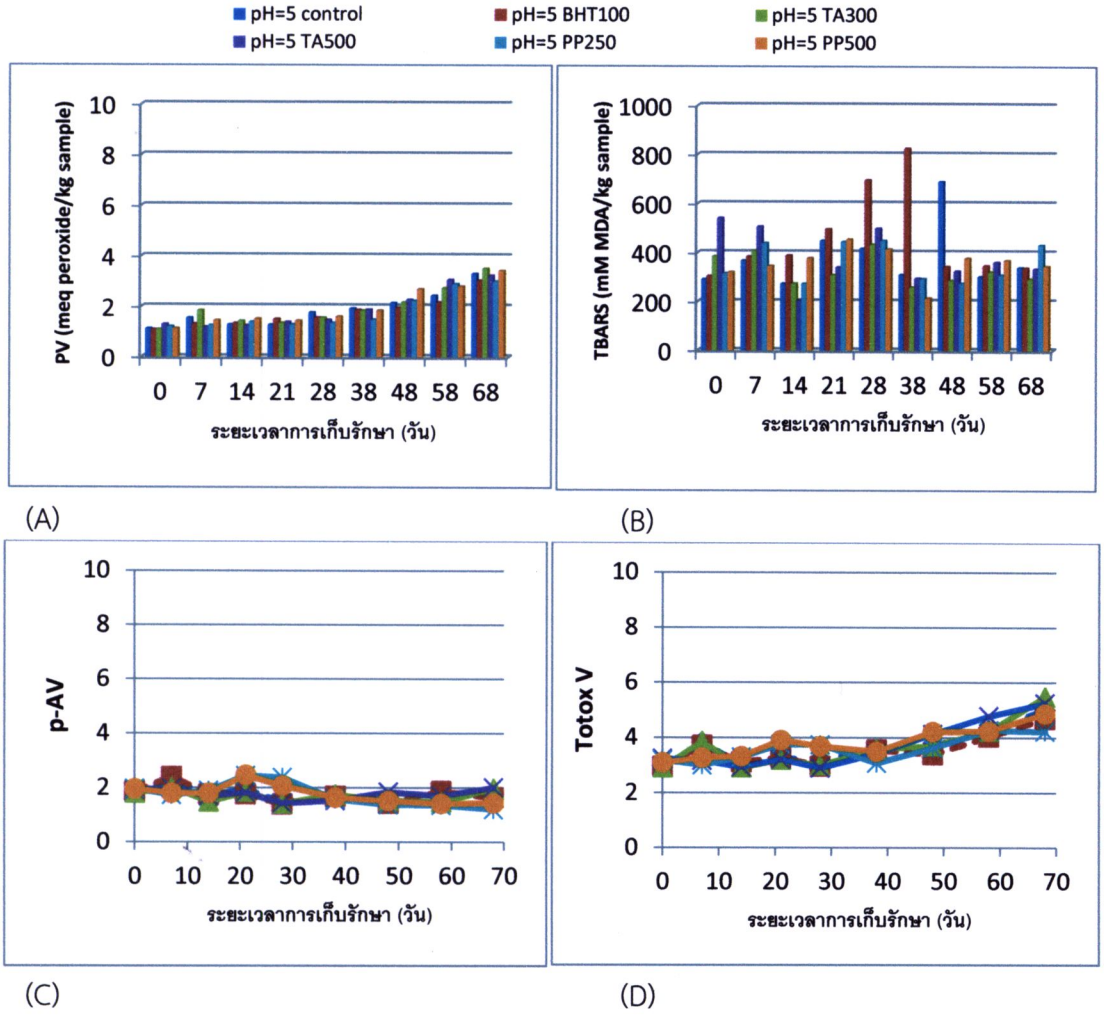
4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชันที่มีพีเอช 5.4

การเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงไป โดยผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ทั้งค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) ค่า TBARS ค่า p-AV และปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox V) ของอิมัลชันแบ่งตามอุณหภูมิเก็บรักษา แสดงได้ดังนี้

- **อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส**
  - **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

ผลการเก็บรักษาอิมัลชัน(พีเอช 5.4) ที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในทุกวิธีทดสอบมีค่าในระดับต่ำตลอดอายุการเก็บรักษา 0-68 วัน (ภาพที่ 4.17A-4.17D) โดยเมื่อเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 68 วัน พบว่า ค่า p-AV ที่วิเคราะห์ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ส่วนค่า PV และ Totox V มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บรักษา แสดงว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ มีผลต่อการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ในทางตรงข้าม วิธี TBARS กลับไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ การเติมสารสกัดพืชทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่กำหนดไว้ ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของอิมัลชันที่เตรียมขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิต่ำช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการทดสอบที่อุณหภูมินี้มีค่าน้อยเกินไป การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงไม่สมบูรณ์

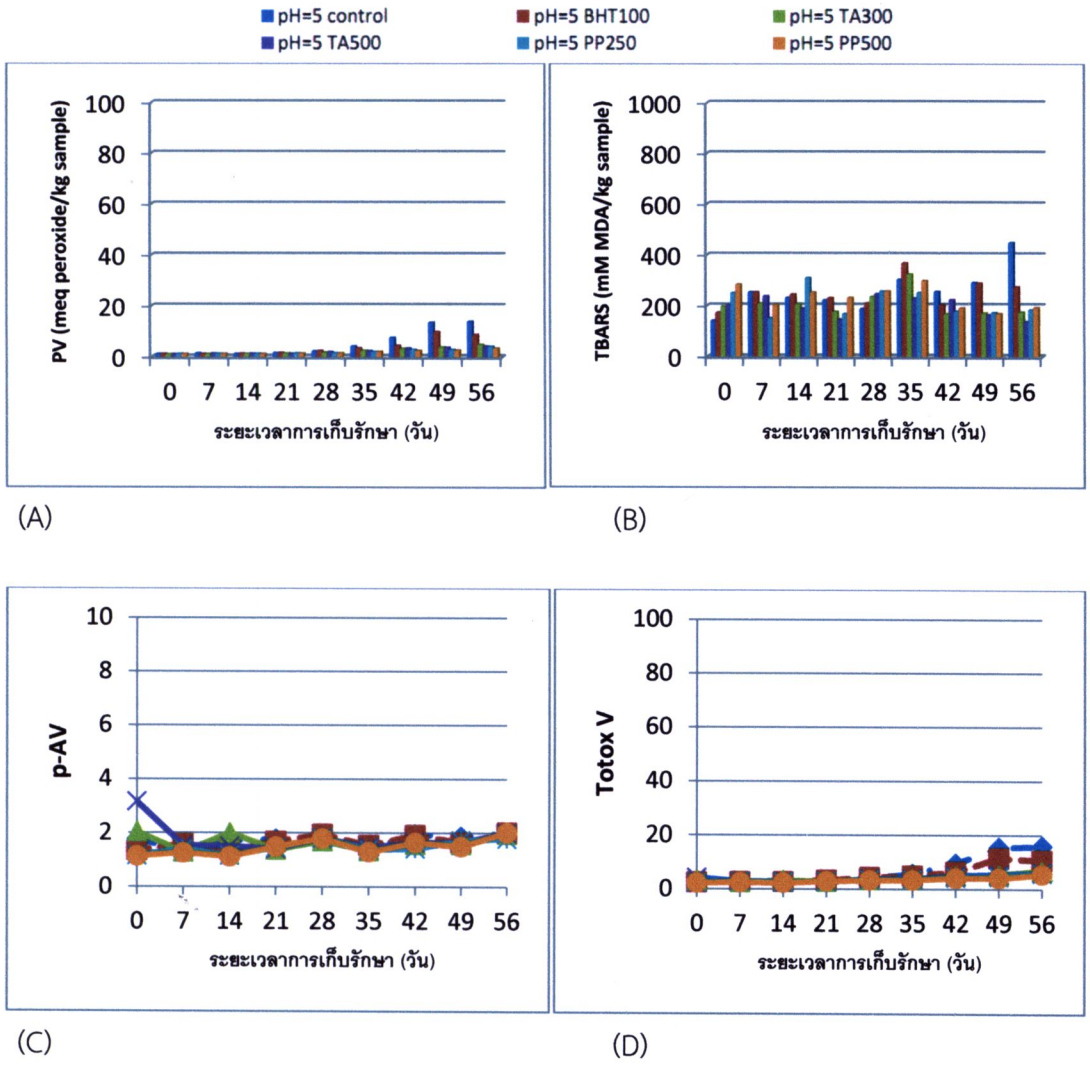


ภาพที่ 4.17 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส: PV (A), TBARS (B), p-AV (C) และ Totox V (D)

หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

ผลการเก็บรักษาอิมัลชันที่พีเอช 5.4 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในทุกวิธีทดสอบมีค่าอยู่ในระดับต่ำตลอดอายุการเก็บรักษานาน 56 วัน แสดงได้ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส : PV(A), TBARS (B), p-AV (C) และ Totox V (D)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

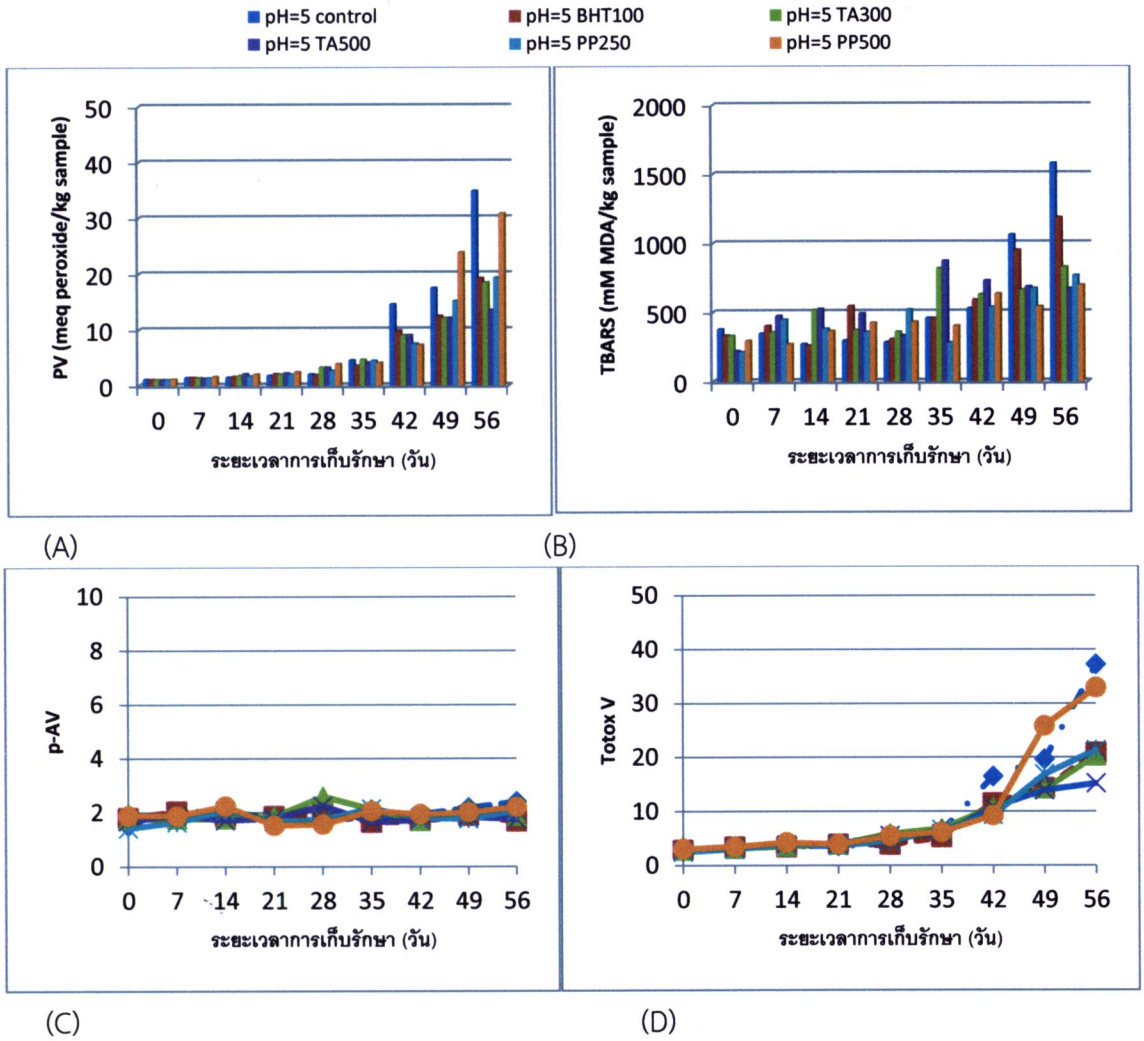
การเก็บรักษาอิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิดที่อุณหภูมินี้ พบว่า ค่า PV ค่า TBARS และ ค่า Totox V มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่า p-AV ที่มีแนวโน้มคงที่ตลอด 56 วัน (ภาพที่ 4.18C) ในขณะที่การเติมสารสกัดพืชลงในอิมัลชัน สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้เป็นอย่างดี โดยสารสกัดทะโล้และผักไผ่สามารถยับยั้งการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิได้ดีตลอดอายุการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารสกัดพืช คือ สารสกัดทะโล้ 300 และ 500 พีพีเอ็ม หรือ สารสกัดผักไผ่ 250 และ 500 พีพีเอ็ม พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านการหืนสูงขึ้นไปด้วย

อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาอิมัลชันที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้สารสกัดพืชที่ความเข้มข้นในระดับต่ำก็เพียงพอต่อการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือการหืน เนื่องมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ที่ระดับสูง รวมถึงสารสกัดพืชแต่ละชนิด ย่อมมีความจำเพาะต่อการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกลไกที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพของสารสกัดทะโล้และผักไผ่ที่วิเคราะห์ได้จากแต่ละวิธีจึงมีค่าแตกต่างกัน

- **อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส**
  - **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

การเปลี่ยนแปลงค่า PV, ค่า TBARS, ค่า p-AV และค่า Totox V ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 56 วัน (ภาพที่ 4.19) พบว่า อิมัลชันควบคุมทั้งสองชนิด (ไม่เติม BHT และเติม BHT 100 พีพีเอ็ม) เกิดการออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าที่ได้วิเคราะห์ได้ทุกวิธีสูงกว่าที่พบในอิมัลชันที่เก็บที่ 25 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ดี การเปลี่ยนแปลงของค่า p-AV ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในอุณหภูมิต่ำ (25 องศาเซลเซียส) แสดงว่า อุณหภูมิการเก็บรักษาที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีการสร้างและสลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ผลการใช้สารสกัดพืชทะโล้และผักไผ่เป็นสารต้านออกซิเดชัน พบว่า การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้น(300 และ 500 พีพีเอ็ม) มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่ดีในทุกวิธีวิเคราะห์ และการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดพืชให้มากขึ้นยังส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่การใช้สารสกัดผักไผ่ทั้งสองความเข้มข้นกลับมีแนวโน้มต่างจากทะโล้ โดยสารสกัดผักไผ่ที่ความเข้มข้นสูง (500 พีพีเอ็ม) มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันต่ำกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้สารสกัดทะโล้ทั้งสองความเข้มข้นมีความเหมาะสมต่อระบบอิมัลชันที่เก็บที่อุณหภูมิดังกล่าวมากที่สุด

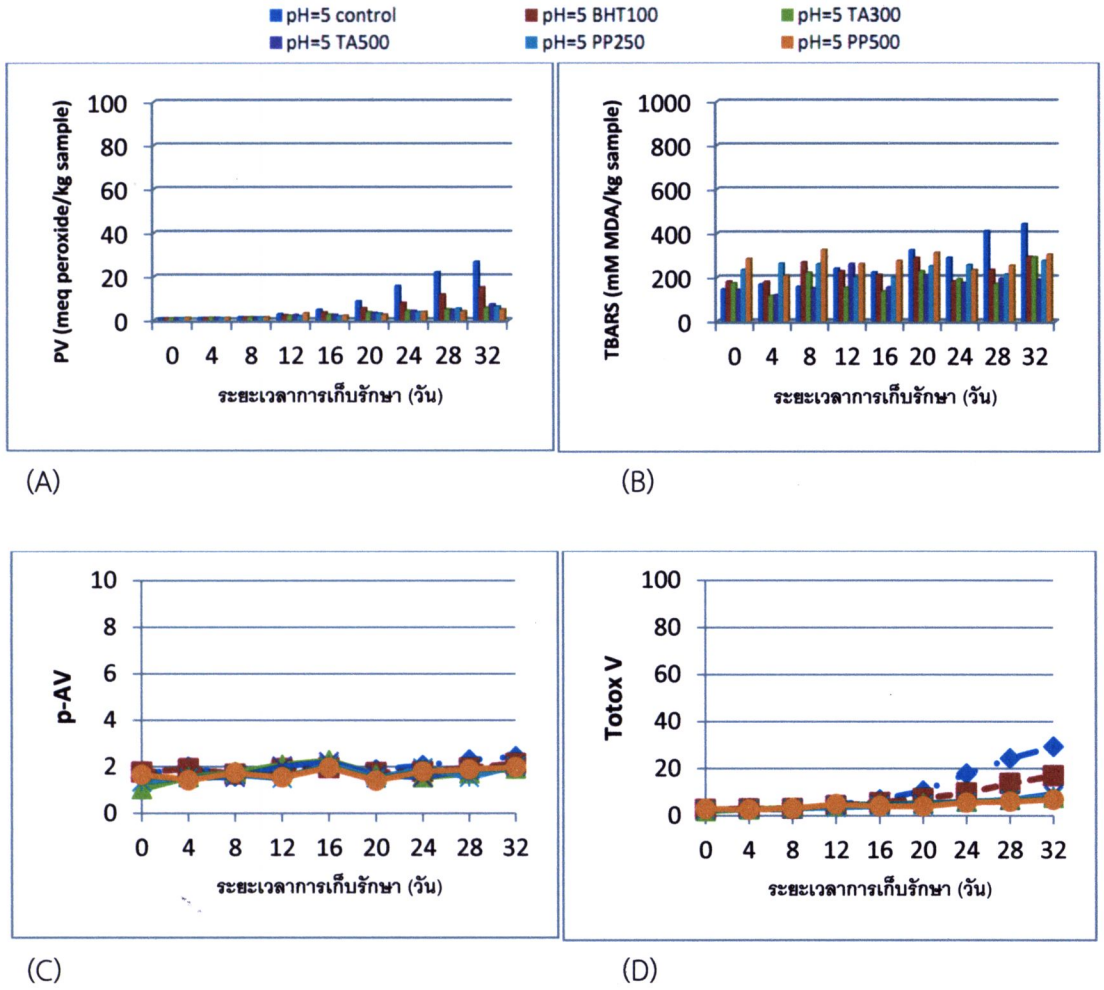


ภาพที่ 4.19 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างอิมัลชันตัวอย่างอิมัลชัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส: PV (A), TBARS (B), p-AV (C) และ Totox V (D)

หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ส่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเพิ่มสูงขึ้น พิจารณาได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าที่วิเคราะห์ได้จากวิธีต่างๆ ทั้งค่า PV ค่า TBARS ค่า p-AV และปริมาณออกซิเดชันทั้งหมด (Totox V) โดยการเพิ่มขึ้นค่า PV และค่า Totox V มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สุดตลอดระยะเวลา 32 วัน (ภาพที่ 4.20)

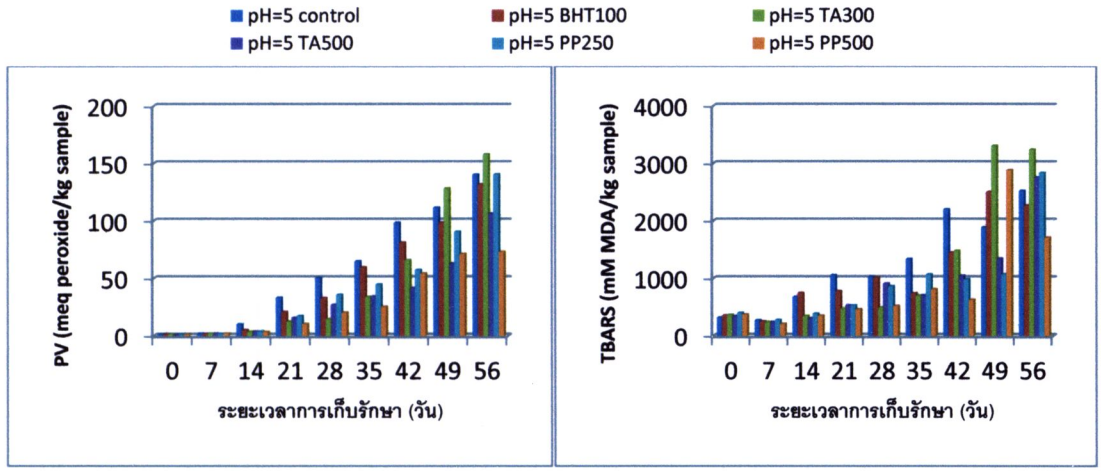


ภาพที่ 4.20 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส : PV (A), TBARS (B), p-AV (C) และ Totox V (D)

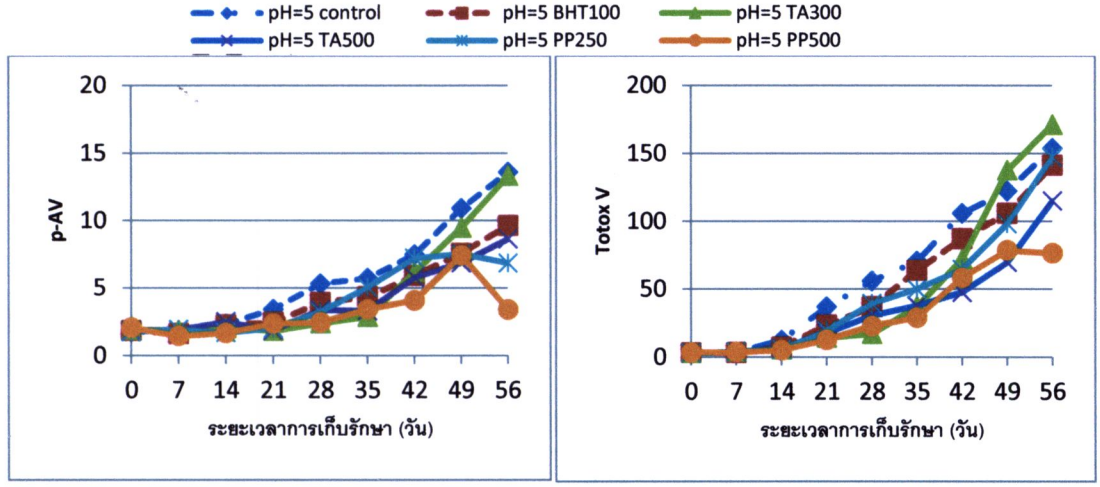
หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

- **อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส**
  - **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

การเกิดออกซิเดชันของอิมัลชันมีอัตราเพิ่มมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ อีก ทั้งยังพบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในทุกวิธีวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 4.21



(A) (B)



(C) (D)

ภาพที่ 4.21 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส: PV (A), TBARS (B), p-AV (C) และ Totox V (D)

หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (A), ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม (B), สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม (C), สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม (D), สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม (E) และ สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม (F)

อิมัลชันควบคุมทั้งสองมีค่า PV, ค่า TBARS, ค่า p-AV และค่า Totox V ใกล้เคียงกันตลอดอายุการเก็บรักษา โดยการวิเคราะห์ค่า TBARS พบการลดลงของค่าที่วิเคราะห์ได้ในช่วงท้ายของการเก็บรักษา อาจเนื่องมาจาก การสลายตัวของมาลอนไดอัลดีไฮด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมถึงสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี TBARS ได้ (Fernandez และ คณะ, 1997) อย่างไรก็ตาม พบว่า BHT ยังคงมีประสิทธิภาพต้านออกซิเดชันที่ดี แม้ว่าจะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง

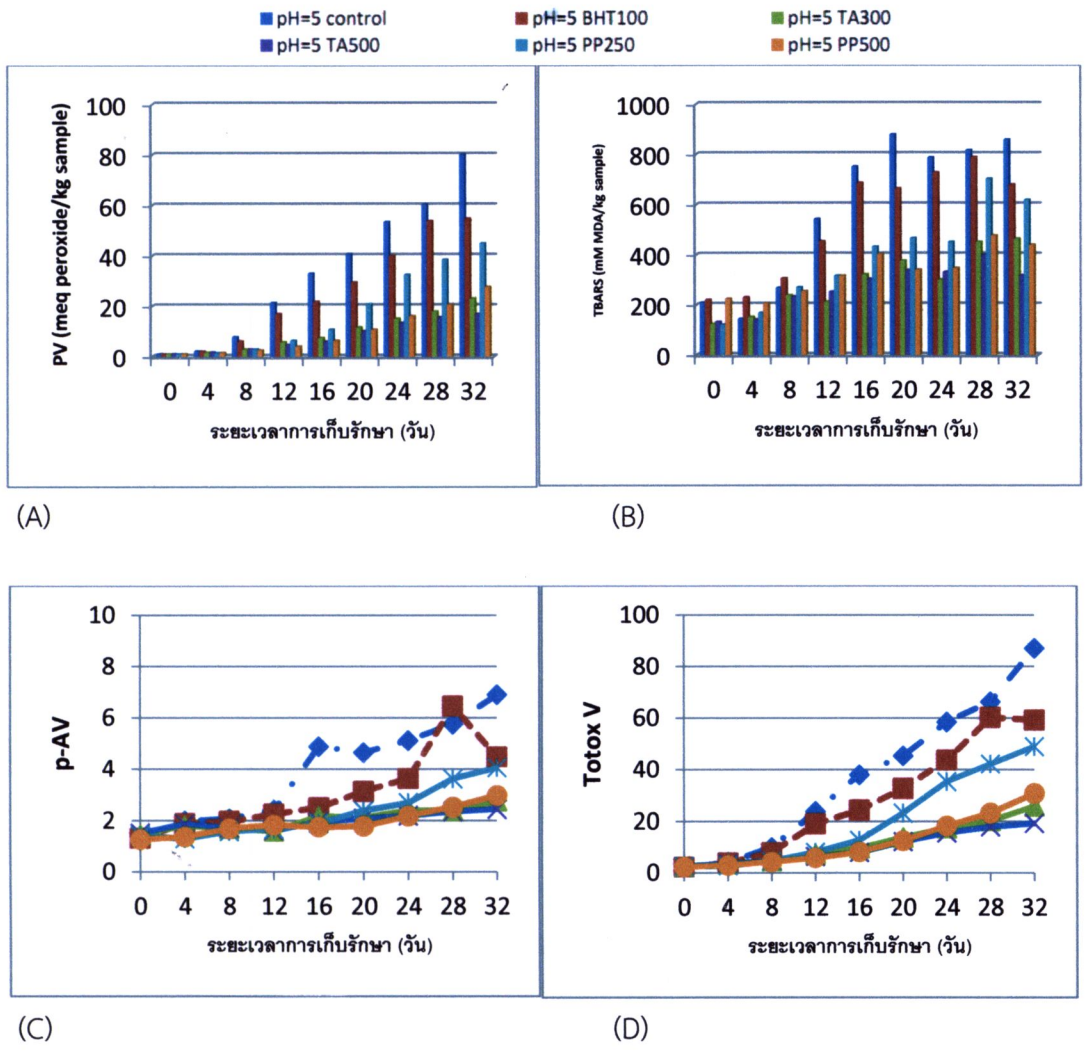
การเติมสารสกัดพืชเป็นสารต้านออกซิเดชันในอิมัลชันที่อุณหภูมินี้ พบว่า ความเข้มข้นของสารสกัดพืชเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชัน โดยสารสกัดทะโล้และผักไผ่ที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็มตลอดอายุการเก็บรักษา ส่วนการใช้สารสกัดพืชที่ความเข้มข้นระดับต่ำมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในช่วง 42 วันแรกของการเก็บรักษาเท่านั้น อันเนื่องมาจาก สารประกอบฟีนอลิกหลายชนิดสามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้ ประสิทธิภาพในการต้านการหืนจึงลดลง (Frankel, 1993)

การเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษา ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอิมัลชันทดสอบ โดยอุณหภูมิสูงเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังพบว่าการใช้สารสกัดพืชเป็นสารต้านออกซิเดชันในระดับสูง มีประสิทธิภาพในการต้านการหืนสูงกว่าการใช้ในระดับต่ำ

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ดังเช่น การเปลี่ยนแปลงของค่า PV และค่า Totox V ของอิมัลชันควบคุมตรวจพบความแตกต่างของค่าที่วิเคราะห์ได้ในวันที่ 20 ตามภาพที่ 4.22A และ 4.22D ส่วนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กลับตรวจพบการเปลี่ยนแปลงในช่วงท้ายของการทดสอบ คือ ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป (ภาพที่ 4.18A และ 4.18D) ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่า p-AV มีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิต่ำ แต่ค่า TBARS กลับไม่มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่แน่ชัด รวมไปถึง ประสิทธิภาพในการต้านการหืนของ BHT 100 พีพีเอ็มในอิมัลชันก็ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็น 35 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืชทั้งสองชนิด โดยทั้งสารสกัดทะโล้และผักไผ่ยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้อุณหภูมิต่ำ (25 องศาเซลเซียส) รวมถึงความเข้มข้นที่ใช้ทั้งสองระดับก็ยังมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันอีกด้วย แสดงให้เห็นว่า สารต้านออกซิเดชันในสารสกัดพืชทั้งสองชนิดมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี โดยมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่า BHT ซึ่งเป็นสารกันหืนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม จึงมีความเหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารต้านออกซิเดชันในอิมัลชันระบบนี้



ภาพที่ 4.22 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5.4 ณ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส: PV (A), TBARS (B), p-AV (C), ค่า Totox V (D)

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500=สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

ผลการทดลองวิเคราะห์การหืนทั้ง 4 วิธี แสดงว่าว่า การเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันได้ทั้ง 2 รูปแบบ ทั้งเร่งการออกซิเดชันของไขมันให้กลายเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และ เร่งการสลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เนื่องมาจากอิมัลชันควบคุมมีค่าต่างๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 ถึง 4 เท่า เมื่อเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีทดสอบ นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ยังส่งผลให้สารต้านออกซิเดชันต่างๆมีประสิทธิภาพลดน้อยลงตามไปด้วย เห็นได้จากประสิทธิภาพของ BHT ที่ลดลงเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น

ถึงแม้ว่า การเติมสารสกัดพืชในอิมัลชันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลง แต่การใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิด (สารสกัดทะโล้และผักไผ่) ก็ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ BHT ในอิมัลชันของทุกวิธีวิเคราะห์ โดยสารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม และสารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม ส่วนสารสกัดที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด คือ สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเก็บรักษาก็ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยพบว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะใช้เวลาสั้นลง จึงมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นลง ส่วนที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ผลการทดลองพบว่า การเติมสารสกัดพืชทั้งทะโล้และผักไผ่ ล้วนแต่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้โดยสารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็มที่มีประสิทธิภาพดีกว่า BHT ในทุกอุณหภูมิทดสอบ

4.3.4 ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิมัลชัน

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์**

เมื่อพิจารณาระดับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเก็บรักษา (25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส) ของอิมัลชันที่มีพีเอชต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเดียวกัน อิมัลชันเกิดการออกซิเดชันไขมันในทุกวิธีวิเคราะห์เรียงลำดับจากต่ำไปสูง ได้แก่ พีเอช 3, 5.4 และ 7 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการเก็บรักษาทั้ง 3 ระดับพบว่า การเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิต่ำมีอัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง เรียงลำดับได้ดังนี้ การเก็บรักษาที่ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บรักษาที่ 45 องศาเซลเซียส จะเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในทุกวิธีที่วิเคราะห์ ทำให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำอย่างเด่นชัดและยังพบว่า อิมัลชันที่พีเอช 3 เกิดการออกซิเดชันสูงที่สุด ส่วนที่พีเอช 5.4 และ 7 พบว่า มีค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยของอุณหภูมิ การเก็บรักษามีบทบาทสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงพีเอชของระบบจะส่งผลต่อการออกซิเดชันแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิการเก็บรักษา

เมื่อพิจารณาการใช้สารสกัดทะโล้ และผักไผ่ ที่ระดับความเข้มข้นทั้งสองในอิมัลชัน พบว่าประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชันแปรผันตามค่าพีเอชของระบบ โดยสารสกัดพืชทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพดีที่พีเอช 5.4 และ 7 แต่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดในทุกวิธีวิเคราะห์ที่พีเอช 3 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น การเติมสารสกัดพืชในระบบที่มีพีเอช 3 ส่งผลให้สารสกัดพืชแสดงสมบัติเป็นสารโปร-ออกซิแดนซ์ที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแทนการยับยั้งปฏิกิริยา อย่างไรก็ดี การเติมสารสกัดทะโล้และผักไผ่ที่ระดับความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันที่ดีในทุกพีเอชและทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา ส่วนการใช้สารสกัดพืชในระดับต่ำ (สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม หรือสารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม) สามารถยับยั้งการออกซิเดชันได้ในช่วง 35 หรือ 42 วันของการเก็บรักษาเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส แสดงในรูปของค่า Q_{10} ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส

อิมัลชันทดสอบมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงกว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (ตารางที่ 4.7) โดยการเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิการสูงขึ้นส่งผลให้ค่าครึ่งชีวิตของผลิตภัณฑ์ลดลงตามไปด้วย โดยพบว่า ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ค่าครึ่งชีวิตมีค่าน้อยที่สุด และค่าครึ่งชีวิตมีแนวโน้มที่จะลดลงตามค่าพีเอชของระบบที่ลดลงอีกด้วย แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิและพีเอชต่างก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มหรือลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา รวมทั้งยังให้ผลเสริมฤทธิ์กันในการเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันทั้งการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิ) และการสลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิชนิดต่างๆ

ด้วยเหตุนี้ การประยุกต์ใช้สารสกัดพืชเป็นสารต้านออกซิเดชันในอิมัลชัน ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆหลายประการ ทั้งลักษณะทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี อุณหภูมิการเก็บรักษาความเหมาะสมของระบบที่ทำให้การต้านออกซิเดชันมีประสิทธิภาพสูงที่สุด รวมถึงปัจจัยด้านความแตกต่างของพืช ซึ่งจะช่วยให้การนำสารสกัดพืชมาใช้ประโยชน์ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยผลการทดลองนี้พบว่า สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็มมีประสิทธิภาพในการต้านการหืนสูงที่สุดทั้งในอิมัลชันที่มีพีเอชต่างกันและเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีลักษณะทางกายภาพที่ดี รองลงมาคือ การใช้สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม และสารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม อีกทั้งการใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม จึงสามารถนำสารสกัดพืชดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 4.7 ค่า Q_{10} และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆ

			PV		p-AV		TBARS		Totox V	
	ตัวอย่าง*	ppm	Q_{10}	$t_{1/2}$ (days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)
T=25 °C										
pH=3	Control		2.959	50.4	0.4391	147.4	0.250	0.173	52.54	36.4
	BHT	100	2.945	59.9	0.8557	172.7	4.474	0.326	13.58	47.4
	TA	300	3.635	44.8	2.272	379.0	20.340	1.645	4.094	22.3
		500	4.438	50.7	1.890	304.5	16.930	0.868	17.04	28.6
	PP	250	3.218	37.8	6.438	364.6	239.6	9.621	13.07	19.8
		500	3.419	41.2	2.192	198.6	15.006	0.719	16.41	22.4
pH=5	Control		4.524	49.4	2.083	319.2	0.835	0.579	42.78	29.7
	BHT	100	4.071	53.4	0.6787	229.9	407.300	15.580	28.23	38.2
	TA	300	3.728	49.5	2.198	823.6	10.660	0.554	10.50	25.1
		500	3.028	43.4	0.1259	4097.2	4.244	0.346	8.978	21.8
	PP	250	3.656	47.6	0.4936	88.5	43.108	3.879	14.82	44.2
		500	3.730	44.9	0.3656	124.8	37.162	3.465	13.86	30.8
pH=7	Control		1.591	14.5	12.34	699.4	0.150	0.104	2.948	2.0
	BHT	100	1.717	17.8	4.804	443.3	4.094	0.078	6.561	3.9
	TA	300	1.884	25.0	1.405	884.6	50.96	1.530	6.390	5.8
		500	1.704	24.6	4.678	1078.2	12.29	1.012	3.307	5.7
	PP	250	1.740	20.0	1.217	110.3	17.43	1.132	2.487	4.9
		500	1.634	22.8	0.0266	92.1	14.25	0.934	6.005	6.9

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

			PV		p-AV		TBARS		Totox V	
	ตัวอย่าง*	ppm	Q_{10}	$t_{½}$ (days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)
T=35 °C										
pH=3	Control		2.375	17.0	19.25	335.8	40.57	0.6931	3.175	0.693
	BHT	100	2.704	20.3	9.595	201.9	4.115	0.0730	12.36	3.489
	TA	300	1.517	12.3	10.25	166.8	7.478	0.0809	21.27	5.445
		500	1.330	11.4	8.003	161.1	2.683	0.0513	5.037	1.679
	PP	250	1.447	11.7	2.154	56.6	2.528	0.0401	5.805	1.512
		500	1.449	12.0	4.365	90.6	2.130	0.0479	5.029	1.368
pH=5	Control		1.359	10.9	8.722	153.3	40.38	0.6931	2.810	0.693
	BHT	100	1.686	13.1	16.019	338.8	2.070	0.0383	4.926	1.351
	TA	300	1.777	13.3	19.688	374.7	4.134	0.0519	10.09	2.389
		500	1.677	14.3	1372	32535.4	4.086	0.0816	6.228	2.423
	PP	250	1.619	13.0	8.214	179.2	4.277	0.0900	10.32	2.980
		500	1.353	12.0	10.65	341.4	4.562	0.0932	4.882	2.222
pH=7	Control		0.990	9.1	2.622	56.7	24.05	0.6931	3.001	0.693
	BHT	100	1.096	10.4	4.048	92.3	0.781	0.0192	2.000	0.589
	TA	300	1.515	13.3	31.81	629.6	1.639	0.0300	3.524	0.909
		500	1.552	14.4	10.24	230.5	3.772	0.0823	5.483	1.713
	PP	250	1.298	11.5	3.827	90.7	2.192	0.0650	7.534	1.987
		500	1.594	13.9	127.3	3467.1	2.204	0.0656	4.299	1.146

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม BHT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500==สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

- **อิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์**

ผลการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษาจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส พบว่า อิมัลชันควบคุมมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงกว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บรักษา ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำ (พีเอช 3) ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในอิมัลชันที่มีพีเอช 5.4 หรือ 7 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ส่วนค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของอิมัลชัน พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ค่าครึ่งชีวิตของอิมัลชันทุกพีเอชทดสอบมีค่าลดลง ในขณะที่อิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชกลับมีค่า Q_{10} และ $t_{1/2}$ ใกล้เคียงกันแม้จะเพิ่มอุณหภูมิขึ้น แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้มากขึ้น ซึ่งทำให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์สั้นลงไปด้วย แต่การเติมสารสกัดพืชเพื่อยับยั้งการออกซิเดชันยังคงให้ผลดีในทุกอุณหภูมิทดสอบ

ตารางที่ 4.8 ค่า Q_{10} และค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของอิมัลชันที่ประกอบด้วยน้ำมัน 70 เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ้นต์ที่พีเอช และอุณหภูมิต่างๆ

			PV		TBARS		p-AV		Totox V	
	ตัวอย่าง*	ppm	Q_{10}	$t_{½}$ (days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)	Q_{10}	$t_{1/2}$(days)
T=25 °C										
pH=3	Control		1.843	70.8	1.389	408.9	0.124	210.9	1.268	108.1
	BHT	100	1.304	58.6	2.492	412.0	22.317	8415.6	1.459	125.0
	TA	300	1.087	21.7	3.050	235.6	0.748	93.5	1.042	30.1
		500	1.100	19.4	3.730	210.9	0.222	59.1	0.924	25.8
	PP	250	1.256	13.6	1.896	49.7	1.312	85.1	1.327	18.0
		500	1.133	13.3	1.270	45.3	0.284	94.5	1.056	17.6
pH=5	Control		1.313	13.7	1.555	52.6	1.576	184.6	1.356	19.6
	BHT	100	1.260	16.3	0.934	124.7	0.370	128.0	1.197	23.6
	TA	300	1.133	23.6	3.805	334.0	42.305	5481.8	1.390	43.0
		500	1.286	26.0	1.443	157.8	1.407	208.6	1.920	58.5
	PP	250	1.520	31.7	0.141	189.3	0.728	107.6	1.415	44.5
		500	1.283	34.2	0.162	118.8	0.445	85.4	1.098	46.2
pH=7	Control		1.127	10.8	1.373	46.8	1.118	88.9	1.096	14.0
	BHT	100	1.126	13.1	1.095	61.5	0.376	139.7	1.075	18.4
	TA	300	1.182	16.5	4.672	186.3	0.487	159.5	1.403	26.6
		500	1.424	19.4	4.510	173.7	0.425	136.4	1.838	33.6
	PP	250	1.159	14.5	3.892	270.7	0.731	108.9	1.176	19.2
		500	1.250	17.2	6.564	1043.8	1.075	106.8	1.261	22.6
T=35 °C										
pH=3	Control		4.539	38.4	17.578	294.3	53.136	1695.2	8.028	85.2
	BHT	100	4.419	44.9	6.088	165.3	8.135	377.1	6.578	85.7
	TA	300	2.385	19.9	2.872	77.2	4.759	124.9	2.838	28.9
		500	2.105	17.7	2.188	56.5	10.557	266.5	2.718	27.9
	PP	250	1.118	10.8	0.982	26.2	3.253	64.8	1.228	13.6
		500	1.161	11.7	1.227	35.6	15.844	332.8	1.446	16.6
pH=5	Control		1.134	10.4	1.560	33.8	5.021	117.1	1.342	14.5
	BHT	100	1.333	13.0	4.725	133.6	11.981	345.4	1.693	19.8
	TA	300	1.664	20.8	2.878	87.8	1.921	129.6	1.891	31.0
		500	1.464	20.2	2.858	109.3	1.691	148.2	1.649	30.5
	PP	250	2.169	20.8	55.915	1337.8	4.381	147.7	2.701	31.5
		500	2.287	26.6	14.794	732.9	3.744	192.0	2.881	42.1
pH=7	Control		0.955	9.6	1.242	34.1	2.749	79.5	1.080	12.8
	BHT	100	1.120	11.7	2.208	56.2	14.018	371.9	1.426	17.1
	TA	300	1.267	14.0	1.506	39.9	10.096	327.4	1.479	19.0
		500	1.217	13.6	1.486	38.5	9.316	321.0	1.405	18.3
	PP	250	1.193	12.5	2.528	69.6	5.330	149.1	1.343	16.3
		500	1.248	13.8	4.897	159.0	3.034	99.4	1.380	17.9

หมายเหตุ Control=ตัวอย่างควบคุม, BHT=ตัวอย่างเติม B HT 100 พีพีเอ็ม, TA300=สารสกัดทะโล้ 300 พีพีเอ็ม, TA500==สารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม, PP250=สารสกัดผักไผ่ 250 พีพีเอ็ม, PP500=สารสกัดผักไผ่ 500 พีพีเอ็ม

นอกจากนี้ อิมัลชันทดสอบที่มีพีเอชต่างกันก็มีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 25 - 45 องศาเซลเซียสแตกต่างกัน โดยพบว่า ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเดียวกันอิมัลชันที่มีพีเอชต่ำเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าที่พีเอชสูง (5.4 และ 7) และเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น พบว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันแปรผันตามอุณหภูมิทดสอบ โดยที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเกิดการออกซิเดชันสูงที่สุด

ผลของพีเอชและอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีต่ออิมัลชันที่เติมสารสกัดพืชทั้งสองชนิด พบว่า ความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารสกัดพืช มีความสัมพันธ์กับพีเอชของระบบทดสอบ โดยที่พีเอชต่ำประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชันมีค่าลดลง แต่ที่พีเอช 5.4 และ 7 กลับมีประสิทธิภาพสูงกว่าหรือเทียบเท่าการใช้ BHT 100 พีพีเอ็ม ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ก็เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในทุกพีเอชทดสอบ โดยเฉพาะอิมัลชันที่มีพีเอช 7 แสดงว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของระบบอิมัลชันนี้แปรผันตามอุณหภูมิมากกว่าพีเอชที่ใช้ทดสอบ ด้วยเหตุนี้ การใช้สารสกัดพืชทั้งสองชนิดเพื่อเป็นสารต้านออกซิเดชันต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสอง โดยสารสกัดทะโล้ 500 พีพีเอ็ม มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากทนพีเอชในช่วงกว้างและทนอุณหภูมิสูงได้ดี