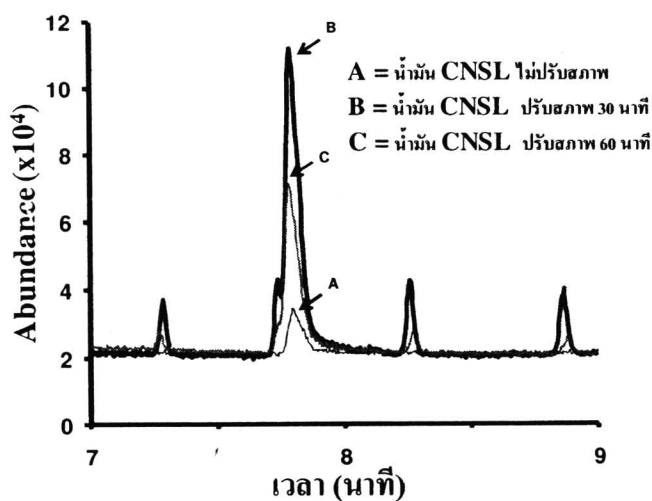


#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในการพัฒนาสารเติมแต่งไฮบริด (HA) ที่เป็นของแข็งระหว่างแวกซ์กับคาร์บอนอลจากน้ำมัน CNSL ในขั้นตอนแรกจะเป็นการศึกษาการปรับสภาพน้ำมัน CNSL เพื่อควบคุมและปรับเพิ่มปริมาณของคาร์บอนอลในน้ำมัน CNSL และศึกษาสัดส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตกผลึกร่วมของแวกซ์กับทั้งน้ำมัน CNSL สองชนิดคือ น้ำมัน CNSL ไม่ผ่านการปรับสภาพและน้ำมันที่ผ่านการทำปฏิกิริยาปรับสภาพ เพื่อให้ได้สารเติมแต่ง HA ที่มีปริมาณของคาร์บอนอลผสมในปริมาณที่มากพอสำหรับการประยุกต์ใช้งาน จากนั้นเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบผลของสารเติมแต่ง HA ที่เตรียมได้จากน้ำมัน CNSL ไม่ผ่านการปรับสภาพ (HA-C) และน้ำมัน CNSL ปรับสภาพ (HA-T) ต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง NR และการช่วยผสมของยางผสมระหว่างยาง NR และ ยาง EPDM เปรียบเทียบกับสารป้องกันการเสื่อมในเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ Wingstay-L<sup>®</sup> จากนั้นยังเปรียบเทียบกับคาร์บอนอลสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการปรับเพิ่มปริมาณของคาร์บอนอลในน้ำมัน CNSL

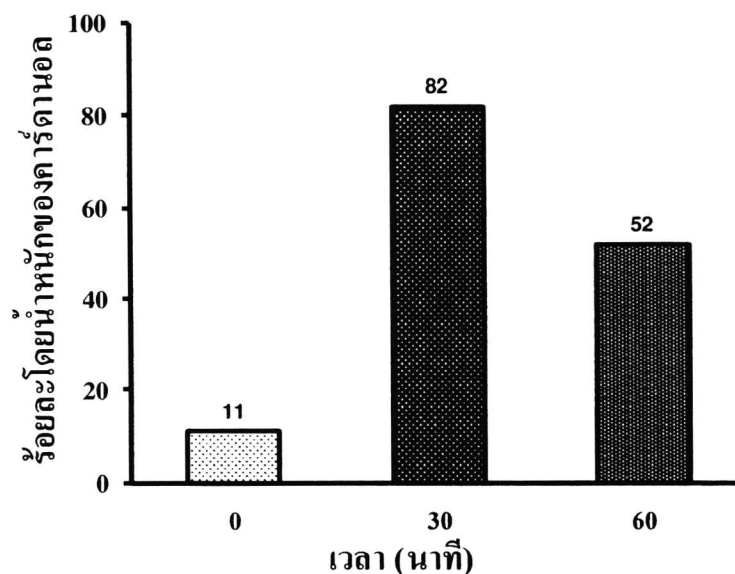
##### 4.1 ผลของเวลาสำหรับการปรับสภาพน้ำมัน CNSL ต่อปริมาณของคาร์บอนอลที่ได้

จากการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำมัน CNSL ด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 160 °ซ เป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้กรดอนุคาร์บิกเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนอลในปริมาณที่มากที่สุด โดยปริมาณของคาร์บอนอลที่ได้จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค GC-MS ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วย GC-MS สามารถแสดงได้ดังโครมาโทแกรมในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลของเวลาปรับสภาพน้ำมัน CNSL ต่อปริมาณของคาร์บอนอล

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมัน CNSL ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ 30 และ 60 นาที แสดงได้ตั้งโครมาโทแกรม A B และ C ตามลำดับ จากโครมาโทแกรม A B และ C เมื่อเปรียบเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานคาร์ดานอลที่แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.1 พบว่ามีพีคของคาร์ดานอลเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 7.81 7.86 และ 7.89 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโครมาโทแกรม A B และ C พบว่าการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันให้กรดอนุคาร์ดิกเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลนั้นมีผลิตภัณฑ์ร่วมเกิดขึ้น และสามารถประมาณร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์ดานอลในน้ำมัน CNSL ได้จากการเปรียบเทียบจาก calibration curve ของสารมาตรฐานคาร์ดานอลแสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.3 ซึ่งร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์ดานอลแสดงดังรูปที่ 4.2 จากการประมาณปริมาณของคาร์ดานอลในน้ำมัน CNSL เมื่อทำการปรับสภาพเป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าตัวอย่างน้ำมัน CNSL ที่ผ่านการปรับสภาพเป็นระยะเวลา 30 นาที มีปริมาณของคาร์ดานอลในน้ำมัน CNSL มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากในระหว่างเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน นอกจากกรดอนุคาร์ดิกจะเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลแล้ว คาร์ดานอลยังสามารถเสื่อมสภาพไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกด้วย ดังนั้นคาดว่าเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันของน้ำมัน CNSL ควรใช้ประมาณ 30 นาที



รูปที่ 4.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์ดานอลในน้ำมัน CNSL ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ

#### 4.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกร่วมของแว็กซ์กับน้ำมัน CNSL

##### 4.2.1 ผลการสังเกตการตกผลึกร่วมแว็กซ์กับน้ำมัน CNSL

การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิที่ใช้ตกผลึกต่อความสามารถในการตกผลึกร่วมของแว็กซ์กับคาร์ดานอล ทำได้โดยการใช้เทคนิค concentration gradient เพื่อสังเกตพฤติกรรมการตกผลึกร่วมของแว็กซ์กับน้ำมัน CNSL ในหลอดทดลองที่อุณหภูมิ 20 - 50 °ซ เมื่อ

ทำการปรับเพิ่มปริมาณของน้ำมัน CNSL จากนั้นสังเกตสัดส่วนของการผสมที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะจากของผสมของเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตกผลึกไปเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ลักษณะทางกายภาพของของผสมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

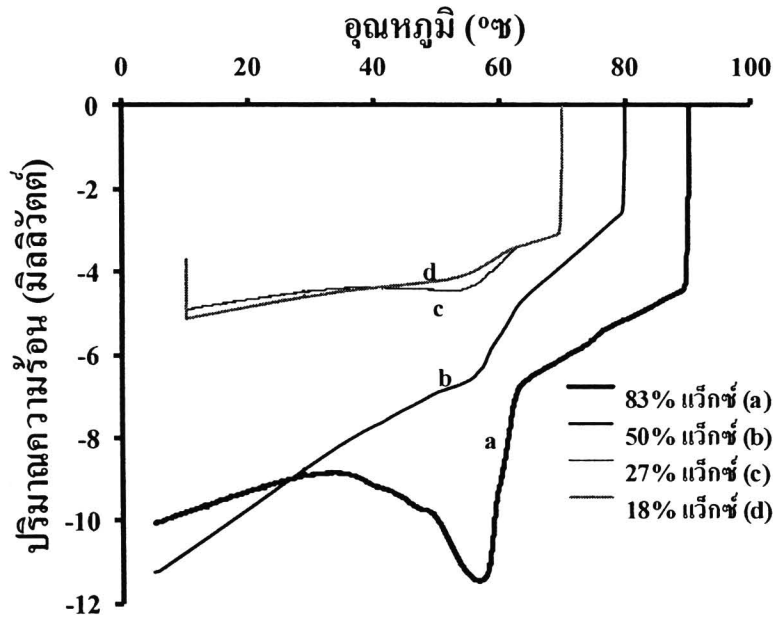
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของผสมที่อุณหภูมิต่างๆ

ร้อยละโดยน้ำหนัก ของแวกซ์	อุณหภูมิตกผลึก (°ซ)			
	20	30	40	50
83	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง
67	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง	เจล
33	ของแข็ง	ของแข็ง	ของแข็ง	เจล
27	ของแข็ง	ของแข็ง	เจล	เจล
18	ของแข็ง	เจล	เจล	เจล

จากความสัมพันธ์ของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิที่ใช้ตกผลึก ทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรมการตกผลึกร่วมของแวกซ์กับน้ำมัน CNSL ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพได้ โดยพบว่ามีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของเฟสที่คล้ายกัน กล่าวคือเมื่อทำการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 °ซ ด้วยสัดส่วนของแวกซ์มากกว่าร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก พบว่าแวกซ์มีความสามารถในการตกผลึก น้ำมัน CNSL ให้ตกผลึกร่วมกันได้ โดยได้เป็นสารประกอบของแข็ง สีน้ำตาลและเป็นสัดส่วนที่มีปริมาณของคาร์บอนอลผสมในปริมาณที่มากพอสำหรับการพัฒนาเป็นสารเติมแต่ง HA เพื่อใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพในยาง NR และสารช่วยผสมในยางผสมระหว่างยาง NR และ EPDM

#### 4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแวกซ์กับน้ำมัน CNSL ปรับสภาพ

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของสารประกอบของแข็งที่ได้จากการตกผลึกร่วมที่สัดส่วนต่างๆ ของแวกซ์ด้วยเทคนิค DSC โดยสแกนด้วยอัตราเท่ากับ 2 °ซ ต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 10 – 90 °ซ เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิตกผลึกและปริมาณความร้อนของการตกผลึก โดยคาดว่าจะช่วยอธิบายความสัมพันธ์ของสัดส่วนของของผสมและอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการตกผลึกร่วมระหว่างแวกซ์กับคาร์บอนอล ผลการวัดค่าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากผลการสแกนแบบลดอุณหภูมิ พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมแกรมและจุดยอดที่ได้แสดงถึงค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิตกผลึก จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับอุณหภูมิของของผสมที่สัดส่วนของแวกซ์ต่างๆ พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมแกรมลดลงเมื่อปริมาณของแวกซ์ผสมลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณของผลึกและความร้อนที่คายออกสำหรับการตกผลึกร่วมของแข็งแวกซ์กับน้ำมัน CNSL ปรับสภาพ มีปริมาณลดลงเมื่ออัตราส่วนของแวกซ์ลดลงจากร้อยละ 83 ถึง 18

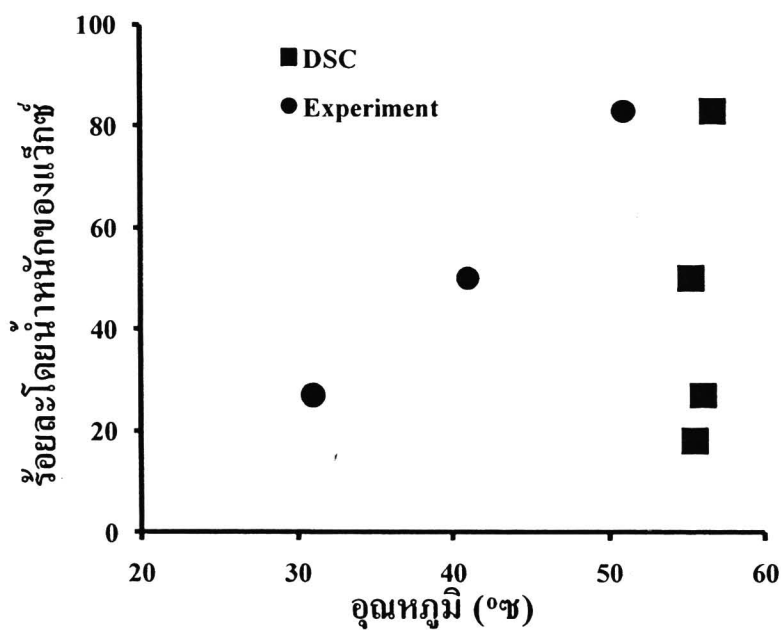


รูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรมการตกผลึกของแข็ง

#### 4.2.3 ผลการศึกษาพฤติกรรมของการตกผลึกร่วมของแวกซ์กับน้ำมัน CNSL

ปรับสภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงเฟสของของผสมแวกซ์กับน้ำมัน CNSL ปรับสภาพ ตามผลการทดลองในตารางที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อุณหภูมิตกผลึกของแข็งที่สัดส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแวกซ์กับอุณหภูมิตกผลึก แสดงได้ดังรูปที่ 4.4

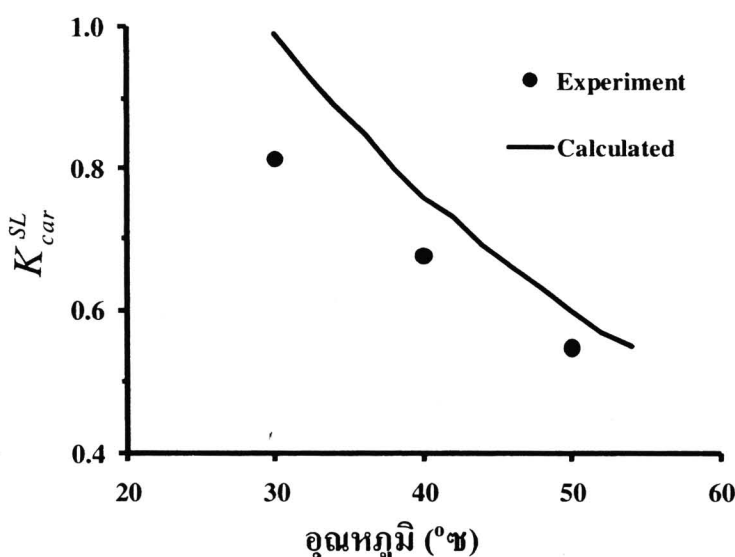


รูปที่ 4.4 อุณหภูมิตกผลึกของแวกซ์ผสม

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณของแก๊ซต่ออุณหภูมิตกผลึก พบว่าอุณหภูมิในการตกผลึกที่วิเคราะห์ด้วย DSC มีค่าในช่วง  $55.3 - 56.7$  °ซ ซึ่งพบว่า DSC อาจจะไม่เหมาะสมในการวัดอุณหภูมิตกผลึกร่วมของของผสม เนื่องจากอุณหภูมิตกผลึกที่วัดได้จาก DSC เป็นอุณหภูมิตกผลึกสูงสุดในเฉพาะส่วนขององค์ประกอบแก๊ซเท่านั้น ประกอบกับกลไกการตกผลึกร่วมของแก๊ซกับคาร์บอนอลมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกับอุณหภูมิตกผลึก ความสามารถในการละลายระหว่างแก๊ซกับน้ำมัน CNSL และการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบระหว่างการเกิดกระบวนการตกผลึก ทำให้ไม่สามารถนำผลการทดลองในส่วนนี้มาอธิบายอุณหภูมิตกผลึกร่วมที่ได้จากการทดลองในแบบมหัพภาคได้

#### 4.2.4 ผลการศึกษาค่าคงที่สมดุลของแข็ง-ของเหลวของคาร์บอนอลในแก๊ซผสมน้ำมัน CNSL

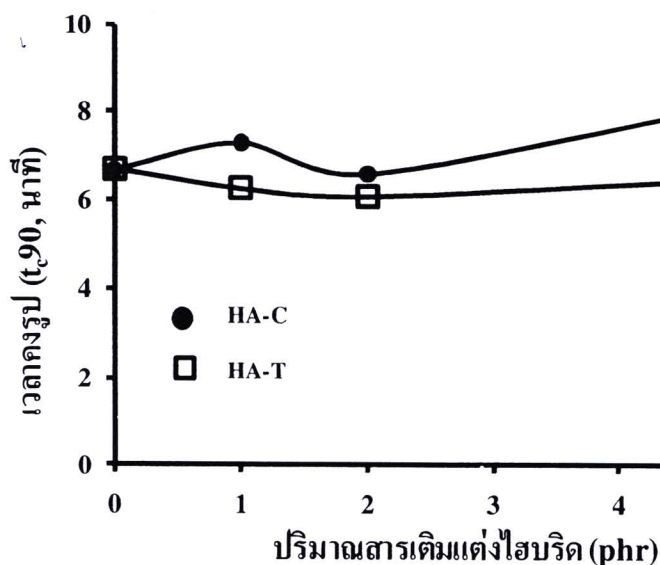
จากการทดลองตกผลึกร่วมดังตารางที่ 4.1 ทำให้สามารถคำนวณค่า  $K_{cur}^{SL}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้จากสมการที่ (1) โดยสัดส่วนโมลของคาร์บอนอลวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค GC-FID ซึ่งค่า  $K_{cur}^{SL}$  ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ ก.4 และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $K_{cur}^{SL}$  ที่ได้จากการทดลองกับค่า  $K_{cur}^{SL}$  จากการคำนวณด้วยแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ดังสมการที่ (10) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจากการศึกษาค่า  $K_{cur}^{SL}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการตกผลึกร่วมที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ( $30$  °ซ) ทำให้ค่า  $K_{cur}^{SL}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงปริมาณของคาร์บอนอลที่ถูกทำให้ตกผลึกร่วมในแก๊ซมีมากขึ้น และจากการเปรียบเทียบค่า  $K_{cur}^{SL}$  ที่ได้จากการทดลองและผลการทำนายด้วยแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและความผิดพลาดของแบบจำลองอาจเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของความสามารถในการละลายระหว่างแก๊ซกับน้ำมัน CNSL และการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบระหว่างการตกผลึกร่วมของแก๊ซกับคาร์บอนอล ซึ่งจากแบบจำลองพบว่าการปรับเพิ่มอุณหภูมิช่วง  $30$  ถึง  $50$  °ซ ส่งผลให้  $K_{cur}^{SL}$  มีค่าลดลงตั้งแต่  $0.81$  ถึง  $0.55$



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิการตกผลึกต่อค่า  $K_{cur}^{SL}$

#### 4.3 ผลของสารเติมแต่งไฮบริดต่อระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ

จากผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์ด้วยเครื่อง ODR ตามมาตรฐาน ISO 3417 เพื่อหาระยะเวลาการคงรูป ( $t_{c90}$ ) ที่เหมาะสมของตัวอย่างยางที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความดัน  $80\text{ กก.ต่อซม.}^2$  แสดงดังรูปที่ 4.6 เป็นผลของสารเติมแต่ง HA ต่อระยะเวลาการคงรูปของยาง NR พบว่าตัวอย่างยาง NR (ยางสูตร Non) มีระยะเวลาการคงรูปเท่ากับ 6.67 นาที และเมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่ง HA-C ในปริมาณเท่ากับ 0 ถึง 5.0 phr พบว่าการปรับเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่ง HA-C ส่งผลทำให้ระยะเวลาการคงรูปของยาง NR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน CNSL ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาการคงรูปช้าลง ในกรณีของตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA-T ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง HA ที่ได้จากน้ำมัน CNSL ที่ผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณที่น้อยกว่า 5.0 phr พบว่าไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการคงรูปของยาง NR



รูปที่ 4.6 ผลของสารเติมแต่ง HA ต่อระยะเวลาการคงรูปของยาง NR ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความดัน  $80\text{ กก.ต่อซม.}^2$

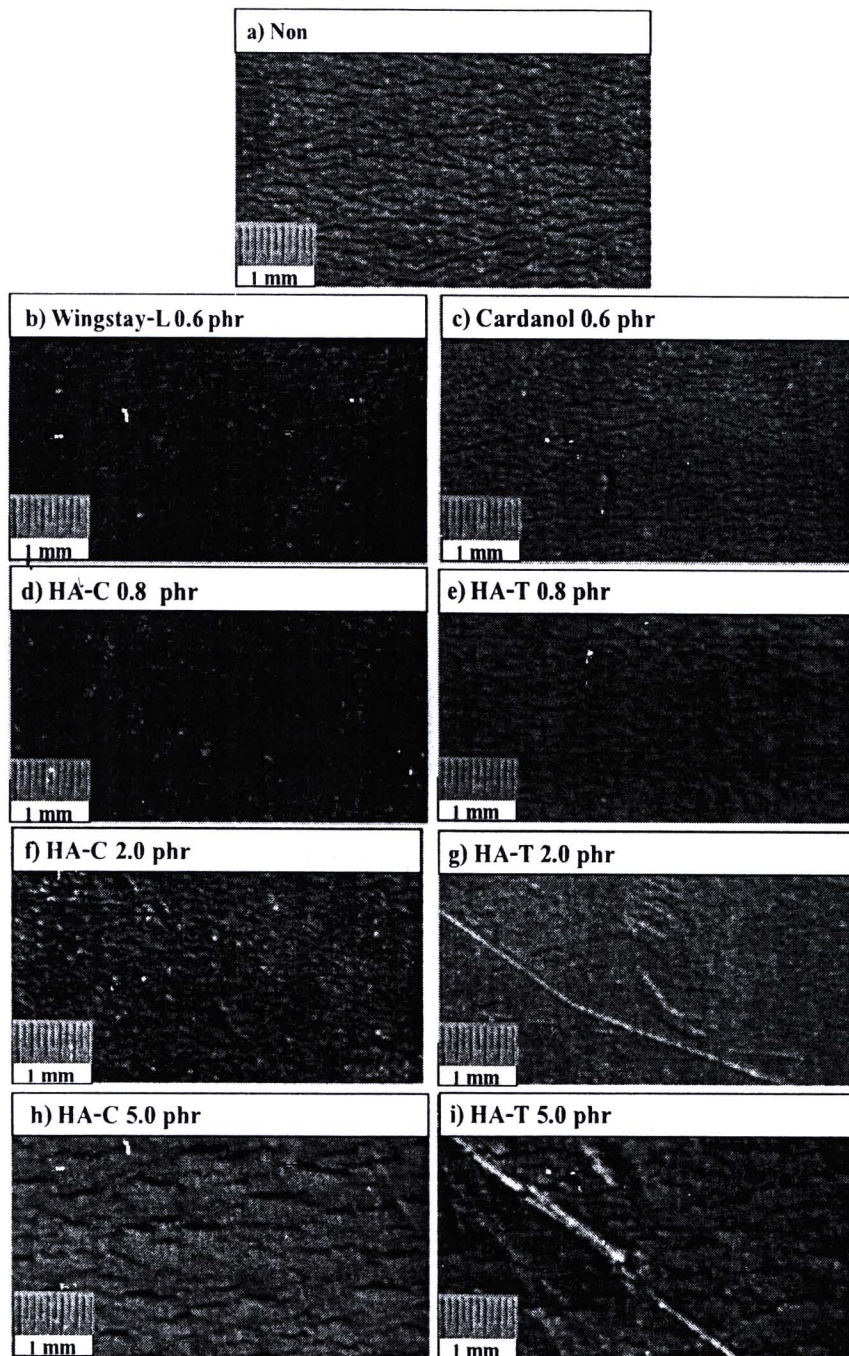
#### 4.4 ผลของสารเติมแต่งไฮบริดต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบผลของสารเติมแต่ง HA ที่ได้จากการดกผลึกร่วมน้ำมัน CNSL ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (HA-C) และที่ได้จากน้ำมัน CNSL ที่ผ่านการปรับสภาพ (HA-T) ต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและความร้อน เปรียบเทียบกับคาร์บอนอลสังเคราะห์ (เพื่อเปรียบเทียบผลของการปรับเพิ่มปริมาณของคาร์บอนอลในน้ำมัน CNSL) และเปรียบเทียบกับ Wingstay-L<sup>®</sup> ซึ่งเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ในปริมาณเท่ากับ 0.6 phr โดยศึกษาผลการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารเติมแต่ง HA ในปริมาณเท่ากับ 0 ถึง 10.0 phr

#### 4.4.1 ผลของความต้านทานต่อโอโซน

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของตัวอย่างยาง NR ที่ความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 50 ppm อุณหภูมิ 40 °C เป็นระยะเวลาเท่ากับ 72 ชม. เพื่อทำการศึกษาผลของสารเติมแต่ง HA ต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง NR โดยลักษณะการเสื่อมสภาพของตัวอย่างยาง NR หลังการอบเร่งด้วยโอโซนสามารถสังเกตได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ถ่ายภาพพื้นผิวของตัวอย่างยาง NR แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 จากภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างยาง NR หลังการอบเร่งด้วยโอโซนจะเห็นได้ว่าสูตรยาง NR ที่ไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน ส่งผลทำให้พื้นผิวของยาง NR เกิดรอยแตกที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.7

ในการพิจารณาระดับของความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน จะพิจารณาตามมาตรฐาน ISO 1431 (part 1) ซึ่งแบ่งระดับความต้านทานต่อโอโซนจากลักษณะการเสื่อมสภาพของตัวอย่างยางหลังการอบเร่งด้วยโอโซน ในเทอมของความหนาแน่นและขนาดของรอยแตกบนพื้นผิวของตัวอย่างยาง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.4 ทำให้สามารถแสดงระดับของความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยาง NR ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างยาง NR (Non) ที่ผสมแวกซ์ในปริมาณ 2.0 phr เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนนั้น เมื่อทำการอบเร่งด้วยโอโซน ส่งผลให้ตัวอย่างยาง NR เกิดการเสื่อมสภาพอยู่ในระดับ B-2 โดยมีจำนวนของรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและมีขนาดของรอยแตกที่น้อยกว่า 1 มม. ซึ่งความหนาแน่นและขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการผสมแวกซ์ในปริมาณเท่ากับ 2.0 phr ยังไม่สามารถช่วยทำให้ยาง NR มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความหนาของชั้นฟิล์มแวกซ์ที่เคลือบบนพื้นผิวยาง NR ยังไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนนั่นเอง [11]



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายรอยแตกของตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA จากน้ำมัน CNSL ไม่ปรับสภาพ (HA-C) และปรับสภาพ (HA-T) (ภาพถ่ายที่กำลังขยาย X 40 เท่า)



ตารางที่ 4.2 ระดับความต้านทานต่อไอโซนของตัวอย่างยาง NR

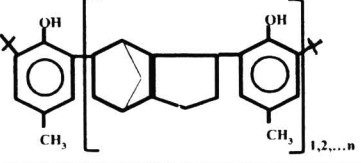


ตัวอย่าง	ระดับ
Non	B-2
Wingstay-L 0.6 phr	B-2
Cardanol 0.6 phr	B-2
HA-C 0.8 phr	No crack
HA-C 2.0 phr	No crack
HA-C 5.0 phr	C-5
HA-T 0.8 phr	No crack
HA-T 2.0 phr	No crack
HA-T 5.0 phr	C-5

หมายเหตุ A < B < C = ความหนาแน่นของรอยแตก

1 < 2 < 3 < 4 < 5 = ขนาดของรอยแตก

ในกรณีของตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA (ยางสูตร HA-C และ HA-T) ในปริมาณเท่ากับ 0.8 และ 2.0 phr พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA ในยาง NR มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากไอโซนได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้จากการที่สารเติมแต่ง HA เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่มีแว็กซ์และคาร์ดานอลเป็นส่วนประกอบ ทำให้สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพได้ทั้งการป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของไอโซนกับยาง NR และการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าแว็กซ์ในปริมาณเท่ากับ 2 phr มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากไอโซนในระดับ B-2 แต่เนื่องจากสารเติมแต่ง HA มีคาร์ดานอลเป็นส่วนประกอบ ซึ่งคาร์ดานอลมีพันธะคู่และหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างที่พร้อมและว่องไวที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ (อนุมูลอิสระเกิดจากไอโซนที่ผ่านชั้นของฟิล์มแว็กซ์เข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยาง) ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาส่งผลให้ยาง NR เกิดการเสื่อมสภาพได้น้อยลง โดยตัวอย่างยาง NR เกิดรอยแตกขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากไอโซนของสารเติมแต่ง HA ในปริมาณเท่ากับ 0.8 และ 2.0 phr กับ Wingstay-L<sup>\*</sup> และคาร์ดานอลสังเคราะห์ในปริมาณเท่ากับ 0.6 phr พบว่าสารเติมแต่ง HA มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพในยาง NR ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการที่คาร์ดานอลมีหมู่ไฮดรอกซิลและพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล อีกทั้งมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า Wingstay-L<sup>\*</sup> ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ส่งผลทำให้คาร์ดานอลสามารถแพร่ออกมาทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่พื้นผิวของยาง NR ได้ดีกว่า

ตารางที่ 4.3 สมบัติของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ

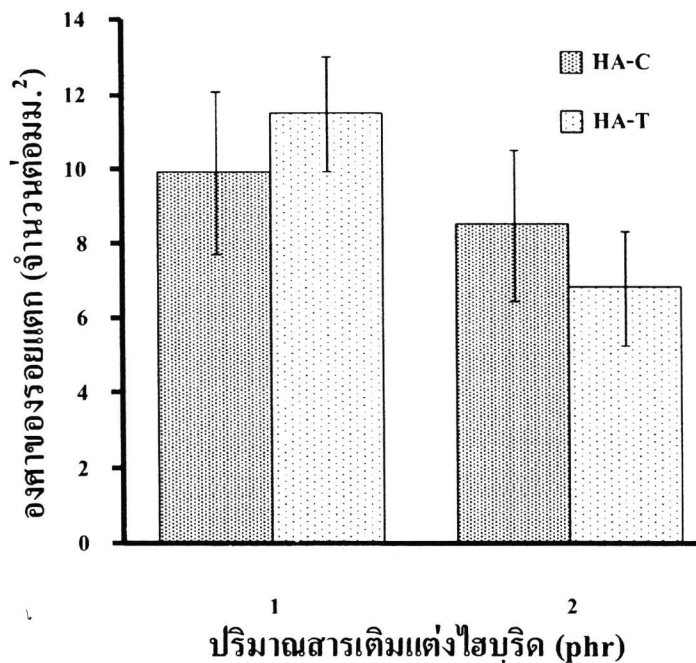
	โครงสร้าง	น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)
Wingstay-L <sup>®</sup>		650
คาร์ดานอล		302
คาร์ดานอลสังเคราะห์		304

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณเท่ากับ 5.0 phr พบว่ายางเกิดรอยแตกที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 3 มม. ซึ่งเป็นขนาดของรอยแตกที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นนี้ก็เนื่องจากการผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณที่มากเกินไป มีผลต่อสมบัติเชิงกลของตัวอย่างยาง NR ทำให้ตัวอย่างยาง NR มีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น จึงส่งผลโดยตรงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณเท่ากับ 0.8 ถึง 2.0 phr มีส่วนช่วยปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการเสื่อมเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยาง NR ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้นำเสนอการพิจารณาความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพในทอม “<sup>(1)</sup>ค่าองศาของรอยแตก” (degree of cracking) ซึ่งหมายถึงจำนวนรอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในพื้นที่ 1 มม.<sup>2</sup> ลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้นนี้มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ช่วยทำให้สามารถเปรียบเทียบถึงความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยาง NR ได้ชัดเจนมากขึ้นตามรูปที่ 4.8

จากผลของปริมาณสารเติมแต่ง HA ต่อค่าองศาของรอยแตกดังรูปที่ 4.8 พบว่าตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA-T ในปริมาณ 2.0 phr เป็นปริมาณที่เทียบเท่าหรือสมมูลกับปริมาณของคาร์ดานอลเท่ากับ 1.2 phr มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีกว่าสารเติมแต่ง HA-C ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่ง HA-T ที่ได้จากการปรับสภาพน้ำมัน CNSL มีปริมาณของคาร์ดานอลที่มากกว่าสารเติมแต่ง HA-C นั่นเอง จึงส่งผลให้มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของยาง NR ได้ดีกว่า

หมายเหตุ <sup>(1)</sup> ขอสงวนสิทธิ์การใช้ค่าองศาของรอยแตกเฉพาะงานวิจัยนี้เท่านั้น



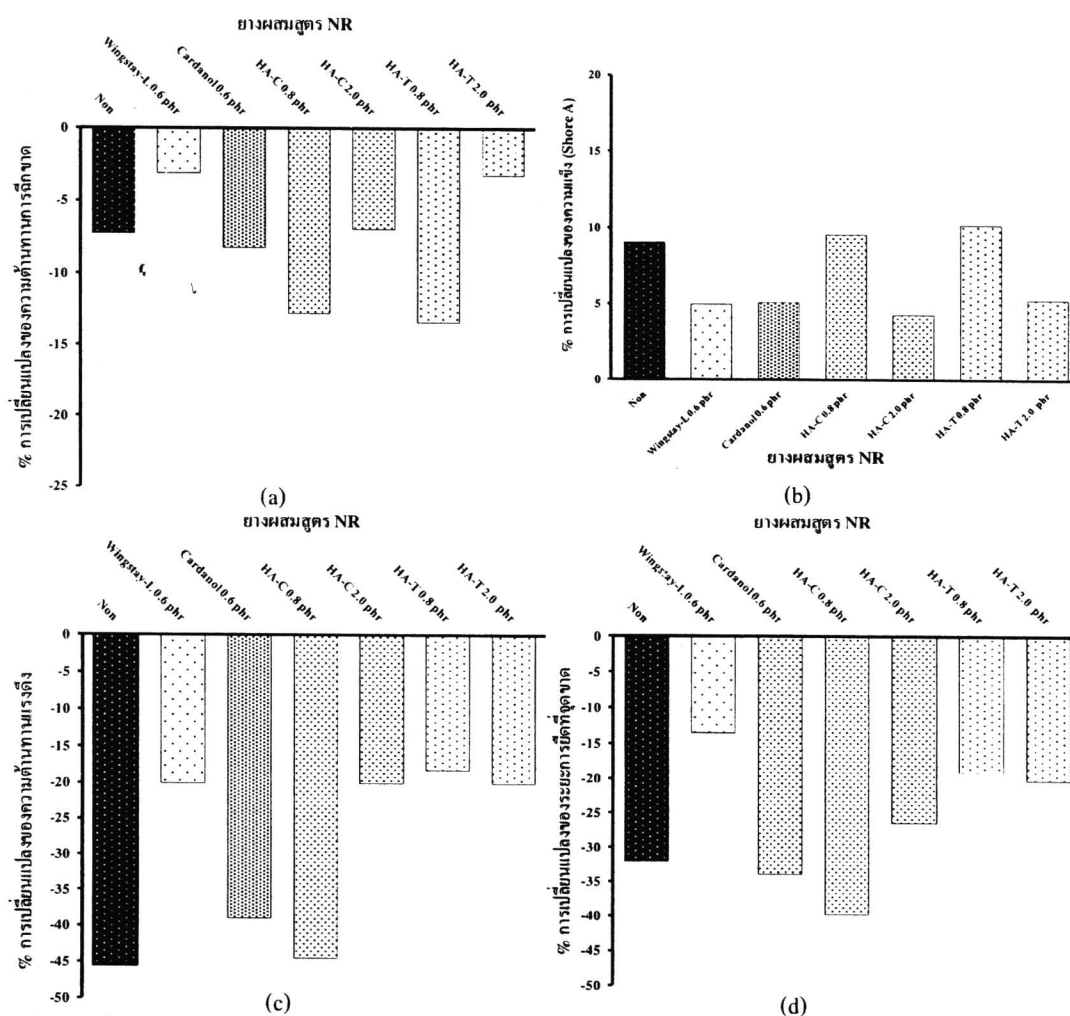
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวอย่างยาง NR ที่ผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณ 1.0 และ 2.0 phr

#### 4.4.2 ผลของความต้านทานต่อการอบเร่งด้วยความร้อน

จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง HA ต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °ซ เป็นระยะเวลา 22 ชม. จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของตัวอย่างยาง NR ก่อนและหลังการอบเร่งด้วยความร้อน เพื่อจะทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างยาง NR ที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการอบเร่งด้วยความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพของสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ผสมในยาง NR โดยในการพิจารณาความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพสามารถพิจารณาได้จากร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลของยาง NR ก่อนและหลังอบเร่งด้วยความร้อน พร้อมกับเปรียบเทียบกับตัวอย่างยาง NR ที่ผสม Wingstay - L<sup>\*</sup> และคาร์บอนดลสังเคราะห์ในปริมาณเท่ากับ 0.6 phr ซึ่งจากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง ระยะการยืดที่จุดขาด ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็ง (shore A) ของยาง NR ก่อนและหลังการอบเร่งดังแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก. 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าภาวะที่ตัวอย่างยาง NR ได้รับการอบเร่งส่งผลให้ตัวอย่างยาง NR มีความต้านทานแรงดึง ระยะการยืดที่จุดขาด ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน เนื่องจากผลของประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนและความร้อนของสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ผสมในยาง NR

และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนและความร้อน โดยพิจารณาจากร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการฉีกขาดและความแข็ง

ของแผลงในรูปที่ 4.9(a) และ(b) พบว่าตัวอย่างยาง NR (Non) มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการฉีกขาดและความแข็งมีค่าเท่ากับ 8 และ 9 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยาง NR มีสมบัติการต้านทานต่อการฉีกขาดที่เสถียรต่อความร้อนสูงและการเปลี่ยนแปลงสมบัติความแข็งอาจเกิดเนื่องจากการระเหยของน้ำมันหรือการเกิดปฏิกิริยาหลังการอบเร่งของตัวอย่างยาง NR ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง NR



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง HA ต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ในกรณีของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและระยะการยืดที่จุดขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.9(c) และ (d) พบว่าตัวอย่างยาง NR (Non) มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและระยะการยืดที่จุดขาดเท่ากับ 45 และ 32 ตามลำดับ เนื่องจากภาวะอบเร่งตัวอย่างยาง NR ที่อุณหภูมิ 100 °ซ ทำให้เว็กซ์ (เว็กซ์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นเว็กซ์ผสมระหว่างพาราฟินเว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์เว็กซ์ที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 58 และ 71 °ซ) สามารถละลายในยาง NR ได้มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มเว็กซ์ไม่มีประสิทธิภาพใน

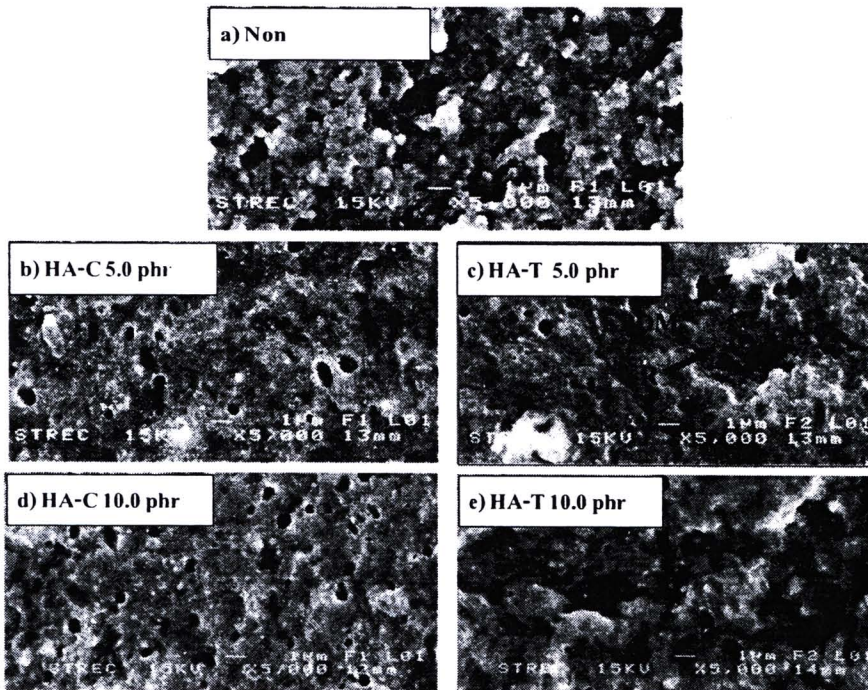
การป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับยาง NR ได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของการผสมสารเติมแต่ง HA ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและระยะการยืดที่จุดขาด พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-C ในปริมาณเท่ากับ 0.8 phr ยังไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่คาร์บอนอลมีขนาดของโมเลกุลที่เล็ก ส่งผลให้เกิดการระเหยได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการผสมสารเติมแต่ง HA-C ในปริมาณเท่ากับ 2.0 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่เทียบเท่าหรือสมมูลกับปริมาณของคาร์บอนอลเท่ากับ 0.2 phr พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-C มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีขึ้น ในกรณีของการผสมสารเติมแต่ง HA-T พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-T ในปริมาณเท่ากับ 0.8 ถึง 2.0 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่เทียบเท่าหรือสมมูลกับปริมาณของคาร์บอนอลเท่ากับ 0.6 และ 1.2 phr ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าสารเติมแต่ง HA-C ทั้งนี้เนื่องจาก สารเติมแต่ง HA-T มีปริมาณของคาร์บอนอลในปริมาณที่มากกว่านั่นเองดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนกับ Wingstay-L<sup>®</sup> และคาร์บอนอลสังเคราะห์พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-T ในปริมาณ 2.0 phr มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าคาร์บอนอลสังเคราะห์เนื่องจากคาร์บอนอลในน้ำมัน CNSL มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Wingstay-L<sup>®</sup> พบว่ามีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากคาร์บอนอลระเหยได้ง่ายกว่าดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

#### 4.5 ผลของสารเติมแต่งไฮบริดต่อความสามารถในการช่วยผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM

การทดลองในส่วนนี้ต้องการศึกษาถึงความสามารถในการช่วยผสมเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM โดยใช้สารเติมแต่ง HA สำหรับทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายและการยึดเกาะระหว่างเฟสของยาง NR และเฟสของยาง EPDM ให้ดีขึ้น ในการพิจารณาความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของยางผสมสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ซึ่งการผสมเข้าได้ดีนั้นจะส่งผลให้ยางผสมมีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพอีกด้วย

##### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างยางผสม NR/EPDM

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยางผสมระหว่างยาง NR และยาง EPDM ที่ถูกย้อมสีด้วยออกสเมียมเตรดดรอกไซด์ ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า เพื่อศึกษาผลของการผสมสารเติมแต่ง HA-C และ HA-T ต่อการกระจายและการยึดเกาะระหว่างเฟสของยางผสมระหว่างยาง NR และยาง EPDM แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.10** โครงสร้างจุลภาคของยางผสมระหว่างยาง NR (เฟสสีเทา) กับยาง EPDM (เฟสสีขาว) ที่สัดส่วนการผสม 75:25 เมื่อผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณต่าง ๆ (ภาพถ่ายที่ กำลังขยาย X 5000 เท่า)

จากโครงสร้างจุลภาคของยางผสมที่ผ่านการเชื่อมสี ทำให้สามารถสังเกตเห็นเฟสของยาง NR เกิดเป็นสีเทาและเฟสของยาง EPDM เป็นสีขาว โดยทั่วไปนั้นการเชื่อมสีของออสเมียมเตรดดรอกไซด์คือการเลือกเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ และในยาง NR ซึ่งมีจำนวนพันธะคู่ที่มากกว่ายาง EPDM ทำให้สามารถสังเกตเห็นเฟสของยาง NR เป็นสีเทา จากอิทธิพลของการผสมสารเติมแต่ง HA ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของยางผสม พบว่าตัวอย่างยางผสมที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง HA ดังแสดงในรูปที่ 4.10(a) แสดงให้เห็นธรรมชาติของการผสมอย่างชัดเจนว่ายาง NR และยาง EPDM ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วของยางทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันนั่นเอง สามารถสังเกตเห็นการแยกเฟสอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะระหว่างเฟสของยางทั้งสองที่ไม่ดี และในกรณีของตัวอย่างยางผสมที่ผสมสารเติมแต่ง HA ดังแสดงในรูปที่ 4.10(b) ถึง (e) แสดงให้เห็นว่าการผสมสารเติมแต่ง HA สามารถช่วยทำให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างเฟสของยาง NR และยาง EPDM ให้ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น อาจจะอธิบายได้จากโครงสร้างของคาร์บอนอลีนน้ำมัน CNSL ที่มีส่วนที่เป็นอะโรมาติกและอะลิฟาติกจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม ทำให้สามารถละลายได้ทั้งเฟสของยาง NR และยาง EPDM จึงทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสของยาง NR และยาง EPDM ส่วนในกรณีผลของปริมาณของสารเติมแต่ง HA พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการผสมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากเกินไป

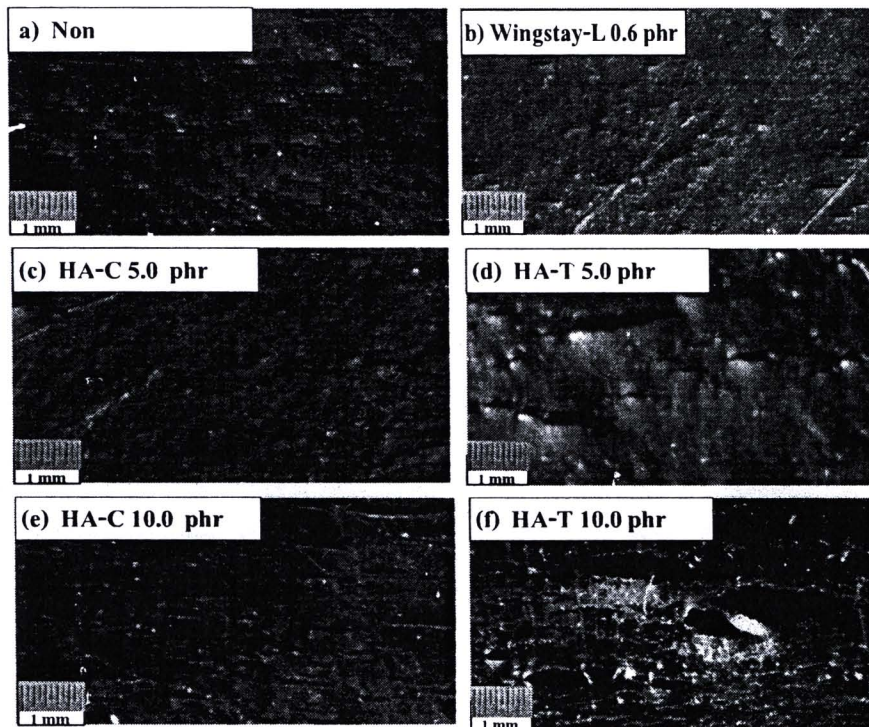
แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองในตอนต้นมีข้อสังเกตที่น่าสนใจก็คือการผสมสารเติมแต่งที่มากเกินไป จะส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพลดลง

#### 4.5.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณสารเติมแต่ง HA ที่ใช้เป็นสารช่วยผสมสำหรับยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM ต่อการปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยางผสมที่ความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm อุณหภูมิ 40 °C เป็นระยะเวลา 72 ชม. เพื่อศึกษาความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของตัวอย่างยางผสมที่ผสมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดคือ HA-C และ HA-T โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างยางผสมที่ผสม Wingstay-L<sup>®</sup> ในปริมาณ 0.6 phr ในการพิจารณาระดับของความสามารถต้านทานต่อโอโซนจะพิจารณาจากความหนาแน่นและขนาดของรอยแตกบนพื้นผิวของตัวอย่างยางผสมที่ผ่านการอบเร่งด้วยโอโซน ดังเช่นที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งลักษณะของการเสื่อมสภาพของยางผสมสามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัลที่กำลังขยาย 40 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.11

จากจำนวนและขนาดของรอยแตกบนพื้นผิวของตัวอย่างยางผสมที่ผ่านการอบเร่งด้วยโอโซน ทำให้สามารถแสดงระดับของความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการผสมยาง EPDM เพื่อปรับปรุงสมบัติการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนในยาง NR (ไม่ผสมสารช่วยผสม) ส่งผลทำให้ยาง NR มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพอยู่ในระดับ C-4 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างยาง NR (Non) ดังตารางที่ 4.2 พบว่าไม่ช่วยทำให้ยาง NR มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากฤทธิ์ของทั้งสองชนิดผสมไม่เข้ากันดังรูปที่ 4.10 จึงทำให้การผสมยาง EPDM ไม่ช่วยทำให้เฟสของยาง NR มีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของสารช่วยผสม (สารเติมแต่ง HA-C และ HA-T) ในปริมาณเท่ากับ 5.0 และ 10.0 phr ต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน พบว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-T มีแนวโน้มการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนลดลง โดยสามารถทำให้ตัวอย่างยางผสมมีความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพอยู่ในระดับ B-5 และยังสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีกว่าตัวอย่างยางผสมที่ผสม Wingstay-L<sup>®</sup> ซึ่งอาจจะเป็นผลจากคาร์บอนออลีนน้ำมัน CNSL มีส่วนช่วยในการเชื่อมประสานระหว่างเฟสของยาง NR กับเฟสยาง EPDM ให้ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น จึงทำให้ยางผสมมีสมบัติความต้านทานต่อโอโซนได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10(c) และ (e) และในกรณีของการผสมสารเติมแต่ง HA-C พบว่ามีการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนอยู่ในระดับ C-4 พิจารณาจากรูปที่ 4.10(b) และ (d) แสดงให้เห็นเฟสของยาง NR และยาง EPDM มีการยึดเกาะระหว่างเฟสยาง NR และเฟสยาง EPDM ที่ดี แต่เนื่องจากผสมสารเติมแต่ง HA-C ในปริมาณที่มากเกินไป อาจมีผลทำให้มีการปนเปื้อนของสารประกอบอื่น ๆ ในยางผสมมากตามไปด้วย เพราะเนื่องจากสารเติมแต่ง HA-C เตรียมจากน้ำมัน

CNSL ตามธรรมชาติที่ไม่ผ่านขั้นตอนการเพิ่มปริมาณคาร์บอนอาจส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามการผสมยาง EPDM ซึ่งจัดเป็นยางที่ทนต่อโอโซนได้เป็นอย่างดีจึงยังทำให้ยางผสมมีความสามารถที่จะป้องกันการเสื่อมสภาพได้



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายรอยแตกของตัวอย่างยาง NR/EPDM ที่ผสมสารเติมแต่ง HA

ตารางที่ 4.4 ระดับความต้านทานต่อโอโซนของตัวอย่างยาง NR/EPDM

ตัวอย่าง	ระดับ
Non	C-4
Wingstay-L 0.6 phr	C-4
HA-C 5.0 phr	C-4
HA-C 10.0 phr	C-4
HA-T 5.0 phr	B-5
HA-T 10.0 phr	B-5

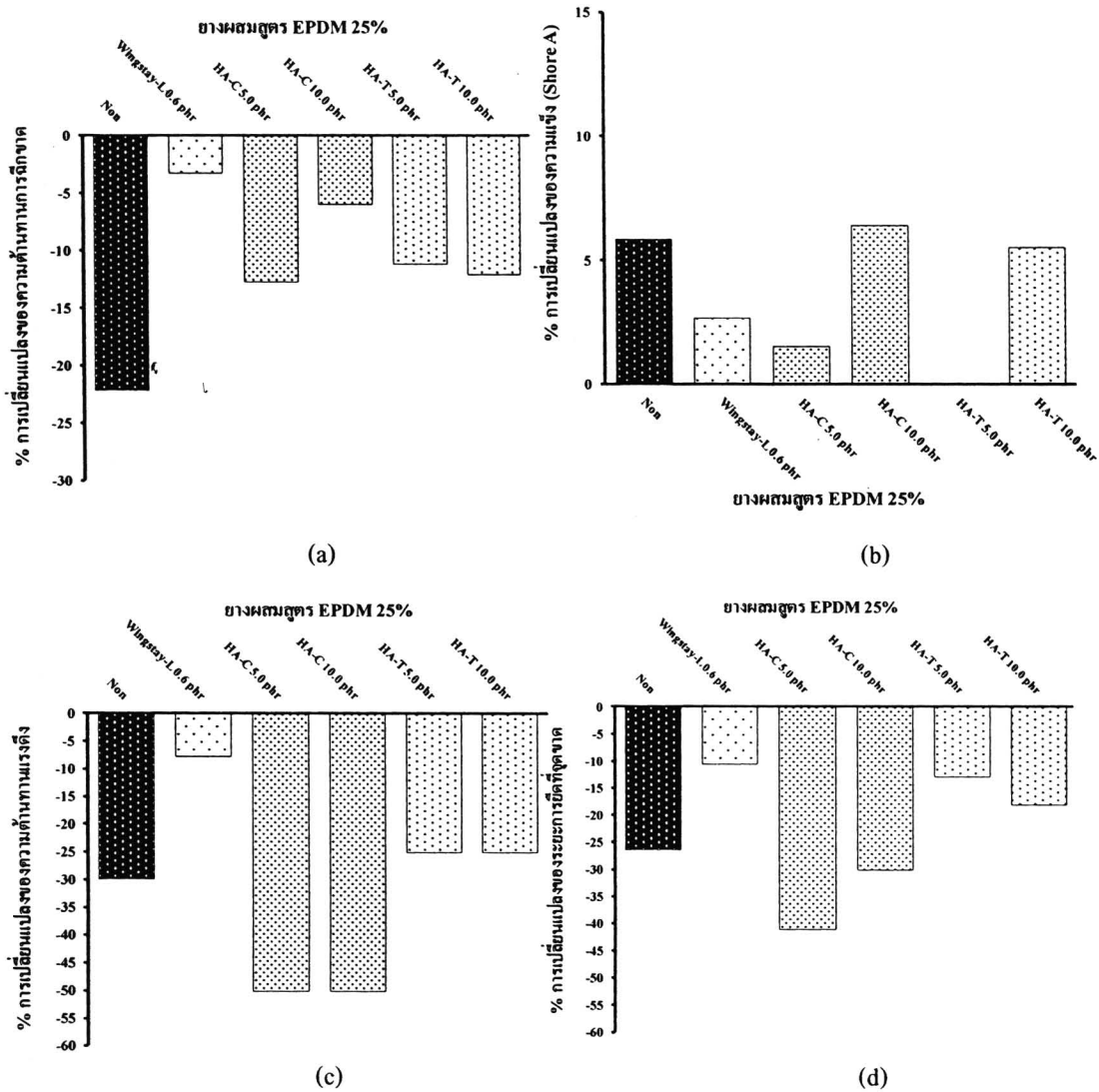


#### 4.5.3 ผลสมบัติเชิงกลของตัวอย่างยาง NR/EPDM ที่ผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง HA ที่ใช้เป็นสารช่วยผสมยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM ต่อการปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °ซ เป็นระยะเวลา 22 ชม. โดยในการพิจารณาความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพจากร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลของยางผสมก่อนและหลังการอบเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.12(a) ถึง (d) แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณสารเติมแต่ง HA ในปริมาณเท่ากับ 5.0 และ 10.0 phr ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึง ระยะการยืดที่จุดขาด ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็ง พบว่าการอบเร่งด้วยความร้อนทำให้ตัวอย่างผสมมีค่าของความต้านทานแรงดึง ระยะการยืดที่จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด และความแข็งของตัวอย่างยางเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการอบเร่งที่แตกต่างกัน เป็นมาจากยางผสมมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้นั่นเอง และจากการพิจารณาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการฉีกขาดของตัวอย่างยางผสม (ยางผสมสูตร Non) ดังแสดงในรูปที่ 4.12(a) เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวจะพบว่าตัวอย่างยางผสมที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง HA มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการฉีกขาดมีค่าที่มากที่สุด ทั้งนี้อาจจะอธิบายได้จากความสามารถในการผสมเข้ากันระหว่างของเฟสของยาง NR และเฟสของยาง EPDM ซึ่งเมื่อไม่ใส่สารช่วยผสมจึงทำให้ผสมไม่เข้ากันและไม่มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดี อีกทั้งยังอาจจะเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายในส่วนของเฟสยาง NR อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.10(a) และเมื่อพิจารณาผลของการผสมสารเติมแต่ง HA พบว่าตัวอย่างยางผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการฉีกขาดลดลงและยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกับตัวอย่างยางผสมที่ผสม Wingstay-L<sup>®</sup> ซึ่งจากผลการทดลองในส่วนนี้จะช่วยยืนยันได้ว่าการผสมสารเติมแต่ง HA มีส่วนช่วยปรับปรุงการผสมเข้ากันของยาง NR และยาง EPDM ได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้เฟสของยาง NR เกิดการเสื่อมสภาพได้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10(b) ถึง (c) ในกรณีของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความแข็งของตัวอย่างยางผสมดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) พบว่าตัวอย่างยางผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความแข็งน้อยกว่าร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากผลของการอบเร่งทำให้เกิดการระเหยของน้ำมันและการเกิดปฏิกิริยาหลังการบ่มสุกได้น้อย

เมื่อพิจารณาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและระยะการยืดที่จุดขาดของตัวอย่างยางผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.12(c) และ (d) พบว่าตัวอย่างยางผสมที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง HA มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและระยะการยืดที่จุดขาดเท่ากับร้อยละ 30.0 และ 26.5 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของการผสมสารเติมแต่ง HA ในปริมาณ 5.0 และ 10.0 phr พบว่าตัวอย่างยางผสมที่ผสมสารเติมแต่ง HA-T มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาดลดลง และมีแนวโน้มใกล้เคียงกับตัวอย่างยางผสมที่ผสม Wingstay-L<sup>®</sup> แสดงให้เห็นว่าการผสมสารเติมแต่ง HA-T มีส่วนช่วยปรับปรุงให้ยางผสม

สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ส่งผลให้เฟสของยาง NR เกิดการเสื่อมสภาพได้น้อยลง แต่เมื่อพิจารณาผลของการผสมสารเติมแต่ง HA-C พบว่ายังไม่สามารถปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพได้ อาจเนื่องจากการผสมน้ำมัน CNSL ในปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลของสารปนเปื้อนอื่น ๆ ผสมในยางผสมมากตามไปด้วยดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 4.5.2



รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณสารเติมแต่ง HA ต่อการป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางผสมสูตร NR/EPDM

#### 4.6 ผลการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์การผลิตสารเติมแต่งไฮบริด

การศึกษาในส่วนนี้ เป็นการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินราคาการผลิตสารเติมแต่ง HA จากน้ำมัน CNSL สำหรับการขยายระดับการผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะทำการประเมินราคาการก่อสร้างโรงงาน เครื่องจักรและค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการดำเนินการผลิต ในกรณีการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการนี้ โรงงานจะถูกสร้างขึ้นในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

ซึ่งเป็นจังหวัดที่ใกล้แหล่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตและโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA กับ Wingstay-L®

#### 4.6.1 ผลการคำนวณต้นทุนการผลิตสารเติมแต่งไฮบริด

จากผลการศึกษากระบวนการผลิตสารเติมแต่ง HA จากน้ำมัน CNSL ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทำให้สามารถแสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตสารเติมแต่ง HA ได้ดังนี้ คือ

##### ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำน้ำมัน CNSL มาปรับสภาพ โดยการต้มที่อุณหภูมิ 160 °ซ เป็นเวลา 30 นาที

##### ขั้นตอนที่ 2 การผสมวัตถุดิบ

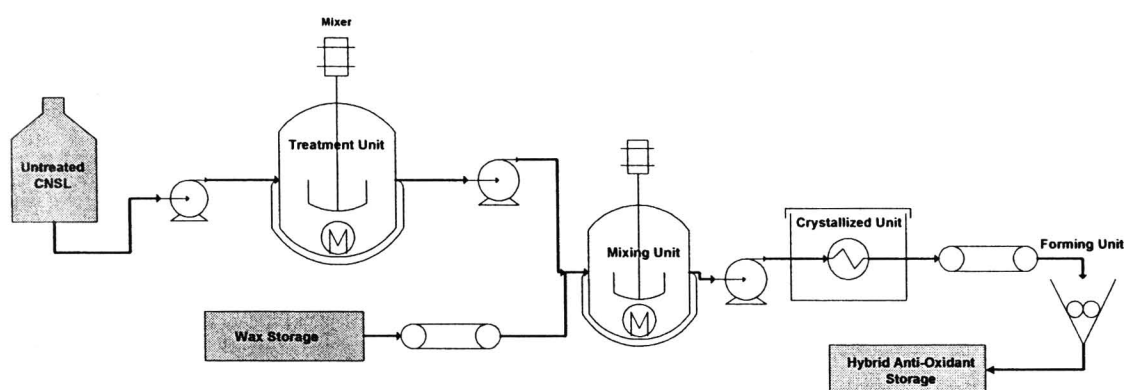
นำน้ำมัน CNSL ที่ผ่านการปรับสภาพมาผสมกับแว็กซ์ผสม (พาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิโดยประมาณ 80 - 90 °ซ เพื่อให้ส่วนผสมทั้งสองละลายเข้าด้วยกัน โดยใช้สัดส่วนของน้ำมัน CNSL ที่ผ่านการปรับสภาพที่ร้อยละ 73 โดยน้ำหนัก

##### ขั้นตอนที่ 3 การตกผลึกร่วม

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาทำการลดอุณหภูมิลงจนเหลืออุณหภูมิประมาณ 30 °ซ เพื่อให้เกิดการตกผลึกร่วม ก็จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่พร้อมทำการขึ้นรูป

##### ขั้นตอนที่ 4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

นำผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากขั้นตอนการตกผลึกร่วมมาทำการขึ้นรูปตามความต้องการของลูกค้า และนำไปจัดเก็บเพื่อรอส่งมอบให้กับลูกค้า



รูปที่ 4.13 กระบวนการผลิตสารเติมแต่ง HA จากน้ำมัน CNSL

ในการคำนวณต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA จะทำการประมาณกำลังผลิตที่ 480 กก./วัน และจากอุปกรณ์และเครื่องจักรดังรูปที่ 4.13 ทำให้สามารถคำนวณต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA ซึ่งต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ

ตารางที่ 4.5 การคำนวณต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA ในปริมาณ 1 กิโลกรัมของ HA

รายการ	จำนวนเงิน (บาท/กก. ของ HA)
1. ต้นทุนวัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ (raw material cost)	
- น้ำมัน CNSL ปรับสภาพ	14.6
- ปีโตรเลียมเว็กซ์	10.6
2. ต้นทุนค่าดำเนินงาน (operating cost)	
- ค่าสาธารณูปโภค (น้ำ ไฟฟ้า)	1.7
- ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร	0.5
- ค่าแรงงาน	0.7
- อื่นๆ (ภาษี ดอกเบี้ยเงินกู้)	15.7
<b>รวมต้นทุน</b>	<b>43.8</b>

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถประมาณต้นทุนการผลิตสารเติมแต่ง HA ได้ที่ กิโลกรัมละ 43.8 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับ Wingstay-L<sup>®</sup> ซึ่งมีราคา กิโลกรัมละ 290 บาท พบว่ามีราคาต่ำกว่ามาก แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาสารเติมแต่ง HA ช่วยทำให้ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมยางในประเทศมีต้นทุนที่ต่ำลง

#### 4.6.2 การประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์การสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA

ในการประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์การสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการลงทุนการสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA นั้น รายละเอียดของข้อมูลในกรณีการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์การสร้างโรงงาน แสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 1. รายละเอียดของโครงการ[15]

อายุโครงการ	10 ปี
พื้นที่โครงการ	1 ไร่
โครงสร้างเป็นโรงงาน	1 ชั้น
งบประมาณ	
- มูลค่าที่ดิน	1,000,000 บาท
- มูลค่าการก่อสร้างโรงงาน	1,535,976 บาท
- มูลค่าในการดำเนินการผลิตครั้งแรก	281,775 บาท
- รวมมูลค่าโครงการ	2,817,751 บาท

## 2. รายละเอียดของกระบวนการผลิต

ในการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ประมาณกำลังผลิตสารเติมแต่ง HA ที่ 140 ตัน/ปี หรือ 480 กก./วัน (โรงงานทำการ 6 วันต่อสัปดาห์) และประมาณส่วนแบ่งทางการตลาด 1% ของปริมาณการนำเข้าเฉลี่ยของสารจำพวก Anti-oxidizing preparations and other compound stabilizers for rubber or plastics ตั้งแต่ปี 2005 ถึงปี 2009[16] จำหน่วยในราคาเท่ากับ 80 บาท/กก.

## 3. รายละเอียดของเครื่องจักร

จากรูปที่ 4.13 สามารถที่จะแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตสารเติมแต่ง HA ที่กำลังผลิต 480 กก./วัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องจักร

อุปกรณ์	จำนวน (หน่วย)
1. storage tank ขนาด 2,500 ลิตร	1
2. ถังพร้อมใบกวนขนาด 100 ลิตร	2
3. heater	2
4. ถังตกผลึกขนาด 100 ลิตร	1
5. jacket ทำความเย็น	1
6. ป้อนที่อัตราการไหล 20 ลิตร/นาที	2
7. สายพานขนาด 10 นิ้ว ยาว 25 ฟุต	2
8. เครื่องขึ้นรูปขนาด 40 x 50 ซม.	1

## 4. รายละเอียดของแหล่งเงินทุน

- เงินทุนส่วนตัว 3,000,000 บาท
- เงินทุนกู้ยืม 2,000,000 บาท
- เงินทุนรวม 5,000,000 บาท

### ที่มาของเงินทุน

- เงินทุนส่วนตัว มาจากการรวมหุ้นของผู้ประกอบการ
- เงินทุนกู้ยืม กู้ยืมจากธนาคารไทยพาณิชย์ด้วยดอกเบี้ย 7.5 % ต่อปี มีระยะเวลาการผ่อนชำระ 10 ปี

### 5. ข้อมูลค่าใช้จ่ายรายปี

เนื่องจากสารเติมแต่ง HA เป็นสินค้าที่ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในท้องตลาด ดังนั้นในการผลิตสารเติมแต่ง HA จึงมีการปรับเพิ่มกำลังผลิตขึ้นทุกปีจนกระทั่งเต็มกำลังการผลิตมีรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

ค่าใช้จ่ายคงที่ในแต่ละปีประกอบด้วย

- ภาษี	50,720 บาท
- ค่าประกัน	25,360 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการตลาด การบริหาร และการวางแผน	1,808,883 บาท
รวมค่าใช้จ่ายคงที่ในแต่ละปี	1,884,964 บาท



ค่าใช้จ่ายที่แปรผันในแต่ละปีตามกำลังการผลิต

ปีที่ 1	กำลังการผลิต 28,000 กก.	ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบและค่าจ่ายแปรผันปี	1,195,950 บาท
ปีที่ 2	กำลังการผลิต 56,000 กก.	ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบและค่าจ่ายแปรผันปี	2,391,900 บาท
ปีที่ 3	กำลังการผลิต 84,000 กก.	ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบและค่าจ่ายแปรผันปี	3,587,850 บาท
ปีที่ 4	กำลังการผลิต 112,000 กก.	ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบและค่าจ่ายแปรผันปี	4,783,800 บาท
ปีที่ 5-10	กำลังการผลิต 140,000 กก.	ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบและค่าจ่ายแปรผันปี	5,979,750 บาท

### 6. ข้อมูลรายรับ

ปีที่ 1	รายได้จากการขายสินค้า	2,240,000 บาท
ปีที่ 2	รายได้จากการขายสินค้า	4,480,000 บาท
ปีที่ 3	รายได้จากการขายสินค้า	6,720,000 บาท
ปีที่ 4	รายได้จากการขายสินค้า	8,960,000 บาท
ปีที่ 5-10	รายได้จากการขายสินค้า	11,200,000 บาท

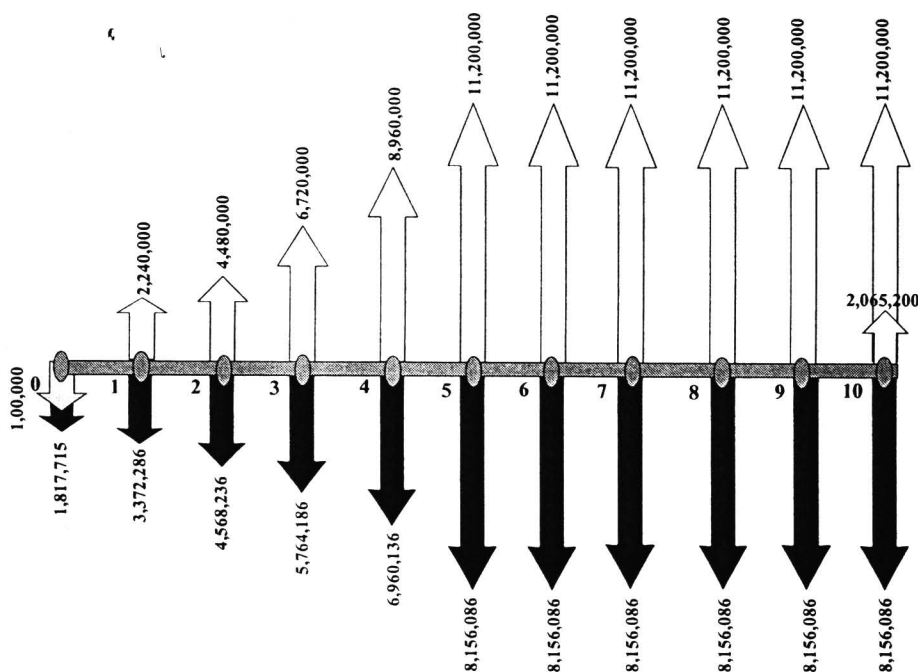
### 7. ข้อมูลการชำระหนี้

การชำระหนี้คืนธนาคารจะชำระทั้งหมด 10 งวด งวดละ 291,372 บาท/ปี

จากข้อมูลรายละเอียดของโครงการดังที่แสดงไปแล้วข้างต้น นำมาใช้ในการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยจะทำการสร้างผังกระแสเงินสดในมุมมองของโครงการ และทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้ประเมินว่าโครงการผลิตสารเติมแต่ง HA ว่ามีความเหมาะสมในการลงทุนหรือไม่ โดยจะทำการพิจารณาจากพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

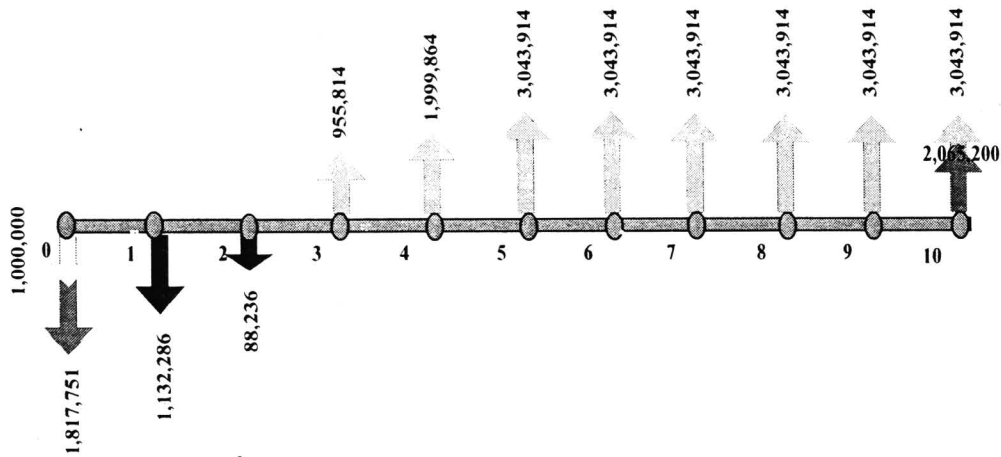
1. ผังกระแสเงินสดหลักและผังกระแสเงินสดสุทธิในมุมมองของโครงการ

ในการสร้างผังกระแสเงินสดหลักและผังกระแสเงินสดสุทธิในมุมมองของโครงการ เพื่อที่จะแสดงรายรับและรายจ่ายในแต่ละปีของโรงงาน ซึ่งข้อมูลการประมาณรายรับและรายจ่ายแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.11 ทำให้สามารถแสดงผังกระแสเงินสดหลักได้ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผังกระแสเงินสดหลักในมุมมองของโครงการ

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงรายรับและรายจ่ายของโครงการในระยะเวลาของโครงการ 10 ปี และจากผังกระแสเงินสดหลักที่ได้แสดงดังกล่าว ทำให้สามารถแสดงผังกระแสเงินสดสุทธิของโครงการได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผังกระแสเงินสดสุทธิในมุมมองของโครงการ

## 2. ผลการคำนวณอัตราผลตอบแทนของโครงการที่คาดหวัง (MARR)

จากข้อมูลของแหล่งเงินทุนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น สามารถนำมาคำนวณค่า WACC ได้เท่ากับ 9 % จากนั้นทำการประมาณค่า MARR ได้เท่ากับ 15 %

## 3. ผลการคำนวณอัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR)

การคำนวณอัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) สามารถคำนวณได้จากค่า PW ดังแสดงในสมการที่ ก.1 โดยใช้วิธีการ trial and error ค่า IRR เพื่อให้ได้ค่าที่ทำให้ผลต่างของค่า PW ในส่วนของรายรับกับรายจ่ายเท่ากับศูนย์ จากผลจากการคำนวณพบว่าค่า IRR มีค่าเท่ากับ 32.1 %

## 4. ผลการคำนวณมูลค่าโครงการในปัจจุบัน (PW) และในอนาคต (FW)

ทำการประเมินมูลค่าโครงการในปัจจุบันและมูลค่าโครงการในอนาคตโดยใช้ข้อมูลจากผังกระแสเงินสดหลักดังรูปที่ 4.14 ผังกระแสเงินสดดังรูปที่ 4.15 และใช้ค่า MARR เท่ากับ 15 % รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก. สมการที่ ก.2 และก.3 ผลที่ได้แสดงดังนี้

มูลค่าโครงการในปัจจุบันเท่ากับ 5,463,217 บาท

มูลค่าโครงการในอนาคตเท่ากับ 20,231,388 บาท

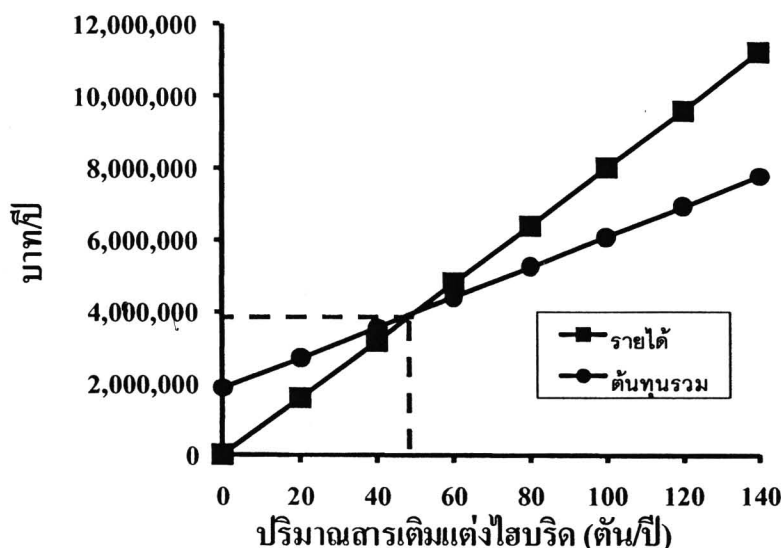
## 5. ผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ ( $n_p$ )

ในการคำนวณระยะเวลาในการคืนทุน payback period ( $n_p$ ) ใช้ข้อมูลจากผังกระแสเงินสดดังรูปที่ 4.15 และใช้ค่า MARR เท่ากับ 15 % พบว่าโครงการมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 3 ปี 1 เดือน รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก. สมการที่ ก.4



## 6. ผลการคำนวณกำลังการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตถึงจุดคุ้มทุน

การคำนวณจุดคุ้มทุนของการผลิตสารเติมแต่ง HA ทำได้โดยการนำข้อมูลรายรับและรายจ่ายมาหาความสัมพันธ์กับกำลังการผลิตดังรูปที่ 4.16 จากความสัมพันธ์ของกำลังการผลิตกับรายได้และต้นทุนรวม พบว่าจุดตัดแสดงถึงกำลังการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเพื่อให้ถึงจุดคุ้มทุน ซึ่งเป็นจุดที่มีกำลังการผลิตเท่ากับ 49 ตัน/ปี



รูปที่ 4.16 การประมาณหาจุดคุ้มทุนในการผลิตสารเติมแต่ง HA

จากผลการประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวข้างต้น พบว่าโครงการการสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA มีค่า IRR มากกว่า MARR ถึงสองเท่า แสดงให้เห็นว่าโครงการการสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA มีความน่าจะเป็นไปได้ในการลงทุนสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA นอกจากนี้ มูลค่าโครงการในปัจจุบันและในอนาคตมีค่ามากกว่าศูนย์ และยังมีระยะเวลาคืนทุนของโครงการใช้ระยะเวลาเพียง 3 ปี 1 เดือน นั้นยังแสดงให้เห็นว่าโครงการการสร้างโรงงานผลิตสารเติมแต่ง HA มีความเหมาะสมในการลงทุน