

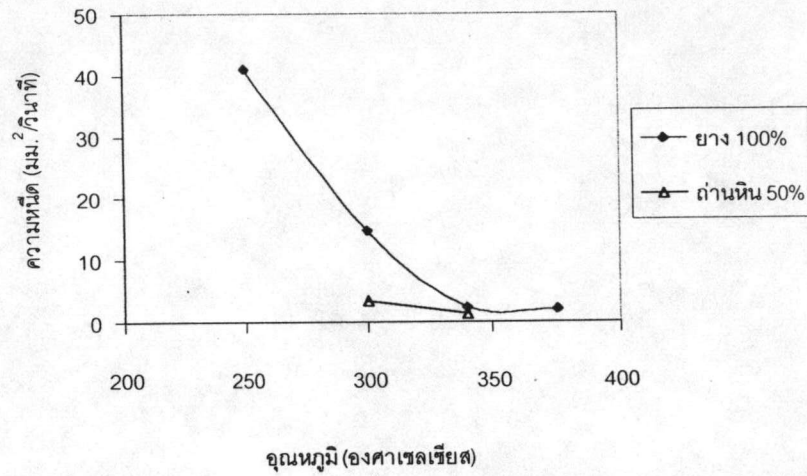
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการแปรรูปร่างธรรมชาติผสมลิแกนด์ให้เป็นของเหลวในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยาง และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ถูกนำไปวิเคราะห์ค่าความหนืดและคำนวณปริมาณของเหลวที่ได้

4.1. ผลของอุณหภูมิ

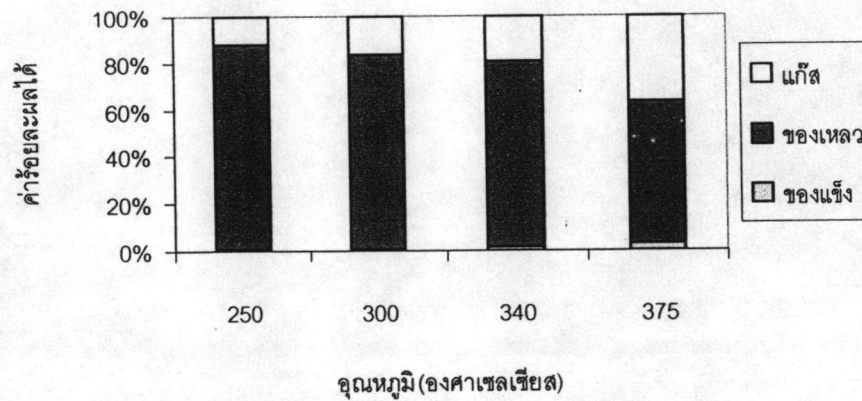
จากการทดลองโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว พบว่าค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของยางแตกตัวมากขึ้นจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลงส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 340-375 องศาเซลเซียส ยางมีการแตกตัวน้อยมากหรือมีการจับตัวใหม่ของโมเลกุลที่แตกตัวออกมา (re-polymerization) ซึ่งเรียกว่าเป็นเพดานอุณหภูมิ (ceiling temperature) ของยางธรรมชาติ การทดลองที่ใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่อยางเป็น 1:1 ก็ได้ผลในแนวทางเดียวกันคือ ความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางแตกตัวได้มากขึ้นจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลที่เล็กลง ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลงเช่นเดียวกัน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.2) สำหรับวัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียวพบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สมากขึ้น ของเหลวลดลง และของแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของยางแตกตัวมากขึ้น จนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของเหลวลดลง ส่วนของแข็งที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยนั้นเนื่องมาจากการเกิดคาร์บอนในเซชัน (carbonization) และเมื่อใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่อยางเป็น 1:1 พบว่าของเหลวที่ได้มีปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ยางธรรมชาติอย่างเดียวเป็นวัตถุดิบมาก มีแก๊สเกิดขึ้นค่อนข้างมาก เนื่องจากในถ่านหินมีสารระเหยได้และไฮโดรเจนอยู่ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับยางช่วยส่งเสริมให้สายโพลีไอโซพรีนแตกตัวได้มากขึ้นจนได้โมเลกุลมีขนาดเล็กกลายเป็นแก๊ส และบางส่วนเหลือเป็นของเหลว ส่วนของแข็งที่ได้มาจากถ่านหิน



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

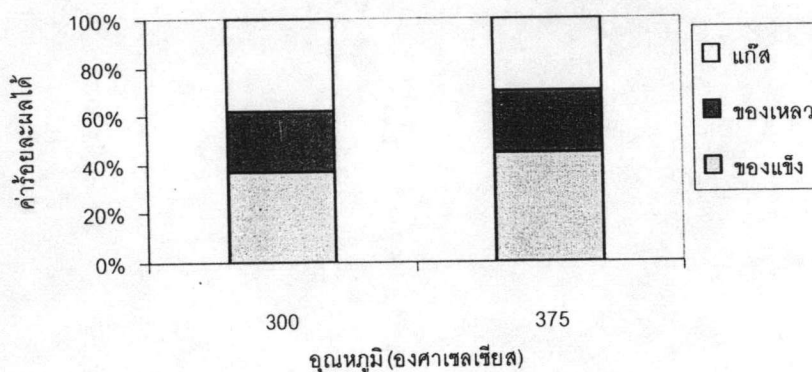
- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



ก. การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว

รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

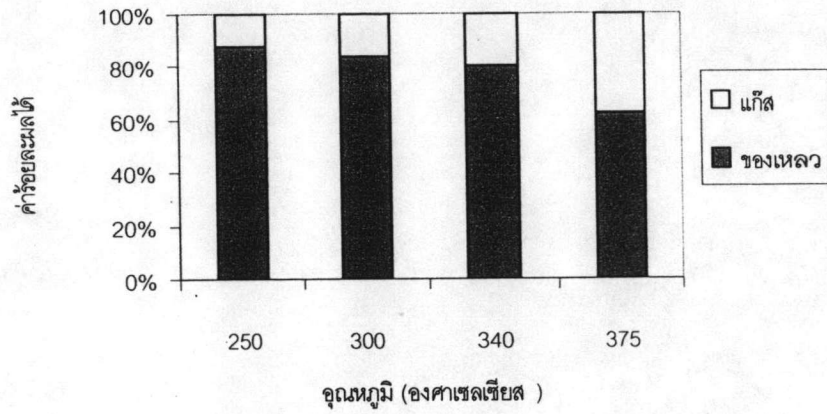


ข. การทดลองโดยใช้วัสดุที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่ออย่างเป็น 1:1

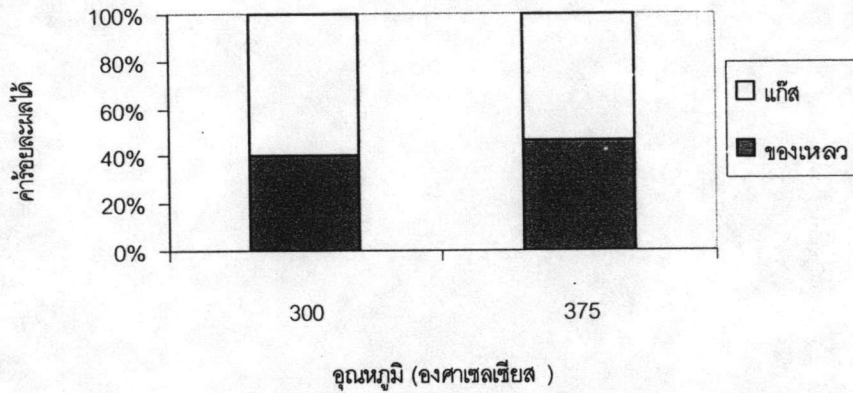
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแกล็ด (ต่อ)

- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

อย่างไรก็ดี สัดส่วนระหว่างแกล็ดกับของเหลวที่ได้ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปมากนักกับอุณหภูมิ เนื่องจากอนุภาคของถ่านหินที่กระจายตัวอยู่จะช่วยรับความร้อนจากผิวของเครื่องปฏิกรณ์ในบริเวณที่มีการถ่ายโอนความร้อนในอัตราที่สูง (hot spot) ทำให้ช่วยกระจายความร้อนไปสู่อย่างได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้โมเลกุลของยางไม่ขาดออกอย่างรวดเร็ว ผลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



ก. การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว



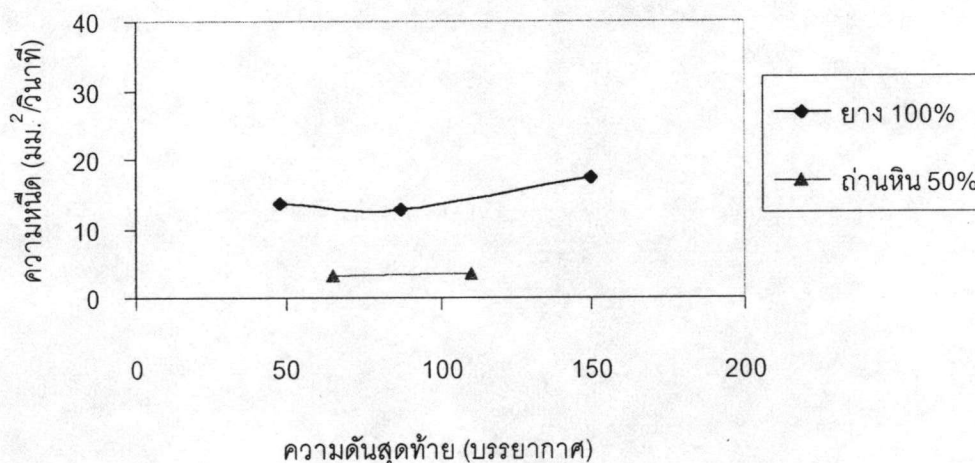
ข. การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่ออย่างเป็น 1:1

รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊ส

- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.2. ผลของความดัน

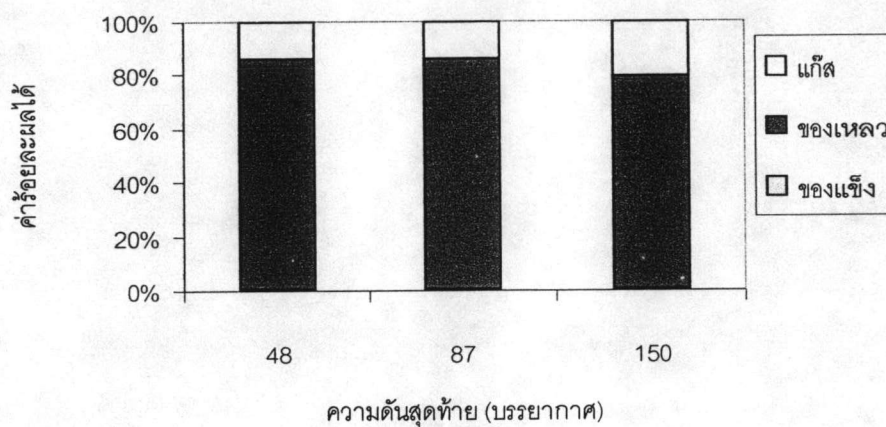
จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 20, 40 และ 60 บรรยากาศ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และใช้วัตุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว พบว่าความดันไม่มีผลต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.3) อย่างไรก็ตามจากการแทรกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเนื้อยางทำให้ยางพองตัว เมื่อยางถูกให้ความร้อนก็จะทำให้โมเลกุลของยางขาดออกจากกันได้ง่ายขึ้น เมื่อใช้วัตุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่อยางเป็น 1:1 ที่ความดันเริ่มต้น 20 และ 40 บรรยากาศ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ผลของความดันที่มีต่อค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



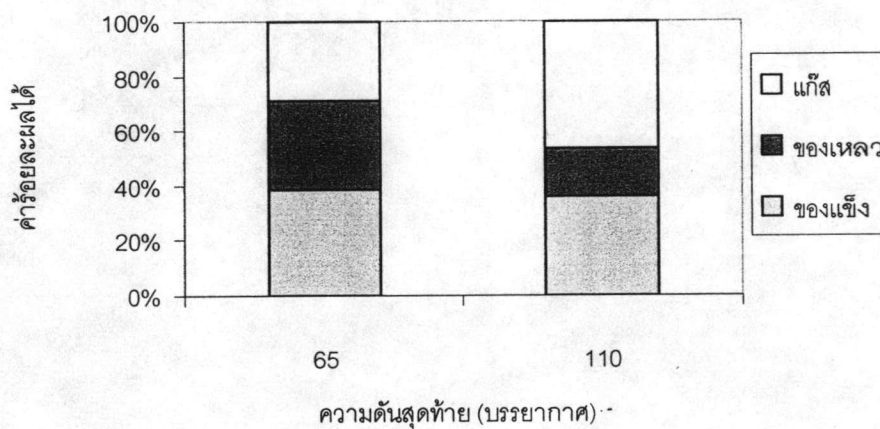
รูปที่ 4.4 ผลของความดันที่มีต่อค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากการคำนวณค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ สำหรับวัตุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว พบว่าความดันไม่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ ส่วนวัตุดิบที่มีถ่านหินร้อยละ 50 พบว่าสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง มีแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงไฮโดรเจนถูกบีบมาก ทำให้ทำปฏิกิริยามากขึ้นกลายเป็นแก๊ส แต่ของเหลวแตกตัวเท่าเดิมความหนืดจึงไม่เปลี่ยนแปลง ผลของความดันที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



ก. การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว



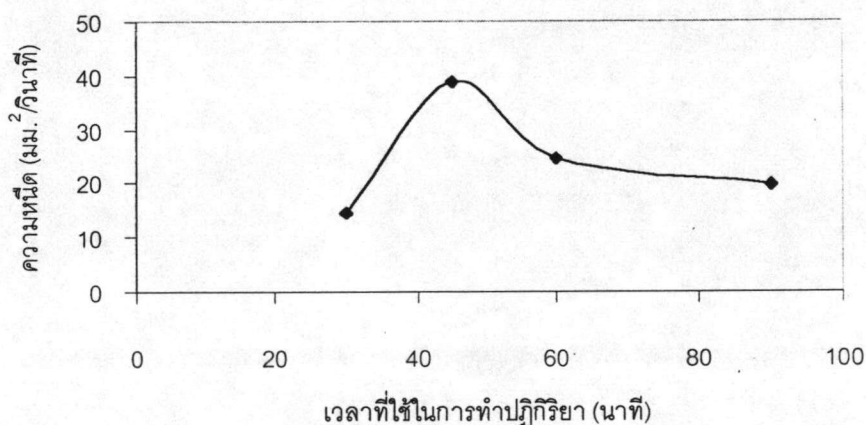
ข. การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยางเป็น 1:1

รูปที่ 4.5 ผลของความดันที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.3. ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

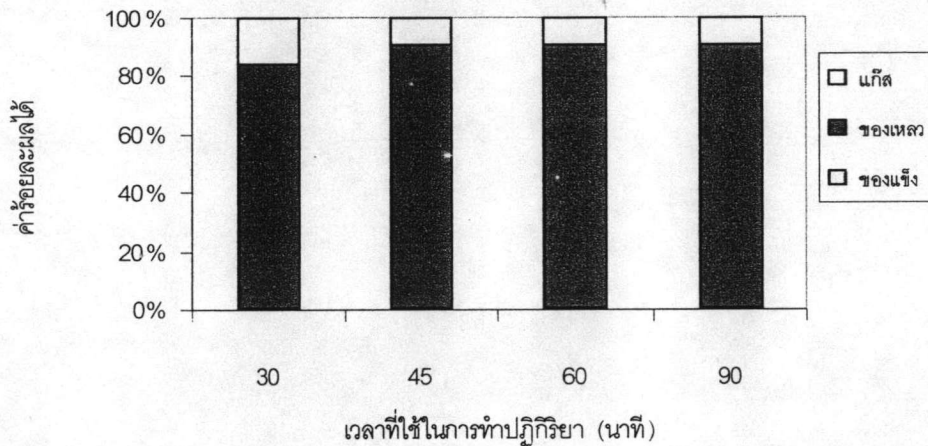
จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติอย่างเดียว พบว่าเมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.6 แต่ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะเห็นว่าความหนืดของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ แล้วเพิ่มขึ้นจนถึงที่เวลาประมาณ 45 นาที จากนั้นจึงค่อยๆลดลง เนื่องจากในช่วงต้น โมเลกุลของยางจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็ก แต่เมื่อให้เวลามากขึ้นอนุภาคบางส่วนจะเกิดการรวมตัวกันอีก เกิดเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โมเลกุลเหล่านี้บางส่วนยังสามารถแตกตัวต่อไปได้อีกแต่บางส่วนไม่แตกตัวหรือแตกตัวได้ยาก ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการกระจายตัวของโมเลกุลสุดท้าย ดังนั้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยามากๆความหนืดของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงจนกระทั่งไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีผู้ทำการวิจัยไว้ก่อนหน้านี้แล้ว [11,12] และสังเกตเห็นผลในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการทดลองโดยใช้ยางธรรมชาติอย่างเดียว

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

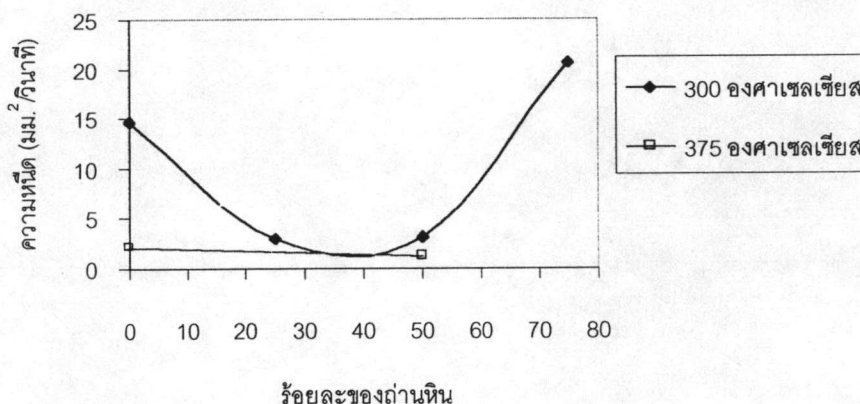


รูปที่ 4.7 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้
ยางธรรมชาติอย่างเดียว

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ

4.4. ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยาง

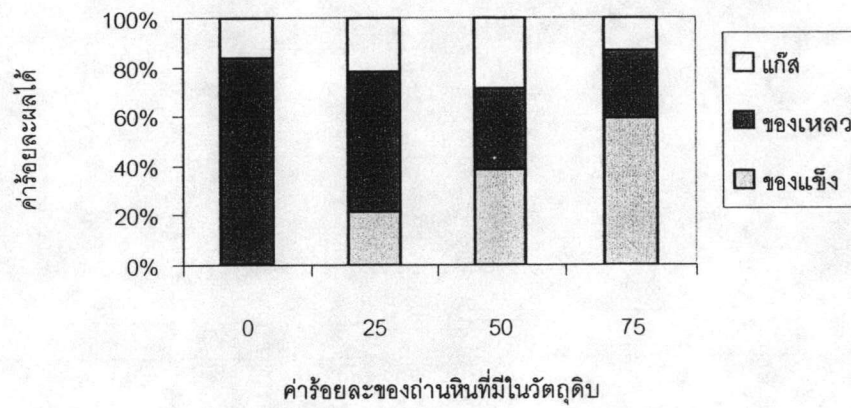
จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยางต่างๆกัน พบว่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของถ่านหินในวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 25 แต่ความหนืดจะเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็นต้นไป เนื่องจากในถ่านหินมีไฮโดรเจนและสารระเหยได้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับยางทำให้โมเลกุลของยางเล็กลงส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง แต่เมื่อปริมาณถ่านหินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 50 เป็นต้นไป ความหนืดเพิ่มขึ้นมากเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กของถ่านหินที่เกิดจากการเสียดสีกันในระหว่างทำปฏิกิริยาสามารถหลุดผ่านกระดาษกรองออกมาพร้อมของเหลวในระหว่างการสกัดทำให้ของเหลวที่ได้มีปริมาณของแข็งมากและมีความหนืดสูง การทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณถ่านหินในวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยางแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



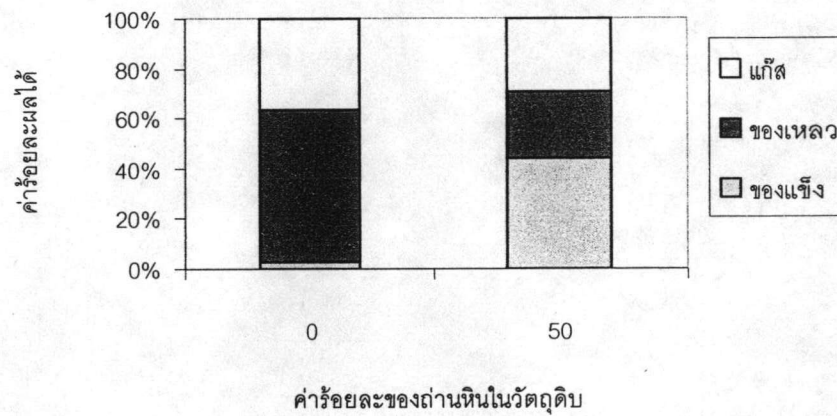
รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยางที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าถ้าใช้วัตถุดิบที่มีถ่านหินผสมอยู่จะเกิดแก๊สมากกว่าใช้วัตถุดิบที่เป็นยางอย่างเดียว (ยกเว้นที่ถ่านหินร้อยละ 75) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนจากถ่านหินทำปฏิกิริยากับยางได้โมเลกุลขนาดเล็กกลายเป็นแก๊ส การทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส โดยใช้วัตถุดิบที่มีถ่านหินผสมอยู่ร้อยละ 50 ให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวน้อยกว่าการใช้วัตถุดิบที่เป็นยางอย่างเดียว



ก. การทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



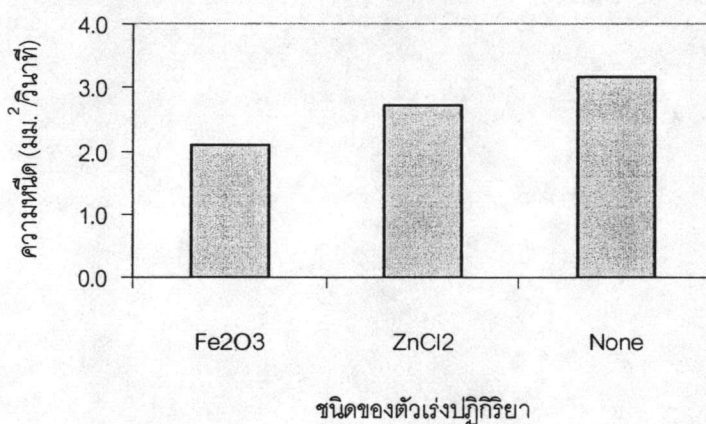
ข. การทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับยางที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์

- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

4.5. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

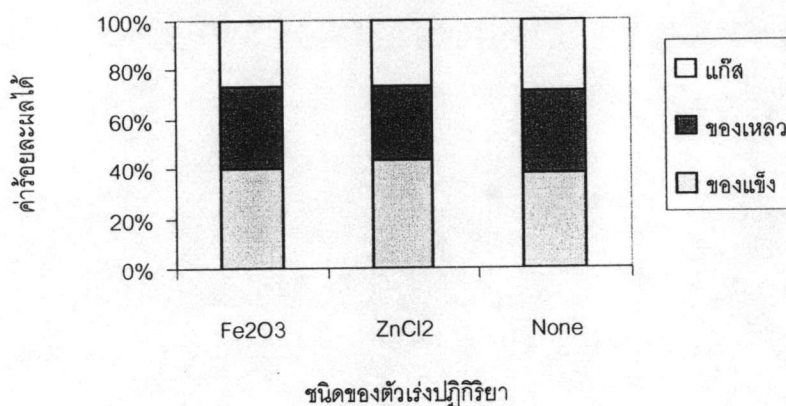
จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่อxygen เป็น 1:1 และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์ และซิงค์คลอไรด์ คิดเป็นร้อยละ 10 ของวัตถุดิบ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนืดลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และจากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์



การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่อxygen เป็น 1:1

รูปที่ 4.10 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 ของวัตถุดิบ



การทดลองโดยใช้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของถ่านหินต่ออย่างเป็น 1:1

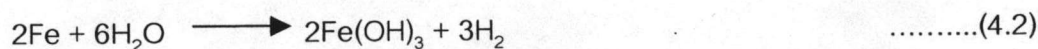
รูปที่ 4.11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสัดส่วนของผลิตภัณฑ์

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 20 บรรยากาศ
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 ของวัตถุดิบ

4.6. การอภิปรายสมมติฐาน

จากการอภิปรายในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งให้เห็นว่าการแตกตัวของยางขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้โดยที่ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวจะมีค่าความหนืดค่าหนึ่งที่เพดานอุณหภูมิ 340-375 องศาเซลเซียส ถ้าหากมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นทั้งที่มาจากถ่านหินหรือที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ของเหลวจะแตกตัวมากขึ้น และบางส่วนจะกลายเป็นแก๊ส

นอกจากนี้การที่มีเหล็กอยู่ในระบบการแตกตัวจะดีกว่า ทั้งนี้เพราะการเกิดไฮโดรเจนอันเนื่องมาจากเหล็ก ซึ่งเข้าใจว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ดังนั้นการมีเหล็กออกไซด์ปนในเนื้อยางจึงทำให้เกิดการผลิตไฮโดรเจนได้ ทำให้ความหนืดของของเหลวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่มีค่าต่ำกว่าจากที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้เลือกทำการทดลองส่วนใหญ่ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งคาดว่าที่เวลานี้สารจะทำปฏิกิริยากันโดยสมบูรณ์แล้ว เนื่องจากมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ทำการทดลองที่เวลาเท่ากันนี้ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่คล้ายกัน เช่น การศึกษากระบวนการร่วมของถ่านหินกับยางรถยนต์ [8-10] การศึกษาดีพอลิเมอไรเซชันของยางธรรมชาติและยางรถยนต์โดยใช้ของไหลภาวะเหนือวิกฤต [11] เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่เคยทำมาแล้วโดยเปรียบเทียบที่ภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่เคยทำมาแล้ว

ก.	งานวิจัยนี้	งานของ Mastral และคณะ [8]
วัตถุประสงค์	ยางธรรมชาติผสมถ่านหินร้อยละ 0, 25, 50, 75	ยางรถยนต์ผสมถ่านหินร้อยละ 0, 20, 50, 100
แก๊สที่ใช้	คาร์บอนไดออกไซด์	ไนโตรเจน
อุณหภูมิ	300 องศาเซลเซียส	400 องศาเซลเซียส
ความดัน	(เริ่มต้น) 20 บรรยากาศ	(เริ่มต้น) 10 บรรยากาศ
เวลา	30 นาที	30 นาที
ตัวเร่งปฏิกิริยา	เหล็กออกไซด์ร้อยละ 10 ของวัตถุประสงค์	เหล็กออกไซด์คิดเป็นปริมาณเหล็กร้อยละ 5 ของถ่านหิน
ผลการทดลอง	เมื่อร้อยละของถ่านหินในวัตถุประสงค์เพิ่มขึ้น ปริมาณของเหลวที่ได้มีแนวโน้มลดลง และที่ปริมาณถ่านหินร้อยละ 50 เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าได้ปริมาณของเหลวร้อยละ 33	เมื่อร้อยละของถ่านหินในวัตถุประสงค์เพิ่มขึ้น ปริมาณของเหลวที่ได้มีแนวโน้มลดลง และที่ปริมาณถ่านหินร้อยละ 50 เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าได้ปริมาณของเหลวร้อยละ 26

ข.	งานวิจัยนี้	งานของ Chen และคณะ [11]
วัตถุประสงค์	ยางธรรมชาติ	ยางธรรมชาติ
แก๊สที่ใช้	คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์
อุณหภูมิ	300 องศาเซลเซียส	380 องศาเซลเซียส
ความดัน	(สุดท้าย) 48 บรรยากาศ	(สุดท้าย) 272 บรรยากาศ
เวลา	30-90 นาที	30 นาที ถึง 3 ชั่วโมง
ผลการทดลอง	เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความหนืดของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง	เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (มวลโมเลกุลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืด)