

การปรับปรุงคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางใช้แล้วในระดับ
อุตสาหกรรม

UPGRADING OF CARBON BLACK FROM WASTE TIRE PYROLYSIS
PLANT

ณัฐวัฒน์ ทองเหลือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสอย่างใช้แล้วใน
ระดับอุตสาหกรรม

ณัฐวัฒน์ ทองเหลือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางใช้งานแล้ว ในระดับอุตสาหกรรม
	Upgrading of Carbon Black from Waste Tire Pyrolysis Plant
ชื่อ - นามสกุล	นายณัฐวัฒน์ ทองเหลือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ไชยยงค์ ไชยยะ, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชนาธิป สามารถ, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์วีราภรณ์ ผิวสะอาด, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ กวสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 17 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การปรับปรุงคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางใช้แล้วในระดับอุตสาหกรรม
นักศึกษา	นายณัฐวัฒน์ ทองเหลือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระตุ้นคาร์บอนแบล็คที่ผลิตจากโรงงานไพโรไลซิสยางรถยนต์ด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน

ซึ่งกระบวนการทางเคมีจะถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริกและกำหนดเงื่อนไขการทดลองด้วยอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนระหว่างสารเคมีต่อคาร์บอนแบล็ค โดยไอโอดีนนัมเบอร์ที่แสดงถึงคุณภาพของพื้นที่ผิวนั้นได้ถูกปรับให้ผลลัพธ์เหมาะสมจากวิธีการตอบสนองพื้นผิว (RSM) และออกแบบการทดลองด้วยซอฟต์แวร์ Design Expert ซึ่งออกแบบด้วยวิธีการ Box-Behnken โดยตัวแปรในการทดลองได้แก่ อุณหภูมิ 30-50 °C เวลา 6-24 h และอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี 0.25-1.0 g/ml หลังจากนั้นกระตุ้นด้วยความร้อนด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 30 min เพื่อเพิ่มไอโอดีนนัมเบอร์ให้เทียบเท่าคาร์บอนแบล็คเกรดเชิงพาณิชย์ N330

และจากการวิเคราะห์ด้วย RSM สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดคือ 117.51 mg/g ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 22.86 h และอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี 0.74 g/ml และทดลองซ้ำจากสมการ RCB_EQ แสดงถึงผลไอโอดีนนัมเบอร์ 119 mg/g ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่จะลดลงมากกว่า 90% ยกเว้นกำมะถันและคลอรีนซึ่งลดลง 43.27 และ 53.96% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของ RCB_13 พบว่าน้ำหนักจะลดลงเทียบเท่าศูนย์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 620 ถึง 800 °C

คำสำคัญ: คาร์บอนแบล็คที่นำกลับมาใช้ใหม่, ของเสียจากยางรถยนต์, ไพโรไลซิส, บ็อกซ์-เบห์นเคน

Thesis Title	Upgrading of carbon black from waste tire pyrolysis plant
Name – Surname	Mr.Natthawat Thonglueng
Program	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Assist.Prof.Natacha Phetyim, D.Eng.
Academic Year	2022

ABSTRACT

This study investigates the chemical and thermal treatment of carbon black produced by a tire pyrolysis plant.

Carbon blacks were chemically treated with nitric acid at various temperatures, times, and chemical-to-carbon black ratios. The number of iodine was optimized and investigated utilizing response surface methodology (RSM) and Design Expert. The Box–Behnken design was utilized to optimize the three parameters: Temperature 30-50 °C, time 6-24 h, and ratio of carbon black to chemical 0.25-1.0 g/ml for increasing iodine number, indicating increasing surface area, and upgrading to commercial carbon black N330.

According to the results of the RSM analysis, the optimal conditions for maximum iodine number were 117.51 mg/g at 50 °C for 22.86 h and 0.74 g/ml for the carbon black to chemical ratio validated by experimental RCB_ EQ, which yield 119 mg/g of iodine number. The majority of heavy metals decreased by more than 90%, except for sulfur and chorine, which decreased by 43.27 and 53.96 %, respectively. RCB_13 carbon black additive was eliminated, according to thermogravimetric analysis, at temperatures between 620 and 800 °C.

Keyword: recovered carbon black, waste tire, pyrolysis, Box–Behnken

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

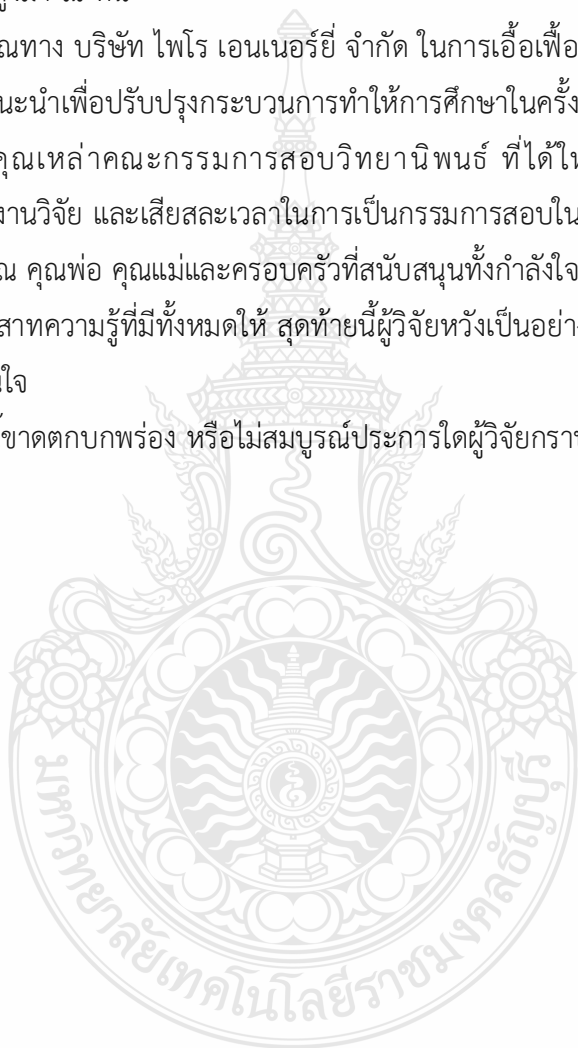
ขอขอบพระคุณทาง บริษัท ไฟโร เอนเนอร์ยี จำกัด ในการเอื้อเฟื้อคาร์บอนแบล็คสำหรับใช้ในการทดลองและให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงกระบวนการทำให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเหล่าคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย และเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่สนับสนุนทั้งกำลังใจ และกำลังใจทรัพย์ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่มีทั้งหมดให้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ

หากงานวิจัยนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใดผู้วิจัยกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ณัฐวัฒน์ ทองเหลือง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	2
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	3
กิตติกรรมประกาศ	4
สารบัญ	5
สารบัญตาราง	7
สารบัญรูป	8
บทที่ 1 บทนำ	10
1.1 ที่มาและความสำคัญ	10
1.2 วัตถุประสงค์	12
1.3 ขอบเขต	12
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 กระบวนการไฟโรไลซิส	13
2.2 ยางรถยนต์	15
2.3 คาร์บอนแบล็ค	18
2.4 มาตรฐานการดูดซับไอโอดีนคาร์บอนแบล็ค ASTM D1510	23
2.5 คุณภาพของคาร์บอนแบล็ค	25
2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	34
3.1 แผนการดำเนินงาน	34
3.2 วัสดุและสารเคมี	35
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	37
3.4 วิธีการทดลอง	41
3.4.1 การเตรียมคาร์บอนแบล็ค	41
3.4.2 การออกแบบการทดลอง	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 การกระตุ้นคาร์บอนแบล็คด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน.....	43
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง	43
3.6 การ Optimization และ Validation	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของไอโอดีนนัมเบอร์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง	45
4.1.1 การออกแบบและผลการทดลอง	42
4.1.2 ผลของการกระตุ้นทางเคมีต่อไอโอดีนนัมเบอร์ของคาร์บอนแบล็ค.....	48
4.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ในกระบวนการด้วยกระตุ้นทางเคมี.....	51
4.2 กำจัดโลหะหนัก (Demineralization).....	51
4.3 กลุ่มฟังก์ชันพื้นผิวบนคาร์บอนแบล็ค (Fourier-transform infrared spectroscopy; FTIR).....	52
4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน	53
(Thermogravimetric analysis; TGA).....	
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
5.1 สรุปผลงานวิจัย	55
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีเพื่อหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16	61
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16	63
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16	65
ภาคผนวก ง การการเปรียบธาตุโลหะในคาร์บอนแบล็ค	67
ประวัติผู้เขียน	69

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบผลผลิตของเขม่าดำซึ่งผลิตจากกรรมวิธีต่าง ๆ.....	20
ตารางที่ 2.2 คาร์บอนแบล็คบางประเภทที่ใช้ในยางรถยนต์พลาสติกและสี	21
ตารางที่ 2.3 คุณภาพคาร์บอนแบล็คเกรดการค้า.....	27
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน	34
ตารางที่ 3.2 การกำหนดตัวแปรและปัจจัยการทดลอง.....	42
ตารางที่ 3.3 การทดลองกระตุ้นด้วยสารกรดไนตริก	42
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของการออกแบบการทดลอง	47
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	47
ตารางที่ 4.3 ตารางโลหะหนักของคาร์บอนแบล็ค.....	52



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของยางรถยนต์.....	16
รูปที่ 2.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$	29
รูปที่ 2.3 แสดงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$	30
รูปที่ 3.1 คาร์บอนแบล็คจากโรงงานไฟโรไลซิส (บริษัท ไฟโร เอนเนอร์ยี จำกัด)	35
รูปที่ 3.2 กรดไนตริก (HNO_3 , 65%, EMSURE)	35
รูปที่ 3.3 กรดกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid; HF)	36
รูปที่ 3.4 จาระบีซิลิโคน (Silicone grease)	36
รูปที่ 3.5 ตัวทำปฏิกิริยาไอโอดีน (Iodine; I_2)	36
รูปที่ 3.6 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)	37
รูปที่ 3.7 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI)	37
รูปที่ 3.8 เพนทานอล.....	37
รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH meter ยี่ห้อ METTLER TOLEDO)	38
รูปที่ 3.10 เครื่องเขย่าผสมสาร	39
รูปที่ 3.11 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ	39
รูปที่ 3.12 เครื่องอบแห้ง	39
รูปที่ 3.13 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ.....	40
รูปที่ 3.14 เครื่องเหวี่ยง	40
รูปที่ 3.15 เครื่องแก้วและอุปกรณ์ชุด Reflux	40
รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการใช้งานแล้ว	41
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการกระตุ้นคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทางเคมี และความร้อน.....	43
รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการหาสถานะที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่สูงที่สุดจากโปรแกรม Design Expert	44
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงไอโอดีนนัมเบอร์ของคาร์บอนแบล็คจากการคาดการณ์เทียบกับการทดลอง.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริกต่อ ไอโอดีนนัมเบอร์.....	49
รูปที่ 4.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อไอโอดีนนัมเบอร์	50
รูปที่ 4.4 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริกและเวลาต่อ ไอโอดีนนัมเบอร์.....	50
รูปที่ 4.5 สภาวะตัวแปรที่เหมาะสมจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมี.....	51
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของคาร์บอนแบล็ค	53
รูปที่ 4.7 กราฟการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของคาร์บอนแบล็ค	54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากปริมาณสะสมของยางที่ใช้จนแล้วและความต้องการด้านอุตสาหกรรมน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มมากขึ้น กระบวนการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วในประเทศไทยจึงเพิ่มมากขึ้นตาม แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงและระยะเวลาของกระบวนการที่นานจึงเป็นข้อจำกัดความสามารถในการผลิต โพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอนในปฏิกิริยา Diels-Alder [1] นอกจากนี้ยังมีความท้าทายในด้านข้อจำกัดทางการตลาดของผลิตภัณฑ์ อุปสรรคทางด้านกฎหมาย รวมถึงสัดส่วนสิ่งปนเปื้อนในคาร์บอนแบล็คที่สูง ซึ่งปัจจุบันเป็นข้อจำกัดการใช้ในวัสดุในรูปแบบรีไซเคิลที่มีมูลค่าสูง [2-3] และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพต่อยางรถยนต์ เช่น ปริมาณของคาร์บอนจากถ่าน และสารระเหย เป็นต้น ดังนั้นคุณภาพของคาร์บอนแบล็คที่นำกลับมาใช้ใหม่จึงได้รับผลกระทบทางลบเนื่องจากปริมาณถ่านที่สูงในยางรถยนต์และมีการกระจายตัวแปรโดยพื้นที่ได้คั้งทางด้านซ้ายของค่าฐานนิยมจะมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ได้คั้งทางด้านขวาของฐานนิยม [4]

การผลิตคาร์บอนแบล็คเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันดิบ น้ำมันจากพืช หรือผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความหนาแน่นสูง เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง กระบวนการฟลูอิดคละตะไครกและกระบวนการเอธิลีนแครกกิง โดยคาร์บอนแบล็คเป็นรูปแบบของคาร์บอนคริสตัลไลน์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่ค่อนข้างสูง แม้ว่าจะต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีความแตกต่างกันจากเขม่าที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงกว่า และมีสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAH) ที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้คาร์บอนแบล็คมักถูกใช้เป็นสารประกอบในการเกิดออกซิเดชันของเชื้อเพลิง รวมไปถึงเป็นสารเติมแต่งสีและเสริมแรงในยางรถยนต์ ตลอดไปจนสารเติมแต่งสีและสารป้องกันการสึกหลอในพลาสติก งานพิมพ์ และเม็ดสีหมึกคาร์บอนแบล็ค [5] โดยมีมาตรฐาน ASTM D1765-16 เป็นระบบสำหรับการจำแนกประเภทคาร์บอนแบล็คเกรดการค้า โดยมีอักษรตัวแรกเพื่อระบุอัตราการเชื่อมโยงของคาร์บอนแบล็คที่เป็นสารประกอบโดยทั่วไปในยางรถยนต์ ตัวเลขหลักที่สองแสดงถึงขนาดอนุภาคเฉลี่ย และตัวเลขสองหลักสุดท้ายแสดงถึงโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค [6] และคาร์บอนแบล็คจากยางที่ได้รับความนิยมมากที่สุดอยู่ในเกรด N330 มีค่าไอโอดีนัมเบอร์ที่ 82 g/kg

คาร์บอนแบล็คที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCB) เป็นผลพลอยได้จากการไพโรไลซิสของยางรถยนต์ที่เป็นของเสีย โดยจะมีความแตกต่างอย่างมากจากคาร์บอนแบล็คเชิงพาณิชย์หรือเกรดการค้า (CCB) เนื่องจากมีโครงสร้างและสารประกอบที่ไม่พึงประสงค์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่น สารประกอบอินทรีย์และตะกอนคาร์บอน [7] ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มคาร์บอนแบล็คเกรดการค้า (CCB) ผสมกับ

คาร์บอนแบล็คที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCB) เพื่อที่จะชดเชยคุณสมบัติการเสริมแรงที่ต่ำของคาร์บอนแบล็คที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCB) [8-9] และพบว่าผลการเสริมแรงและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงภายในการบ่มยางที่ถูกเติมด้วย RCB นั้นน้อยกว่าที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็คทั่วไปเพียงเล็กน้อย แต่จากการวิเคราะห์ SEM รูปร่างอนุภาคของ RCB ยังคงมีความแตกต่างจาก CCB เมื่อเทียบในเกรด N330 โดยจะมีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่า

สำหรับการละลายสิ่งเจือปนอินทรีย์ในคาร์บอนแบล็คนั้น สามารถใช้ขั้นตอนการจัดแร่ธาตุ (demineralization) โดยสามารถใช้สารละลายทั้งที่เป็นกรดและด่างได้ และจากผลลัพธ์ที่ได้นั้นการทำให้ปราศจากแร่ธาตุด้วยกรดจะมีประสิทธิภาพในการละลายสิ่งเจือปนที่เป็นอินทรีย์มากกว่าการทำให้ปราศจากแร่ธาตุด้วยเบส [11-12] ซึ่งสารละลายกรดที่นิยมถูกใช้สำหรับการจัดแร่ธาตุ เช่น กรดไนตริก (HNO_3), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งกรดไนตริกสามารถละลาย นิกเกิล (Ni) และ วาเนเดียม (V) ได้ดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นเบส [13] และกรดไฮโดรคลอริกละลายสังกะสี (Zn) ได้ดีกว่ากรดซัลฟูริก [12] และขนาดก้อนเกาะหลวม (agglomerate) ของ CCB นั้นมากกว่า RCB หลังจากการจัดแร่ธาตุด้วยกรด เนื่องมาจากการสะสมของคาร์บอนที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิส [14]

การปรับปรุงคุณสมบัติคาร์บอนแบล็คนั้นสามารถใช้วิธีการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology ; RSM) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติแบบหลายตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองในกระบวนการที่มีความซับซ้อน [15] ดังนั้นวิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพในระดับสูงเมื่อมีการตอบสนองจากการทดลองที่ได้รับผลกระทบมาจากหลายตัวแปร ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากจึงนิยมใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [16-18] ดังนั้น Design Expert จึงเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบการทดลองทางสถิติ (DOE) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับการกำหนดจุดที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง ที่สามารถใช้เพื่อศึกษาจากการเปรียบเทียบข้อมูล การคัดกรองข้อมูลการทดลอง การกำหนดลักษณะเฉพาะของข้อมูลการทดลอง การเพิ่มประสิทธิภาพ การออกแบบอัตราส่วนผสม รวมไปถึงการออกแบบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการทดสอบของสถิติในกรณีที่มีปัจจัยซ้อนกัน [19] โดยประเมินผลการทดลองจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยในการระบุอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อผลลัพธ์ที่ต้องการ จากการแสดงผลถึงกระทบและความผิดปกติของข้อมูลจากการทดลอง [20]

คาร์บอนแบล็คที่ได้จากไพโรไลซิสยางที่เป็นของเสียซึ่งอยู่ในรูปของของแข็ง สามารถปรับปรุงคุณภาพจากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพเพื่อเพิ่มไอโอดีนัมเบอร์เทียบเท่าคาร์บอนแบล็คในเกรด N330 ที่ใช้เติมในสารประกอบของยาง ดังนั้นจึงเป็นวัตถุประสงค์ในการเพิ่มคุณภาพ RCB โดย

การกำจัดสิ่งเจือปนจากการบำบัดด้วยกรด และเพิ่มพื้นที่ผิวที่แสดงผลในรูปของไอโอดีนนัมเบอร์ โดยเงื่อนไขในการทดลองที่ถูกปรับให้ผลลัพธ์เหมาะสมกับกระบวนการนั้นได้รับการแก้ไขโดยใช้วิธีการตอบสนองพื้นผิว

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 หาสภาวะที่เหมาะสมในปรับปรุงคุณภาพคาร์บอนแบล็คจากโรงงานไฟโรว์ไลซิยางรยนต์ เพื่อให้ไอโอดีนนัมเบอร์เทียบเท่าคาร์บอนแบล็คเกรดการค้า N330

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี ของคาร์บอนแบล็คที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีและทางความร้อน ของคาร์บอนแบล็คที่ผลิตจากโรงงานไฟโรว์ไลซิยางรยนต์

1.3 ขอบเขต

1.3.1 คาร์บอนแบล็คที่ใช้ในการทดลอง ได้จากกระบวนการไฟโรว์ไลซิยางรยนต์ใช้แล้วของบริษัท ไฟโรว์-เอ็นเนอจี จำกัด

1.3.2 ใช้โปรแกรม Design expert v.13 ในการออกแบบการทดลอง โดยเลือกการออกแบบการทดลองแบบชนิดบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

1.3.3 ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวและลดปริมาณแร่ธาตุปนเปื้อนในคาร์บอนแบล็คด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี 0.5 g/ml เวลา 24 h

1.3.4 กระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วยกรดไนตริกที่สภาวะอุณหภูมิ 30-50 °C เวลา 6-24 h และอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี 0.25-1.0 g/ml

1.3.5 กระตุ้นด้วยกระบวนการทางความร้อนที่สภาวะ 850 °C เป็นเวลา 30 min

1.3.6 ทดสอบหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ด้วยมาตรฐาน ASTM D1510-16

1.3.7 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

1.3.8 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้คาร์บอนแบล็คที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เทียบเท่าคาร์บอนแบล็คเชิงการค้าเกรด N330

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพคาร์บอนแบล็ค

1.4.3 เพิ่มมูลค่าคาร์บอนแบล็คจากการไฟโรว์ไลซิยางรยนต์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คาร์บอนแบล็คที่จากการไพโรไลซิสจากยางรถยนต์นั้นมีอยู่จำนวนมากหากเทียบกับการไพโรไลซิสจากวัตถุดิบชนิดอื่นเนื่องในวัตถุดิบคือยางรถยนต์นั้นมีองค์ประกอบที่คาร์บอนแบล็คอยู่เป็นจำนวนมากนั่นเอง ซึ่งคาร์บอนแบล็คนั้นเป็นของเสียจากกระบวนการจึงได้เล็งเห็นถึงโอกาสในการเพิ่มมูลค่าของคาร์บอนแบล็ค โดยการนำคาร์บอนแบล็คนั้นกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางความร้อนให้มีพื้นที่ผิวเทียบเท่าคาร์บอนแบล็คเชิงการเชิงพาณิชย์เกรด N330 โดยอ้างอิงจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 กระบวนการไพโรไลซิส [21]

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) มาจากคำว่า Pyro ที่แปลว่า “ความร้อน” และ lysis ที่แปลว่า “แยกสลาย” ดังนั้น ไพโรไลซิส คือ การแยกสลายด้วยความร้อนด้วยสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศหรืออับอากาศในช่วงอุณหภูมิสูง เช่น 500-800 °C ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และอื่นๆ) ของเหลว (สารละลายอินทรีย์ และน้ำมัน) และของแข็ง (คาร์บอนแบล็ค) โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และสารประกอบที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและวิธีการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับการเผาในเตาเผา เนื่องจากจะได้น้ำมัน ชีวภาพเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ซึ่งนับว่านอกจากเป็นการกำจัดของเสียแล้วยังได้พลังงานทดแทนเป็น ผลพลอยได้อีกด้วย

2.1.1 หลักการของกระบวนการไพโรไลซิส

การทำให้ชีวมวลหรือวัตถุดิบซึ่งที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนัก ปราศจากความชื้นโดยอาศัยกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 120 – 150 °C หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500-600 °C เพื่อทำลายพันธะทางเคมีซึ่งเป็นขั้นตอนของ กระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก อะซิโตน เมทานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมถึงของแข็งที่เป็นคาร์บอนแบล็ค หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900 – 1,100 °C

ประกอบกับการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ระบบจะทำให้คาร์บอนแบล็คเกิดการแตกตัวได้เป็น ผลิตภัณฑ์ แก๊สต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการแก๊สฟิเคชันนั่นเอง

2.1.2 วิธีการไพโรไลซิส

วิธีการไพโรไลซิสแบ่งได้ตามวิธีการให้ความร้อนโดยมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

1) การไพโรไลซิสแบบปกติ (conventional pyrolysis) หรือ slow pyrolysis คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนน้อยกว่า $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Sec}$ และอุณหภูมิที่ใช้มีค่าน้อยกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมัน และถ่าน ส่วน slow pyrolysis gasification เป็นกระบวนการแปรรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในถ่านและน้ำมัน ให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการที่ละเอียดอ่อนและซับซ้อน ซึ่งแก๊สชีวมวลที่ได้จะเป็นแก๊สที่มีพลังงานระดับปานกลาง และมีความสะอาด โดยวิธีการแปรรูปพลังงานได้โดยการนำถ่านไปเผาในฟลูอิดไดส์เบด (fluidized bed) ของทรายเป็นตัวกลางหรือ packing โดยทำให้ทรายมีความร้อนสูงขึ้น และส่งความร้อนผ่านทรายดังกล่าวไปยัง bed ซึ่งอยู่ถัดไป จากนั้นจะทำให้เกิดการกลั่นสลายของถ่านในเบดนี้ ถ่านส่วนหนึ่งในเบดที่สองจะถูกเผาเพื่อให้ความร้อนกับ pyrolysis gas และนำความร้อนที่ได้ในฟลูอิดไดส์เบดแรก หรือให้ความร้อนจากภายนอกด้วยการป้อนเข้าไปพร้อมกับชีวมวลเปียกที่ความดันสูง

2) การไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (flash หรือ fast pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง $10\text{--}10,000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Sec}$ และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $400\text{--}1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือแก๊สและของเหลว และได้มีการค้นพบว่า fast pyrolysis gasification ได้มีไอของโมเลกุลเกิดขึ้นระหว่างการกลั่นสลายนั้นสามารถที่จะแตกตัวที่ อุณหภูมิสูงที่สามารถให้สารโอเลฟินและผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถที่จะคงอยู่ได้ถ้าได้รับความร้อนก่อนที่จะปฏิกิริยาต่อไปจะเกิดขึ้น สารพวกโอเลฟินเป็นสารที่สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นสารเคมีอื่นที่ได้ เช่น แปรสภาพอย่างง่ายให้เป็นแก๊สโซลีน สารไฮโดรคาร์บอนหรือ แอลกอฮอล์

2.1.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

1) ถ่านชาร์รวมถึงคาร์บอนแบล็ค เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยมีค่า ความร้อน $4,800\text{ kcal/kg}$ ในด้านสิ่งแวดล้อมถ่านชาร์ช่วยลดปริมาณมลพิษจากก๊าซซัลเฟอร์และไดออกไซด์ได้ รวมถึงสามารถนำไปผลิตเป็นวัตถุดิบต่างๆได้ เช่น ตัวดูดซับน้ำมัน วัสดุก่อสร้าง ฉนวน ปุ๋ย ตัวกรอง หรือถ่านกัมมันต์

2) ก๊าซไพโรไลซิส (pyrolysis gas) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซซึ่งเกิดจากก๊าซที่ไม่ผ่านการควบแน่น ตัวอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และก๊าซที่มีมวลโมเลกุลต่ำก๊าซ โดยการไพโรไลซิสมีค่าความร้อนที่ประมาณ 1.8 kcal/L ด้วยเหตุที่ค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงต้องนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งและยังเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต กระแสไฟฟ้า

3) น้ำมันชีวภาพ (pyrolysis oil or bio-oil) ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้อาจใช้เป็นเชื้อเพลิง ของเหลวหรือสกัดเป็นสารเคมี น้ำมันชีวภาพ ยังมีชื่อที่เรียกอื่นๆ อีก เช่น pyrolysis oil, bio-crude oil, bio-fuel-oil, liquid smoke, pyrolysis tar, pyro-ligneous acid เป็นต้น ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการให้ความร้อน (slow หรือ fast pyrolysis) ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ มีค่าต่ำคือประมาณ 17-19 MJ/kg เมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นคือประมาณ 42-44 MJ/kg

2.1.4 สภาพที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส

โดยทั่วไปแล้วการไพโรไลซิสจะได้น้ำมันประมาณ 38-56% และได้ก๊าซประมาณ 10-30% ส่วนที่เหลือเป็นของแข็ง น้ำมันที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และน้ำมันหนักผสมรวมกัน ปริมาณและคุณภาพของน้ำมันและ ก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังต่อไปนี้

1) สภาพที่ใช้ในการไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการเผา บรรยากาศในปฏิกรณ์ และระบบการป้อนสาร เป็นต้น

2) ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

3) วัตถุดิบที่ป้อนเข้า เช่น ขนาดของสาร ชนิดและส่วนผสมของสาร เป็นต้น

ซึ่งกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สารใดสารหนึ่งเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารนั้นให้มีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปจะทำกับยางรถยนต์ เมื่อนำยางรถยนต์มาผ่านกระบวนการแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำมันที่มีน้ำมันเบนซิน ดีเซล และน้ำมันหนักผสมรวมกัน รวมถึงยังได้ก๊าซ ซึ่งแต่เดิมนั้น กระบวนการ ไพโรไลซิสนั้นถูกประเมินว่าไม่คุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ แต่ในปัจจุบันที่น้ำมันเชื้อเพลิงมี ราคาสูงขึ้นมากจึงมีการพัฒนากระบวนการและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่ได้จนเป็นที่แพร่หลาย

2.2 ยางรถยนต์ [22]

2.2.1 โครงสร้างในยางรถยนต์

ซึ่งอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทต่อการเจริญเติบโตหรือการขยายตัวของเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยเฉพาะด้านการลงทุนและการจ้างงานทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์สันดาบและไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมรถยนต์ ฉะนั้นการศึกษาใดๆเกี่ยวกับลักษณะทั่วไปทางด้านการผลิตรวมถึงการตลาดของอุตสาหกรรมยางรถยนต์จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำหนดปัจจัยทางด้านอุปสงค์และปัจจัยทางด้านอุปทานอันเป็นสาเหตุทำให้ราคาของยางรถยนต์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างชิ้นพื้นฐานในการผลิตยางรถยนต์โดยในแต่ละส่วนหรือ

องค์ประกอบจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับหน้าที่และประสิทธิภาพในการใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกส่วนประกอบของยางออกได้เป็น 6 ส่วนได้แก่



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์

1) หน้ายาง (Tread) คือส่วนที่อยู่นอกสุดของยาง และเป็นส่วนที่สัมผัสผิวดถนนโดยตรง ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันของมีคมหรือสิ่งแปลกปลอมที่จะสร้างความเสียหายต่อโครงยางและหน้ายาง โดยจะประกอบไปด้วยดอกยางและร่องยางที่ทำหน้าที่ให้ยึดเกาะถนนเวลาวิ่ง และในปัจจุบันดอกยางมีอยู่หลายลักษณะ โดยแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไป จึงควรเลือกลักษณะดอกยางให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

2) ไหล่ยาง (Shoulder) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกันระหว่างหน้ายางกับแก้มยาง มีความหนาเทียบเท่ากับหน้ายาง โดยทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อนภายในยางเพื่อลดความร้อนสะสมในยาง

3) แก้มยาง (Sidewall) เป็นส่วนด้านข้างสุดของยาง ที่ไม่ได้สัมผัสพื้นผิวดถนนขณะที่รถวิ่งอยู่และเป็นส่วนที่ยืดหยุ่นมากที่สุด

4) โครงยาง (Carcass) เป็นส่วนประกอบหลักของยาง ซึ่งจะคงรูปร่างและมีหน้าที่รักษาความดันลมภายในยาง เพื่อให้ยางสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ รวมถึงต้องทนทานต่อแรงกระแทกหรือสั่นสะเทือนจากถนน

5) ผ้าใบเสริมหน้ายาง (Breaker or Belt) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างหน้ายาง (Tread) กับโครงยาง (Carcass) โดยทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับหน้ายาง และป้องกันไม่ให้โครงยางชำรุดเสียหายเสียรูปจากสิ่งอันตรายต่างๆ จากถนน

6) ขอบยาง (Bead) ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นลวดเหล็กกล้า (High Carbon Steel) ที่ช่วยยึดส่วนปลายทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้ในส่วนของขอบยาง (Bead) มีความแข็งแรง จึงเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง ที่จะต้องทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ลมยางรั่วซึมออกมาจากยาง นอกจากนี้ยังมียางรถยนต์ยังมี ส่วนประกอบอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น ผ้าใบหุ้มขดลวดและยางแข็งๆ ที่มีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยม (Bead Filer) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างขอบและแก้มยาง และยังมีองค์ประกอบผ้าใบหุ้มขอบลวดที่อยู่ด้านนอกสุดของขอบยาง เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายกับโครงยางซึ่งจะส่งผลให้เสียรูป จากการเปลี่ยนยางในแต่ละครั้ง

2.2.3 กระบวนการผลิตยางรถยนต์

2.2.3.1) การผสมวัตถุดิบ (Mixing) ส่วนผสมสำคัญได้แก่

1) ยางธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตยางรถยนต์ คือ ช่วยทำให้ยางรถยนต์มีความยืดหยุ่นทนต่อแรงกระแทกและแรงดึงได้ดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมใช้งานในช่วง -40 ถึง 70 °C และไม่สามารถทนต่อน้ำมันบางประเภทได้ ดังนั้นจึงพัฒนาและก่อให้เกิดยางสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัด ให้มีคุณสมบัติดีกว่ายางธรรมชาติ โดยยางสังเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1 ยางที่มีคุณสมบัติทนความร้อน แต่คุณสมบัติทานด้านความเหนียวและความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ได้แก่ Styrene Butadiene Rubber และ Polybutadiene Rubber กลุ่มที่ 2 เป็นยางที่มีคุณสมบัติทนต่อน้ำมันรวมถึงความร้อนและโอโซน ยางสังเคราะห์ในกลุ่มนี้ได้แก่ Chloroprene Neoprene Rubber และ Acrylonitrile Butadiene Rubber

2) คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินดิบ ที่เผาไหม้โดยไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยให้ยางมีความแข็งแรง ทำให้ยางมีความทนทาน และทนต่อรอยขีดข่วนต่าง ๆ จากสิ่งแปลกปลอมจากพื้นถนนหรือสภาพแวดล้อม

3) สารเคมีต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผสมยาง ซึ่งการผสมยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และผงเขม่าดำ และตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเตรียมเป็นยาง Compound Rubber ที่จะนำไปขึ้นรูป สารเคมีที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มสารที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent) กลุ่มใส่เพื่อเพิ่มยืดหยุ่น กลุ่มนี้ได้แก่ กำมะถัน เป็นต้น กลุ่มสารป้องกันบางเสื่อมสภาพของยาง (Protective Agent) สารกลุ่มนี้ได้แก่ สารโอโซน เป็นต้น กลุ่มสารช่วยกระบวนการผลิตยาง เช่น น้ำมัน และช่วยให้ยางมีคุณสมบัตินุ่มนวล หรือสารอื่นๆ เช่น สารที่ทำให้ยางฟู หรือใส่ให้ยางมีสีต่าง ๆ ตามความต้องการทางตลาด

2.2.3.2) การทำลวดขอบยาง (Bundling), การฉาบบาง (Coating) การขึ้นรูปขอบลวด (Foaming)

2.2.3.3) การทำโครงผ้าใบและการขึ้นรูปยางเข้ากับผ้าใบ จากนั้นนำแผ่นยางไปตัด ก็จะได้ โครงผ้าใบและเข็มขัดรัดหน้ายางเส้นลวด

2.2.3.4) การขึ้นรูปเส้นลวดเหล็กและการผสมยางกับเส้นลวด จากนั้นจะได้เข็มขัดรัดหน้ายาง

2.2.3.5) การขึ้นรูปแก้มยางและหน้ายาง หลังจากกระบวนการนี้ก็จะได้โครงยางสำเร็จรูป (Green Tire)

2.2.3.6) การประกอบโครงยาง

2.2.3.7) การอบยาง (Curing Machine) เครื่องอบยาง (Curing Press) เป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่อัดลายดอกยางลงบนโครงยางสำเร็จรูป เพื่อให้เนื้อยางสุก

2.2.3.8) ตัดเนื้อยางส่วนที่เกิน (Trimming)

2.2.3.9) ตรวจสอบความสมดุลของยาง

2.2.3.10) ขึ้นรูปยาง เป็นการนำเอายางที่ผสมแล้ว มาขึ้นรูปเป็นลักษณะของส่วนต่าง ๆ ในยาง โดยอาจนำส่วนอื่นๆอื่น ๆ เช่น ผ้าใบ เข้ามาเป็นส่วนประกอบ โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง มี 2 ลักษณะคือ 1) เครื่องจักรประเภท (Extrusion) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปยาง โดยอาศัยแรงดันจากการหมุนของสกรูดันยางผสมผ่านแม่พิมพ์ออกมา Extrusion ใช้ในการขึ้นรูปยางในส่วนโครงยางและขอบยาง 2) เครื่องจักรประเภท (Calendar) โดยเป็นลักษณะการรีดยาง โดยลักษณะการรีดยางผสมที่เคลือบหรือฉาบกับวัสดุอื่น ๆ ให้มีความหนา โดยอาศัยการรีดผ่านลูกกลิ้งจำนวน 2 ลูก ซึ่งใช้สำหรับขึ้นรูปในส่วนของชั้นผ้าใบ และเข็มขัดรัดหน้ายาง

2.3 คาร์บอนแบล็ค [23]

คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) เป็นคาร์บอนที่ใช้เรียกถ่านอุตสาหกรรม (Industrial carbon) โดยทั่วไปถ่านอุตสาหกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่งคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์เคมีปิโตร ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบเสริมกำลังในการผลิตยางรถยนต์และใช้เป็นผงแม่สีสำหรับสีดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตหมึกและสีชนิดต่างๆ คำว่าคาร์บอนแบล็คนี้ในทางการค้าและอุตสาหกรรมภายในประเทศเรียกว่า เขม่าดำ

2.3.1 กรรมวิธีการผลิตเขม่าดำ

โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตเขม่าดำใช้หลักการเผาสารไฮโดรคาร์บอนให้ลุกไหม้แบบไม่สมบูรณ์ในเปลวไฟที่แผ่กระจายอย่างกว้างๆ แล้วแยกเอาเขม่าดำที่เกิดขึ้นออกจากเปลวไฟ โดยให้เขม่าดำนี้ไปกระพือโลหะที่เย็นหรือโดยวิธีดักด้วย โดยกรรมวิธีการผลิตสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ กรรมวิธีการใช้ความร้อนสูง (Thermal black process) กรรมวิธีการเผาไหม้ในเตาแบบท่อ

(Channel black process) กรรมวิธีการเผาไหม้ในเตาเผาธรรมดา (Furnace black process) การเผาทั้ง 3 ลักษณะอาจใช้แก๊ส (Gas furnace process) หรือใช้น้ำมัน (Oil furnace process) ก็ได้

2.3.1.1 กรรมวิธีการใช้ความร้อนสูง เป็นขบวนการที่ใช้หลักการสลายตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงในที่ไม่มีอากาศ วิธีนี้มักใช้ในการผลิตเขม่าดำชนิดเทอร์มอลแบล็ค (Thermal black) และอะเซทีนแบล็ค (Acetylene black) เป็นขบวนการผลิตแบบแบช (Batch process) ขบวนการประกอบไปด้วยเตาเผา 2 ลูก ซึ่งด้านข้างด้วยวัสดุทนไฟและมีอิฐทนไฟบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งเผาอิฐที่อยู่ภายในให้มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1300 องศาเซลเซียส โดยการใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ต่อจากนั้นจึงดับเปลวไฟแล้วจึงผ่านสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งโดยทั่วไปใช้แก๊สจากธรรมชาติส่งผ่านเข้าไปในเตาไฟซึ่งยังร้อนอยู่ แก๊สที่ได้ออกมาจากเตาเผาส่วนใหญ่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดซึ่งจะเป็นตัวพาเอาเขม่าดำผ่านเข้าไปหอล้อยเย็น ตอนที่อุณหภูมิจะลดลงเหลือ 125 องศาเซลเซียส เขม่าดำจะถูกแยกออกจากแก๊สดังกล่าวด้วยเครื่องไซโคลน แล้วแยกด้วยถังกรองอีกชั้นหนึ่งเพื่อให้แยกสมบูรณ์ขึ้น เขม่าดำที่ได้จะถูกลำเลียงผ่านสายพานเข้าสู่หน่วยบรรจุซึ่งจัดเก็บในรูปแบบผงหรือเม็ด

2.3.1.2 กรรมวิธีการเผาแบบท่อ เป็นการผลิตเขม่าดำโดยจุดเชื้อเพลิงให้ไฟลุกไหม้ในท่อซึ่งเจาะรูเป็นรูเล็ก ๆ จำนวนหลายพันรู แผ่นเป็นรูปพัดจำนวนหลายพันอัน เขม่าดำจากเปลวไฟเมื่อไปกระทบกับท่อเหล็กกล้า ซึ่งเจาะเป็นช่องเล็ก ๆ เพื่อการระบายแก๊สที่เหลือวางอยู่เหนือเปลวไฟก็จะไปเกาะติดอยู่เมื่อทำให้ท่อเหล็กกล้าเลื่อนไปมาผ่านเครื่องชุดซึ่งเรียงอยู่ที่ เขม่าดำเกาะติดอยู่ก็จะตกลงไปในที่รองรับแล้วถูกลำเลียงไปแยกยังเครื่องแยกเพื่อเอาสกปรกออก เช่น เศษผง เศษถ่าน ออกชั้นหนึ่งก่อนแล้วผ่านไปแยกด้วยไซโคลนเป็นครั้งที่สองจึงผ่านเขาถึงเก็บ

2.3.1.3 กรรมวิธีการเผาไหม้ในเตาเผาธรรมดา วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเขม่าดำโดยวิธีนี้คือแก๊สธรรมชาติ แก๊สธรรมชาติผสมน้ำมัน หรือน้ำมันเพียงอย่างเดียววิธีนี้คล้ายกับวิธีการเผาไหม้ในเตาแบบท่อคือทำให้วัตถุดิบลุกไหม้บางส่วน แต่ใช้แก๊สแทนอากาศในปริมาณมากในครั้งเดียวแทนที่จะใช้เปลวไฟขนาดเล็ก จำนวนมาก แก๊สหรือสารไฮโดรคาร์บอนจะถูกนำเข้าไปในเตาซึ่งเผาให้ร้อน โดยใช้สารไฮโดรคาร์บอนเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 1250 ถึง 1450 °C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกด้วยความร้อนจะผ่านไปยังหอล้อยเย็น ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเหลือประมาณ 200 °C แล้วแยกเอาเขม่าดำออกจากแก๊สที่ไม่ต้องแยกด้วยโดยใช้ไฟฟ้าสถิต นำมาบดให้เป็นอนุภาคเล็กๆ แล้วแยกต่อด้วยเครื่องไซโคลนดังตารางที่ 1 ตารางการเปรียบเทียบผลผลิตของเขม่าดำซึ่งผลิตจากกรรมวิธีต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบผลผลิตของเขม่าดำซึ่งผลิตจากกรรมวิธีต่างๆ

กรรมวิธีการผลิต	เขม่าดำที่ได้, ร้อยละ
1.กรรมวิธีในเตาเผาแบบท่อ (Channel black process)	1.2 – 5.6
2.กรรมวิธีในเตาเผาแบบธรรมดา (Gas furnace black process)	11 - 30
3.กรรมวิธีใช้ความร้อนสูง (Thermal black process)	40 - 53
4.กรรมวิธีในเตาเผาน้ำมัน (Oil furnace black process)	50 - 70

2.3.2 การใช้งานทั่วไป [24]

คาร์บอนแบล็คที่ใช้กันมากที่สุด (70%) เป็นเม็ดสีและกระเบื้องเสริมแรงในยางรถยนต์คาร์บอนแบล็คยังช่วยระบายความร้อนออกจากดอกยางและบริเวณสายพานของยางลดความเสียหายจากความร้อนและยืดอายุการใช้งาน ประมาณ 20% ของการผลิตของโลกไปสู่สายพานท่อและสินค้าอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางล้อ เครื่องจักรส่วนใหญ่จะใช้เป็นเม็ดสีในหมึกสีเคลือบและพลาสติก

คาร์บอนแบล็คถูกเพิ่มเข้าไปในโพลีโพรพิลีนเนื่องจากดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งจะทำให้วัสดุย่อยสลาย อนุภาคคาร์บอนแบล็คยังใช้ในวัสดุดูดซับเรดาร์บางชนิดในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์และผงหมึกเครื่องพิมพ์เลเซอร์และในหมึกและสีอื่น ๆ ความแข็งแรงและความเสถียรในการย้อมสีที่สูงของคาร์บอนแบล็คยังนำไปใช้ในการทำสีของเรซินและฟิล์ม คาร์บอนแบล็คถูกนำมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ คาร์บอนแบล็คเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีใช้เป็นสารตัวเติมผสมในพลาสติกอีลาสโตเมอร์ฟิล์มกาวและสี ใช้เป็นสารเติมแต่งป้องกันไฟฟ้าสถิตในผ้าและท่อเชื้อเพลิงรถยนต์

คาร์บอนสีดำจากพืชที่ใช้เป็นส่วนผสมอาหารที่รู้จักกันในยุโรปเป็นสารเติมแต่ง E153 ได้รับการอนุมัติให้ใช้เป็นสารเติมแต่ง E153 (คาร์บอนแบล็คหรือคาร์บอนจากผัก) ในออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ [6] แต่ถูกห้ามในสหรัฐอเมริกา เม็ดสีคาร์บอนแบล็คถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเป็นเวลาหลายปี ใช้ในขวดนม UHT หลายชั้นในสหรัฐอเมริกาบางส่วนของยุโรปและเอเชียและแอฟริกาใต้และในสินค้าเช่นภาชนะอาหารที่ใช้ไมโครเวฟได้และภาชนะเนื้อในนิวซีแลนด์

การตรวจสอบคาร์บอนแบล็คของรัฐบาลแคนาดาในปี 2554 สรุปได้ว่าคาร์บอนแบล็คสามารถใช้ในผลิตภัณฑ์ต่อไปได้ซึ่งรวมถึงบรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับผู้บริโภคในแคนาดา เนื่องจาก “ในผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคส่วนใหญ่คาร์บอนแบล็คจะถูกผูกไว้ในเมทริกซ์และไม่สามารถสัมผัสได้เช่นเป็นเม็ดสีในพลาสติกและยาง” และ “มีการเสนอว่าคาร์บอนแบล็คจะไม่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณหรือความเข้มข้นหรือต่ำกว่า เงื่อนไขที่ก่อให้เกิดหรืออาจก่อให้เกิดอันตรายในแคนาดาต่อชีวิตหรือสุขภาพของมนุษย์”

ในออสเตรเลียมีดีคาร์บอนแบล็คในบรรจุภัณฑ์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของกฎระเบียบด้านบรรจุภัณฑ์ของสหภาพยุโรปหรือสหรัฐอเมริกา หากมีการใช้สีใด ๆ จะต้องเป็นไปตามข้อตกลงบางส่วนของยุโรป

การผลิตรวมอยู่ที่ประมาณ 8,100,000 เมตริกตัน (8,900,000 ตันสั้น) ในปี 2549 การบริโภคคาร์บอนแบล็คทั่วโลกประมาณ 13.2 ล้านเมตริกตันคิดเป็นมูลค่า 13,700 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2558 คาดว่าจะสูงถึง 13.9 ล้านเมตริกตันคิดเป็นมูลค่า อยู่ที่ 14.4 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2559

คาดว่าจะการบริโภคทั่วโลกจะรักษา CAGR (อัตราการเติบโตต่อปี) ที่ 5.6% ระหว่างปี 2559 ถึง 2565 โดยแต่ละระดับ 19.2 ล้านเมตริกตันมูลค่า 20.4 พันล้านเหรียญสหรัฐภายในปี 2565

2.3.3 เสริมคาร์บอนแบล็ค [24]

การใช้คาร์บอนแบล็คในปริมาณสูงสุดเป็นสารเสริมแรงในผลิตภัณฑ์ยางโดยเฉพาะยางรถยนต์ ในขณะที่การวัลคาไนซ์แบบเหงือกบริสุทธิ์ของสไตรีน – บิวทาไดอีนมีความต้านทานแรงดึงไม่เกิน 2 MPa และความต้านทานต่อการขัดถูเล็กน้อยการผสมด้วยคาร์บอนแบล็ค 50% โดยน้ำหนักจะเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการสึกหรอแสดงในตารางด้านล่าง มักใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศในอีลาสโตเมอร์สำหรับส่วนประกอบควบคุมการสั่นสะเทือนของเครื่องบินเช่นที่ยึดเครื่องยนต์

ตารางที่ 2.2 คาร์บอนแบล็คบางประเภทที่ใช้ในยางรถยนต์พลาสติกและสี [6]

ชื่อ	อักษรย่อ	ASTM	ขนาดอนุภาค นาโนเมตร	ความต้านทานแรงดึงMPa	การขัดถูในห้องปฏิบัติการ สัมพัทธ์	รอยขีดข่วนสัมพัทธ์กับ Roadwear
Super Abrasion Furnace	SAF	N110	20–25	25.2	1.35	1.25
SAF ระดับกลาง	ISAF	N220	24–33	23.1	1.25	1.15
เตาขัดสูง	HAF	N330	28–36	22.4	1.00	1.00

ตารางที่ 2.2 คาร์บอนแบล็คบางประเภทที่ใช้ในยางรถยนต์พลาสติกและสี [6] (ต่อ)

ชื่อ	อักษรย่อ	ASTM	ขนาดอนุภาคนาโนเมตร	ความต้านทานแรงดึงMPa	การขัดถูในห้องปฏิบัติการสัมพัทธ์	รอยขีดข่วนสัมพัทธ์กับ Roadwear
ช่องทางการประมวลผลที่ง่าย	EPC	N300	30–35	21.7	0.80	0.90
เตาหลอมอย่างรวดเร็ว	FEF	N550	39–55	18.2	0.64	0.72
เตาโมดูลัสสูง	HMF	N660	49–73	16.1	0.56	0.66
เตากึ่งเสริมแรง	SRF	N770	70–96	14.7	0.48	0.60
ความร้อนที่ดี	กท	N880	180–200	12.6	0.22	-
ความร้อนปานกลาง	มท	N990	250–350	9.8	0.18	-

ผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมดที่มีคุณสมบัติในการสึกหลอและทนต่อแรงดึงและการเสียดสีเป็นสิ่งสำคัญต้องใช้คาร์บอนแบล็คดังนั้นจึงมีสีดำ ในกรณีที่คุณสมบัติทางกายภาพมีความสำคัญ แต่ต้องการสีอื่นที่ไม่ใช่สีดำเช่นรองเท้าเทนนิสสีขาวซิลิกาที่ตกตะกอนหรือรวมกันจะถูกแทนที่ด้วยคาร์บอนแบล็ค คีฟเลอร์ที่ใช้ซิลิกากำลังได้รับส่วนแบ่งการตลาดในยางรถยนต์เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงและการจัดการบนถนนเปียกได้ดีขึ้นเนื่องจากการสูญเสียการหมุนที่ต่ำกว่า คีฟเลอร์ซิลิกาตามเนื้อผ้ามีคุณสมบัติในการสึกกร่อนที่แย่ง แต่เทคโนโลยีได้ค่อยๆพัฒนาไปจนถึงจุดที่สามารถจับคู่กับประสิทธิภาพการขัดถูของคาร์บอนแบล็คได้

2.3.4 เคมีพื้นผิวและพื้นผิว [24]

คาร์บอนแบล็คทั้งหมดมีสารประกอบเชิงซ้อนออกซิเจนที่ถูกดูดซับด้วยเคมี (เช่นคาร์บอกซิลิกควิ-โนนิคแลคโทนิคกลุ่มฟีนอลิกและอื่น ๆ) บนพื้นผิวอยู่ในระดับที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการผลิต กลุ่มออกซิเจนบนพื้นผิวเหล่านี้เรียกรวมกันว่าเนื้อหาที่ระเหยได้ เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากมีเนื้อหาที่ระเหยได้

อุตสาหกรรมเคลือบและหมึกพิมพ์ขอบเขตของคาร์บอนแบล็คที่มีกรดออกซิโดซ์ กรดถูกฉีดพ่นในเครื่องอบแห้งอุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อเปลี่ยนเคมีพื้นผิวโดยธรรมชาติของสีดำ ปริมาณออกซิเจนที่ถูกพันธะทางเคมีบนพื้นผิวของสีดำจะเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มลักษณะการทำงาน

2.3.5 ความปลอดภัย [24]

1) การก่อมะเร็ง

คาร์บอนสีดำอาจจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์และจัดเป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่ม 2B เพราะมีหลักฐานเพียงพอในสัตว์ทดลองที่มีหลักฐานไม่เพียงพอในมนุษย์ศึกษาทางระบาดวิทยา หลักฐานการก่อมะเร็งในการศึกษาในสัตว์ทดลองมาจากการศึกษาเกี่ยวกับการสูดดมเรื่อรัง 2 ครั้งและการศึกษาการฉีดเข้าช่องท้องในหนู 2 ครั้งซึ่งแสดงให้เห็นอัตราการเป็นมะเร็งปอดในสัตว์ทดลองที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาการสูดดมในหนูไม่ได้แสดงให้เห็นว่ามะเร็งปอดในสัตว์ทดลองมีอัตราที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลทางระบาดวิทยาจากการศึกษาสามกลุ่มของคณงานผลิตภัณฑ์คาร์บอนแบล็ค การศึกษาสองชิ้นจากสหราชอาณาจักรและเยอรมนีโดยมีคณงานมากกว่า 1,000 คนในแต่ละกลุ่ม การศึกษาพบว่าอัตราการเสียชีวิตจากมะเร็งปอดเพิ่มขึ้น การศึกษาครั้งที่สามเกี่ยวกับคณงานคาร์บอนแบล็คกว่า 5,000 คนในสหรัฐอเมริกาไม่ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราการเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้น การค้นพบใหม่ของการตายของโรคมะเร็งปอดเพิ่มขึ้นในการปรับปรุงจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สหราชอาณาจักรคาร์บอนสีดำอาจจะเป็นสารก่อมะเร็งชั้นปลาย อย่างไรก็ตามการศึกษาล่าสุดและใหญ่กว่าจากเยอรมนีไม่ได้ยืนยันสมมติฐานนี้

2) การทำงาน

มีแนวทางปฏิบัติที่เข้มงวดและจัดทำขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่าพนักงานที่ผลิตคาร์บอนแบล็คจะไม่เสี่ยงต่อการสูดดมคาร์บอนแบล็คในปริมาณที่ไม่ปลอดภัยในรูปแบบดิบ แนะนำให้ใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจเพื่อป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสูดดมคาร์บอนแบล็คอย่างเหมาะสม ประเภทของการป้องกันระบบทางเดินหายใจที่แนะนำจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คที่ใช้

คนสามารถสัมผัสกับคาร์บอนแบล็คในที่ทำงานได้โดยการสูดดมและสัมผัสกับผิวหนังหรือดวงตา การบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัย (OSHA) ได้กำหนดขีด จำกัด ทางกฎหมาย (ขีด จำกัดการสัมผัสที่อนุญาต) สำหรับการสัมผัสคาร์บอนแบล็คในสถานที่ทำงานที่ 3.5 mg/m^3 ในวันทำงาน 8 h สถาบันแห่งชาติเพื่อความปลอดภัยและอาชีวอนามัย (NIOSH) ได้มีการกำหนดขีด จำกัดของการเปิดรับแสงที่แนะนำ (REL) 3.5 mg/m^3 กว่าวันทำงาน 8 h ที่ระดับ 1750 mg/m^3 คาร์บอนแบล็คเป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพทันที

2.4 มาตรฐานการดูดซับไอโอดีนคาร์บอนแบล็ค ASTM D1510 [25]

คาร์บอนแบล็คถูกนำมาใช้ในการใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงสารเติมแต่งสำหรับวัสดุยาง ผลิตภัณฑ์พลาสติก หมึกพิมพ์ และสารเคลือบ เป็นหนึ่งในสารเคมีทางอุตสาหกรรมชั้นนำที่ผลิตขึ้นใน

โลกโดยพิจารณาจากน้ำหนักเมตริกประจำปี ในปี 2015 มีการผลิตคาร์บอนแบล็คมากกว่า 12 ล้านเมตริกตันทั่วโลก การใช้งานคาร์บอนแบล็คส่วนใหญ่อยู่ในอุตสาหกรรมยาง

2.4.1 จุดประสงค์ของการทดสอบจำนวนการดูดซับไอโอดีน

หมายเลขการดูดซับไอโอดีน (IAN) สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็คซึ่งมูลค่าของตัวคาร์บอนแบล็คส่วนหนึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตรพื้นที่ผิวที่สูง (S-V) IAN กำหนดปริมาณของสารละลายหรือตัวทำละลายที่สามารถสกัดได้ ซึ่งสามารถลดอัตราส่วน S-V และยังลดคุณภาพและมูลค่าของวัสดุพื้นฐาน เมื่อมีสายพันธุ์ที่มีความผันผวนสูงหรือสามารถสกัดได้ IAN จะลดลงและบ่งชี้ถึงระดับสิ่งสกปรกที่สูงขึ้นภายในคาร์บอนแบล็ควัสดุ. IAN ที่ต่ำกว่ายังสามารถบ่งบอกถึงปัญหาในสภาพการผลิตหรืออายุของวัสดุ

วิธีทดสอบที่ได้รับความนิยมสูงสุดวิธีหนึ่งสำหรับ IAN คือวิธี ASTM D1510 สรุปสองขั้นตอน: ขั้นตอนการไทเทรตแบบแมนนวลและขั้นตอนทางเลือกโดยใช้ระบบการเตรียมและการวิเคราะห์แบบอัตโนมัติ เช่น เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

2.4.2 สรุปวิธี ASTM D1510

วิธีแรก (วิธี A) ทดสอบตัวอย่างคาร์บอนแบล็คที่ชั่งน้ำหนักแล้วซึ่งบำบัดด้วยสารละลายไอโอดีนมาตรฐานไอโอดีนส่วนเกินจะถูกไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ได้มาตรฐาน วิธีที่สอง (วิธี B) ยังทดสอบตัวอย่างคาร์บอนแบล็คที่ชั่งน้ำหนักแล้วซึ่งบำบัดด้วยสารละลายไอโอดีนที่ได้มาตรฐาน ในวิธีนี้ ตัวอย่างจะได้รับการบำบัดโดยใช้ตัวประมวลผลตัวอย่างอัตโนมัติและผ่านการไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้สารละลายมาตรฐานของโซเดียมไฮโอซัลเฟต ในทั้งสองวิธี ไอโอดีนที่ดูดซับจะถูกรายงานเป็นเศษส่วนของมวลรวมของคาร์บอนสีดำ

2.4.3 ความเสถียรของโซลูชัน

ข้อกำหนดการผลิตของ Spex CertiPrep สำหรับผลิตภัณฑ์ไอโอดีนและโซเดียมไฮโอซัลเฟตของเราเป็นไปตามและเกินค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดโดยวิธี ASTM (โซเดียมไฮโอซัลเฟต: 0.0394 ± 0.00008 N; ไอโอดีน: 0.0473 ± 0.00003 N) Spex ผลิตภายใต้ ISO/IEC 17025 และ ISO/IEC Guide 34 สารละลายไอโอดีนและโซเดียมไฮโอซัลเฟตอาจมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติระหว่างการเก็บรักษาเมื่อเวลาผ่านไปแม้ในภาชนะที่ปิดสนิท เมื่อเปิดภาชนะแล้ว สารละลายทั้งสองอาจเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ภาชนะเปิดที่สัมผัสกับอากาศอาจทำให้เกิดการเติบโตของแบคทีเรียเมื่อเวลาผ่านไป และต้องตรวจสอบก่อนใช้งาน ASTM D1510 กำหนดให้มีการตรวจสอบช่องว่างทุกวัน

2.4.4 มาตรฐาน

Spex CertiPrep กำหนดมาตรฐานของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เทียบกับมาตรฐานที่ตรวจสอบย้อนกลับได้กับโพแทสเซียมไดโครเมต, NIST Standard Reference Material 136F สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นมาตรฐานเทียบกับ 0.0394 นิวตันโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามที่กำหนดโดยวิธี ASTM D1510

2.5 คุณภาพของคาร์บอนแบล็ก [26]

คาร์บอนแบล็กหรือถ่านผงเป็นสารที่รู้จักกันมานานและใช้กันมากในอุตสาหกรรม ปัจจุบันคาร์บอนแบล็กมีลักษณะปน ร่วน และเป็นอสัณฐาน การใช้งานมักจะแยกตามคุณสมบัติเฉพาะตัวซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันในด้านพื้นที่ผิวขนาดอนุภาคโครงสร้างน้ำหนักเฉลี่ยของเม็ดถ่าน (average aggregate mass) และส่วนประกอบทางเคมีเนื่องจากคาร์บอนแบล็กเป็นสารละเอียด เบา ถูกลมพัดพาและฟุ้งกระจายได้ง่าย ฉะนั้นเพื่อเป็นการลดความสกปรกต่อสิ่งแวดล้อมการผลิตในอุตสาหกรรมจึงผลิตคาร์บอนแบล็กในรูปเม็ด (pellet) ในระหว่างการผลิตต้องใช้ถุงกรอง (bag filter) เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายถึงแม้ว่าคาร์บอนแบล็กผลิตได้จะมีสารประกอบพหุไซโคลโอเลฟินส์และโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอยู่บ้าง และเชื่อกันว่าสารพวกนี้เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง แต่ก็ไม่มีหลักฐานยืนยันว่า คาร์บอนแบล็กเคยเป็นภัยต่อชีวิตมนุษย์

คาร์บอนแบล็กเผาไหม้ยากไม่เกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองถ้ามีเปลวไฟมาทำให้เกิดการลุกไหม้ การลุกไหม้ก็จะเป็นไปอย่างช้า ๆ และอาจดับได้ง่ายโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนแบล็กที่ใช้ผสมยางเรียกว่า rubber grade carbon black เป็นคาร์บอนแบล็กชนิดไม่มีรูพรุนมีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 70 ส่วนคาร์บอนแบล็กที่มีรูพรุนซึ่งใช้ในการทำสีและเครื่องใช้ไฟฟ้ามีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่าร้อยละ 70 เนื่องจากยังไม่มีวัตถุหรือสารเคมีอื่นใดที่นำมาใช้แทนคาร์บอนแบล็กในอุตสาหกรรมยางได้ ฉะนั้นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยางมีคุณภาพดี การตรวจสอบคุณสมบัติของคาร์บอนแบล็ก จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

คุณภาพของคาร์บอนแบล็กขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่สำคัญคือพื้นที่ผิวโครงสร้างและความเข้มของสี (tint strength) ของคาร์บอนแบล็ก ฉะนั้นการทดสอบคุณสมบัติทั้งสามประการจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมคุณภาพ

การหาพื้นที่ผิวอาจหาได้โดยวิธีการดูดซับก๊าซหรือของเหลว (gas adsorption we liquid adsorption) ในการทดสอบโดยวิธี gas adsorption จะใช้ก๊าซไนโตรเจน แต่ในการควบคุมคุณภาพการผลิตในโรงงานมักใช้วิธีดูดซับของเหลวเนื่องจากวิธีการทดสอบง่ายกว่าคือให้คาร์บอนแบล็กดูดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นอกจากวิธีทั้งสองแล้วยังมีผู้พบวิธีทดสอบใหม่โดยใช้คาร์บอนดูด

ในสารละลาย acetyl tri-methyl ammonium bromide (CTAB) วิธีนี้ได้ผลดีสำหรับพวกคาร์บอนแบล็คที่ไม่มีรูพรุน

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คทดสอบได้โดยการไทเทรตคาร์บอนแบล็คกับ dibutyl phthalate (DBP) จนถึงความหนืดตามที่กำหนด

ความเข้มของสีทดสอบโดยใช้หลักที่ว่าคาร์บอนแบล็คที่มีความเข้มของสีสูงจะมี light adsorption coefficient สูงและมีค่า reflectance ต่ำค่านี้วัดได้โดยการผสมคาร์บอนแบล็คกับสีทาสีขาวเช่นซิงค์ออกไซด์หรือไทเทเนียมออกไซด์มีน้ำมันหรือสารจำพวกเรซินเป็นตัวเชื่อมทำให้เป็นส่วนผสมหนืด (paste) แล้ววัดค่า diffuse reflectance เทียบกับสารสีดำมาตรฐาน (Standard reference black)

ปัจจุบันประเทศไทยได้ส่งเสริมให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ยางเช่นยางรถยนต์ยางรถจักรยานยนต์ ฯลฯ ขึ้นในประเทศและกำลังผลิตก็ขยายขึ้นตลอดเวลาทำให้ปริมาณการใช้คาร์บอนแบล็คเพิ่มขึ้นจนมีผู้ตั้งโรงงานผลิตคาร์บอนแบล็คขึ้นในประเทศนอกจากนั้นสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้เห็นความสำคัญจึงได้จัดทำมาตรฐานคาร์บอนแบล็คสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยางขึ้นคุณลักษณะที่ต้องการซึ่งสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้มีดังนี้

2.5.1 ขนาดเมื่อทดสอบตาม ASTM D1514 แล้ว

1) ค้างบนแรงขนาด 500 ไมโครเมตร (No. 35) ได้ไม่เกินร้อยละ 0.0000 ของน้ำหนัก

1.2 ค้างบนแรงขนาด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 0.10 ของน้ำหนัก

2.5.2 ค่าไอโอดีนแอดซอร์ปชัน (iodine adsorption number) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1510

2.5.3 ความเข้มของสี (tint strength) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 3265 โดยเปรียบเทียบกับ IRB No. 3 (Industry Reference Black No. 3)

2.5.4 ค่าที่พีแอบซอร์ปชัน (DBP absorption number we dibutyl phthalate absorption number) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 2414

2.5.5 ความหนาแน่นโดยการเท (pour density) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1513

2.5.6 การสูญเสียเนื่องจากความร้อน (heating loss) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1509

2.5.7 ปริมาณเถ้า (ash) ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1506

2.5.8 ปริมาณซัลเฟอร์เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1619 ต้องไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนัก

2.5.9 ความเป็นกรด-ด่างให้เป็นไปตามตารางที่ 1 เมื่อทดสอบตาม ASTM D 1512

2.5.10 โมดูลัสขณะที่ยืดตัวเป็นร้อยละ 300 (modulus at 300% elongation) an คาร์บอนแบล็กมาผสมในยางตามวิธีที่กำหนด ASTM D 3192 แล้วอบและอัดที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียสนาน 30 นาทีและทดสอบตาม ASTM D 412 โดยเปรียบเทียบกับ IRB No. 4 แล้วให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 คุณภาพคาร์บอนแบล็คเกรดการค้า [8]

ประเภท		ค่า ไอโอดีน แอคซอร์ป ชัน	ความ เข้ม ของสี ของสี	ค่าดัชนี แอบซอร์ป ชัน อุณหภูมิต่ำ เช่น ๓๐°C	ความ หนาแน่น โดยการเท กรัมต่อ ลิตร	การสูญเสีย เนื่องจาก ความร้อน	ปริมาณ เถ้า	ค่าความเป็น กรด-ด่าง		โมดูลัสการยืดตัว เป็นร้อยละ 300 เมกาปาสกาล	
รหัสระบุ ตาม ASTM	รหัสระบุในทาง อุตสาหกรรม	มิลลิกรัม ต่อกรัม ± 5	ร้อยละ ± 4	ร้อยละ ต่อ 100 กรัม ± 5	ร้อยละ ต่อ ๑๐๐ กรัม ± 25	ร้อยละ ไม่เกิน	ร้อยละ ไม่เกิน	ไม่น้อย กว่า	ไม่เกิน	ไม่น้อย กว่า	ไม่เกิน
N 110	SAF	145	124	113	335	3.5	1.0	7.4	8.0	-1.6	0.0
N 220	ISAF-HM	221	114	115	350	2.5	1.0	7.4	8.0	-1.0	+1.0
N 231	ISAF-LM	120	117	91	390	2.5	1.0	7.4	8.0	-4.0	0.0
N 326	HAF-LS	84	110	72	560	2.5	1.0	7.4	8.0	-4.0	0.0
N 327	HAF-LS	86	120	60	510	2.5	1.0	7.4	8.0	-7.0	-4.0
N 330	HAF	82	103	102	375	2.5	1.0	7.4	8.0	-1.0	+2.0
N 339	HAF-HS	90	110	120	345	2.5	1.0	7.4	8.0	+1.0	+3.0
N 347	HAF-HS	90	103	124	340	2.5	1.0	7.4	8.0	+0.4	+2.4
N 375	HAF improved	90	114	115	350	2.5	1.0	7.4	8.0	+0.4	+2.5
N 550	FEF	43	—	118	355	1.5	0.75	7.5	8.1	-0.8	+1.5
N 650	—	37	—	122	355	1.5	0.75	7.5	8.1	-1.2	+1.6
N 660	GPF	36	—	91	425	1.0	0.75	7.5	8.1	-3.5	-1.2
N 774	SRF-HM-LS	27	—	72	495	1.0	0.75	7.5	8.1	-4.2	-2.1

กรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้ให้บริการตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนแบล็คตามข้อกำหนดของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมทั้งนี้เพื่อให้คาร์บอนแบล็คที่ผลิตขึ้นมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดอันจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการใช้สอยอย่างเต็มที่

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [27]

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหา ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบาย ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สามารถศึกษาผลปัจจัยหลายๆชนิดพร้อมกัน ซึ่งเวลาที่ใช้น้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย โดยการออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มี

ประสิทธิภาพโดยการปรับค่าของปัจจัย (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะส่งผลจากการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (response) ที่เกิดขึ้น

กระบวนการที่มีปัจจัย (factors) หรือผลตอบ (response : X_1, X_2, X_3, X_4) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (quality characteristic) ของกระบวนการ โดยในการออกแบบการทดลองเราต้องการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของตัวแปร Y และตัวแปร X โดยพยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (process knowledge) เพื่อนำเอาไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป

2.6.1 การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เกิดมาจากการทดลองถ้ากำหนดค่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบสนอง” (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปของกราฟิกโดยที่ η จะถูกพลอตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพลอตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่สามารถทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่งดังสมการ

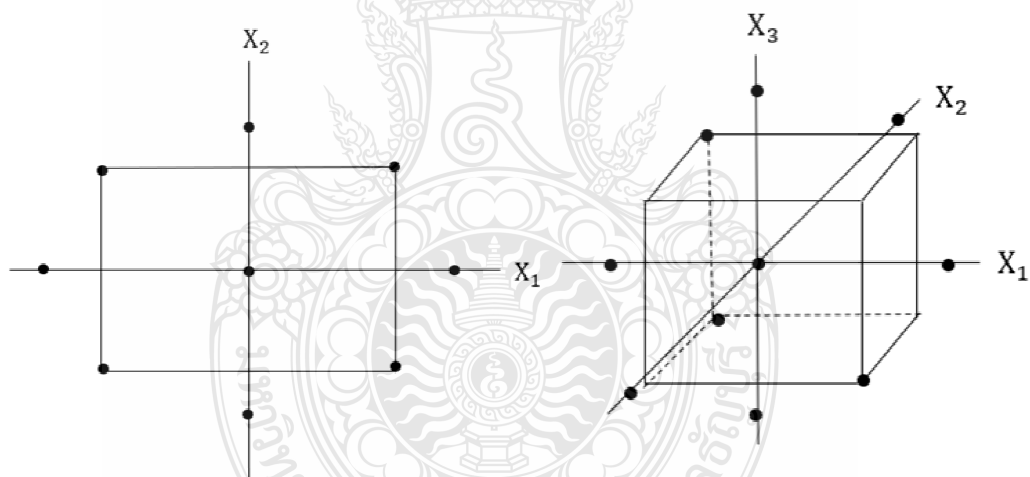
$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2 \quad (2.3)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวของในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสองดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

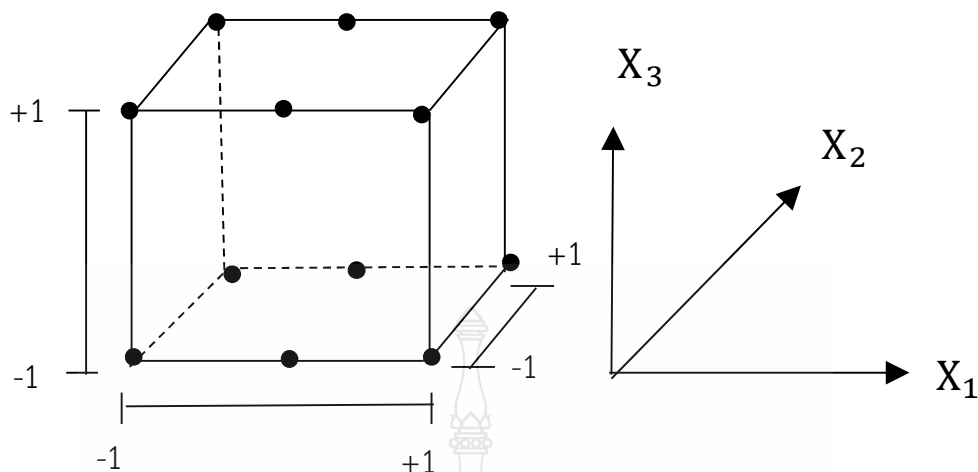
ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด การป้อนด้วยทางชัน การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองลำดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองลำดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองลำดับที่สองเป็นการเน้นไปเพื่อสร้างแบบจำลองแบบควอดราติกของผลตอบสนองโดยมีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ

2.6.1.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนองที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย $2k$ แฟกทอเรียลที่มี nc รัน ซึ่ง $2k$ รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ nc รันที่จุดศูนย์กลาง ดังภาพที่ 2.2 แสดงส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$ ปัจจุบัน



รูปที่ 2.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$

2.6.1.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพื้นผิวการตอบสนอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรัน ที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$

เนื่องจากการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่เกินขอบเขตหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

2.6.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ แตกต่างกันมากค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วยสำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าคะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมานั้นภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่า “ความคลาดเคลื่อน”

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทิมา ชังศิริพร และคณะ [28] ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้จากยางพาราที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของสารเชื่อมประสาน 3 ชนิด คือ ปริมาตรแป้งมันสำปะหลัง อัตราส่วนน้ำมันดินและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และน้ำ รวมถึงหาขนาดของเม็ดถ่านในการอัดขึ้นรูปแบบเม็ด โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ชนิดแป้งมันสำปะหลัง ใน

สัดส่วนผงถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำ คือ 1:0.35:1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดถ่าน 4 มิลลิเมตร และถ่านเม็ดสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ไปกระตุ้นโดยกระบวนการทางเคมีด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และให้ความร้อนจากการเผาในท่อสแตนเลสพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ การใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 2 โมลาร์และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 °C เป็นเวลา 90 min ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงสุดถึง 602.75 และ 202.04 mg/g ตามลำดับ

Mohd Shafiq Hakimi Mohd Shaid และคณะ [29] ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับจากเมทาลีนบลูและฟีนอลจากคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ โดยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการกระตุ้นด้วยความร้อนที่สภาวะ 1000 °C เป็นเวลา 2 h กำหนดเป็นกลุ่ม AC10-2 และจากนั้นนำไปปรับปรุงคาร์บอนแบล็คด้วยกระบวนการทางเคมีโดยใช้กรดซัลฟิวริกแช่เป็นเวลา 24 h ก่อนนำไปอบด้วยความร้อนกำหนดเป็นกลุ่ม AC-Demi และปรับปรุงคาร์บอนแบล็คด้วยกระบวนการทางเคมีอีกครั้งด้วยกรดไนตริกแช่เป็นเวลา 24 h ก่อนอบด้วยความร้อน คือกลุ่ม AC-Oxi ซึ่งผลการทดลองกลุ่ม AC-Oxi พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มเป็น 325 m²/g และกลุ่ม AC10-2 และกลุ่ม AC-Demi พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มใกล้เคียงกันคือ 237 และ 324 m²/g ตามลำดับ โดยผลการดูดซับเมทาลีนบลูของ AC-Oxi สูงที่สุดคือ 107 mg/g ในขณะที่ AC10-2 แสดงการดูดซับฟีนอลสูงที่สุดคือ 48 mg/g โดยใช้สมการ Langmuir และ Redlich-Peterson แต่การดูดซับฟีนอลได้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมคือ สมการ Redlich

Yuan Gao และคณะ [30] ได้ศึกษาการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะถ่านกัมมันต์จากลิกนินจากน้ำหมักกระดาษจากการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มเป็น 2943 m²/g และปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะคือ อัตราส่วนลิกนินต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยอัตราส่วนลิกนินต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดคือ 3 ต่อ 1 และกระตุ้นด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 750 °C โดยใช้เวลา 1 h และจากการวิเคราะห์การดูดซับโดยใช้ไอโซเทอม Langmuir ให้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางด้าน kinetic และสมดุลการดูดซับมากที่สุด

Jenny Pena และคณะ [31] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนแบล็คจากแกรบ buckwheat ที่เป็นพืชพื้นเมืองจากประเทศฝรั่งเศส โดยการผลิตคาร์บอนแบล็คด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed base ให้ความร้อนจากไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าของสารออกซิไดซ์ส่งผลต่อความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบแร่ของคาร์บอนแบล็ค โดยจากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิด คาร์บอนแบล็คมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้นและให้ปริมาณซีเถ้าที่น้อยลง เนื่องจากการลดคาร์บอนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลจากการกระตุ้นโดยไอน้ำทำให้พื้นที่

ผิวเพิ่มมากขึ้นเป็น $0.168 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งมากกว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ $0.291 \text{ cm}^3/\text{g}$ จากการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน

Linfeng Zhu และคณะ [32] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนแบล็คจากฟางข้าว โดยฟางข้าวถูกนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และของเหลวที่ได้หลังจากปรับสภาพจะใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนแบล็ค ซึ่ง KOH ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสกัดลิกนินและสารกระตุ้นการทำงานของสารเคมี และการเติมเมลานินในของเหลวที่ผ่านการปรับสภาพสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ $2646 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุน $1.285 \text{ cm}^3/\text{g}$ เนื่องจากเมลานินเป็นแหล่งไนโตรเจนและเป็นตัวปรับปรุงรูพรุน

Ruben Gomez-Hernandez และคณะ [33] ได้ศึกษาคาร์บอนแบล็คเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคละเอียด ที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วนของวัตถุดิบปิโตรเลียมหนัก และการผลิต CB อนุภาคนาโนในเชิงพาณิชย์ต้องใช้อุปกรณ์ การเตรียมสารเคมี รวมถึงการผสมผสานเทคนิคการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ที่ซับซ้อน และ CB อนุภาคนาโนยังสามารถผลิตได้จากยางที่ใช้งานแล้ว แต่ผลผลิตนั้นค่อนข้างต่ำและกระบวนการการผลิตนี้ยังมีความซับซ้อนทางเทคนิค แต่รายงานนี้จึงพัฒนาวิธีการที่ง่ายและราคาไม่แพงสำหรับการผลิต CB อนุภาคนาโนจากยางรถยนต์ที่เป็นของเสีย ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมผลผลิตของ CB อนุภาคนาโนที่ผ่านการรีไซเคิล (~ 22 นาโนเมตร) มีค่าประมาณ 81% และมีความคงตัวทางความร้อนและการนำไฟฟ้าที่โดยรวมถึงมีการก่อตัวเป็นก้อนคล้ายลูกโซ่ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและการทดสอบความสามารถในการละลายบ่งชี้ว่าถูกออกซิไดซ์ไปบางส่วน (C, 84.9%; S, 10.21%; O, 4.9%) และผลิตภัณฑ์นี้ผ่านการวิเคราะห์คุณสมบัติด้วย FTIR, Raman, TGA, BET, SEM และ TEM ซึ่งวิธีการผลิตนี้อาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการลดขยะจำนวนมากและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงลบ และ CB อนุภาคนาโนที่มีคุณภาพสามารถใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เซ็นเซอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวเร่งปฏิกิริยา เม็ดสี คอนกรีต และพลาสติก รวมถึงการใช้งานอื่นๆ อีกมากมาย

Syahirah Yahya, Syamsul Kamar Muhamad Wahab และ Farah Wahida Harun [38] ได้ศึกษาการพัฒนาน้ำมันไบโอดีเซลจาก น้ำมันพืชที่ผ่านการปรุงอาหารแล้ว ด้วยเหตุหลายประเทศนิยมผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชดิบ อย่างไรก็ตามการผลิตไบโอดีเซลวัตถุดิบโดยใช้ผลิตน้ำมันพืชในปัจจุบันชะลอการเติบโตเนื่องจากต้นทุนการผลิตวัตถุดิบที่สูง เป็นผลให้น้ำมันปรุงอาหารเหลือใช้ (WCO) จึงเป็นทางเลือกที่ประหยัดและหาได้ง่าย ซึ่งไม่ต้องเพาะปลูกและเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพที่ให้ผลตอบแทนสูง ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำมอนต์มอริลโลไนต์ K10 (Fe-MMT K10) ที่ผ่านการแลกเปลี่ยน Fe ไอออน มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแปลง WCO เป็นไบโอดีเซล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ Fe-MMT K10 สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 95.26% ซึ่งสูงกว่าไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ MMT K10 ที่ไม่ได้ดัดแปลงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (38.39% และ 29.50% ตามลำดับ) และ

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลดำเนินการโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ร่วมกับการออกแบบ central composite design (CCD) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการสร้างแบบจำลองทางสถิติ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าการผลิตไบโอดีเซลมีระดับไบโอดีเซลที่เหมาะสมคือ 92.74% ที่ 134.07 °C ที่เวลาทำปฏิกิริยา 6.32 h และอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 11.77:1



วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาในส่วนของวัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ รวมไปถึงวิธีการดำเนินการวิจัย โดยงานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณภาพคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทางความเค็มและกระบวนการทางความร้อน ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติผ่านเครื่องมือต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2564					2565						
	ต.ค	พ.ย	ม.ค	ก.พ	มี.ค	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย
1.วางแผนงานวิจัย	---											
2.ศึกษาค้นคว้า		---										
3.จัดเตรียมวัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์			---									
3.การเตรียมคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรถยนต์				---	-----							
4.ออกแบบการทดลองและกำหนดตัวแปร						---						
5.ปรับสภาพคาร์บอนแบล็คด้วยวิธีทางเคมี							-----					
6.ปรับสภาพคาร์บอนแบล็คด้วยวิธีทางความร้อน								-----				
7.วิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนแบล็คที่ปรับสภาพแล้ว										---		
8.สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง											---	
10.จัดทำเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์												---

แผนการดำเนินงาน

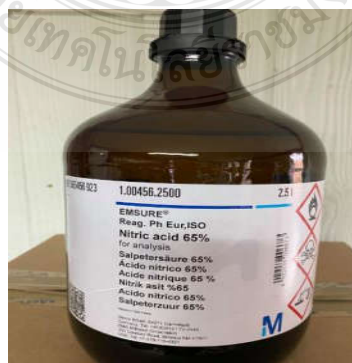
ดำเนินงานเสร็จสิ้น

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

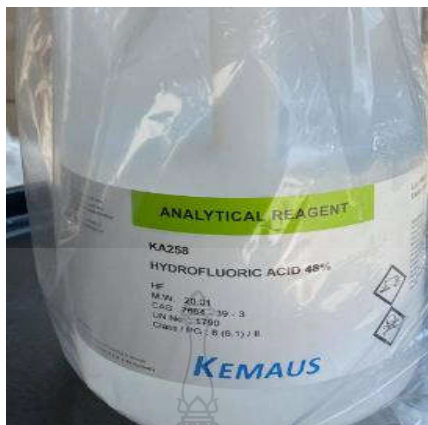
- 3.1.1 คาร์บอนแบล็คจากโรงงานไฟโรว์ไลซิส (บริษัท ไฟโรว์ เอนเนอร์ยี จำกัด)
- 3.1.2 กรดไนตริก (HNO_3 , 65%, EMSURE)
- 3.1.3 กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid; HF)
- 3.1.4 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 3.1.5 จาระบีซิลิโคน (Silicone grease)
- 3.1.6 ตัวทำปฏิกิริยาไอโอดีน (Iodine; I_2)
- 3.1.7 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- 3.1.8 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI)
- 3.1.9 เอมีลแอลกอฮอล์ (Amyl alcohol)
- 3.1.10 โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate; KIO_3)
- 3.1.11 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4)
- 3.1.12 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)



รูปที่ 3.1 คาร์บอนแบล็คจากโรงงานไฟโรว์ไลซิส (บริษัท ไฟโรว์ เอนเนอร์ยี จำกัด)



รูปที่ 3.2 กรดไนตริก (HNO_3 , 65%, EMSURE)



รูปที่ 3.3 กรดกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid; HF)



รูปที่ 3.4 จาระบีซิลิโคน (Silicone grease)



รูปที่ 3.5 ตัวทำปฏิกิริยาไอโอดีน (Iodine; I₂)



รูปที่ 3.6 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)



รูปที่ 3.7 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI)



รูปที่ 3.8 เพนทานอล

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อม ให้ความร้อน (Hotplate magnetic stirrers)
- 3.2.2 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 3.2.3 ตู้ดูดควัน (Fume hood)

- 3.2.4 เครื่องแก้วและอุปกรณ์ชุด Reflux
- 3.2.5 โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.2.6 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (Muffle Furnace)
- 3.2.7 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น BP2215
- 3.2.9 เครื่องวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)
- 3.2.10 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (Auto Titrator ยี่ห้อ Metrohm)
- 3.2.11 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH meter ยี่ห้อ METTLER TOLEDO)
- 3.2.12 เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)
- 3.2.13 หลอด centrifuge ขนาด 15 มิลลิลิตร
- 3.2.14 ปีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
- 3.2.15 เครื่องเขย่าผสมสาร ยี่ห้อ KK
- 3.2.16 กระดาษกรอง เบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ยี่ห้อ CYTIVA
- 3.2.17 เครื่องทำน้ำปราศจากไอออน
- 3.2.18 เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ HETTICH
- 3.2.19 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
- 3.2.20 เครื่องอบแห้ง



รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH meter ยี่ห้อ METTLER TOLEDO)



รูปที่ 3.10 เครื่องเขย่าผสมสาร



รูปที่ 3.11 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ



รูปที่ 3.12 เครื่องอบแห้ง



รูปที่ 3.13 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ



รูปที่ 3.14 เครื่องเหวี่ยง

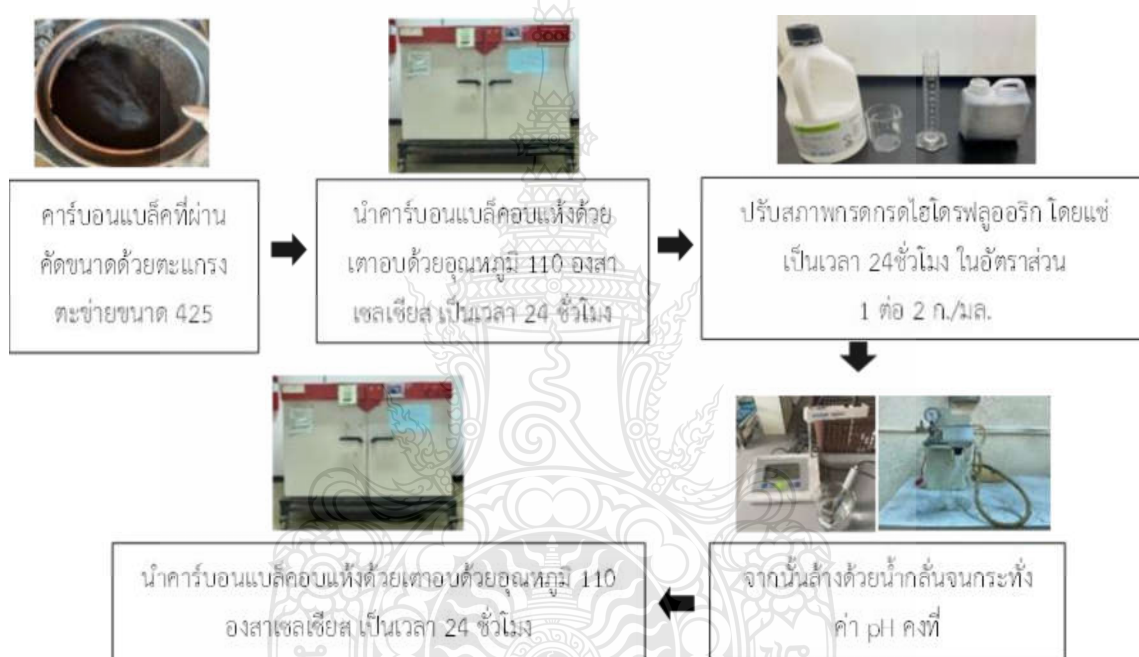


รูปที่ 3.15 เครื่องแก้วและอุปกรณ์ชุด Reflux

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมคาร์บอนแบล็ค

นำคาร์บอนแบล็คที่ได้จากบริษัท ไฟโรเอนเนอร์ยี จำกัด คาร์บอนแบล็ค กำหนดขนาดด้วยตะแกรงตะข่ายขนาด 425 nm หลังจากนั้นนำคาร์บอนแบล็คคอบแห้งด้วยเตาอบด้วยอุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 1 h จากนั้นนำคาร์บอนแบล็คไปกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) ด้วยกรดกรดไฮโดรฟลูออริก โดยแช่เป็นเวลา 24 h ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 g/ml และนําล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH คงที่ และอบด้วยอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 h ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการใช้งานแล้ว

3.4.2 การออกแบบการทดลอง

การทดลองนี้มี 17 การทดลองจากออกแบบการทดลองโดย Box Behnken โมเดล ด้วยโปรแกรม Design Expert 13 (เวอร์ชันทดลอง) ดังตารางที่ 3.2 ด้วยมีเงื่อนไขปัจจัยการทดลอง 3 ระดับและ 3 ตัวแปร ซึ่งประเมินทางสถิติจากข้อมูลการทดลองของคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไฟโรไลซิสของยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยกำหนดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งตัวแปรตามคือค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และปัจจัย A แสดงถึงอุณหภูมิในการรีฟลักซ์ ปัจจัย B คืออัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก และปัจจัย C คือเวลารีฟลักซ์

ตารางที่ 3.2 การกำหนดตัวแปรและปัจจัยการทดลอง

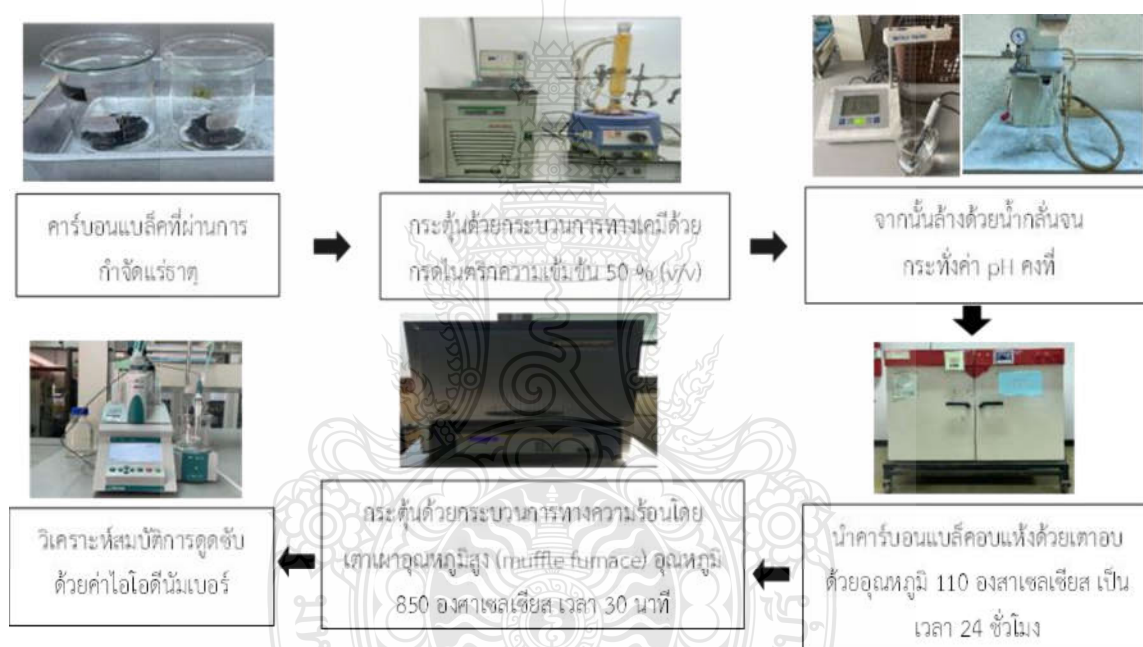
Factor	Name	Unit	Level		
			Low	Middle	High
A	Temperature	°C	30	40	50
B	Ratio	g/ml	0.25	0.5	1.0
C	Time of reaction	hour	6	12	24
Response	Name	Unit			
Y1	Iodine number	mg/g			

ตารางที่ 3.3 การทดลองกระตุ้นด้วยสารกรดไนตริก

Std	Run	A: Temperature (°C)	B: Ratio (g/mL)	C: Time (hour)
11	1	40	0.25	24
13	2	40	0.5	12
4	3	50	1	12
17	4	40	0.5	12
14	5	40	0.5	12
9	6	40	0.25	6
1	7	30	0.25	12
3	8	30	1	12
15	9	40	0.5	12
12	10	40	1	24
7	11	30	0.5	24
2	12	50	0.25	12
8	13	50	0.5	24
16	14	40	0.5	12
5	15	30	0.5	6
10	16	40	1	6
6	17	50	0.5	6

3.4.3 การกระตุ้นคาร์บอนแบล็คด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน

นำคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุมากระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 50 % (v/v) ซึ่งต่อในชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์ตามเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 3.2 จากนั้นนำไปล้างเพื่อกำจัดกรดส่วนเกินด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH คงที่ และอบด้วยความร้อนที่ 110 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลา 24 h จากนั้นกระตุ้นด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยเตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 30 min และพักให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิ จากนั้นนำคาร์บอนแบล็คเก็บในถุงซิปล็อคและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เพื่อหาสภาวะการปรับสภาพที่ดีที่สุด ด้วยค่าไอโอดีนัมเบอร์ ASTM D1506 ดังรูปที่ 3.17



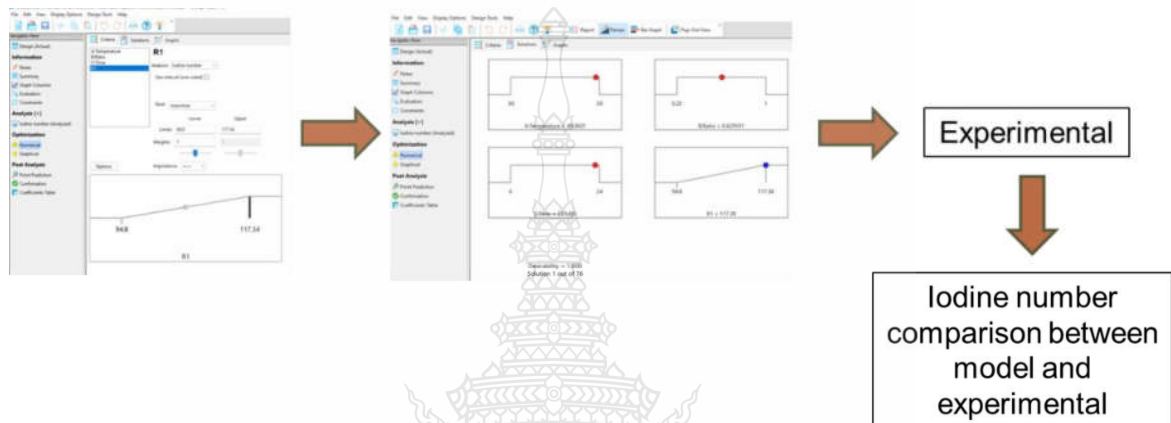
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการกระตุ้นคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลจากการทดลองดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design Expert 13 (เวอร์ชันทดลอง) โดยการวิเคราะห์ใช้สามขั้นตอนหลักเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) และสุดท้ายวิเคราะห์จากการพล็อตพื้นผิวตอบสนอง (Response surface)

3.5 การ Optimization และ Validation

สร้างสภาวะโดยใช้ฟังก์ชันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยโปรแกรม Design Expert พร้อมเทคนิคการแบบจำลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology ; RSM) เพื่อหาค่าไอโอดีนัมเบอร์ที่สูงที่สุดในแต่ละสภาวะระหว่างการทดลองและได้การตรวจสอบความแม่นยำจากการทดลองซ้ำ



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการหาสภาวะที่ค่าไอโอดีนัมเบอร์ที่สูงที่สุดจากโปรแกรม Design Expert

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางความร้อน ซึ่งผลการวิจัยและการอภิปรายผลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

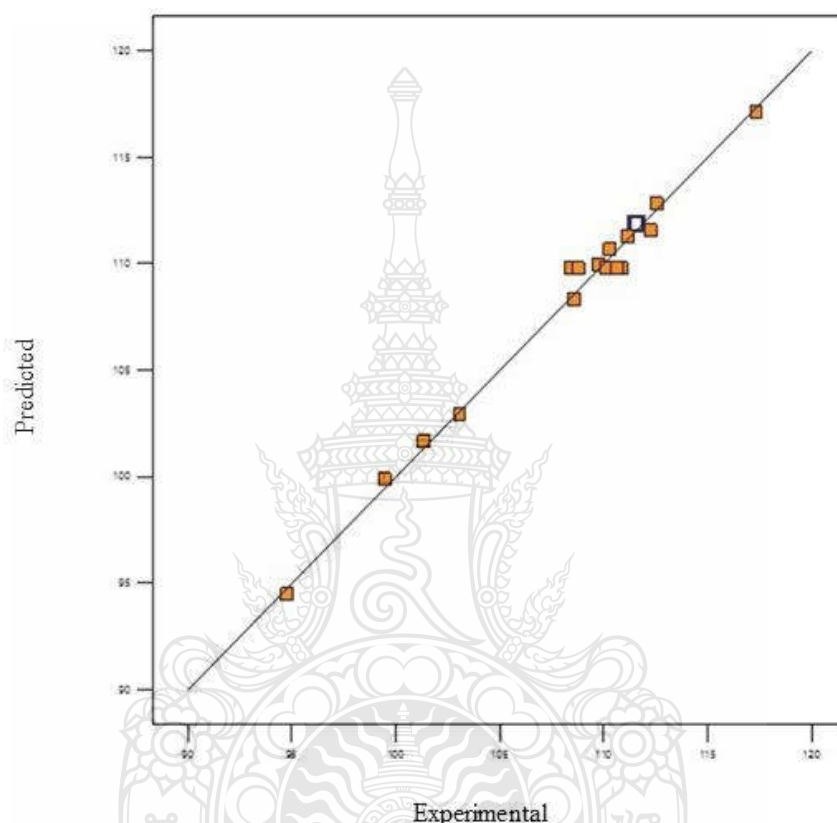
4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของไอโอดีนนัมเบอร์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

4.1.1 การออกแบบและผลการทดลอง

โปรแกรม Design Expert V.13 ใช้สำหรับการประเมินทางสถิติจากข้อมูลการทดลองของคาร์บอนแบล็คจากกระบวนการไพโรไลซิสของยางใช้งานแล้ว ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 โดยตัวแปรตามคือค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และปัจจัย A แสดงถึงอุณหภูมิในการรีฟลักซ์ ปัจจัย B คืออัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก และปัจจัย C คือเวลารีฟลักซ์ โดยมีผลการทดลองทั้งหมด 17 ครั้งโดยอิงตามเมทริกซ์ Box-Behnken (ตารางที่ 4.1) โดยมีจุดศูนย์กลางสามจุดเพื่อกำหนดอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อความเข้มข้นของไอโอดีน ซึ่งผลศึกษาอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ของไอโอดีนนัมเบอร์ คืออุณหภูมิ (30-50 °C) เวลา (6-24 h) และ (อัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี (0.25-1.0 g/ml) และสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ ถูกกำหนดจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งจำนวนทดลองของคาร์บอนแบล็คเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพไอโอดีนนัมเบอร์แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยพบว่าผลผลิตคาร์บอนแบล็คที่บำบัดแล้วด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกอยู่ในช่วงระหว่าง 55-88 % และข้อมูลการทดลองถูกนำไปคำนวณผ่านซอฟต์แวร์ Design Expert สำหรับการประมวลผลและการสร้างสมการพหุนามกำลังสองแบบควอเทอร์เนียนระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระเพื่อทำนายผลไอโอดีนนัมเบอร์ดังสมการ (4.1)

$$\begin{aligned} \text{Iodine number, } \frac{\text{mg}}{\text{g}} = & 71.222 + 3.06453A - 0.3745B - 4.17556C + 1.0412AB \\ & + 0.044783AC - 0.138222BC - 0.049382A^2 - 30.998B^2 \\ & + 0.80084C^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

สมการ (4.1) คือสมการทำนายไอโอดีนนับเบอร์ของผลกระทบบึงเชิงเส้นและกำลังสองจากสามตัวแปร ซึ่งเครื่องหมายบอกหมายถึงผลเสริมฤทธิ์กันในขณะที่เครื่องหมายเชิงลบหมายถึงผลที่เป็นปฏิปักษ์ โดยใช้สมการแบบจำลองที่พัฒนาแล้ว รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองแสดงค่าที่คาดการณ์เทียบกับค่าทดลองที่คาดการณ์เทียบกับค่าทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงไอโอดีนนับเบอร์ของคาร์บอนแบล็คจากการคาดการณ์เทียบกับการทดลอง

ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองที่ได้ทำการทดลอง ตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 แบบจำลองมี $F = 61.13$, $P < 0.0001$, $R^2 = 0.9874$ และ $\text{adj.}R^2 = 0.9713$ โดยมีค่าการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยคือ $p > 0.05$ ซึ่งไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และค่า $\text{Prob} > F$ ของอัตราส่วนและเวลาระบุดผลกระทบไอโอดีนนับเบอร์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ตัวแปรปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนและเวลามีความสำคัญทางสถิติเนื่องจากค่า p น้อยกว่า 0.05 ในขณะที่ตัวแปรปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกับเวลาไม่มีนัยสำคัญเนื่องจากค่า p เป็น มากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของการออกแบบการทดลอง

Std	Run	A:Temperature °C	B:Ratio g/mL	C:Time hour	%Yield	Actual mg/g	Predicted mg/g
11	1	40	0.25	24	78%	111.15	111.25
13	2	40	0.5	12	74%	108.43	109.77
4	3	50	1	12	88%	108.6	108.32
17	4	40	0.5	12	76%	110.10	109.77
14	5	40	0.5	12	75%	110.88	109.77
9	6	40	0.25	6	75%	112.26	111.54
1	7	30	0.25	12	84%	101.37	101.62
3	8	30	1	12	60%	94.80	94.46
15	9	40	0.5	12	72%	110.65	109.77
12	10	40	1	24	71%	110.30	110.66
7	11	30	0.5	24	84%	103.10	102.89
2	12	50	0.25	12	55%	99.50	99.86
8	13	50	0.5	24	55%	117.34	117.08
16	14	40	0.5	12	72%	108.80	109.77
5	15	30	0.5	6	82%	111.59	111.87
10	16	40	1	6	69%	112.56	112.82
6	17	50	0.5	6	76%	109.76	109.94

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	484.99	9	53.89	61.13	< 0.0001 significant
A-Temperature	137.18	1	137.18	155.61	< 0.0001
B-Ratio	0.2195	1	0.2195	0.2490	0.6331

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสองสำหรับวิธีพื้นผิวตอบสนอง(ต่อ)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
C-Time	2.86	1	2.86	3.24	0.1147
AB	64.19	1	64.19	72.81	< 0.0001
AC	68.40	1	68.40	77.59	< 0.0001
BC	0.9672	1	0.9672	1.10	0.3297
A ²	102.38	1	102.38	116.13	< 0.0001
B ²	59.72	1	59.72	67.75	< 0.0001
C ²	132.26	1	132.26	150.02	< 0.0001
Residual	6.17	7	0.8816		
Lack of Fit	1.32	3	0.4397	0.3625	0.7846 not significant
Pure Error	4.85	4	1.21		
Cor Total	491.16	16			

4.1.2 ผลของการกระตุ้นทางเคมีต่อไอโอดีนนัมเบอร์ของคาร์บอนแบล็ค

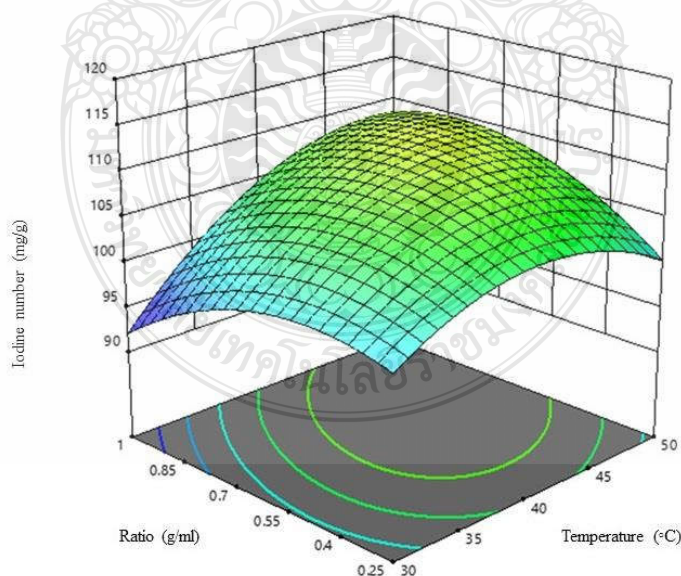
การพล็อตพื้นผิวการตอบสนอง 3 มิติ (รูปที่ 4.2) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (A) และอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก (B) ต่อไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งพารามิเตอร์ A ถูกแปรผันตั้งแต่ 30 ถึง 50 °C พารามิเตอร์ B ถูกแปรผันตั้งแต่ 0.25 ถึง 1 g/ml และพารามิเตอร์ C ถูกทำให้คงที่ที่ระดับกลางคือ 12 h โดยการเพิ่มพารามิเตอร์ A และการคงค่าพารามิเตอร์ B ไว้ที่ระดับต่ำ (0.25 g/ml) จะเพิ่มไอโอดีนนัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญจนถึงขีดจำกัดที่ 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จำนวนไอโอดีนสูงสุดที่ (97 mg/g) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มพารามิเตอร์ B ในขณะที่คงค่าพารามิเตอร์ A ไว้ สามารถเปลี่ยนไอโอดีนนัมเบอร์เกิน 97 mg/g (ประมาณ 102 mg/g)

ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นผลกระทบของปฏิสัมพันธ์พารามิเตอร์อุณหภูมิ (A) และเวลาปฏิกิริยา (C) ต่อไอโอดีนนัมเบอร์ โดยมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก (B) คงที่ที่ 0.5 g/ml โดยค่าสูงสุดของทั้งพารามิเตอร์ A และ C กราฟแสดงไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด

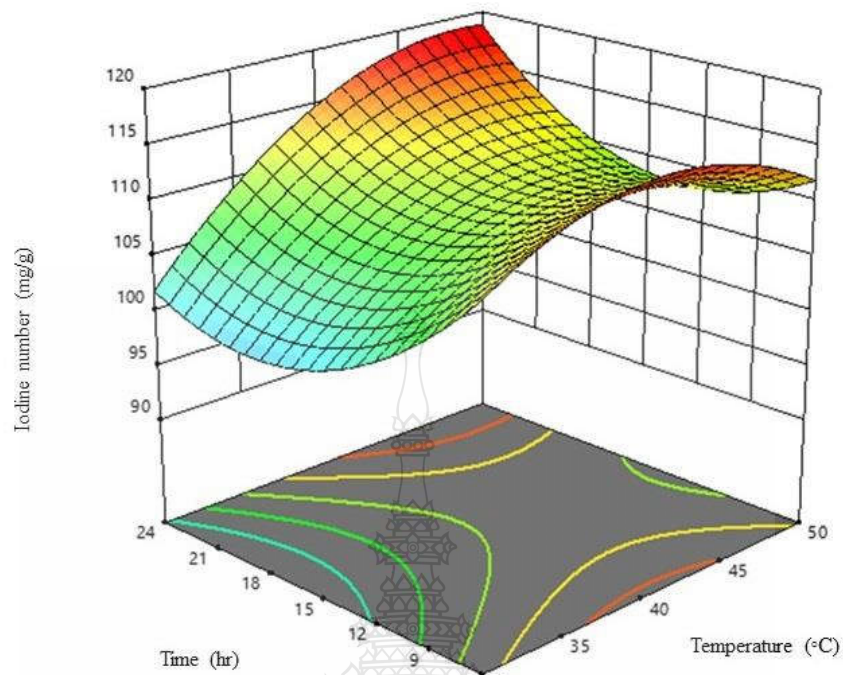
(117 มก./กรัม) ซึ่งอาจไม่เหมาะสมหากพิจารณาแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์ B โดยไอโอดีนนัมเบอร์สามารถลดลงเหลือ 112 mg/g โดยลดค่าพารามิเตอร์ C ให้เหลือระดับต่ำสุดคือ 6 h ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ A ไว้ที่ระดับสูงสุดที่ 50 °C

ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นผลกระทบของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์อัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก (B) และเวลาของการกระตุ้น (C) ต่อไอโอดีนนัมเบอร์ ในขณะที่อุณหภูมิ (A) คงที่ที่ 40 °C โดยที่พารามิเตอร์ B อัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก 0.7 g/ml และที่พารามิเตอร์ C คือ 24 h พบว่ามีไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดในทางตรงกันข้ามไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าต่ำสุดเมื่อระดับต่ำสุดของพารามิเตอร์ B และ C

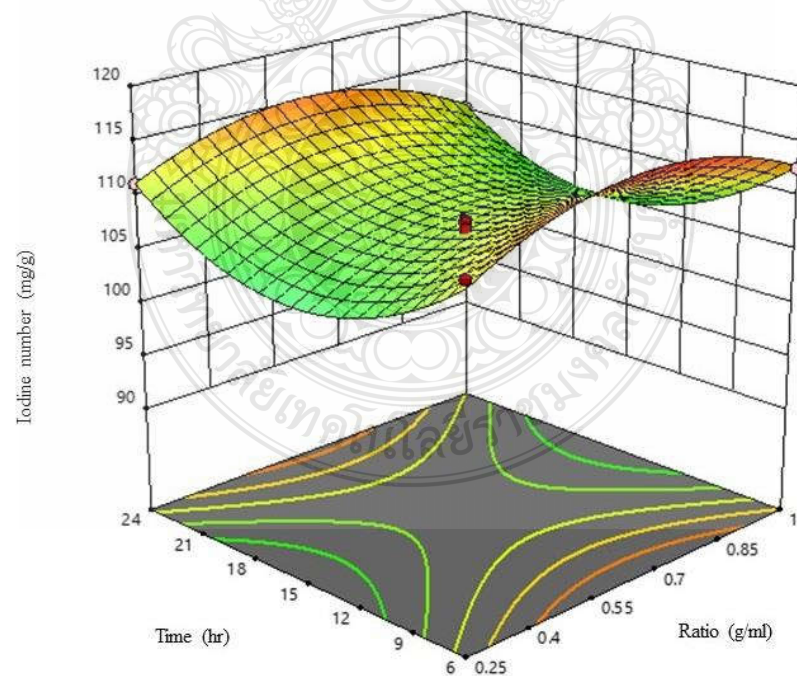
การศึกษาจำนวนมากได้รายงานการใช้สารเคมีอื่นๆ ในการขจัดแร่ธาตุในคาร์บอนแบล็ค เวลาในการแช่ที่ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อตัวทำปฏิกิริยาที่ต่ำแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามเวลาที่แช่ [7, 21-22, 27]. โดยอุณหภูมิของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการละลาย เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดต้นทุนด้านพลังงานที่สำคัญและการสูญเสียการระเหยของสารทำปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ และอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อตัวทำปฏิกิริยาก็เป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นกัน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่จำเป็นในการดำเนินการตามกระบวนการขจัดแร่ธาตุ ยิ่งปริมาณและความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยามากเท่าใด ผลกระทบต่อการขจัดแร่ธาตุก็จะยิ่งมากขึ้น [7] และพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นตามมา



รูปที่ 4.2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริกต่อไอโอดีนนัมเบอร์



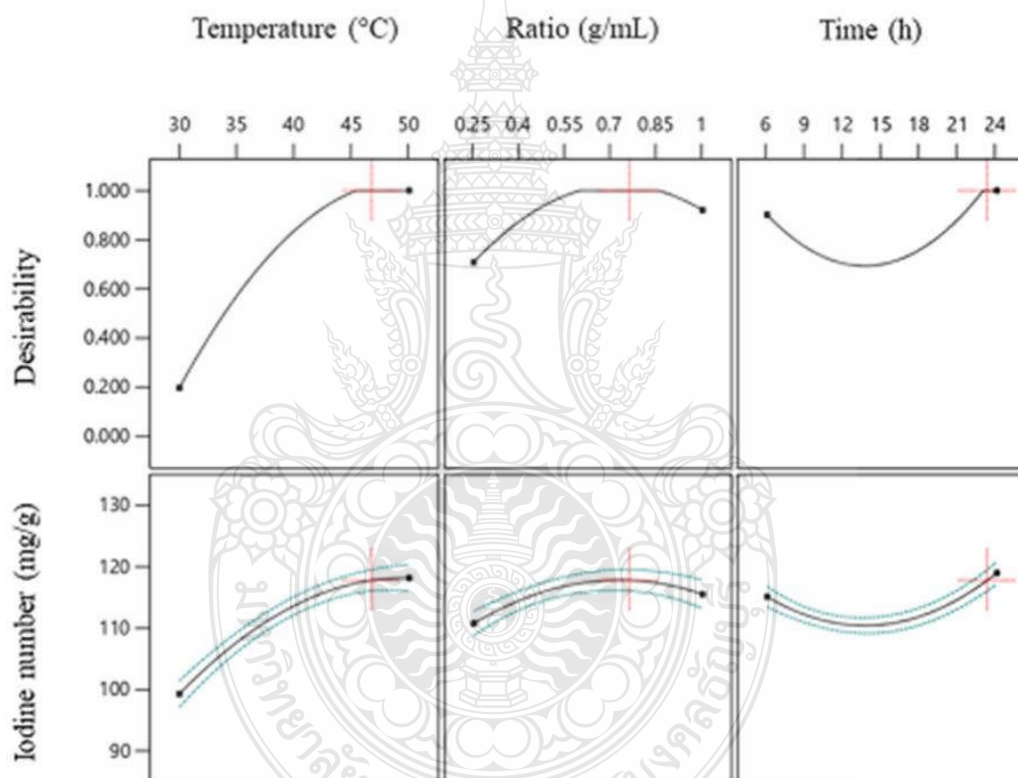
รูปที่ 4.3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อไอโอดีนนับเบอร์



รูปที่ 4.4 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริกและเวลาต่อไอโอดีนนับเบอร์

4.1.3 การหาสภาวะในการเพิ่มค่าไอโอดีนนมเบอร์ในกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงตัวเลขโดยซอฟต์แวร์ Design Expert เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มไอโอดีนนมเบอร์สูงสุดถูกกำหนดโดยอิงจากการออกแบบโดย Box Behnken ของแบบจำลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology ; RSM) สำหรับการคาดการณ์ไอโอดีนนมเบอร์ที่สูงที่สุด 117.34 mg/g ที่สภาวะ 46.74 °C เป็นเวลา 23.24 h ในอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก 0.76 g/ml แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยสมการคาดการณ์ไอโอดีนนมเบอร์ได้รับการตรวจสอบโดยทำการทดลองเพิ่มเติมภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ผลการทดลองไอโอดีนนมเบอร์เป็น 119 mg/g ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.25%



รูปที่ 4.5 สภาวะตัวแปรที่เหมาะสมจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

4.2 กำจัดโลหะหนัก (Demineralization)

ลักษณะของ RCB, RCB_13 และ RCB_EQ โดยเครื่อง XRF แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยคาร์บอนแบล็ค ได้มาจากไพโรไลซิสของยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้ว โดยมีสัดส่วนของธาตุอยู่จำนวนมากซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยส่วนประกอบอนินทรีย์ [33] รวมถึง สังกะสี (Zn), แคลเซียม (Ca) และ เหล็ก (Fe) มีความเข้มข้นสูงในคาร์บอนแบล็คเช่นเดียวกัน กล่าวคือคาร์บอนแบล็คได้รับการกระตุ้นด้วย

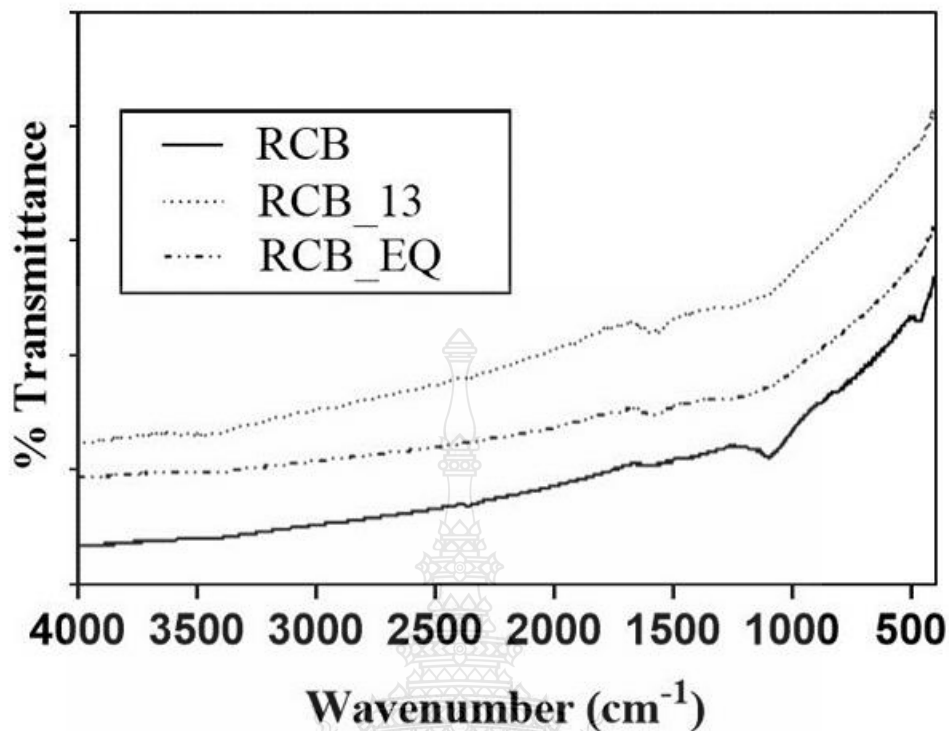
กระบวนการขจัดแร่ธาตุที่เป็นกรดเพื่อลดสิ่งเจือปนอินทรีย์และขจัดส่วนประกอบที่ไม่พึงประสงค์ โดยสิ่งเจือปนอินทรีย์เกือบทั้งหมด เช่น สังกะสี ถูกกำจัดโดยการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก (HNO_3) ลดลง 98.29 % โดยประมาณ และเนื่องจากการกระตุ้นของกรดไนตริกจะเปลี่ยนอนุพันธ์ของสังกะสีกลายเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ ซิงไนเตรท(ZnNO_3) [34] โดยกลุ่มตัวอย่างทดลองที่ 13 (RCB_13) แสดงสถานะที่ดีที่สุดในการทดลอง (ความเข้มข้นของไอโอดีนสูงสุด) ในขณะที่ RCB_EQ ได้รับการปรับให้เหมาะสมตามวิธีการตอบสนองพื้นผิว โดยโลหะหนักส่วนใหญ่ลดลงมากกว่าร้อยละ 90 ยกเว้นกำมะถันและคลอรีนซึ่งลดลง 43.27 และ 53.96 % ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ตารางโลหะหนักของคาร์บอนแบล็ค

Sample	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Co	Cu	Zn
RCB	1.6484	177	657	2856	10.06	1386	239	158	14871
RCB_13	0.7889	109	441	69.1	2.94	213	13.69	10.66	641
RBC_EQ	0.9351	81.49	43.45	31.57	0.87	28.7	5.08	12.76	253

4.3 กลุ่มฟังก์ชันพื้นผิวบนคาร์บอนแบล็ค (Fourier-transform infrared spectroscopy; FTIR)

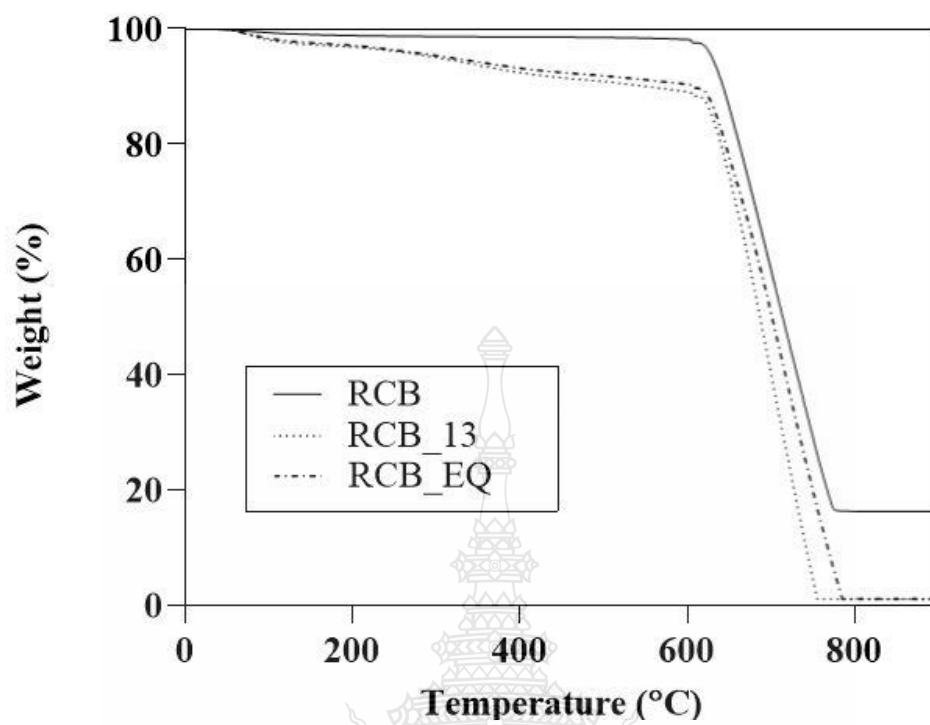
รูปที่ 4.6 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนคาร์บอนแบล็คซึ่งวิเคราะห์จาก FT-IR spectra โดยพีคการดูดซับที่เป็นลักษณะเฉพาะของ RCB_13 และ RCB_EQ ค่อนข้างคล้ายกันไม่พบหมู่ฟังก์ชัน พีคที่ 2357 cm^{-1} แต่ในทางตรงกันข้ามกับ RCB พบหมู่ฟังก์ชัน C=O [10] และจุดพีคที่ช่วง 1586 และ 1587 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C=C ทั้งสามกลุ่มทดลอง และพีคที่ 1099 cm^{-1} RCB พบหมู่ฟังก์ชัน S=O - ที่มีฟังก์ชันต่างๆ ได้แก่ ซัลโฟนาไมด์ ซัลโฟน และซัลฟอกไซด์ [35] ในทางตรงกันข้าม RCB_13 และ RCB_EQ ไม่ถูกตรวจพบหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเนื่องจากผ่านกระบวนการขจัดแร่ธาตุ



รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของคาร์บอนแบล็ค

4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA)

กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนของ RCB, RCB_13 และ RCB_EQ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 โดยการสลายตัวด้วยความร้อนของ RCB, RCB_13 และ RCB_EQ เริ่มต้นที่ 100 องศา โดย RCB มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักประมาณ 5% ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงช่วงอุณหภูมิ 620 ถึง 770 °C แต่ในทางกลับกันการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ RCB_13 และ RCB_EQ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 100 °C โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักประมาณ 17% จนถึงช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C เนื่องจากผลของการลดแร่ธาตุจากการกำจัดสารอินทรีย์และแร่ธาตุออกจากคาร์บอนแบล็ค (RCB) และช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 620 ถึงใกล้ 800 °C พบว่าการสูญเสียน้ำหนักอย่างมากทั้ง RCB, RCB_13 และ RCB_EQ



รูปที่ 4.7 กราฟการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของคาร์บอนแบล็ค

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

คาร์บอนแบล็คหลังจากการกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) จากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ไฮโดรเจนที่ใช้แล้วโดยกรดไฮโดรฟลูออริก จากนั้นกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมีใช้กรดไนตริก (HNO_3) และการบวนการทางความร้อนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวซึ่งแสดงจากไอโอดีนนัมเบอร์ ทำให้สามารถอัพเกรดคาร์บอนแบล็คอยู่ในเกรด N330 ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยสภาวะการทดลองที่ อุณหภูมิ 30-50 °C ที่เวลา 6-24 h และอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็คต่อสารเคมี 0.25-1 g/ml ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ซึ่งเป็นการระบุปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองของการออกแบบการทดลองในแต่ละครั้ง ซึ่งพบว่าแบบจำลองกำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9874 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยสภาวะการทดลองอุณหภูมิที่ 46.74 °C เป็นเวลา 23.24 h และอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คต่อกรดไนตริก 0.76 g/ml สามารถเพิ่มไอโอดีนนัมเบอร์จาก 34.4 mg/g เป็น 117.34 mg/g จากปรับสภาวะให้ที่เหมาะสมโดยโปรแกรม Design Expert และได้สมการทำนายผลการทดลองซึ่งแสดงผลลัพธ์ผ่านจำนวนไอโอดีนนัมเบอร์ รวมถึงตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายผลการทดลองจากการทดลองซ้ำซึ่งผลการทดลองไอโอดีนนัมเบอร์เป็น 119 mg/g ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.25% และในส่วนโลหะหนักส่วนใหญ่ลดลงมากกว่า 90% ยกเว้นกำมะถันและคลอรีนซึ่งลดลง 43.27 และ 53.96 % ตามลำดับ โดยที่คาร์บอนแบล็คกลุ่ม RCB_13 และ RCB_EQ ถูกกำจัดเกือบทั้งหมดจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 620 ถึง 800 °C และคาร์บอนแบล็คที่ปรับสภาพแล้วจะไม่พบหมู่ฟังก์ชัน S=O จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวบนคาร์บอนแบล็ค

บรรณานุกรม

- [1] Pakdel, H., Pantea, D. M., & Roy, C. Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 57(1), 91-107, 2011.
- [2] Menares, T., Herrera, J., Romero, R., Osorio, P., & Arteaga-Pérez, L. E. Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Waste management*, 102, 21-29, 2020.
- [3] Reschner, K. Scrap tire recycling a summary of prevalent disposal and recycling methods. *Entire-Engineering*, Berlin, 1, 115-240, 2008.
- [4] Bowles, A. J., & Fowler, G. D. Assessing the impacts of feedstock and process control on pyrolysis outputs for tyre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106277, 2009.
- [5] C. Arnal, M.U., Alzueta, A. Millera and R, Bilbao. Experimental and kinetic study of the interaction of a commercial soot toward no at high temperature. Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11-15, 2011.
- [6] ASTM D1765-16. Standard classification system for carbon black used in rubber products. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [7] Martínez, J. D., Cardona-Urbe, N., Murillo, R., García, T., & López, J. M. Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization. Production and application in rubber compounding, *Waste management*, 85, 574-584.
- [8] Urrego-Yepes. W., Cardona-Urbe, N., Vargas-Isaza. C. A., & Martínez, J. D. Incorporating the recovered carbon black produced in an industrial-scale waste tire pyrolysis plant into a natural rubber formulation. *Journal of Environmental Management*, 287, 112292, 2021.
- [9] Sagar, M., Nibedita, K., Manohar, N., Kumar, K. R., Suchismita, S., Pradhyesh, A., & Jayaramudu, J. A potential utilization of end-of-life tires as recycled carbon black in EPDM rubber. *Waste management*, 74, 110-122, 2018.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Dwivedi, C., Manjare, S., & Rajan, S. K. Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black. Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds, *Composites Part B: Engineering*, 200, 108346, 2020.
- [11] Dong, P., Maneerung, T., Ng, W. C., Zhen, X., Dai, Y., Tong, Y. W., & Neoh, K. G. Chemically treated carbon black waste and its potential applications. *Journal of hazardous materials*, 321, 62-72, 2017.
- [12] Pundlik, W., Vikaskumar, S., Avadhesh, K., & Desai, K. R. Acid demineralization and characterization of carbon black obtained from pyrolysis of waste tire using thermal shock process. *Int J Res Chem Environ*, 13, 208-212, 2012.
- [13] Shah, J., Jan, M. R., Mabood, F., & Shahid, M. Conversion of waste tyres into carbon black and their utilization as adsorbent. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 53(5), 1085-1089, 2006.
- [14] Sugatri, R. I., Wirasadewa, Y. C., Saputro, K. E., Muslih, E. Y., Ikono, R., & Nasir, M. Recycled carbon black from waste of tire industry: thermal study. *Microsystem Technologies*, 24(1), 749-755, 2018.
- [15] Mäkelä, M. Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review. *Energy Conversion and Management*, 151, 630-640, 2017.
- [16] Balajii, M., & Niju, S. A novel biobased heterogeneous catalyst derived from *Musa acuminata* peduncle for biodiesel production–Process optimization using central. *Renewable Energy*, 145, 134-140, 2021.
- [17] Yahya, S., Wahab, S. K. M., & Harun, F. W. Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology. *Renewable Energy*, 157, 164-172, 2020.

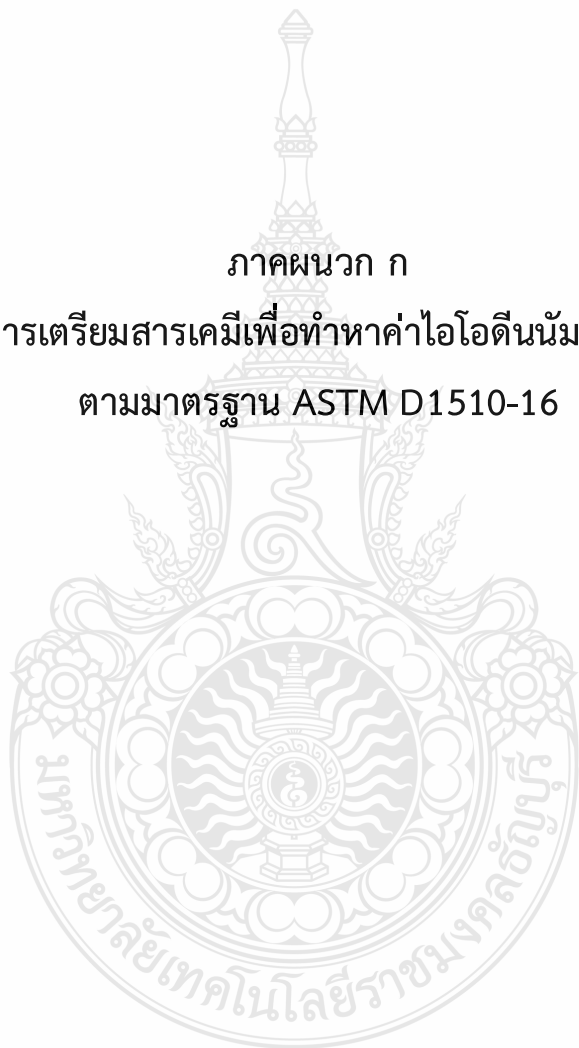
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] Junsittiwate, R., Srinophakun, T. R., & Sukpancharoen, S. Multi-objective atom search optimization of biodiesel production from palm empty fruit bunch pyrolysis. *Heliyon*, e09280, 2022.
- [19] Martin Tanco, Elisabeth Viles, Laura Ilzarbe and Maria Jesus Alvarez. Dissecting DoE Software. *Six Sigma Forum Magazine*, May 2008.
- [20] John Cornley. Design of Experiments: useful statistical tool in assay development or vendor disconnects. *Drug Discovery World*, Winter 2009/2010.
- [21] Phetyim, N and Pivsa-Art, S. Prototype Co-Pyrolysis of Used Lubricant Oil and Mixed Plastic Waste to Produce a Diesel-Like Fuel. *Energies*, 2018:pp 1-11.
- [22] การผลิตยางรถยนต์. 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://ditkm.myreadyweb.com/article/topic-41910.html>
- [23] ความสำคัญและประโยชน์ของคาร์บอนแบล็คในทางอุตสาหกรรม. 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2523_93_12.pdf
- [24] คาร์บอนสีดำ. 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://hmong.in.th/wiki/Carbon_black
- [25] spexcertiprep. Guide to Standard Test Methods for Carbon Black Iodine Adsorption Number ASTM D1510. 2565. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.spex.com/getmedia/a39e2a86-e6d2-422d-a6d5-68c4d1d870e8/Product-Guide-to-Carbon-Black.pdf?ext=.pdf>
- [26] คุณภาพของคาร์บอนแบล็ค. 2565. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2523_94_11.pdf
- [27] การออกแบบการทดลอง. 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2553/enin20453as_ch2.pdf
- [28] จันทิมา ชั่งสิริพร และคณะ. การผลิตถ่านถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพาราที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. 2559 (14-20).
- [29] Mohd Shafiq Hakimi Mohd Shaid, Muhammad Abbas Ahmad Zaini. Et. Al. Evaluation of methylene blue dye and phenol removal onto modified CO₂-activated pyrolysis tyre powder. (112), 2019.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] Yuan Gao, Qinyan Yue. Et. Al. Preparation of high surface area-activated carbon from lignin of papermaking black liquor by KOH activation for Ni(II) adsorption. (217), 2013.
- [31] Jenny Pena, Audrey Villot and Claire Gerente. Pyrolysis chars and physically activated carbons prepared from buckwheat husks for catalytic purification of syngas. (132), 2020.
- [32] Linfeng Zhu, Feng Shen. Et. Al. Black liquor-derived porous carbons from rice straw for high-performance supercapacitors. (217), 2017.
- [33] Ruben Gomez-Hernandez, Yesmin Panecat-Bernal and Miguel Angel Mendez-Rojas. High yield and simple one-step production of carbon black nanoparticles from waste tires. 2019.
- [34] Hassan, A. A., Zhang, Z., Formela, K., & Wang, S. Thermo-oxidative exfoliation of carbon black from ground tire rubber as potential reinforcement in green tires. Composites Science and Technology, 2011.
- [35] Steinmeyer DE, Levine AM and Erickson DM. Method of devolatilizing recycled carbon black and associated apparatus. 20 Aug 2013.
- [36] Shabayev, P. Response of legumes to co-inoculation with nodule bacteria and plant growth promoting rhizobacteria. Int. J. Sci. Technol, 5, 1-9.
- [37] X Zhang, H Li, Q Cao, and L Jin. Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black. Waste Management & Research, 36(5), 436-444.
- [38] Syahirah Yahya, Syamsul Kamar Muhamad Wahab and Farah Wahida Harun. Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using Fe-Montmorillonite K10 by response surface methodology. Renewable Energy 157 (2020), 164-172.

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารเคมีเพื่อหาค่าไอโอดีนนมเบอร์
ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16



ก1 สารละลายโซเดียมไธโรซัลเฟตความเข้มข้น 0.0394 โมล/ลิตร

เตรียมน้ำปราศจากไอออน 250 ml ในขวดแก้วปริมาตร 1000 ml เติมโซเดียมไธโรซัลเฟต (Sodium thiosulphate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) น้ำหนัก 9.78125 g และเติมเอมิลแอลกอฮอล์ (Amyl alcohol) ปริมาตร 5 ml ผสมให้เข้ากันจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนเต็ม 1000 ml

ก2 สารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.04728 mol/L

เตรียมโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI) น้ำหนัก 57.0 g ใส่ในขวดสีชาปริมาตร 1000 ml จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 100 ml และเติมตัวทำปฏิกิริยาไอโอดีน (Iodine; I_2) น้ำหนัก 6 g ผสมให้เข้ากันจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนเต็ม 1000 ml

ก3 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตไอโอไดด์ความเข้มข้น 0.0394 mol/L

เตรียมน้ำปราศจากไอออน 200 ml ในขวดแก้วปริมาตร 1000 ml เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI) น้ำหนัก 45.0 g และเติมโพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate; KIO_3) น้ำหนัก 1.4054 g ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 1 h ผสมให้เข้ากันจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนเต็ม 1000 ml

ก4 สารละลายกรดซัลฟิวริก

เตรียมน้ำปราศจากไอออน 200 ml ในขวดแก้วปริมาตร 1000 ml เติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) ปริมาตร 7 ml และเติมน้ำปราศจากไอออน 90 ml ผสมให้เข้ากันจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนเต็ม 1000 ml

ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการหาค่าไอโอดีนน้ำมันเบอร์ดตามมาตรฐาน ASTM D1510-16



ข1 ขั้นตอนการทดลองหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

เตรียมคาร์บอนแบล็คที่ผ่านการกระตุ้นน้ำหนัก 0.5 g อ้างอิงจากตาราง ข.1 ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 15 ml จากนั้นปิเปตสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.0394 mol/L ปริมาตร 10 ml แล้วปิดฝา จากนั้นเขย่าหลอดทดลองด้วยเครื่องเขย่าผสมสารที่สภาวะ 240 strokes/min เป็นเวลา 1 min จากนั้นนำหลอดทดลองเหวี่ยงแยกชั้นด้วยเครื่องเหวี่ยงที่สภาวะ 8000 rpm เป็นเวลา 3 min จากนั้นแยกสารละลายไอโอดีนด้วยกระดาศกรองและปิเปตสารละลาย 5 ml ใส่เครื่องแก้วทดลอง และเติมน้ำปราศจากไอออน 40 ml จากนั้นไตเตรทกับสารละลายโซเดียมไทรโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.0394 mol/L ด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักคาร์บอนแบล็คตามช่วงการดูดซับไอโอดีน

Iodine number, I (mg/g)	Sample weight (g)	Ratio I ₂ : sample weight
0-130.9	0.500	50:1
131.0-280.9	0.250	100:1
281.0-520.9	0.125	200:1
521.0 and above	0.0625	400:1

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณค่าไอโอดีนน้ำมันเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16



ค วิธีการคำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตามมาตรฐาน ASTM D1510-16

$$I = ((B-S)/B) \times (V/W) \times N \times 126.91$$

ค.1

I = จำนวนไอโอดีนนัมเบอร์

B = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไตรไอซัลเฟตที่ไตรเตรทจาก blank (ml)

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไตรไอซัลเฟตที่ไตรเตรทจากตัวอย่างการทดลอง (ml)

V = ปริมาตรสารละลายไอโอดีนที่เติมในตัวอย่างการทดลอง (ml)

W = น้ำหนักตัวอย่างการทดลอง (g)

N = ค่าคงที่ จำนวนกรัมสมมูลของสารละลายไอโอดีน 1 ลิตรเท่ากับ 126.91



ภาคผนวก ง
การการเปรียบธาตุโลหะในคาร์บอนแบล็ค



Condition	P 15	S16	Cl 17	K 19	Ca 20	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30
Raw Carbon Black	ND<90.64	1.6484	177	657	2856	ND<0.73	0.75	10.06	1386	239	ND<0.46	158	14871
HF 24 hour	ND<52.74	1.6123	49.93	37.13	332	ND<0.48	1.91	2.06	440	78.56	3.76	226	6110
Nitric 24 Hr	ND<48.49	1.1335	103	43.29	130	2.8	2.36	1.59	162	17.7	4.37	19.87	1143
Nitric-NonHF 6 Hr	ND<50.45	0.7889	109	441	69.1	3.01	3.48	2.94	213	13.69	4.55	10.66	641
Nitric-NonHF 6 Hr + T50	57.36	0.9351	81.49	43.45	31.57	2.66	2.41	0.87	28.7	5.08	4.38	12.76	253

ภาพที่ ง1 การเปรียบเทียบธาตุโลหะในคาร์บอนแบล็ค



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นาย ณัฐวัฒน์ ทองเหลือง
วัน เดือน ปีเกิด 5 มกราคม 2538
ที่อยู่ 33/180 คอนโดลุมพินีทาวน์ชิป รังสิต-คลอง1 ตึก E7 ชั้น 8 ซ.รังสิต-
นครนายก 28/1 ถ.เลียบคลองรังสิต-นครนายก ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี
จ.ปทุมธานี
การศึกษา ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี และวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทร 092-4998251
อีเมลล์ thonglhueng.n@Gmail.com

