

การปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามสำหรับการดูดซับสี

ย้อมอาหารทาร์ตราซีน

Surface Modification of Activated Carbon from Tamarind Shell

for Tartrazine Adsorption



ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ใบรับรองปัญหาพิเศษ

การปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามสำหรับการดูดซับสีย้อม  
อาหารทาร์ตราซีน

Surface Modification of Activated Carbon from Tamarind Shell for  
Tartrazine Adsorption

จัดทำโดย

ชนากร ธรรมสาร รหัสนักศึกษา 58080174

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

(ดร. พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม)

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

13 / มิ.ย. / 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ	การปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามสำหรับการดูดซับ สีย้อมอาหารทาร์ทราซีน	
ชื่อนักศึกษา	ชนากร ธรรมสาร	รหัสนักศึกษา 58080174
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร	
พ.ศ.	2562	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม	

### บทคัดย่อ

ปัญหาพิเศษทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามเพื่อดูดซับสีย้อมอาหารทาร์ทราซีน โดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทำการเตรียมด้วยวิธีที่แตกต่างกันดังนี้ ATS1 กระตุ้นทางเคมีด้วย KOH, ATS2 กระตุ้นทางเคมีด้วย  $H_2SO_4$  และ ATS3 กระตุ้นทางเคมีด้วย KOH กับ  $H_2SO_4$  และทำการวัดค่าไอโอดีน ผลพบว่า ATS2 ให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด แสดงถึงการมีพื้นที่ผิวสูงสุด จึงเลือกมาทำการศึกษาการดูดซับสีทาร์ทราซีน ปัจจัยที่ใช้ศึกษาการดูดซับสีทาร์ทราซีน โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design และทำการวิเคราะห์ Response Surface Methodology โดยมีปัจจัย 4 อย่าง ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) ค่าความเป็นกรดเบส (pH) เวลา (นาที) และความเร็วรอบการเขย่า (rpm) พบว่า ปัจจัยทั้ง 4 อย่าง มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการกำจัดความเข้มข้นของสีทาร์ทราซีนอย่างมีนัยสำคัญ ( $R^2 = 93.14\%$ ) สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีทาร์ทราซีน คือ การใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม pH 2 ระยะเวลา 160 นาที และใช้ความเร็วรอบการเขย่า 200 rpm โดยสภาวะนี้ให้ร้อยละการกำจัดความเข้มข้นของสีทาร์ทราซีนเท่ากับ 60.30

คำสำคัญ: สีทาร์ทราซีน ถ่านกัมมันต์ การดูดซับ ค่าเลขไอโอดีน

Special problem title	Surface Modification of Activated Carbon from Tamarind Shell for Tartrazine Adsorption
Student name	Thanakorn Thammasarn Student ID 58080174
Program	Bachelor of Science in Food Process Engineering
Year	2019
Advisor	Dr. Pongsert Sriprom

### ABSTRACT

The special problem focused on using tamarind shell as raw material to produce activated carbon for tartrazine adsorption. By using hydrothermal technique at 110 °C. The production of activated carbon used different chemical activation as follow by ATS1 used KOH, ATS2 used H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and ATS3 used KOH&H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and measured iodine value found that ATS2 has highest iodine value means ATS2 has highest surface area, Therefore the ATS2 was selected for study tartrazine adsorption. The studied tartrazine adsorption by using the Box-Behnken design of experiment and analyzed by Response Surface Methodology. The factors were the amount of activated carbon (g), time (min), pH and rotation (rpm). The studied showed that the amount of activated carbon, time, pH and rotation were significantly affected on the tartrazine removal ( $R^2 = 93.14\%$ ). The optimum conditions for the tartrazine removal were the 2 g of activated carbon, absorb time of 160 min, pH 2 and rotate speed 200 rpm. The result of this condition tartrazine removal was 60.30%.

Keywords: Tartrazine, Activated Carbon, Adsorption, Iodine Value

## กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาพิเศษในหัวข้อเรื่อง การปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามสำหรับการดูดซับสี ย้อมอาหารทาร์ทราซีน สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม ที่ได้ให้การแนะนำช่วยปรับปรุงแก้ไข ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะ และติดตามความก้าวหน้าในการทำงานนี้ ผู้วิจัยตระหนักถึงความเอาใจใส่และความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พงษ์สวัสดิ์ อัครวิทย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความกรุณาในการใช้ห้องปฏิบัติการในการวิจัย ทั้งยังคอยช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่าน ที่คอยสั่งสอน ให้ความรู้แก่ผู้จัดทำตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่ในคณะอุตสาหกรรมเกษตร จนกระทั่งประสบความสำเร็จในวันนี้

รวมถึงขอขอบคุณนายวงศกร สองเมืองแก่น และนายอิพงษ์ ไพค่านาม พี่นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สั่งสอน ให้คำแนะนำ และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณ บริษัท ปิ่นเพชร จำกัด ที่จัดหาวัสดุดิบในการทำวิจัยมาให้ จนปัญหาพิเศษสำเร็จไปด้วยดี

นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้รับการช่วยเหลือและกำลังใจจากคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง และเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆ มากมาย อนึ่ง ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ปัญหาพิเศษเล่มนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย ข้าพเจ้าในฐานะผู้จัดทำปัญหาพิเศษนี้ รู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ธนากร ธรรมสาร

28 มีนาคม 2562

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มะขาม	4
2.2 ถ่านกัมมันต์	5
2.3 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)	6
2.4 การกระตุ้น (Activation)	7
2.5 สีทาร์ทราซีน (Tartrazine)	8
2.6 การดูดซับ (Adsorption)	9
2.7 การวิเคราะห์แบบ Response Surface Methodology, RSM	11
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	13
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	13
3.2 อุปกรณ์	13
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	21
4.1 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเปลือกมะขาม	21
4.2 การหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	21
4.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีทาร์ทราซีน	22
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	37
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	39
ประวัติผู้เขียน	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปัจจัยและระดับค่าปัจจัยที่ทำการศึกษาเพื่อหาพื้นที่ผิวตอบสนอง	17
3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการดูดซับสีทาร์ทราซีน	17
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมะขาม	21
4.2 ค่าเลขไอโอดีนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์	22
4.3 ผลการทดลองหาค่าการกำจัดสีทาร์ทราซีนตามแผนการทดลองแบบ Box-Behnken	23
4.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย	25
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกำจัดสีทาร์ทราซีน	27
4.6 การยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกำจัดสีทาร์ทราซีน	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 มัชฌิม	4
2.2 โครงสร้างโมเลกุลสีทาร์ทราซีน	8
3.1 เตาเผาขณะที่อัดแก๊สไนโตรเจนเข้าไป	14
3.2 เตาอบ และเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล	15
3.3 กระบวนการการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และการเลือกถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่ดีที่สุด	20
4.1 แผนภูมิพาเรโตของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย	28
4.2 กราฟผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง	29
4.3 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย	30
4.4 กราฟแสดงผลกระทบร่วมของปัจจัย 4 ปัจจัย	31
4.5 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการกำจัดสีทาร์ทราซีน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะขาม เป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่ประกอบไปด้วยส่วนของเนื้อมะขาม ยุ่ง และเปลือก โดยทั่วไป คนมักจะนำเอาเพียงแค่ส่วนเนื้อมาใช้ประโยชน์ทั้งการนำมาประกอบอาหารและในกระบวนการแปรรูปต่างๆทำให้มีเศษเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเปลือกมะขามไปใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อย เพื่อเป็นการนำไปเพิ่มมูลค่าให้เปลือกมะขามจึงนิยมทำเป็นถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัตถุที่มีพื้นที่ผิวและมีความพรุนสูง มีความสามารถในการดูดซับสูง จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กรองอากาศในเครื่องปรับอากาศ ในอุตสาหกรรมยา ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) โดยวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีวิธีการผลิตแบบวิธีดั้งเดิม ซึ่งให้พื้นที่ผิวค่อนข้างน้อย ซึ่งเมื่อใช้ในการดูดซับแล้วได้ค่าการดูดซับที่ต่ำ จึงมีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดย Adetola E. Ogungbenro และคณะ (2015) ได้ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัมตัวอย่างผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าถ่านกัมมันต์ให้พื้นที่ผิว 798 ตร.ม/กรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.21 ลบ.ซม/กรัม Akram Alabadi และคณะ (2015) จึงใช้การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี Hydrothermal โดยใช้เจลาตินกับสตาร์ชที่ผ่านการเผาแล้วมาผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 1,957 ตร.ม/กรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.79 ลบ.ซม/กรัม ต่อมา Kuan Huang และคณะ (2016) ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิว โดยใช้คาร์บอนรูพรุนขนาด Mesopore ผสมกับโซเดียมเอไมด์เป็นสารตั้งต้นโดยการใช้กระบวนการ Hydrothermal ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้ให้พื้นที่ผิวสูงถึง 3,180 ตร.ม/กรัม และปริมาตรรูพรุนสูงถึง 1.86 ลบ.ซม/กรัม ซึ่งได้ค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับการดูดซับ โดยสีทาร์ทราซินในอุตสาหกรรมอาหารจัดเป็น Food Additive ประเภทสารให้สีใช้ย้อมสีอาหาร เพื่อให้อาหารมีสีสันสวยงาม น่ารับประทาน นิยมใช้ในเครื่องดื่ม ของหวาน ลูกกวาด ลูกอม และผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยพบว่าในการเคลือบผลิตภัณฑ์สามารถเคลือบติดผิวลูกกวาดได้เพียง 20% (พิมพ์เพ็ญ และ นิธิยา, 2561) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีทาร์ทราซีนมีองค์ประกอบเป็นสีไอโซคายส์ ยากต่อการบำบัด และมีอันตราย เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเปลี่ยนแปลงเป็นสารอะโรมาติกเอมีน และทำปฏิกิริยากับเซลล์ในร่างกายของเรา เป็นสารก่อให้เกิดเซลล์มะเร็ง (Mohammed A Kassem และคณะ, 2014) จึงต้องหาวิธีในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนที่เหลือ 80% ก่อนถูกปล่อยเป็นน้ำทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นมีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ โดย Mohammed A Kassem และคณะ (2014) ได้ทำการใช้เม็ดถ่านกัมมันต์ที่มีส่วนผสมของ Belladonna ในการดูดซับสารละลายสีย้อมทาร์ทราซีนความเข้มข้น 100 มก./ลิตร โดยสามารถดูดซับได้สูงสุด 60% ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

ดังนั้นปัญหาพิเศษนี้ จึงทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขาม โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อใช้ในการดูดซับสีทาร์ทราซีน โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเปลือกมะขาม และเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขาม

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีทาร์ทราซีน (Tartrazine) ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขาม

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามเพื่อใช้ในการดูดซับสีทาร์ทราซีน โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยมีผลตอบสนองที่ต้องการคือ ปริมาณการดูดซับสีทาร์ทราซีน ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) รวมทั้งหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี Hydrothermal synthesis โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้

1.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1.3.1.1 เตรียมถ่านกัมมันต์ ATS1 โดยการไฮโดรเทอร์มอลด้วยน้ำ ต่อด้วยการกระตุ้นด้วยกรด

$\text{H}_2\text{SO}_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.1.2 เตรียมถ่านกัมมันต์ ATS2 โดยการไฮโดรเทอมอลด้วยน้ำ ต่อด้วยการกระตุ้นเบส KOH

1.3.1.3 เตรียมถ่านกัมมันต์ ATS3 โดยนำมาการไฮโดรเทอมอลด้วยน้ำ ต่อด้วยการกระตุ้น  $H_2SO_4$  และ KOH

1.3.2 ศึกษาสถานะและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีทาร์ทราซีน (Tartrazine)

1.3.2.1 ตัวแปรอิสระ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีทาร์ทราซีน

ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้

สถานะความเป็นกรด-เบส

ความเร็วรอบการเขย่า

1.3.2.2 ตัวแปรตาม

การดูดซับสารละลายสีทาร์ทราซีน (Tartrazine)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถทำถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขาม และเพิ่มคุณภาพด้วยเทคนิค Hydrothermal โดยใช้สถานะที่เหมาะสม ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนที่สูง

1.4.2 ทราบถึงกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เพื่อให้เหมาะกับการดูดซับสีทาร์ทราซีนให้ได้มากที่สุด

1.4.3 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกมะขาม ซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มะขาม

มะขาม ชื่อวิทยาศาสตร์ Tamarindus indica L. จัดอยู่ในวงศ์ถั่ว (FABACEAE หรือ LEGUMINOSAE) จัดเป็นต้นไม้ในประเทศแถบเขตร้อน มีถิ่นกำเนิดจากในทวีปแอฟริกา มะขามในไทยมีสองชนิดคือมะขามเปรี้ยวและมะขามหวาน โดยมะขามหวานมีหลายพันธุ์เช่น พันธุ์น้ำผึ้ง อินทผลัม หมื่นจง สีทอง ในบางครั้งจะเรียกมะขามตามลักษณะของฝัก นอกจากนี้มะขามยังเป็นต้นไม้ประจำจังหวัดเพชรบูรณ์ และตามตำราพรหมชาติยังถือว่ามะขามเป็นไม้มงคลชนิดหนึ่ง สำหรับประโยชน์ของมะขามและสรรพคุณมะขามนั้นมีมากมาย จัดว่าเป็นผลไม้เพื่อสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและยังมีสรรพคุณใช้เป็นยารักษาโรคอีกด้วย โดยส่วนที่นำมาใช้เป็นยาจะเป็นเนื้อฝักแก่ (มะขามเปียก) เปลือกของลำต้น (ทั้งสดและแห้ง) และเนื้อในเมล็ด สามารถช่วยรักษาได้หลายโรค เช่น เป็นยาขับเสมหะ แก้อาการท้องเดิน บรรเทาอาการท้องผูก ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิ เป็นต้น ในด้านคุณค่าทางโภชนาการมะขามยังอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย อย่างวิตามินซี วิตามินบี 2 วิตามินเอ ธาตุแคลเซียม ธาตุฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น มะขามที่แก่จัดนั้นเราจะเรียกว่า มะขามเปียก โดยมะขามหวาน 100 กรัม จะมีแคลอรีเท่ากับ 314 แคลอรี (USDA Nutrient database, 2018)



ภาพที่ 2.1 มะขาม

ที่มา: iFit4Health (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon or Activated charcoal) โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก วัสดุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ควรเลือกใช้วัสดุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ และราคาถูก โดยวัสดุดิบจากธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง วัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพ เช่น กะลามะพร้าว แกลบข้าว ชานอ้อย ชี้เลื่อย เมล็ดและเปลือกผลไม้ เป็นต้น คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ คือ เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก ปริมาตรรูพรุน การกระจายของรูพรุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนสูงมาก เพราะว่ามีรูพรุนขนาดจุลภาคจำนวนมาก และสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้อีกโดยใช้สารเคมีในการกระตุ้น เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์เกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจำนวนมาก ซึ่งพื้นที่ผิวภายในผนังรูพรุนหรือรอยแตกเหล่านั้นทำให้เกิดพื้นที่ว่างขนาดใหญ่ที่อนุภาคสาร และโมเลกุลก๊าซจำนวนมากสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือถูกกักอยู่ในถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปคนส่วนใหญ่จะรู้จักและคุ้นเคยกับการใช้ถ่านนี้ในการกรองน้ำ แต่นอกเหนือจากการกรองน้ำแล้ว ถ่านกัมมันต์ยังนิยมใช้กรองสาร และเป็นวัสดุดูดซับในหลายอุตสาหกรรมอีกด้วย (อภิย์, 2557)

การดูดซับอนุภาคหรือโมเลกุลก๊าซของถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาทางกายภาพโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการกรองหรือดูดซับสารจะต่ำลง เนื่องจากที่ว่างภายในโครงสร้างถ่านมีน้อยลง ผู้ใช้งานจึงต้องทำการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์เก่าออก และใส่ถ่านกัมมันต์ใหม่เข้าไปทดแทน โดยถ่านกัมมันต์ที่ถูกใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นซ้ำ (reactivated) เพื่อกำจัดสารต่างๆที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ออกให้หมดก่อนนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2559)

**ชนิดของสารดูดซับและการประยุกต์ใช้** สามารถแบ่งตามขนาดรูพรุนได้ดังนี้

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 nm ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือสารระเหย

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5-200 nm ใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาเชิงตัวเร่ง (Catalytic reaction) ใช้ ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ฟอกสี

ค. ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 nm เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

แบ่งตามลักษณะของรูปร่างดังนี้

ก. ประเภทผง(Powder) ขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 nm ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงใช้สำหรับพอกสีและการผลิตยา

ข. ประเภทเกร็ด(Pellet) ขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 nm ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด ใช้สำหรับทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการที่มีปฏิกิริยาในสถานะแก๊ส

ค. ประเภทขึ้นรูปเป็นแท่ง(Extruded) ใช้ในเบตนิ่งเพื่อการดูดซับสารปนเปื้อนที่ต้องการอัตราการดูดซับที่สูง

โครงสร้างถ่านกัมมันต์

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ มีลักษณะเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนเรียงตัวเป็นชั้นๆ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากแกรไฟต์ โดยโครงสร้างเป็นผลึกเล็กมาก(Microcrystalites) มีองค์ประกอบกันเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม ด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆมีขนาด ประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กนี้เท่ากับ 20-50 อังสตรอม

สมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีลักษณะที่ผิวเป็นกรดหรือเบสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ในขณะที่สมบัติทางกายภาพแสดงถึงขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิว

ก. ชนิดเป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่ฟังก์ชันที่เกาะบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ คาร์บอนิล อัลดีไฮด์ คีโตน แอนไฮไดรด์ เป็นต้น ผิวถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ดูดซับโมเลกุลเบสได้ดี

ข. ชนิดเป็นเบส เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง หมู่ฟังก์ชันที่เกาะบนผิวถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี หมู่ฟังก์ชันนี้ได้แก่ ไฮดรอกซิลคาร์บอเนต เป็นต้น

## 2.3 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนแรกของการสร้างรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น ในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างในรูปของก๊าซและน้ำมันหาร์ ซึ่งจะได้อ่างที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะเกิดช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยการคาร์บอนไนซ์เป็นการไพโรไลซิสในที่อับอากาศเพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอน โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกของชีวมวล กลายเป็นโครงสร้างของถ่าน ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำ น้ำมันหาร์ และก๊าซต่างๆ

เมื่อใช้ความร้อนไล่ความชื้นและสารระเหยต่างๆออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่าถ่านชาร์ ส่วนที่หลุดออกมาคือ ก๊าซและน้ำมันคาร์บอน การบวนการคาร์บอนไนซ์จึงเป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น

## 2.4 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอนด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสาร ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดเนื่องจากวิธีการกระตุ้นทางเคมีมีหลากหลายวิธี และประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการเตรียมถ่านก่อนการกระตุ้นด้วย โดยทั่วไปการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นมี 2 วิธี ดังนี้

### ก. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

ทำให้ถ่านชาร์พัฒนาความพรุนมากขึ้น โดยการใช้สารออกซิไดซ์ เช่น  $\text{CO}_2$   $\text{O}_2$  เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส แก๊สออกซิไดซ์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่เหลืออยู่ และอะตอมคาร์บอนในถ่านชาร์เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ทำให้คาร์บอนถูกนำไปก่อให้เกิดรูพรุนใหม่ และยังทำให้พื้นที่ผิวมีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

### ข. การกระตุ้นทางเคมี

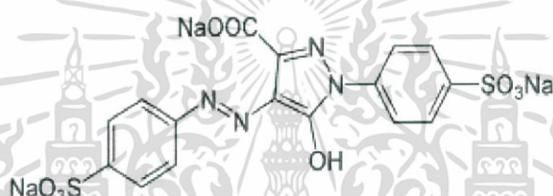
เป็นการผสมวัตถุดิบกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแล้วนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริก เป็นต้น กลไกการเกิดรูพรุน โดยวิธีการเตรียมทางเคมียังไม่ทราบชัดเจน จะแตกต่างกันไปตามสารเคมีที่ใช้ โดยคาดว่าสารเคมีจะมีบทบาทในการทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบ ข้อดีของการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้คืออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ แต่มีข้อเสียคืออาจมีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ยังสามารถรวมขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นเป็นขั้นตอนเดียวกันโดยเริ่มต้นจากวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์มาก่อน กระบวนการนี้มีข้อดีคือสามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติและทำให้เกิดรูพรุนที่ดีกว่า (Prasert, 2007)

อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ประกอบด้วยกระตุ้น 2 แบบ (ทางกายภาพและทางเคมี) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย (Yi Zhang et al., 2006)

## 2.5 สีทาร์ทราซีน (Tartrazine)

สีทาร์ทราซีน (Tartrazine) หรือเกลือไตรโซเดียมของ 5-ไฮดรอกซี-1-พารา-ซัลโฟฟีนิล-4-(พารา-ซัลโฟฟีนิลอะโซ) ไพราโซล-3-คาร์บอกซีลิก แอซิด (trisodium salt of 5-hydroxy-1-p-sulfophenyl-4-(p-sulfophenylazo) pyrazol-3-carboxylic acid) มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$  มวลโมเลกุลเท่ากับ 534.37 กรัม ในอุตสาหกรรมอาหารจัดเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ในกลุ่มสารให้สี (coloring agent) ประเภทสีสังเคราะห์ ให้สีเหลืองมะนาว ผลิตภัณฑ์ที่ใช้สีทาร์ทราซีนเป็นสีผสมอาหาร ได้แก่ ลูกกวาด ลูกอม หมากฝรั่ง แยม เยลลี่ โยเกิร์ต มัสตาร์ด (mustard) บะหมี่ ไอศกรีม น้ำอัดลม เครื่องดื่มที่ให้พลังงาน (energy drink) มันฝรั่งทอดกรอบ (potato chip) เป็นต้น ปัจจุบันสีทาร์ทราซีนอาจเป็นอาหารก่อภูมิแพ้ (food allergen)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลสีทาร์ทราซีน

ที่มา: Pual May (2018)

คุณลักษณะของสีทาร์ทราซีนมีดังนี้

- 1) มีลักษณะเป็นผง มีสีเหลือง สามารถละลายได้ในน้ำมีสีอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของน้ำหนัก
- 2) จำนวนน้ำหนักที่หายไป โดยการอบแห้งที่ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง รวมกับจำนวนคลอไรด์และซัลเฟต คิดคำนวณเป็น โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมซัลเฟต ตามลำดับ ทั้งหมดต้องไม่เกินร้อยละ 15 ของน้ำหนัก
- 3) สารที่ไม่ละลายในน้ำ (water-insoluble matter) ไม่เกินร้อยละ 0.2 ของน้ำหนัก
- 4) สารที่สกัดได้ด้วยอีเทอร์ (Ether-extractable matter) ไม่เกินร้อยละ 0.2 ของน้ำหนัก
- 5) สารหนู(คิดเป็น As) ไม่เกิน 3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตะกั่ว(คิดเป็น Pb) ไม่เกิน 10 มก./กก.
- 6) สีอื่น (subsidiary dyes) ไม่เกินร้อยละ 1 ของน้ำหนัก
- 7) สารที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ (intermediates) ไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) บ่งบอกถึงความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการ เคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การเกิดกระบวนการดูดซับ เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

### 2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดูดซับประเภทนี้มี พลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย

การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล ส่งผลให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับนั้นทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว(monolayer) เท่านั้น

แรงดึงดูดสำหรับการดูดซับทางกายภาพ แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดลักษณะการดูดซับทางกายภาพแบ่งออกเป็น

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

ข. แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic or Coulombic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดเสริมที่เกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับของแข็ง หรือสารดูดซับเกิดสภาพมีขั้ว (polarity)

แรงดึงดูดโดยแรงแวนเดอร์วาลส์เกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน(electron cloud) ซึ่งเคลื่อนที่รอบๆนิวเคลียสของอะตอม รูปร่างของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้เกิดสภาพขั้วคู่ (electric dipole) ที่ระดับต่างกันระหว่างอะตอมให้เกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ

### 2.6.2 กลไกการดูดซับ

ในทางทฤษฎี เราสามารถแบ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก(External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยก(Adsorbate) จะเข้าถึงสารดูดซับ(Adsorbent) ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ (Liquid film) โดยโมเลกุลดังกล่าวจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ และเกี่ยวข้องกับกลไกการแพร่ของโมเลกุล(molecular diffusion) และการถ่ายเทมวลสารแบบพา (convection mass transfer)

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน(Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยกจะแทรกตัวหรือแพร่เข้าถึงช่องว่างภายในสารดูดซับ(pore diffusion) เพื่อให้เกิดการดูดซับ โดยในขั้นนี้จะเกี่ยวข้องกับกลไกการแพร่ของโมเลกุลในระบบของแข็ง (diffusion in Solids)

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยกดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ผ่านมา

### 2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface of adsorbents) โดยอัตราเร็วในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับโดยพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย

ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดติด (Solute solubility and size) กล่าวได้ว่าขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของสารดูดซับ โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของสารดูดซับ

อุณหภูมิ (Temperature) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงอีกทางหนึ่งด้วย

ความปั่นป่วน (turbulence or mixing) ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ พิล์มน้ำ (ของไหล) ที่อยู่รอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของ สารดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกก็เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับแทน

ค่าพีเอช (pH value) มีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับไอออนอื่นๆ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และค่าการละลายน้ำของสารต่างๆอีกด้วย

## 2.7 การวิเคราะห์แบบ Response Surface Methodology , RSM

วิธีการพื้นผิวผลตอบ เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมของผลตอบสนองนี้ เช่น ผลตอบสนอง  $y$  เป็นฟังก์ชันของ  $x_1$  และ  $x_2$  ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

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

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟิก เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นที่ผิวผลตอบ ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง (สำนักหอสมุด, 2562)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านกัมมันต์ Adetola E. Ogungbenro และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัมซึ่งจัดเป็นหนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยอาศัยวิธีการไพโรไลซิส(Pyrolysis) และการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการกระตุ้นทางกายภาพโดยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สออกซิไดซ์ โดยใช้เวลาการกระตุ้นในแต่ละตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยเวลาที่ใช้อยู่ในช่วง 1 ถึง 3 ชั่วโมง จากผลการทดลองถ่านกัมมันต์ที่ใช้เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์BET พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเมล็ดอินทผลัมมีพื้นที่ผิว (surface area) เท่ากับ 798 ตร.ม/กรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.21 ลบ.ซม./กรัม ซึ่งยังเป็นค่าที่ต่ำอยู่พอสมควร ต่อมา Akram Alabadi และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากการเผาสตา์ชและเจลาติน โดยใช้สัดส่วนระหว่างสตา์ชและเจลาตินที่แตกต่างกันเพื่อหาสัดส่วนที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัล(Hydrothermal synthesis) และทำการปรับปรุงคุณภาพถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) ในสัดส่วนถ่านชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:4 จากนั้นเผาภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ไนโตรเจน จากผลการทดลองการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ดีที่สุดคือตัวอย่างที่มีสัดส่วนของสตาซและเจลาตินเท่ากับ 1:1 โดยผลจากการวิเคราะห์ BET พบว่ามีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 1,957 ตร.ม./กรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.79 ลบ.ซม./กรัม ซึ่งค่าที่ได้นั้นถือว่าสูงกว่าวิธีไฟโรไลซิสค่อนข้างมาก ต่อมา Kuan Huang และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความเป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) โดยใช้โซเดียมเอไมด์ (Sodium Amide,  $\text{NaNH}_2$ ) ในการกระตุ้น ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis) โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นในแต่ละตัวอย่างแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 400 ถึง 900 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของถ่านชาร์กับโซเดียมเอไมด์เท่ากับ 1:2 ในการกระตุ้นทางเคมีภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ไนโตรเจน โดยผลที่ได้จากตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจที่สุด โดยผลจากการวิเคราะห์ BET ตัวอย่างดังกล่าวมีพื้นที่ผิวสูงถึง 3,325 ตร.ม./กรัม และมีปริมาตรรูพรุนสูงถึง 1.86 ลบ.ซม./กรัม

Sushmita Banerjee และคณะ (2013) ได้นำซีลี้อย่างไร้จากวัสดุมูลค่าต่ำทางการเกษตร โดยผ่านการอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และบดให้ได้อนุภาค 0.425-0.6 มม. มาใช้ดูดซับสีทาร์ทราซินความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มก./ลิตร ได้สภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้เวลา 70 นาที ค่า pH เท่ากับ 3 สามารถดูดซับสีทาร์ทราซินได้ 97% และจะสามารถดูดซับได้ลดลงหากความเข้มข้นเริ่มต้นของสีทาร์ทราซินเริ่มต้นที่ 15 มก./ลิตร โดยจะสามารถดูดซับได้ 71% จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้กับความเข้มข้นสีทาร์ทราซินที่มีความเข้มข้นที่สูง

Mohammed A Kassem และคณะ (2014) ได้มีการนำถ่านกัมมันต์แบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ Belladonna ในการดูดซับสารละลายสีย้อมทาร์ทราซินความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ลิตร โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 4.0 กรัม ค่า pH เท่ากับ 1.5 ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยสามารถดูดซับสีทาร์ทราซินได้ 37% และหากใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20.0 กรัม ที่สภาวะเดียวกันจะสามารถดูดซับสีทาร์ทราซินได้สูงถึง 71.8%

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุุดิบและสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุุดิบ

เปลือกมะขาม (บริษัท ปิ่นเพชร จำกัด, ประเทศไทย)

สีทาร์ทราซีน (Tartrazine, บริษัท อติณพ จำกัด, ประเทศไทย)

##### 3.1.2 สารเคมี

น้ำกลั่น (Distilled water, H<sub>2</sub>O)

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH, AR grade, Merck KGaA, Germany)

กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, AR grade, RCI Labscan Limited, Thailand)

โซเดียมไฮโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AR grade, Merck KGaA, Germany)

ไอโอดีน (I<sub>2</sub>, AR grade, Merck KGaA, Germany)

โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI, AR grade, Merck KGaA, Germany)

โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO<sub>3</sub>, AR grade, Merck KGaA, Germany)

โซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, AR grade, Merck KGaA, Germany)

#### 3.2 อุปกรณ์

บีกเกอร์ขนาด 100,250,500 และ1000 mL (Duran, Germany)

ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL (Duran, Germany)

ขวดปรับปริมาตรขนาด 10,50,100,200,250 และ 1,000 mL (Duran, Germany)

ไซริงค์ ฟิวเตอร์ (13mm, Nylon 0.45 µm, PureTech, USA)

บิวเรตต์ ขนาด 10 mL (Duran, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิเปตต์ 10 mL (Duran, Germany)

เตาเผา (Thermo Scientific, THERMOLYNE, USA)

เตาอบ (redline, BINDER, Germany)

เครื่องกวนแม่เหล็ก (Harmony Hotplate Stirrer, HTS-1003, LMS, Japan)

เครื่อง Incubator Shaker (ZHWHY-100B, ZHICHENG, China)

เครื่องวัด pH (EUtech instruments, pH 700, USA)

เครื่องชั่งสาร (CP225D, SARTORIUS AG, Germany)

Teflon-lined stainless steel reactor (HYD-100, Tefic Biotech, China)

เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (PG Instruments, T60 Visible Spectrophotometer, England)

### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1.1 นำเปลือกมะขามที่แยกจากยั้งแล้ว ไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นออกจากเปลือกมะขาม

3.3.1.2 นำเปลือกมะขามมาทำการคาร์บอนไนซ์โดยการเผาแบบอับอากาศภายใต้สภาวะ  $N_2$  atmosphere ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที่ โดยใช้เตาเผา



ภาพที่ 3.1 เตาเผาขณะใช้อัดแก๊สไนโตรเจนเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.3 นำถ่านที่ได้ทำการไฮโดรเทอมอลด้วยน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้เตาอบจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เข้าใกล้ 7 และอบเพื่อไล่ความชื้น



ภาพที่ 3.2 เตาอบ และเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

3.3.1.4 นำถ่านที่ได้มาทำการกระตุ้นด้วยวิธีที่ต่างกันดังนี้

1) การกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก  $H_2SO_4$  (ATS1)

นำไปกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนไปโอซาร์ต่อกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1:3 ในสัดส่วนที่เป็นของแข็งต่อของเหลว เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เข้าใกล้ 7 จากนั้นทำการคาร์บอนไนซ์โดยนำเปลือกมะขามเผาแบบอับอากาศภายใต้สภาวะ  $N_2$  atmosphere ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราการใช้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที่

2) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ KOH (ATS2)

นำไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนไปโอซาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1:3 ในสัดส่วนที่เป็นของแข็งต่อของเหลว เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เข้าใกล้ 7 จากนั้นทำการคาร์บอนไนซ์โดยนำเปลือกมะขามเผาแบบอับอากาศภายใต้สภาวะ  $N_2$  atmosphere ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราการใช้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การกระตุ้นด้วยกรดและเบส (ATS3)

นำไปกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนไปโอซาร์ต่อกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1:3 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปกระตุ้นอีกครั้งด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนไปโอซาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:3 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งค่า pH เข้าใกล้ 7 จากนั้นทำการคาร์บอนไนซ์โดยนำเปลือกมะขามเผาแบบอับอากาศภายใต้สภาวะ  $N_2$  atmosphere ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

#### 3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทดสอบค่าเลขไอโอดีน

นำผงถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมะขาม ATS1, ATS2 และ ATS3 มาทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน โดยขั้นแรกนำผงถ่านใส่ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไอโอดีน 100 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 วินาที นำสารละลายมากรองเพื่อแยกผงถ่านออก ปิดเตตราละลายที่ได้จากการกรอง 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) จนได้สีเหลืองอ่อน ทำการไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) ที่ใช้คำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนักคาร์บอนจากสมการ เพื่อหาตัวอย่างที่มีค่าเลขไอโอดีนสูงที่สุดเพื่อมาใช้ในการดูดซับดังต่อไปนี้

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (3.1)$$

โดย	X/M	คือ ค่าการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนัก (mg/g)
	M	คือ น้ำหนักผงถ่าน (g)
	A	คือ $N_2 \times 12693.0$
	B	คือ $N_1 \times 126.93$
	S	คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) (mL)
	DF	คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (Dilution factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การทำกราฟมาตรฐานของสารละลายสีทาร์ทราซีน (Calibration Curve of Tartrazine)

เตรียมสารละลายทาร์ทราซีนความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มก./ล. ตามลำดับ จากนั้นสร้างกราฟมาตรฐานโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 426 nm พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทาร์ทราซีน (แกนนอน) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกนตั้ง)

### 3.3.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีทาร์ทราซีน

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ มาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา ทำการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) โดยกำหนดให้มีตัวแปร 4 ชนิด คือ  $X_1$  (จำนวนตัวดูดซับ, กรัม),  $X_2$  (pH),  $X_3$  (เวลา, นาที) และ  $X_4$  (ความเร็วรอบการเขย่า, rpm) โดยระดับของตัวแปร 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และทำการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง ดังตารางที่ 3.2 โดยมีผลตอบสนองที่ต้องการคือ ปริมาณการดูดซับสีทาร์ทราซีน (%Removal, Y) จากนั้นทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมโดยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับค่าปัจจัยที่ทำการศึกษาเพื่อหาพื้นที่ผิวตอบสนอง

Factor	Code	Level		
		-1	0	
AC Dosage (g)	$X_1$	0.50	1.25	2.00
pH	$X_2$	2	6.5	11
Time (min)	$X_3$	10	95	180
Rotate (rpm)	$X_4$	0	100	200

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการดูดซับสีทาร์ทราซีน

Experiment	Factor Level			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	0.50	10	6.5	100
2	2.00	10	6.5	100
3	0.50	180	6.5	100
4	2.00	180	6.5	100
5	1.25	95	2.0	0
6	1.25	95	11.0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการดูดซับสีทาร์ทราซีน(ต่อ)

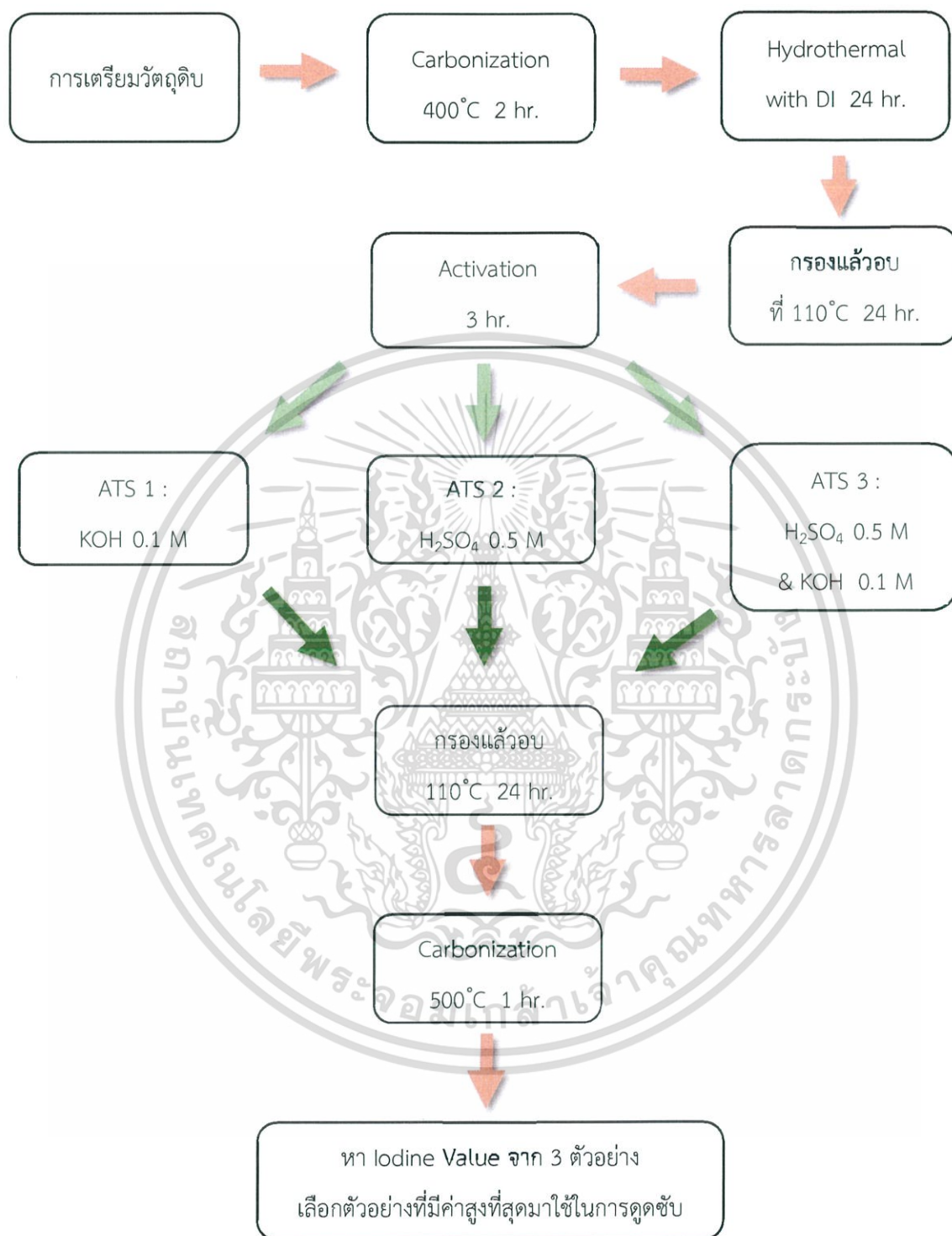
Experiment	Factor Level			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
7	1.25	95	2.0	200
8	1.25	95	11.0	200
9	0.50	95	6.5	0
10	2.00	95	6.5	0
11	0.50	95	6.5	200
12	2.00	95	6.5	200
13	1.25	10	2.0	100
14	1.25	180	2.0	100
15	1.25	10	11.0	100
16	1.25	180	11.0	100
17	0.50	95	2.0	100
18	2.00	95	2.0	100
19	0.50	95	11.0	100
20	2.00	95	11.0	100
21	1.25	10	6.5	0
22	1.25	180	6.5	0
23	1.25	10	6.5	200
24	1.25	180	6.5	200
25	1.25	95	6.5	100
26	1.25	95	6.5	100
27	1.25	95	6.5	100
28	0.50	10	6.5	100
29	2.00	10	6.5	100
30	0.50	180	6.5	100
31	2.00	180	6.5	100
32	1.25	95	2.0	0
33	1.25	95	11.0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการดูดซับสีทาร์ทราซีน(ต่อ)

Experiment	Factor Level			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
34	1.25	95	11.0	200
35	1.25	95	11.0	200
36	0.50	95	6.5	0
37	2.00	95	6.5	0
38	0.50	95	6.5	200
39	2.00	95	6.5	200
40	1.25	10	2.0	100
41	1.25	180	2.0	100
42	1.25	10	11.0	100
43	1.25	180	11.0	100
44	0.50	95	2.0	100
45	2.00	95	2.0	100
46	0.50	95	11.0	100
47	2.00	95	11.0	100
48	1.25	10	6.5	0
49	1.25	180	6.5	0
50	1.25	10	6.5	200
51	1.25	180	6.5	200
52	1.25	95	6.5	100
53	1.25	95	6.5	100
54	1.25	95	6.5	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 กระบวนการการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และการเลือกถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเปลือกมะขาม

เปลือกมะขามมีคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก โดยหลังจากการทำ Proximate Analysis เปลือกมะขามมีลักษณะเป็นสีดำ และมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมะขาม

องค์ประกอบ	ปริมาณ
ความชื้น (%)	0.35
เถ้า (%)	3.66
สารระเหย (%)	3.73
คาร์บอนคงตัว (%)	92.36

ปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวที่สูง และปริมาณเถ้าที่ต่ำ บ่งบอกถึงความเหมาะสมในการนำเปลือกมะขามาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงจะส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนที่สูง อีกทั้งปริมาณเถ้าที่ต่ำเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าสิ่งปนเปื้อนในเปลือกมะขามนั้นมีน้อย เมื่อนำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนที่มาก เนื่องจากโอกาสที่เถ้าจะไปปิดกั้นรูพรุนของคาร์บอนภายในถ่านกัมมันต์จะน้อยลงตามปริมาณเถ้าจากเปลือกมะขาม

#### 4.2 การหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ตัวอย่าง เพื่อหาตัวอย่างที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการดูดซับสี ย้อมทาร์ทราซีน โดยค่าเลขไอโอดีนที่สูงจะแสดงถึงการมีพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนที่มาก โดยตัวอย่าง ATS1 ใช้วิธีการกระตุ้นกับสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตัวอย่าง ATS2 ใช้วิธีการกระตุ้นกับกรด

ซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และตัวอย่าง ATS3 ใช้วิธีการกระตุ้นกับสารเคมี 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกระตุ้นกับกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เมื่อเปรียบเทียบค่าเลขไอโอดีนของตัวอย่างทั้งสามแล้วพบว่า ตัวอย่าง ATS2 มีค่าเลขไอโอดีนสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเลขไอโอดีนของตัวอย่างถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ค่าเลขไอโอดีน
ATS 1	294.48
ATS 2	365.56
ATS 3	135.39

### 4.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีทาร์ทราซีน

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การดูดซับสีทาร์ทราซีนใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของทาร์ทราซีนเท่ากับ 20 มก./ล. ทำการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีทาร์ทราซีน กำหนดให้มีตัวแปร 4 ชนิด โดยระดับของตัวแปร 3 ระดับ คือ  $X_1$  (จำนวนตัวดูดซับ, กรัม),  $X_2$  (pH),  $X_3$  (เวลา, นาที) และ  $X_4$  (ความเร็วรอบการเขย่า, rpm) จากการทดลองได้ค่าร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าการกำจัดสีทาร์ทราซีนตามแผนการทดลองแบบ Box-Behnken

Experiment	Factor Level				Removal (%)
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	
1	0.50	10	6.5	100	11.64
2	2.00	10	6.5	100	26.73
3	0.50	180	6.5	100	29.35
4	2.00	180	6.5	100	37.00
5	1.25	95	2.0	0	23.58
6	1.25	95	11.0	0	44.97
7	1.25	95	2.0	200	51.99
8	1.25	95	11.0	200	42.45
9	0.50	95	6.5	0	14.59
10	2.00	95	6.5	0	22.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการดูดซับสีทาร์ทราซีน (ต่อ)

Experiment	Factor Level				Removal (%)
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	
11	0.50	95	6.5	200	28.61
12	2.00	95	6.5	200	37.93
13	1.25	10	2.0	100	34.28
14	1.25	180	2.0	100	43.31
15	1.25	10	11.0	100	41.72
16	1.25	180	11.0	100	46.40
17	0.50	95	2.0	100	24.38
18	2.00	95	2.0	100	52.41
19	0.50	95	11.0	100	48.15
20	2.00	95	11.0	100	54.61
21	1.25	10	6.5	0	23.69
22	1.25	180	6.5	0	25.30
23	1.25	10	6.5	200	20.86
24	1.25	180	6.5	200	33.02
25	1.25	95	6.5	100	39.10
26	1.25	95	6.5	100	36.58
27	1.25	95	6.5	100	35.43
28	0.50	10	6.5	100	10.59
29	2.00	10	6.5	100	25.05
30	0.50	180	6.5	100	29.56
31	2.00	180	6.5	100	36.06
32	1.25	95	2.0	0	29.98
33	1.25	95	11.0	0	46.33
34	1.25	95	2.0	200	52.87
35	1.25	95	11.0	200	43.19
36	0.50	95	6.5	0	14.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในกระบวนการกำจัดสีทาร์ทราซีน (ต่อ)

Experiment	Factor Level				Removal (%)
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	
37	2.00	95	6.5	0	23.90
38	0.50	95	6.5	200	25.58
39	2.00	95	6.5	200	39.20
40	1.25	10	2.0	100	32.70
41	1.25	180	2.0	100	48.43
42	1.25	10	11.0	100	38.26
43	1.25	180	11.0	100	41.93
44	0.50	95	2.0	100	25.79
45	2.00	95	2.0	100	44.03
46	0.50	95	11.0	100	43.99
47	2.00	95	11.0	100	45.24
48	1.25	10	6.5	0	23.48
49	1.25	180	6.5	0	23.27
50	1.25	10	6.5	200	20.75
51	1.25	180	6.5	200	37.00
52	1.25	95	6.5	100	35.74
53	1.25	95	6.5	100	36.90
54	1.25	95	6.5	100	34.07

จากตารางที่ 4.3 พบว่า การกำจัดสีทาร์ทราซีนสูงสุดเท่ากับ 11.64% - 54.61% จากการออกแบบการทดลองทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ได้ค่าการทดลองสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยของร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	36.30	1.37	26.41	0.000
AC Dosage	5.768	0.687	8.39	0.000
Time	5.037	0.687	7.33	0.000
pH	3.062	0.687	4.46	0.000
Rotate	4.872	0.687	7.09	0.000
AC Dosage*AC Dosage	-4.95	1.03	-4.80	0.000
Time*Time	-5.66	1.03	-5.49	0.000
pH*pH	10.63	1.03	10.31	0.000
Rotate*Rotate	-5.06	1.03	-4.91	0.000
AC Dosage*Time	-1.93	1.19	-1.62	0.114
AC Dosage*pH	-4.82	1.19	-4.05	0.000
AC Dosage*Rotate	0.64	1.19	0.54	0.592
Time*pH	-2.05	1.19	-1.72	0.093
Time*Rotate	3.38	1.19	2.84	0.007
pH*Rotate	-7.12	1.19	-5.98	0.000

S = 3.36671    R<sup>2</sup> = 93.14%    R<sup>2</sup>(adj) = 90.68%

จากตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) มีค่าเท่ากับ 93.14% ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (R<sup>2</sup>-adj) มีค่าเท่ากับ 90.68% แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต้นทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ เวลา ค่าความเป็นกรดต่าง และความเร็วรอบการหมุน สามารถอธิบายความผันแปรของร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนได้ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสม โดยความสัมพันธ์ของปัจจัยสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned}
 \% \text{Removal} = & -15.87 + 40.97X_1 + 0.2410 X_2 - 2.266X_3 + 0.2043X_4 - 8.79X_1^2 \\
 & - 0.000783X_2^2 + 0.5248X_3^2 - 0.000506X_4^2 - 0.0302X_1X_2 \\
 & - 1.428X_1X_3 + 0.0086X_1X_4 - 0.00536X_2X_3 + 0.000397X_2X_4 - 0.01582X_3X_4
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ
- $X_1$  = จำนวนถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)
  - $X_2$  = ระยะเวลา (นาที)
  - $X_3$  = ค่าความเป็นกรดต่าง
  - $X_4$  = ความเร็วรอบการหมุน (RPM)

เมื่อทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย โดยตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญ (P-value > 0.05) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ออก จะได้สมการทำนายร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีน ดังสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} \% \text{Removal} = & -15.87 + 40.97X_1 + 0.2410 X_2 - 2.266X_3 + 0.2043X_4 - 8.79X_1^2 \\ & - 0.000783X_2^2 + 0.5248X_3^2 - 0.000506X_4^2 - 1.428X_1X_3 \\ & + 0.000397X_2X_4 - 0.01582X_3X_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

- เมื่อ
- $X_1$  = จำนวนถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)
  - $X_2$  = ระยะเวลา (นาที)
  - $X_3$  = ค่าความเป็นกรดต่าง
  - $X_4$  = ความเร็วรอบการหมุน (rpm)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกำจัดสีทาร์ทราซีน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	6004.68	428.91	37.84	0.000
Linear	4	2202.09	550.52	48.57	0.000
AC	1	798.48	798.48	70.45	0.000
Time	1	608.84	608.84	53.71	0.000
pH	1	225.05	225.05	19.85	0.000
Rotate	1	569.72	569.72	50.26	0.000
Square	4	3053.50	763.38	67.35	0.000
AC*AC	1	261.00	261.00	23.03	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกำจัดสีทาร์ทราซีน (ต่อ)

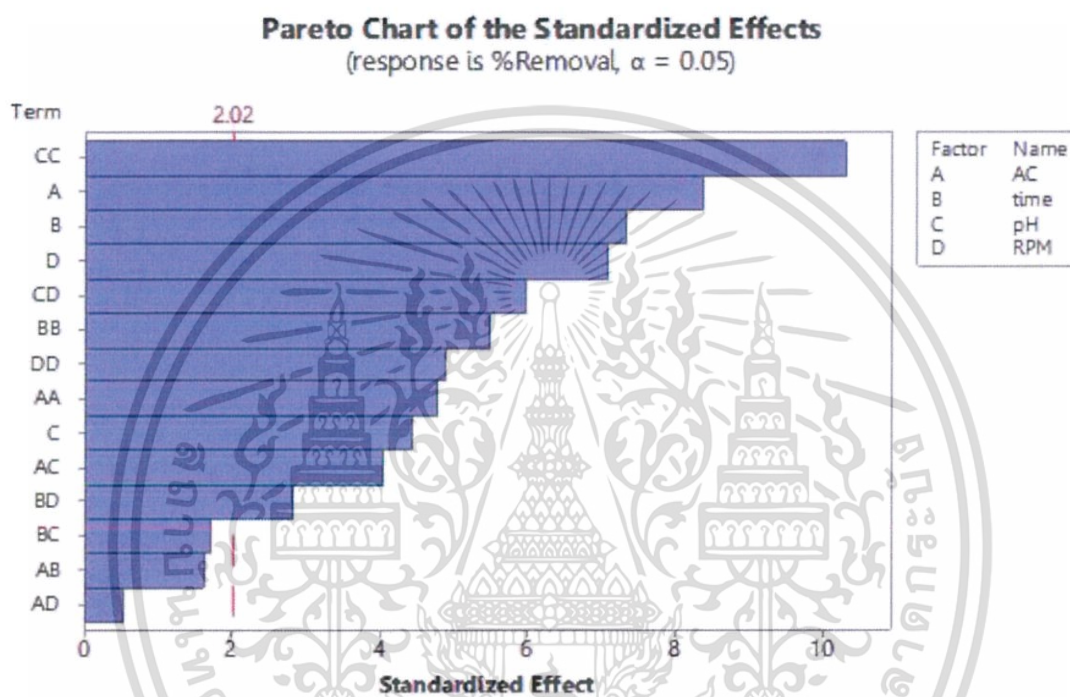
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time*Time	1	341.81	341.81	30.16	0.000
pH*pH	1	1204.78	1204.78	106.29	0.000
Rotate*Rotate	1	273.25	273.25	24.11	0.000
2-Way Interaction	6	749.09	124.85	11.01	0.000
AC*Time	1	29.68	29.68	2.62	0.114
AC*pH	1	185.84	185.81	16.39	0.000
AC*Rotate	1	3.31	3.31	0.29	0.592
Time*pH	1	33.64	33.64	2.97	0.093
Time*Rotate	1	91.14	91.14	8.04	0.007
pH*Rotate	1	405.50	405.50	35.77	0.000
Error	39	442.06	11.33		
Lack-of-Fit	10	268.37	26.84	4.48	0.001
Pure Error	29	283.99	5.99		
Total	53	64467.74			

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า P-value ของเทอมส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต้นส่วนใหญ่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีทาร์ทราซีนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การที่ตัวแปรต้นดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวผลตอบ ส่วนเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลา ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์และรอบการหมุน ผลกระทบร่วมระหว่างเวลากับค่าความเป็นกรดต่าง ถือว่าไม่มีผลต่อการกำจัดสีทาร์ทราซีน เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาการขาดความเหมาะสมของสมการ (lack of fit) พบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.005 เมื่อตรวจสอบความเหมาะสมและวินิจฉัยสำหรับการสังเกตที่ผิดปกติ พบว่าอาจมีสาเหตุมาจากการทดลองครั้งที่ 20 และ 24 ซึ่งมีการกระจายตัวออกห่างจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นตรงค่อนข้างมาก แต่จากการตรวจสอบจากค่าส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการแจกแจงแบบปกติ และทุกค่ามีการกระจายแบบอิสระต่อกัน รวมถึงมีความเสถียรของความแปรปรวน จึงอาจจะทำให้ผลการทดลองมีความแม่นยำน้อยลงเล็กน้อย

#### 4.3.2 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด



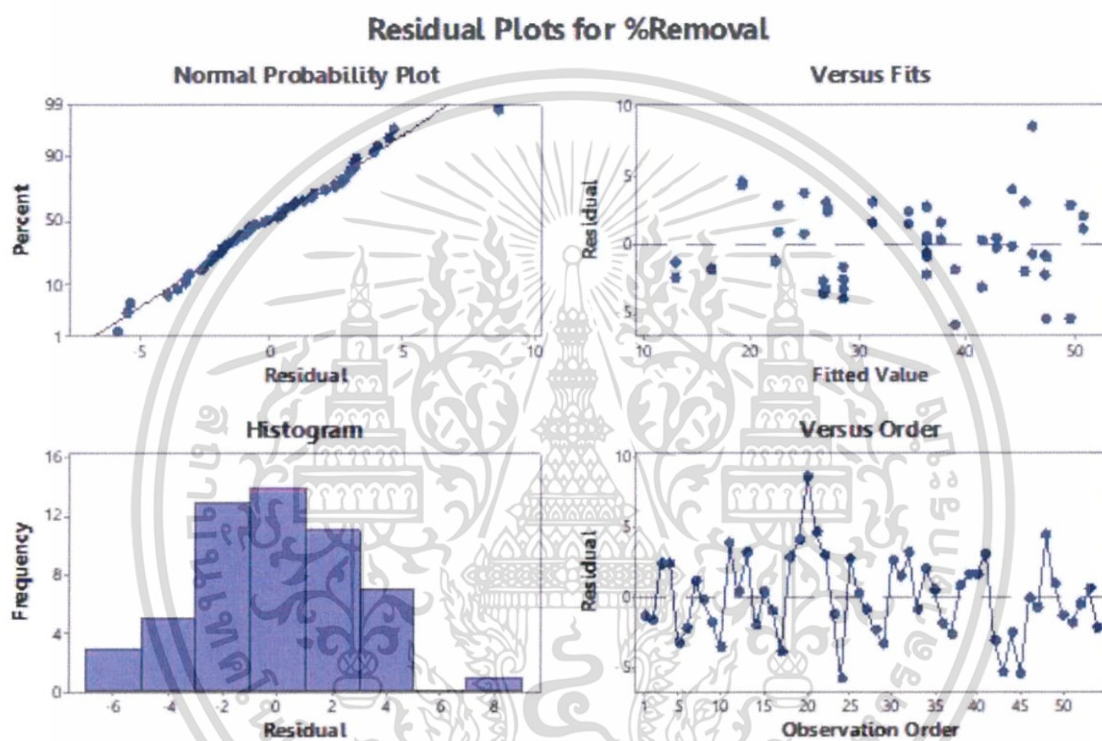
ภาพที่ 4.1 แผนภูมิพาเรโตของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย

จากภาพที่ 4.1 แผนภูมิพาเรโตแสดงผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีน โดยกราฟของปัจจัยที่มีค่าเกินเส้นค่าเฉลี่ย 2.02 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ไม่สามารถตัดปัจจัยนั้นได้ ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนโดยมีนัยสำคัญ ได้แก่ ผลกระทบของปริมาณถ่านกัมมันต์ (A), ผลกระทบของระยะเวลา (B), ผลกระทบของค่าความเป็นกรดต่าง (C), ผลกระทบของความเร็วรอบการหมุน (D), ผลกระทบของปริมาณถ่านกัมมันต์และปริมาณถ่านกัมมันต์ (A\*A), ผลกระทบของระยะเวลาและระยะเวลา (B\*B), ผลกระทบของค่าความเป็นกรดต่างและค่าความเป็นกรดต่าง (C\*C), ผลกระทบของความเร็วรอบการหมุนและความเร็วรอบการหมุน (D\*D), ผลกระทบของปริมาณถ่านกัมมันต์และค่าความเป็นกรดต่าง (A\*C) และผลกระทบของระยะเวลาและความเร็วรอบการหมุน (B\*D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 54 ครั้ง มาวิเคราะห์ โดยแสดงผลในรูปแบบกราฟ เพื่อนำไปตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง โดยพิจารณาจากค่าส่วนตกค้างของข้อมูล (residual) ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

Normal Probability Plot เป็นการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (residual) พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวแนวเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ส่วนตกค้างของปริมาณร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนที่ได้ไม่มีความผิดปกติ จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่แสดงใน Versus Order เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้าง (residual) บนแผนภูมิการกระจาย พบว่า ส่วนตกค้างของร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนที่ได้มีการกระจายแบบอิสระ กระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกัน

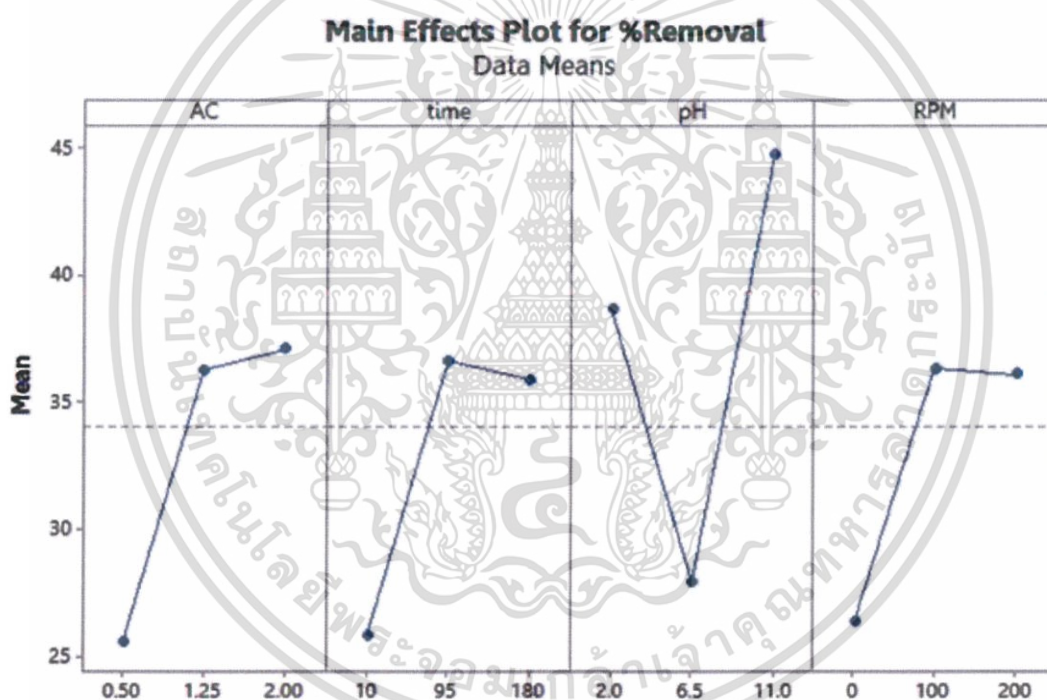
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่แสดงใน Versus Fits โดยใช้แผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละระดับปัจจัย พบว่า ข้อมูลส่วนตกค้างของร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งค่าบวกและค่าลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

การตรวจสอบ Histogram พบว่า กราฟมีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ บอถึงการกระจายความถี่ของส่วนตกค้างเป็นไปตามปกติ และค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลาง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

#### 4.3.4 ผลของปัจจัยหลักต่อการดูดซับสีทาร์ทราซีน



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้น ร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนจะสูงขึ้น ด้วย เนื่องจากปริมาณของตัวดูดซับที่มากขึ้นย่อมทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

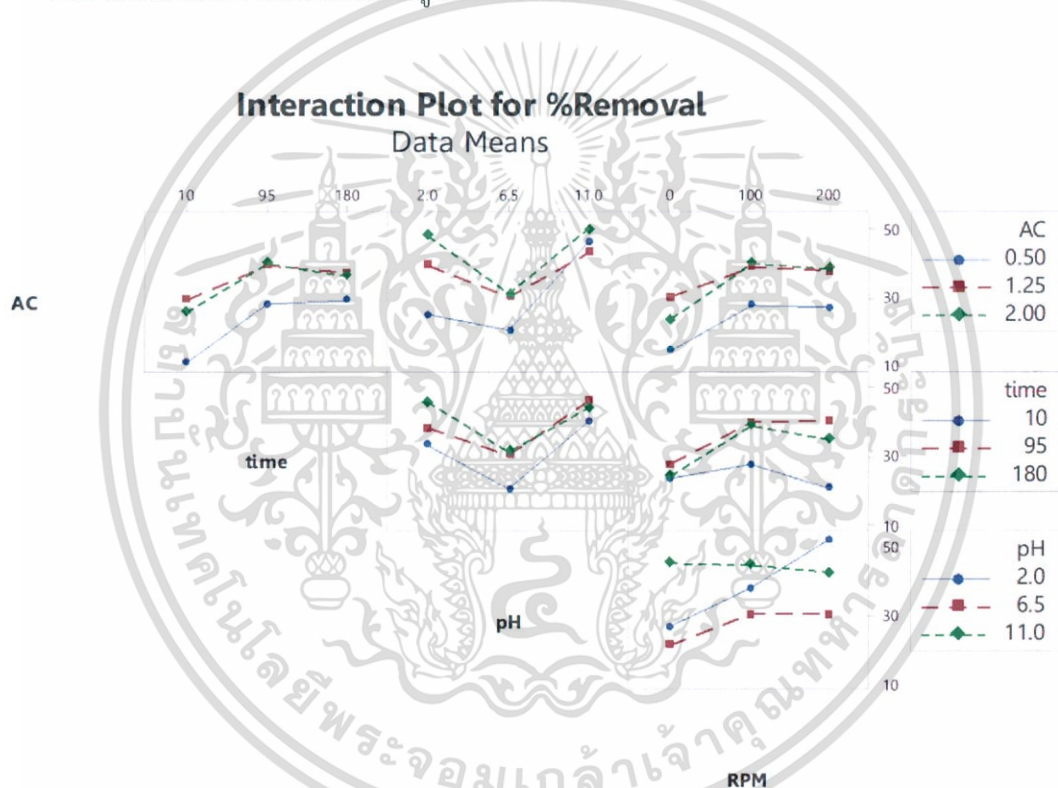
เมื่อระยะเวลามากขึ้น ร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนจะสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับทำให้เกิดกระบวนการการดูดซับได้นานยิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดการกำจัดสีทาร์ทราซีนได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในสภาวะกรดหรือเบส ร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนจะสูง เนื่องจากไฮดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับไอออนอื่นๆ นอกจากนี้ค่าความเป็นกรดต่างยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และค่าการละลายน้ำของ สารต่างๆอีกด้วย

เมื่อความเร็วรอบการหมุนมากขึ้น ร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนจะสูงขึ้น เนื่องจากการหมุนหรือเขย่า ระหว่างกระบวนการการดูดซับจะช่วยให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับมากขึ้น จึงทำให้เกิดการดูดซับได้ดี

#### 4.3.5 ผลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการดูดซับสีทาร์ทราซีน

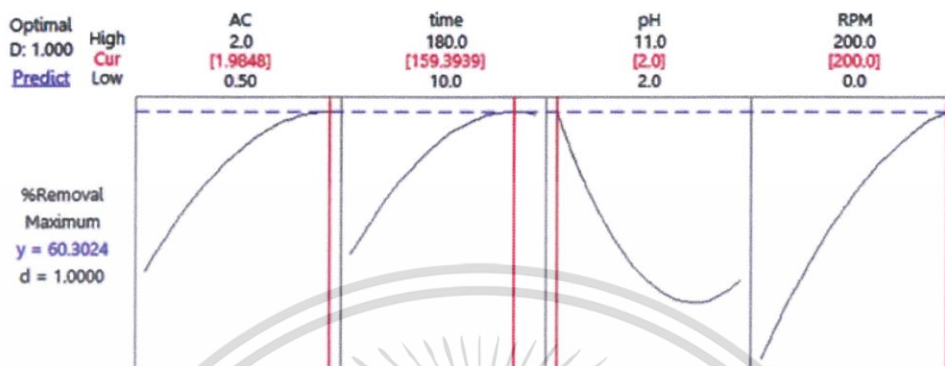


ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงผลกระทบร่วมของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับสีทาร์ทราซีน และเมื่อพิจารณาถึง ปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับสีทาร์ทราซีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.05$ ) พบว่า เมื่อเพิ่ม ระดับปัจจัยของปริมาณถ่านกัมมันต์กับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 และเมื่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 กับเพิ่มระดับปัจจัยของความเร็วรอบการหมุน จะส่งผลกระทบต่อการดูดซับสีทาร์ทราซีนมี แนวโน้มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.6 สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีทราทราซีน



ภาพที่ 4.5 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการกำจัดสีทราทราซีน

จากภาพที่ 4.5 แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีทราทราซีน โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัม เป็นเวลา 160 นาที โดยค่า pH ของสารละลายสีทราทราซีนเท่ากับ 2 ใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ 200 rpm และได้ค่าประมาณของการกำจัดสีทราทราซีนที่เหมาะสมที่สุดคือ 60.30% ซึ่งเชื่อมั่นได้ 95% ว่าการกำจัดสีทราทราซีนที่ได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 53.86% และ 66.75% เมื่อทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการกำจัดสีทราทราซีน โดยทำการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 การทดลอง จะได้ค่าดังตารางที่ 4.6 ซึ่งร้อยละการกำจัดสีทราทราซีนที่ได้จากการทดลองซ้ำ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางสถิติ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.6 การยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการกำจัดสีทราทราซีน

	1	2	3
Removal (%)	62.68	63.63	66.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

การนำเปลือกมะขามมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วย Hydrothermal technique และการนำกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนที่สูง จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกำจัดสีทาร์ทราซีน โดยพิจารณาปัจจัย 4 ชนิด คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) ระยะเวลา (นาท) ค่าความเป็นกรดต่าง และความเร็วรอบการหมุน (RPM) เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสม พบว่า เมื่อทำการกำจัดสีทาร์ทราซีนโดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัม ระยะเวลา 160 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีทาร์ทราซีนเท่ากับ 2 และใช้ความเร็วรอบการหมุน 200 rpm โดยมีปริมาตรของสารละลายสีทาร์ทราซีน 100 มิลลิลิตร จะได้ร้อยละการกำจัดสีทาร์ทราซีนเท่ากับ 60.30% จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยแต่ละชนิดพบว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์มาก จะทำให้เกิดการกำจัดสีทาร์ทราซีนสูง, เมื่อระยะเวลามาก จะทำให้เกิดการกำจัดสีทาร์ทราซีนสูง, เมื่อค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในสภาวะกรดหรือเบส จะทำให้เกิดการกำจัดสีทาร์ทราซีนสูง และเมื่อความเร็วรอบการหมุนสูง จะทำให้เกิดการกำจัดสีทาร์ทราซีนสูง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนการลดขนาดก่อนนำไปดูดซับสีทาร์ทราซีน หากขนาดถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กมากเท่าไร ประสิทธิภาพในการดูดซับจะดียิ่งขึ้น

5.2.2 สารละลายสีทาร์ทราซีนความเข้มข้น 20 มก./ลิตร ไม่ควรเก็บไว้เกิน 3 วัน ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นสีทาร์ทราซีนลดลง

## บรรณานุกรม

- ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร(โครมการตำราเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ; ลำดับ 6. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. “ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้”. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. 2562. Tartrazine / FD&C Yellow #5. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2365/tartrazine-fd-c-yellow-5>. 9 พฤษภาคม 2562.
- ศุภณัฐ วัชรธรรมวิศุ. 2555. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=41&id=37](http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=37). 12 ตุลาคม 2561.
- ศุภณัฐ วัชรธรรมวิศุ. 2556. การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://scienc.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>. 12 ตุลาคม 2561.
- ศุภณัฐ วัชรธรรมวิศุ. 2559. สารน่ารู้ : ถ่านปลุกฤทธิ์ !. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://old.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/552-2016-02-09-03-10-28>. 11 ตุลาคม 2561.
- สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. 2555. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.tint.or.th/nkc/RD-web/instrument/instru-005.html>. 12 ตุลาคม 2561.
- หัตถวิภา หมายมั่น. 2559. Scanning Electron Microscope : SEM. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-znalysis-instrument-ment/item/96-scanning-electron-microscope.html>. 12 ตุลาคม 2561.
- อภัย ราชภูววิจิตร. 2557. ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://goo.gl/t9xCYs>. 12 ตุลาคม 2561.
- Alabadi, Akram, Shumaila Razzaque, Yuwan Yang, Shi Chen, and Bien Tan. “Highly porous activated carbon materials from carbonized biomass with high CO<sub>2</sub> capturing capacity”. *Chemical Engineering Journal* 281 (2015): 606–12. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.032>.

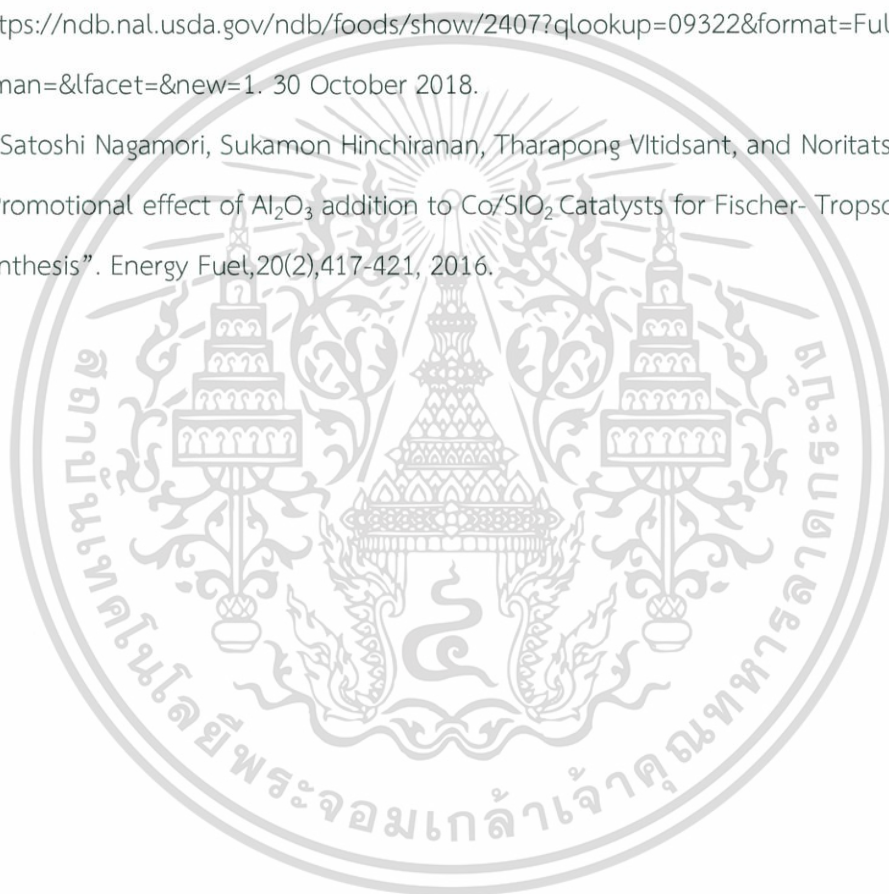
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A Kassem, Mohammed, and Gamal O El-Sayed. "Adsorption of Tartrazine on Medical Activated Charcoal Tablets under Controlled Conditions". *Journal of Environmental Analytical Chemistry* 01, No. 01 (2014). <https://doi.org/10.4172/JREAC.1000102>.
- Anton Paar. 2013. X-Ray diffraction (XRD). [Online]. Available: <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/>. 12 October 2018.
- Banerjee, Sushmita, และ M.C. Chattopadhyaya. "Adsorption Characteristics for the Removal of a Toxic Dye, Tartrazine from Aqueous Solutions by a Low Cost Agricultural by-Product". *Arabian Journal of Chemistry* 10 (May 2017): S1629–38. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.06.005>.
- D. Jiang, A. Baiker. 2015. SEM: Imaging with Secondary Electrons. [Online]. Available: <http://www.microscopy.ethz.ch/sem-examples.htm>. 12 October 2018.
- Huang, Kuan, Song-Hai Chai, Richard T. Mayes, Shuai Tan, Christopher W. Jones, and Sheng Dai. "Significantly increasing porosity of mesoporous carbon by  $\text{NaNH}_2$  activation for enhanced  $\text{CO}_2$  adsorption". *Microporous and Mesoporous Materials* 230 (2016): 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.04.041>.
- JWGB Sci. & Technology. 2018. JW-BK200B Surface Area and Porosity Analyzer. [Online]. Available: <http://jwgb.net/en/productshow.php?id=22>. 12 October 2018.
- Ogungbenro, Adetola E., Dang V. Quang, Khalid A. Al-Ali, Lourdes F. Vega, และ Mohammad R.M. Abu-Zahra. "Physical synthesis and characterization of activated carbon from date seeds for  $\text{CO}_2$  capture". *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6, No.4 (20A18): 4245–52. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.030>.
- Prasert Reubroycharoen, Tharapong Vitidsant, Yong Liu, Guohui Yang and Noritatsu Tsubaki, "Highly active Fischer-Tropsch synthesis  $\text{Co}/\text{SiO}_2$  catalysts prepared from microwave irradiation". *Catalysis Communications*, Volume 8, Issue 3, March 2007, Pages 50-59
- Pual May. 2018. Tartrazine. [Online]. Available: <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/tartrazine/tartrazineh.htm>. 24 November 2018.

Sahnoun, Sousna, Mokhtar Boutahala, Chafia Tiar, และ Abdelkrim Kahoul. “Adsorption of Tartrazine from an Aqueous Solution by Octadecyltrimethylammonium Bromide-Modified Bentonite: Kinetics and Isotherm Modeling”. *Comptes Rendus Chimie* 21, No. 3–4 (March 2018): 391–98. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.01.008>.

USDA Nutrient database. 2018 . Full Report (All Nutrients): 09383, Tangerines, (mandarin oranges), canned, juice pack, drained [Online]. Available: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2407?qlookup=09322&format=Full&max=25&man=&facet=&new=1>. 30 October 2018.

Yi Zhang, Satoshi Nagamori, Sukamon Hinchiranan, Tharapong Vltidsant, and Noritatsu Tsubaki, “Promotional effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  addition to  $\text{Co}/\text{SiO}_2$  Catalysts for Fischer–Tropsch synthesis”. *Energy Fuel*, 20(2), 417–421, 2016.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### ก.1 การคำนวณหาค่าเลขไอโอดีน (Iodine Value or Iodine Number)

การคำนวณหาค่าเลขไอโอดีน (Iodine Value or Iodine Number) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Iodine Value} = \frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M}$$

โดย	X/M	คือ ค่าการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนัก (mg/g)
	M	คือ น้ำหนักผงถ่าน (g)
	A	คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน $\times 12693.0$
	B	คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต $\times 126.93$
	S	คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) (mL)
	DF	คือ ปริมาตรสารละลายไอโอดีน/ปริมาตรสารละลายฟูลเทรต

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม โดยใช้สารละลายไอโอดีนที่มีความเข้มข้น 0.1 mol/L ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นกรองเอาถ่านออกแล้วนำสารละลายหลังการกรอง 25 มิลลิลิตร มาใช้ในการไทเทรต และใช้สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 mol/L ทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตจนเปลี่ยนเป็นสารละลายไม่มีสี พบว่าปริมาตรที่ใช้ในการไทเทรตเท่ากับ 16 มิลลิลิตร

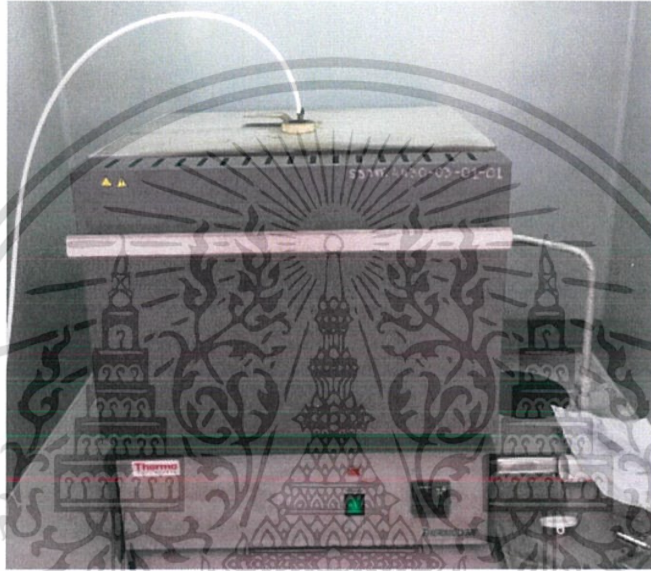
$$\begin{aligned} \text{Iodine Value} &= \frac{1269.3 - (4 \times 12.69 \times 16)}{1} \\ &= 456.95 \end{aligned}$$

ดังนั้น ถ่านกัมมันต์นี้มีค่าเลขไอโอดีนเท่ากับ 456.95

## ภาคผนวก ข

### เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ข.1 เตาเผา (Thermo Scientific, THERMOLYNE)



ข.2 เตาอบ (redLine, BINDER, Germany)

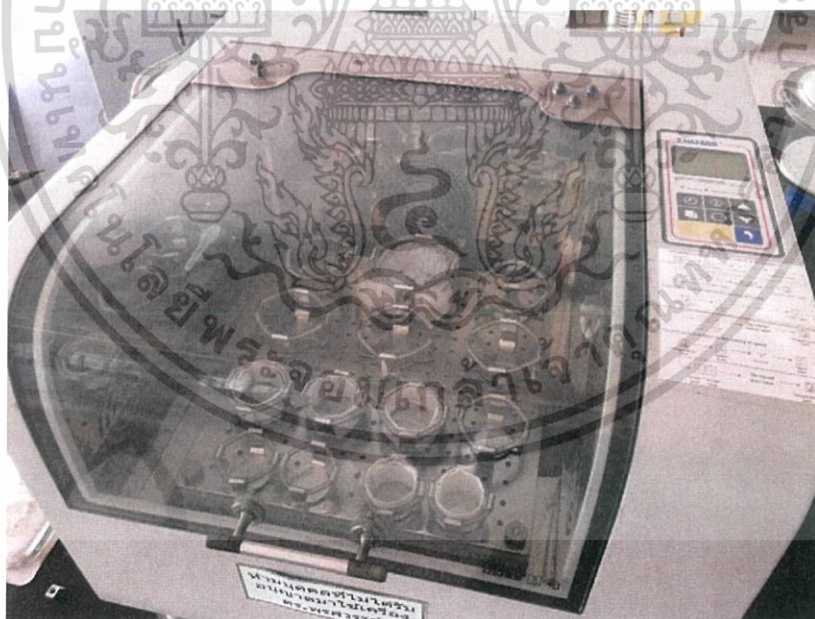


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 Teflon-lined stainless steel reactor (HYD-100, Tefic Biotech, China)

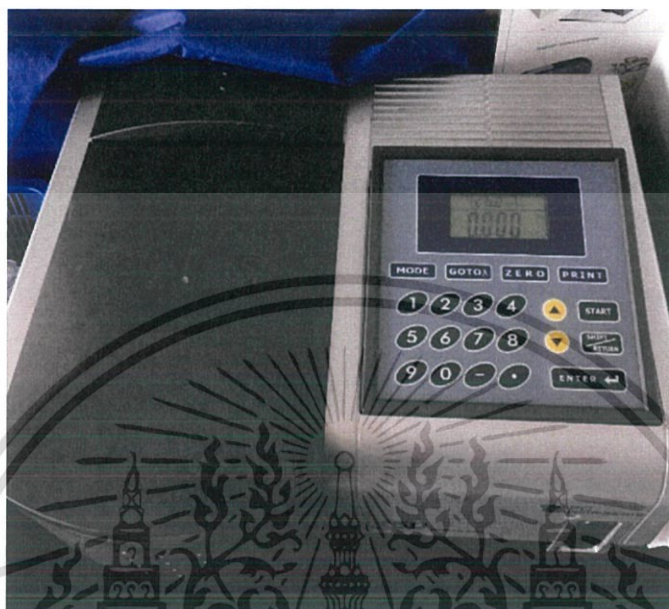


ข.4 เครื่อง Incubator Shaker (ZHWHY-100B)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (PG Instruments, T60 Visible Spectrophotometer)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ชนากร ธรรมสาร
วัน เดือน ปี เกิด	15 กรกฎาคม 2539
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนทวีธาภิเศก พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนทวีธาภิเศก , สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ พ.ศ. 2558 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	ฝึกงานที่บริษัท เอก-ชัย ดิสทริบิวชั่น ซิสเทม จำกัด
ผลงานวิจัย	-
รางวัลที่เคยได้รับ	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้