



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2559

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकुเป็นตัวดูดซับ
สำหรับกำจัดไอออนตะกั่วจากสารละลาย

Preparation of Activated Carbon from Sago Log Waste as an
Absorbent for the Removal of Lead (II) from Aqueous Solution



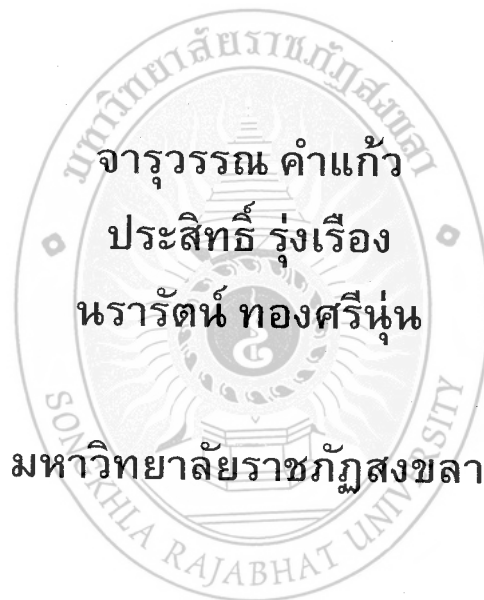
สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
จารุวรรณ คำแก้ว
ประสิทธิ์ รุ่งเรือง
นรรัตน์ ทองศรีนุ่น

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

กรกฎาคม 2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2559

โครงการวิจัย เรื่อง การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้น
สาธิตเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดไอออนตะกั่วจากสารละลาย



สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัย
ในสถาบันอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานกลุ่มโครงการความหลากหลายทางชีวภาพ และผู้ทรงคุณวุฒิในกลุ่มโครงการความหลากหลายทางชีวภาพทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และติดตามผลการดำเนินงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณโปรแกรมเคมีและเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณนักศึกษาผู้ช่วยวิจัย ที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยที่ไม่ได้กล่าวนาม งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวรรณ คำแก้ว
หัวหน้าโครงการวิจัย



เลข Bib#	11A 2524
วันที่	10 ต.ค. 2562
เลขเรียกหนังสือ	๖๖๒.๖๖ ๖๖๓๗

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีที่มีการเตรียม 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคาร์บอนไนซ์ และการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และขนาดของถ่าน และศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการก่อกัมมันต์ ได้แก่ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์ และอัตราส่วนการจุ่มซุระหว่างน้ำหนักของถ่านคาร์บอนไนซ์ต่อปริมาตรของสารก่อกัมมันต์ โดยมีขั้นตอนในการก่อกัมมันต์ดังนี้ คนสารผสมที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที เก็บที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำ DI 5 ครั้ง แล้วกรอง นำถ่านที่กรองได้ไปแช่ด้วยสารละลาย NaHCO₃ เข้มข้น 5% นาน 24 ชั่วโมง กรองถ่าน ล้างถ่านที่กรองได้ด้วยน้ำ DI จนได้ pH 7 แล้วนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 105 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ให้ถ่านที่มีขนาด 500-1,000 μm เพื่อนำไปใช้ก่อกัมมันต์ต่อไป และสภาวะที่เหมาะสมในการก่อกัมมันต์ คือ กระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยสารละลายกรด H₂SO₄ เข้มข้น 50% ในอัตราส่วนของส่วนผสมเท่ากับ 1:3 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกนำไปตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FT-IR และลักษณะโครงสร้างอสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านคาร์บอนไนซ์ ผลการตรวจพบว่าถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुมีหมู่ซัลเฟตอยู่ที่ผิว ในขณะที่ไม่พบหมู่ซัลเฟตที่ผิวถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านคาร์บอนไนซ์จากกากต้นสาकु นอกจากนี้ยังตรวจพบอีกว่าถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुมีโครงสร้างของรูพรุนขนาดใหญ่และสม่ำเสมอกว่า และมีสภาพพื้นผิวที่เรียกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไปดูดซับสารละลายตะกั่ว พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 97.5% และไม่พบหมู่ซัลเฟตที่ผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมเมื่อนำไปตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะด้วย FT-IR จากนั้นได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว ได้แก่ ผลของ pH ผลของระยะเวลาในการสัมผัส และผลของความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว พบว่า ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงสุด ที่ pH 6 เท่ากับ 97.9% ที่ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 90 นาที เท่ากับ 98.5% และที่ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว 40 ppm เท่ากับ 98.6%

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुเทียบกับราคาถ่านกัมมันต์ทางการค้า ยี่ห้อ Fluka พบว่าถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า จึงทำให้การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากต้นสาकुมีโอกาที่จะเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้ สำหรับในอนาคตถ้าทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาकुในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้สามารถประหยัดขนาดของการผลิตลงได้

Abstract

The objective of this research is to study the preparation of sago waste activated carbon from the agricultural residues by chemical activation. The preparation procedures in two stages: (i) carbonization for sago waste, (ii) activation for carbonized charcoal were carried out. Various conditions, i.e. temperature, time and particle size were investigated for carbonization and various conditions, i.e. type of activated chemicals and impregnation ratio between weight of carbonized charcoal and volume of activated chemical were investigated for activation. The activation was performed as follows; the mixture was stirred at RT for 30 min, kept at 105°C for 24 h, washed with DI water for 5 times, and then filtered. The filtrate was soaked in 5% NaHCO₃ solution for 24 h, filtered, washed with DI water until pH reached 7, then dried at 105°C for 3 h. It was shown that the carbonization at temperature of 300°C for 105 min was the optimal conditions that obtained the carbonized charcoal with a particle size range of 500-1000 µm for further activation. For optimal conditions in the activation, 50% H₂SO₄ solution was suitable to activate the carbonized charcoal with the impregnation ratio of 1:3. The prepared activated carbon was characterized by FT-IR for functional group and was visualized via scanning electron microscopy (SEM) for surface morphology with the comparison of commercial activated carbon and carbonized charcoal. It was shown that sulfate group on surface of sago waste activated carbon was appeared whereas the other two were not. In addition, the larger size and regularity of porous structure with roughly surface of sago waste activated carbon was found whereas the commercial activated carbon were not.

The application of prepared activated carbon for adsorption of lead ion in aqueous solution was performed. It was found that adsorption efficiency of activated carbon was of 97.5% and sulfate group on its surface was disappeared when it was characterized by FT-IR. Then, the adsorption effect for lead ion in solution under various conditions, i.e. pH, contact time and concentration of lead ion in solution were investigated. It was found that the obtained highest adsorption efficiency of activated carbon was 97.9% at pH 6, 98.5% for 90 min of contact time, and 98.6% for 40 ppm of lead ion solution.

The production cost for sago waste activated carbon was analyzed and compared to the price of commercial activated carbon of Fluka brand. It was found that production cost for sago waste activated carbon was lower than the price of commercial activated carbon. Thus, the production of sago waste activated carbon should have an opportunity for commercial business competition with the commercial activated carbon. For the future, if the activated carbon is produced in large scale, its production cost will become to the economies of scale.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	vii
สารบัญภาพ	viii
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
สาคว	4
ถ่านกัมมันต์	4
1. ชนิดของถ่านกัมมันต์	5
1.1 แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น	5
1.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์	5
1.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์	5
1.4 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ	6
1.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	7
2. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	7
2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	7
2.2 การคาร์บอนไนซ์	7
2.3 การก่อกัมมันต์	9
2.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์	9
3. การดูดซับ	11
3.1 กลไกการดูดซับ	12
3.2 ขั้นตอนการดูดซับ	12
3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
สารเคมีและอุปกรณ์	16
วิธีการวิจัย	17
1. การสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาควและการเก็บตัวอย่าง	18
2. การเตรียมถ่านกัมมันต์	18

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	18
2.1.1 การวิเคราะห์หาค่าความชื้น	18
2.1.2 การวิเคราะห์หาค่าสารระเหย	18
2.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า	19
2.1.4 การหาค่าคาร์บอนคงตัว	19
2.2 การคาร์บอนไนซ์กากสาकु	19
2.2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม	19
2.2.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม	19
2.2.3 การศึกษาขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสม	20
2.2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของของถ่านคาร์บอนไนซ์	20
2.3. การก่อกัมมันต์ทางเคมี	20
2.3.1 การศึกษาชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์ที่เหมาะสม	20
2.3.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านและสารก่อกัมมันต์ที่เหมาะสม	20
2.3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของของถ่านกัมมันต์	21
3. การศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้	21
4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	21
4.1 ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	22
4.2 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	22
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่อการดูดซับ	22
5. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต	22
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล	23
การสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकु	23
การเตรียมถ่านกัมมันต์	24
1. การเตรียมวัตถุดิบ	24
2. การคาร์บอนไนซ์กากสาकु	25
2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม	25
2.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม	26
2.3 การหาขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสม	27
3. การก่อกัมมันต์ทางเคมี	29
3.1 การศึกษาชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์ที่เหมาะสม	29
3.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านคาร์บอนไนซ์และสารก่อกัมมันต์ที่เหมาะสม	30
4. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์	31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	6
2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด	6
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องแก้ว ที่ใช้ในการทดลอง	17
4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ ($n=3$) และงานวิจัยบางเรื่องที่ผ่านมา	24
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์ เมื่อเทียบกับวัตถุดิบกากสาकुก่อนเผา ($n=3$)	31
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่าง ๆ	32
4.4 การประมาณการราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับ 1 กิโลกรัม	41
1. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकु เมื่อทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ	55
2. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकु เมื่อทำการคาร์บอนไนเซชันที่ระยะเวลาต่าง ๆ	56
3. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकुขนาดต่าง ๆ	57
4. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์กากสาकुที่กระตุ้นด้วยสารเคมีต่าง ๆ	58
5. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์กากสาकुที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนต่าง ๆ	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	8
2.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์	11
4.1 (a) เนื้อสาकुจากต้น (b) การแยกน้ำแบ่งออกจากเนื้อสาकु (c) แบ่งสาकु (d) กากสาकु	23
4.2 กากสาकु (a) ก่อนอบแห้ง (b) หลังอบแห้ง	24
4.3 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกากสาकुที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับเวลาในการคาร์บอนไนเซชันกากสาकु	26
4.5 ถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकुขนาดต่าง ๆ: (a) <106 ไมครอน (>140 เมช), (b) 106-500 ไมครอน (140-35 เมช), (c) 500-1,000 ไมครอน (35-18 เมช) เผาที่ 300°C นาน 105 นาที	27
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकु	27
4.7 ภาพถ่าย SEM 500x ของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकुขนาดต่าง ๆ; (a) <106 ไมครอน (>140 เมช), (b) 106-500 ไมครอน (35-140 เมช), (c) 500-1,000 ไมครอน (18-35 เมช) เผาที่ 300°C นาน 105 นาที	28
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकु	30
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับอัตราส่วนโดยมวลของถ่านคาร์บอนไนซ์กับปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่เข้มข้น 50%	31
4.10 ภาพถ่าย SEM 1,000x ของถ่านที่เตรียมได้จากกากสาकु ขนาด 500-1,000 ไมครอน (a) ถ่านคาร์บอนไนซ์ ; (b) ถ่านกัมมันต์	33
4.11 ภาพถ่าย SEM 1,000x ของถ่านกัมมันต์ขนาด 500-1,000 ไมครอน (a) ถ่านกัมมันต์กากสาकुที่เตรียมได้ และ(b) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	33
4.12 IR Spectrum ของ (a) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (b) ถ่านคาร์บอนไนซ์ และ (c) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	34
4.13 Electron Microanalysis-Mapping Analysis ที่แสดงธาตุต่าง ๆ ที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เมื่อนำไปดูดซับ Pb^{2+} ในสารละลาย (a) ก่อนดูดซับ (b) หลังดูดซับ	36
4.14 ลักษณะโครงสร้างอณูฐานวิทยาและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยเครื่อง SEM (1,000x) ที่แสดงถึงธาตุที่ปรากฏในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ โดยเครื่อง Dispersive X-ray Spectrometer เมื่อนำไปดูดซับ Pb^{2+} ในสารละลาย (a) ก่อนดูดซับ (b) หลังดูดซับ	37
4.15 FTIR สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสาकु ก่อนและหลังการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 100 ppm: (a) ก่อนการดูดซับ และ (b) หลังการดูดซับ	38
4.16 ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 1000 ppm	39
4.17 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 1000 ppm	39

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

คำย่อ	คำอธิบาย
มอก.	มาตรฐานอุตสาหกรรม
AC	Activated Carbon
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American water Works association
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscopy



บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาด้านน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยในปัจจุบัน นับวันจะทวีความรุนแรงอย่างมาก เนื่องจากมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น หากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ได้ปล่อยน้ำทิ้งที่มีสารเคมีปนเปื้อนเป็นสารประกอบอินทรีย์โดยเฉพาะโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัด จะทำให้เกิดปัญหาน้ำเสียตามมา น้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะหนัก เช่น โปรท โครเมียม ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม เป็นต้น เกลือของโลหะหนักเหล่านี้เป็นสารคงตัวและสามารถละลายน้ำได้ แต่ไม่สามารถสลายตัวได้เองในกระบวนการทางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำหรือบริเวณรอบแหล่งน้ำนั้น เมื่อเกลือของโลหะหนักถูกถ่ายทอดสู่มนุษย์หากได้รับการสะสมในระดับที่เกินมาตรฐานจะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ตามมา ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อควบคุมมิให้ปริมาณสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ (ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่ผ่านมาพบว่า การกำจัดโลหะหนักที่ปล่อยมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีวิธีการบำบัดทางเคมีหลายวิธี เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น และกระบวนการดูดซับ เป็นต้น แต่พบว่ากระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและมีต้นทุนที่สูง อย่างไรก็ตามพบว่า กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์มาดูดซับสารประกอบอินทรีย์นั้น เป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ทำได้ง่ายและใช้สะดวก ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์โดยการเผาและอัดแรงดันที่อุณหภูมิสูงภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นจึงกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ผิวของคาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง เกิดร่างแห รูพรุน ภายใน และร่างหุ้มฟังก์ชันบนพื้นผิวในแต่ละส่วน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีลักษณะพิเศษ คือ มีพื้นที่สัมผัสผิวมาก (ประมาณ 600 - 2000 ตารางเมตรต่อกรัม) จึงมีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และมีหลายขนาด (20-20,000 อังสตรอม) ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง ปัจจุบันจึงได้ทำการวิจัยศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งหลายชนิดที่ราคาถูก ส่วนใหญ่มักใช้วัตถุดิบที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว (อรุวรรณ, วรรณ และแหลมทอง, 2543) ลูกหวาก (ปัญญา, 2555; Inbaraj and Sulochana, 2006; Stephen and Sulochana, 2006) กากชา (Mondal, 2009) และกระดองปู (อรดี และศศิธร, 2557) เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (สุภาภรณ์, วิไล และละเอียด, 2542) แต่ยังคงพบว่ามีข้อจำกัดเกี่ยวกับการดูดซับที่ไม่ครอบคลุมกับสารละลายโลหะหนักทุกชนิด เนื่องจากการดูดซับต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี สภาวะเหล่านั้น ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้น และขนาดของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

สา쿠เป็นพืชตระกูลปาล์มที่พบตามที่สูงและ พบได้ในตอนใต้ของประเทศไทย และประเทศเพื่อนบ้านทางภาคใต้ของไทย ประโยชน์หลักของต้นสาคุคือ สามารถผลิตแป้งสาคุจากลำต้นเพื่อแปรรูปเป็น

อาหารประเภทต่าง ๆ สำหรับในหลายจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศ เช่น พัทลุง ตรัง และ นครศรีธรรมราช เป็นต้น พบว่าได้ผลิตแป้งสาจากต้นสาจากเพื่อใช้เป็นอาหาร และส่งออกเพื่อจำหน่าย ทำให้วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสา มีปริมาณมากตามไปด้วย ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มมูลค่าจาก วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาโดยนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับโลหะตะกั่ว (Pb) ในน้ำเสีย เนื่องจากต้น สาคู่มิองค์ประกอบทางเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชัน (เช่น C=O, S=O และ -OH เป็นต้น) ที่สามารถจับกับโลหะหนักเหล่านี้ได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการ กระตุ้นด้วยสารเคมี
2. เพื่อตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะ และโครงสร้างอสังฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากสา ที่เตรียม
4. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต ถ่านกัมมันต์จากกากสา เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า
5. เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา : การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นตัว ดูดซับไอออนของตะกั่วในสารละลาย โดยการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ และประเมินต้นทุนการผลิต และจุดคุ้มทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสา เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการ แข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า
2. ขอบเขตด้านพื้นที่ : พื้นที่ศึกษาสำหรับการเก็บตัวอย่างในโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ชุมชน อ.ควน ชนุน จ.พัทลุง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิชาการ : เผยแพร่ผลงานวิจัยโดยการนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติ หรือนานาชาติ และเผยแพร่ผลงานวิจัยโดยการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ ที่อยู่ในฐานข้อมูลที่ สกอ. ยอมรับ เช่น ฐานข้อมูล ScienceDirect หรือ Scopus เป็นต้น
2. ด้านนโยบาย : มีแนวทางในการนำไปสู่การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการจัดการน้ำเสีย ให้กับหน่วยงานของรัฐที่รับผิดชอบดูแลโดยตรง เช่น สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติประจำจังหวัด เป็นต้น
3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ : มีแนวทางในการเพิ่มโอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิง พาณิชย์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า เมื่อใช้ผลการประเมินการวิเคราะห์ต้นทุนการ ผลิต และจุดคุ้มทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสา
4. ด้านสังคม/ชุมชน : ชุมชนได้เห็นคุณค่าและประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตแป้งต้นสา จากการทำเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสา ก่อให้เกิดอาชีพที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้ เช่น การ จำหน่ายกากต้นสาให้กับโรงงานผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ทำให้เกิดรายได้อีกทางหนึ่งให้แก่คนในชุมชน

5. สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่สาขาเคมีและเคมีประยุกต์ จำนวน 2 คน ได้แก่ นักศึกษาสาขาวิชาเคมีชั้นปีที่ 3 ที่ได้ร่วมทำวิจัยในบางขั้นตอนของการศึกษาจากโครงการวิจัยที่ได้เสนอขอ โดยนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชาการวิจัยเฉพาะทาง (special topic) ในชั้นปีที่ 4



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาकु

สาकु มีชื่อวิทยาศาสตร์: *Metroxylon sagu* เป็นพืชจำพวกปาล์มชนิดหนึ่ง ซึ่งมีแบ่งในลำต้นและนำมาผลิตเป็นสาकु ภาษามาเลย์เรียก sagu เป็นพืชที่พบตามที่สูงและ ถิ่นกำเนิดอยู่ที่นิวกินีและหมู่เกาะโมลุกกะ ประเทศอินโดนีเซีย และบริเวณใกล้เคียง กระจายพันธุ์ในอินโดนีเซีย มาเลเซีย ปาปัวนิวกินี และตอนใต้ของไทย ต้นสาकुที่อายุ 9 ปี ขึ้นไปจะสะสมแป้งในลำต้นมาก เมื่อโค่นต้นจะลอกเอาแป้งที่มีลักษณะข้นเหนียวมาทำอาหารได้ เรียกแป้งนี้ว่า “แป้งสาकु” ซึ่งนำมาใช้แทนเมล็ดสาकुที่ทำจากมันสำปะหลัง แป้งสาकुบริสุทธิ์มีอะไมโลส 27% อะไมโลเพคติน 73% ([https://th.wikipedia.org/wiki/สาकु_\(ปาล์ม\)](https://th.wikipedia.org/wiki/สาकु_(ปาล์ม))) สามารถใช้ทำเค้กและคุกกี้ เส้นก๋วยเตี๋ยวและขนมแห้งต่าง ๆ ในสหรัฐใช้ทำคัสตาร์ด ในทางอุตสาหกรรมใช้รักษารูปทรงในการผลิตกระดาษและเส้นใย ผสมในการผลิตไม้อัด ลำต้นอ่อนใส่กลวง และเศษน้ำที่เหลือจากการผลิตแป้งใช้เป็นอาหารสัตว์ (เปลือก, 2557, สุมาลี, 2551) เปลือกลำต้นใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและเชื้อเพลิง ก้านใบใช้ทำฝามันง เพดาน และรั้ว ใบอ่อนใช้สานตะกร้า ยอดอ่อนรับประทานเป็นผักหนอนของด้วงสาकुนำมารับประทานได้ กากที่เหลือจากการผลิตแป้งนำมาเพาะเห็ดฟาง ใบสาकुนำมาเย็บเป็นตับใช้มุงหลังคาและฝาบ้าน ก้านใบนำมาลอกเปลือกนอกออก นำไปจักสานเป็นชะลอมหรือแผงวางของได้ ผลของต้นสาคุรับประทาน นอกจากนี้บางจังหวัดทางภาคใต้ของไทยได้นำต้นสาकु (ที่ไม่ได้ทำแป้ง) ไปสับ เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ (วรรณชัย, 2552; สมศักดิ์ และชาญวิทย์, 2535)

กากต้นสาकु คือส่วนของลำต้นที่เหลือจากการผลิตแป้งสาकु หากมีปริมาณที่มาก ชาวบ้านได้กำจัดโดยการเผา ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเร็ว แต่ผลเสียคือเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน หรือเกิดภาวะเรือนกระจก

ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุติดทางธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน 87–90% (ส่วนที่เหลือมีธาตุอื่น ๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน) มาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง พื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (<http://th.wikipedia.org/wiki/ถ่านกัมมันต์>) ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณที่สูง ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือใช้ในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมาก

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) แต่ถูกทำขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างภายในที่เป็นรูพรุนมีจำนวนมาก โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนถ่านแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิด

อื่น ๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง และมีผิวโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 ถึง 20,000 อังสตรอม) (ปริญทร, 2551)

การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สามารถทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ สมรรถนะของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัส

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อาจเป็นวัตถุดิบที่เป็นอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในธรรมชาติ หรืออาจได้จากการสังเคราะห์ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมได้แก่ ถ่านพีท ถ่านหิน ถ่านลิกไนต์ และไม้ เป็นต้น เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง มีราคาถูกและหาได้ง่าย และมีคุณสมบัติคงที่

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่าง ๆ ได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

1.1 แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น (รุจิรา, 2556; ปานฉัตร, 2554) ได้แก่

1.1.1 ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่

1.1.2 ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้ มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย

1.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (รุจิรา, 2556; ปานฉัตร, 2554) ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ของ IUPAC ได้แก่

1.2.1 ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนไม่เกิน 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย

1.2.2 ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ในการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี เป็นต้น

1.2.3 ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก และมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

1.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (รุจิรา, 2556; ปานฉัตร, 2554) ได้แก่

1.3.1 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ (น้อยกว่า 0.35 กรัมต่อมิลลิกรัม) ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้ มักใช้เพื่อดูดซับในสารละลาย เช่น การฟอกสีของน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวบริสุทธิ์ เป็นต้น

1.3.2 ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง (มากกว่า 0.45 กรัมต่อมิลลิกรัม) ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้ มักใช้ดูดสารพิษ หรือไอระเหย

1.4 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ (รจจิรา, 2556) ได้แก่

1.4.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon) มีลักษณะเป็นผงซึ่งได้จากการบด ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ดูดซับในสภาวะของเหลว

1.4.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดหรือเม็ด (granular activated carbon) มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดเครื่องอัดเป็นเส้นกลม ๆ แล้วตัดออกเป็นท่อน ขนาดเท่า ๆ กัน หรืออาจทำเป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย

คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง และชนิดเม็ด ตาม มอก. 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ปานฉัตร, 2554)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2547)
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20 - 0.75

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (ปานฉัตร, 2554)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2547)
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

1.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ (รจจิรา, 2556) ได้แก่

1.5.1 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับแก๊ส (gas absorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาด้วยความดันสูง

1.5.2 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสี (color absorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนใหญ่ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านขานอ้อย ถ่านจากกล้วย ถ่านตากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล.

1.5.3 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับโลหะ (metal absorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

2. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน (รจจิรา, 2556)

ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) และการกระตุ้นหรือการก่อกัมมันต์ (activation) รายละเอียดมีดังนี้

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเลือกใช้วัตถุดิบใด ๆ ก็ได้ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว ชิงช้าวโปกด กากสาคุ โดยพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบ ดังนี้

- 1) คาร์บอนคงตัวสูง
- 2) ปริมาณความชื้นต่ำ
- 3) มีสารระเหยได้
- 4) มีปริมาณซีเล็ดต่ำ
- 5) ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- 6) สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

ในการคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงถึงราคา ต้นทุน และกระบวนการผลิต ตลอดจนวัฏประสงค์ของการนำไปใช้งาน สำหรับการเตรียมวัตถุดิบอาจนำวัตถุดิบมาร้อนคัดขนาด หรือบด เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการเผา หรือการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ซึ่งบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียว ยากแก่การบดวัตถุดิบโดยตรง ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปเผาให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาด

2.2 การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำได้โดยเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ลักษณะ ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) หรือถ่านคาร์บอนไนซ์ ของเหลวที่มีลักษณะคล้ายน้ำมัน เรียกว่า น้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในขั้นตอนนี้จะมีการเริ่มสร้างโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊ส และน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ควรมีลักษณะดังนี้

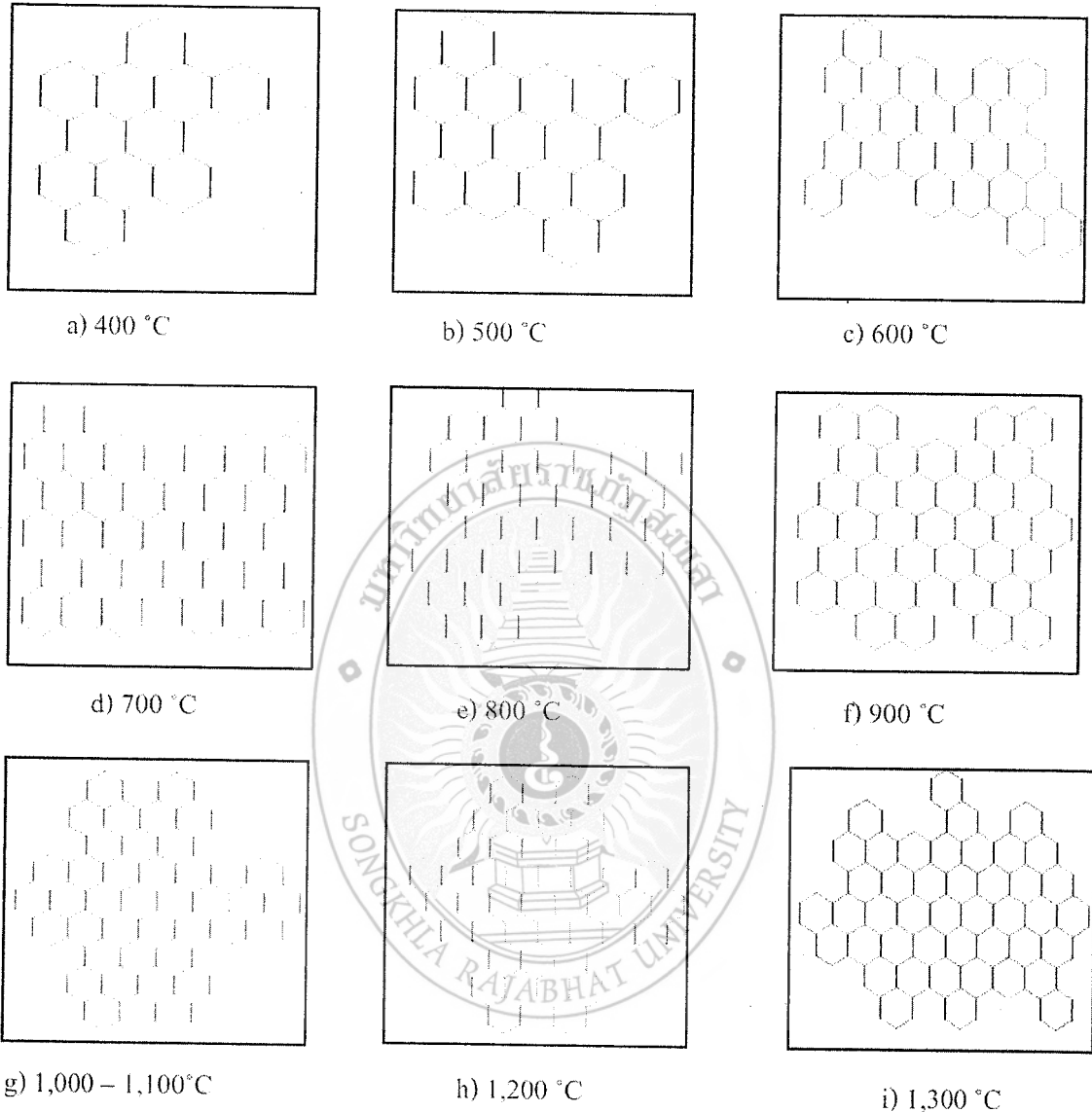
- 1) มีสีดำตลอด
- 2) เมื่อหักถ่าน ส่วนที่หักจะมีผิวมัน เงา
- 3) ปลายที่หัก จะแหลมคม
- 4) ปรากฏจากฝุ่น ผง และซีเล็ด

การคาร์บอนไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ ทำได้โดยการปรับสภาวะให้เหมาะสม โดยต้องคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.1

2.2.2 อัตราความร้อน (heat rate) อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์ และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหย

ถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น และสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย



ภาพที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Hassler, 1974)

2.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น ไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูง

2.2.4 ธรรมชาติของวัสดุติบ (nature of materials) วัสดุติบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนไนซ์ โดยถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันอาจมีวิธีกระตุ้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป

2.3 การก่อกัมมันต์ (activation) หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับได้ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ถ่านมีความว่องไวมากขึ้น ความหมายของการก่อกัมมันต์มี 3 ลักษณะ คือ

- 1) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป แล้วเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- 2) เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้หะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- 3) เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center)

โดยปกติการก่อกัมมันต์ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การก่อกัมมันต์ทางเคมี (chemical activation) และการก่อกัมมันต์ทางกายภาพ (physical activation) (Mohan & Pittman, 2006) สำหรับในโครงการวิจัยนี้ได้สนใจการก่อกัมมันต์ทางเคมี โดยการแช่ถ่านคาร์บอนในสารเคมีเพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ที่ผิวคาร์บอนของถ่าน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แช่ ถ่านคาร์บอนจะดูดซับเอาสารละลายนั้นเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนบนผิวคาร์บอนของถ่าน และสารเคมีที่เติมลงไปจะทำให้ลายโครงสร้างของผิวคาร์บอน เมื่อนำถ่านคาร์บอนไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในอากาศจะเกิดการสลายตัว และเกิดการเชื่อมไขว้ (cross-link) กันของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัว เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือไฮโดรเจน ในโครงสร้างของถ่านคาร์บอนไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมไขว้กันนี้ ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้การเกิดทาร์ลดลง ในขณะที่เกิดการเชื่อมไขว้กัน สารเคมีที่ใช้กระตุ้น (ซึ่งมีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ๆ) จะหุ้มผิวถ่านอยู่รอบ ๆ และจะแทรกซึมลงไปที่ผิวคาร์บอนของถ่าน จึงทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรด จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น การเกิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์นอกจากจะเกิดจากการเชื่อมไขว้ของโครงสร้างของผิวคาร์บอนแล้วยังเกิดจากการเกิดแก๊สที่ระเหยออกไปในขั้นตอนการเผากระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ ทำให้สารอินทรีย์ในอากาศเกิดการสลายตัว แล้วเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส ทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งทำให้สารเคมีที่ใช้กระตุ้นสามารถแทรกซึมลงไปยังผิวคาร์บอนของถ่านคาร์บอนไนซ์ ได้อย่างทั่วถึง

ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่ข้อเสียคือมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิด และปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัสดุติบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัสดุติบ อุณหภูมิ และเวลา

2.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างใกล้เคียงกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซิน หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือ แต่ละอะตอมก็มีพันธะเดี่ยวอีก 3 อะตอมในแผ่นระนาบที่สมมาตรกัน โดยมีซิกมาอิเล็กตรอน (σ -electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลือซึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน (π -electron) จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้าง (หรือ

เกิดเรโซแนนซ์) ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรยิ่งขึ้น โดยยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อน เป็นต้น (ปานฉัตร, 2554)

โดยทั่วไป สามารถพิจารณาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ออกได้ 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างทางกายภาพ และโครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ รายละเอียดมีดังนี้

2.4.1 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ (physical structure of activated carbon) โดยทั่วไปจะหมายถึงโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบคาร์บอนระหว่างช่องระหว่างผลึกของคาร์บอน ทำให้รูพรุนเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือการทำให้มีความพรุน ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากและมีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้าง หนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี รูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถจำแนกตามได้ขนาดรัศมีของรูพรุนคือ

(1) แมโครพอร์ (macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่า หรือเท่ากับ 100 - 200 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

(2) เมโซพอร์ (mesopores) หรือ ทรานซิชั่นัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 1.5 - 100 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนเป็นเมโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) ตัวเร่งปฏิกิริยาอะมิโนซิลิเกต (aminosilicate catalyst)

(3) ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร ปริมาตร 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจำนวนมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุดทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้น ที่ความดันต่าง ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อมั่นว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่า “การกระจายตัวของรูพรุน (pore size distribution)” จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

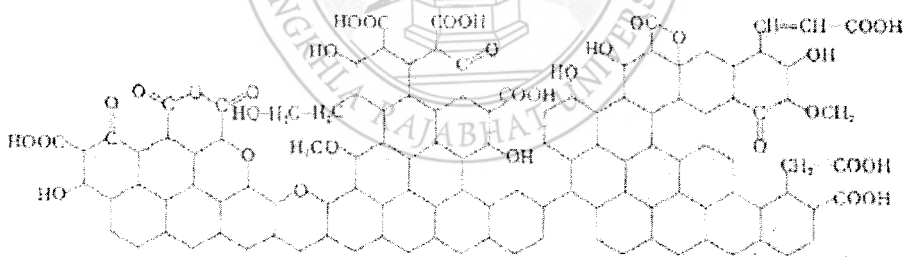
โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจาย มีทั้งแมโครพอร์ เมโซพอร์ และไมโครพอร์ เรียกว่า “โครงสร้างผสม (mixed structural type)” พบว่าแมโครพอร์เป็นเพียงทางเปิดสู่ผิวภายนอกอนุภาค โดยมีเมโซพอร์เป็นกิ่งออกมาจากไมโครพอร์อีกทีหนึ่ง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อความจุในการดูดซับจะมีประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันนอล (functional groups) อื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพออิเล็กทรอนิกส์แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่า

จะดูดซับได้แต่มีโอกาที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรงกว่าโอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า (ปานฉัตร, 2554)

2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ (chemical structure of activated carbon surface) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่น ๆ ได้ เช่น อะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจน ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นจะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป การที่มีอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนอยู่ จะส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมีจะเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น carboxyl, phenolic, hydroxyl, quinonoid, normal lactone, fluorescein-type lactone และ carboxylic acid anhydride เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในสารละลายจะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเปลี่ยนแปลง นั่นคือ สามารถแสดงความเป็นกรดหรือเบสได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนบนพื้นผิวมากก็จะแสดงความเป็นกรด (ภาพที่ 2.2) ซึ่งพื้นผิวที่มีความเป็นกรดนี้ จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนน้อยก็จะแสดงความเป็นเบสซึ่งจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ

จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน อะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมเชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่าง หรือโพรงได้ ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นโดยการล้างพวกทาร์ และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรงที่จะสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ที่มา : Jankowska et al., 1991.

3. การดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารมาสะสมที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวโดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไหลมาสัมผัสกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) องค์ประกอบแต่ละชนิดของสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย และความชอบของตัวถูกละลายที่มีต่อตัวดูดซับ (specific affinity) แต่การ

ดูดซับไม่รวมถึงขบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (surface precipitation process) หรือขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายเกิดจากการดูดซับหรือการตกตะกอนที่พื้นผิวหรือขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันหรือขบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้วโดยทั่วไปจะใช้คำว่า sorption (Danald, 1995)

การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ (ได้แก่ พื้นผิวที่ผิว ขนาดของรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ (ได้แก่ ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ลักษณะของสารละลาย (เช่น ค่าความเป็นกรด - ด่าง อุณหภูมิ เป็นต้น) และระยะเวลาในการดูดซับ เป็นต้น

3.1 กลไกการดูดซับ เป็นการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง เรียกการกักนี้ว่า การดูดซับ การดูดซับที่ผิวนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (phase) ต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ คือ ของเหลว แก๊ส และของแข็ง โดยมีได้ทั้งแบบแก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ในการดูดซับที่ผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยสามารถกำจัดออกจากตัวทำละลายและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของ ตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ติดอยู่ที่ผิวภายนอก

การถ่ายเทโมเลกุลจากสารละลายไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในสารละลายเหลือน้อย เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ ในการเกาะติดของโมเลกุลโดยการดูดซับมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ที่พิจารณาการดูดซับจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นการดูดซับทางกายภาพ แต่ถ้าเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมี

3.2 ขั้นตอนการดูดซับ การดูดซับของถ่านกัมมันต์ (McKay, 1983; Sanuel, 1987) เกิดขึ้น 4 ขั้นตอน อธิบายได้ดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายเข้าหาถ่านกัมมันต์ (bulk solution transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่เป็นสารละลายไปสู่บริเวณที่ใกล้ ๆ กับอนุภาคของตัวดูดซับ (boundary layer) การเคลื่อนที่นี้จะเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ (diffusion) โดยทั่วไปขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้เร็ว

3.2.2 ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางที่ผิวของตัวดูดซับ (film diffusion) ในขั้นตอนนี้ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆ ของสารละลายที่อยู่นิ่ง และอยู่รอบ ๆ อนุภาคของตัวดูดซับ โดยใช้วิธีการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) ระยะทาง และเวลาในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านอนุภาคของตัวดูดซับ โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มบาง ๆ จะลดลงเมื่ออัตราการไหล สูงขึ้น

3.2.3 ขั้นตอนการแพร่ของโมเลกุลผ่านช่องว่างในตัวดูดซับ (pore diffusion) ภายหลังจากโมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มบาง ๆ รอบอนุภาคของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในอนุภาคนี้ (intra-particle transport) อาจเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ของโมเลกุลผ่านสารละลายในรูพรุนในตัวดูดซับหรือโดยกระบวนการแพร่ผ่านไปตามพื้นผิวของตัวดูดซับ (surface diffusion)

3.2.4 ขั้นตอนการดูดซับ (adsorption) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงบริเวณที่เป็นผิวของตัวดูดซับ (adsorption bond) การสร้างพันธะของกระบวนการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะเกิดขึ้นขั้นตอนกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ด้วยเหตุนี้ ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นี้จะทำหน้าที่เป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยาในการกำจัดโมเลกุลต่าง ๆ ออกจากสารละลาย แต่เมื่อใดก็ตามที่ขั้นตอนการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางธรรมชาติของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะช้าซึ่งอาจจะช้ากว่าขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นี้ ดังนั้นขั้นตอนการดูดซับนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดอัตราในการดูดซับโมเลกุลต่าง ๆ ออกจากสารละลาย

3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ Davidson and Mcmurry (2006) ได้อธิบายว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับขนาดของสารที่ถูกดูดซับ บนผิวของสารดูดซับความปั่นป่วน (turbulence) รายละเอียดมีดังนี้

3.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ สมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับ มีอิทธิพลของอัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) นั่นคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3.3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ pH ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออน มากกว่าที่ pH สูง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย (pH_{sol}) และค่า pH ที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{zpc}) ที่แสดงถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในสารละลาย ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลายของระบบนั้น ๆ โดยที่ค่า pH_{sol} และ pH_{zpc} มีความสัมพันธ์กันคือในกรณีที่ค่า $pH_{sol} > pH_{zpc}$ แสดงว่าวัสดุดูดซับนั้นจะเกิดการแตกตัวทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับแสดงประจุลบมากกว่าประจุบวก มีผลทำให้วัสดุดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุบวกได้ ในทางตรงกันข้ามถ้ากรณีที่ค่า $pH_{sol} < pH_{zpc}$ วัสดุดูดซับดังกล่าวจะไม่เกิดการแตกตัวและแลกเปลี่ยนไอออนบวก ทำให้วัสดุดูดซับนี้มีความสามารถในการดูดซับไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุลบได้

3.3.3 อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับอุณหภูมิขึ้นอยู่กับประเภทการดูดซับของวัสดุดูดซับ เช่น ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น

3.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำก่อน แล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิว

ของสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับและ ความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

3.3.5 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัว ถูกดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับเมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้น ตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการละลายอีกด้วย นั่นคือ สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุน มักถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีจำนวนน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

3.3.6 ความปั่นป่วน (turbulence) อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไพบาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการผลิตถ่านกัมมันต์นิยมทำกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ โดยทำจากวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติที่หลากหลาย เช่น ลูกหูกวาง (ปัญญา มณีจักร, 2555) กากชา (Mondal, 2009) กากน้ำตาล (Legrouri *et al.*, 2005) ถ่านไม้ (พิทักษ์ อยู่มี, 2558) เปลือกปู (อรดี และคณะ, 2557) ชานอ้อย เปลือกกล้วย และกะลามะพร้าว (อรรธรรม และคณะ, 2543) เป็นต้น โดยนำวัสดุเหล่านี้มาผ่านกระบวนการคาร์บอนที่สภาวะต่าง ๆ และนำไปกระตุ้นโดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีที่ใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (พิทักษ์ อยู่มี, 2558) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Feng-Chin *et al.*, 2011) ซิงค์คลอไรด์ (Oliveres-Marín *et al.*, 2006) กรดซัลฟิวริก (Oliveres-Marín *et al.*, 2012; Karaöz *et al.*, 2008; Legrouri *et al.*, 2005; Kadirvelu *et al.*, 2005) แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Maheswari *et al.*, 2008; Kadirvelu *et al.*, 2004) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (Adinata *et al.*, 2007) เป็นต้น สำหรับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาครสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายเพื่อเพิ่มมูลค่าให้เป็นประโยชน์ต่อสังคมและรักษาสิ่งแวดล้อม (Aripin *et al.*, 2010; Awg-Adeni *et al.*, 2010; Djoković *et al.*, 2009) โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เพื่อดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น สีย้อม (Feng-Chin *et al.*, 2011; McKay *et al.*, 1983) และสารประกอบอนินทรีย์ เช่น โลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

งานวิจัยที่ได้ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาคร (ที่ไม่เตรียมเป็นถ่านกัมมันต์) มาดูดซับโลหะตะกั่ว และทองแดง ในสารละลายที่ pH ต่าง ๆ (Quek *et al.*, 1998) พบว่า การดูดซับโลหะทั้ง 2 ชนิด เกิดขึ้นได้ดีที่สุด ที่ pH 4-5.5 โดยที่วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาครสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าทองแดง โดยให้ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 46.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การดูดซับทองแดงให้ค่าความจุสูงสุดของการ

ดูดซับเท่ากับ 12.4 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้น ต่อมา Wahi *et al.* (2010) ได้ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकु (ที่ไม่เตรียมเป็นถ่านกัมมันต์) มาดูดซับโลหะสังกะสี ในสารละลาย เมื่อใช้ผงของวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुที่มีขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 300, 500 และ 1,200 ไมโครเมตร ที่ pH ต่าง ๆ พบว่า การดูดซับสังกะสีในสารละลายเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อใช้ผงวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुขนาด 300 ไมโครเมตร ที่ pH เท่ากับ 9 นั้นคือสามารถดูดซับได้ 74% โดยให้ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 10.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อปรับ pH เท่ากับ 7 จะให้ค่าความจุของการดูดซับลดลงเหลือเพียง 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुที่ไม่เตรียมเป็นถ่านกัมมันต์มาดูดซับโลหะหนัก จะทำได้ไม่ดี นั่นคือมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ดังนั้นจึงทำให้นักวิจัยในต่างประเทศกลุ่มใหม่นำวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुไปเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับทั้งสารอินทรีย์ประเภทสีย้อม (McKay *et al.*, 1983) และสารอนินทรีย์ประเภทสารประกอบของโลหะหนักที่ละลายในน้ำและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น Kadirvelu *et al.* (2005) ได้ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकुที่เตรียมจากโรงงานอุตสาหกรรมมาดูดซับสีย้อม Rhodamin-B จากน้ำทิ้ง พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับสีย้อมที่ pH 5.7 ได้ 91% เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 100 มิลลิกรัมต่อสารละลายสีย้อมที่เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิตร และเมื่อปรับ pH ให้เท่ากับ 7 พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับสีย้อมได้ถึง 100% เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 275 มิลลิกรัมต่อสารละลายสีย้อมที่เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิตร นอกจากนี้ นักวิจัยกลุ่มเดิม (Kadirvelu *et al.*, 2004) ได้ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुโดยการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้กรด H_2SO_4 และ $(NH_4)_2S_2O_8$ แล้วนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เพื่อดูดซับไอออนปรอทในสารละลายน้ำ พบว่าถ่านกัมมันต์ขนาด 125-250 ไมโครเมตร สามารถดูดซับได้ดีที่ pH 5 โดยมีความจุของการดูดซับ เท่ากับ 55.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม pH ของสารละลายจาก 2 ถึง 10 ต่อมา Maheswari *et al.*, (2008) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकुโดยการกระตุ้นทางเคมีที่ใช้สารละลายชนิดเดียวกับที่นักวิจัยกลุ่มของ Kadirvelu *et al.* (2004) ใช้ หลังจากนั้นได้ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แล้วนำไปดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำทิ้ง พบว่าถ่านกัมมันต์ขนาด 125-250 ไมโครเมตร สามารถดูดซับได้ดีที่ pH 4 โดยมีความจุของการดูดซับเท่ากับ 32.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับสารละลายทองแดงเพิ่มขึ้นจาก pH 2 ถึง pH 4 เมื่อใช้สารละลายทองแดงเข้มข้น 10 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

จะเห็นได้ว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकुมาดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการดูดซับที่ไม่ครอบคลุมกับโลหะหนักทุกชนิด เนื่องจากการดูดซับต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี สภาวะเหล่านั้น ได้แก่ pH อุณหภูมิ ความเข้มข้น และขนาดของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकुโดยการก่อกัมมันต์ทางเคมี แล้วนำมาประยุกต์ใช้โดยการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย (ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม) ที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อให้ได้การดูดซับมีประสิทธิภาพที่ดีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งทำการประเมินต้นทุนการผลิต และจุดคุ้มทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งต้นสาकु เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	เกรดสารเคมี	บริษัทผู้จำหน่าย	ประเทศผู้ผลิต
1. กรดไฮโดรคลอริก	HCl	AR	RCI LabScan	Thailand
2. ไอโอดีน	I ₂	AR	Fisher Chemical	United Kingdom
3. โพแทสเซียมไอโอไดด์	KI	AR	Ajax Finechem	New Zealand
4. โซเดียมไฮโอซัลเฟต	Na ₂ S ₂ O ₃	AR	LobaChemie	India
5. โซเดียมคาร์บอเนต	Na ₂ CO ₃	AR	QR&C	New Zealand
6. โพแทสเซียมไอโอเดต	KIO ₃	AR		Australia
7. เลดคลอไรด์	PbCl ₂	AR	Ajax Finechem	New Zealand
8. สารละลายแอมโมเนีย	NH ₃	AR	LobaChemie	India
9. โพแทสเซียมไซยาไนด์	KCN	AR	Ajax Finechem	New Zealand
10. โซเดียมซัลไฟต์	Na ₂ SO ₃	AR	Ajax Finechem	New Zealand
11. ไตไฮโซน	C ₁₃ H ₁₂ N ₄ S	AR	LobaChemie	India
12. คลอโรฟอร์ม	CHCl ₃	AR	RCI LabScan	Thailand
13. กรดซัลฟิวริก	H ₂ SO ₄	AR	RCI LabScan	Thailand
14. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	AR		
15. โซเดียมไบคาร์บอเนต	NaHCO ₃	AR	LobaChemie	India
16. โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	AR	RCI LabScan	Thailand
17. แป้งมัน	-			
18. ถ่านกัมมันต์ทางการค้า		Commercial	FILTRASORB 100	USA
19. ถ่านกัมมันต์กากสา쿠 (ผลิตเอง)	-	-	-	-

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องแก้ว ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องแก้ว	รุ่น/ยี่ห้อ	บริษัทผู้ผลิต/จำหน่าย
1. เครื่องชั่งไฟฟ้า (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)	METTLER TOLEDO AG 204	
2. ตู้อบไฟฟ้า	Memmert ULE600/500	Memmert
3. เตาเผาอุณหภูมิสูง	Cabolite RWF1100	CARBOLITE
4. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบแช่ยาได้	Memmert	MERIT TECH
5. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	Shimadzu 2J1-0004	MERIT TECH
6. เครื่อง SEM	Quanta-400	FEI, Czech Republic
7. Energy Dispersive X-ray Spectrometer	X-Max	Oxford, England
8. Electron Microanalysis-Mapping Analysis	X-Max	Oxford, England
9. เครื่อง FTIR	ATR-FTIR Alpha	BRUKER
10. เตาให้ความร้อน		MERIT TECH
11. เครื่องวัด pH	METTLER TOLEDO	
12. เครื่องกรองสูญญากาศ		
13. ครุชีเบิ้ลและฝา		
14. โถดูดความชื้น		
15. เครื่องแก้ววัดปริมาตรชนิดต่าง ๆ		
16. กระดาษกรองเบอร์ 42	Whatmann	
17. ซ้อนตักสาร		
18. ครกบดสาร		
19. ตะแกรงร่อนขนาด 106, 500 และ 1000 ไมครอน		
20. ไมโครปิเปต (ปรับปริมาตร) ขนาด 200 และ 1000 ไมโครลิตร		
21. ไมโครปิเปตทิพ ขนาด 200 และ 1000 ไมโครลิตร		

วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัย ได้แบ่งการศึกษาหลักออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาकुและการเก็บตัวอย่าง การเตรียมถ่านกัมมันต์ การศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ และการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต รายละเอียดมีดังนี้

1. การสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาครและการเก็บตัวอย่าง

โดยลงพื้นที่สำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาครที่ อ.ควนขนุน จ.พัทลุง เมื่อวันที่ และเก็บตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้งจากกากสาคร (ที่เหลือจากการผลิตแป้งสาคร) โดยวิธีตักแล้วบรรจุในกระสอบพลาสติก ขนาด 20 กิโลกรัม จำนวน 5 กระสอบ

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาครในการวิจัยนี้มี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์กากสาคร และการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยสารเคมี รายละเอียดมีดังนี้

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ นำตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้งจากกากสาคร มาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายครั้ง นำไปตากแห้ง 1 วัน แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากสาครแห้งโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามวิธีของ ASTM D1762-84 รายละเอียดมีดังนี้

2.1.1 การวิเคราะห์หาค่าความชื้น

(1) เเป่าด้วยเบี่ยงทอนความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C นาน 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักถ้วยเบี่ยงทอนความร้อนด้วยเครื่องชั่งละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยเบี่ยงทอนความร้อนที่คงที่

(2) ชั่งตัวอย่างกากสาครแห้งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบี่ยงทอนความร้อนที่ทราบน้ำหนักแล้ว ไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 2 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

(3) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกากสาครแห้งหลังอบ คำนวณหาปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(A - B)}{W} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ A คือ (น้ำหนักถ้วยกระเบี่ยง + น้ำหนักกากสาคร) ก่อนอบ (กรัม)
- B คือ (น้ำหนักถ้วยกระเบี่ยง + น้ำหนักกากสาคร) หลังอบ (กรัม)
- W คือ น้ำหนักกากสาครก่อนอบ (กรัม)

2.1.2 การวิเคราะห์หาค่าสารระเหย

(1) อบถ้วยเบี่ยงทอนความร้อนพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักถ้วยเบี่ยงทอนความร้อนพร้อมฝาปิดด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยเบี่ยงทอนความร้อนพร้อมฝาปิดที่คงที่

(2) ชั่งตัวอย่างกากสาครแห้งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบี่ยงทอนความร้อนที่ทราบน้ำหนักแล้ว ไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 900±10°C เป็นเวลา 7 นาที นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น

(3) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกากสาครแห้งหลังอบ คำนวณหาปริมาณสารระเหยเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(C - D)}{W} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

- เมื่อ C คือ (น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักกากสาคุ) ก่อนเผา (กรัม)
- D คือ (น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักกากสาคุ) หลังเผา (กรัม)
- W คือ น้ำหนักกากสาคุก่อนเผา (กรัม)

2.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

- (1) เเผถ้วยเบ้องทนความร้อนพร้อมฝาปิดในเตาเผาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักถ้วยเบ้องทนความร้อนพร้อมฝาปิดด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยเบ้องทนความร้อนพร้อมฝาปิดที่คั่งที่
- (2) ชั่งตัวอย่างกากสาคุแห่งประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบ้องทนความร้อนที่ทราบน้ำหนักแล้ว ไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 250°C นาน 30 นาที แล้วเผาคต่อที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชม. นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
- (3) ชั่งน้ำหนักเถ้าในตัวอย่าง คำนวณหาปริมาณเถ้าเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (3)

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักเถ้า (g)}}{\text{น้ำหนักกากสาคุ (g)}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3)$$

2.1.4 การหาค่าคาร์บอนคงตัว คำนวณปริมาณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละสารระเหย} - \text{ร้อยละเถ้า} \quad \dots\dots\dots(4)$$

2.2 การคาร์บอนไนซ์กากสาคุ ในการคาร์บอนไนซ์กากสาคุ มีปัจจัยที่ต้องศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

2.2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม

- (1) นำกากสาคุที่ตากแดด 1 วัน ไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ที่ 105°C นาน 2 ชม. เพื่อให้กากสาคุแห้งสนิท
- (2) นำกากสาคุที่แห้งสนิทที่ตากแดดจากข้อ 1) ไปเผาคด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 300-500°C นาน 1 ชม. จะได้ถ่านกากสาคุที่อุณหภูมิต่าง ๆ
- (3) บดถ่านกากสาคุให้มีขนาดเล็กกว่า 50 เมช หรือ 297 ไมครอน แล้วนำถ่านไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ภาคผนวก ก.) เลือกถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองต่อไป

2.2.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม

- (1) นำกากสาคุที่ผ่านการอบแห้งสนิท ไปเผาคด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 300°C ในระยะเวลาตั้งแต่ 60-180 นาที จะได้ถ่านกากสาคุที่เผาที่อุณหภูมิ 300°C ที่ระยะเวลาต่าง
- (2) บดถ่านกากสาคุให้มีขนาดเล็กกว่า 50 เมช หรือ 297 ไมครอน แล้วนำถ่านไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ภาคผนวก ก.) เลือกถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองต่อไป

2.2.3 การศึกษาขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสม

(1) เผากากสาकुที่ผ่านการอบแห้งสนิทด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 300°C นาน 105 นาที

(2) นำถ่านคาร์บอนไนซ์จากกากสาकुที่เผาจากข้อ 1) มาร่อนโดยใช้ตะแกรงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดที่เล็กกว่า 140 เมช (106 ไมครอน) 140-35 เมช (106-500 ไมครอน) และ 35-18 เมช (500-1,000 ไมครอน)

(3) นำถ่านคาร์บอนไนซ์แต่ละขนาดไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ภาคผนวก ก.) เลือกถ่านที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองต่อไป

2.2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านคาร์บอนไนซ์

(1) นำถ่านคาร์บอนไนซ์จากกากสาकुที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C นาน 105 นาที ขนาด 500-1,000 ไมครอน ไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ โดยวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว รวมทั้งศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

(2) ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนไนซ์จากสาकु โดยเทคนิค FTIR

2.3. การกักกัมมันต์ทางเคมี มีปัจจัยที่ต้องศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

2.3.1 การศึกษาชนิดของสารเคมีที่ใช้กักกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยเลือกสารเคมีที่ใช้กระตุ้น 2 ชนิด ได้แก่ H_2SO_4 และ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ขั้นตอนการศึกษาทำได้ดังต่อไปนี้

(1) นำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาที่อุณหภูมิ 300°C นาน 105 นาที ขนาด 500-1000 ไมครอน มาแช่ในกรด H_2SO_4 เข้มข้น 50%(v/v) และ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ เข้มข้น 0.5%(w/v) ในอัตราส่วน 1:1 (น้ำหนักแห้งของถ่านต่อสารกระตุ้น)

(2) คนสารผสม นาน 30 นาที แล้วนำไปเก็บในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 12 ชม.

(3) ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นอย่างน้อย 5 ครั้ง แล้วนำถ่านไปแช่ในสารละลาย NaHCO_3 เข้มข้น 5%(w/v) นาน 1 คืน ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นจนหมดกรด

(4) อบถ่านในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชม.

(5) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้ง 2 ชนิด ไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ภาคผนวก ก.) เลือกถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองต่อไป

2.3.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านและสารกักกัมมันต์ที่เหมาะสม

(1) นำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาที่อุณหภูมิ 300°C นาน 105 นาที ขนาด 500-1000 ไมครอน มาแช่ในกรด H_2SO_4 เข้มข้น 50%(v/v) ในอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านคาร์บอนไนซ์และกรด H_2SO_4 ดังนี้ 1:2, 1:3 และ 1:4

(2) คนสารผสมในแต่ละอัตราส่วน นาน 30 นาที แล้วนำไปเก็บในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 12 ชม.

(3) ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นอย่างน้อย 5 ครั้ง แล้วนำถ่านที่แช่กรดในแต่ละอัตราส่วน ไปแช่สารละลาย NaHCO_3 เข้มข้น 5%(w/v) นาน 1 คืน ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นจนหมดกรด

(4) อบถ่านในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชม.

(5) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในแต่ละอัตราส่วน ไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (ภาคผนวก ก.) เลือกถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองต่อไป

2.3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านกัมมันต์จากสาकुที่กระตุ้นด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น 50%(v/v) ในอัตราส่วน 1:3 ไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังต่อไปนี้

- (1) คุณสมบัติทางกายภาพ ศึกษาโดยนำถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามวิธีของ ASTM D1762-84
- (2) ลักษณะสัณฐานวิทยาและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังดูดซับไอออนตะกั่ว ศึกษาโดยนำถ่านกัมมันต์ไปตรวจวัดใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- (3) หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์จากสาकु ก่อนและหลังดูดซับไอออนตะกั่ว ศึกษาโดยนำถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR

3. การศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

ในการวิจัยได้นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ขนาด 500-1000 ไมครอน ไปทดสอบการดูดซับไอออนตะกั่ว ตามวิธีของ Maheswari *et al.* (2008) โดยแช่ถ่านกัมมันต์ 50 มิลลิกรัม ในสารละลายไอออนตะกั่ว เข้มข้น 100 ppm (วัด pH ได้เท่ากับ 4) ปริมาตร 50 มล. เขย่าด้วยความเร็ว 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ที่ระยะเวลา 60 นาที แล้วแยกสารละลายตะกั่วออกจากถ่านกัมมันต์ โดยการเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นำสารละลายไอออนตะกั่วที่แยกได้ ไปหาความเข้มข้นโดยใช้โคโธโซนที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry (อวัชชัย และสมบุรณ์, 2548) (ภาคผนวก ข.) และคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (5)

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพในการดูดซับ} = \frac{A}{B} \times 100 \quad \dots\dots\dots(5)$$

- เมื่อ
- A คือ ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ในสารละลาย หลังการดูดซับ (ppm)
 - B คือ ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ในสารละลาย ก่อนการดูดซับ (เท่ากับ 100 ppm)

สำหรับถ่านกัมมันต์ที่แยกได้ นำไปตรวจหาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยเทคนิค FTIR ตรวจหาธาตุที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องตรวจวัดด้วยเทคนิค Electron Microanalysis-Mapping Analysis และตรวจหาลักษณะอัญฐานของโครงสร้างพื้นผิวที่แสดงถึงธาตุที่ปรากฏในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ โดยเครื่อง Dispersive X-ray Spectrometer ควบคู่กับเครื่อง SEM เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ก่อนการดูดซับไอออนตะกั่ว

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

ในการศึกษาได้ใช้ถ่านกัมมันต์จากสาकुที่กระตุ้นด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น 50%(v/v) ในอัตราส่วน 1:3 (น้ำหนักถ่านคาร์บอน : ปริมาตรกรด) มาศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายในระบบกะ โดยใช้สารละลายสต็อก $PbCl_2$ ที่เข้มข้น 1,000 ppm โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ หลังจากนั้นได้แยกส่วนใสของสารละลายไปตรวจวัดหาปริมาณตะกั่ว โดยใช้

ไดโรว์โซน ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry (ภาคผนวก ข.) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยปิเปตสารละลายสต็อก $PbCl_2$ ที่เข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 50 มล. ลงในถ่านกัมมันต์ จำนวน 50 มิลลิกรัม ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 มล. ปรับค่า pH ตั้งแต่ 2 ถึง 10 โดยใช้สารละลายกรด HCl 6 M และ/หรือ สารละลายเบส NaOH 6 M นำขวดทั้ง 4 ขวดไปเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ที่ระยะเวลาเริ่มต้นที่ 60 นาที (Maheswari *et al.*, 2008) หลังจากนั้นนำไปแยกส่วนใส่ออกจากผงถ่านโดยการเซ็นติฟิวซ์ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที แล้วนำส่วนใสของสารละลายไปตรวจวัดปริมาณตะกั่ว โดยใช้ไดโรว์โซน ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry

4.2 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยปิเปตสารละลายสต็อก $PbCl_2$ ที่เข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 50 มล. ลงในถ่านกัมมันต์ จำนวน 50 มิลลิกรัม ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 มล. ปรับ pH เท่ากับ 6 นำขวดทั้ง 4 ขวดไปเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (Maheswari *et al.*, 2008) ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 5 ถึง 180 นาที หลังจากนั้นนำไปแยกส่วนใส่ออกจากผงถ่านโดยการเซ็นติฟิวซ์ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที แล้วนำส่วนใสของสารละลายไปตรวจวัดปริมาณตะกั่ว โดยใช้ไดโรว์โซน ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่อการดูดซับ โดยปิเปตสารละลายมาตรฐาน $PbCl_2$ ที่เข้มข้น ตั้งแต่ 10 ถึง 50 ppm จำนวน 50 มล. ลงในถ่านกัมมันต์ จำนวน 50 มิลลิกรัม ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 มล. ปรับ pH เท่ากับ 6 นำขวดทั้ง 4 ขวดไปเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (Maheswari *et al.*, 2008) นาน 90 นาที หลังจากนั้นนำไปแยกส่วนใส่ออกจากผงถ่านโดยการเซ็นติฟิวซ์ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที แล้วนำส่วนใสของสารละลายไปตรวจวัดปริมาณตะกั่ว โดยใช้ไดโรว์โซน ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry

5. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาเก

ในการศึกษาได้วิเคราะห์ต้นทุน และจุดคุ้มทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากการสาเก เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

บทที่ 4

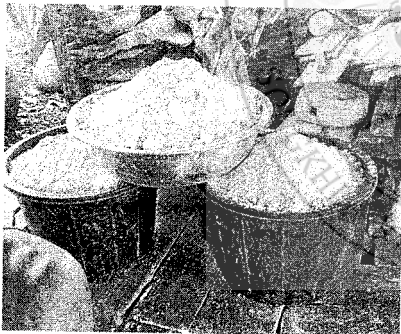
ผลและการอภิปรายผล

การสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาคุ

จากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจป่าสาคุใน อ.ควนขนุน จ.พัทลุง พบว่า ที่บ้านหัวพร ต.ควนขนุน มีป่าสาคุอยู่เป็นจำนวนมากที่ขึ้นโดยธรรมชาติ ชาวบ้านในละแวกนั้นได้ใช้ประโยชน์จากต้นสาคุโดยเฉพาะการนำต้นสาคุมาผลิตเป็นแป้งสาคุที่สามารถทำเองได้ในครัวเรือนโดยใช้ภูมิปัญญาชาวบ้านที่ส่งต่อจากรุ่นสู่รุ่น เพื่อนำมาประยุกต์เป็นอาหารได้ทั้งคาวและหวาน ชาวบ้านใน อ.ควนขนุน เรียกแป้งสาคุที่ผลิตจากต้นสาคุว่า “สาคุตัน” ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก สีน้ำตาลอ่อน คุณพิชัย ทิพย์มาก ซึ่งเป็นชาวบ้านที่อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 6 ม.7บ้านหัวพร ต.ควนขนุน อ.ควนขนุน จ.พัทลุง

จากการที่ได้ไปพูดคุย และสอบถาม เกี่ยวกับขั้นตอนการทำแป้งสาคุ พบว่า จะใช้เนื้อส่วนในของลำต้นสาคุที่แก่เต็มที (สังเกตจากต้นสาคุจะชูช่อดอกเขากวางที่บานเต็มที) มาขูดด้วยเครื่องขูด เนื้อสาคุที่ขูดแล้วมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.1 (a) หลังจากนั้นนำเนื้อสาคุที่ขูดได้มาแยกกากด้วยผ้าที่ขึงตึงบนกระด้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (b) ส่วนที่เป็นเนื้อแป้งจะตกตะกอนอยู่ก้นภาชนะ เหน้ำที่อยู่ส่วนบนออกทิ้ง นำน้ำแป้งไปคั้นจนกระทั่งได้น้ำแป้งที่แห้งหมาด แล้วจึงนำน้ำแป้งไปแผ่เพื่อตากให้แห้ง แป้งสาคุที่แห้งแล้ว มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.1 (c) ส่วนกากสาคุที่ได้หลังจากแยกน้ำแป้งออกแล้ว มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.1 (d) จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่ากากสาคุซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากต้นสาคุ มีลักษณะคล้ายกากมะพร้าว ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้

(a)



(b)



(c)



(d)



ภาพที่ 4.1 (a) เนื้อสาคุจากต้น (b) การแยกน้ำแป้งออกจากเนื้อสาคุ (c) แป้งสาคุ (d) กากสาคุ

การเตรียมถ่านกัมมันต์

ในการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาคุ มีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์กากสาคุ และการกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยสารเคมี ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ

ในขั้นตอนนี้ได้เก็บตัวอย่างกากสาคุจากบ้านหัวพุด ต.ควนขนุน อ.ควนขนุน จ.พัทลุง ที่ได้จากการผลิตแป้งสาคุ นำกากสาคุที่เหลือจากการแยกน้ำแป้งและยังคงมีความชื้นสูง (ภาพที่ 4.2 (a)) มาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายครั้ง นำไปตากแดด 1 วัน แล้ววิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ (proximate analysis) ของกากสาคุแห้ง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามวิธี ASTM D1762-84 กากสาคุที่ผ่านการอบแห้งที่ $105\pm 1^{\circ}\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.2 (b) และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้



ภาพที่ 4.2 กากสาคุ (a) ก่อนอบแห้ง (b) หลังอบแห้ง

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ ($n=3$) และงานวิจัยบางเรื่องที่ผ่านมา

การวิเคราะห์ปริมาณ กลุ่มสารโดยประมาณ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (\pm SD) ของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์		
	กากสาคุ (งานวิจัยนี้)	เปลือกทุเรียน (Chandra <i>et al.</i> , 2009)	ลูกทุกวาง (ปัญญา มณีจักร, 2555)
1. ปริมาณความชื้น	14.98 \pm 0.89	5.53 \pm 1.0	17.25
2. ปริมาณสารระเหย	55.07 \pm 0.14	69.59 \pm 1.2	59.65
3. ปริมาณเถ้า	5.56 \pm 0.05	2.52 \pm 1.5	3.46
4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว	24.39 \pm 1.05	22.36 \pm 0.8	19.64

จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ากากสาคุเป็นวัตถุดิบที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากกากสาคุมีปริมาณคาร์บอนคงตัวค่อนข้างสูง ทำให้เมื่อนำกากสาคุไปเผาเป็นถ่านในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ อาจไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากนัก ซึ่งทำให้มี

ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าจากวัสดุเหลือทิ้งจากต้น
 สาเหตุได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ปัญญา มณีจักร (2555) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง พบว่าปริมาณ
 คาร์บอนคงตัวในลูกทุกวางที่หาได้ มีค่าร้อยละ 19.64 และเมื่อใช้ความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์
 พบว่าต้องใช้อุณหภูมิในการเผา 500°C นาน 120 นาที ซึ่งสูงกว่าและนานกว่าการคาร์บอนไนซ์กากสาकुที่ใช้
 อุณหภูมิในการเผา 300°C นาน 105 นาที (ดูผลการทดลองได้จากข้อ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ)
 นอกจากนี้ Chandra *et al.* (2009) ได้นำเปลือกทุเรียนมาเตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่าเปลือกทุเรียนมี
 ปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 22.36 ทำให้ต้องใช้ความร้อนในการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 673 K
 (400°C) ซึ่งสูงกว่าการคาร์บอนไนซ์กากสาकुเช่นกัน จะเห็นได้ว่าถ้าใช้วัตถุดิบในเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มี
 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ต่ำ จะทำให้ต้องใช้พลังงานในการเตรียมถ่าน ๆ ที่สิ้นเปลืองมากกว่า ซึ่งอาจทำให้
 มีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าได้ แม้ว่าปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าของวัตถุดิบกากสาकुที่หาได้มีค่าสูง
 กว่าวัตถุดิบเปลือกทุเรียน (Chandra *et al.*, 2009) รวมทั้งวัตถุดิบกากสาकुมีปริมาณสารที่สามารถระเหย
 ได้ (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นต้น) ที่ต่ำกว่าวัตถุดิบลูกทุกวาง (ปัญญา มณีจักร, 2555)
 และเปลือกทุเรียน (Chandra *et al.*, 2009) ก็ตาม

2. การคาร์บอนไนซ์กากสาकु

การคาร์บอนไนซ์จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากใน
 ขั้นตอนนี้จะมีการเริ่มสร้างโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่
 ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจาก
 โครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊ส และน้ำมันทาร์ ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น

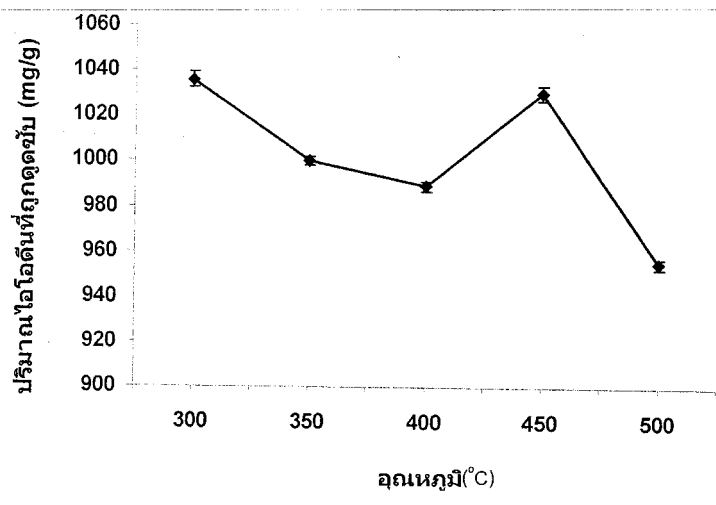
สำหรับในการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กากสาकु
 โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาในแต่ละสภาวะ นั่นคือ จะต้องมีการดูด
 ซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ มอก. 900 - 2554)
 ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสภาวะที่ถ่านสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยที่ศึกษา
 ที่สภาวะเดียวกัน รายละเอียดมีดังนี้

2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อนำกากสาकुที่ตากแห้ง 1 วัน ไปอบไล่ความชื้นด้วย
 ตู้อบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105°C นาน 2 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.2 (b)) เพื่อให้กากสาकुแห้งสนิท แล้ว
 นำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ตั้งแต่ 300-500°C นาน 1 ชั่วโมง บดถ่านให้มีขนาดเล็กกว่า 500 ไมครอน
 แล้วนำถ่านไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการทดลอง (ภาคผนวก ง.) แสดงดังภาพที่ 4.3

จากภาพที่ 4.3 พบว่าเมื่อเผากากสาकुที่อุณหภูมิ 300°C จะได้ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่โครงสร้างรูพรุน
 สามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุด (1,036 มิลลิกรัมต่อกรัม) เมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาकुที่เผา ณ
 อุณหภูมิอื่น ๆ ที่สูงกว่า จากกราฟที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ ทำให้ถ่าน
 คาร์บอนไนซ์ดูดซับไอโอดีนได้ลดลง เนื่องจากพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบกากสาकुถูกทำลายเพิ่มขึ้น
 ทำให้คาร์บอนเรียงตัวเป็นระเบียบได้น้อยลง และทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้
 ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนลดลงเนื่องจาก โครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นเพียงทางส่งผ่าน
 อนุภาคให้เข้าไปในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่าเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 300°C ในการคาร์บอนไนซ์
 ข้นกากสาकुในสภาวะต่าง ๆ ต่อไป

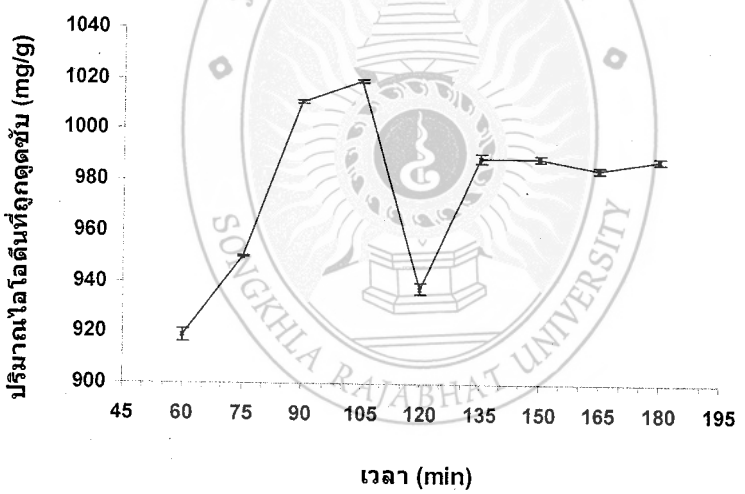
662.93

927ก



ภาพที่ 4.3 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกากสาคุที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยนำกากสาคุที่ตากแห้ง 1 วัน ไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105°C นาน 2 ชั่วโมง เพื่อให้กากสาคุแห้งสนิท แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C ในช่วงระยะเวลา 60 - 180 นาที บดถ่านให้มีขนาดเล็กกว่า 500 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการทดลอง (ภาคผนวก จ.) แสดงดังภาพที่ 4.4

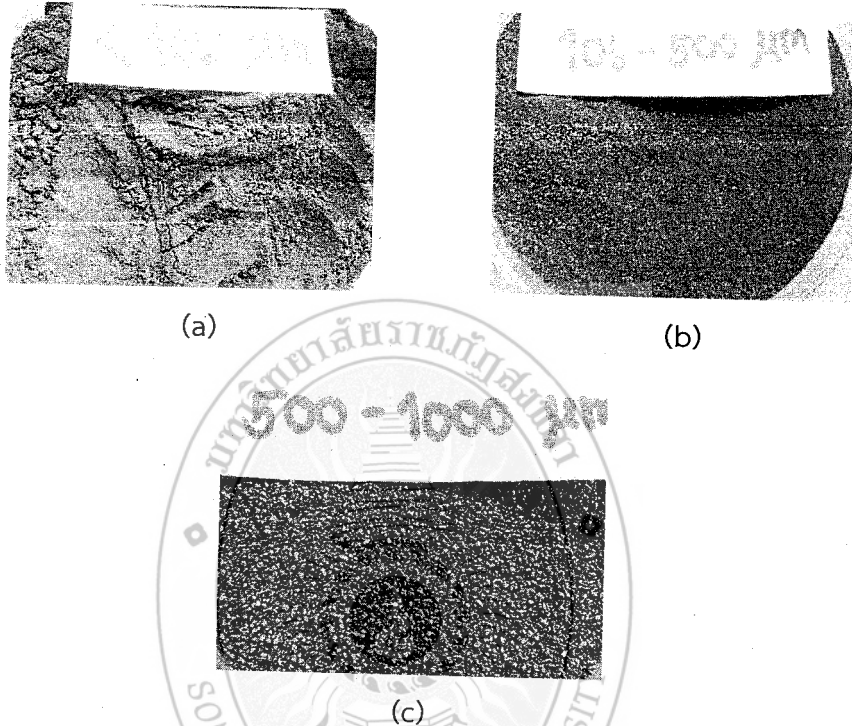


ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับเวลาในการคาร์บอนไนเซชันกากสาคุ

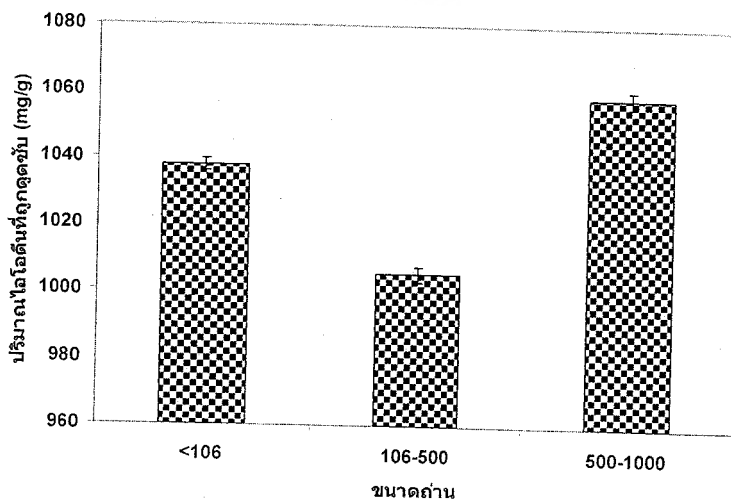
จากกราฟที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเผามากขึ้น (ตั้งแต่ 120 ถึง 180 นาที) ถ่านคาร์บอนที่ดูดซับไอโอดีนได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนบริเวณผิวของถ่านมีการจัดเรียงตัวของเป็นระนาบพื้นฐานที่ทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านมีปริมาณลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเจ็จันทน์ (2556) โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่าน ๆ และค่าดัชนีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อเผาถ่านนาน 105 นาที ที่อุณหภูมิ 300°C จะได้ถ่านคาร์บอนที่โครงสร้างรูพรุนสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุด (1,019 มิลลิกรัมต่อกรัม) เมื่อเทียบกับถ่านกากสาคุที่

เผาในระยะเวลาอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการเผา 105 นาที ในการคาร์บอนไนเซชันกาซาคูในสภาวะต่าง ๆ ต่อไป

2.3 การหาขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสม นำถ่านคาร์บอนไนซ์จากกาซาคูที่เผาที่อุณหภูมิ 300°C นาน 105 นาที มาบดให้ละเอียด แล้วคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดที่เล็กกว่า 106 ไมครอน (μm) ขนาด 106-500 ไมครอน และขนาด 500-1,000 ไมครอน ดังภาพที่ 4.5 แล้วนำถ่านไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการทดลอง (ภาคผนวก ฉ.) แสดงดังภาพที่ 4.6

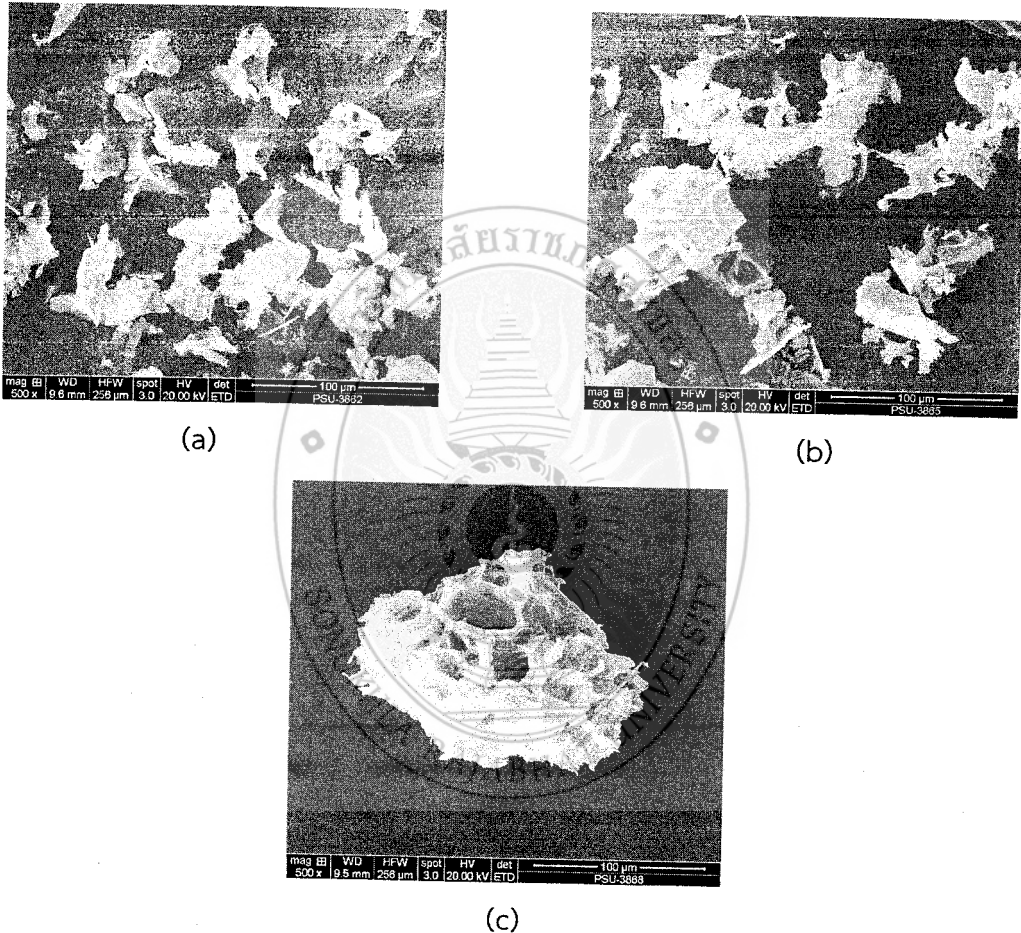


ภาพที่ 4.5 ถ่านคาร์บอนไนซ์กาซาคูขนาดต่าง ๆ: (a) <106 ไมครอน (>140 เมช), (b) 106-500 ไมครอน (140-35 เมช), (c) 500-1,000 ไมครอน (35-18 เมช) เผาที่ 300°C นาน 105 นาที



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์กาซาคู

จากภาพที่ 4.6 พบว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 500-1,000 ไมครอน สามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุด (1,059 mg/g) เมื่อเทียบกับถ่านกากสาคุขนาดต่าง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนบริเวณผิวของถ่าน ขนาด 500-1,000 ไมครอน มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีขนาดเล็ก (<500 ไมครอน) ทำให้ถ่านที่มีขนาด 500-1,000 ไมครอน มีขนาดโพรงของชั้นคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น (ภาพที่ 4.7 ที่แสดงลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาและพื้นผิวที่ถ่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า) จึงทำให้ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 500-1,000 ไมครอน มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้น และมีโอกาสที่จะทำให้ถ่านมีการกระจายตัวของรูพรุนได้มากกว่า ส่งผลให้ผิวของถ่านมีความพรุนมากกว่า และสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้น



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM 500x ของถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาคุขนาดต่าง ๆ; (a) <106 ไมครอน (>140 เมช), (b) 106-500 ไมครอน (35-140 เมช), (c) 500-1,000 ไมครอน (18-35 เมช) เผาที่ 300°C นาน 105 นาที

จากลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาและพื้นผิวถ่านคาร์บอนไนซ์ ขนาดต่าง ๆ ที่ถ่ายโดยใช้กล้อง SEM ที่แสดงจากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าชั้นคาร์บอนที่ผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีขนาด 500-1,000 ไมครอน (ภาพ 4.7 (c)) มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบกว่า ทำให้โพรงของคาร์บอนมีขนาดที่ใหญ่กว่าคาร์บอนที่ผิวถ่านฯ ขนาด 106-500 และ <106 ไมครอน ตามลำดับ (ภาพ 4.7 (a) และ (b)) ส่งผลให้คาร์บอนที่ผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ ขนาด 500-1,000 ไมครอน สามารถดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่าถ่านที่มี

ขนาดที่เล็กกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับไอโอดีนได้มากกว่า (ตามที่อธิบายข้างต้น) ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านคาร์บอนเชิงทฤษฎีที่มีขนาด 500-1,000 ไมครอน เพื่อนำไปกักกัมมันต์ทางเคมีต่อไป

3. การกักกัมมันต์ทางเคมี

การกักกัมมันต์ทางเคมี เป็นการทำให้คาร์บอนที่ผิวของถ่านมีความสามารถในการดูดซับได้ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป แล้วเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน ซึ่งจะเป็นการทำให้ถ่านมีความว่องไวในการดูดซับมากขึ้น

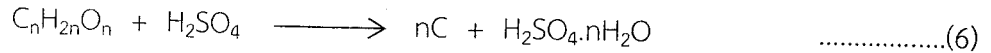
การวิจัยในครั้งนี้ได้กักกัมมันต์ทางเคมี โดยการแช่ถ่านคาร์บอนเชิงทฤษฎีในสารเคมีเพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ที่ผิวคาร์บอนของถ่าน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แช่ถ่าน คาร์บอนจะดูดซับเอาสารละลายนั้นเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนบนผิวคาร์บอนของถ่าน และสารเคมีที่เติมลงไปจะทำลายโครงสร้างของผิวคาร์บอน เมื่อนำถ่านคาร์บอนไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในทฤษฎีจะเกิดการสลายตัว และเกิดการเชื่อมไขว้กันของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้น ในขณะที่เกิดการเชื่อมไขว้กัน สารเคมีที่ใช้กระตุ้นจะหุ้มผิวถ่านอยู่รอบ ๆ และจะแทรกซึมลงไปที่ผิวคาร์บอนของถ่าน จึงทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรด จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเพื่อทำให้ถ่านเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในทฤษฎีแล้วระเหยออกไปเป็นแก๊ส และทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้สารเคมีที่ใช้กระตุ้นสามารถแทรกซึมลงไปยังผิวคาร์บอนของถ่านคาร์บอนเชิงทฤษฎี ได้อย่างทั่วถึง

สำหรับในการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดของสารเคมี และอัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากทฤษฎี รายละเอียดมีดังนี้

3.1 การศึกษาชนิดของสารเคมีที่ใช้กักกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยเลือกถ่านคาร์บอนเชิงทฤษฎีที่มีขนาด 500-1,000 ไมครอนมากระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 50% (v/v) และสารละลาย $(NH_4)_2S_2O_8$ 0.5% (w/v) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้งของถ่านต่อสารเคมีที่ใช้กระตุ้น เท่ากับ 1:1 คนสารผสมทั้ง 2 ชนิด นาน 30 นาที แล้วนำไปเก็บในตู้อบที่อุณหภูมิ $105^\circ C$ นาน 12 ชม. ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นอย่างน้อย 5 ครั้ง แล้วนำถ่านไปแช่ในสารละลาย $NaHCO_3$ เข้มข้น 5% (w/v) นาน 1 คืน ล้างถ่านด้วยน้ำกลั่นจนหมดกรด นำถ่านกัมมันต์ไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ $105^\circ C$ นาน 3 ชม. (Maheswari et al., 2008) แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการทดลอง (ภาคผนวก ข.) แสดงดังภาพที่ 4.8

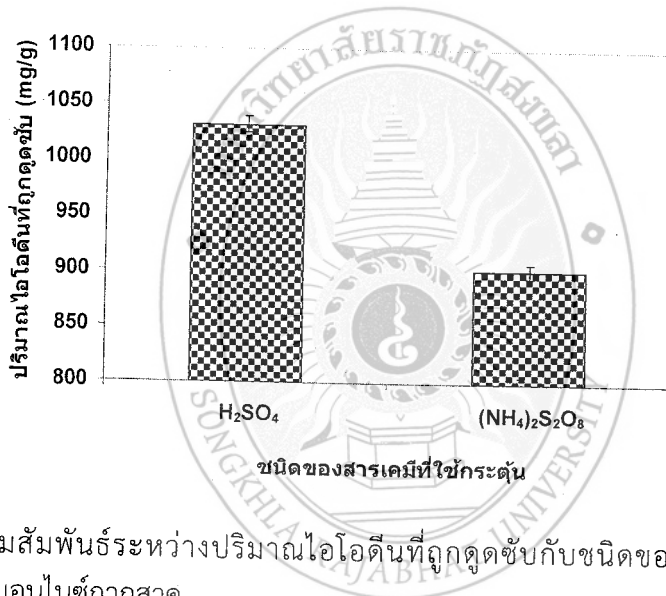
จากภาพที่ 4.8 พบว่าถ่านคาร์บอนเชิงทฤษฎีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ นาน 105 นาที ขนาด 500-1,000 ไมครอน ถูกกระตุ้นด้วยกรด H_2SO_4 แล้ว ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุด (1,032 mg/g) เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย $(NH_4)_2S_2O_8$ ในน้ำหนักที่เท่ากัน เนื่องจากผิวของถ่านสามารถดูดซับเอาหมู่ฟังก์ชันของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จากกรดซัลฟิวริกเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนบนผิวคาร์บอนของถ่านได้ดีกว่าดูดซับหมู่ฟังก์ชันของเปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$) จากแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของ SO_4^{2-} มีขนาดที่เล็กกว่าหมู่ฟังก์ชันของ $S_2O_8^{2-}$ นอกจากนี้กรด H_2SO_4 จะไปทำลายโครงสร้างของผิวถ่านที่มีสารประกอบอินทรีย์ (เช่น เซลลูโลส) ทำให้

สารอินทรีย์ในกากสาขุจะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นธาตุคาร์บอน และกำจัดน้ำออก ดังสมการที่ (6) (Oliveres-Marín *et al.*, 2012; Legrouri *et al.*, 2005)



จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ทำให้ถ่านเกิดรูพรุน และจะทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมไขว้กัน กรด H_2SO_4 สามารถเข้าไปหุ้มโพรงของรูพรุนและพื้นผิวของถ่านอยู่รอบ ๆ ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kadirvelu *et al.*, 2005) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่ากรด H_2SO_4 อาจแทรกซึมลงไปพื้นผิวคาร์บอนของถ่าน เกิดเป็นสารประกอบของ C_nSO_3H และ C_nSO_3Na ได้ เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ Kadirvelu และคณะ (2005) ได้ใช้สารละลาย $NaHCO_3$ แช่ถ่านหลังจากกระตุ้นด้วยกรด H_2SO_4 อีกครั้ง

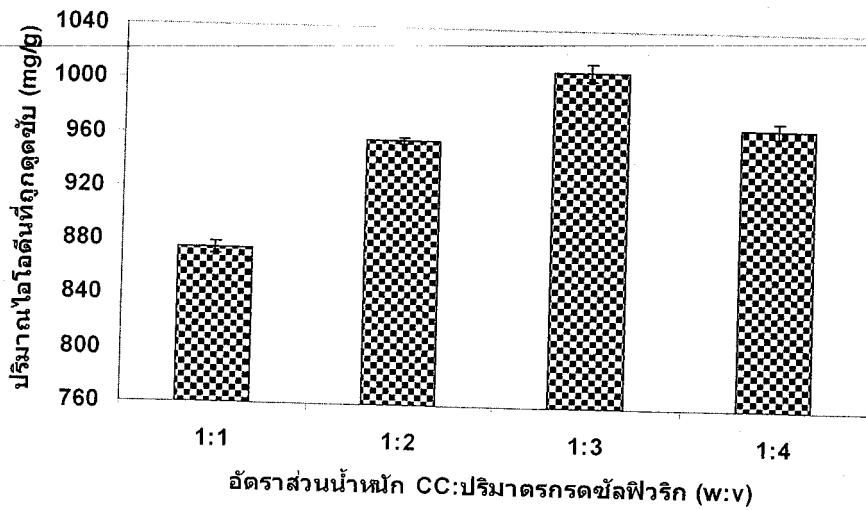
จากสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่าธาตุคาร์บอนที่เกิดขึ้นพื้นผิวของถ่าน จะทำให้โอกาสในเกิดการกระจายตัวของรูพรุนมีมากขึ้น และทำให้เกิดจำนวนรูพรุนในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกมีความจุในการดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้กรดซัลฟิวริกในการกระตุ้นเพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาขุในการศึกษาสภาวะอื่นต่อไป



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับกับชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาขุ

3.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านคาร์บอนไนซ์และสารก่อกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยเลือกถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกซึ่งสามารถดูดซับไอโอดีนได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.1) มาศึกษาอัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำหนักแห้งของถ่านและกรดซัลฟิวริก ในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1 แล้วนำถ่านไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ผลการทดลอง (ภาคผนวก ข.) แสดงดังภาพที่ 4.9

จากภาพที่ 4.9 พบว่าเมื่อนำถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาขุที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ นาน 105 นาที ขนาด 500-1,000 ไมครอน ไปกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนโดยมวล 1:3 ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุด (1,009 mg/g) เมื่อเทียบกับการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนโดยมวลอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนโดยมวล เท่ากับ 1:3 เพื่อนำไปใช้การศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายต่อไป



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ถูกดูดซับกับอัตราส่วนโดยมวลของถ่านคาร์บอนกับปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เข้มข้น 50%

จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยมวลของถ่านคาร์บอนกับปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านคาร์บอนที่อัตราส่วนโดยมวล 1:4 มีค่าต่ำกว่า 1:3 อธิบายได้ว่า ความเป็นไปได้ที่ H_2SO_4 จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสในขั้นตอนการก่อกัมมันต์ แล้วทำให้พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Karagöz และคณะ (2008) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกในการจุ่มซุบ (impregnation) วัสดุชีวมวล แล้วทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กลง

4. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านคาร์บอน และถ่านกัมมันต์

ถ่านคาร์บอน และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามวิธี ASTM D1762-84 ผลการศึกษาแสดงในตาราง ที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณของของถ่านคาร์บอน และ ถ่านกัมมันต์ เมื่อเทียบกับวัตถุดิบภาคสาขาก่อนเผา (n=3)

ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (\pm SD) ของถ่าน		
	วัตถุดิบภาค	ถ่านคาร์บอน	ถ่านกัมมันต์
1. ปริมาณความชื้น	14.98 \pm 0.89	7.26 \pm 0.44	5.12 \pm 0.13
2. ปริมาณสารระเหย	55.07 \pm 0.14	15.79 \pm 1.91	15.72 \pm 0.39
3. ปริมาณเถ้า	5.56 \pm 0.05	5.92 \pm 0.24	4.44 \pm 0.14
4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว	24.39 \pm 1.05	71.03 \pm 5.13	74.72 \pm 1.03

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านคาร์บอนและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากภาคสาขามีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณสารระเหยและปริมาณความชื้นมีค่าลดลง เนื่องจากในระหว่างการคาร์บอน สารระเหยต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจาก

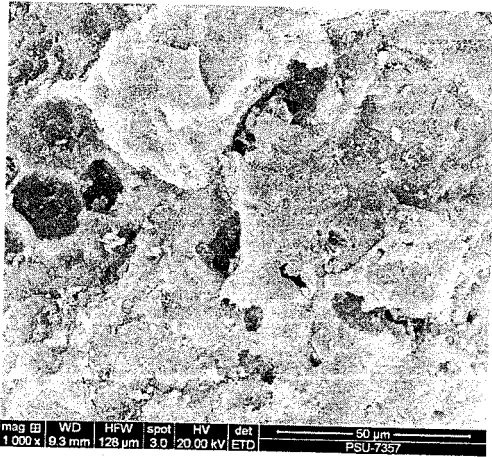
โครงสร้างของกากสาคุในรูปของแก๊ส และน้ำมันทาร์ เมื่อเผาถ่านต่อไปสารอินทรีย์ที่มีหมู่แอลกอฮอล์ (ปัญญา มณีจักร, 2555) ที่ยังคงเหลืออยู่ เกิดการสลายตัว ทำให้โครงสร้างของถ่านเกิดการเชื่อมไขว้กันจนเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวเหล่านี้ ไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมไขว้กันนี้ ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น และปริมาณสารระเหยและปริมาณความชื้นมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบกากสาคุก่อนนำไปเผา

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสาคุโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกกับวัตถุดิบอื่น ๆ ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกเช่นกัน (ตาราง 4.3) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ มีคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูงกว่าวัตถุดิบอื่น ๆ ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มโอกาสให้รูพรุนมีการกระจายตัวได้มาก ทำให้เกิดจำนวนรูพรุนได้มากขึ้น และน่าจะทำให้หมู่ HSO_3^- เกาะอยู่ที่ผิวถ่านและแทรกซึมลงไปที่ผิวคาร์บอนของถ่านได้ดีขึ้น

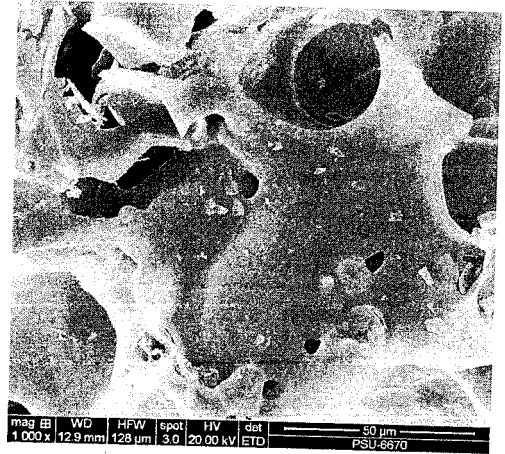
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่เตรียมจากวัตถุดิบต่าง ๆ

วัตถุดิบที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์	ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว
กากสาคุ (งานวิจัยนี้)	74.72
เมล็ดเซอร์รี (Oliveres-Marín <i>et al.</i> , 2012)	48.67
กากสาคุ (Maheswari <i>et al.</i> , 2008; Kadirvelu <i>et al.</i> , 2005)	65.0
สารซีวมวล (Karagöz <i>et al.</i> , 2008)	69.03

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างอณูฐานวิทยาและพื้นผิวเทียบกับถ่านคาร์บอนในกากสาคุที่เตรียม โดยถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า ผลจากการถ่ายภาพ (ภาพที่ 4.10) พบว่า กรด H_2SO_4 ที่ใช้เป็นสารก่อกัมมันต์ สามารถทำให้สภาพพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนของถ่านคาร์บอนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างมาก นั่นคือ สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะที่เรียกว่า มีจำนวนรูพรุนที่มากกว่าและมีโครงสร้างรูพรุนที่ขนาดใหญ่กว่าถ่านคาร์บอนใน เนื่องจากโปรตอนจากสารละลายกรด สามารถทำให้โพรงของรูพรุนเปิดออกได้มากขึ้น (Nadeem *et al.*, 2006) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nadeem และคณะ (2006) ที่ใช้กรด H_2SO_4 เป็นสารก่อกัมมันต์ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากฝักมะรุม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสาคุมีจำนวนอนุภาคขนาดเล็กที่ปนอยู่ทั้งบริเวณผิวและในรูพรุนที่น้อยกว่าถ่านคาร์บอน



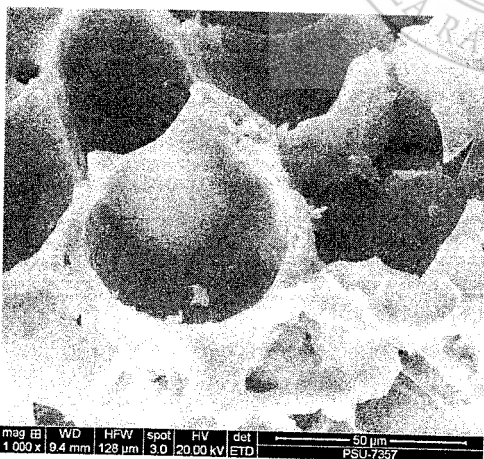
(a)



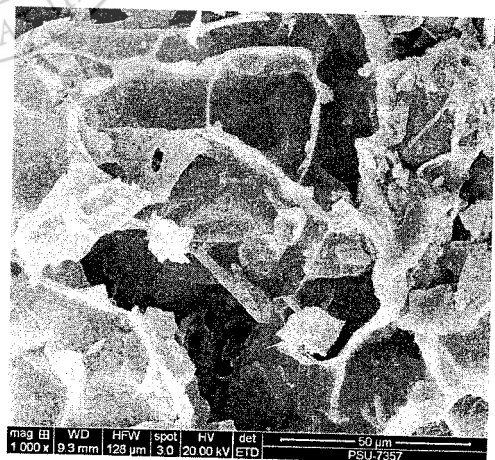
(b)

ภาพที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM 1,000x ของถ่านที่เตรียมได้จากกากสา쿠 ขนาด 500-1,000 ไมครอน
(a) ถ่านคาร์บอนไนซ์ ; (b) ถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Activated carbon FILTRA SORB100; AC FILTRA SORB100) ผลจากการถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าสภาพพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากกากสาคุที่เตรียมได้และโพรงของรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า และมีการกระจายของรูพรุนที่สม่ำเสมอกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า นอกจากนี้โครงสร้างของรูพรุนที่พบจากพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากกากสาคุที่เตรียมได้ มีลักษณะคล้ายกับคาปิลลารี (capillary like) ในขณะที่โครงสร้างของรูพรุนที่พบจากพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทางการค้า มีลักษณะที่ไม่เป็นรูป และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 4.11



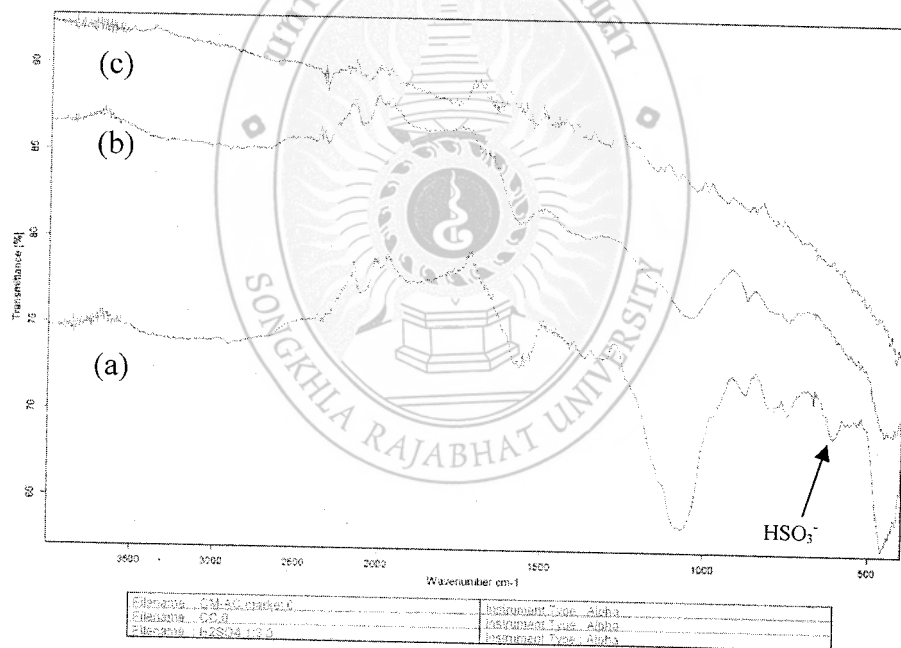
(a)



(b)

ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM 1,000x ของถ่านกัมมันต์ขนาด 500-1,000 ไมครอน (a) ถ่านกัมมันต์จากกากสาคุที่เตรียมได้ และ (b) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

นอกจากนี้ได้นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของถ่าน เทียบกับถ่านคาร์บอนไนซ์จากกากสาकुและถ่านกัมมันต์ทางการค้า ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.12 จากสเปกตรัม FTIR (ภาพที่ 4.12) ของถ่านกัมมันต์ (เส้น a) และถ่านคาร์บอนไนซ์ (เส้น b) ที่เตรียมได้จากกากสาकु พบว่าพันธะของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในสารประกอบอินทรีย์ของถ่านทั้งสองชนิดปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกัน เช่น พันธะ C=C (เลขคลื่น 1,695 และ 1574 cm^{-1} ตามลำดับ) ของโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล พันธะ C-OH ของการสั่นแบบยืดหดในอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ (เลขคลื่น 1,081 และ 1052 cm^{-1} ตามลำดับ) และพันธะ C-H ของการสั่นในอนุพันธ์ของเบนซีน (เลขคลื่น 877 และ 800 cm^{-1} ตามลำดับ) เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าทั้งถ่านกัมมันต์และถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้จากกากสาकु มีพันธะต่าง ๆ ของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่คล้ายคลึงกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา เปลื้อง และมวงคล (2557) ได้รายงานส่วนประกอบทางเคมีของกากสาकुเป็นร้อยละ เช่น มีลิกโนเซลลูโลส เท่ากับ 14.98 มีลิกนิน เท่ากับ 2.59 มีเฮมิเซลลูโลส เท่ากับ 12.39 และมีเซลลูโลส เท่ากับ 5.03 จะเห็นว่าพันธะต่าง ๆ ของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารอินทรีย์ที่พบจากถ่านกัมมันต์และถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้จากกากสาकु มีความสอดคล้องกับสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีของกากสาकुในงานวิจัยดังกล่าว (เปลื้อง และมวงคล, 2557)



ภาพที่ 4.12 IR Spectrum ของ (a) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (b) ถ่านคาร์บอนไนซ์ และ (c) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

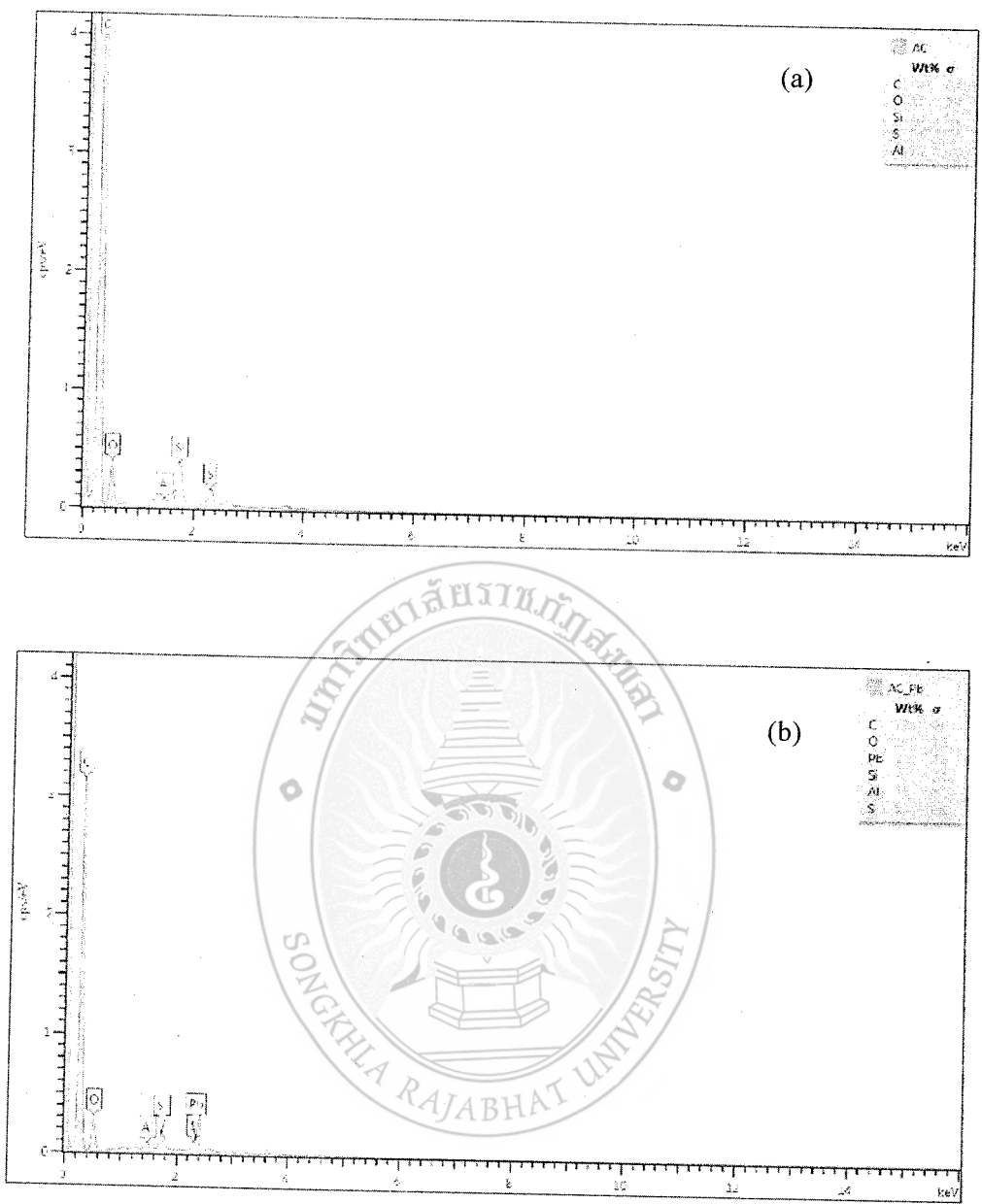
อย่างไรก็ตามได้สังเกตเห็นความแตกต่างของสเปกตรัมของถ่านทั้งสองแบบ นั่นคือ สเปกตรัม FTIR ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบหมู่ฟังก์ชัน HSO_3^- บนผิวของถ่าน ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 576 cm^{-1} ในขณะที่ถ่านคาร์บอนไนซ์จากกากสาकु (เส้น b) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า (เส้น c) ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของ HSO_3^- ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน (หรือใกล้เคียง) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,081 cm^{-1} ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ มีความเข้มของแบนด์มากกว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่น

$1,052\text{ cm}^{-1}$ ของถ่านคาร์บอนไอโซไซยานูรอน เนื่องจากที่ตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จะมีทั้งพันธะ C-O (เลขคลื่น $1,052\text{ cm}^{-1}$) และพันธะ S=O (เลขคลื่น $1,081\text{ cm}^{-1}$) ของหมู่ฟังก์ชัน HSO_3^- ในขณะที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1,052\text{ cm}^{-1}$ ของถ่านคาร์บอนไอโซไซยานูรอน มีเพียงพันธะ C-O ของการสั่นแบบยืดหดเพียงอย่างเดียว จากผลการศึกษา FTIR ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่าสอดคล้องกับผล FTIR จากงานวิจัยของ Olivares-Marín และคณะ (2012) และ Inbaraj และ Sulochana (2006) ที่ใช้กรด H_2SO_4 เป็นสารก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไอโซไซยานูรอนจากเมล็ดเชอร์รี่ และเปลือกลูกทุกวาง ตามลำดับ

5. การศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

จากลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าในขั้นตอนของการกระตุ้นถ่านด้วยกรด H_2SO_4 จะทำให้กรด H_2SO_4 สามารถเข้าไปหุ้มโพรงของรูพรุนและพื้นผิวของถ่านอยู่รอบ ๆ ได้ ทำให้ผิวถ่านแสดงประจุเป็นลบของ HSO_3^- จึงทำให้ถ่านกัมมันต์นี้น่าจะดูดซับไอออนของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ได้ดีกว่าถ่านคาร์บอน และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปทดสอบการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย ผลการดูดซับพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสาकुโดยการกระตุ้นด้วย H_2SO_4 ในอัตราส่วน 1:3 สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้สูง โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 97.46 ผลการดูดซับ Pb^{2+} ในสารละลายได้ถูกพิสูจน์ โดยนำถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการดูดซับ Pb^{2+} ไปตรวจวัดด้วยเทคนิค Electron Microanalysis-Mapping Analysis เพื่อตรวจหาธาตุที่ปรากฏบนผิวถ่านถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ก่อนและหลังการดูดซับ ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.13

จากภาพที่ 4.13 (b) จะเห็นได้ว่าพบธาตุ Pb ปรากฏที่ผิวของถ่านกัมมันต์หลังจากการดูดซับในตำแหน่งที่ซ้อนทับกับตำแหน่งของธาตุ S (ปรากฏที่ระดับพลังงาน 2.4 keV ดังภาพที่ 4.13 (a)) แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากกากสาकुที่มีหมู่ HSO_3^- เกาะที่ผิวสามารถจับกับไอออน Pb^{2+} ได้ จากผลการตรวจหาลักษณะอัญฐานของโครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการดูดซับควบคู่กับเครื่อง Dispersive X-ray Spectrometer ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับชั้นพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และซิลิกอน (Si) จะเห็นว่าธาตุเหล่านี้ปรากฏอยู่ในระดับชั้นพลังงานเดียวกัน คือ ชั้น K (เป็นชั้นที่มีระดับพลังงานที่ไม่สูง) แต่เมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปดูดซับไอออนตะกั่ว จะพบธาตุ Pb ในระดับชั้นพลังงาน M (ชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนวงนอกหลุดออก) ดังนั้นจึงพบธาตุ Pb ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีพลังงานที่สูงกว่าธาตุ C, O, Si ดังแสดงดังภาพที่ 4.14

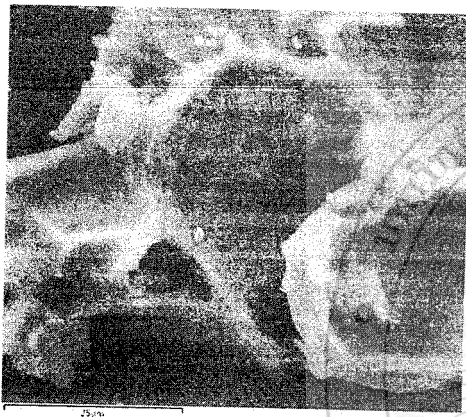
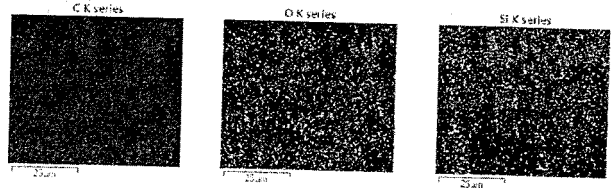


ภาพที่ 4.13 Electron Microanalysis-Mapping Analysis ที่แสดงธาตุต่าง ๆ ที่ปรากฏบนผิวถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เมื่อนำไปดูดซับ Pb^{2+} ในสารละลาย (a) ก่อนดูดซับ (b) หลังดูดซับ



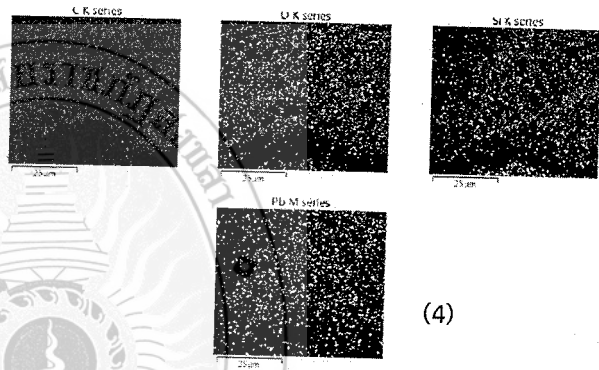
(a)

(1) (2) (3)



(b)

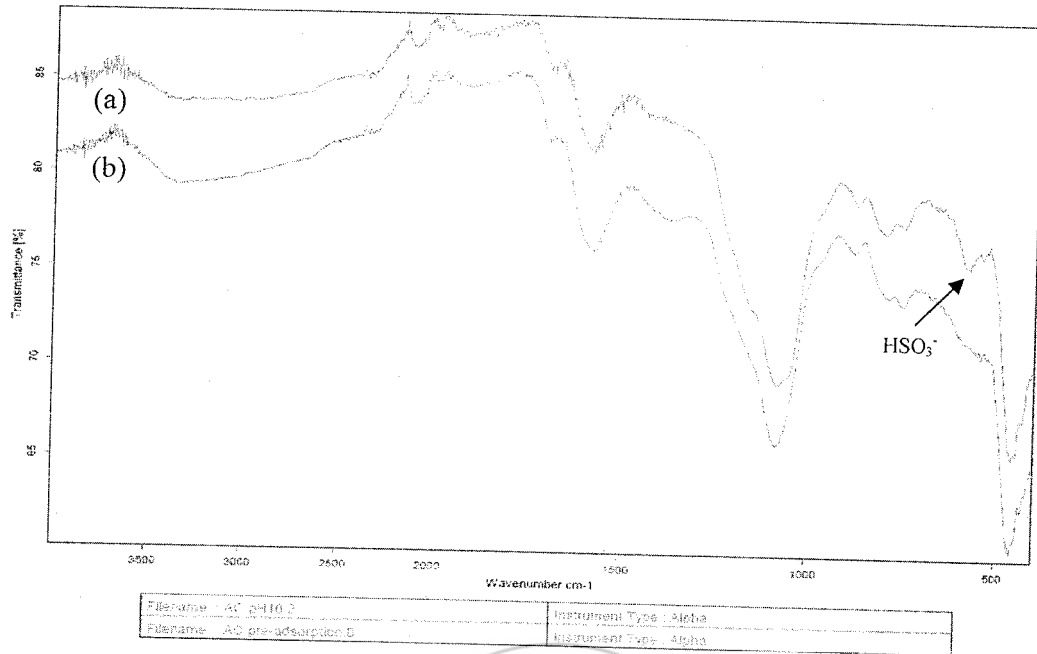
(1) (2) (3)



(4)

ภาพที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยเครื่อง SEM (1,000x) ที่แสดงถึงธาตุที่ปรากฏในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ โดยเครื่อง Dispersive X-ray Spectrometer เมื่อนำไปดูดซับ Pb^{2+} ในสารละลาย (a) ก่อนดูดซับ (b) หลังดูดซับ

จากผลดังกล่าวจึงได้นำถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังดูดซับไอออนตะกั่วไปตรวจหาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้หลังการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย จะไม่ปรากฏสเปกตรัมของในตำแหน่งเลขคลื่น 576 cm^{-1} (เส้น b) แสดงว่าไอออน Pb^{2+} ในสารละลาย จะถูกหมู่ HSO_3^- ที่ผิวถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้เกิดเป็นสารประกอบโคออดิเนตโควาเลนต์ที่แข็งแรง และมีความยาวพันธะที่สมดุล จึงทำให้ไม่ปรากฏสเปกตรัมของการสั่นของหมู่ HSO_3^- ในย่านความถี่เดิม ในขณะที่สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ก่อนการดูดซับ ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน HSO_3^- ในตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าว (เส้น a)



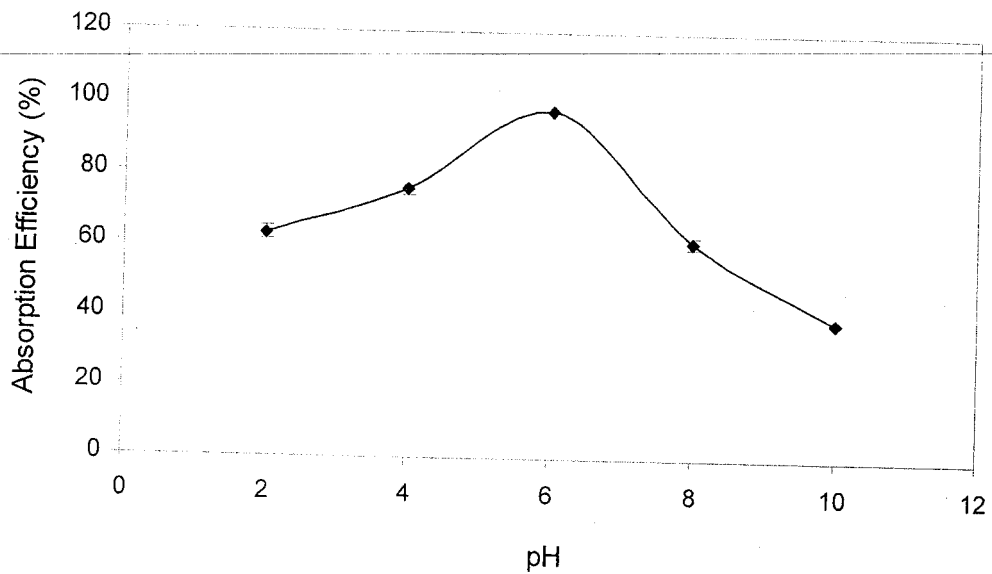
ภาพที่ 4.15 FTIR สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสา쿠 ก่อนและหลังการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 100 ppm: (a) ก่อนการดูดซับ และ (b) หลังการดูดซับ

6. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว ทำได้โดยตรวจวัดปริมาณตะกั่วในสารละลายที่แยกออกจากถ่านกัมมันต์แล้วนำไปตรวจวัดหาปริมาณโดยใช้ไตโธซอน ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Spectrophotometry (ตามขั้นตอนในภาคผนวก ข.) โดยหาความเข้มข้นของตะกั่วจากกราฟมาตรฐาน (ที่แสดงในภาคผนวก ค.) ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว และผลของความเข้มข้นของไอออนตะกั่วต่อการดูดซับ รายละเอียดมีดังนี้

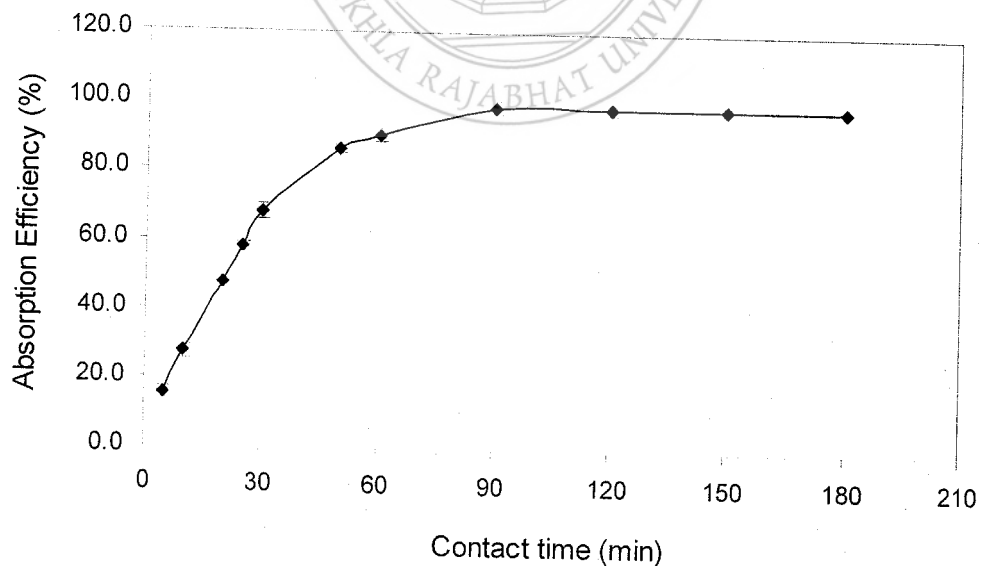
6.1 ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

เนื่องจาก pH ของสารละลาย มีความสำคัญต่อการดูดซับไอออนของโลหะต่าง ๆ นั่นคือ โลหะต่างชนิดกันจะถูกดูดซับที่ pH ต่างกัน นอกจากนี้การดูดซับไอออนของโลหะยังขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านกัมมันต์อีกด้วย (Wahi *et al.*, 2010) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว เข้มข้น 1000 ppm ที่ pH 2 - 10 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากสาคุ ขนาด 500-1000 ไมครอน ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นตั้งแต่ pH 2 จนถึง pH 6 ซึ่งทำให้พบค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูงสุดร้อยละ 97.9 หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึง pH 10 เนื่องจากที่ pH มากกว่า 6 ไอออนของตะกั่วถูกไฮโดรไลซ์ และเมื่อสารละลายมี pH มากกว่า 7 ไอออน Pb^{2+} ตกตะกอนกับ OH^- เกิดตะกอน $Pb(OH)_2$ (Issabayeva *et al.*, 2006; Nadeem *et al.*, 2006) ทำให้ปริมาณของไอออนตะกั่วในสารละลายมีจำนวนลดลง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จึงดูดซับไอออนตะกั่วได้น้อยลง



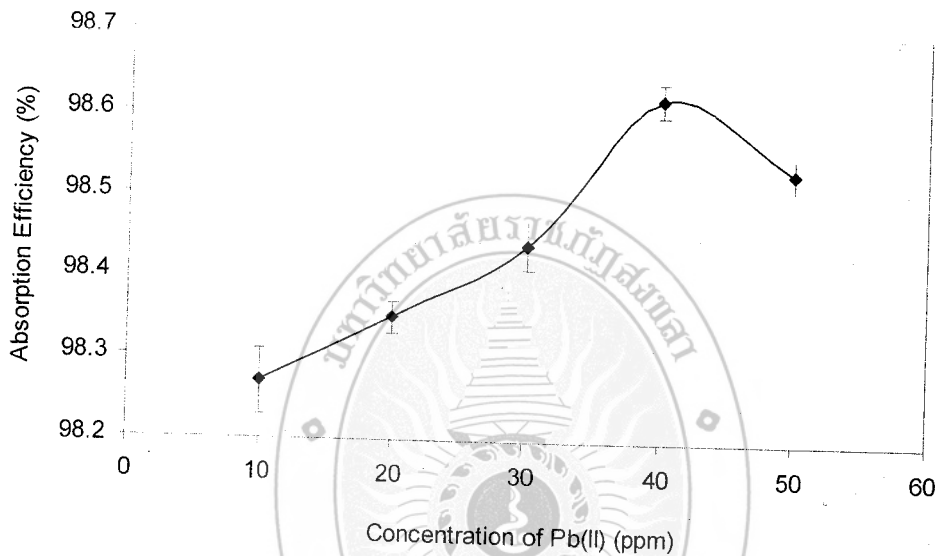
ภาพที่ 4.16 ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 1000 ppm

6.2 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว จากการศึกษาผลของระยะเวลาที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จำนวน 50 มิลลิกรัม แขนในสารละลาย $PbCl_2$ ที่เข้มข้น 1,000 ppm จำนวน 50 มิลลิลิตร ปรับ pH ของสารละลายเท่ากับ 6 แล้วเขย่าด้วยความเร็ว 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 ถึง 180 นาที พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจะเริ่มคงที่เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล เช่นเดียวกับงานวิจัยของ อรดี และ ศศิธร (2557), Maheswari *et al.*, (2008), Nadeem *et al.*, (2006) จากการทดลองพบว่า การดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกากสาเกเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 90 นาที ดังภาพที่ 4.17 โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่วเท่ากับร้อยละ 98.5



ภาพที่ 4.17 ผลของระยะเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายที่เข้มข้น 1000 ppm

6.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่อการดูดซับ โดยปกติการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะแสดงถึงความจุในการดูดซับสารที่สนใจ ซึ่งความจุในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น (Karagöz *et al.*, 2008) นั่นคือ ถ้าเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้สารที่สนใจถูกดูดซับได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงขับในการดูดซับที่มีมากกว่าผลของการต้านทานการขนถ่ายมวลของสารที่สนใจระหว่างวัฏภาคที่เป็นของเหลว (สารละลายของสารที่สนใจ) กับวัฏภาคที่เป็นของแข็งที่เป็นถ่านกัมมันต์ (Karagöz *et al.*, 2008) จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับปริมาณตะกั่วได้สูงสุดที่ความเข้มข้น 40 ppm ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 98.62 และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 50 ppm ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากถ่านกัมมันต์เกิดการอิ่มตัวในการดูดซับ ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ผลของความเข้มข้นของไอออนตะกั่วต่อการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

7. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาकु

ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาकुได้วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ผลการวิเคราะห์แสดงดังในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การประมาณการราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับ 1 กิโลกรัม

รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวนที่ใช้	ราคารวม (บาท)
กากสา쿠	1 บาท/ กิโลกรัม	10 กิโลกรัม	10
ค่าแรง	300 บาท/คน/วัน	3 วัน (1 คน)	900
H ₂ SO ₄ (AR เกรด)	77 บาท/ลิตร	1.5 ลิตร	116
NaHCO ₃ (AR เกรด)	696 บาท/กิโลกรัม	300 กรัม	209
น้ำ	0.02 บาท/กิโลกรัม	500 กิโลกรัม	10
ไฟฟ้า	4 บาท/กิโลวัตต์	100 กิโลวัตต์	400
ค่าขนส่ง	100 / เหม่าจ่าย	10 กิโลกรัม	100
ราคารวม			1,745
ราคาถ่านกัมมันต์ (Fluka 05120)	1 กิโลกรัม		2,800

จากตารางจะเห็นได้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาคุเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้ายี่ห้อ Fluka ซึ่งมีเป็นสินค้าที่มีลักษณะการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน ด้านต้นทุนการผลิตจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากกากสาคุมีต้นทุนการผลิตที่สามารถแข่งขันทางการตลาดได้ หากคำนึงถึงการแข่งขันเชิงพาณิชย์ของผู้ประกอบการการผลิตถ่านกัมมันต์ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นเพื่อจำหน่ายจะทำให้เกิดการประหยัดจากขนาด (Economies of scale) นั้นแสดงให้เห็นถึงต้นทุนการผลิตที่ลดลงบ่งชี้ถึงโอกาสในการลงทุนและการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการนำกากสาकुซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาเพิ่มมูลค่าโดยการเตรียมเป็น ถ่านกัมมันต์ที่ก่อกัมมันต์ทางเคมีโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ทำให้ถ่านกัมมันต์จากสาकुที่เตรียมได้ มีโครงสร้างของรูพรุนขนาดใหญ่ สม่ำเสมอ และมีสภาพพื้นผิวที่เรียกว่าถ่านกัมมันต์การค้า นอกจากนี้ยังทำให้ผิวถ่านกัมมันต์จากสาकुมีหมู่ซัลเฟต จึงทำให้สามารถนำถ่านกัมมันต์จากสาकुไปใช้ ประโยชน์ในการดูดซับไอออนของตะกั่วในสารละลายได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 97.46 นอกจากนี้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากสาकुมีต้นทุนที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า ถ้าการผลิตถ่านกัมมันต์จากสาकुในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้สามารถประหยัดขนาดของการผลิตลงได้ ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้



ผลผลิต

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับชาติ HERP CONGRESS V

การประชุมใหญ่โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา ครั้งที่ 5 The Fifth Higher Education Research Promotion Congress (HERP CONGRESS V) โดยความร่วมมือของมหาวิทยาลัย 70 แห่ง “รากฐานภูมิปัญญาไทยนวัตกรรมวิจัยสู่สากล” วันที่ 2-4 มีนาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานีจังหวัดอุดรธานี

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธูโดยการก่อกัมมันต์ทางเคมี

จารุวรรณ คำแก้ว¹, นรรัตน์ ทองศรีนุ่น¹ และ ประสิทธิ์ รุ่งเรือง²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ²คณะวิทยาการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธูที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีที่มีการเตรียม 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคาร์บอนไนซ์กากสาธู และการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้ ในการคาร์บอนไนซ์กากสาธูได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการคาร์บอนไนซ์ ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลา และการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไนซ์ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการก่อกัมมันต์ทางเคมี ได้แก่ ขนาดของถ่านคาร์บอนไนซ์ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์ และอัตราส่วนระหว่างถ่านคาร์บอนไนซ์ต่อสารก่อกัมมันต์ โดยควบคุมสภาวะการกระตุ้นด้วยการคนสารผสมเป็นเวลา 30 นาที เก็บที่อุณหภูมิ 105°C นาน 12 ชม. แห้งด้วยสารละลาย NaHCO₃ 5% (w/v) นาน 1 คืน ล้างจนหมดกรด แล้วนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชม. ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กากสาธู เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 105 นาที ทำให้ได้ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1,019 mg/g และสภาวะที่เหมาะสมในการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้เมื่อใช้ถ่านคาร์บอนไนซ์ขนาด 500-1,000 µm กระตุ้นด้วยสารละลายกรด H₂SO₄ 50% (w/w) ในอัตราส่วน 1:3 (ถ่านคาร์บอนไนซ์ : สารละลายกรด H₂SO₄ 50% (w/w)) ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1,009 mg/g ถ่านกัมมันต์กากสาธูที่เตรียมได้ถูกนำไปตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง FT-IR และลักษณะโครงสร้างอสังฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์การค้า ผลการตรวจพบว่าถ่านกัมมันต์กากสาธูมีหมู่ซัลเฟตอยู่ที่ผิว ในขณะที่ไม่พบหมู่ซัลเฟตที่ผิวถ่าน กัมมันต์การค้าและถ่านคาร์บอนไนซ์กากสาธู นอกจากนี้ยังตรวจพบอีกว่า ถ่านกัมมันต์กากสาธูมีจำนวนรูพรุนที่มากกว่า มีโครงสร้างของรูพรุนขนาดใหญ่และสม่ำเสมอกว่า และมีสภาพพื้นผิวที่เรียกว่าถ่านกัมมันต์การค้า ได้นำถ่านกัมมันต์กากสาธูที่เตรียมไปดูดซับสารละลายตะกั่ว พบว่าปริมาณตะกั่วลดลง และไม่พบหมู่ซัลเฟตที่ผิวถ่านกัมมันต์กากสาธูที่เตรียมเมื่อนำไปตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง FT-IR

คำสำคัญ: การก่อกัมมันต์ทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริก, ถ่านกัมมันต์กากสาธู, การดูดซับตะกั่ว



การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธูโดยการก่อกัมมันต์ทางเคมี

จารุวรรณ คำแก้ว¹, นรารัตน์ ทองศรีนุ่น¹ และ ประสิทธิ์ รุ่งเรือง²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ²คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
อีเมล : csuitcharit@gmail.com

ความเป็ยบท

การนำถ่านกัมมันต์มาดูดซับไอออนของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ทำได้ง่าย และสะดวก เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (~600-2,000 ตร.ม./ก.) ภายในมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และมีหลายขนาด (20-20,000 อังสตรอม) นอกจากนี้ ยังมีรูปร่างที่ซับซ้อนพื้นผิว จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านกัมมันต์มีข้อจำกัดในการดูดซับที่ไม่ครอบคลุมกับโลหะหนักทุกชนิด เนื่องจากการดูดซับให้ประสิทธิภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสม ได้แก่ pH อุณหภูมิ ความเข้มข้น และชนิดของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น รวมทั้งถ่านกัมมันต์มีราคาแพง ปัจจุบันมีการวิจัยศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งหลายชนิดที่ราคาถูก ส่วนใหญ่มักใช้วัสดุเหลือทิ้งเป็นวัตถุดิบของทางการเกษตร ดังนั้น ในโครงการวิจัยที่จึงสนใจที่จะเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธูโดยการก่อกัมมันต์ทางเคมี เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับตะกั่ว (Pb²⁺) และปรอทปนเปื้อนทางการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาธู เพื่อวิเคราะห์โอกาสความเป็นไปได้ในการแข่งขันทางธุรกิจเชิงพาณิชย์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธูที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี
2. เพื่อตรวจหาคุณลักษณะเฉพาะ และโครงสร้างสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ และการนำไปใช้ประโยชน์ โดยการดูดซับสารละลายตะกั่ว
3. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากสาธู เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

วิธีการโดยสรุป

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธู

- สกัดและเก็บตัวอย่างกากสาธูจากแหล่งผลิต แป้งสาธู อควาซน จ.พัทลุง
- ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการคาร์บอนไอซ์จากสาธู ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลา

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไอซ์จากสาธู

- ขนาดของถ่านคาร์บอนไอซ์
- ชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์
- อัตราส่วนและช่วงค่าคาร์บอนไอซ์ต่อสารก่อกัมมันต์

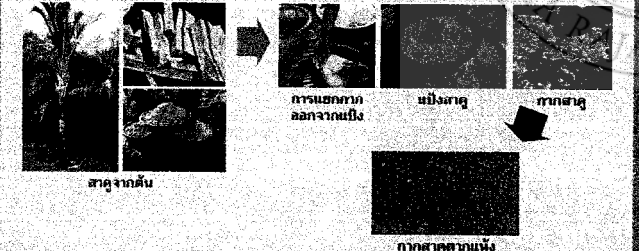
ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากกากสาธูที่เตรียมได้

- ด้วยเครื่อง FT-IR และ ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

โดยควบคุมสภาวะการกระตุ้นด้วยการคนสารผสม นาน 30 นาที เก็บที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง แซ่ด้วย NaHCO₃ 5% นาน 1 คืน ถึงจนหมดกรด แล้วอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง

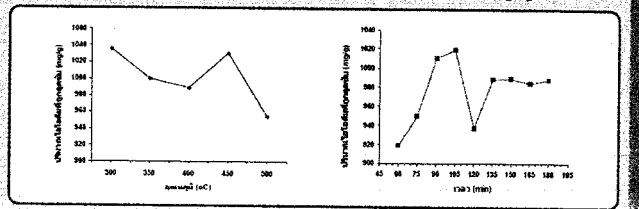
ผลการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุดูดซับและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากสาธูตามวิธีของ ASTM



คุณสมบัติทางกายภาพของกากสาธู	ร้อยละ SD
1. ปริมาณความชื้น (อบที่ 103 °C นาน 16 ชม.)	11.98 ± 0.89
2. ปริมาณสารรวม (เผาที่ 900 °C นาน 7 นาที)	85.97 ± 0.14
3. ปริมาณเถ้า (เผาที่ 250 °C นาน 30 นาที แล้วเผาต่อที่ 600 °C นาน 3 ชม.)	4.33 ± 0.09
4. ปริมาณคาร์บอนไอซ์	-

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการคาร์บอนไอซ์ในเข่งนากสาธู ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการคาร์บอนไอซ์ต่อปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ

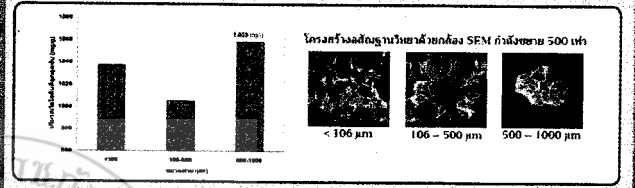


กิตติกรรมประกาศ

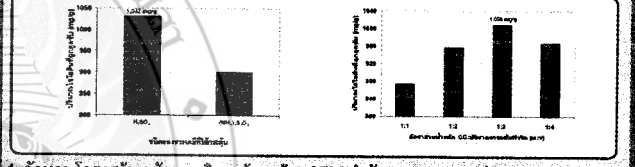
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ผลการวิจัย

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการก่อกัมมันต์ถ่านคาร์บอนไอซ์ในเข่งนากสาธู ผลของขนาดถ่านคาร์บอนไอซ์ต่อปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ



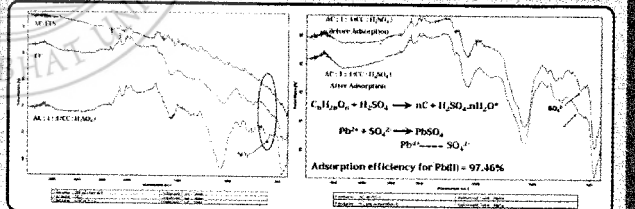
ผลของชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อกัมมันต์ และ อัตราส่วนระหว่างถ่านคาร์บอนไอซ์ต่อสารก่อกัมมันต์ที่มีต่อปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ



4. ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า



5. คุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง FT-IR (Alpha, Bruker, Germany)



6. การประมาณการราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับ 1 กิโลกรัม

รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวนที่ใช้	ราคารวม (บาท)
กากสาธู	-	10 กก.	-
H ₂ SO ₄ (AR ทรด)	77 บาท/ลิตร	1.5 ลิตร	231
NaHCO ₃ (AR ทรด)	696 บาท/กิโลกรัม	300 กรัม	209
น้ำ	0.02 บาท/กิโลกรัม	500 กิโลกรัม	10
ไฟฟ้า	4 บาท/กิโลวัตต์	100 กิโลวัตต์	400
ราคารวม	-	-	850
ราคาถ่านกัมมันต์ (Fluka 05120)	1 กิโลกรัม	-	2,800

สรุปผลการวิจัย

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากสาธู ขนาด 500-1,000 ไมครอน (18-35 เมช) โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรด H₂SO₄ ในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ใ้ค่าไอโอดีนแบบเบรท์ เท่ากับ 1,009 mg/g สามารถนำไปใช้กำจัด Pb²⁺ ในน้ำได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Pb²⁺ สูงถึง 97.5% และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าประมาณ 3 เท่า

เอกสารอ้างอิง

1. Maheswari, P., Venkatesh, N., Madhavakrishnan, S., Shabudeen, P.S.S., Venkatesh, R. and Pattabhi, S. (2008). Utilization of sago waste as an adsorbent for the removal of Cu(II) ion aqueous solution. *E-Journal of Chemistry*, 5, 233-242.
2. Quek, S.Y., Wase, D.A.J. and Forster, C.F. (1998). The use of sago waste for the sorption of lead and copper. *Water SA*, 24, 251-256.
3. Wali, R., Kanakaraju, D. and Yusuf, N. A. (2010). Preliminary study on zinc removal from aqueous solution by sago wastes. *Global Journal of Environmental Research*, 4, 127-134.

บรรณานุกรม

- เจือจันทร์ เกตษา. (2556). ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเข้ชั้นต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. *วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.*
- ธวัชชัย ศรีวิบูลย์ และสมบุรณ์ แก้วปิ่นทอง. (2548). การหาปริมาณตะกั่วโดยใช้ไดไธโซน (Dithizone). *ปฏิบัติการเคมีมีวิเคราะห์ 2. มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพมหานคร.*
- ปานฉัตร กลัดเจริญ. (2554). การผลิตและทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน. *วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.*
- ปัญญา มณีจักร. (2555). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทูกวาง. *วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย. 1, 119-128.*
- ปรีนทร เต็มถาวรศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หมาจู้. *วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.*
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. (2539). ประกาศราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร.
- เปลื้อง บุญแก้ว และ มงคล คงเสน. (2557). การใช้ปาล์มสาคุในอาหารสัตว์. *Princess of Narathiwat University Journal. 1, 113-119.*
- พิทักษ์ อยู่มี. (2558). การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้ โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 43(4), 788-798.*
- รุจิรา ปิ่นแก้ว. (2556). การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, เพชรบูรณ์.*
- วรรณชัย พรหมเกิด. (2552). ระดับสาคุที่เหมาะสมในอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลานิลแดงแปลงเพศ. ในรายงานสืบเนื่อง “การประชุมวิชาการของเครือข่ายการวิจัยสถาบันอุดมศึกษา ปี 2552: เศรษฐกิจฐานความรู้สู่วิฤทธิชาติ”, นครศรีธรรมราช, 9-19.
- สุมาลี เพชรจันทร์. (2551). คุณค่าทางอาหารของเยื่อในลำต้นสาคุและผลพลอยได้จากสาคุและการใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารโคพื้นเมืองไทย. *วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.*
- สุภาพรณ์ เชื้อประเสริฐ, วิไล ลือวิสุทธิชาติ และละเอียด เพ็งโสภกา. (2542). การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งเพื่อใช้ดูดซับโลหะโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมและศึกษาวิธีการนำโลหะโครเมียมกลับมาใช้ใหม่. [online], Available: <http://www.kmutt.ac.th/rippc/pron324.htm> [2015, September 24].
- สมศักดิ์ เหล่าเจริญสุข และชาญวิทย์ เบญจมะ. (2535). ผลของการใช้เยื่อในลำต้นสาคุในอาหารไข่ไก่. ในรายงานสืบเนื่อง “การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 30 สาขา สัตว์”, 339-348.

- อรดี ฤทธิชัย และศศิธร มั่นเจริญ. (2557). การกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย ถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 19, 131-140.
- อรวรรณ ศิริโชติ, วรณา อินนาจิตร และแหลมทอง ชื่นชม. (2543). การศึกษากระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย เปลือกกล้วย และกะลามะพร้าว และเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ถ่านที่ผลิตได้. *โครงการงานทางเคมี, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, สงขลา.
- Adinata, D., Wan Daud, W.M.A. and Aroua, M.K. (2007). Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K_2CO_3 . *Bioresource Technology*. 98, 145-149.
- Aripin, H., Lestari, L. and Sabchevski, S. (2010). Sago waste based activated carbon film as an electrode materials for electric double layer capacitor. *The Open Materials Science Journal*. 4, 117-124.
- Awg-Adeni, D.S., Abd-Aziz, S., Bujang, K. and Hassan, M.A. (2010). Bioconversion of sago residue into value added products. *African Journal of Biotechnology*. 9, 2016-2010.
- Chandra, T.C., Mirna, M.M. and Sunarso, J. (2009). Activated carbon from durian shell : Preparation and characterization. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 40, 457-462.
- Danald, L. S. (1995). *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, USA, pp. 100-185.
- Davidson, J.H. and McMurry, P.H. (2006). Adsorption. [online], Available: <http://www.me.umm.edu/courses/me5115/notes/adsorption-1.htm> [2015, September 24].
- Djoković, V., Krsmanović, R., Božanić, D.K., McPherson, M., Tendeloo, G.V., Nair, P.S., Georges, M.K. and Radhakrishnan, T. (2009). Adsorption of sulfur onto a surface of silver nanoparticles stabilized with sago starch biopolymer. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 73, 30-35.
- Feng-Chin, W., Pin-Hsueh, W., Ru-Ling, T. and Ruey-Shin, J. (2011). Preparation of novel activated carbons from H_2SO_4 -pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *Journal of Environmental Management*. 92, 708-713.
- Hassler, J.W. (1974). *Publication with activated carbon*, New York, Mercel Dekker, Inc.
- Inbaraj, B.S., Sulochana, N. (2006). Mercury adsorption on a carbon sorbent derived from fruit shell of *Terminalia catappa*. *Journal of Hazardous Materials*. B133, 283-290.
- Issabayeva, G., Kheireddine, M., and Sulaiman, N.M.N. (2006). Removal of lead from aqueous solutions on palm shell activated carbon. *Bioresource Technology*. 97, 2350-2355.

- Jankowska, H., Swiatkowski, A., and Choma, J., (1991). *Active Carbon*, Ellis Horwood.
- Kadirvelu, K., Karthika, C., Vennilamani, N. and Pattabhi, S. (2005). Activated carbon from industrial solid waste as an adsorbent for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies. *Chemosphere*. **60**, 1009-1017.
- Kadirvelu, K., Kavipriya, M., Karthika, C., Vennilamani, N. and Pattabhi, S. (2004). Mercury (II) adsorption by activated carbon made from sago waste. *Carbon*. **42**, 745-752.
- Karagöz, S., Tay, T., Ucar, S. and Erdem, M. (2008). Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption. *Bioresource Technology*. **99**, 6214-6222.
- Legrouri, K., E.Khouya, E., Ezzine, M., Hannache, H., Denoyel, R., Pallier, R., and Naslain, R. (2005). Production of activated carbon from a new precursor molasses by activation with sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*, **118**, 259-263.
- Maheswari, P., Venilamani, N., Madhavakrishnan, S., Shabudeen, P.S.S., Venckatesh, R. and Pattabhi, S. (2008). Utilization of sago waste as an adsorbent for the removal of Cu(II) ion aqueous solution. *E-Journal of Chemistry*. **5**, 233-242.
- McKay, G. and Blair, H.S., Gardner, J. (1983). The Adsorption of Dyes in Chitin Intra-particle Diffusion Process. *Journal of Applied Polymer Science*. **28**, 1767-1778.
- Mohan, D. and Pittman Jr. C.U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*. **137**, 762-811.
- Mondal, M.K. (2009). Removal of Pb(II) ions from aqueous solution using activated tea waste : Adsorption on a fixed-bed column. *Journal of Environment Management*. **90**, 3266-3271.
- Nadeem, M., Mahmood, A., Shahid, S.A., Shah, S.S., Khalid, A.M. and McKay, G. (2006). Sorption of lead from aqueous solution by chemically modified carbon adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*. **B138**, 604-613.
- Olivares-Marín, M., Fernández-González, C., Macías-García, A., and Gómez-Serrano, V. (2012). Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonization with H₂SO₄. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. **94**, 131-137
- Olivares-Marín, M., Fernández-González, C., Macías-García, A., and Gómez-Serrano, V. (2006). Preparation of activated carbon from cherry stones by chemical activation with ZnCl₂. *Applied Surface Science*. **252**, 5967-5971.
- Quek, S.Y., Wase, D.A.J. and Forster, C.F. (1998). The use of sago waste for the sorption of lead and copper. *Water SA*. **24**, 251-256.

- Sanuel, D.F. and Osman, M.A., (1987). *Adsorption Processes for Water Treatment*, Butterworths Publishers, USA., pp. 14-20.
- Stephen, B.I., Sulochana, N. (2006). Mercury adsorption on a carbon sorbent derived from fruit shell of *Terminalia catappa*. *Journal of Hazardous Materials*. B133, 283-290.
- Wahi, R., Kanakaraju, D. and Yusuf, N. A. (2010). Preliminary study on zinc removal from aqueous solution by sago wastes. *Global Journal of Environmental Research*. 4, 127-134.



ภาคผนวก ก.

การหาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ โดยวิธี ASTM D4607-94

สารละลายและการเตรียม

1. สารละลายกรด HCl เข้มข้น 5% (v/v) ปริมาตร 500 มล.

เตรียมโดยปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) ปริมาตร 67.7 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มล. ที่มีน้ำกลั่นอยู่ 200 มล. จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 500 มล.

2. สารละลายไอโอดีน (I_2) เข้มข้น 0.100 N ปริมาตร 1,000 มล.

เตรียมโดยชั่ง I_2 หนัก 12.70 กรัม และ KI หนัก 19.10 กรัม ผสมให้เข้ากัน ละลายเข้าด้วยกันด้วยน้ำกลั่นจน I_2 ละลายหมด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มล. แล้วจึงเก็บสารละลายที่เตรียมได้ในขวดสีชา

3. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เข้มข้น 0.100 N ปริมาตร 1,000 มล.

เตรียมโดยชั่ง $Na_2S_2O_3$ หนัก 24.82 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่ต้มเดือด ปริมาตร 75 ± 25 มล. คนให้สารละลายหมด (เติม Na_2CO_3 หนักประมาณ 0.10 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของ $Na_2S_2O_3$ เนื่องจากแบคทีเรีย) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มล. แล้วจึงเก็บสารละลายที่เตรียมได้ในขวดสีชา และเก็บไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาใช้งาน

4. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) เข้มข้น 0.100 N ปริมาตร 1,000 มล.

โดยอบ KIO_3 ที่อุณหภูมิ $110^\circ C$ นาน 2 ชม. จากนั้นเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ชั่ง KIO_3 ที่อบแห้งแล้ว หนัก 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มล. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มล. แล้วจึงเก็บสารละลายที่เตรียมได้ในขวดสีชา

5. สารละลายน้ำแอมโมเนีย 0.1% (w/v)

เตรียมโดยชั่งแอมโมเนีย 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นที่ต้มเดือด ปริมาตร 25 มล. คนตลอดเวลา จากนั้นเทลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ ๆ ปริมาตร 1,000 มล. ต้มต่อไปอีก 4-5 นาที หรือจนใส ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเก็บสารละลายที่เตรียมได้ในขวดสีชา (ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งาน)

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน

1. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต

1.1 ปิเปตสารละลาย 0.1 N KIO_3 ปริมาตร 25 มล. ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 250 มล.

1.2 เติม KI หนัก 2.0 กรัม ลงไป แล้วเขย่าให้ละลาย

1.3 เติม conc. HCl ปริมาตร 25 มล. ลงในขวดรูปกรวยแล้วเขย่าให้เข้ากัน

1.4 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อน

1.5 เติมน้ำแอมโมเนียลงไป 2-3 หยด จากนั้นไทเทรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี (ไทเทรตซ้ำ 3 ครั้ง)

1.6 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮโอซัลเฟต (N_1) ได้จากสมการที่ (8)

$$N_1 = \frac{P \times R}{S} \dots\dots\dots(8)$$

- เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)
 P_1 คือ ปริมาตรของสารละลาย KIO_3 (มล.)
 R คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KIO_3 (N)
 S คือ ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไทเทรต (มล.)

2. สารละลายไอโอดีน

- 1.1 ปิเปตสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 250 มล.
- 1.2 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อน
- 1.5 เติมน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยด จากนั้นไทเทรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี (ไทเทรตซ้ำ 3 ครั้ง)
- 1.6 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน (N_2) ได้จากสมการที่ (9)

$$N_2 = \frac{N \times S}{I} \dots\dots\dots(9)$$

- เมื่อ N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย I_2 (N)
 N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)
 S คือ ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไทเทรต (มล.)
 I คือ ปริมาตรของสารละลาย I_2 (มล.)

การหาค่าการดูดซับไอโอดีน

1. อบอุ่นกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 120°C นาน 3 ชม. แล้วเก็บให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งถ่านกัมมันต์ หนัก 0.1000 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนให้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 250 มล.
3. เติมสารละลายกรด HCl เข้มข้น 5% (v/v) ปริมาตร 1 มล. ปิดด้วยกระดาษฟิวส์ เช้าให้เข้ากัน เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เปิดปากขวดต้มในตู้ควันให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เติมสารละลาย I_2 ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ปริมาตร 10 มล. ปิดจุกอย่างรวดเร็ว แล้วเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที
5. กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จากนั้นปิเปตสารละลายมา 5 มล. ใส่ในขวดรูปกรวย
6. ไทเทรตด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อน

7. เติมน้ำแบ่งลงไป 2-3 หยด จากนั้นไทเทรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี

8. ทำการทดลองซ้ำ โดยเติมน้ำหนักถ่านกัมมันต์ครั้งละ 0.1000 กรัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย I₂ (C) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$C = \frac{N_1 \times S}{F} \dots\dots\dots(10)$$

- เมื่อ N₁ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Na₂S₂O₃ (N)
- S คือ ปริมาตรของสารละลาย Na₂S₂O₃ ที่ใช้ไทเทรต (มล.)
- C คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย I₂ (N)
- F คือ ปริมาตรของสารละลาย I₂ (มล.)

9. คำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (X/M) ได้จากสมการที่ (11)

$$X/M = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \dots\dots\dots(11)$$

- เมื่อ X/M คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g)
- A คือ น้ำหนักของ I₂ ในสารละลายเริ่มต้น (mg) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$A = N_2 \times 12693.0 \dots\dots\dots(12)$$

- เมื่อ N₂ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย I₂ (N)
- DF คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (dilution factor; DF = 1.200) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$DF = \frac{1 + H}{F} \dots\dots\dots(13)$$

เมื่อ I คือ ปริมาตรของสารละลาย I₂ ที่ใช้ในการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย I₂ (I = 5 มล.)

H คือ ปริมาตรของสารละลาย HCl ที่เข้มข้น 5% (H = 1 มล.)

F คือ ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ และนำมาไทเทรต (F = 5 มล.)

B คือ น้ำหนักของ I₂ ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลาย Na₂S₂O₃ 1 มล (mg) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$B = N_1 \times 126.93 \dots\dots\dots(14)$$

- เมื่อ N₁ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Na₂S₂O₃ (N)
- S คือ ปริมาตรของสารละลาย Na₂S₂O₃ ที่ใช้ไทเทรต (มล.)
- M คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

ภาคผนวก ข.

การหาปริมาณตะกั่วโดยใช้ไตโรโซนด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี

(ธวัชชัย และสมบุญ, 2548)

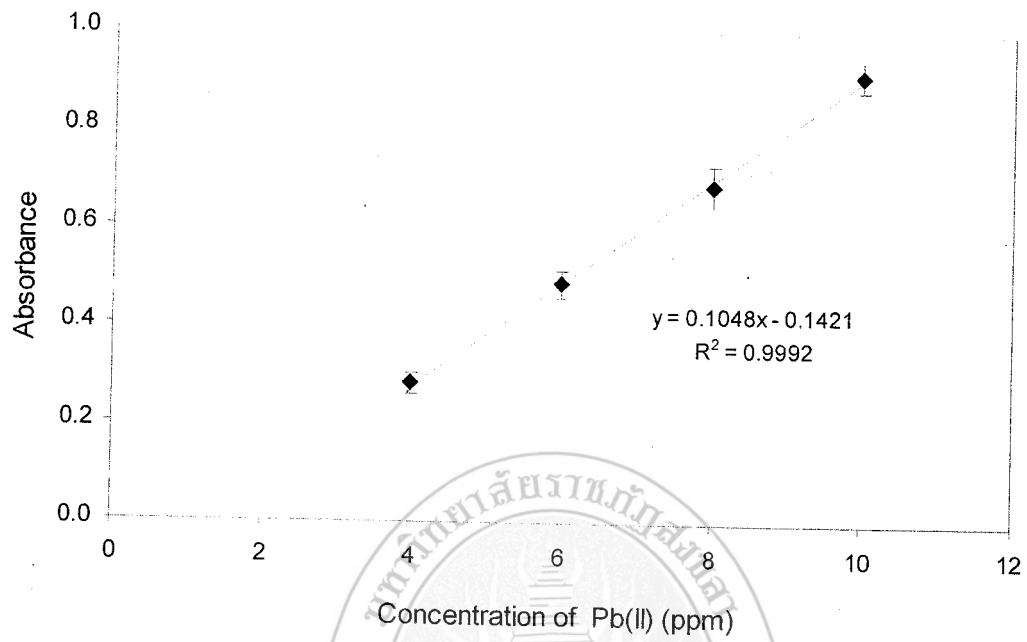
สารละลาย

1. สารละลายมาตรฐาน $PbCl_2$ เข้มข้น 100 ppm
2. สารละลายผสมของแอมโมเนีย โซเดียมไนต์-ซัลไฟท์ เตรียมโดยใช้แอมโมเนียเข้มข้น 35 มล. และ 3 มล. ของ 10% KCN ผสมกันแล้วเจือจางให้เป็น 100 มล. หลังจากนั้นเติม 0.15 กรัมของ Na_2SO_3 เขย่าให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. สารละลาย HCl เจือจาง 1 M
4. สารละลายไตโรโซน เข้มข้น 0.005% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม จำนวน 100 มล.
5. ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม
6. สารละลายตัวอย่าง

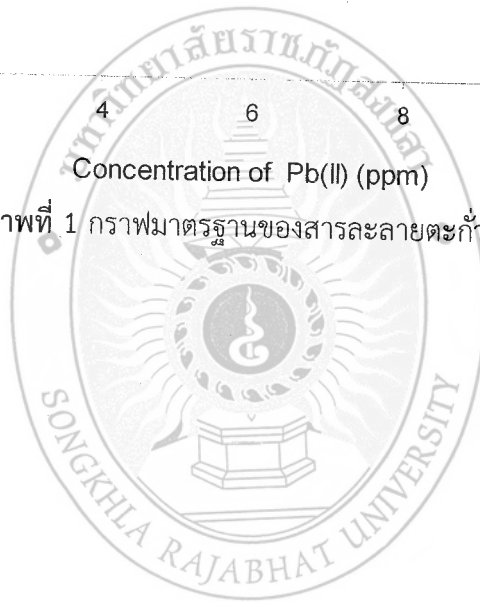
วิธีทดลอง

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 10 มล. ลงในกรวยแยก ขนาด 150 มล.
2. เติมสารละลายผสมของแอมโมเนีย โซเดียมไนต์-ซัลไฟท์ ปริมาตร 75 มล. ลงในกรวยแยก
3. ปรับ pH ของสารละลายให้มีค่า $pH = 9.5$ (โดยใช้ pH-meter) โดยค่อย ๆ หยด 0.1 M HCl ทีละหยด (ข้อควรระวัง ไม่ควรทำให้สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด เพราะจะทำให้เกิดแก๊ส HCN ซึ่งเป็นอันตรายมาก)
4. เติมสารละลายไตโรโซน เข้มข้น 0.005% (w/v) ในคลอโรฟอร์ม จำนวน 7.5 มล.
5. เติมตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม
6. เขย่ากรวยแยกนาน 15 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น
7. ไขชั้นคลอโรฟอร์มออก แล้วนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
8. ทำกราฟมาตรฐาน โดยใช้สารละลายมาตรฐาน $PbCl_2$ เข้มข้น 100 เตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm จากนั้นทำการสกัดแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็น สารละลายแบลนด์
9. หาความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายตัวอย่าง โดยการอ่านความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 8. (แสดงในภาคผนวก ค.)

ภาคผนวก ค.
กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว



ภาพที่ 1 กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว



ภาคผนวก ง.

ตารางที่ 1. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์จากสาหร่าย เมื่อทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณ I ₂ ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ความเข้มข้นที่สมดุลของ I ₂ (N)
300	0.1033±0.0043	2294.6821±56.3134	0.0238±0.0015
	0.2085±0.0129	637.9953±21.5630	0.0304±0.0010
	0.3023±0.0021	174.9095±5.1724	0.0298±0.0010
	ค่าเฉลี่ย	1035.8623±27.6829	0.0280±0.0012
350	0.1020±0.0010	2213.6320±28.9455	0.0277±0.0031
	0.2021±0.0011	626.3418±13.2546	0.0316±0.0025
	0.3015±0.0004	160.2230±10.9516	0.0304±0.0024
	ค่าเฉลี่ย	1000.0656±17.7172	0.0299±0.0027
400	0.1012±0.0006	2119.6010±29.8623	0.0308±0.0064
	0.2013±0.0002	718.0348±19.3809	0.0279±0.0003
	0.3027±0.0020	129.9768±5.7623	0.0323±0.0003
	ค่าเฉลี่ย	989.2042±18.3352	0.0303±0.0023
450	0.1016±0.0005	2267.2742±17.4863	0.0251±0.0017
	0.2019±0.0008	678.8983±9.4905	0.0293±0.0008
	0.3020±0.0015	145.3080±4.5227	0.0317±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	1030.4935±10.4998	0.0286±0.0009
500	0.1023±0.0014	2134.8601±42.5426	0.0294±0.0006
	0.2023±0.0016	636.0787±13.7071	0.0322±0.0015
	0.3022±0.0012	93.9203±3.7071	0.0334±0.0007
	ค่าเฉลี่ย	954.9531±19.9856	0.0317±0.0009

ภาคผนวก จ.

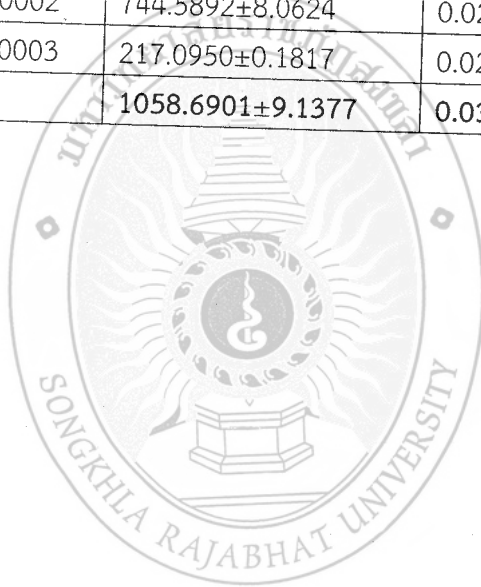
ตารางที่ 2. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนกึ่งทางอากาศ เมื่อทำการคาร์บอนไนเซชันที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (min)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณ I_2 ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ความเข้มข้นที่สมดุลของ I_2 (N)
60	0.1033±0.0043	2134.8602±56.3134	0.0294±0.0015
	0.2085±0.0129	576.0210±21.6303	0.0329±0.0010
	0.3023±0.0021	45.9343±5.1724	0.0342±0.0010
	ค่าเฉลี่ย	918.9385±27.7054	0.0322±0.0012
75	0.1024±0.0004	2109.0219±61.6737	0.0331±0.0011
	0.2024±0.0009	632.4289±29.0383	0.0323±0.0002
	0.3020±0.0009	108.3985±7.4517	0.0329±0.0005
	ค่าเฉลี่ย	949.9498±32.7212	0.0328±0.0006
90	0.1022±0.0014	2167.2602±167.1822	0.0312±0.0006
	0.2023±0.0003	696.1132±21.5736	0.0300±0.0005
	0.3020±0.0006	169.0740±12.2906	0.0307±0.0004
	ค่าเฉลี่ย	1010.8158±67.0155	0.0306±0.0005
105	0.1020±0.0012	2205.7156±117.1403	0.0298±0.0006
	0.2030±0.0010	697.9893±25.2149	0.0298±0.0006
	0.3021±0.0017	153.8489±5.8836	0.0313±0.0004
	ค่าเฉลี่ย	1019.1846±49.4129	0.0303±0.0005
120	0.1013±0.0003	2186.1783±56.9934	0.0312±0.0006
	0.2025±0.0017	566.6860±47.0760	0.0349±0.0006
	0.3031±0.0012	59.0794±22.8088	0.0348±0.0003
	ค่าเฉลี่ย	937.3146±42.2927	0.0336±0.0005
135	0.1019±0.0007	2217.5555±76.7589	0.0295±0.0002
	0.2027±0.0004	644.2181±23.7014	0.0320±0.0006
	0.3028±0.0005	104.8052±19.0683	0.0331±0.0005
	ค่าเฉลี่ย	988.8596±39.8429	0.0316±0.0004
150	0.1026±0.0003	2203.0886±35.3464	0.0295±0.0003
	0.2027±0.0005	643.2938±27.2190	0.0320±0.0006
	0.3017±0.0003	120.4435±6.1749	0.0326±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	988.9419±22.9134	0.0314±0.0004
165	0.1019±0.0004	2195.4359±47.9602	0.0303±0.0012
	0.2023±0.0004	628.9890±13.4979	0.0324±0.0003
	0.3021±0.0010	129.06490±28.8619	0.0322±0.0008
	ค่าเฉลี่ย	984.4966±30.1067	0.0316±0.0008
180	0.1027±0.0005	2152.9304±57.8776	0.0313±0.0006
	0.2025±0.0004	691.9182±27.4525	0.0301±0.0005
	0.3018±0.0008	120.0139±4.9986	0.0325±0.0008
	ค่าเฉลี่ย	988.2875±30.1096	0.0313±0.0006

ภาคผนวก ฉ.

ตารางที่ 3. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนซึ่งกักสาหร่ายขนาดต่าง ๆ

ขนาดถ่าน (μm)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณ I_2 ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ความเข้มข้นที่สมดุลของ I_2 (N)
<106	0.1020 \pm 0.0002	2246.0122 \pm 30.5284	0.02985 \pm 0.0006
	0.2017 \pm 0.0015	736.7343 \pm 10.1850	0.02935 \pm 0.0006
	0.3010 \pm 0.0006	130.6760 \pm 5.2481	0.03261 \pm 0.0005
	ค่าเฉลี่ย	1037.8075 \pm 15.3205	0.0306 \pm 0.0006
106-500	0.1014 \pm 0.0004	2204.4755 \pm 27.3008	0.0318 \pm 0.0003
	0.2022 \pm 0.0004	675.3696 \pm 23.8593	0.0315 \pm 0.0003
	0.3024 \pm 0.0003	136.2000 \pm 5.4363	0.0324 \pm 0.0004
	ค่าเฉลี่ย	1005.3483 \pm 18.8655	0.0319 \pm 0.0003
500-1,000	0.1014 \pm 0.0005	2214.3862 \pm 19.1689	0.0315 \pm 0.0001
	0.2022 \pm 0.0002	744.5892 \pm 8.0624	0.0290 \pm 0.0002
	0.3024 \pm 0.0003	217.0950 \pm 0.1817	0.0295 \pm 0.0003
	ค่าเฉลี่ย	1058.6901 \pm 9.1377	0.0300 \pm 0.0002



ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากสาकुที่กระตุ้นด้วยสารเคมีต่าง ๆ

สารเคมีที่ใช้กระตุ้น	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณ I ₂ ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ความเข้มข้นที่สมดุลของ I ₂ (N)
H ₂ SO ₄ 50% (w/w)	0.1002±0.0002	2285.0958±11.1927	0.0297±0.0006
	0.2003±0.0002	684.4417±13.1166	0.0313±0.0005
	0.3008±0.0005	126.0363±10.3186	0.03121±0.0004
	ค่าเฉลี่ย	1031.8579±11.5426	0.0306±0.0005
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ 0.5% (w/w)	0.1006±0.0002	2113.2205±13.4168	0.0355±0.0006
	0.2005±0.0003	538.6241±8.5761	0.0365±0.0003
	0.3009±0.0008	53.4022±5.2756	0.0353±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	901.7489±9.0895	0.0358±0.0004



ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 5. ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากสาकुที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนต่าง ๆ

AC:H ₂ SO ₄ (w:v)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณ I ₂ ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ความเข้มข้นที่สมดุลของ I ₂ (N)
1:1	0.1007±0.0005	2052.1218±24.1911	0.0346±0.0006
	0.2010±0.0003	547.7535±7.4674	0.0346±0.0003
	0.3006±0.0003	23.3654±5.3666	0.0354±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	874.4136±12.3417	0.0349±0.0004
1:2	0.1007±0.0000	2135.7427±31.9501	0.0316±0.0012
	0.2018±0.0013	614.7040±9.2823	0.0321±0.0003
	0.3013±0.0004	118.8857±5.4081	0.0319±0.0003
	ค่าเฉลี่ย	956.4441±15.5468	0.0319±0.0006
1:3	0.1011±0.0004	2173.8947±19.1284	0.0299±0.0010
	0.2012±0.0002	713.4966±16.6170	0.0286±0.0006
	0.3016±0.0012	140.2886±5.1217	0.0312±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	1009.2266±13.6224	0.0299±0.0006
1:4	0.1033±0.0003	2135.8627±34.4677	0.0296±0.0015
	0.2020±0.0004	646.2876±13.5067	0.0309±0.0005
	0.3010±0.0006	122.0595±5.2881	0.0318±0.0002
	ค่าเฉลี่ย	968.0699±17.7542	0.0308±0.0007

7.3 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ :

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิทยาศาสตร์

1. Charuwan Khamkaew, Lalitporn Wongsuwan, Abdullateep Sareedeh, Removal of Inorganic Arsenic Species in Seaweed *Gracilaria fisheri* by Using Typical Edible Eluents. *KMUTNB Int J Appl Sci Technol*, Special Issue 2017, 137-143.
2. Charuwan Khamkaew, Effects of Mobile Phase Composition as a function of Temperature on Isocratic Elution Behavior of β -carotene in Reversed-Phase Liquid Chromatographic Systems. *International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences*, 2017, 6(3): 94-97.
3. Charuwan Khamkaew, and Sontaya Manaboot, Determination of Lead Desorption from *G.fisheri* Seaweed using Edible Eluents by Voltammetry at the Hanging Mercury Drop Electrode. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, 855: 3-8.
4. จารุวรรณ คำแก้ว, การปรับปรุงอุปกรณ์ดักจับก๊าซของชุดทดสอบสารหนูทางการค้า สำหรับตรวจวัดปริมาณสารหนูทั้งหมดในกุ้งแห้งโดยตรง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 2558 (1) : 57-69.
5. Charuwan Suitcharit, Quantitative Determination of Arsenate in Dried Shrimp by Spectrophotometric Measurement of Its Heteropoly Blue. *Advanced Materials Research*, 2013 (705) : 9-14.
6. Charuwan Suitcharit, Farisan Awae, Wae-a-risa Sengmama and Kawee Srikulkit, Preparation of Depolymerized Chitosans and Effect of Chitosan's Molecular Weights on Mangosteen Dye Fixation. *Chiang Mai Journal of Science*, 2011. 38(3) : 473-484.
7. Charuwan SUITCHARIT, Farisan AWAE, Wae-a-risa SENGMAMA and Kawee SRIKULKIT, Effect of Chitosan's Molecular Weights on Mangosteen Dye Fixation on Cotton Fabric. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2010. 20(1): 27-31.
8. Charuwan Suitcharit, Warunee Yosdum, Kanjana Kead-La-Eead, and Kawee Srikulkit, The Usage of *Sapinduk rarak* Fruit for scoring Cotton Fabric. *Colourway THAILAND'S LEADING TEXTIL JOURNAL*. 2009. 15(85): 47-52. (in Thai)
9. Suitcharit, C., Mohamed, N., Lim, P. E. and Sirinawin, W. Determination of Zinc Species Using Ultrafiltration and Different Solid Sorbents. *Journal of Physical Science*. 2005. 16(1): 69-83.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. Charuwan Khamkaew and Sontaya Manaboot, Extraction Efficiency of Lead(II) from Seaweed *Gracilaria fisheri* with Food Additive Extractants, *The 11th Pure and Applied Chemistry Conference 2018 (PACCON2018)*, Hadyai, Songkhla Province, Thailand, February 7-9, 2018.
2. Charuwan Khamkaew, Lalitporn Wongsuwan, Abdullateep Sareedeh, Determination of Inorganic Arsenic Species in Seaweed *G. fisheri* by Cathodic Stripping Voltammetric

7.3 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ :

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิทยาศาสตร์

1. Charuwan Khamkaew, Lalitporn Wongsuwan, Abdullateep Sareedeh, Removal of Inorganic Arsenic Species in Seaweed *Gracilaria fisheri* by Using Typical Edible Eluents. *KMUTNB Int J Appl Sci Technol*, Special Issue 2017, 137-143.
2. Charuwan Khamkaew, Effects of Mobile Phase Composition as a function of Temperature on Isocratic Elution Behavior of β -carotene in Reversed-Phase Liquid Chromatographic Systems. *International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences*, 2017, 6(3): 94-97.
3. Charuwan Khamkaew, and Sontaya Manaboot, Determination of Lead Desorption from *G.fisheri* Seaweed using Edible Eluents by Voltammetry at the Hanging Mercury Drop Electrode. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, 855: 3-8.
4. จารุวรรณ คำแก้ว, การปรับปรุงอุปกรณ์ดักจับก๊าซของชุดทดสอบสารหนูทางการค้า สำหรับตรวจวัดปริมาณสารหนูทั้งหมดในกุ้งแห้งโดยตรง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 2558 (1) : 57-69.
5. Charuwan Suitcharit, Quantitative Determination of Arsenate in Dried Shrimp by Spectrophotometric Measurement of Its Heteropoly Blue. *Advanced Materials Research*, 2013 (705) : 9-14.
6. Charuwan Suitcharit, Farisan Awae, Wae-a-risa Sengmama and Kawee Srikulkit, Preparation of Depolymerized Chitosans and Effect of Chitosan's Molecular Weights on Mangosteen Dye Fixation. *Chiang Mai Journal of Science*, 2011. 38(3) : 473-484.
7. Charuwan SUITCHARIT, Farisan AWAE, Wae-a-risa SENGMAMA and Kawee SRIKULKIT, Effect of Chitosan's Molecular Weights on Mangosteen Dye Fixation on Cotton Fabric. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2010. 20(1): 27-31.
8. Charuwan Suitcharit, Warunee Yosdum, Kanjana Kead-La-Eead, and Kawee Srikulkit, The Usage of *Sapinduk rarak* Fruit for scoring Cotton Fabric. *Colourway THAILAND'S LEADING TEXTIL JOURNAL*. 2009. 15(85): 47-52. (in Thai)
9. Suitcharit, C., Mohamed, N., Lim, P. E. and Sirinawin, W. Determination of Zinc Species Using Ultrafiltration and Different Solid Sorbents. *Journal of Physical Science*. 2005. 16(1): 69-83.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในรายงานการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. Charuwan Khamkaew and Sontaya Manaboot, Extraction Efficiency of Lead(II) from Seaweed *Gracilaria fisheri* with Food Additive Extractants, *The 11th Pure and Applied Chemistry Conference 2018 (PACCON2018)*, Hadyai, Songkhla Province, Thailand, February 7-9, 2018.
2. Charuwan Khamkaew, Lalitporn Wongsuwan, Abdullateep Sareedeh, Determination of Inorganic Arsenic Species in Seaweed *G. fisheri* by Cathodic Stripping Voltammetric

- Method at Hanging Mercury Drop Electrode. *The 9th Pure and Applied Chemistry Conference 2016* (PACCON2016), BITEC, Bangkok, Thailand, February 9-11, 2016.
3. Charuwan Khamkaew, Isocratic elution for retention behaviour of β -carotene by RP-HPLC under different volume fractions of binary mobile phase as a function of temperatures. *7th International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference* (I-SEEC 2015), Wangchan Riverview Hotel, Phitsanulok, Thailand, November 24-26, 2015.
 4. Charuwan Khamkaew, Linear-retention models of capacity factor for describing the isocratic elution of β -carotene with different compositions of 2-propanol in methanol by reversed-phase high performance liquid chromatography. BUU2015 Conference. Bangsean Heritage Hotel, Bangsean, Chonburi, Thailand, July 10-12, 2015.
 5. Charuwan Khamkaew, Nithiwadee Jullanin, Monthakan Jantharangsri, Jiraporn Nooyimsai, Linear Retention Equations for Describing the Isocratic Elution Behaviour of β -carotene in Reversed-Phase Liquid Chromatography Using Binary solvent System. *The 8th Pure and Applied Chemistry Conference 2015* (PACCON2015), Amari Water Gate Hotel, Bangkok, Thailand, January 21-23, 2015.
 6. Charuwan Suitcharit, Nithiwadee Jullanin, Monthakan Jantharangsri, Jiraporn Nooyimsai. RETENTION BEHAVIOUR OF β -CAROTENE AT DIFFERENT TEMPERATURES UNDER BINARY MOBILE PHASES FOR ISOCRATIC ELUTION IN REVERSED-PHASE LIQUID CHROMATOGRAPHY. 39th Congress on Science and Technology of Thailand (STT39), BITEC, Bangkok, Thailand, October 21-23, 2014.
 7. Charuwan Suitcharit, and Saowakon Wattanachant. The Modification of Gas-Trap Apparatus for the measurement of Total Arsenic in Dried Shrimp. การประชุมวิชาการระดับชาติ “เครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ” ประจำปี 2556. 27-28 กุมภาพันธ์ 2556. สามพรานรีเวอร์ไซด์ นครปฐม. (Oral Presentation)
 8. Charuwan Suitcharit, Asron Daman, and Sontaya Manaboot. DETERMINATION OF DESORPTION EFFICIENCY OF EDIBLE ELUENTS FOR LEAD FROM SEAWEED *Gracilaria fisheri* BY ASV MEASUREMENT. 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38), The Empress Hotel Chiangmai, Chiangmai, Thailand, October 17-19, 2013: C1_C0013; Available access in http://www.scisoc.or.th/stt38/proceedings38/pdf/C1/STT38_C1_C0013F.pdf. (Poster Presentation)
 9. Charuwan Suitcharit, and Saowakon Wattanachant. A Simply Method for the Total Arsenic Measurement in Dried Shrimp by Test Kit Using the Designed Gas-Trap Apparatus. *Thailand Research Symposium 2012*, Convention centre, Central World, Bangkok, August 24-28, 2012. (Poster Presentation)
 10. Charuwan Suitcharit, Chaowaneeporn Cheeprasop, Chatjira Chuinukul, and Saowakon Wattanachant. Method Development for Reduction of Arsenic Content in Sea Water and Simply Determination of Arsenic in Dried Shrimp. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 22 ประจำปี 2555 “Thai-ASEAN : Path of Collaboration”. ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา, June 23-26, 2012. (Poster Presentation)

11. Charuwan Suitcharit, **Spectrophotometric Method for Arsenate Determination in Dried Shrimp.** *The 6th Pure and Applied Chemistry Conference 2012 (PACCON 2012).* The Empress Hotel Chiangmai, Chiangmai, Thailand, January 11-13, 2012: 769. (Poster Presentation)
12. Charuwan Suitcharit, Preecha Issara, and Mohammad Chopknam. **Characterization of Depolymerized Chitosan with Sodium nitrite.** *Thailand Research Symposium 2010.* Convention centre, Central World, Bangkok, August 26-30, 2010: 96-98. (Oral Presentation)
13. Charuwan Suitcharit, Farisan Awae, Wae-a-risa Sengma, and Kawee Srikulkit, **Effect of Chitosan's Molecular Weights on Mangosteen Dye Fixation on Cotton Fabric.** *Thailand Textile Symposium 2010,* Miracle Grand Convention Hotel, Bangkok, August 26th, 2010: 61-65. (Poster Presentation)
14. Charuwan Suitcharit, Waraporn Niyomdecha, Maisaroh Tingnamrob, and Kawee Srikulkit. **The Production of Natural Dye Powder from Mangosteen and *Terminalia catappa* Leaves.** นวัตกรรมเพื่อการเกิดพระเกียรติ “ตามรอยเบื้องพระยุคลบาท” และงานแสดงผลงานพัฒนาเทคโนโลยีทุนปริญญาตรี สกว. ครั้งที่ 6 IRPUS 51 (Project No. I350A006), March 28-29, 2008: Pavilion C 89. (Poster Presentation)
15. Charuwan Suitcharit, Warunee Yosdum, Kanjana Kead-La-Eead, and Kawee Srikulkit, **The Usage of *Sapinduk rarak* Fruit for scoring Cotton Fabric.** นวัตกรรมเพื่อการเกิดพระเกียรติ “ตามรอยเบื้องพระยุคลบาท” และงานแสดงผลงานพัฒนาเทคโนโลยีทุนปริญญาตรี สกว. ครั้งที่ 6 IRPUS 51 (Project No. I350A008), March 28-29, 2008: Pavilion C 89. (Poster Presentation)
16. Charuwan Suitcharit, Norita Mohamed, Lim Poh Eng, and Waraporn Sirinawin, **Speciation Studies of Cadmium-Organic Ligand Complexes Using Ultrafiltration and Different Solid Sorbents.** *MSA Golden Jubilee International Science Congress (ISC) 2005,* Putra World Trade Centre, Kuala Lumpur, Malaysia, August 3-6, 2005. (Oral Presentation)
17. Charuwan Suitcharit, Norita Mohamed, Lim Poh Eng, and Waraporn Sirinawin, **Determination of Zinc Species Using Ultrafiltration and Different Solid Sorbents.** *Regional Conference for Young Chemists (RCYC) 2004.* Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, April 13-14, 2004: 1-15. (Oral Presentation)

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ :

ประวัติผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย): นางสาว นรารัตน์ ทองศรีนุ่น
(ภาษาอังกฤษ): Miss Nararat Thongsrinoon
2. หมายเลขบัตรประชาชน: 3960500062176
3. ตำแหน่งปัจจุบัน: อาจารย์ (พนักงานมหาวิทยาลัย)
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
ที่อยู่: โปรแกรมวิชาเคมีและเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
160 ถ.กาญจนวนิช ต.เรารูปร่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000
เบอร์โทรศัพท์ : 087-479-9169

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่สำเร็จการศึกษา	ระดับการศึกษา	คุณวุฒิ	มหาวิทยาลัย
2544	ปริญญาตรี	วท.บ (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2551	ปริญญาโท	วท.ม (เคมีวิเคราะห์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เคมีวิเคราะห์, ไบโอะเซ็นเซอร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- แอมเพอโรเมตริกไบโอะเซ็นเซอร์สำหรับสารประกอบฟีนอลิกโดยใช้เอนไซม์แลคเคสที่ถูกตรึงบนท่อนาโนคาร์บอน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

นำเสนอผลงานโปสเตอร์

Nararat Thongsrinoon, Benoit Guiyesse, Mathieu Lenoir, Jing Liu,

Proespichaya Kanatharana, Panote Thavarungkul and Bo Mattiasson. "Determination of estrogenic activity based on yeast estrogen assay". 32nd Congress on Science and Technology of Thailand (STT.32) "Science and Technology for Sufficiency Economy", Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand. 10-12 October 2006.

Nararat Thongsrinoon, Proespichaya Kanatharana and Panote

Thavarungkul. "Amperometric Biosensor Based on Alkanethiols Self-assembled Monolayer on Gold Electrode". The 5th PERCH-CIC Annual Scientific Congress (PERCH-CIC Congress V), Jomtien Palm Beach Resort, Pattaya, Thailand. 6-9 May 2007.

- การพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดปริมาณเอทานอลในตัวอย่างเลือดด้วยเทคนิคเฮดสเปซ-แก๊สโครมาโตกราฟี

นำเสนอผลงานปากเปล่า

Nararat Thongsrinoon, Wirachai Samai and Suwit Ruangkittisakul.

"The Optimization of Operational Conditions for Ethanol Determination in Human Blood Samples Using Headspace-Gas Chromatography". The 25th Faculty of Medicine Congress "A 36-year journey of success in quality and excellence", Faculty of Medicine, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand. 5-7 August 2009.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ

ประวัติผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย): นายประสิทธิ์ รุ่งเรือง
(ภาษาอังกฤษ): Mr. Prasit Rungruang
8. หมายเลขบัตรประชาชน: 3910100512948
9. ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (พนักงานมหาวิทยาลัย)
10. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
ที่อยู่: โปรแกรมวิชาการบัญชี
คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
160 ถ.กาญจนวนิช ต.เรารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000
เบอร์โทรศัพท์ : 087-479-9169
โทรสาร : 095-0755858
อีเมลล์ : ton_prasit@hotmail.com

11. ประวัติการศึกษา

ปีสำเร็จการศึกษา	ระดับการศึกษา	คุณวุฒิ	มหาวิทยาลัย
2544	ปริญญาตรี	บธ.บ (การบัญชี)	มหาวิทยาลัยทักษิณ
2551	ปริญญาโท	บธ.ม (การบัญชี)	มหาวิทยาลัยรามคำแหง

12. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ การบัญชี

13. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

พ.ศ. 2553 ต้นทุนและผลตอบแทนจากการผลิตน้ำตาลปี๊บและน้ำตาลแว่น, แหล่งทุนวิจัย
คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ