

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับ
งานเครื่องกรองน้ำ

คณะผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร (หัวหน้าโครงการ)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์
นางสาวพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยทำการบดถ่านให้เป็นผงและอัดขึ้นเม็ดถ่านเป็นรูปทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดเม็ด ศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของสารเชื่อมประสาน 3 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดินและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และหาขนาดเม็ดถ่านในการอัดขึ้นเม็ด พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้สารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง ในสัดส่วนผงถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำ คือ 1:0.35:1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดถ่าน 4 มิลลิเมตร เม็ดถ่านสามารถทนต่อแรงอัดกระแทกได้ 53 เมกะปาสคาล และร้อยละการแตกตัวในน้ำเท่ากับ 1.25 ทำให้ได้ถ่านเม็ดสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และให้ความร้อนด้วยการเผาในท่อสแตนเลสพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ การใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงสุดถึง 602.75 และ 202.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทำการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการกรองน้ำที่เป็นอนสารละลายเหล็กในระบบชุดดูดซับสารละลายเหล็ก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายเหล็ก คือ อัตราการไหลน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้สามารถดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำได้ตามมาตรฐานของน้ำอุปโภคบริโภค คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นี้มีการดูดซับเหล็กได้สูงเมื่อเทียบกับทางการค้า นอกจากนี้ยังมีราคาที่ถูกกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าถึง 3 เท่า เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยสามารถในดูดซับได้นานถึงเวลา 14 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานสามารถทำการฟื้นฟูสภาพด้วยไอน้ำในชุดระบบฟื้นฟูสภาพแบบแบทช์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ควบคุมความดัน 20-30 บาร์ ใช้เวลาในการกระตุ้น 60 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์หลังจากถูกฟื้นฟูสภาพแล้วมีความสามารถดูดซับสารละลายเหล็กได้ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ตั้งต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีนี้นั้นทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ABSTRACT

In this research, the production of activated carbon pellets from parawood charcoal of gasification process by crushing coal into powder and extruded in to cylindrical pellets with extruder was investigated. The effects of the types and proportions of binder's three types of cassava starch, tar, and polyvinyl alcohol (PVA) and find grain size of charcoal for pelleted extrusion. It was found that the suitable conditions were using cassava starch as a binder, ratio of charcoal per binder per water is 1: 0.35: 1 and grain size of charcoal was 4 mm, which able to resistant to compressive stress up to 53 MPa and % fracture of charcoal pellets equal 1.25 achieve charcoal pellets for production of activated carbon activated by potassium hydroxide (KOH) and heating with burned in stainless tube. The optimal concentration for potassium hydroxide as activating agent was 2 molar, activating temperatures 700 °C for 90 minutes. The result of iodine number and methylene blue adsorption were 602.75 and. 202.04 milligrams per gram of activated carbon, respectively. The study of the produced activated carbon was used to absorb iron solution in water with iron solution absorption system. The optimum conditions to filter iron were the water flow rate 0.5 liters per minute and initial concentration of iron in the water was 5 milligrams per liter. The results showed that produced activated carbon could meet the specification of World Health Organization which iron content was not exceeding than 0.3 milligrams per liter and this activated carbon has high iron adsorption as compared to commercial AC. In addition, PAC is 3 times cheaper than commercial activated carbon. The produced activated carbon is capable of adsorbing up to 14 hours. The regeneration of used activated carbon by steam at a temperature of 300 °C, regeneration time is 60 minutes. After regenerated, it was capable of adsorbing iron solution close to the fresh activated carbon. Consequently, this regenerated activated carbon is feasible to regenerate.

(3)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “งบประมาณแผ่นดินปี 2559” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท พาราวีเนียร์ 2002 จำกัด ตั้งอยู่ 10 หมู่ 2 ตำบลในควน อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ่านไม้ยางพาราจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อทำวิจัย อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
ABSTRACT	(2)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
รายการตาราง.....	(8)
รายการรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์	4
2.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์	4
2.2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง.....	4
2.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด.....	4
2.2.3 ถ่านกัมมันต์แบบเป็นแท่ง.....	4
2.3 วิธีการกระตุ้นถ่าน	5
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	6
2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	6
2.4.2 คุณสมบัติในการดูดซับ	7
2.5 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์	7
2.6 สารเชื่อมประสาน.....	8

2.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	8
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.9 ทฤษฎีการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	9
2.10 การผลิตถ่านไม้จากเตาเผา.....	10
2.10.1 ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน.....	11
2.10.2 หลักการการเผาถ่าน.....	11
2.10.3 เตาเผาถ่านสำหรับผลิตถ่านไม้.....	12
2.11 สารละลายเหล็กในน้ำ.....	13
2.12 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	13
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.13.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	15
2.13.2 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นต่างๆ.....	16
2.13.3 รูปแบบของถ่านกัมมันต์.....	17
2.13.4 การใช้ถ่านกัมมันต์ในดูดซับและกรองน้ำ.....	18
2.14 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร.....	19
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย.....	21
3.1 วัสดุ.....	21
3.2 สารเคมี.....	21
3.2.1 สารเคมีสำหรับการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด.....	21
3.2.2 สารเคมีสำหรับเป็นสารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นเม็ดถ่าน.....	21
3.2.3 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์.....	22
3.2.4 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์.....	22
3.2.5 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารละลายเหล็กในน้ำ.....	22
3.3 อุปกรณ์.....	22
3.3.1 อุปกรณ์สำหรับการกระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด.....	22

3.3.2 อุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นเม็ดถ่าน.....	23
3.3.3 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์	23
3.3.4 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์เมทิลีนบลู.....	23
3.3.5 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกรองน้ำของถ่านกัมมันต์	24
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.4.1 การเตรียมถ่านไม้ยางพาราผง	24
3.4.2 การอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้.....	25
3.4.2 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด	27
3.4.3 ตรวจสอบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้.....	30
3.4.4 ทดสอบใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ.....	30
3.4.5 วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	36
4.1 ผลของการใช้สารเชื่อมประสานต่อการอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้ยางพารา.....	36
4.2 การผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด.....	41
4.2.1 ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการแช่ถ่าน.....	41
4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้น	43
4.2.3 ผลของเวลาในการกระตุ้น	44
4.3 ผลการศึกษาถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ	47
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำ.....	47
4.3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กในน้ำ	48
4.3.3 เปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	50
4.4 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	52
4.5 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis).....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย.....	61
ภาคผนวก.....	64

รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 ออกแบบการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด 500 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 300 นาที	32
ตารางที่ 3-2 ออกแบบการทดลองผลของอัตราการไหลน้ำที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด 500 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 300 นาที	32
ตารางที่ 3-3 ออกแบบการทดลองผลการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ ดำเนินการที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 15 ชั่วโมง	33
ตารางที่ 3-4 ออกแบบการทดลองผลการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้หลังจากดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำดำเนินการที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จนเป็นเวลา 15 ชั่วโมง	35
ตารางที่ 4-1 แสดงผลของชนิด สัดส่วนของเชื่อมประสาน และขนาดเม็ดถ่านต่อค่าความแข็งแรงของเม็ดถ่าน	37
ตารางที่ 4-2 รายละเอียดวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านไม้	56
ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	57
ตารางที่ 4-4 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ	57

รายการรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (ก) แบบเกร็ดหรือเม็ด (ข) และแบบแท่ง (ค)	5
รูปที่ 2.2 แบบจำลองการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเท่านั้นเมื่อดูดซับสารถูกดูดซับเป็นไอ	10
รูปที่ 2.3 เตาเผาอิวาเตะสำหรับผลิตน้ำส้มควันไม้	12
รูปที่ 2.4 แก๊สซิฟิเคชันชนิด Downdraft (http://www.kmutt.ac.th/TEC2/newweb/)	14
รูปที่ 3.1 ลักษณะของถ่านไม้ย่างพารา	21
รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด	24
รูปที่ 3.3 ผงถ่านบดละเอียด	25
รูปที่ 3.4 สารเชื่อมประสานน้ำมันดิน (ก) แป้งมันสำปะหลัง (ข) และ PVA (ค)	25
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้	26
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของเครื่องอัดขึ้นเม็ด	26
รูปที่ 3.7 เม็ดถ่านไม้ที่ได้จากการอัด	26
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งของเม็ดถ่าน	27
รูปที่ 3.9 การแช่เม็ดถ่านด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	27
รูปที่ 3.10 แสดงการกรองเอาเม็ดถ่านออกจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	28
รูปที่ 3.11 แผนภาพเตาเผาแบบท่อสำหรับการเผากระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์	28
รูปที่ 3.12 เตาเผาแบบท่อสำหรับการเผากระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์	29
รูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการเผากระตุ้นถ่าน	29
รูปที่ 3.14 ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	30
รูปที่ 3.15 แผนภาพของระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ	31
รูปที่ 3.16 ระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์	31
รูปที่ 3.17 แผนภาพส่วนประกอบของระบบฟื้นฟูแบบแบทช์สำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว	34
รูปที่ 3.18 ระบบฟื้นฟูแบบแบทช์สำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว	34
รูปที่ 3.19 ถ่านกัมมันต์หลังจากการคืนสภาพแล้ว	34
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของปริมาณสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง (ก) น้ำมันดิน (ข) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (ค) ต่อค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านขนาด 4 และ 8 มิลลิเมตร	38
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบชนิดของสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดิน และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านขนาด 4 มิลลิเมตร	39

รูปที่ 4.3 แสดงการแตกตัวของเม็ดถ่านและการละลายในน้ำของการใช้สารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง (ก) น้ำมันดิน (ข) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (ค)	40
รูปที่ 4.4 ถ่านเม็ดที่ผลิตได้จากการใช้สารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นเม็ด	40
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละผลได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	41
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	42
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที	43
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที	44
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที	44
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ในถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	47
รูปที่ 4.15 กราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด ที่อัตราการไหลน้ำต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	48
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลน้ำในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำหนักรถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	48
รูปที่ 4.17 กราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่างๆ โดยมีอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักรถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	49
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำโดยมีอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักรถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	50

รูปที่ 4.19 กราฟเบคทรูเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที่ และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	51
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที่ และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม.....	51
รูปที่ 4.21 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังการดูดซับสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	52
รูปที่ 4.22 ถ่านกัมมันต์เม็ดหลังจากการดูดซับสารละลายเหล็ก.....	52
รูปที่ 4.23 กราฟเบคทรูเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้ว โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที่ และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	53
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้ว โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที่ และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม	53
รูปที่ 4.25 ถ่านกัมมันต์เม็ดหลังจากฟื้นฟูสภาพแล้ว.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

น้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดินมีแร่ธาตุน้ำแร่เจือจางจำนวนมากละลายปนอยู่ เช่น อนุมูลเหล็ก แมงกานีส และอื่นๆ (McFarland et al., 2015) ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้จึงเห็นเป็นน้ำใส แต่เมื่อสัมผัสอากาศก็จะเปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำไม่ได้ ทำให้น้ำมีสีแดงและเกิดตะกอนเหล็กเมื่อซักผ้า ผ้าจะมีสี ทั้งไว้นานๆเครื่องสุขภัณฑ์จะมีคราบสีน้ำตาลทำให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน และเมื่อร่างกายเราได้รับธาตุเหล็กปริมาณมากเกินไปส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพการใช้ถ่านกัมมันต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดสารพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำโดยอาศัยหลักการดูดซับที่ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลากหลายชนิด เช่น กะลามะพร้าว แกลบ ชานอ้อย ไม้ยางพารา และผลพลอยได้ที่มาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้แก่ ถ่านชาร์ (Char) มีปริมาณมากถึง 1 ใน 4 ของไม้ป้อน ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ พบว่าถ่านชาร์มีปริมาณมากและขายได้ราคาประมาณ 10 - 20 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งหากสามารถเพิ่มมูลค่าของถ่านไม้ก็จะช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่วิสาหกิจขนาดย่อมได้เป็นอย่างมาก วิธีการหนึ่งของการเพิ่มมูลค่าถ่านไม้ คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวที่มีความพรุนสูงเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ราคาขายอยู่ที่ 100 - 300 บาทต่อกิโลกรัม ถ่านกัมมันต์มีประโยชน์มากมาย เช่นกรองน้ำให้บริสุทธิ์นิยมใช้ในเครื่องกรองน้ำการบำบัดน้ำเสียการกำจัดกลิ่น เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงมากประมาณ 500 - 2000 ตารางเมตรต่อกรัม (Jiwalak, 2002) มีความสามารถในการดูดซับสูงและเป็นวัสดุที่มีราคาสูง ส่วนใหญ่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะแม้ประเทศไทยจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้แต่ยังไม่เพียงพอกับความต้องการ จากข้อมูลของกรมศุลกากรในปี พ.ศ.2548 ประเทศไทยนำเข้าถ่านกัมมันต์ถึง 4,802,834 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 204,881,304 บาท และเพิ่มขึ้นเป็น 5,658,602 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2549 จะเห็นว่าการใช้งานถ่านกัมมันต์เป็นไปอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไอซ์เซชันโดยการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 200 - 500 องศาเซลเซียส ภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ วิธีกระตุ้นทางกายภาพได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam) โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 - 1,100 องศาเซลเซียส ซึ่งการกระตุ้นวิธีนี้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ส่วนวิธีกระตุ้นทางเคมีเป็นการทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับผิวคาร์บอน สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น (Hirunpraditkoon et al., 2011) ซึ่งจะแทรกตัวเข้าไปสลายน้ำมันดินและสารอินทรีย์ต่างๆ ทำให้ผิวของคาร์บอนเกิดรูพรุน

ภายในจำนวนมากข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิต่ำในการกระตุ้นต่ำและระยะเวลาในการกระตุ้นเร็วกว่าแบบกายภาพ ส่งผลให้ประหยัดพลังงานและต้นทุนต่ำลง แต่วิธีนี้มีกระบวนการล้างสารเคมีตกค้างเพิ่มเข้ามาด้วย

เนื่องจากวัตถุดิบที่ได้ทางการเกษตรต้องผ่านกระบวนการคาร์บอนไซเซชันก่อนถึงจะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้นการใช้วัตถุดิบเป็นถ่านไม้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดกระบวนการผลิตดังกล่าวได้ ยังช่วยแก้ปัญหาการจัดหาวัตถุดิบและสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่ถ่านไม้ได้เป็นอย่างดี ปัญหาของการใช้ถ่านไม้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยเฉพาะการใช้ถ่านกัมมันต์กับงานกรองน้ำ ดังนั้นการอัดขึ้นเม็ดถ่านด้วยเครื่องอัดเม็ดและการใช้สารเชื่อมประสานที่เหมาะสมจึงเป็นประเด็นที่สำคัญ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้เกิดความแข็งแรงทนทาน โดยสารเชื่อมประสานที่ใช้ ได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์น้ำมันดิน และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในแง่ความพรุนของรูขนาดเล็ก ซึ่งดูได้จากการดูดซับไอโอดีนที่ต้องไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2557) เพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้ในเครื่องกรองน้ำและในอุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้บำบัดน้ำเสีย

งานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการใช้ทรัพยากรของประเทศให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลงานสู่การต่อยอดในเชิงพาณิชย์ จึงสนใจทำการศึกษการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนของระบบ Gasification โดยกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Teng et al., 2011) เพราะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และราคาไม่แพงมากสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ โดยมีกระบวนการศึกษา 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการอัดขึ้นเม็ดถ่านด้วยเครื่องอัดเม็ดโดยการผสมสารเชื่อมประสานและขั้นตอนการกระตุ้น เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ เช่น ค่า %Yield ค่าการดูดซับไอโอดีน นัมเบอร์ ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู และความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์ พร้อมทั้งศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการกรองน้ำที่มีสารละลายเหล็กอยู่ เพื่อกำจัดสารละลายเหล็กออกจากน้ำและนำมาเปรียบเทียบการกรองสารละลายเหล็กกับถ่านกัมมันต์ในท้องตลาด และเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูงจึงศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยไอน้ำแบบแบทช์ เพื่อนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ในการกรองน้ำใหม่ รวมถึงทำการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตและการขายผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับการต่อยอดผลงานสู่การใช้งานจริงเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากถ่านไม้ยางพาราโดยใช้วิธีการอัดขึ้นเม็ดถ่านและการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการอัดเม็ดถ่านไม้และการกระตุ้นถ่านไม้ยางพาราด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
3. เพื่อการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ทดสอบการใช้งานถ่านกัมมันต์เม็ดกับการกรองเหล็กออกจากน้ำเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถนำถ่านไม้ย่างพาราที่มาจากผลพลอยได้ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมาเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อทำให้เกิดประโยชน์ต่อชุมชนและอุตสาหกรรมที่หลากหลาย
2. พัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านไม้เพื่อลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศและลดการสูญเสียเงินตราออกสู่ต่างประเทศ
3. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ที่คุณสมบัติเทียบเท่าวัสดุชนิดอื่นที่สามารถต่อยอดสู่การใช้งานจริง

1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย

1. ศึกษาการอัดเม็ดถ่านไม้ด้วยเครื่องอัดเม็ดขนาดมอเตอร์ 2 แรงม้าและการใช้สารเชื่อมประสานในการขึ้นเม็ดที่เหมาะสมเพื่อความแข็งแรงของเม็ดถ่าน
2. ศึกษาผลการกระตุ้นถ่านไม้ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเตาเผาแบบท่อและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้
3. ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ที่ได้ด้วยการวัดค่าการดูดซับไอโอดีนหรือไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) และการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorb)
4. ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในเครื่องกรองน้ำเพื่อกรองเหล็กออกจากน้ำและศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

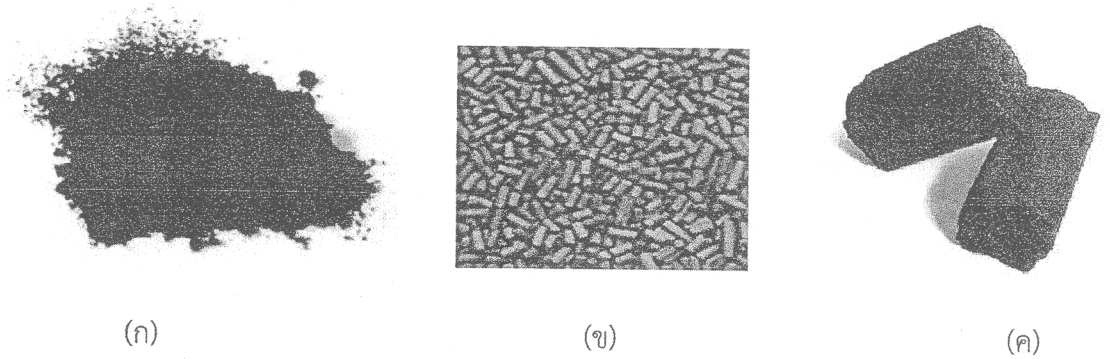
ถ่านกัมมันต์(Activated carbon) คือวัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูงเป็นการนำเอาวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง (รุจิรา, 2556) ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้งโดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และไนโตรเจนโดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากก๊าซและของเหลวได้ในปริมาณสูงถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) แต่ถูกทำขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวมากมีความจุในการดูดซับสูงผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูง

2.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon, PAC) แสดงรูปที่ 2.1 (ก) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกนำมาบดจนสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนักมีลักษณะเป็นผงโดยทั่วไปจะมีขนาด 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร นิยมใช้ในการดูดซับสารในสถานะแก๊สหรือของเหลวเช่นการฟอกสี การดูดซับกลิ่นระเหยง่ายและดูดกลิ่นในของเหลว

2.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) แสดงรูปที่ 2.1 (ข) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือเป็นถ่านกัมมันต์แบบผงแล้วมาเติมตัวประสานทำให้เป็นเม็ดสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 เมช ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 และสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 40 เมช ได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ดที่ใช้งานมานานจนประสิทธิภาพลดลงแล้วสามารถนำไปทำการฟื้นฟูสภาพเพื่อให้อำนาจการดูดซับที่ผิวมากขึ้น ถ่านกัมมันต์แบบนี้นิยมใช้เป็นไส้กรองในเครื่องกรองน้ำ

2.2.3 ถ่านกัมมันต์แบบเป็นแท่ง (Extruded) แสดงรูปที่ 2.1 (ค) นิยมใช้ในเบตนิ่งเพื่อการดูดซับสารปนเปื้อนที่ต้องการอัตราการดูดซับสูงๆ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและแบบขึ้นรูปเป็นแท่งมีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้



รูปที่ 2.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (ก) แบบเกร็ดหรือเม็ด (ข) และแบบแท่ง (ค)

ที่มา: <http://www.neutron.rmutphysics.com>.

2.3 วิธีการกระตุ้นถ่าน

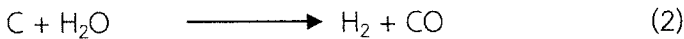
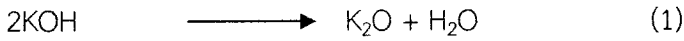
การกระตุ้น (Activation) เป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวที่มีความว่องไวมากขึ้นเพื่อเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ วัตถุประสงค์ของการกระตุ้นได้แก่

1. เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
2. เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้วซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่
3. เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ
4. การเผาสารที่เหลืออยู่ในถ่านและการขยายขนาดของรูพรุนที่เกิดอยู่ในถ่าน

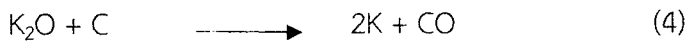
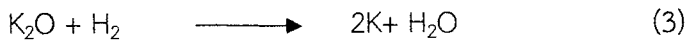
การกระตุ้นถ่านแบ่งได้เป็น 2 วิธีตามรายละเอียดดังนี้

1. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600 - 700 องศาเซลเซียส และล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นที่ติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งานปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ได้แก่อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ อุณหภูมิการกระตุ้น และระยะเวลาการกระตุ้น

การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบเมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูงมีปฏิกิริยาแสดงดังนี้



สมการที่ 1 และ 2 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

2. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่นการจัดเรียงตัวใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้นนิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆเช่นไอน้ำอิ่มตัวด้วย (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้น ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800 - 1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำร้อนด้วย เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายไปทำให้โครงสร้างภายในมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก (นภารัตน์, 2545)

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

1. ความหนาแน่น (Density) เป็นการทดสอบหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร โดยปริมาตรในที่นี้หมายถึงปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และปริมาตรของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้ขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric density) ต่ำจะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรยังขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาคด้วย คือ อนุภาคที่มีค่าความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง

2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) เป็นค่ามาตรฐานใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติถ่านกัมมันต์เนื่องจากสามารถทดสอบเปรียบเทียบได้กับถ่านกัมมันต์ทุกชนิดค่าพื้นที่ผิวที่มีในการรายงานคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการของบีอีที (BET) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซในการดูดซับ ใช้เครื่องทดสอบพื้นที่ผิวเป็นเครื่องวิเคราะห์โดยปกติถ่านกัมมันต์สามารถมีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 600 - 2,500 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ค่าความแข็ง/ค่าการขัดถู (Hardness/Abrasion number) บอกถึงความต้านทานการสึกกร่อน ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพได้ของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (Backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามชนิดวัสดุดิบและระดับที่ถ่านถูกกระตุ้นทดสอบความแข็งของถ่านด้วย Brinell hardness test

2.4.2 คุณสมบัติในการดูดซับ

คุณสมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์หาได้จากไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) ของของเหลวบนถ่านกัมมันต์ เมื่อนำไปดูดซับของเหลวตัวอย่างซึ่งมีการดูดซับ 2 แบบ ตามรายละเอียดดังนี้

1. การดูดซับไอโอดีน เป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยเป็นการหาจำนวน มิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ที่จุดซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ให้อยู่ในช่วง 0.007 - 0.03 นอร์มัล โมเลกุลของไอโอดีนมีขนาดเท่ากับ 0.54 นาโนเมตร วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86

2. การดูดซับเมทิลีนบลู สามารถบอกค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้สำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลูซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesoporous pore) คือจะมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร เนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดรัศมีโมเลกุลเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร (บุญรักษ์, 2543)

2.5 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

รูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถจำแนกได้ตามขนาดรัศมีของรูพรุน ได้แก่

1. แมโครพอร์ (Macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 100 - 200 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นดังนั้นแมโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

2. เมโซพอร์ (Mesopores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 1.5 - 100 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมพื้นที่ผิว 20 - 100 ตารางเมตรต่อกรัมตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนเป็นเมโซพอร์ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gels) อะลูมินาเจล (Alumina gels) และตัวเร่งปฏิกิริยาอะมิโนซิลิเกต (Aminosilicate catalyst)

3. ไมโครพอร์ (Micropores) ขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร ปริมาตร 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจำนวนมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัมบางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัมไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุดทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่ความดันต่างๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อมั่นว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่า “การกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัสดุดิบที่ใช้และ

วิธีการกระตุ้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) (ปรียาพา และพุทธธิดา, 2556)

2.6 สารเชื่อมประสาน

สารเชื่อมประสาน (Bonding agent) หมายถึง สารที่ใช้ผสมกับวัสดุที่ต้องการเพื่อสร้างการยึดเกาะหรือจับตัวกันให้แน่นและทำให้เกิดความแข็งแรงของวัสดุนั้นๆ

1. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพและติดไฟได้คล้ายกระดาษการใช้งานของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชันและแขวนลอยต่างๆข้นขึ้น (คือใช้เป็น Thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียวและทนการขีดข่วนได้

2. Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC) เป็นสารไม่มีกลิ่นและไม่มีรส มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะและเป็นสารคงสภาพ

3. แปะมัน มีคุณสมบัติพิเศษ คือเมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียว และมีคุณสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัวแปงมันที่จะให้ทำกาจะ ต้องเป็นแปงบริสุทธิ์ มีความเป็นกรดต่ำ ซึ่งก็คือแปงประเภทเด็กซ์ทรีน กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย

2.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

1. ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทั้งนี้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
2. ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ
3. ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่โดยถ่านกัมมันต์จะถูกดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอดำ
4. ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
5. ใช้ทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สีและกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
6. ใช้ในเครื่องกรองน้ำดื่มเพื่อกรองสี กลิ่นและสารอินทรีย์ในน้ำให้บริสุทธิ์
7. ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องตีแอมอลกอฮอล์เช่นไวน์วิสก็มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลืนที่ไม่ต้องการเช่นเอสเตอร์ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติดีขึ้น

2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

เครื่องแอกติเวเตอร์ (Activator) คือ เครื่องมือที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะภาพผลิตภัณฑ์ทั้งด้านเคมีและฟิสิกส์มีดังนี้

1. เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ซึ่งได้รับการออกแบบตามข้อกำหนดของ US.EPA โดยทำการเผาของเสียอันตรายที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 850 องศาเซลเซียสมีลักษณะเป็นท่อนอนยาวเอียงเล็กน้อยขณะทำงานจะหมุนตลอดเวลาภายในมีวัสดุทนไฟฉาบอยู่สามารถควบคุมระยะเวลาการเผา

ไหม้และปริมาณของเสียอันตรายที่จะเผาได้จึงทำปฏิกิริยาการเผาทำลายของเสียอันตรายได้อย่างสมบูรณ์และมีการป้อนไอน้ำเข้าไปยังท่อที่บรรจุถ่านโดยเคลื่อนที่ไปตามแนวราบและแนวรัศมีของท่อ

2. เตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) มีลักษณะเป็นท่อ สามารถเลือกก๊าซที่จะใช้เป็นบรรยากาศในการเผาได้หรือ Vacuum furnace เป็นเตาเผาควบคุมบรรยากาศให้เป็นสุญญากาศ บรรยากาศในการเผาจะพิจารณาเลือกใช้จากชนิดของวัสดุนั้นๆ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่เป็นออกไซด์เซรามิกสามารถเผาได้ในบรรยากาศปกติทั่วไป แต่ถ้าวัสดุที่เป็นโลหะหรือเซรามิกประเภทคาร์ไบด์หรือไนไตรด์ต้องมีการควบคุมบรรยากาศเป็นไนโตรเจน และมีการใช้ไอน้ำป้อนเข้าไปในท่อด้วยอัตราการไหลต่างๆเพื่อช่วยในการกระตุ้นวัสดุนั้นๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

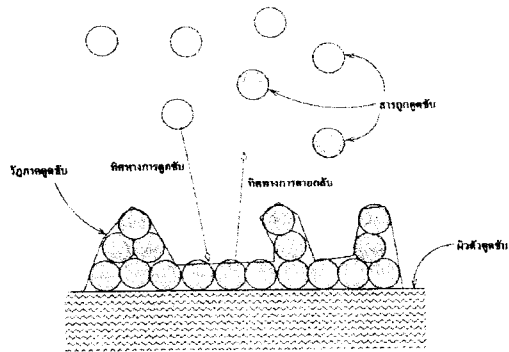
2.9 ทฤษฎีการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass transfer) มาสะสม (Accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวโดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) แสดงรูปที่ 2.2 ถ่านกัมมันต์มีความสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หลักการดูดซับ (Adsorption) การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆของสารอินทรีย์และคาร์บอนที่บริเวณผิวนอกของถ่านกัมมันต์โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ในทางทฤษฎีสารที่ถูกดูดซับอาจจะถูกปล่อยกลับออกมาได้แต่จากการสังเกตทดลองได้แสดงให้เห็นว่าสภาวะการปล่อยกลับออกมานั้นเกิดขึ้นได้ยากแบบคทีเรียมักจะสร้างกลุ่มอยู่ที่ผิวของถ่านกัมมันต์และกินบางส่วนของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้ซึ่งจะเป็นการช่วยคืนรูปของถ่านกัมมันต์บางส่วนและป้องกันการหลุดกลับของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้

ส่วนกระบวนการดูดซับนั้นจะอาศัยหลักการแพร่ของก๊าซหรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหรูพรุนภายในเม็ดถ่านซึ่งภายในจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดการจับยึดโดยความเป็นร่างแหยึดเหนี่ยวไว้ ยกตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีเช่นโอโซนถูกดูดซับเข้าไปและถูกคาร์บอนรีดิวซ์เป็นออกซิเจนซึ่งตัวโอโซนหรือออกซิเจนไม่ได้ไปสร้างหรือถูกจับไว้โดยถ่านกัมมันต์แต่อย่างใดส่วนกระบวนการดูดซับอีกประเภทคือการถูกดูดซับเข้าไปแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้สร้างพันธะที่หนาแน่นกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
2. ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
3. อุณหภูมิ
4. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ
5. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเท่านั้นเมื่อดูดซับสารถูกดูดซับเป็นไอ

2.10 การผลิตถ่านไม้จากเตาเผา

กระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization Process) เป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศเพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่านคาร์บอนส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันดินและก๊าซต่างๆ

ขั้นตอนการคาร์บอไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์เนื่องจากในการคาร์บอไนเซชันจะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุนโดยในระหว่างการคาร์บอไนเซชัน ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจนและน้ำจะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซและน้ำมันดิน จากนั้นจะได้ถ่านคาร์บอนซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างระหว่างผลึกโดยจะมีสารอินทรีย์ที่เป็นน้ำมันดินอุดช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งในส่วนประกอบของถ่านคาร์บอนที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนและคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย

2.10.1 ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27 - 197 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 การไพโรไลซิสโดยทำให้เกิดก๊าซและน้ำมันดินในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 - 497 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 3 การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านคาร์บอนโดยในช่วงนี้ น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมากที่ช่วงอุณหภูมิ 497 - 847 องศาเซลเซียส

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันก็เพื่อผลิตให้ได้ถ่านที่มีรูพรุนและการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ

2.10.2 หลักการการเผาถ่าน

การเผาถ่าน คือกระบวนการเปลี่ยนให้ไม้กลายเป็นถ่าน ซึ่งจำแนกขั้นตอนการเผา 4 ขั้นตอนคือ

1. การไล่ความชื้น (Dehydration) อุณหภูมิ 20 - 270 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 20 - 180 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นซึ่งก็คือน้ำที่อยู่ภายในเนื้อไม้ออกมาด้วยลักษณะควันจะเป็นสีขาวปนสีน้ำเงินอ่อน

ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 180 - 270 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่มีการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) จะสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสการจะทำให้ความร้อนใกล้เคียงกันทั่วทุกจุดของเตา ต้องพยายามรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 260 องศาเซลเซียสให้นาน ควันช่วงนี้จะมีสีเหลือง

2. การเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่าน อุณหภูมิ 270 - 400 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ

ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 270 - 300 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ไม่ต้องเติมฟืนหน้าเตาเตาจะมีความร้อนสะสมพอที่จะคลายความร้อนได้เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนที่สะสมไว้ในตัวเองที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียสและเซลลูโลสมีการสลายตัว

ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 300 - 400 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้สิ้นสุดที่ 400 องศาเซลเซียสเซลลูโลสจะมีการสลายตัวต่อเนื่อง และที่ 310 องศาเซลเซียส ลิกนินจะเริ่มสลายตัว

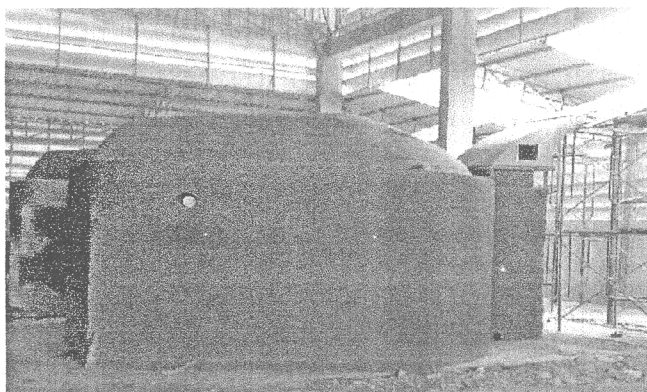
3. การทำถ่านให้บริสุทธิ์ (Refining technique) ถ่านจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เมื่อเผาเสร็จที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสแล้ว แต่ยังมีน้ำมันดิน (Tar) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งอยู่รวมทั้งคาร์บอนเสถียรยังต่ำอยู่ อุณหภูมิพื้นเตาประมาณ 500 องศาเซลเซียสควันจะมีสีเริ่มใสจะต้องทำการปิดช่องอากาศเข้าความร้อนจะมีการถ่ายเทลงมาที่พื้นอุณหภูมิก็จะใกล้เคียงกันที่ 500 องศาเซลเซียส

4. การทำให้เย็น (Cooling) ก่อนจะนำถ่านไม้มาใช้งานต้องปิดปล่องเตาทุกปล่องปล่อยให้ถ่านเย็นจนอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสสามารถลुकติดไฟได้เองเมื่อเจออากาศภายนอก

2.10.3 เตาเผาถ่านสำหรับผลิตถ่านไม้

การผลิตถ่านให้ได้คุณภาพสูงมีคุณสมบัติที่สมบูรณ์และปลอดภัยจากสารก่อมะเร็ง จะต้องเป็นเตาเผาถ่านที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียสโดยที่ตัวเตาต้องออกแบบมาให้สามารถทนต่อความร้อนสูงที่เกิดขึ้นได้รวมทั้งมีระบบการหมุนเวียนความร้อนภายในที่ดีซึ่งดั้งเดิมจะเป็นเตาที่เรียกว่า เตาอิวาเตะ โดยสามารถผลิตถ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีอยู่ด้วยกันหลายขนาด ปริมาณการผลิตก็แปรผันไปตามขนาดของเตา เตาที่ใช้เผาถ่านมาจนถึงปัจจุบันจะมี 3 รูปแบบคือ

1. เตาอิวาเตะ เป็นเตาเผาความร้อนสูงซึ่งเป็นภูมิปัญญาดั้งเดิมของชาวญี่ปุ่นปัจจุบันยังคงมีการเผาถ่านไม้โดยใช้เตานี้อยู่โดยถ่านที่ได้มาจะเป็นถ่านคุณภาพสูงนำไฟฟ้าได้สามารถดูดประจุไฟฟ้าจากร่างกายให้เกิดสมดุลในฮีโรซิมะใช้ถ่านนี้ไว้ใต้อาคารเพื่อซบกัมมันตภาพรังสีจากเตาและสามารถใช้ประโยชน์จากควันไม้จำนวนมากที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเผาถ่านมาผลิตเป็นน้ำส้มควันไม้และพลังงานความร้อนใช้ทำน้ำอุ่น ดังแสดงรูปแบบเตาในรูปที่ 2.3 เตาอิวาเตะมีโครงสร้างถาวรและมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการป้องกันและควบคุมกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้มากกว่าการผลิตในแต่ละครั้งจะได้ผลผลิตจากกระบวนการถ่านนี้ ถ่านไม้ประมาณ 25% ของเลวของน้ำส้มควันไม้ประมาณ 50% และแก๊สที่กลิ่นตัวไม้ได้ 25% (สมพร, 2552)



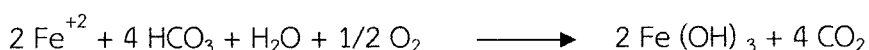
รูปที่ 2. 3 เตาเผาอิวาเตะสำหรับผลิตน้ำส้มควันไม้

2. เตาหลุมเตาผีเตาหลุมผีหรือเตาอบ (Ground pit or heap kiln) จะลักษณะเป็นหลุมที่ใช้บรรจุไม้สำหรับเผาโดยมีการเผาแบบใช้วัสดุ เช่นดิน ทราเยาะมาเป็นตัวกลบ รูปแบบนี้จะมีการลงทุนต่ำแต่ผลผลิตก็ต่ำด้วยเช่นกัน

3. เตาดินหรือเตาอิฐ (Mud or Brick kiln) จะเป็นเตาที่สร้างกระบวนการเผาได้อย่างเป็นระบบมากกว่าแบบเตาหลุมผี ซึ่งเตาแบบจีนมีความนิยมและผลิตถ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นเตาที่มีหลังคาโค้งรูปทรงของเตามีลักษณะคล้ายไข่สามารถกระจายความร้อนได้ทั่วถึงทั้งเตา

2.11 สารละลายเหล็กในน้ำ

เหล็ก (Iron) เป็นโลหะที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปที่ผิวโลกมีอยู่ที่ผิวน้ำและน้ำบาดาลในรูปของสารละลายและตะกอน เกิดจากสารประกอบของเหล็กในดินมีกลิ่นเฉพาะตัวและมีรสที่ไม่พึงประสงค์ เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาลมีอยู่ 2 แบบคือ Fe^{+2} (Ferrous) และ Fe^{+3} (Ferric) โดย Fe^{+2} สามารถละลายน้ำได้และไม่คงที่ (Unstable) เมื่อถูกอากาศจะเปลี่ยนไปเป็นรูปของ Fe^{+3} ซึ่งไม่สามารถละลายน้ำได้และจะตกเป็นตะกอนในตอนแรกน้ำจะใสแต่เมื่อทิ้งไว้สักครู่ น้ำจะกลายเป็นสีน้ำตาลขุ่นและมีตะกอนของสนิมเหล็กนอนก้นดังปฏิกิริยา

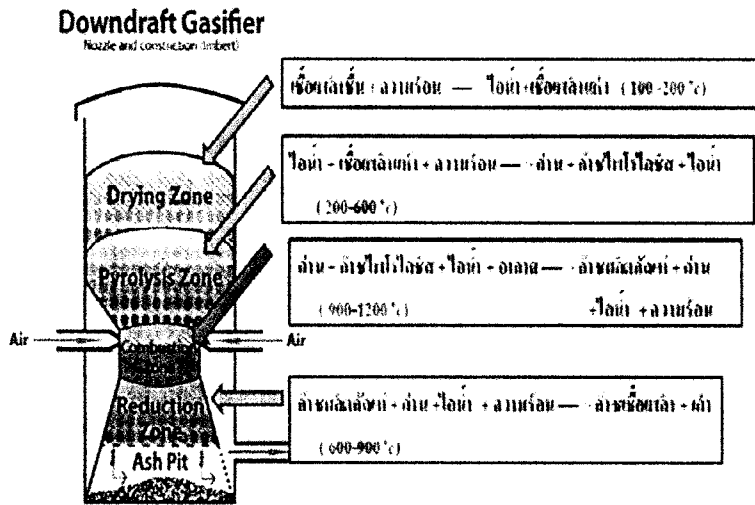


ดังนั้นรูปของเหล็กจึงขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ เหล็กในแหล่งน้ำใต้ดินจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต $Fe(HCO_3)_2$ ซึ่งละลายน้ำ แต่เมื่อนำขึ้นมาจากใต้ดินทิ้งไว้ในบรรยากาศสักครู่ก็จะขุ่นและตกตะกอนกลายเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$ มีสีเหลืองแดงปัญหาที่เกิดขึ้นคือสภาพน้ำบาดาลในธรรมชาติมักจะมีเหล็กในปริมาณสูง

เหล็กถือว่าเป็นธาตุที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แต่ทำให้เกิดปัญหากับผู้ใช้ น้ำบาดาลเช่นทำให้ น้ำขุ่นเกิดปัญหาในการซักล้างทำให้เกิดคราบสนิมที่สุขภัณฑ์ถึงแม้ว่าไม่มีพิษต่อร่างกายแต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปร่างกายจะขับออกมาไม่หมดทำให้เหลือสะสมไว้ในตับทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับตับได้กำจัดได้ด้วยการกรองหรือตกตะกอน สำหรับคุณภาพน้ำเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลกน้ำบริโภคต้องมีปริมาณเหล็กไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำอุปโภคมีปริมาณเหล็กไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

2.12 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

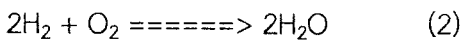
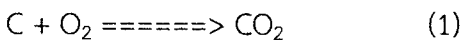
แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) คือ การเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางของกระบวนการ เช่น อากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งกระบวนการนี้จะมีแตกต่างจากกระบวนการเผาไหม้ (combustion) โดยการเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) อย่างสมบูรณ์ในหนึ่งกระบวนการ แต่สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีภายในของคาร์บอนในชีวมวลไปเป็นแก๊ส (syngas) ที่สามารถเผาไหม้ได้ (combustible Gas) โดยอาศัยปฏิกิริยา 2 กระบวนการ โดยก๊าซที่ผลิตได้จะมีคุณภาพที่ดีกว่าและง่ายต่อการใช้งานกว่าชีวมวล ยกตัวอย่างเช่นสามารถใช้เดินเครื่องยนต์แก๊ส (gas engine) และกังหันแก๊ส (gas turbine) หรือใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวต่อไป (liquid fuels) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อนโดยอาศัยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า



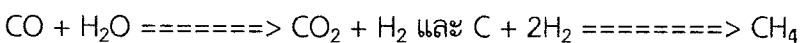
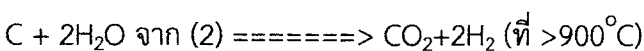
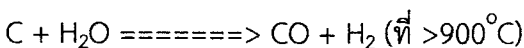
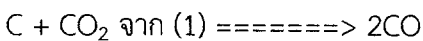
รูปที่ 2.4 แก๊สซิฟิเคชันชนิด Downdraft (<http://www.kmutt.ac.th/TEC2/newweb/>)

ห้องปฏิกรณ์ของแก๊สซิฟิเคชัน คือ แก๊สซิไฟเออร์ (gasifier) แบ่งเป็น 4 โซน คือ

1. Combustion Zone or Oxidation Zone เป็นส่วนที่นำอากาศเข้าไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงซึ่งจะเกิดการปฏิกิริยา ระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจน กับออกซิเจนในอากาศที่ส่งเข้ามาและที่อยู่ในเชื้อเพลิง ผลของการปฏิกิริยาจะได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และพลังงานความร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 1000-1500 °C จะคายพลังงานความร้อนไปยังโซนต่อไป



2. Reduction Zone เมื่อก๊าซร้อนที่ปฏิกิริยาจากโซนแรกไหลผ่านมาและอุณหภูมิลดลงเหลือ 500- 900 °C จะเปลี่ยนก๊าซที่เผาไหม้ได้อีกครั้ง คือ คาร์บอนไดออกไซด์เมื่อไหลผ่าน คาร์บอนที่ความร้อนระดับนี้ จะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งสามารถติดไฟได้



ดูจากสมการข้างถ้าเราให้มี CO₂ มากขึ้น ทำให้ CO มากขึ้น และยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1100°C CO₂ เปลี่ยนเป็น CO เกือบหมด ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบก็สูงตาม

3. Pyrolysis Zone พลังงานความร้อนถูกคายจากโซน Reduction ก่อนหน้า เผาไหม้ชีวมวลที่เราใส่เข้าไป ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ 200-500 องศา ทำให้เกิด เมทานอล กรด และ น้ำมันดิน และกลายเป็นของแข็งในรูปของคาร์บอนและจะไปปฏิกิริยาต่อไปในโซน Reduction ต่อไปผลการปฏิกิริยาดังนี้

เชื้อเพลิงชีวมวล + ความร้อน 200-500°C

=====> คาร์บอน (ถ่าน) + CO + CO₂ + H₂O + CH₄ + C₂H₆ + ACID + Tar(น้ำมันดิน)

4. Drying Zone โซนนี้ความร้อนจะลดลงเหลือไม่มาก ทำให้สารระเหยสลายตัวไปคงเหลือแต่ความชื้น ทำให้เป็นไอน้ำไปมีค่าอุณหภูมิ 100-200°C

ผลผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน นอกจาก syngas แล้ว ยังมีน้ำมันดิน (tar) และอาจมีสารมีพิษอื่น ซึ่งจะต้องกรองออกก่อน

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

Kumaret และคณะ (2006) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพาราโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำซึ่งมีตัวแปรศึกษา คือ เวลา อุณหภูมิ และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการกระตุ้น คุณสมบัติของถ่านที่ทำการวิเคราะห์ คือค่าไอโอดีนค่าการฟอกสีเมทิลีนบลู และพื้นที่ผิว จากผลการทดลองพบว่าไม้ยางพาราสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600, 700, และ 750 องศาเซลเซียสขนาด 0.46 มิลลิเมตรใช้เวลาการเผา 4 ชั่วโมงพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดถึง 765 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาค 0.46, 0.93, และ 1.31 มิลลิเมตรพบว่าที่ขนาดอนุภาค 0.46 มิลลิเมตรทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมีและค่าเมทิลีนบลูมีค่าสูงกว่าที่ขนาดอนุภาค 0.93 และ 1.31 มิลลิเมตร

นำพล (2555) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามเปรี้ยวโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และไอน้ำในสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านต่อปริมาตรของสารละลายตัวกระตุ้นเท่ากับ 1:3ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเผาจากนั้นจึงวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ได้แก่ค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ค่าการดูดซับฟินอล การดูดซับเมทิลีนบลูเปอร์เซ็นต์เถ้า และความชื้นจากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัม

มันต์ คือ การเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ในสภาวะอับอากาศ และการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นมีค่ามากกว่าถ่านที่เผาอุณหภูมิที่ 400, 500, และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียสมาทำการทดลองดูดซับฟีนอลพบว่าถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำแสดงค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลที่ใกล้เคียงกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและต่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แต่ยังมีค่าการดูดซับฟีนอลที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าประมาณ 4 - 5 เท่าจากการศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้วมีค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูสูงกว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและการกระตุ้นด้วยไอน้ำเมื่อเอามาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่มีการดูดซับเมทิลีนบลูที่ได้นั้นดีมาก

2.13.2 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นต่างๆ

ปัญญา (2556) ศึกษาการเตรียมถ่านคาร์บอนและถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวางสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับโครเมียม กระตุ้นถ่านคาร์บอนด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอน คือ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ใช้ถ่านคาร์บอนต่อ KOH อัตราส่วน 1 ต่อ 1 เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนต่อปริมาณถ่านเท่ากับ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์การค้า (Fluka, 50120) ซึ่งกำจัดได้เพียง 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม

Sun และ Jiang (2012) การเตรียมและคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยโดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ทำการไพโรไลซิสเปลือกกล้วยในกระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้การป้อนแก๊สไนโตรเจนอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 400 - 650 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยการป้อนไอน้ำ 4 - 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ศึกษาผลของอุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการกระตุ้นที่ 40 - 60 นาที สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียสป้อนไอน้ำด้วย 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมงใช้เวลา 60 นาที พบว่ามีพื้นที่ผิวสูงสุด 948 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรทั้งหมด 0.988 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ปริมาณการดูดซับไอโอดีน 1.326 กรัมต่อกรัม ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู 265 มิลลิกรัมต่อกรัมและค่าความแข็ง 94.7%

สิงหนเดช (2553) การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเก็บพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งงานวิจัยนี้เตรียมถ่านกัมมันต์ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH และทางกายภาพด้วยก๊าซ CO₂ ที่อุณหภูมิการเผา 850 องศาเซลเซียสถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบ Mesoporus ด้วยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจาก 20-28% และ 27-45% สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยอัตราส่วนของ KOH/Char = 1 และ 4 ตามลำดับค่าพื้นที่ผิว (BET) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยอัตราส่วน KOH/Char = 1 และใช้เวลาการกระตุ้นด้วย CO₂ เป็นเวลา 20 - 150 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 222 - 627 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยอัตราส่วน KOH/Char = 4 ใช้เวลาการกระตุ้นเหมือนกันมีค่า BET

เพิ่มขึ้นจาก 682 -1120 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้ได้ค่าพื้นที่ผิวที่สูงใกล้เคียงกับของถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่หลากหลายเช่น เป็นวัสดุกักเก็บก๊าซและใช้เป็นวัสดุในการดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสียหรือการทำน้ำดื่มบริสุทธิ์สำหรับการนำไปทดสอบการดูดซับโลหะหนักของไอออนของ Pb^{2+} , Cd^{2+} , และ Cr^{+3} ผลการดูดซับถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดของมะม่วงหิมพานต์นี้สามารถดูดซับไอออนของ Pb^{2+} , Cd^{2+} , และ Cr^{+3} ได้ 99.6% ที่ pH 6.5, 99.4% ที่ pH 6.0, และ 99.3% ที่ pH 3.5 ตามลำดับ ข้อมูลจากการทดลองนำไปใช้คำนวณไอโซเทอมการดูดซับด้วยสมการของ Freundlich และ Langmuir ได้ค่าความสามารถการดูดซับมากที่สุดของไอออน Pb^{2+} , Cd^{2+} , และ Cr^{+3} มีค่าเป็น 28.90 มิลลิกรัมต่อกรัม 14.29 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 13.93 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.13.3 รูปแบบของถ่านกัมมันต์

กิตติพงษ์ และคณะ (2555) การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากผงถ่านวัสดุชีวมวล 3 ชนิด ด้วยชุดเกลียวอัดถ่านอัดแท่งชุดผลิตถ่านอัดแท่งที่ใช้ในการทดสอบมีส่วนประกอบได้แก่ถังผสมเกลียวลำเลียงถึงบ่อนชุดเกลียวอัดชุดส่งกำลังและโครงหลักในการศึกษาได้นำชนิดผงถ่านมาทดสอบ 3 ชนิดคือผงถ่านแห้งมันสำปะหลังผงถ่านไม้รวม และผงถ่านกะลามะพร้าวให้ความเร็วเกลียวอัด 3 ระดับคือ 115, 130, และ 145 รอบต่อนาที ผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบทำงานได้เหมาะสมที่อัตราการบ่อน 140 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและความเร็วเกลียวอัด 145 รอบต่อนาที เมื่อใช้ส่วนผสมไม้รวมผงถ่านกะลามะพร้าวแป้งมันสำปะหลังและน้ำในสัดส่วน 0.5:0.5:0.15:1 โดยน้ำหนักทำให้เครื่องต้นแบบมีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 131.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พลังงานจำเพาะที่ใช้เฉลี่ย 16.16 วัตต์ ชั่วโมงต่อกิโลกรัมถ่านอัดแท่งมีความหนาแน่น 676.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความแข็งแรง 0.235 เมกะปาสคาลค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง 5527.3 แคลอรีต่อกรัม และมีประสิทธิภาพการใช้งาน 27.79 - 29.56% ถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอยู่ที่ 15.01 - 1.62 เซนติเมตร, 4.12 - 0.05 เซนติเมตรและ 1.23 - 0.12 เซนติเมตรตามลำดับและความชื้นเฉลี่ย 7.13% (db.) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดนิยมใช้ในการดูดซับสีและกลิ่นในการทำน้ำประปา ใช้ในเครื่องกรองน้ำหรือเครื่องทำน้ำให้บริสุทธิ์ และใช้เป็นวัสดุทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เป็นต้น

ดารณี และปิยะนุช (2554) เตรียมพอลิเมอร์ผสมในสภาวะสารละลาย (Solution Blending) โดยPVA (Mw 125,000 g/mol, BDH Chemical Ltd), Na-CMC (Mw 700,000g/mol, Acros Organics) และแป้งอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักเป็น 50:50:0, 45:45:10, 40:40:20, 35:35:30 และ 30:30:40 โดยชั่งน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมให้มือน้ำหนักรวม 0.50 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วที่มีฝาปิด (Screw-top Glass Bottle) แล้วเติมสารเพิ่มความหนืดหยุ่น คือ กลีเซอรอล (99 %, Sigma aldrich) ในปริมาณร้อยละ 0 และ 15 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำร้อน 20.0 ml คนสารละลายด้วยก้อนกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเทสารละลายพอลิเมอร์ผสมลงในแม่พิมพ์รูปร่างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 cm วางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อให้ตัวทำละลายค่อยๆ ระเหยออกไปเป็นระยะเวลาประมาณ 7 วัน จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องจน

น้ำหนักคงที่ ลอกฟิล์มออกจากแม่พิมพ์ เก็บฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไว้ในเดสิเคเตอร์ภายใต้สุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 25°C ศึกษาการขึ้นรูปของชิ้นงานโดยนำผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมาบดผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 3% โดยน้ำหนักเป็นสารยึดเหนี่ยว (Binder) โดยใช้อัตราส่วนผง 0.5 กรัมต่อ PVA 3 wt.% 1 หยดแล้วนำมาอัดขึ้นรูป

2.13.4 การใช้ถ่านกัมมันต์ในดูดซับและกรองน้ำ

วีโล และสุภาภรณ์ (2543) การกำจัดโลหะโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ชนิด เกล็ดที่ทำจากกะลามะพร้าว โดยทำการทดลองในระบบกะเพื่อศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายโครเมียมที่มีต่อประสิทธิภาพการ กำจัดโครเมียม จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมขึ้นอยู่กับสัดส่วน ระหว่างถ่านกัมมันต์และโครเมียมเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม ที่เหมาะสมคือ 2.5 เมื่อสารละลายโครเมียมมีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ความสามารถของ ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะโครเมียมจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับโลหะโครเมียม ด้วยถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์ม ซึ่งตัดแปลงจากไอโซเทอร์มของ Freundlich และสามารถหาสมการอัตราการกำจัดโลหะโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา รีดอกซ์และการดูดซับได้ดังนี้ สูตร นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (VI) ในหอดูดซับซึ่งบรรจุถ่านกัมมันต์ชนิด เกล็ด โดยทำการทดลองในห่อซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.05 เมตร และสูง 1 เมตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสาร ละลายเข้าเข้า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม จะเพิ่มขึ้น จากศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง Bed Depth Service Time (BDST) เพื่อทำนายระยะเวลาใช้งานของหอดูดซับ พบว่าแบบจำลอง BDST สามารถใช้ทำนายระยะเวลา ใช้งาน (service time) ของหอดูดซับซึ่งบรรจุถ่านกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา

ธีรยุทธ และทิพวัลย์ (2552) การบำบัดน้ำย้อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคโฟโตแคตาไลติกและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีวัตถุประสงค์หลักในการลดความเข้มข้นของน้ำสีเดเร็กซ์ สิริแอกทีฟและสีเบสิค ที่เหลือจากกระบวนการย้อม โดยทำการศึกษาจากปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0, 5, 10, และ 15 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 2, 4, 6, และ 8 ชั่วโมง ปริมาณของ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น 5, 10, และ 15 กรัมต่อลิตร และเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 1, 2, 3, และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้นำมาเปรียบเทียบความเข้มข้นด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำคือปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 6 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร และใช้เวลา 2 ชั่วโมง หลังการบำบัดจะมีความเข้มข้นลดลงจากก่อนที่จะบำบัด

วารุณี (2542) การคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจากการขจัดไอระเหยของกรดน้ำส้มเข้มข้นนี้ ทำได้โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อใช้จนกระทั่งประสิทธิภาพของการดูดซับลดลงจนไม่เหมาะสมที่จะใช้งานต่อไปแล้ว จำเป็นต้องทิ้งและเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ใหม่มาใช้แทน ดังนั้นจึงมุ่งเน้นในการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับไอระเหยของกรดน้ำส้มเข้มข้นแล้ว มาทำการคืนสภาพ

(Regeneration) โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการคืนสภาพ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วนี้เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่วิธีที่เลือกใช้คือ การทำให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายอัลคาไลน์และตัวทำละลายอินทรีย์ โดยทำการศึกษาตัวแปร ได้แก่ ชนิด ความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์และระยะเวลาของการคืนสภาพ ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคืนสภาพ โดยใช้ทั้งสารละลายอัลคาไลน์และตัวทำละลายอินทรีย์ มีค่าการดูดซับต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคืนสภาพโดยใช้สารละลายอัลคาไลน์เพียงอย่างเดียว และสรุปได้ว่า การคืนสภาพถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีปริมาตร 17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว 10 กรัม ระยะเวลาของการคืนสภาพ 30 นาทีและ 60 นาที เป็นสภาวะการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด

2.14 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร

Miller 2004. จดสิทธิบัตรเลขที่ US 5736481 A เกี่ยวกับการอัดขึ้นเม็ดของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic) เครื่องอัดขึ้นเม็ด (extruder) ที่มีการใช้ส่วนผสมประกอบ คือ อนุภาคถ่านกัมมันต์ ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ (organic binder) และน้ำ โดยเม็ดที่ได้จะผ่านเข้าอุปกรณ์กลิ้ง (tumbling equipment) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อการทำแห้ง อุปกรณ์กลิ้งจะทำให้เม็ดถ่านกัมมันต์ที่ได้มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกของผิวเม็ด และมีรูปแบบที่สวยงาม รวมถึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดและลดช่องว่างระหว่างเม็ด ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์อันเนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของคาร์บอนและการเพิ่มความจุเชิงปริมาตรในการทำงาน (volumetric working capacity) สำหรับการใช้ในงานการดูดซับและคายซับไอระเหยประโยชน์อีกอย่าง คือ จะช่วยลดปริมาณฝุ่นที่ติดไปกับคาร์บอน

McCrae et al. 2004. จดสิทธิบัตรเลขที่ US 4002587 A เกี่ยวกับขึ้นรูปเพื่อทำรูปแบบ (shape) ของถ่านกัมมันต์ โดยได้เปิดเผยวิธีการทำถ่านกัมมันต์ขึ้นรูปที่มีรูปแบบใหม่ ด้วยการเชื่อมร่างแหโครงข่ายของเซลลูโลสที่เป็นโพลิเมอร์ โดยใช้สารเชื่อมประสาน เช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส (sodium carboxymethylcellulos, CMC) แป้ง (starch) ลิกนิน (lignin) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) สำหรับเชื่อมต่อกภายในโครงข่ายคาร์บอนสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ การทำเช่นนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงเชิงกลและทนทานต่อการแตกเมื่อสัมผัสกับน้ำ การเชื่อมประสานจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 270°C เทคโนโลยีการเชื่อมประสานนี้สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีรูปแบบต่างๆ โดยได้นำเสนอขั้นตอน คือ ทำการผสมถ่านกัมมันต์ผงกับสารเชื่อมประสานโพลิเมอร์ ตัวทำละลาย สารปรับ pH และ สารเชื่อมโครงข่ายในเครื่องผสม (mixer) ให้ได้วัสดุผสม หลังจากนั้นขึ้นรูปวัสดุและทำให้เกิดการเชื่อมโครงข่ายด้วยการให้ความร้อนที่ 270°C จุ่มถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วลงในสารละลายที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงและทำการอบแห้งวัสดุที่ได้

David Von. (2005) จดสิทธิบัตรเลขที่ EP 1596982 A2 เกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการสำหรับการผลิตถ่านและการกระตุ้น (activation) ถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้เตาเผาแบบทำงานได้หลายประเภท (multipurpose) นั่นคือ ใช้กับการผลิตถ่านที่มีคุณภาพสูงจากวัสดุตั้งต้นที่เป็นไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และสามารถใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถเลือกได้ด้วยกระบวนการที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง สามารถช่วยเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งมีขั้นตอนกระบวนการ คือ เตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปชิ้นเล็กๆ ของไม้ (chip) เท่ากับขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ใส่ไม้ที่เตรียมได้เข้าสู่เตาเผาไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าแก่เตาเผาให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ก็จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้มาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำชิ้นเล็กๆขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 3 เซนติเมตรของบริษัท พาราวีเนียร์ 2002 จำกัด ตั้งอยู่ 10 หมู่ 2 ตำบลในควน อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง เป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของถ่านไม้ยางพารา

3.2 สารเคมี

3.2.1 สารเคมีสำหรับการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด

1. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
2. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก
4. น้ำกลั่น

3.2.2 สารเคมีสำหรับเป็นสารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นเม็ดถ่าน

1. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

2. แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)
3. น้ำมันดิน (Tar)

3.2.3 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก
2. สารละลายน้ำแป้ง
3. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (I_2) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
4. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
5. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
6. โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3)
7. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
8. น้ำกลั่น

3.2.4 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

1. สารละลายเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$)
2. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($KHPO_4$)
3. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

3.2.5 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารละลายเหล็กในน้ำ

1. ไฮดรอกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ($NH_2OH.HCl$)
2. 1, 10 - ฟีนานโทโรลีนโมโนไฮเดรต ($C_{12}H_8N_2.H_2O$)
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4)
4. สารละลายเหล็ก (Fe^{2+})
5. กรดคาร์บอกซิลิก (CH_3COOH)
6. โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa)

3.3 อุปกรณ์

3.3.1 อุปกรณ์สำหรับการกระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. โถดูดความชื้น (Desiccators)
3. เครื่องกรองสุญญากาศ
4. ปีกเกอร์
5. กระบอกลวด
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ปีเปต

8. แท่งแก้วคนสาร
9. กระจกครอบ
10. ถาดสแตนเลส
11. เครื่องวัดพีเอชมิเตอร์
12. ตู้อบ
13. เตาเผาไฟฟ้าแบบท่อ (Tube furnace)
14. ท่อสแตนเลส
15. สายยางซิลิโคน

3.3.2 อุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นเม็ดถ่าน

1. เครื่องทดสอบ Hardness
2. เครื่องอัดเม็ด (Extruder)
3. เครื่องชั่ง
4. เครื่องบดละเอียด
5. ภาชนะสำหรับผสมผงถ่าน

3.3.3 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

1. เครื่องชั่ง
2. นาฬิกาจับเวลา
3. โถดูดความชื้น
4. ปีกเกอร์
5. ขวดรูปชมพู่
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ปีเปต
8. บิวเรต
9. กระจกตวง
10. กระจกครอบ
11. แท่งแก้วคนสาร
12. ซ้อนตักสาร
13. หลอดหยด

3.3.4 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์เมทิลีนบลู

1. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
2. เครื่อง UV-VIS Spectrometer
3. เครื่องชั่ง
4. ปีกเกอร์

5. ขวดรูปخمพู
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ปิเปต
8. กระจกตวง
9. แท่งแก้วคนสาร
10. ซ้อนตักสาร

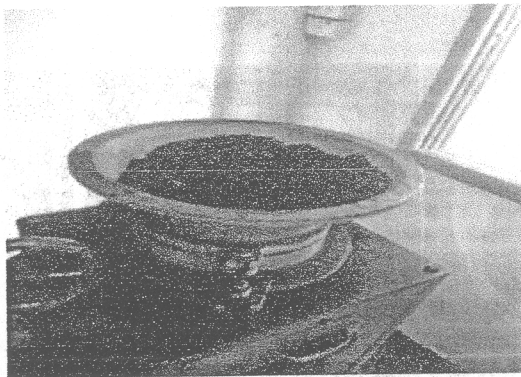
3.3.5 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกรองน้ำของถ่านกัมมันต์

1. ท่อพีวีซี
2. ป้อน้ำ
3. วาล์วเปิด/ปิด
4. ถังน้ำ 200 ลิตร
5. ก๊อกน้ำ
6. ขวดสีใส่เก็บตัวอย่าง
7. เครื่องแก้วต่างๆที่ใช้ในการทดลอง
8. นาฬิกาจับเวลา

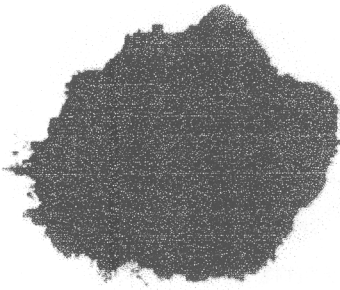
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมถ่านไม้ยางพาราผง

นำถ่านไม้ยางพาราชิ้นเล็กๆมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด Ball mill แสดงรูปที่ 3.2 และร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานให้มีขนาดความละเอียด 200 - 400 เมช เพื่อให้ได้ผงถ่านบดละเอียดแสดงรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด



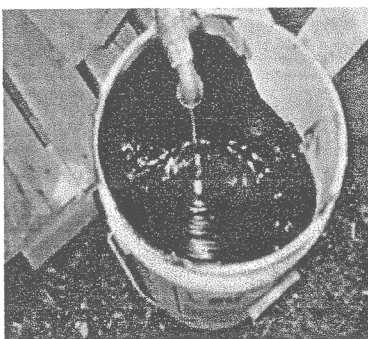
รูปที่ 3.3 ผงถ่านบดละเอียด

3.4.2 การอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้

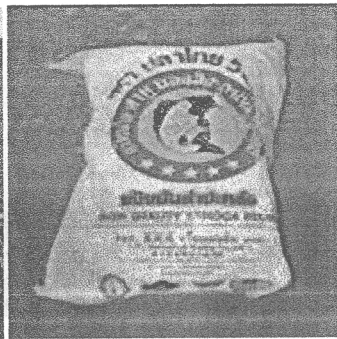
นำผงถ่านที่ได้มาทำการผสมกับสารเชื่อมประสาน 3 ชนิด คือ น้ำมันดิน (Tar) แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) แสดงรูปที่ 3.4 โดยมีสัดส่วนดังนี้ผงถ่าน:สารเชื่อมประสาน:น้ำคือ 1:0.30:1, 1:0.35:1 และ 1:0.40:1 โดยน้ำหนักของแต่ละสารเชื่อมประสาน จากนั้นนำผงถ่านที่ผสมสารเชื่อมประสานแล้วมาอัดขึ้นเม็ดโดยเครื่องอัดเม็ดแสดงรูปที่ 3.5 มีส่วนประกอบหลัก คือ ใบมีดตัด มอเตอร์ สกรูอัด สายพานและหน้าตายัด แสดงรูปที่ 3.6 เมื่อถ่านไหลเข้าสู่หน้าตายที่มีแผ่นเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 8 มิลลิเมตร แล้วตัดด้วยใบมีดเพื่อให้ได้ความยาวของเม็ดถ่านไม้ 1 เซนติเมตรและนำไปตากให้แห้งแสดงรูปที่ 3.7 เพื่อศึกษาหาชนิด ขนาดและสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเชื่อมประสานสำหรับการขึ้นเม็ดถ่าน และวัดความแข็งของเม็ดถ่านโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง แสดงรูปที่ 3.8 และร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.1 (นภารัตน์, 2556) ได้ดังนี้

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแตกตัวของเม็ดในน้ำ

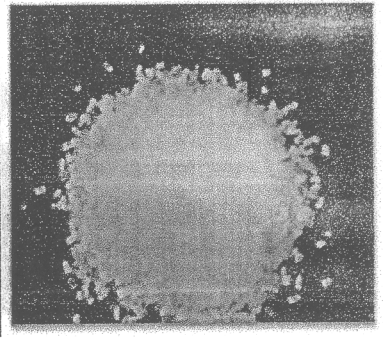
$$\text{ร้อยละการแตกตัว} = \frac{\text{น้ำหนักเม็ดถ่านแห้งก่อนแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักเม็ดถ่านแห้งหลังแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักเม็ดถ่านแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.1)$$



(ก)

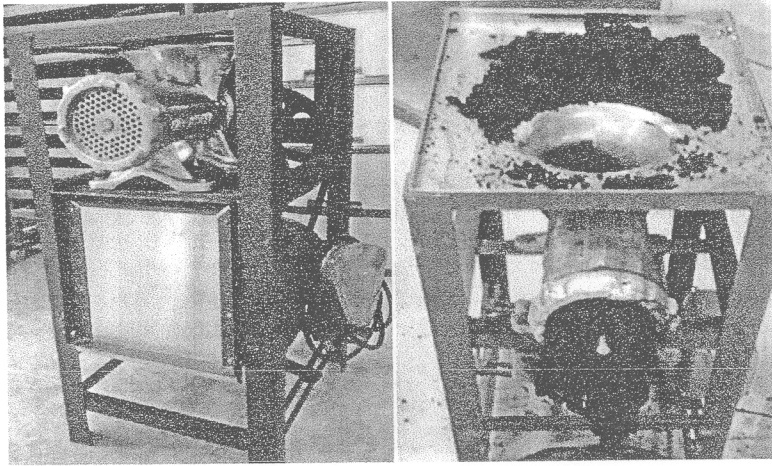


(ข)

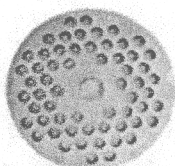


(ค)

รูปที่ 3.4 สารเชื่อมประสานน้ำมันดิน (ก) แป้งมันสำปะหลัง (ข) และ PVA (ค)



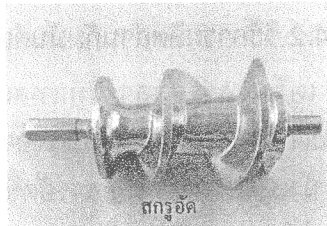
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดชิ้นเม็ดถ่านไม้



หน้าคายอัด



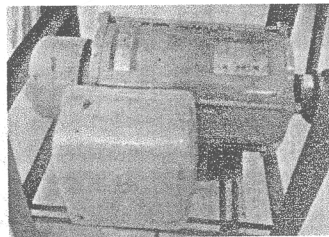
ใบตัด



ถกรูด

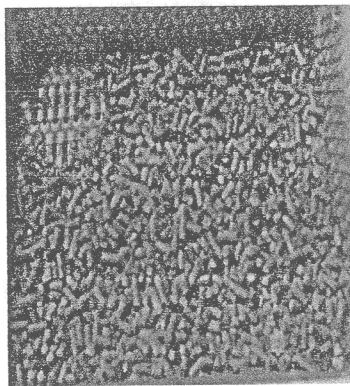


สายพาน

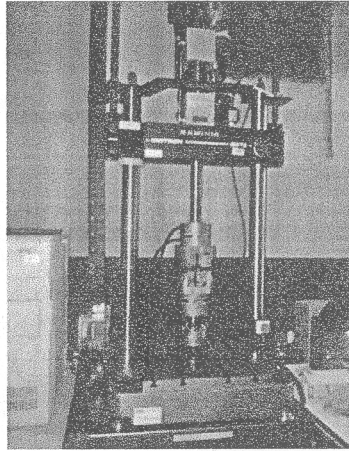


มอเตอร์

รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของเครื่องอัดชิ้นเม็ด



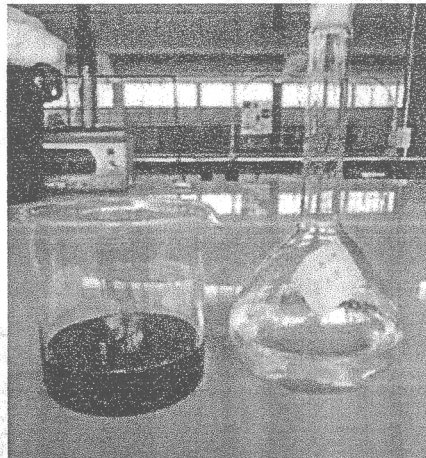
รูปที่ 3.7 เม็ดถ่านไม้ที่ได้จากการอัด



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของเม็ดย่าน

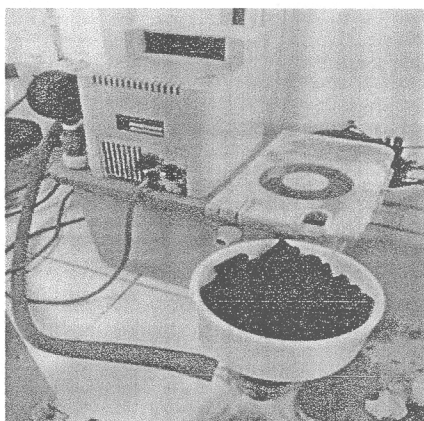
3.4.2 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดย่าน

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ โดยชั่งสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 112 กรัม เจือจางด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
2. นำเม็ดย่านที่ได้จากการอัดขึ้นเม็ดย่าน 200 กรัม แช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้แสดงรูปที่ 3.9 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 การแช่เม็ดย่านด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

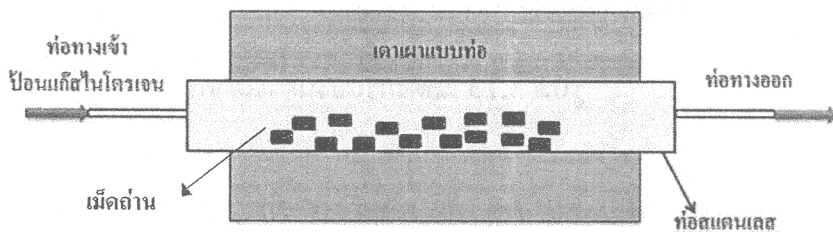
3. กรองเม็ดย่านที่แช่และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแสดงรูปที่ 3.10 กรองเอาเม็ดย่านออกจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



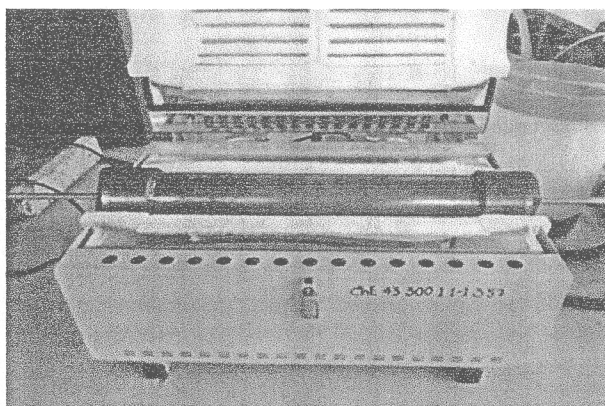
รูปที่ 3.10 แสดงการกรองเอาเม็ดถ่านออกจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

4. นำเม็ดถ่านบรรจุในท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยาว 54 เซนติเมตร มีช่องทางเข้าสำหรับป้อนไนโตรเจนและช่องทางออกสำหรับระบายออก จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) แสดงแผนภาพเตาเผาแบบท่อสำหรับการเผากระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ดังรูปที่ 3.11

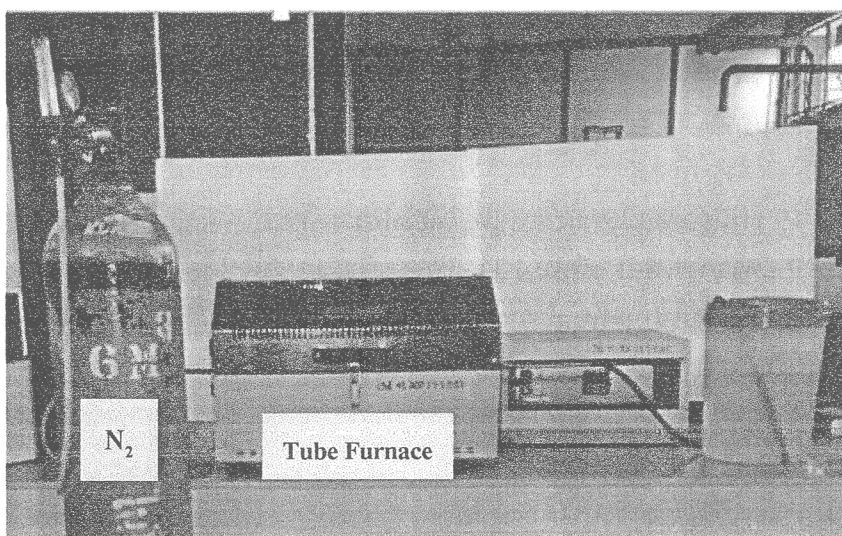
5. เพิ่มอุณหภูมิเตาเผาแบบท่อเพื่อให้ความร้อนกับท่อสแตนเลสที่บรรจุถ่านไว้ แสดงดังรูปที่ 3.12 ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พร้อมกับป้อนก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตรา 4 ลิตรต่อนาที เข้าไปในท่อเพื่อไล่อากาศไม่ให้ถ่านเกิดการลุกติดไฟ ดังรูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการกระตุ้นถ่าน



รูปที่ 3.11 แผนภาพเตาเผาแบบท่อสำหรับการเผากระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์



รูปที่ 3.12 เตาเผาแบบท่อสำหรับการเผากระตุ้นถ่านเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์

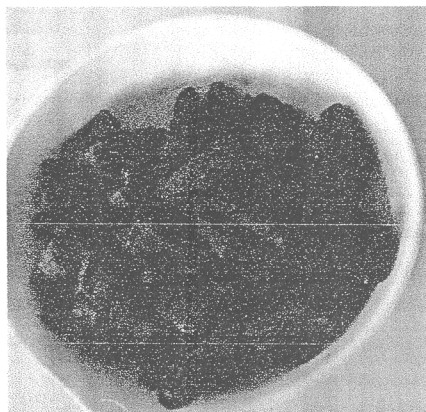


รูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการเผากระตุ้นถ่าน

6. เผาในช่วงอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 600, 700, และ 800 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้น 30, 60, 90, และ 120 นาที เพื่อเปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

7. เมื่อครบกำหนดเวลาในการกระตุ้นหยุดให้ความร้อนเพื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นค่อยนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ ออก

8. ทำการล้างสารเคมีที่ตกค้างในถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 5% แช่ทิ้งไว้ 15 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่า pH เป็นกลาง จากนั้นทำการอบถ่านกัมมันต์ที่ล้างแล้วที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

3.4.3 ตรวจสอบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

1. นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาหาค่าหนักแห้งด้วยการอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของผลได้ของถ่านกัมมันต์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ดังนี้

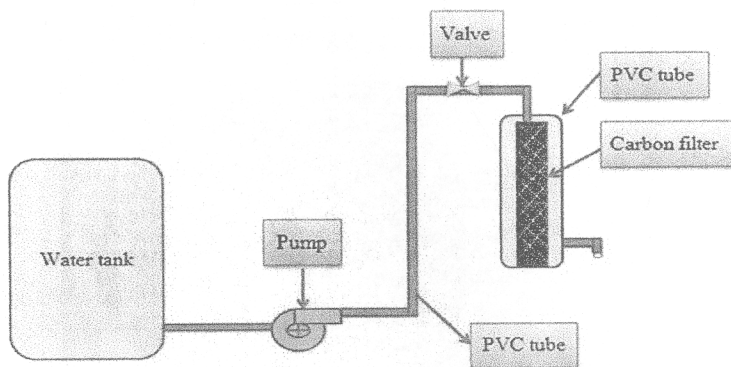
$$\text{ร้อยละผลได้} = (\text{น้ำหนักถ่านหลังกระตุ้น/น้ำหนักถ่านก่อนกระตุ้น}) \times 100 \quad (3.2)$$

2. หาคคุณสมบัติด้านการดูดซับ ประกอบด้วยการวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์วิเคราะห์ตาม ASTM D4607-86 และการดูดซับเมทิลีนบลูวิเคราะห์ตาม JIS K 1474-1991 (สราวุธ, 2550)

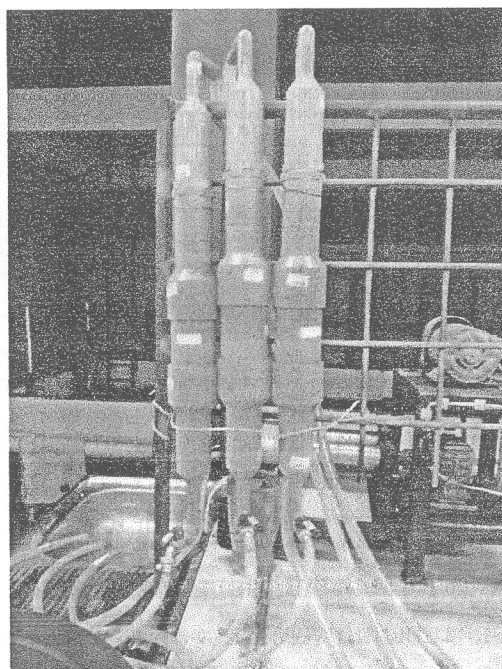
3.4.4 ทดสอบใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ

ทำการผลิตสต็อกถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 5 กิโลกรัม ในสภาวะการกระตุ้นที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที สำหรับการทดลองดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ โดยชุดระบบดูดซับเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้น้ำที่มีสารละลายเหล็กอยู่ได้เข้าไปสัมผัสกับถ่านกัมมันต์เม็ด เพื่อที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารละลายเหล็กไว้ โดยทำการออกแบบแผนภาพชุดระบบดูดซับสารละลายเหล็ก ดังรูปที่ 3.15

การนำน้ำที่มีสารละลายเหล็กปนอยู่โดยใช้ปั๊มดูดจากถังน้ำเข้าสู่ชุดระบบดูดซับสารละลายเหล็กผ่านวาล์วเพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำที่จะผ่านเข้าสู่ชุดระบบดูดซับทางด้านบน ซึ่งชุดระบบดูดซับทำมาจากท่อพีวีซีส่วนล่างของท่อบรรจุตะแกรงสแตนเลสเพื่อใช้เป็นตัวรองรับน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ จากนั้นบรรจุถ่านกัมมันต์ในชุดระบบดูดซับเพื่อดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ น้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วจะออกทางด้านล่าง และทำการเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากถูกดูดซับแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี (Spectrophotometry method) ทำให้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจากการทดลองมีสารดูดซับหลายชนิดและหาอัตราการไหลของน้ำที่สามารถให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเริ่มต้นเท่ากันจึงทำชุดระบบดูดซับทั้งหมด 3 ระบบ แสดงชุดระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แผนภาพของระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ



รูปที่ 3.16 ระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์

วิธีการทดลอง

1. จัดเตรียมชุดระบบดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ ซึ่งประกอบด้วย ท่อพีวีซีสำหรับบรรจุถ่านกัมมันต์
2. ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5, 10, และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตรแสดงดังตารางที่ 3-1 โดยเตรียมสารละลายเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ ชั่ง $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.0702 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแล้วเติม Conc. H_2SO_4 2 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร
3. นำถ่านกัมมันต์บรรจุในชุดระบบดูดซับ 500 กรัม

4. เปิดปั๊มเพื่อสูบน้ำจากถังป้อนเข้าระบบดูดซับสารละลายเหล็กด้วยอัตราการไหล 0.1, 0.5, และ 1.0 ลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 3-2

5. ทำการเก็บน้ำหลังจากที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มาวิเคราะห์ปริมาณเหล็กโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรีเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าแสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-1 ออกแบบการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด 500 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 300 นาที

อัตราการไหล (l/min)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก [C_0] (mg/l)	ความเข้มข้นของเหล็กหลังจากดูดซับ [C] (mg/l)	response
0.5	5		Breakthrough time
	10		
	15		

ตารางที่ 3-2 ออกแบบการทดลองผลของอัตราการไหลน้ำที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด 500 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 300 นาที

ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก [C_0] (mg/l)	อัตราการไหล (l/min)	ความเข้มข้นของเหล็กหลังจากดูดซับ [C] (mg/l)	response
0.5	0.1		Breakthrough time
	0.5		
	1.0		

ตารางที่ 3-3 ออกแบบการทดลองผลการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่มีต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ ดำเนินการที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาทีจนเป็นเวลา 15 ชั่วโมง

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นของเหล็ก หลังจากดูดซับ [C] (mg/L)	response
ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้		Breakthrough time
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า		

3.4.5 วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (Regeneration) เป็นการทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับครั้งใหม่โดยการนำสารละลายเหล็กออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำมีกระบวนการดังนี้

ทำการบรรจุน้ำใส่ในชุดระบบฟื้นฟูซึ่งประกอบด้วย ตะแกรงสแตนเลสสวาล์วระบายไอน้ำ เครื่องวัดความดัน และเครื่องวัดอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.17 ชุดระบบฟื้นฟูทำมาจากสแตนเลสภายในบรรจุตะแกรงสแตนเลสเพื่อใช้เป็นตัวรองรับถ่านกัมมันต์ให้อยู่เหนือผิวน้ำ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานวางบนตะแกรงสแตนเลส ให้ความร้อนกับระบบทำให้น้ำที่อยู่ภายในกลายเป็นไอน้ำไอน้ำที่ได้เข้าไปแยกสารปนเปื้อนมลพิษออก หลังจากนั้นจะได้ถ่านกัมมันต์พร้อมใช้งานอีกครั้ง โดยมีขั้นตอนการทดลองความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับดังนี้

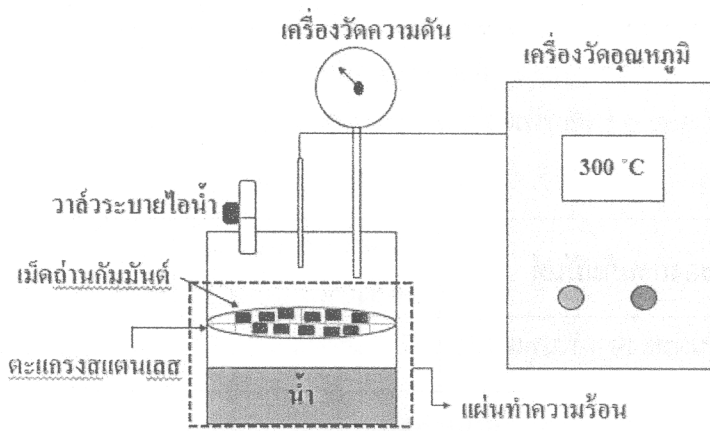
1. จัดเตรียมระบบฟื้นฟูแบบแบทช์สำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วด้วยไอน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.18

2. ป้อนน้ำใส่ในระบบฟื้นฟูปริมาตร 300 มิลลิลิตร

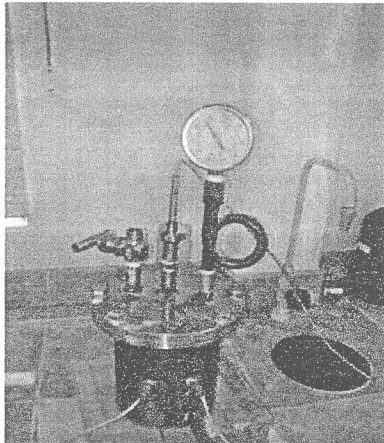
3. นำถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ววางบนตะแกรงซึ่งอยู่เหนือผิวน้ำและปิดระบบ

4. ให้ความร้อนแก่ระบบฟื้นฟูจนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และควบคุมความดัน 20 - 25 bar โดยน้ำที่อยู่ในระบบฟื้นฟูเกิดเป็นไอน้ำไปสัมผัสกับถ่านเป็นเวลา 60 นาที

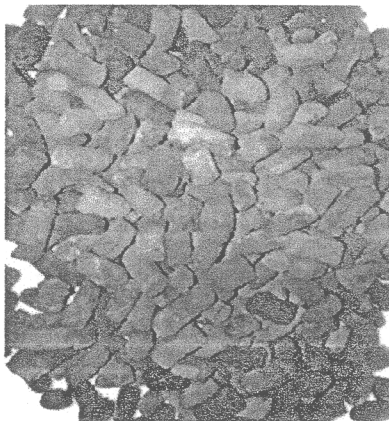
5. นำถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้วซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 มาวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู จากนั้นนำมาทดสอบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำและวิเคราะห์ปริมาณเหล็กหลังการดูดซับ เพื่อศึกษาความสามารถดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ถูกคืนสภาพแล้วแสดงดังตารางที่



รูปที่ 3.17 แผนภาพส่วนประกอบของระบบฟื้นฟูแบบแบทช์สำหรับกระตุ้นล้ากัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว



รูปที่ 3.18 ระบบฟื้นฟูแบบแบทช์สำหรับกระตุ้นล้ากัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว



รูปที่ 3.19 ล้ากัมมันต์หลังจากการคืนสภาพแล้ว

ตารางที่ 3-4 ออกแบบการทดลองผลการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้หลังจากดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำดำเนินการที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จนเป็นเวลา 15 ชั่วโมง

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นของเหล็ก หลังจากดูดซับ [C] (mg/l)	response
ถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้ว		Breakthrough time

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ด้วยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับงานเครื่องกรองน้ำ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นเม็ดถ่านและการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดเพื่อทำการศึกษานำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปดูดซับเหล็กในน้ำและการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

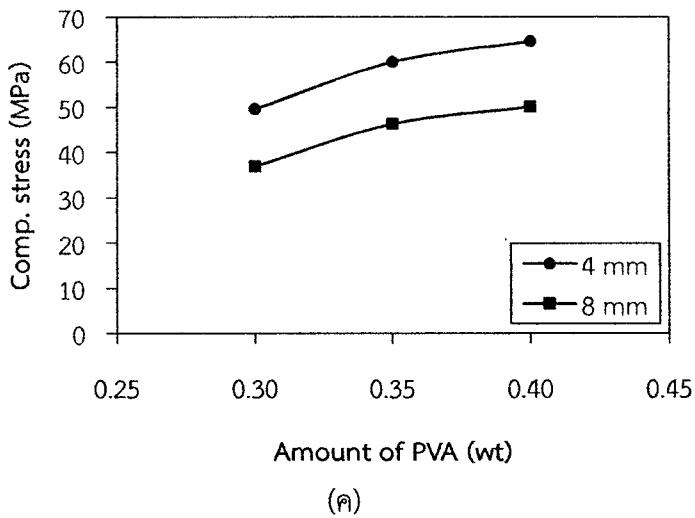
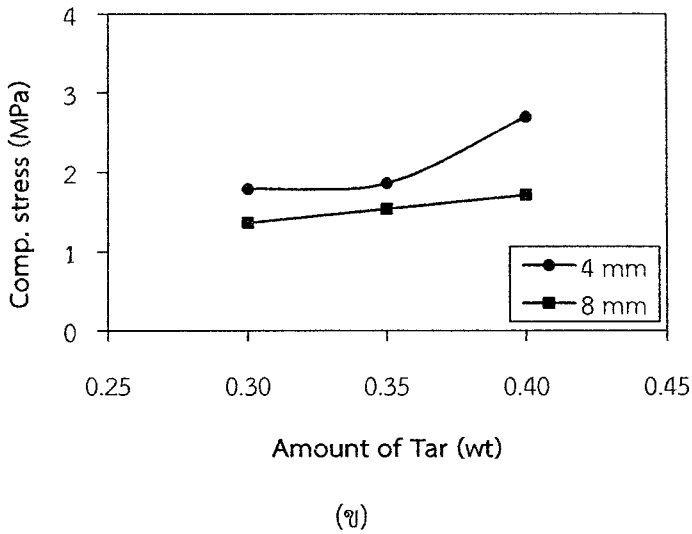
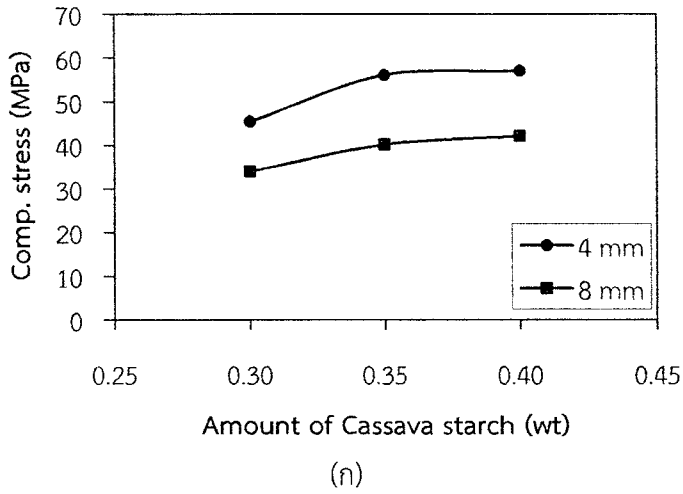
4.1 ผลของการใช้สารเชื่อมประสานต่อการอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นเม็ดถ่านด้วยเครื่องอัดเม็ดขนาด 2 แร่งมา ดังรูปที่ 3.5 โดยทำการศึกษานิตและปริมาณของสารเชื่อมประสาน (Binder Types) 3 ชนิด คือน้ำมันดิน (Tar) แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ในสัดส่วนผงถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำต่างๆ ได้แก่ 1:0.30:1, 1:0.35:1, และ 1:0.40:1 ที่ขนาดเม็ดถ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) 4 และ 8 มิลลิเมตรยาว 1 เซนติเมตรโดยทำการวัดผลของค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่าน (Compress stress) แสดงดังตารางที่ ง-1.1 เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแข็งของเม็ดถ่าน ซึ่งวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งดังรูปที่ 3.7

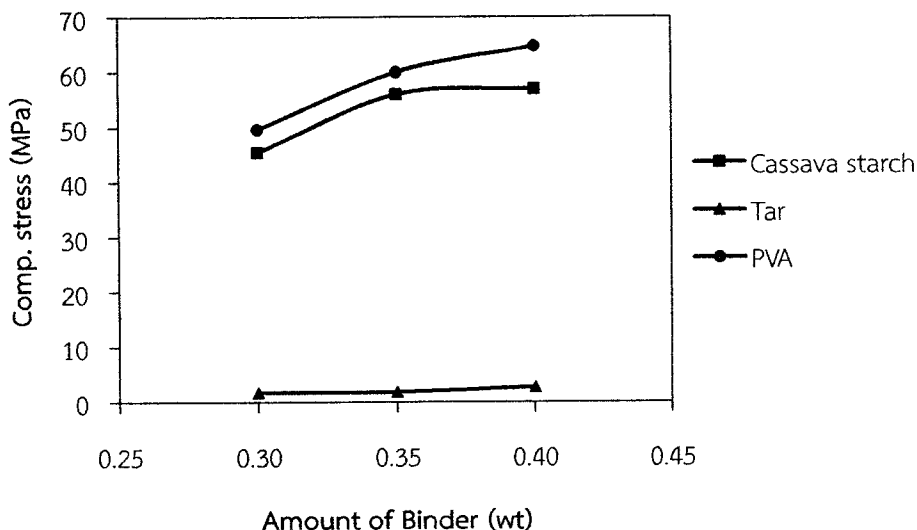
จากการวิเคราะห์ค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่าน (Compress stress) โดยใช้สารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นรูปเม็ดดังแสดงในตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านขึ้นอยู่กับชนิด สัดส่วนของสารเชื่อมประสาน และขนาดเม็ดผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้มีความทนต่อแรงอัดกระแทกมากยิ่งขึ้น และที่ขนาดเม็ดถ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร มีค่าแรงอัดกระแทกสูงกว่าขนาดเม็ดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรเนื่องจากขนาดเม็ดถ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร สามารถอัดตัวได้แน่นกว่านอกจากนี้ที่สัดส่วน 1:0.35:1 และ 1:0.40:1 ยังมีค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านสูงใกล้เคียงกัน คือ 56 และ 57 เมกะปาสกาลตามลำดับของขนาดเม็ด 4 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) ดังนั้นจึงได้สัดส่วนที่เหมาะสม คือ 1:0.35:1 ที่ขนาดเม็ด 4 มิลลิเมตร และนอกจากนี้การอัดขึ้นรูปเม็ดถ่านโดยใช้สารเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันดินและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แสดงดังรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) จากผลการทดลองพบว่ามีความโน้มเอียงของการเพิ่มของค่าแรงอัดกระแทกที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารเชื่อมประสานและขนาดเม็ดถ่านเหมือนกับแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดิน และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้เม็ดถ่านมีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีราคาถูกกว่ามากจึงเลือกแป้งมันสำปะหลังเป็นสารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นเม็ดถ่าน เพื่อนำไปศึกษาการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป

ตารางที่ 4-1 แสดงผลของชนิด สัดส่วนของเชื่อมประสาน และขนาดเม็ดถ่านต่อค่าความแข็งแรงของ เม็ดถ่าน

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ชนิดสารเชื่อม ประสาน	สัดส่วน ผงถ่าน:สารเชื่อมประสาน:น้ำ (โดยน้ำหนัก)	ค่าความ แข็งแรง (MPa)	%การแตกของ เม็ดถ่านในน้ำ
4	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	46	3.54
		1:0.35:1	56	1.25
		1:0.40:1	57	1.20
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	2	12.58
		1:0.35:1	2	10.61
		1:0.40:1	3	9.08
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	50	2.23
		1:0.35:1	60	1.15
		1:0.40:1	65	1.04
8	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	34	6.32
		1:0.35:1	40	4.56
		1:0.40:1	42	3.92
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	1	17.34
		1:0.35:1	2	17.19
		1:0.40:1	2	16.30
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	37	3.36
		1:0.35:1	46	2.23
		1:0.40:1	50	1.64



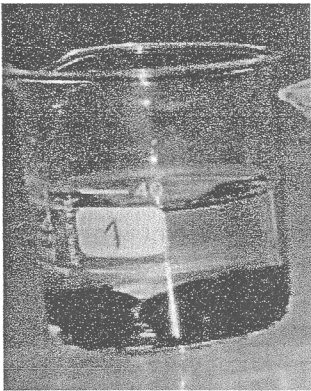
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของปริมาณสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง (ก) น้ำมันดิน (ข) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (ค) ต่อค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านขนาด 4 และ 8 มิลลิเมตร



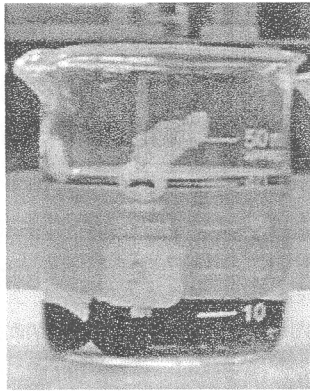
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบชนิดของสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดิน และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อค่าแรงอัดกระแทกของเม็ดถ่านขนาด 4 มิลลิเมตร

การศึกษาผลของชนิด สัดส่วนของเชื่อมประสาน และขนาดเม็ดถ่านที่มีต่อร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำ (% Fracture of charcoal in water) แสดงดังตารางที่ 4-1 และสามารถคำนวณร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำจากสมการที่ (3.1) ผลการทดลองพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลัง และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเชื่อมประสานทำให้ร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านอยู่ในช่วง 1-7 % ซึ่งค่อนข้างน้อย ส่วนการใช้น้ำมันดินเป็นสารเชื่อมประสานทำให้เม็ดถ่านเกิดการแตกเม็ดและคลายเศษผงถ่านออกทำให้ร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านอยู่ในช่วง 9-18 % แสดงดังตารางที่ 4-1.2 และการเพิ่มสัดส่วนของสารเชื่อมประสานส่งผลให้ร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านลดลง สำหรับผลของขนาดเม็ดถ่านจะเห็นได้ว่าที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร สามารถทำให้เม็ดถ่านคงสภาพได้ดีกว่า มีร้อยละการแตกตัวน้อยและมีค่าความแข็งของเม็ดถ่านค่อนข้างสูง เนื่องจากขนาดเม็ดถ่านที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรอัดตัวได้แน่นกว่าขนาดเม็ดถ่านที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารเชื่อมประสาน ที่สัดส่วน 1:0.35:1 ขนาดเม็ดถ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ได้ค่าร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่าน 1.25 ซึ่งลักษณะของเม็ดถ่านจากการใช้สารเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดที่แช่อยู่ในน้ำแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเชื่อมประสานเม็ดถ่านยังคงสภาพเม็ดอยู่และไม่ทำให้น้ำเปลี่ยนสี แต่การใช้น้ำมันดินเป็นสารเชื่อมประสานเมื่อแช่น้ำทิ้งไว้ทำให้น้ำสีเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาลและสามารถคำนวณร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำได้ดังนี้

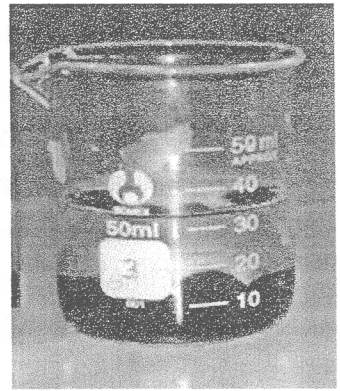
$$\text{ร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านก่อนแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักถ่านหลังแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักถ่านก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.1)$$



(ก)



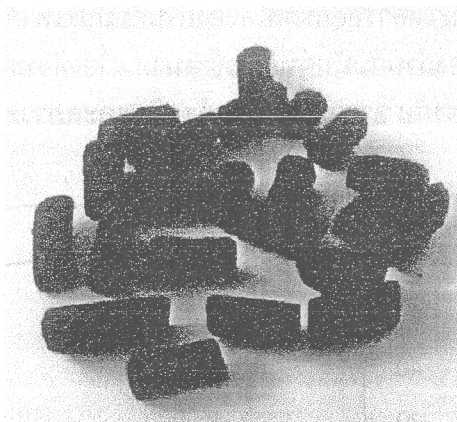
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 แสดงการแตกตัวของเม็ดถ่านและการละลายในน้ำของการใช้สารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง (ก) น้ำมันดิน (ข) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (ค)

จากการทดลองการอัดขึ้นรูปเม็ดถ่านพบว่าสารเชื่อมประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ทนต่อแรงอัดกระแทกได้ดีกว่าแป้งมันสำปะหลัง แต่ทั้งนี้จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปกรองน้ำจึงเลือกตัวประสานที่ไม่เป็นอันตราย ดังนั้นจึงเลือกตัวประสานชนิดแป้งมันสำปะหลังซึ่งสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารเชื่อมประสานมาผสมในสัดส่วน 1:0.35:1 โดยน้ำหนัก นั่นคือการนำผงถ่าน 1 กิโลกรัมต่อแป้งมันสำปะหลัง 350 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จะได้ถ่านเม็ดที่มีความแข็งแรงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 1 เซนติเมตร ทนต่อแรงอัดกระแทก 56 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4.4 ถ่านเม็ดที่ผลิตได้จากการใช้สารเชื่อมประสานในการอัดขึ้นเม็ด

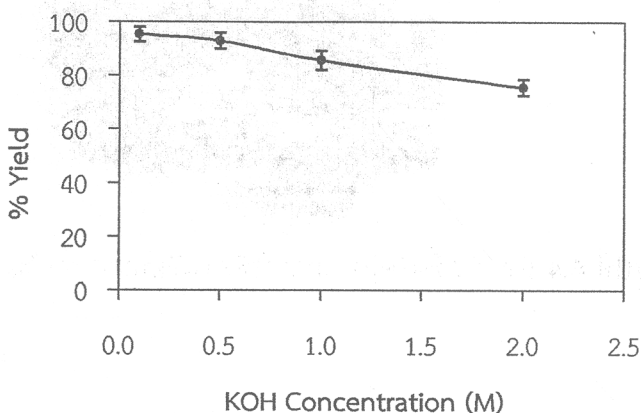
4.2 การผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด

การผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดโดยใช้สารเชื่อมประสาน เป็นการนำเม็ดถ่านที่ได้จากการอัดเม็ดมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำการเผาในเตาเผาแบบท่อซึ่งท่อสำหรับบรรจุถ่านสร้างขึ้นจากวัสดุสแตนเลสแสดงดังรูปที่ 3.10 ทำการศึกษาสภาวะที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH Concentration) อุณหภูมิ (Temperature) และเวลา (Time) ในการกระตุ้น โดยวิเคราะห์ร้อยละผลได้ (%Yield) สามารถคำนวณได้จากสูตรในสมการที่ (3.2) บอกถึงสัดส่วนของผลผลิตที่ได้จากการทดลองส่วนด้วยผลผลิตตามทฤษฎี ค่าไอโอดีน นัมเบอร์ (Iodine number) วิเคราะห์ตาม ASTM D4607-86 และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue) วิเคราะห์ตาม JIS K 1474-1991 ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

$$\%Yield = (\text{น้ำหนักถ่านหลังกระตุ้น} / \text{น้ำหนักถ่านก่อนกระตุ้น}) \times 100 \quad (3.2)$$

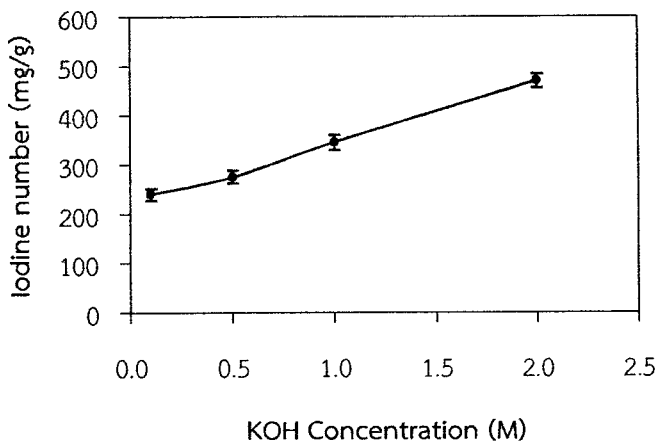
4.2.1 ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการแช่ถ่าน

ศึกษาผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วง 0.1 – 2.0 โมลาร์ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์แสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้กับความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังรูปที่ 4.5 ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ วีระวัฒน์ และพรสวรรค์, 2558 เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แทรกเข้าไปสลายน้ำมันดินและสารอินทรีย์ต่างๆซึ่งทำให้ช่วยลดการดูดตันของรูพรุนภายในเนื้อของถ่านส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้เกิดรูพรุนมากยิ่งขึ้นแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 2.0 โมลาร์ทำให้เม็ดถ่านเริ่มละลายและแตกตัวดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมเพราะสามารถคงสภาพเม็ดถ่านไว้ได้และให้ค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 75.68 แสดงดังตารางที่ ง-2.1.1 ซึ่งเป็นค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับการทดลองของ Jin et al., 2010 ที่ใช้ความเข้มข้นใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบและสภาวะการดำเนินการกระตุ้นที่แตกต่างกัน

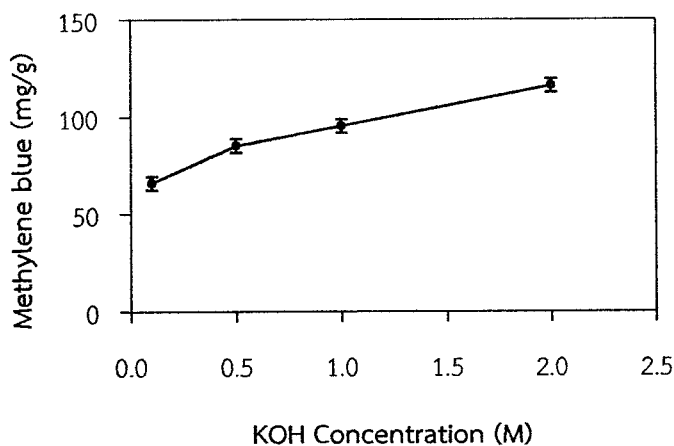


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละผลได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ศึกษาผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วง 0.1 – 2.0 โมลาร์ ที่มีต่อค่าไอโอดีน นัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ โดยค่าไอโอดีนนัมเบอร์บอกถึงการดูดซับสารที่มี ขนาดโมเลกุลเล็ก ส่วนค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเป็นการดูดซับสารโมเลกุลขนาดกลาง ซึ่งแสดงผลในรูป ของกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีน บลูของถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้นดังนั้นความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 2.0 โมลาร์ ทำให้ได้ค่า ไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู คือ 470.50 และ 116.50 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงดัง ตารางที่ ง-2.2.1 และ ง-2.3.1 ตามลำดับ เป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดเพราะมีความสามารถในการดูดซับ มากกว่าความเข้มข้นอื่นๆแต่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าเมทิลีนบลูยังไม่มากพอสำหรับการผลิตเป็น ถ่านกัมมันต์จึงทำการศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นในลำดับต่อไป



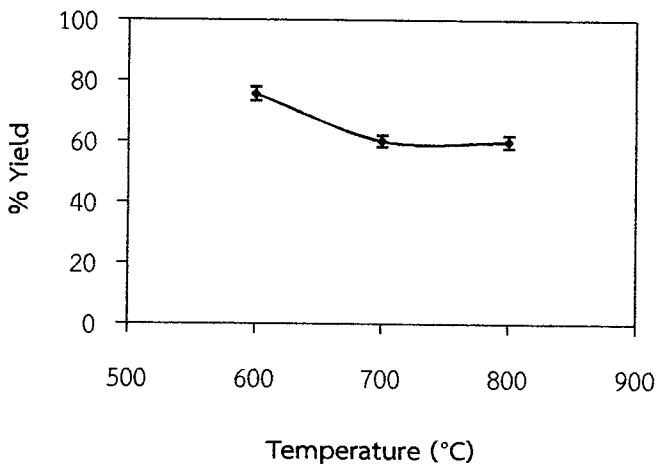
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของ ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของ ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้น

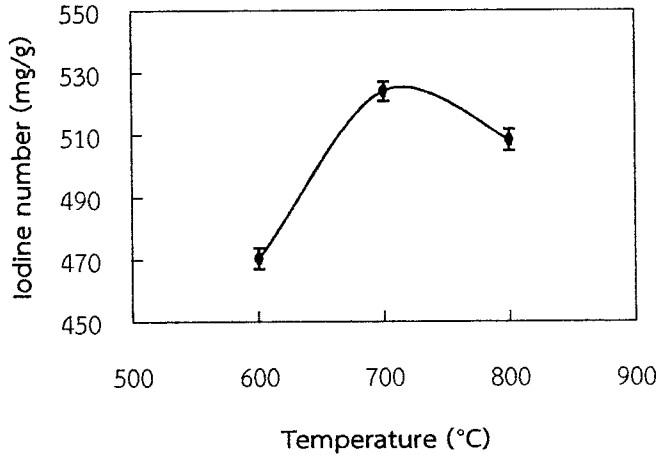
ศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ แสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้กับอุณหภูมิในการกระตุ้นดังรูปที่ 4.8 ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลง และเมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส จะได้ค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ 60.16 และ 59.97 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ ง-2.1.2 เป็นสภาวะที่ปฏิกิริยาการกระตุ้นเกิดได้ดีเนื่องจากความร้อนสูงทำให้สารระเหยที่เกาะอยู่บริเวณผิวและรูพรุนระเหยออกไปทำให้น้ำหนักและร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงด้วย แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นั้นใช้พลังงานมากกว่า 700 องศาเซลเซียส และให้ค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกัน



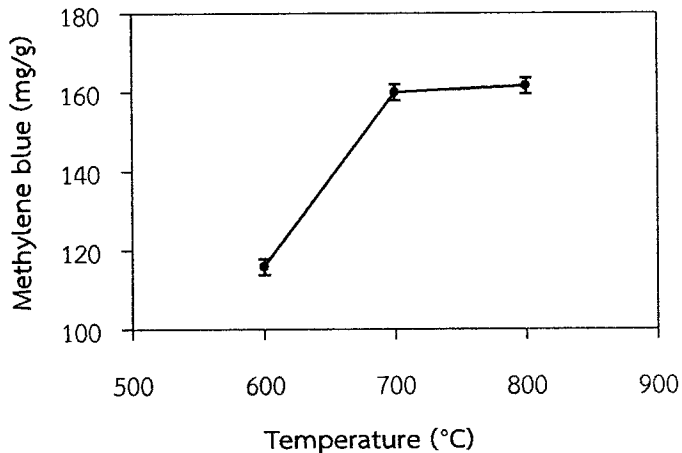
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที

ผลการศึกษาอุณหภูมิในการกระตุ้นในช่วง 600 - 800 องศาเซลเซียส ที่มีต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูกับอุณหภูมิในการกระตุ้นดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น จึงทำให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิมิผลทำให้มีรูพรุนเกิดได้มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ได้ดีขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น คือ 700 องศาเซลเซียสให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าดูดซับเมทิลีนบลู 524.17 และ 159.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับแสดงดังตารางที่ ง-2.2.2 และ ง-2.3.2 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูง แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เริ่มลดลงอาจเนื่องมาจากเมื่อให้ความร้อนมากเกินไปทำให้รูพรุน

ขยายตัวกว้างขึ้น สันเกตได้จากค่าของการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่มากขึ้นด้วย เพราะสารเมทิลีนบลูมีลักษณะโมเลกุลที่ใหญ่กว่าไอโอดีน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที

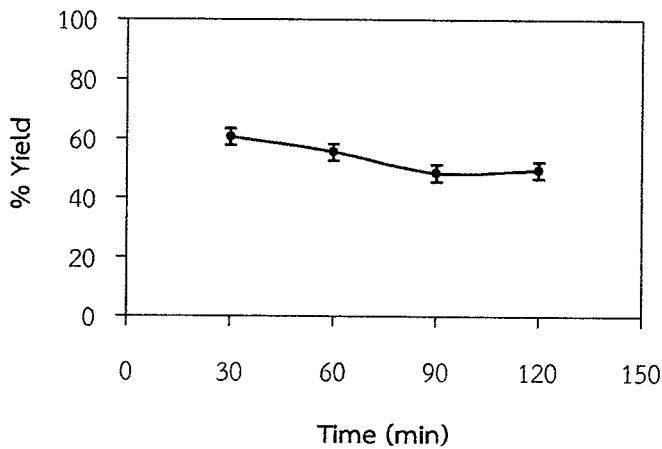


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที

4.2.3 ผลของเวลาในการกระตุ้น

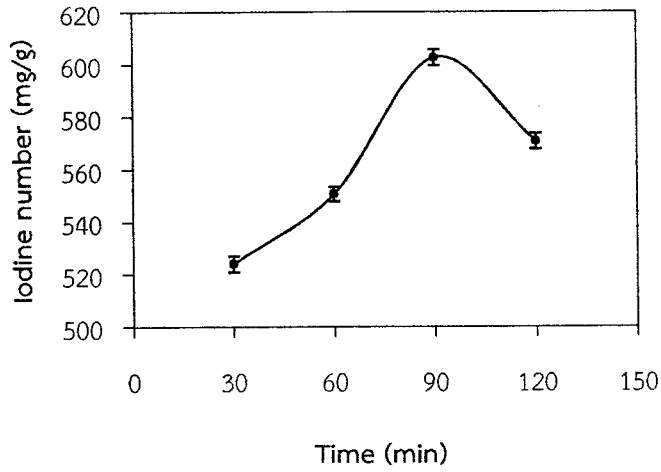
ศึกษาผลของเวลาในการกระตุ้นในช่วง 30 – 120 นาที ที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์แสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้กับเวลาในการกระตุ้นดังรูปที่ 4.11 ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลง และเมื่อเวลากระตุ้นที่ 90 และ 120 นาที มีค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 48.47 และ

49.48 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ ง-2.1.3 สำหรับการใช้เวลากระตุ้นนานถึง 90-120 นาที ทำให้สารระเหยและสารประกอบอินทรีย์ต่างๆสลายไปจากถ่านกัมมันต์ได้ดีสังเกตจากน้ำหนักและร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ลดลงการใช้เวลาในการกระตุ้นนานถึง 120 นาที สามารถกำจัดสารระเหยออกไปใกล้เคียงกับการใช้เวลากระตุ้น 90 นาที เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานจึงเลือก 90 นาที เป็นเวลาในการกระตุ้นที่ดีที่สุด

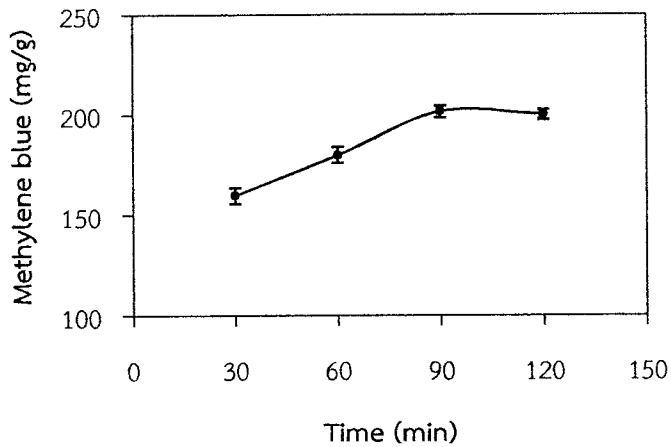


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส

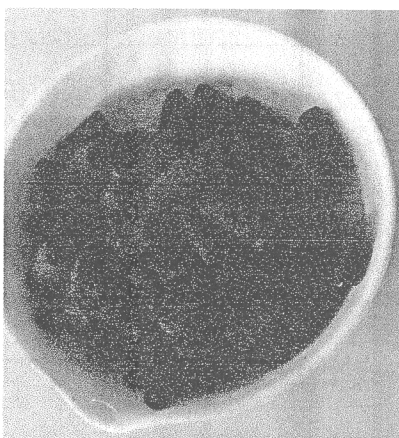
ผลการศึกษาเวลาในการกระตุ้นในช่วง 30 - 120 นาที ที่มีต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์แสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูกับเวลาในการกระตุ้น แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้น ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมากขึ้น ดังนั้นเวลาในการกระตุ้นที่เหมาะสม คือ 90 นาที ซึ่งได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดถึง 602.75 และ 202.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับแสดงดังตารางที่ ง-2.2.3 และ ง-2.3.3 เมื่อเวลาการกระตุ้น 120 นาที ทำให้รูพรุนขนาดเล็กหายไปเพื่อเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดกลางซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Intamanee et al., 2009 เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากเกินไปย่อมส่งผลเสียต่อรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จะเห็นได้จากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลงแต่เมทิลีนบลูเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ เพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงถึง 602.75 มิลลิกรัมต่อกรัมเนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม (มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ที่ 600-1000 มิลลิกรัมต่อกรัม) มีลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้มีสีดำพื้นผิวภายนอกที่ขรุขระและมีน้ำหนักเบา



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

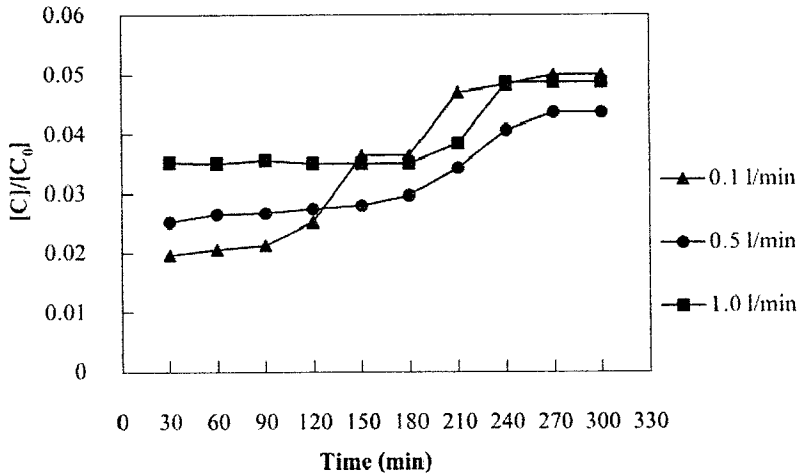
4.3 ผลการศึกษาถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ

ทำการผลิตสต็อกถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 5 กิโลกรัม ในสภาวะการกระตุ้นที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที สำหรับการทดลองถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้มาดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยชุดกรองน้ำดังรูปที่ 3.12 โดยศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ และวิเคราะห์ปริมาณสารละลายเหล็กด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี (Spectrophotometry method) เพื่อหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งน้ำอุปโภคบริโภคต้องมีปริมาณเหล็กอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือจากกราฟเบคทู $[C]/[C_0]$ ต้องน้อยกว่า 0.03 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

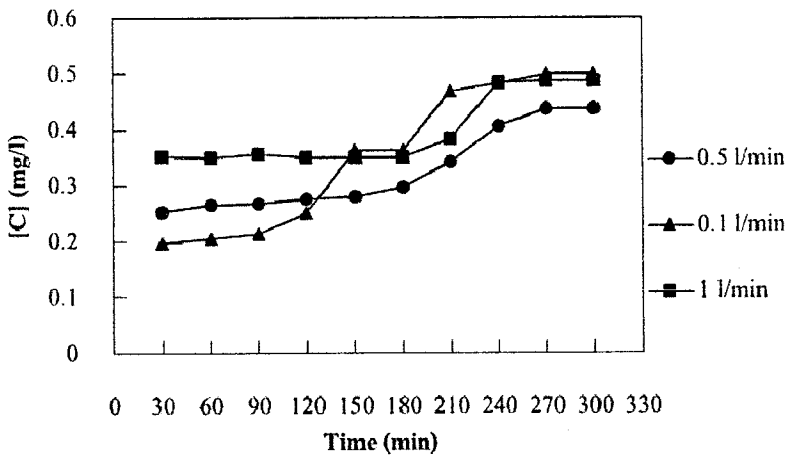
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำ

ศึกษาจากกราฟเบคทูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำที่อัตราการไหลน้ำ 0.1, 0.5, และ 1.0 ลิตรต่อนาที โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 500 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.15 และผลของอัตราการไหลของน้ำในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำแสดงดังรูปที่ 4.16 ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่สามารถลดปริมาณเหล็กได้ตัวอย่างสม่ำเสมอสังเกตได้จากปริมาณ $[C]/[C_0]$ ต้องน้อยกว่า 0.03 และมีเวลาการดูดซับได้นานกว่าอัตราการไหลที่ 0.1 และ 1.0 ลิตรต่อนาทีเนื่องจากการดำเนินระบบ 300 นาที ที่อัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที น้ำที่ไหลผ่านระบบดูดซับมากถึง 300 ลิตร แสดงว่าน้ำไหลผ่านถ่านกัมมันต์มาเร็วจึงทำให้ดูดซับสารละลายเหล็กได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที น้ำไหลผ่านระบบดูดซับ 150 ลิตร แสดงว่าน้ำไหลผ่านถ่านกัมมันต์ช้าลงทำให้ดูดซับสารละลายเหล็กได้มากขึ้น ส่วนอัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาที น้ำไหลผ่านระบบดูดซับ 30 ลิตร ซึ่งน้ำไหลผ่านถ่านกัมมันต์ช้า แสดงได้ว่าอยู่ในระบบดูดซับค่อนข้างนานและสามารถสัมผัสกับถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับสารละลาย

เหล็กได้อย่างดีในช่วงแรก แต่หลังจากเวลา 120 นาที ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้น้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะถ่านกัมมันต์จะเกิดการอิ่มตัวแสดงดังตารางที่ ง-3.1



รูปที่ 4.15 กราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด ที่อัตราการไหลน้ำต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลน้ำในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

4.3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กในน้ำ

ทำการศึกษจากกราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5, 10, และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในน้ำบาดาลมีสารละลายเหล็กปนอยู่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม และน้ำตามบ้านเรือนส่วนใหญ่มีอยู่ประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 500 กรัม และอัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที ในการดูดซับสารละลายเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.17 และผลของ

ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กที่มีต่อการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.18 ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดปริมาณเหล็กหลังการกรองได้ดีที่สุด เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับปริมาณเหล็กได้เกือบทั้งหมด สามารถลดปริมาณเหล็กได้ถึงเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก คือ ปริมาณเหล็กไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก ทำให้การดูดซับสารละลายเหล็กลดลงแสดงดังตารางที่ ง-3.2

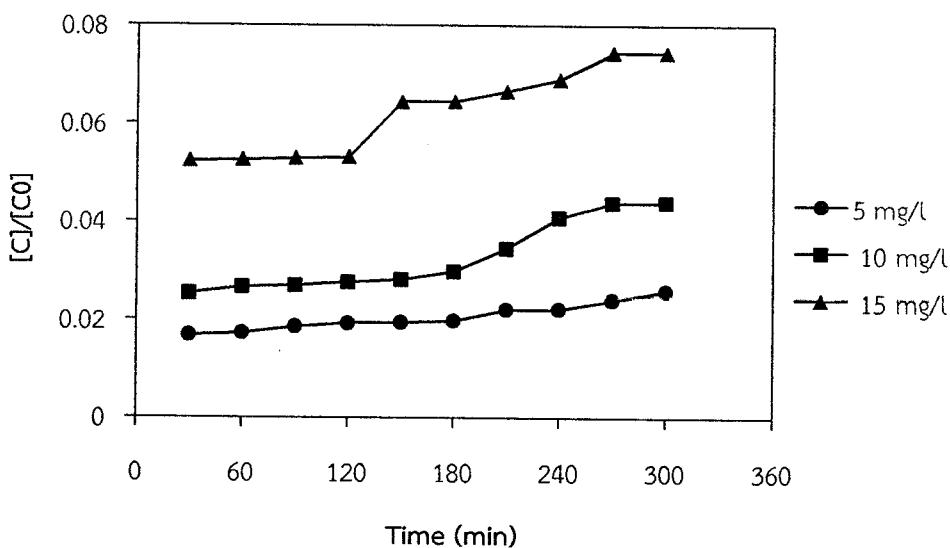
กราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กตามเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก นำมาคำนวณ $[C]/[C_0]$ ซึ่งมาจากความเข้มข้นเหล็กหลังการดูดซับส่วนด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กได้ดังนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องมีค่า $[C]/[C_0]$ น้อยกว่า 0.06

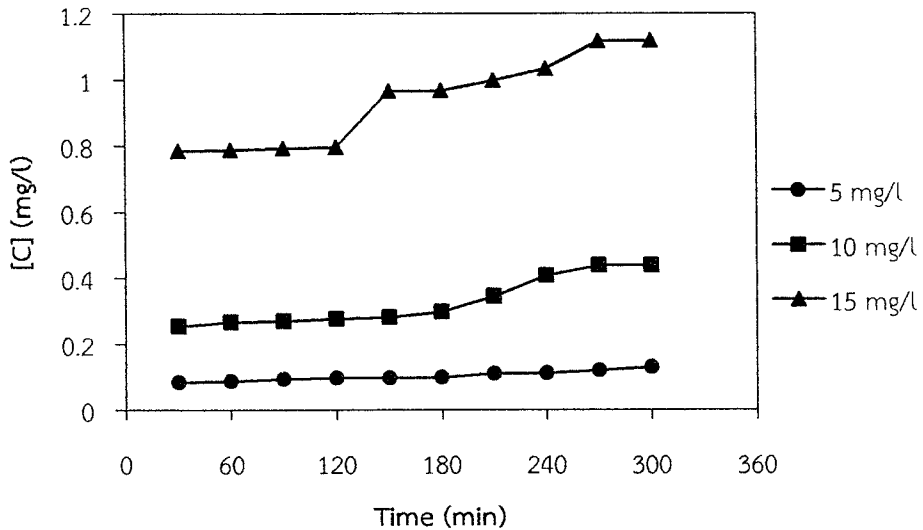
ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องมีค่า $[C]/[C_0]$ น้อยกว่า 0.03

ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องมีค่า $[C]/[C_0]$ น้อยกว่า 0.02

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายเหล็ก คือ อัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ดี



รูปที่ 4.17 กราฟเบคทรูของการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กต่างๆ โดยมีอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

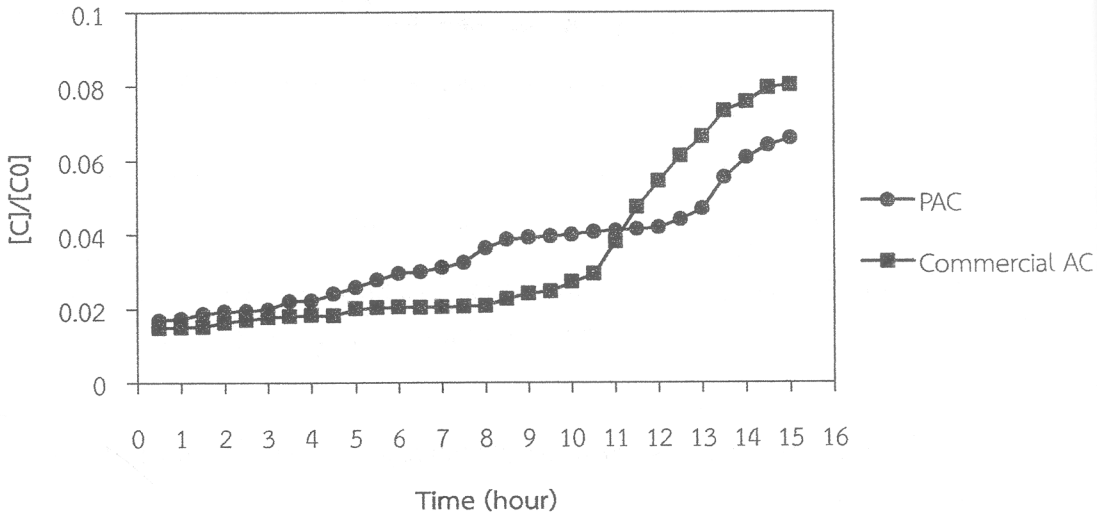


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็กในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำโดยมีอัตรา
การไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

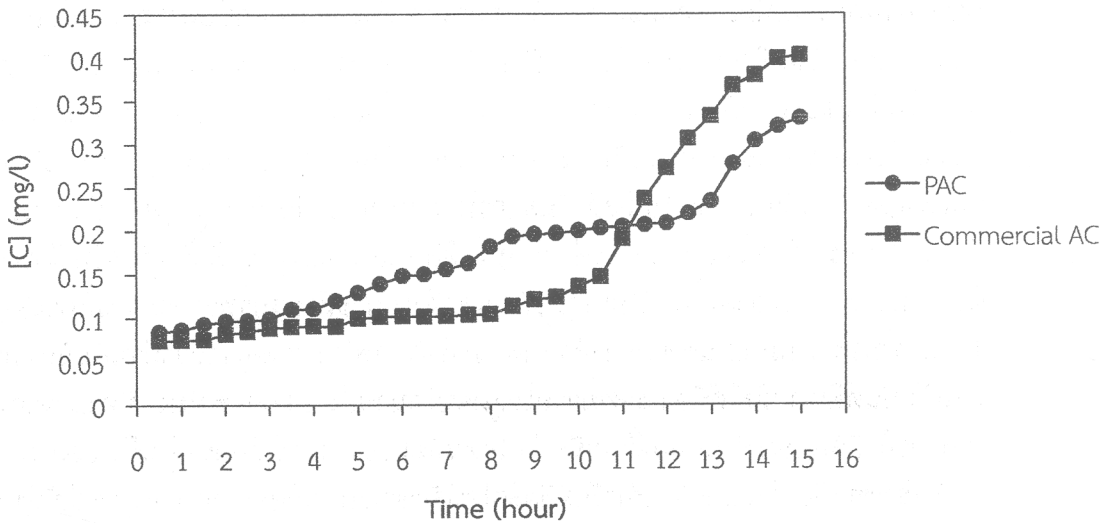
4.3.3 เปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัม มันต์ทางการค้า

จากการศึกษาการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม แสดงดังรูปที่ 4.19 และเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าแสดงดังรูปที่ 4.20 ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำได้ตามมาตรฐานของน้ำอุปโภคบริโภค คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือจากกราฟเบคทรู $[C]/[C_0]$ ต้องน้อยกว่า 0.06 ในส่วนของถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับเหล็กได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในช่วง 11.00 ชั่วโมงแรกเนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1,150.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าดูดซับเมทิลีนบลู 85.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้คือ 602.75 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าดูดซับเมทิลีนบลู 202.04 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงทำให้ดูดซับได้ดีกว่าเพราะสารละลายเหล็กมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับรูพรุนขนาดไมโครแต่เมื่อหลังจาก 11.30 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ทางการค้าหมดประสิทธิภาพในการดูดเร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่เรารผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับได้นานถึง 14.00 ชั่วโมง เนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูง ทำให้ดูดซับได้ดีในช่วงแรกและเกิดการอิ่มตัวเร็วเช่นเดียวกัน และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดใหญ่กว่าทำให้พื้นที่ของถ่านที่สัมผัสกับน้ำอาจจะน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าแต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากเช่นเดียวกันจึงสามารถดูดซับได้นานกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าแสดงดังตารางที่ ง-3.3.1 และ ง-3.3.2

การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากน้ำก่อนดูดซับมีลักษณะสีเหลืองอ่อน เนื่องจากมีสารละลายเหล็กปนอยู่ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์น้ำที่ได้มีลักษณะสีใสขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.21 ส่วนถ่านกัมมันต์เม็ดหลังจากการดูดซับสารละลายเหล็กมีค่า $[C]/[C_0]$ เท่ากับ 0.07 แสดงดังรูปที่ 4.22 ลักษณะมีคราบสีเหลืองและน้ำตาลเกาะติดอยู่ที่เม็ดถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.19 กราฟเบคทรูเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อ นาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เม็ดที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อ นาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม



รูปที่ 4.21 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังการดูดซับสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

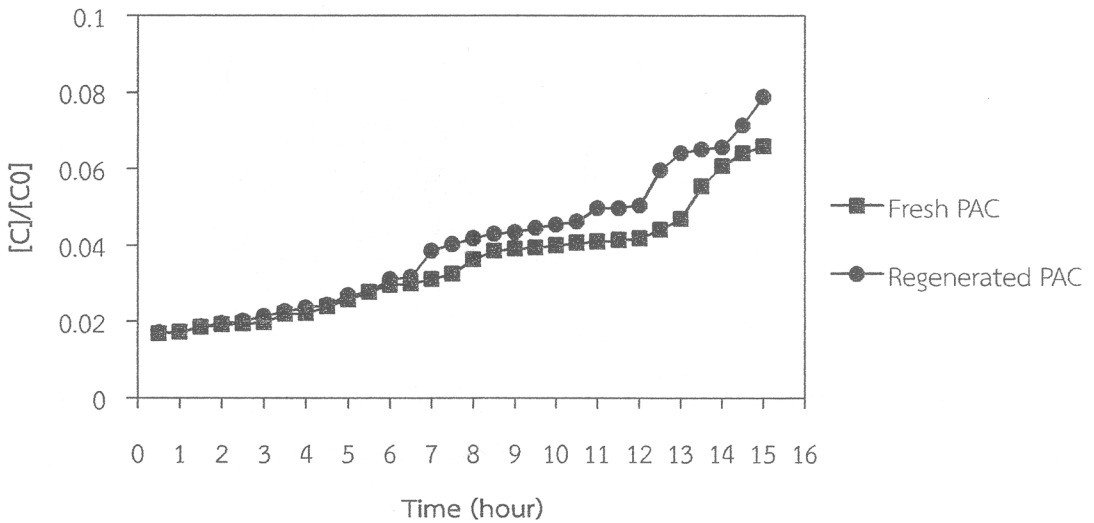


รูปที่ 4.22 ถ่านกัมมันต์เม็ดหลังจากการดูดซับสารละลายเหล็ก

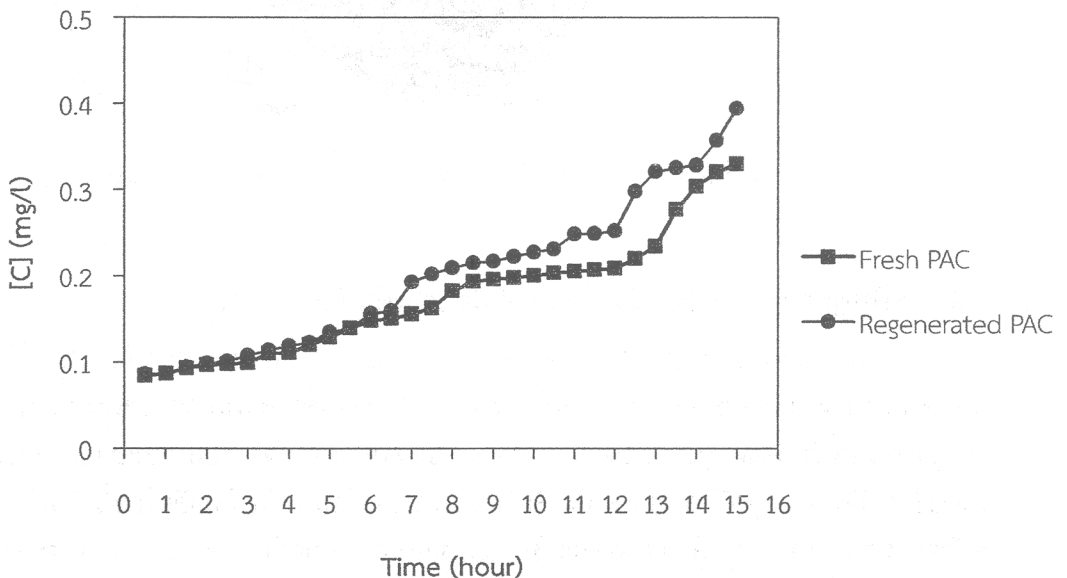
4.4 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารละลายเหล็กแล้วนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสควบคุมความดันอยู่ในช่วง 20 - 25 บาร์ ใช้เวลาในการกระตุ้น 60 นาที ในระบบฟื้นฟูแบบแบทช์แสดงดังรูปที่ 3.14 หลังจากนั้นนำมาทดสอบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำอีกครั้ง ผลเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากผ่านระบบฟื้นฟูแล้ว โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม แสดงดังรูปที่ 4.23 และเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้วแสดงดังรูปที่ 4.24 ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์หลังจากถูกฟื้นฟูสภาพแล้วนั้นมีความสามารถดูดซับสารละลายเหล็กได้ตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก โดยมียปริมาณเหล็กไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อ

ลิตรหรือจากกราฟเบคทรู $[C]/[C_0]$ ต้องน้อยกว่า 0.06 แสดงดังตารางที่ ง-4.1 และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ตั้งต้นแล้วมีความสามารถดูดซับได้ใกล้เคียงกัน

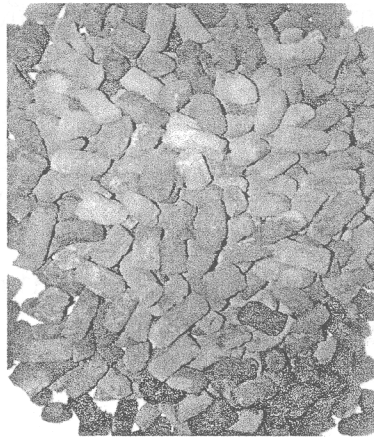


รูปที่ 4.23 กราฟเบคทรูเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้ว โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในน้ำหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เริ่มต้นกับถ่านกัมมันต์หลังจากฟื้นฟูแล้ว โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

ถ่านกัมมันต์เม็ดที่ถูกฟื้นฟูสภาพด้วยไอน้ำแล้วสามารถทำให้เหล็กที่เกาะอยู่หลุดออก แสดงดังรูปที่ 4.25 มีลักษณะสีดำและมีเหล็กเกาะถ่านกัมมันต์เม็ดอยู่น้อยมาก และวิเคราะห์ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์หลังฟื้นฟูได้ค่า 510 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีนี้นั้นทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้



รูปที่ 4.25 ถ่านกัมมันต์เม็ดหลังจากฟื้นฟูสภาพแล้ว

การคำนวณการประยุกต์ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์จริง

จากการทดลองงานวิจัยนี้ให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 500 กรัม และพบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำ 15 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถดูดซับเหล็กได้ต่ำกว่ามาตรฐาน คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยอัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาทีที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับปริมาณเหล็กในน้ำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเหล็กที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับได้} &= 0.5 \text{ l/min} \times (15 \text{ h} \times 60 \text{ min/h}) \times (5 - 0.3 \text{ mg/l}) \\ &= 2,115 \text{ mg} \end{aligned}$$

กรณีความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเหล็กหลังผ่านกระบวนการเติมอากาศหรือความเข้มข้นของเหล็กทั่วไปที่พบตามบ้านเรือนโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 500 กรัม ในการดูดซับเหล็ก 2,115 มิลลิกรัม ด้วยอัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที ให้น้ำที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำได้ดังนี้

$$\text{เวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำ} = \frac{2115 \text{ mg}}{\left(0.5 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times (0.8 - 0.3 \frac{\text{mg}}{\text{l}})\right)} = 8460 \text{ min} = 141 \text{ hour}$$

จากการใช้ถ่านกัมมันต์ 500 กรัม พบว่าใช้เวลาในการดูดซับเหล็กได้ทั้งหมด 141 ชั่วโมง และโดยปกติถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับการกรองน้ำตามบ้านเรือนประมาณ 1 กิโลกรัม ทำให้ได้เวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำเท่ากับ $141 \times 2 = 282$ ชั่วโมง

ใน 1 วัน ตามบ้านเรือนกรองน้ำดื่มประมาณ 30 ลิตร สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำ 30 ลิตร ด้วยอัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที ได้ดังนี้

$$\text{เวลาที่ใช้ในการดูดซับเหล็กในน้ำต่อวัน} = \frac{30 \text{ L/day}}{0.5 \text{ L/min}} = 60 \text{ min/day}$$

คำนวณจำนวนวันที่ถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพในการดูดซับเหล็กในน้ำ โดยปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 1 กิโลกรัม เวลาในการดูดซับเหล็กเท่ากับ 282 ชั่วโมง และใน 1 วัน ใช้น้ำประมาณ 30 ลิตร ซึ่งเวลาในการดูดซับเหล็ก 60 นาทีต่อวัน

$$\text{จำนวนวันที่ถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพ} = \frac{282 \text{ hour} \times 60 \text{ min/hour}}{60 \text{ min/day}} = 282 \text{ day}$$

ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เราผลิตได้ 1 กิโลกรัม สามารถนำไปดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำตามบ้านเรือนได้ประมาณ 282 วัน

4.5 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีพิจารณาจากการใช้ถ่าน 1 กิโลกรัม มาบดละเอียดและนำมาอัดเม็ดถ่านด้วยสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เป็นอันตรายและให้ค่าทนต่อแรงอัดกระทั่งถึง 56 เมกะปาสกาล ซึ่งมีร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำ 1.25 สัดส่วนผงถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำคือ 1:0.35:1 โดยน้ำหนักซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมจากการศึกษาการอัดขึ้นเม็ดถ่าน และนำเม็ดถ่านมากระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ มีอัตราส่วนการแช่น้ำหนักถ่านต่อปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1:2 wt/v ในการแช่ถ่านคิดเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.224 กิโลกรัม และท่อนสแตนเลสสำหรับกระบวนการเผาถ่านดำเนินการที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยป้อนก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตรา 4 ลิตรต่อนาที ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลารวมทั้งหมดในการป้อนไนโตรเจน 30 นาที หลังจากการเผากระตุ้นถ่านพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีร้อยละผลได้ 55 คำนวณได้จากการสมการที่ 3.2 และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 0.55 กิโลกรัม แสดงวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านไม้ดังตารางที่ 4-2 โดยค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการอัดเม็ดถ่านและผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แสดงรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดจากถ่านไม้

กระบวนการ	รายการ	ปริมาณ
การอัดเม็ดถ่าน	ปริมาณถ่าน (กิโลกรัม)	1
	ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(กิโลกรัม)	0.35
	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	1
การกระตุ้นถ่านด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้น KOH (โมลาร์)	2
	อัตราการใช้ถ่านต่อสารละลาย KOH (น้ำหนัก/ปริมาตร)	1:2
	สารละลาย KOH (ลิตร)	2
	มวลโมเลกุล KOH (กรัม/โมล)	56
	ปริมาณ KOH (กิโลกรัม)	0.224
การป้อนไนโตรเจนในกระบวนการเผา	อัตราการไหลไนโตรเจน (ลิตร/นาที)	4
	เวลาในการป้อนไนโตรเจน (นาที)	30
	ปริมาณไนโตรเจนที่ใช้ (ลิตร)	120
	ความหนาแน่นไนโตรเจน (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	806
	น้ำหนักไนโตรเจนที่ใช้ (กิโลกรัม)	96.72
ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	น้ำหนักถ่านกัมมันต์หลังกระตุ้น (กิโลกรัม)	0.55
	ร้อยละผลได้	55

ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

วัสดุและสารเคมี	จำนวน (กิโลกรัม)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ราคา (บาท)
ถ่านไม้	1	5	5
แป้งมันสำปะหลัง	0.35	13	4.55
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.224	70	15.68
ไนโตรเจน	96.72	0.124	11.99
ราคารวม	37.22 บาท		

หมายเหตุ ราคาแก๊สไนโตรเจน 500 ลิตร หรือ 403 กิโลกรัม เท่ากับ 50 บาท

ในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด 550 กรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีในการอัดขึ้นเม็ดและการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 37.22 บาท ดังนั้นการผลิตถ่านกัมมันต์ 1 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่าย 67.67 บาท

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าโดยพิจารณาจากกำลังของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดประกอบด้วย เครื่องอัดเม็ด (Extruder) 2 แรงแม่ และเตาเผาไฟฟ้าแบบท่อ (Tube furnace) โดยค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ สามารถคำนวณได้ตามสมการ (4.1) ซึ่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-4

$$\text{Cost} = W \times C \quad (4.1)$$

เมื่อ W คือ หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

C คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

ตารางที่ 4-4 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ

อุปกรณ์ไฟฟ้า	จำนวน (เครื่อง)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	ระยะเวลาการใช้งาน (ชั่วโมงต่อวัน)	หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน)
เครื่องอัดเม็ด	1	1.5	0.5	0.75
เตาเผาไฟฟ้า	1	2.5	2	5
อัตราค่าใช้ไฟฟ้า	5.75 หน่วยต่อวัน			

จากตารางที่ 4-4 ค่าการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดสำหรับดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ โดยใช้เครื่องอัดเม็ดในการขึ้นรูปเม็ดถ่านมีกำลังไฟ 1.5 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 1 เครื่อง จากนั้นนำเม็ดถ่านไปกระตุ้นโดยเข้าเตาเผาไฟฟ้ามีกำลังไฟ 2.5 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 1 เครื่อง พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ดสำหรับดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ คิดเป็นอัตราการใช้ไฟฟ้าได้ 5.75 หน่วยต่อวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าประเภทบ้านอยู่อาศัยมีค่าพลังงานไฟฟ้า 3.1381 บาทต่อหน่วย และเมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าตามสมการที่ (3) จะได้ $5.75 \times 3.1381 = 18.04$ บาทต่อวัน ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด 1 กิโลกรัม คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า บาทต่อกิโลกรัม โดยรายละเอียดการคำนวณสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Electrical cost} = (18.04 \text{ บาท/วัน}) \times (1 \text{ วัน/1 กิโลกรัม}) = 18.04 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

ดังนั้นเมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุ สารเคมี และค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด 1 กิโลกรัม มีค่าใช้จ่ายทั้งหมด $67.67 + 18.04 = 85.71$ บาท

เมื่อเปรียบเทียบกับทางการค้าที่จำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยราคาของถ่านกัมมันต์ทางการค้าเท่ากับ 200-250 บาท/กิโลกรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นี้มีราคาที่ถูกลงกว่าทางการค้าถึง 3 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเม็ดถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลของระบบ Gasification กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยมีกระบวนการศึกษา 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนแรกการอัดขึ้นเม็ดถ่านด้วยเครื่องอัดเม็ดและขั้นตอนการกระตุ้นในเตาเผาแบบท่อ พร้อมทั้งศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำ และเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า และศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยไออน้ำแบบแบทช์ เพื่อนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำอีกครั้งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ศึกษาชนิด สัดส่วนของสารเชื่อมประสาน และขนาดเม็ดถ่านในการอัดขึ้นเม็ดถ่านไม้พบว่าสถานะที่เหมาะสม ได้แก่ การใช้สารเชื่อมประสานแป้งมันสำปะหลัง ในสัดส่วนผงถ่านต่อสารเชื่อมประสานต่อน้ำ คือ 1:0.35:1 ขนาดเม็ดถ่าน 4 มิลลิเมตร ซึ่งทนต่อแรงอัดกระทั่งถึง 56 เมกะปาสกาล และมีร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำ 1.25

2. ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการกระตุ้นทางเคมีสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์พบว่าสถานะที่เหมาะสม คือ การใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิในกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงสุดถึง 602.75 และ 202.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับไอโอดีนกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1,150.50 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ยังมีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยกว่าแต่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นผ่านมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ว่าถ่านกัมมันต์ควรมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 600 - 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม

3. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นตัวดูดซับได้แก่อัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการกรองสารละลายเหล็ก คือ อัตราการไหลน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และนำมาเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กกับถ่านกัมมันต์ในทางการค้าโดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำได้ตามมาตรฐานของน้ำอุปโภคบริโภค คือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับเหล็กได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในช่วง 11.00 ชั่วโมงแรก แต่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าหมดประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลา 11.30 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่เราผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับได้นานถึงเวลา 14.00 ชั่วโมง

5. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยไอน้ำแบบแบทช์ดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ควบคุมความดันอยู่ในช่วง 20-25 บาร์ ใช้เวลาในการกระตุ้น 60 นาที หลังจากนั้นนำมาทดสอบการดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำอีกครั้ง โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นเหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 500 กรัม พบว่าถ่านกัมมันต์หลังจากถูกฟื้นฟูสภาพแล้วมีความสามารถดูดซับสารละลายเหล็กได้ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ตั้งต้น และสามารถลดปริมาณเหล็กในน้ำได้ตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก คือ ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีนี้นั้นทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นควรทำการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในสภาวะที่เหมาะสมอื่นๆเพิ่มเติม เช่น ศึกษาอุณหภูมิในการกระตุ้นช่วงกลางระหว่าง 700 – 800 องศาเซลเซียส เป็นต้น
2. ศึกษาสารกระตุ้นอื่นๆในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีต้นทุนต่ำกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น
3. สามารถนำการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป
4. สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการกำจัดสารละลายเหล็กในน้ำได้ เช่น การกรองน้ำตามบ้านเรือนที่ใช้น้ำบาดาลเพราะพบสารละลายเหล็กค่อนข้างมาก

เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

กรมควบคุมมลพิษ 2552. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. คุณภาพน้ำเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก. Available Online: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html (สืบค้นเมื่อวันที่ 4 มีนาคม 2559)

กิตติพงษ์ ลาลุน สมโภชน์ สุดาจันทร์ และชัยยันต์ จันทร์ศิริ. 2555. การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากผงถ่านวัสดุชีวมวล 3 ชนิดด้วยเกลือวอดถ่านอัดแท่ง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 3, 87-90.

ฐานข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี. 2016. สารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. Available Online: <http://laboratoryscimsds.com/?p=2042> (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2557)

ฐานข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี. 2016. สารเคมีไอโอดีน. Available Online: <http://laboratoryscimsds.com/?p=1928> (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2557)

ดารณี ชันเพ็ชร และปิยะนุช รสเครือ. 2557. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พีวีเอ)/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (โซเดียม-ซีเอ็มซี) สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 6, 447-455.

ธีรยุทธ นุชเนียม และทิพวัลย์ ตุ่มทอง. 2552. การบำบัดน้ำย้อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์. ปรียญานิพนธ์ ภาควิชาอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

นภารัตน์ จิวาลักษณ์ และดวงเดือน เทพนวล. 2556. การเตรียมและการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.

นภารัตน์ จิวาลักษณ์. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นำพล สุขเจริญ. 2555. การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากมะขามเปรี้ยว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิตคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. 2543. สมบัติของถ่านกัมมันต์. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ. Available Online: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/552-2016-02-09-03-10-28> (สืบค้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2557)

- ปรียาพา พาณิชย์ และพุทธธิดา ภูโอบ. 2556. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากปาล์ม. วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปัญญา มณีจักร. 2556. การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกทุวงเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออนจากน้ำเสียในการวิเคราะห์ค่า COD. งานประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต. 1, 119-128.
- รุจิรา ปิ่นแก้ว. 2556. การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- วารุณี ศุภเสวตหิรัญ. 2542. การคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิไล ลือวิสุทธิชาติ และสุภาภรณ์ เชื้อประเสริฐ. 2543. การกำจัดโลหะโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วีระวัฒน์ คลอวุฒิมินทร์ และพรสวรรค์ อัครแสงรัตน์. 2558. การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2, 185-191.
- สมพร ม่วงหืด. 2552. ความรู้เรื่องเตาอิวาเตะ. Available Online: <http://www.l3nr.org/posts/235013> (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2557)
- สรารุช ศรีคุณ. 2550. การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2557. ถ่านกัมมันต์. Available Online: <http://www2.rid.go.th/research/vijais/moa/fulltext/TIS900-2547.pdf> (สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2559).
- สิงหนเดช แต่งจวง. 2553. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานไฮโดรเจน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยกรุงเทพมหานคร.
- David, V.B. 2005. Apparatus and method for producing activated carbon. European patent, EP 1596982 A2

- Hirunpraditkoon, S., Tunthong, N., Ruangchai, A. and Nuithitikul, K. 2011. Adsorption capacities of activated carbons prepared from bamboo by KOH activation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 5, 591-592.
- Intamane, J., Chungsiriporn, J. and Bunyakan, C. 2009. The removal of ammonia from the exhaust of latex industrial with activated carbon impregnated with chemicals. Thesis of Chemical Engineering faculty of engineering, Prince of Songkla University.
- Jin, X., Yu, Z. and Wu, Y. 2010. Preparation of activated carbon from lignin obtained by straw pulping by KOH and K_2CO_3 chemical activation. *Cellulose Chemistry and Technology*. 46, 79-85.
- Jiwalak, N. 2002. Preparation and characterization of activated carbon from lignite coal by physical and chemical activation. Thesis of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Suranaree University of Technology.
- Kumaret, P., Shivakamy, K., Miranda, L. and Valan, M. 2006. Preparation of steam activated carbon from rubber wood sawdust and its adsorption kinetics. *Journal of Hazardous Materials*. 136, 922-929.
- McCrae, P.D.A., Zhang, T. and Walker, D.R.B. 2004. Method of making shaped activated carbon. United States Patent, US6696384.
- McFarland, M. and Dozier, M. 2015. Drinking water problems: iron and manganese. The Texas A&M University System. Available Online: <http://soiltesting.tamu.edu/publications/L-5451.pdf>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2559)
- Miller, J.R. 2004. Shaped lignocellulosic-based activated carbon. United States Patent, US 5736481 A.
- Sun, K. and Jiang, J.C. 2012. Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. *Biomass and Bioenergy*. 34, 539-544.
- Teng, H., Lin, Y. and Hsu, L. 2011. Production of activated carbons from pyrolysis of waste tires impregnated with potassium hydroxide. *Air & Waste Management Association*. 50, 1940-1946.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี

ก-1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ชื่อเคมี IUPAC	:	Potassium hydroxide
สูตรโมเลกุล	:	KOH
<u>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี</u> (Physical and Chemical Properties)		
สถานะ	:	ของแข็ง
สี	:	ไม่มีสี
กลิ่น	:	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	:	56.11 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	:	1,320 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	:	360 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	:	2.04 กรัมต่อมิลลิลิตร
อันตราย	:	เป็นพิษเมื่อกินเข้าไป เป็นสาเหตุทำให้เกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง และดวงตาได้รับอันตรายอย่างรุนแรง ทำให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

การปฐมพยาบาล

ข้อแนะนำทั่วไป	:	ให้แสดงเอกสารข้อมูลความปลอดภัยนี้ต่อแพทย์ที่ติดต่อ
เมื่อเข้าสู่ระบบหายใจ	:	ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ถ้าผู้ป่วยมีอาการหายใจไม่สะดวกหรือหายใจสั้นๆให้ออกซิเจนแก่ผู้ป่วยให้ใช้เครื่องช่วยหายใจในกรณีที่ผู้ป่วยไม่มีการหายใจหรืออยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์เท่านั้นห้ามช่วยเหลือผู้ป่วยโดยวิธีเป่าลมหายใจลักษณะปากต่อปากหรือเป่าลมหายใจเข้าทางจมูกสามารถใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่เหมาะสมได้
เมื่อสัมผัสผิวหนัง	:	ในกรณีที่ถูกผิวหนังให้ล้างออกด้วยน้ำปริมาณมากเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาทีถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เป็นสารรีบไปพบแพทย์ (ฐานข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี, 2016)

ก-2 ไอโอดีน (Iodine)

ชื่อเคมี IUPAC	:	Iodine
สูตรโมเลกุล	:	I ₂
<u>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)</u>		

สถานะ	:	ผง
สี	:	สีน้ำตาลแดง
กลิ่น	:	ฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	:	253 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	:	184 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	:	113 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	:	4.98

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ มีความเป็นพิษทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก ลำคอ และอาจเกิดแผลไหม้ได้ มีอาการปวดศีรษะ แ่นหน้าอก คลื่นไส้ และระบบไหลเวียนหยุดทำงานได้
- สัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนัง และเกิดแผลไหม้บริเวณผิวหนังที่สัมผัสกับสาร
- สัมผัสสูดดมทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และอาจเกิดแผลไหม้ได้ มีอาการน้ำตาไหล
- กินหรือกลืนเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองของลำคอ มีอาการปวดท้อง ท้องร่วง การรับสารโดยการกินหรือกลืนเข้าไปในปริมาณมากอาจมีอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

การปฐมพยาบาล (First Aid)

- สัมผัสทางหายใจ ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย และนาส่งไปพบแพทย์
- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างอย่างทั่วถึงทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ
- สัมผัสสูดดมให้ฉีดล้างทันทีโดยไหลผ่านอย่างน้อย 15 นาที
- กินหรือกลืนเข้าไปให้เข้ารับการดูแลโดยแพทย์ทันที

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ข-1 วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์^[6]

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

สารเคมี

- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (Conc. HCl)
- โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- ไอโอดีน (I_2)
- โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
- โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3)
- โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- แป้ง
- น้ำกลั่น

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
 - ตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร
 - เทใส่น้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิเมตร
2. น้ำแป้ง(น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น)
 - ชั่งแป้ง 1 ± 0.5 กรัม
 - ละลายด้วยน้ำกลั่น 25 ± 5 มิลลิลิตรพร้อมกับกวนตลอดเวลา
 - เทสารข้างต้นลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆปริมาตร 1 ลิตรพร้อมกับกวนตลอดเวลา
 - ต้มสารละลายต่อไปอีก 4-5 นาที
 - ทิ้งให้เย็นแล้วเก็บในขวดเก็บสารแช่ไว้ในตู้เย็น
3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล
 - ชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.820 กรัม
 - เติมน้ำกลั่นที่ต้มเดือดใหม่ๆ 75 ± 25 มิลลิลิตรแล้วคนให้ละลาย
 - เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 ± 0.01 กรัมเพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไทโอซัลเฟตจากแบคทีเรีย
 - เจือจางจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร
 - เทเก็บในขวดสีชาทิ้งไว้ 4 วันก่อนทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize)

วิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมโพแทสเซียมไอโอเดต (KI) 2.00 ± 0.01 กรัมแล้วเขย่าให้ละลาย
- เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 ปริมาตร 5 มิลลิลิตรแล้วเขย่าให้เข้ากัน
- ไตเตรตสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อนโดยเติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดจุดยุติ คือจุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

$$N_1 = (P \cdot R) / S$$

โดย	N_1	คือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)
	P	คือปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)
	R	คือความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)
	S	คือปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

4. สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล

- ผสมไอโอดีน 12.7 กรัมและโพแทสเซียมไอโอเดต 19.1 กรัมให้เข้ากัน
- เติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตรพร้อมกับกวนตลอดเวลา
- ค่อยๆเติมน้ำกลั่นครั้งละ 2-5 มิลลิลิตรพร้อมกับกวนตลอดเวลาจนปริมาตรทั้งหมดเป็น 50 – 60 มิลลิลิตร
- กวนสารละลายต่ออีก 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด
- เจือจางจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- เทเก็บในขวดสีชา

วิธีเทียบมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อนโดยเติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดจุดยุติ คือจุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

$$N_2 = (S \cdot N_1) / I$$

โดย	N_2	คือความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
	S	คือปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
	N_1	คือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)
	I	คือปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล
 - ออปโพแทสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง
 - ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
 - ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 กรัม
 - ละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
 - เจือจางจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
 - เทเก็บในขวดเก็บสาร

วิธีการวิเคราะห์

1. อบผงถ่านกัมมันต์ที่ได้ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนของถ่านกัมมันต์ใส่ในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาตร 10 มิลลิลิตรปิดจุกแล้วเขย่าให้เข้ากัน
4. นำขวดไปวางบนเตาไฟฟ้าในตู้ดูดควันเปิดจุกออกต้มให้เดือดประมาณ 30 ± 2 วินาทีเพื่อไล่สารประกอบซัลเฟตที่เป็นมลทินออกแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้วปริมาตร 100 มิลลิลิตรเติมลงในขวดปิดจุกอย่างรวดเร็วแล้วเขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที
6. กรองสารละลายที่ได้อย่างรวดเร็วด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42
7. ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20-30 มิลลิลิตรแรกเพื่อล้างปิเปตและปิเกตอร์ที่จะใช้กับสารละลายก่อนจากนั้นปิเปตสารละลายที่ได้มา 50 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร
8. ไตเตรตด้วยสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อนเติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดจุดยุติคือจุดที่สารละลายไม่มีสีบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

คำนวณการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C)

$$X/M = [A - 2.2BS]/W$$

$$C = (N_1 * S)/F$$

โดย	X/M	คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	N_1	คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)
	N_2	คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
	A	คือ น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม) ($N_2 \times 12693.0$)
	B	คือ น้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลย์พอดีกับ(มิลลิกรัม) สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตร ($N_1 \times 126.93$)
	C	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
	W	คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

- S คือ ปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)
- 2.2 คือ สัดส่วนระหว่างสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเตรต (Dilution Factor)

ข-2 วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์^[6]

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำตามมาตรฐาน JIS K 1474-1991 รายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

สารเคมี

- โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)
- เมทิลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS}$)

การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer Solution)

- อบโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
- ชั่งโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 9.08 กรัมละลายด้วยน้ำกลั่น
- เจือจางให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตรสารละลายนี้ที่ได้คือ A
- อบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมงและทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
- ชั่งไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 23.88 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น
- เจือจางให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ที่ได้คือ B
- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีพีเอชเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบลู

- อบเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
- ชั่งเมทิลีนบลู 1,200 มิลลิกรัม
- ละลายด้วยสารบัฟเฟอร์จนมีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตรจะได้สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร

การสร้างกราฟมาตรฐาน

- เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้มา 2.5, 5, 10, 15, และ 20 มิลลิลิตรตามลำดับใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตรเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งจะได้สารละลายเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12, 0.24, 0.48, 0.72 และ 0.96 กรัมต่อลิตรตามลำดับ
- นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร
- บันทึกค่าการดูดกลืนแสงแล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรแกน Y คือค่าการดูดกลืนแสงจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1200 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตรปิดจุกแล้วนำไปเขย่าด้วยอ่างเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที
3. นำสารละลายที่ได้ไปทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก
4. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เป็นตัวเปรียบเทียบหรือแบลнк (Blank)

คำนวณค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ

$$Q = [V*(1200-C)]/S$$

โดย	C	คือความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายเมทิลีนบลู	(มิลลิกรัมต่อลิตร)
	S	คือน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้	(กรัม)
	1200	คือความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น	(มิลลิกรัมต่อลิตร)
	Q	คือค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ	(มิลลิกรัมต่อกรัม)
	V	คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร	

ข-3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำ^[6]

สารเคมี

1. 100 ppm Fe²⁺
2. 1, 10 -phenanthroline monohydrate
3. Hydroxylammonium chloride
4. สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5
5. conc. H₂SO₄

การเตรียมสารละลาย

1. 10 ppm Fe²⁺ ชั่ง Fe (NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O (M.W. = 392.14) จำนวน 0.0702 g ละลายให้หมดด้วยน้ำกลั่นลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วเติม 2.0 mL Conc. H₂SO₄ เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร
2. 1, 10-phenanthroline solution เตรียมโดยละลาย 1, 10-phenanthroline จำนวน 0.05 g ด้วยน้ำกลั่น 50 mL เก็บในขวดพลาสติก
3. Hydroxylammonium chloride solution เตรียมโดยละลาย 2.5 g ของ hydroxylammonium chloride ด้วยน้ำกลั่น 25 mL
4. สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 เตรียมโดยผสมสารละลาย CH₃COOH เข้มข้น 1 M จำนวน 65 mL กับสารละลาย Sodium acetate เข้มข้น 1 M จำนวน 35 mL

วิธีการทดลอง

1. การเตรียม Calibration curve

1.1 ปิเปิดสารละลายต่างๆใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL จำนวน 5 ใบดังตารางข้างล่างนี้แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 25 mL ด้วยน้ำกลั่นเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

ขวดที่	[Fe ²⁺] (ppm)	Hydroxylamine (ml)	1,10-phenanthroline (ml)	Buffer pH 5 (ml)
1	0	1.0	4.0	2.5
2	0.05	1.0	4.0	2.5
3	0.10	1.0	4.0	2.5
4	0.15	1.0	4.0	2.5
5	0.25	1.0	4.0	2.5

1.2. นำสารละลายที่เตรียมไว้ในข้อ 1 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm โดยใช้สารละลายในขวดที่ 1 เป็น blank เขียนกราฟความสัมพันธ์ของ absorbance กับความเข้มข้นของ Fe²⁺

2. การหาปริมาณเหล็กในตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างน้ำแล้วนำมากรองจากนั้นปิเปตน้ำตัวอย่างมา 10.00 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL เติม hydroxylamine จำนวน 0.5 mL เติม 1,10-phenanthroline จำนวน 4.0 mL แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ 2.5 mL จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 25.0 mL ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีก่อนนำไปวัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 510 nm คำนวณหาความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำเป็น mg/L

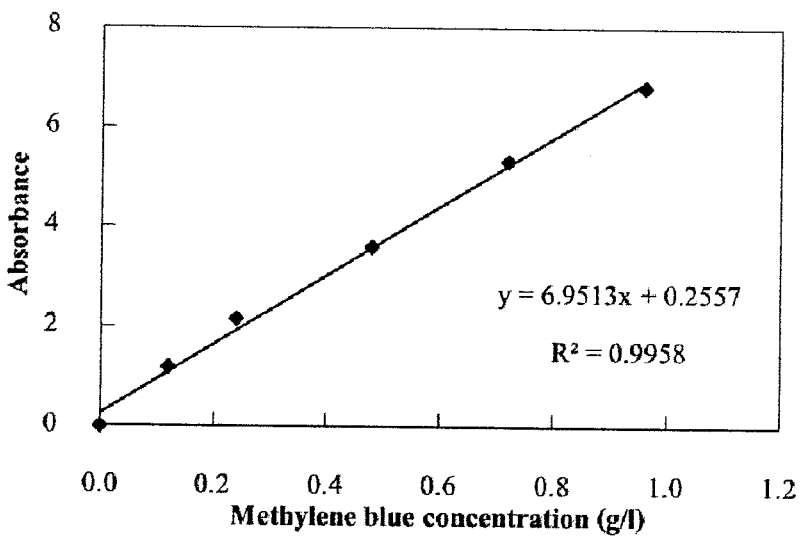
ภาคผนวก ค

กราฟมาตรฐาน

1. การสร้างกราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู

ตารางที่ ค-1 ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (g/L)	ค่าการดูดกลืนแสง $\lambda=665 \text{ nm}$
0	0
0.12	1.1714
0.24	2.1529
0.48	3.5912
0.72	5.3134
0.96	6.8225

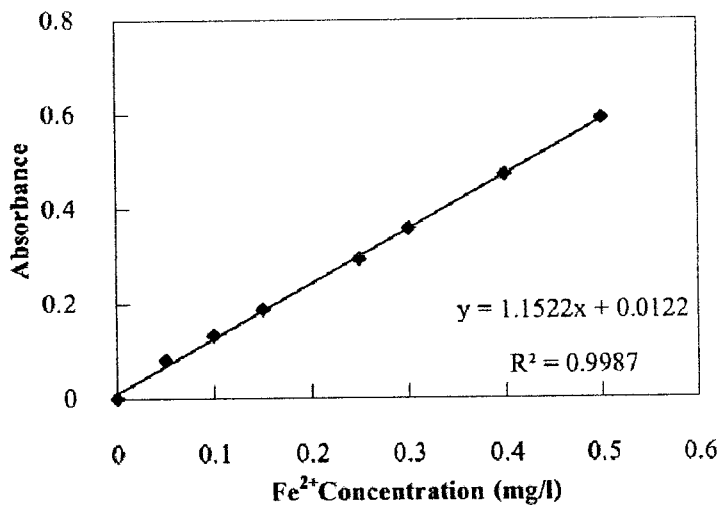


รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลู

2. การสร้างกราฟมาตรฐานเหล็ก

ตารางที่ ค-2 ค่าการดูดกลืนแสงของเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นเหล็ก (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง $\lambda=510$ nm
0	0
0.05	0.08051
0.10	0.13403
0.15	0.18748
0.25	0.29333
0.30	0.35674
0.40	0.47132
0.50	0.59081



รูปที่ ค-2 กราฟมาตรฐานของเหล็ก

ภาคผนวก ง

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

ง-1 ผลการวิเคราะห์การอัดขึ้นเม็ดถ่านด้วยสารเชื่อมประสาน

ตารางที่ ง-1.1 ผลของปริมาณสารเชื่อมประสาน แป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดิน และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีต่อค่าความแข็งแรงของเม็ดถ่านขนาด 4 และ 8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ชนิดสารเชื่อมประสาน	สัดส่วนผงถ่าน:สารเชื่อมประสาน:น้ำ (โดยน้ำหนัก)	ค่าความแข็งแรง (MPa)
4	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	46
		1:0.35:1	56
		1:0.40:1	57
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	2
		1:0.35:1	2
		1:0.40:1	3
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	50
		1:0.35:1	60
		1:0.40:1	65
8	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	34
		1:0.35:1	40
		1:0.40:1	42
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	1
		1:0.35:1	2
		1:0.40:1	2
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	37
		1:0.35:1	46
		1:0.40:1	50

ตารางที่ ง-1.2 ผลของปริมาณสารเชื่อมประสานชนิดแป้งมันสำปะหลัง น้ำมันดิน และโพลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่มีต่อร้อยละการแตกตัวของเม็ดถ่านในน้ำ ที่ขนาดเม็ดถ่าน 4 และ 8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ชนิดสารเชื่อมประสาน	สัดส่วน ผงถ่าน:สารเชื่อมประสาน:น้ำ (โดยน้ำหนัก)	น้ำหนัก ถ่านก่อนแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนัก ถ่านหลังแช่น้ำ (กรัม)	น้ำหนัก ถ่านที่แตกตัวในน้ำ (กรัม)	%การแตกของเม็ดถ่านในน้ำ
4	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	20.04	19.33	0.71	4
		1:0.35:1	20.08	19.83	0.25	1
		1:0.40:1	20.03	19.79	0.24	1
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	20.11	17.58	2.53	13
		1:0.35:1	20.07	17.94	2.13	11
		1:0.40:1	20.15	18.32	1.83	9
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	20.21	19.76	0.45	2
		1:0.35:1	20.04	19.81	0.23	1
		1:0.40:1	20.19	19.98	0.21	1
8	แป้งมันสำปะหลัง	1:0.30:1	20.08	18.81	1.27	6
		1:0.35:1	20.16	19.24	0.92	5
		1:0.40:1	20.14	19.35	0.79	4
	น้ำมันดิน	1:0.30:1	20.24	16.73	3.51	17
		1:0.35:1	20.13	16.67	3.46	17
		1:0.40:1	20.18	16.89	3.29	16
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1:0.30:1	20.21	19.53	0.68	3
		1:0.35:1	20.14	19.69	0.45	2
		1:0.40:1	20.16	19.83	0.33	2

ง-2 ผลการวิเคราะห์การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ง-2.1 ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ง-2.1.1 ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

สถานะในการกระตุ้น	ความเข้มข้นของ KOH (M)	น้ำหนักถ่านก่อนกระตุ้น (g)	น้ำหนักถ่านหลังกระตุ้น (g)	ร้อยละผลได้	ร้อยละผลได้เฉลี่ย
อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 30 นาที	0.1	200.002	190.591	95.29	95.30
		200.083	190.684	95.30	
	0.5	200.002	185.191	95.59	92.86
		200.042	186.284	93.12	
	1.0	200.125	170.557	85.23	85.59
		200.018	171.911	85.95	
	2.0	200.071	150.661	75.30	75.68
		200.029	152.129	76.05	

ตารางที่ ง-2.1.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

สถานะในการกระตุ้น	อุณหภูมิในการกระตุ้น °C	น้ำหนักถ่านก่อนกระตุ้น (g)	น้ำหนักถ่านหลังกระตุ้น (g)	ร้อยละผลได้	ร้อยละผลได้เฉลี่ย
ความเข้มข้นของ KOH 2 M และ เวลา 30 นาที	600	200.071	150.661	75.30	75.68
		200.029	152.129	76.05	
	700	200.121	120.129	60.07	60.16
		200.102	120.561	60.25	
	800	200.155	118.192	59.05	59.97
		200.072	121.833	60.89	

ตารางที่ ง-2.1.3 ผลของเวลาในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

สภาวะในการกระตุ้น	เวลาในการกระตุ้น (min)	น้ำหนักถ่านก่อนกระตุ้น (g)	น้ำหนักถ่านหลังกระตุ้น (g)	ร้อยละผลได้	ร้อยละผลได้เฉลี่ย
ความเข้มข้น KOH 2 M และอุณหภูมิ 700 °C	30	200.121	120.213	60.07	60.66
		200.102	122.561	61.25	
	60	200.088	110.723	55.34	55.45
		200.013	111.125	55.56	
	90	200.055	98.163	49.07	48.47
		200.149	95.829	47.88	
	120	200.031	97.163	48.57	49.48
		200.105	100.829	50.39	

ง-2.2 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ง-2.2.1 ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

สภาวะในการกระตุ้น	ความเข้มข้นของ KOH (M)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต (ml)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เฉลี่ย (mg/g)
อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 30 นาที	0.1	2.088	27.5	240.12	241.01
		2.085	28.0	233.77	
		2.091	26.8	249.13	
	0.5	2.045	25.7	269.75	276.29
		2.105	24.3	280.63	
		2.111	24.4	278.51	
	1.0	2.149	19.2	341.16	345.76
		2.165	18.8	343.80	
		2.176	18.0	352.32	
	2.0	1.951	12.4	473.11	470.50
		1.942	13.0	466.67	
		1.933	12.8	471.74	

ตารางที่ ง-2.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่มีต่อค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

สถานะในการกระตุ้น	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต (ml)	ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (mg/g)	ค่าไอโอดีนนมเฉลี่ย (mg/g)
ความเข้มข้นของ KOH 2 M และเวลา 30 นาที	600	1.951	12.4	473.11	470.50
		1.942	13.0	466.67	
		1.933	12.8	471.74	
	700	1.901	10.0	520.81	524.17
		1.906	9.5	526.77	
		1.902	9.7	524.94	
	800	2.011	8.9	507.59	508.44
		2.009	8.6	512.27	
		2.014	9.0	505.45	

ตารางที่ ง-2.2.3 ผลของเวลาในการกระตุ้นที่มีต่อค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

สถานะในการกระตุ้น	ความเข้มข้นของ KOH (M)	น้ำหนักถ่าน (g)	ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต (ml)	ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (mg/g)	ค่าไอโอดีนนมเฉลี่ย (mg/g)
ความเข้มข้น KOH 2 M อุณหภูมิ 700 °C	30	1.901	10.0	520.81	524.17
		1.906	9.5	526.77	
		1.902	9.7	524.94	
	60	1.912	7.7	551.40	550.92
		1.914	7.9	547.91	
		1.915	7.5	553.45	
	90	1.933	3.8	601.75	602.75
		1.932	3.8	602.06	
		1.929	3.7	604.45	
120	1.928	5.9	572.90	570.95	
	1.929	6.1	569.70		
	1.932	6.0	570.27		

ง-2.3 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ง-2.3.1 ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้นของ KOH (M)	น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/L)	ความเข้มข้นที่สมดุลของเมทิลีนบลู (mg/L)	ค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ค่าเมทิลีนบลูเฉลี่ย (mg/g)
0.1	0.511	1200	860	66.54	66.11
	0.507		867	65.68	
0.5	0.513	1200	765	84.80	85.53
	0.510		760	86.27	
1.0	0.509	1200	710	96.27	95.91
	0.518		705	95.56	
2.0	0.501	1200	620	115.77	116.50
	0.505		608	117.23	

ตารางที่ ง-2.3.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ ดำเนินการที่ความเข้มข้นโพแทสเซียม (KOH) 2.0 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/L)	ความเข้มข้นที่สมดุลของเมทิลีนบลู (mg/L)	ค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ค่าเมทิลีนบลูเฉลี่ย (mg/g)
600	0.501	1200	620	115.77	116.50
	0.505		608	117.23	
700	0.512	1200	385	159.18	159.53
	0.516		375	159.88	
800	0.501	1200	388	162.08	161.91
	0.507		380	161.74	

ตารางที่ ง-2.3.3 ผลของเวลาในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ดำเนินการที่ความเข้มข้นโพแทสเซียม (KOH) 2.0 โมลาร์ และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส

เวลาในการกระตุ้น (นาที)	น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/l)	ความเข้มข้นที่สมดุลของเมทิลีนบลู (mg/l)	ค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ค่าเมทิลีนบลูเฉลี่ย (mg/g)
30	0.512	1200	385	159.18	159.53
	0.516		375	159.88	
60	0.521	1200	551	124.49	125.43
	0.516		548	126.37	
90	0.514	1200	155	203.31	202.04
	0.519		158	200.77	
120	0.511	1200	175	200.59	200.68
	0.513		170	200.78	

ง-3 ผลการวิเคราะห์การดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ง-3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเหล็ก

ตารางที่ ง-3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเหล็ก โดยความเข้มข้นของเหล็ก $[C_0]$ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

อัตราการไหล (L/min)	เวลา (min)	ความเข้มข้นของเหล็ก [C] (mg/l)	[C]/ [C ₀]
0.1	30	0.197	0.020
	60	0.206	0.021
	90	0.214	0.025
	120	0.252	0.036
	150	0.364	0.036
	180	0.363	0.047
	210	0.470	0.048
	240	0.484	0.050
	270	0.500	0.050
	300	0.500	0.050
0.5	30	0.25	0.025
	60	0.26	0.026
	90	0.27	0.027
	120	0.28	0.028
	150	0.28	0.028
	180	0.30	0.030
	210	0.34	0.034
	240	0.41	0.041
	270	0.44	0.044
	300	0.44	0.044
1.0	30	0.353	0.035
	60	0.351	0.035
	90	0.357	0.036
	120	0.351	0.035
	150	0.351	0.035
	180	0.351	0.035
	210	0.384	0.038
	240	0.486	0.049
	270	0.487	0.049
	300	0.488	0.049

ง-3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเหล็ก

ตารางที่ ง-3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเหล็กโดยอัตรา
การไหล 0.5 ลิตรต่อนาที และถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ เหล็ก [C ₀] (mg/l)	เวลา (min)	ความเข้มข้นของเหล็ก [C] (mg/l)	[C]/ [C ₀]
5	30	0.084	0.017
	60	0.086	0.017
	90	0.093	0.019
	120	0.096	0.019
	150	0.097	0.019
	180	0.099	0.020
	210	0.110	0.022
	240	0.111	0.022
	270	0.120	0.024
	300	0.129	0.026
10	30	0.253	0.025
	60	0.266	0.027
	90	0.269	0.027
	120	0.276	0.028
	150	0.282	0.028
	180	0.298	0.030
	210	0.344	0.034
	240	0.408	0.041
	270	0.439	0.044
	300	0.439	0.044
15	30	0.785	0.052
	60	0.789	0.053
	90	0.793	0.053
	120	0.797	0.053
	150	0.966	0.064
	180	0.967	0.064
	210	0.999	0.067
	240	1.034	0.069
	270	1.117	0.074
	300	1.118	0.075

ง-3.3 เปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเหล็กของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ตารางที่ ง-3.3.1 การดูดซับสารละลายเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อ นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก $[C_0]$ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

ชนิดของถ่านกัมมันต์	เวลา (min)	ความเข้มข้นของเหล็ก [C] (mg/l)	$[C]/[C_0]$
ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	30	0.084	0.017
	60	0.087	0.017
	90	0.093	0.019
	120	0.097	0.019
	150	0.098	0.020
	180	0.099	0.020
	210	0.110	0.022
	240	0.111	0.022
	270	0.120	0.024
	300	0.129	0.026
	330	0.139	0.028
	360	0.148	0.030
	390	0.150	0.030
	420	0.156	0.031
	450	0.163	0.033
	480	0.182	0.036
	510	0.193	0.039
	540	0.196	0.039
	570	0.198	0.040
	600	0.200	0.040
	630	0.204	0.041
	660	0.205	0.041
	690	0.207	0.041
	720	0.209	0.042
	750	0.220	0.044
	780	0.235	0.047
	810	0.278	0.056
840	0.304	0.061	
870	0.321	0.064	
900	0.330	0.066	

ตารางที่ ง-3.3.2 การดูดซับสารละลายเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยอัตราการไหล 0.5 ลิตร ต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก $[C_0]$ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

ชนิดของถ่านกัมมันต์	เวลา (min)	ความเข้มของเหล็ก [C] (mg/L)	[C]/ [C ₀]
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	30	0.075	0.015
	60	0.075	0.015
	90	0.076	0.015
	120	0.082	0.016
	150	0.085	0.017
	180	0.089	0.018
	210	0.090	0.018
	240	0.091	0.018
	270	0.091	0.018
	300	0.100	0.020
	330	0.102	0.020
	360	0.102	0.020
	390	0.102	0.020
	420	0.102	0.020
	450	0.103	0.021
	480	0.104	0.021
	510	0.113	0.023
	540	0.121	0.024
	570	0.124	0.025
	600	0.136	0.027
	630	0.147	0.029
	660	0.191	0.038
	690	0.237	0.047
	720	0.273	0.055
750	0.307	0.061	
780	0.332	0.066	
810	0.367	0.073	
840	0.379	0.076	
870	0.398	0.080	
900	0.402	0.080	

ง-4 ผลวิเคราะห์การดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูด้วยการกระตุ้นไอน้ำ

ตารางที่ ง-4.1 การดูดซับสารละลายเหล็กในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว โดยอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็ก $[C_0]$ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และถ่านกัมมันต์ 500 กรัม

ชนิดของถ่านกัมมันต์	เวลา (min)	ความเข้มข้นของเหล็ก [C] (mg/l)	$[C]/[C_0]$
ถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว	30	0.086	0.017
	60	0.087	0.017
	90	0.094	0.019
	120	0.098	0.020
	150	0.101	0.020
	180	0.108	0.022
	210	0.114	0.023
	240	0.119	0.024
	270	0.123	0.025
	300	0.135	0.027
	330	0.139	0.028
	360	0.156	0.031
	390	0.159	0.032
	420	0.193	0.039
	450	0.202	0.040
	480	0.210	0.042
	510	0.215	0.043
	540	0.217	0.043
	570	0.223	0.045
	600	0.227	0.045
	630	0.231	0.046
	660	0.249	0.050
	690	0.249	0.050
	720	0.253	0.051
	750	0.299	0.060
	780	0.321	0.064
	810	0.326	0.065
840	0.329	0.066	
870	0.358	0.072	
900	0.395	0.079	