



รายงานการวิจัย

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน
(Preparation of Activated Carbon from Biomass-Based Materials
and the Characterization of Pore Structure)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสฤติย์กุลชัย

สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

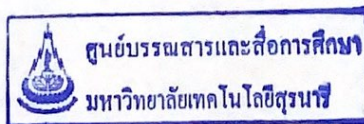
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2545-2546

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2549





รายงานการวิจัย

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน
Preparation of Activated Carbon from Biomass-Based Materials and
the Characterization of Pore Structure



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 - 2546

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2545-2546 สำหรับโครงการวิจัยนี้
2. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. ผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ น.ส. ณิชญา พูนสุวรรณ และ น.ส. สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลสองชนิด ได้แก่ ชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลและเมล็ดลำไยจากโรงงานผลิตผลไม้กระป๋อง โดยใช้วิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำและวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพนั้นทั้งอุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนการเตรียมถ่าน (คาร์บอนไนเซชัน) และขั้นตอนการกระตุ้นมีอิทธิพลต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นมีผลมากที่สุด ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน โดยให้พื้นที่ผิวสูงสุด ประมาณ $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ ที่อุณหภูมิกระตุ้นในช่วงประมาณ $850 - 900^\circ\text{C}$ เป็นเวลานาน 60 นาที ถ่านกัมมันต์เตรียมจากเมล็ดลำไยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้พื้นที่ผิวสูงสุดประมาณ $1,280 \text{ m}^2/\text{g}$ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900°C นาน 60 นาที สำหรับการกระตุ้นโดยวิธีทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อเทียบกับวิธีกระตุ้นทางกายภาพพบว่าสภาวะอุณหภูมิกระตุ้นที่ให้พื้นที่ผิวสูงสุดของชานอ้อยและเมล็ดลำไยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า ($\sim 400^\circ\text{C}$) โดยให้พื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ $1,600 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ สำหรับชานอ้อยและเมล็ดลำไยตามลำดับ



Abstract

This research project aims to study the preparation of activated carbon from bagasse and longan seed which are solid residues left from sugar mills and fruit cannery processes, respectively. Two methods of preparation were studied including the physical activation with carbon dioxide and steam and the chemical activation with phosphoric acid. In the physical activation method, both the temperature and time during the carbonization and activation steps affected the porous properties of the prepared activated carbons with activation temperature exerting the strongest effect. Activated carbons produced by CO₂ and steam activation gave similar porous properties with the highest BET surface area being obtained in the order of 1,000 m²/g at activation temperature and time of 850–900°C and 60 min, respectively. Activated carbons from longan seed activated with CO₂ gave the maximum BET surface area around 1,280 m²/g at activation temperature and time of 900°C and 60 min, respectively. For chemical activation method with phosphoric acid, the optimum condition that gave the maximum in BET surface area occurred at a much lower temperature at 400°C, with maximum BET area being 1,600 and 1,000 m²/g for bagasse and longan seed, respectively.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง1
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ1
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์.....	8
2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	19
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	26
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	26
3.3 วิธีทดลอง.....	34
3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ.....	34
3.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.....	34
3.3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ.....	36
3.3.4 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.....	36
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	37

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ CO_2	39
4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	39
4.1.2 ผลของสภาวะการเตรียมต่อร้อยละผลผลิตรวม.....	39
4.1.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์.....	41
4.2 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ.....	52
4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ.....	52
4.2.2 ผลของสภาวะการเตรียมต่อร้อยละผลผลิตรวม.....	52
4.2.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์.....	54
4.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก.....	64
4.3.1 องค์ประกอบและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์.....	64
4.3.2 สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์.....	64
4.3.3 การดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์.....	72
4.4 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	82
4.4.1 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของเมล็ดลำไย.....	82
4.4.2 ผลวิเคราะห์แบบประมาณของเมล็ดลำไย ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย.....	82
4.4.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อผลผลิตถ่านกัมมันต์.....	85
4.4.4 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	90
4.5 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4).....	95
4.5.1 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต.....	99
4.5.2 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	99

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... 106

บรรณานุกรม..... 110

ภาคผนวก ก. ประวัติผู้วิจัย..... ก1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุนของถ่านกัมมันต์.....	9
4.1 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติแบบประมาณ และร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	40
4.2 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	46
4.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อผลวิเคราะห์แบบประมาณและร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	53
4.4 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ.....	58
4.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของขานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้.....	65
4.6 สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	68
4.7 ค่าคงที่ในสมการแลงเมียร์ สำหรับอธิบายการดูดซับโครเมียมจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการดูดซับ (ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.5).....	79
4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเมล็ดลำไยและถ่านชาร์.....	84
4.9 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางกายภาพ.....	92
4.10 ค่าตัวแปรจากสมการความสัมพันธ์แบบ โพลี โนเมียลอันดับสามระหว่างสมบัติพื้นผิวและร้อยละน้ำหนักที่หายไปในขั้นตอนกระตุ้น.....	98
4.11 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมี.....	102

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์.....	10
2.2	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	11
2.3	หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์.....	13
2.4	การจัดระเบียบโครงสร้างคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ ตามการเพิ่มของอุณหภูมิ.....	15
2.5	การแบ่งชนิดของไอโซทอมการดูดซับ.....	21
3.1	เตาเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.....	27
3.2	เตาเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ.....	28
3.3	ตู้อบสาร.....	29
3.4	ชุดตะแกรงร่อนและเครื่องเขย่าตะแกรง.....	30
3.5	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (ASAP2010).....	31
3.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	32
3.7	รูปวัตถุคิป์ที่ใช้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้.....	33
4.1	ผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที (300/60 หมายถึง อุณหภูมิ/เวลาการคาร์บอนไนซ์).....	42
4.2	ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟไอโซทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เวลากระตุ้น 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที.....	43
4.3	ผลของเวลากระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที.....	45
4.4	ผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (อุณหภูมิกระตุ้น 800°C และเวลากระตุ้น 60 นาที).....	47
4.5	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (ก) 60 นาที และ (ข) 120 นาที ต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยกระตุ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.6	ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที.....	50
4.7	ผลของเวลากระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที.....	51
4.8	ผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที (300/60 หมายถึง อุณหภูมิ/เวลาการคาร์บอนไนซ์).....	55
4.9	ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้เวลากระตุ้น 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที.....	56
4.10	ผลของเวลากระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที.....	57
4.11	ผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (อุณหภูมิกระตุ้น 800°C และเวลากระตุ้น 60 นาที).....	59
4.12	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (ก) 60 นาทีและ (ข) 120 นาที ต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน.....	60
4.13	ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที.....	61
4.14	ผลของเวลากระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที.....	62
4.15	ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยโดยกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	66
4.16	ผลของสภาวะกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.17 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นและอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ต่อการกระจายปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ (เวลาการกระตุ้น 60 นาที).....	70
4.18 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาต่อการกระจายปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุคิบ 1 : 1).....	71
4.19 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะพื้นผิวของวัตถุคิบซานอ้อย (ก) และของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุคิบ/อุณหภูมิ/เวลาดังนี้ (ข) 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที และ (ง) 1.5 : 1.0/500°C/60 นาที.....	73
4.20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์จากซานอ้อยเป็นตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมสองค่า (อุณหภูมิ 30°C, pH = 2.5).....	74
4.21 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อการดูดซับโครเมียมจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซานอ้อย (อุณหภูมิ 30°C, ความเข้มข้นเริ่มต้นโครเมียม 100 mg/L).....	75
4.22 ผลของอุณหภูมิต่อไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมจากสารละลาย ด้วยถ่านกัมมันต์เตรียมจากซานอ้อย (pH = 2.5, ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 100 mg/L).....	77
4.23 การทดสอบไอโซเทอมแลงเมียร์สำหรับการดูดซับโครเมียมจากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซานอ้อย (ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 2.5).....	78
4.24 การทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ การดูดซับโครเมียมจากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์จากซานอ้อย (a) แบบจำลองอันดับหนึ่ง และ (b) แบบจำลองอันดับสอง (อุณหภูมิการดูดซับ 30°C, pH = 2.5, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 mg/L)....	81
4.25 ร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่และอัตราการหายไปของน้ำหนักในระหว่างการไพโรไลซิสเมื่อดำไล.....	83
4.26 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	86
4.27 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงขั้นตอนกระตุ้น.....	87
4.28 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ในช่วงขั้นตอนกระตุ้น.....	88
4.29 ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงขั้นตอนการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่าง ๆ.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.30 ไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สใน ไตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ด ลำไยที่เตรียมที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่าง ๆ.....	91
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดกับร้อยละน้ำหนักที่ หายไปในช่วงตอนการกระตุ้น.....	93
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และปริมาตรรู พรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ กับร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงตอนการกระตุ้น....	94
4.33 การกระจายปริมาตรรูพรุนของรูพรุนแต่ละขนาดที่ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไป ในช่วงตอนกระตุ้นต่าง ๆ.....	96
4.34 ความสัมพันธ์แบบโพสิ โนเมียลอันดับสามระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ทั้งหมดและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก กับร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงตอนการ กระตุ้น.....	97
4.35 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีการกระตุ้น ทางเคมี (H_3PO_4) ที่สภาวะ 60 นาที และความเข้มข้น H_3PO_4 50% โดยน้ำหนัก.....	100
4.36 ไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สใน ไตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์เตรียมที่ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	101
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดกับอุณหภูมิการ กระตุ้น.....	103
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และปริมาตรรู พรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ กับอุณหภูมิการกระตุ้น.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้กลายเป็นถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จัดเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง และมีความว่องไวในการดูดซับสารสูงมาก ถ่านกัมมันต์ถูกใช้ประโยชน์เป็นสารดูดซับในกระบวนการต่าง ๆ เช่น ในกระบวนการแยกสารผสม การทำสารให้บริสุทธิ์ การฟอกสีในสารละลาย การกำจัดกลิ่น กำจัดสารปนเปื้อนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตลอดจนใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี อาหาร ยา น้ำดื่ม และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ภายในประเทศพบว่าส่วนใหญ่จะใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบหลักแต่ปริมาณการผลิตยังไม่พอเพียงต่อความต้องการทำให้ยังคงมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง⁽¹⁾ จากประโยชน์และความสำคัญของถ่านกัมมันต์ที่ได้กล่าวมาแล้วและเพื่อให้การวิจัยและพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์มีความหลากหลายในเชิงของวัตถุดิบเพิ่มมากขึ้น คณะผู้วิจัยชุดนี้ได้เริ่มทำการศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ที่มีอยู่มากในแถบภาคเหนือของประเทศไทยโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในช่วงปีงบประมาณ 2542 - 2544^(2,3) ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ได้ดี โดยเฉพาะการเตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงกว่าวิธีกระตุ้นทางกายภาพประมาณ 3-4 เท่า ขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น สำหรับโครงการใหม่นี้จะทำการศึกษาวิจัยถึงการผลิตถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวลทางการเกษตรที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปในโรงงาน โดยจะเลือกศึกษาวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพ 2 ชนิดได้แก่ ชานอ้อย (Bagasse) และเมล็ดลำไย (Longan seed) เนื่องจากมีเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในปริมาณมาก

สำหรับชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศจำนวน 46 โรง ประมาณว่ามีอยู่ถึง 15 ล้านตันต่อปีที่ความชื้น 50%⁽⁴⁾ โดยชานอ้อยที่ได้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ (~85%) ปริมาณที่เหลืออีก 15% จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ทำเยื่อกระดาษ หรือทำปุ๋ยหมัก อย่างไรก็ตามก็มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำชานอ้อยมาแปรรูปให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง ซึ่งอาจนำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานน้ำตาล สำหรับกระบวนการฟอกสีของสารละลายน้ำตาลในกระบวนการผลิตหรือใช้กำจัดสีของน้ำเสียที่เกิดจากการผลิต เป็นต้น ปัจจุบันการฟอกสีของสารละลายน้ำตาลก่อนการตกผลึกจะใช้เมมเบรนสังเคราะห์ ซึ่งจะลดระดับความเข้มข้นของสีโดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ซึ่ง

เม็ดเรซินที่ใช้ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศและมีราคาแพง ดังนั้นถ้าสามารถนำถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย มาช่วยเสริมในกระบวนการฟอกสีของสารละลายน้ำตาล ก็น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลด ต้นทุนได้ ประกอบกับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่ผ่านการใช้งานแล้ว ยังสามารถนำกลับไปใช้เป็น เชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำได้อีกโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษจากกระบวนการเผาไหม้ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตจากชานอ้อยยังอาจนำไปใช้งานในด้านอื่น ๆ ได้อีก เช่น ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งต้องทำการศึกษาและวิจัยต่อไป

สำหรับเม็ดลำไยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลลำไยสดก็ควรที่จะได้มีการศึกษาเพื่อ เปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม เนื่องจากมีปริมาณเหลือทิ้งในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก และ พบว่ายังไม่มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำเม็ดลำไยมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง จากตัวเลขที่รายงานโดยกอง วิจัยเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์⁽⁵⁾ พบว่า ในปี พ.ศ. 2543 ผลผลิตของลำไยมี สูงถึง 255,312 ตัน โดยมีสัดส่วนของลำไยสดและผลิตภัณฑ์จากลำไย เป็นดังนี้ ลำไยสด 58% ลำไยแห้ง 25% ลำไยแช่แข็ง 1% และลำไยกระป๋อง 16% โดยคิดเป็นมูลค่ารวมประมาณ 3,000 ล้านบาท หากคิดเฉพาะการผลิตลำไยกระป๋องเพียงอย่างเดียวจะมีเม็ดลำไยเหลือทิ้งจากกระบวนการ ผลิตประมาณ 25,000 ตันต่อปี ดังนั้นถ้าสามารถแปรรูปเม็ดลำไยให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น การทำให้เป็นถ่านกัมมันต์ก็จะช่วยในการควบคุมและกำจัดเม็ดลำไยที่เหลือทิ้งในปริมาณมากได้อย่าง มีประสิทธิภาพอีกทางหนึ่งด้วย

เทคโนโลยีการเตรียมถ่านกัมมันต์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีการ วิธีแรกเป็นการ กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) ซึ่งต้องเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่าน เรียกขั้นตอนนี้ว่า “คาร์ บอนในเซชัน” (Carbonization) ต่อด้วยการนำถ่านไปกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงเพื่อเพิ่มความพรุนโดยใช้ไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกขั้นตอนนี้ว่า “การกระตุ้น” (Activation) ส่วนวิธีที่สองเป็นวิธี กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ซึ่งต้องแช่วัตถุดิบในสารเคมี เช่น $ZnCl_2$, KOH , H_3PO_4 แล้ว นำไปกระตุ้นโดยการให้ความร้อนแต่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีกระตุ้นทางกายภาพโดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากวิธีกระตุ้นทางเคมีจะให้พื้นที่ผิวมากกว่าและมีการพัฒนารูพรุนได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับวิธี กระตุ้นทางกายภาพแต่มีข้อเสียเกี่ยวกับการตกค้างของสารเคมีภายในถ่านกัมมันต์เนื่องจากการล้าง สารเคมีออกไม่หมด

การผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเหมาะกับการนำไปใช้งานใน ด้านต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาวิจัยอย่างเป็นระบบ เนื่องจากสมบัติโครงสร้างรูพรุนและ ความสามารถในการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการเตรียม งานวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี ได้มีการศึกษาและรายงานไว้มาก พอสมควร⁽⁶⁻¹⁶⁾ โดยทำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการใช้สารละลาย KOH เพื่อกระตุ้น petroleum coke ได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่ให้ พื้นที่ผิวสูงมากถึง $3,000 \text{ m}^2/\text{g}$ ⁽¹⁴⁾ นักวิจัยบางกลุ่ม^(8, 15) ก็ใช้ทั้งสองวิธีผสมกัน เช่น ทำถ่านก่อนแล้ว

จึงใช้สารเคมีกระตุ้นต่อ หรือเตรียมด้วยวิธีทางเคมีและตามด้วยวิธีทางกายภาพ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดหรือมีการกระจายของขนาดรูพรุนที่เหมาะสมที่สุด หรือการศึกษาวิธีเตรียมทางกายภาพโดยตัดขั้นตอนการทำถ่าน เพื่อลดต้นทุนการผลิต^(12, 13) เป็นต้น จากงานวิจัยเหล่านี้พอสรุปได้กว้าง ๆ ว่า วัสดุคิบที่มีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน เม็ดในผลไม้ เป็นต้น จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงและได้รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ในสัดส่วนที่สูง สามารถใช้ดูดซับแก๊สได้ดี ส่วนวัสดุคิบตั้งต้นที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เช่น ไม้ หรือขานอ้อย จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ในสัดส่วนที่สูงกว่ารูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งสามารถนำไปใช้ดูดซับสารละลาย ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดี

เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มักถูกกลดลิขสิทธิ์ไว้ทำให้ทราบเพียงขั้นตอนในการเตรียมอย่างหยาบ ๆ อีกทั้งหากเป็นวัสดุคิบที่ยังไม่มีผู้ศึกษามาก่อน เช่น เม็ดลำไย หรือขานอ้อย ซึ่งยังมีผู้ศึกษาไม่มากนัก⁽¹⁶⁾ จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยอย่างเป็นระบบ เพื่อหาสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี และหากต้องการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายก็อาจต้องศึกษาวิธีปรับปรุงการเตรียมให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีช่วงขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านนั้นอีกด้วย งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ได้แก่ ขานอ้อยและเม็ดลำไย เพื่อตรวจสอบถึงลักษณะของโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งาน ตลอดจนสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนากระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลในระดับปฏิบัติการ โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพและวิธีกระตุ้นทางเคมี ในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace)
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพและปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ชนิดของวัสดุชีวมวล (ขานอ้อยและเม็ดลำไย), อุณหภูมิ, เวลา, ความเข้มข้น และชนิดของสารเคมีใช้ในขั้นตอนการกระตุ้น
3. ทดสอบสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และหาลักษณะโครงสร้างรูพรุนภายใน ได้แก่ พื้นที่ผิวและการกระจายของขนาดรูพรุนต่าง ๆ
4. ทดสอบการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปดูดซับ โลหะหนักจากสารละลายและเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ติดตั้งเตาเผาแบบท่อพร้อมระบบป้อนไอน้ำ แก๊ส N_2 , CO_2 และชุดวัดอุณหภูมิ
2. บดย่อยวัสดุชีวมวลและ/หรือคัดขนาดโดยใช้เครื่องลดขนาดอนุภาคและชุดตะแกรงร่อน
3. วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis) ของวัสดุชีวมวล โดยใช้เครื่องมือ Thermal Gravimetric Analyzer (TGA)
4. นำวัสดุชีวมวลที่คัดขนาดแล้วมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพและวิธีกระตุ้นทางเคมีในเตาเผาแบบท่อ
5. สำหรับวิธีกระตุ้นทางกายภาพจะใช้วัสดุชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ เม็ดถั่วลิสง และชานอ้อย โดยศึกษาสภาวะการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และชนิดของสารกระตุ้น ได้แก่ ไอน้ำและ CO_2
6. สำหรับวิธีกระตุ้นทางเคมีจะใช้วัสดุชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ เม็ดถั่วลิสงและชานอ้อย โดยศึกษาสภาวะการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และสารเคมีที่ใช้กระตุ้น 1 ชนิด ได้แก่ H_3PO_4
7. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากข้อ 5 และข้อ 6 จะนำมาวิเคราะห์หา ร้อยละผลผลิต (%) สมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) ตัวเลขไอโอดีน (Iodine number) สมบัติพื้นผิวและขนาดรูพรุนและลักษณะโครงสร้างพื้นผิวโดยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)
8. นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปทดสอบการดูดซับโครเมียมจากสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ ทำโดยการนำวัสดุชีวมวลที่คัดขนาดแล้วไปผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน เพื่อไล่สารระเหยออกจากวัตถุดิบให้ได้ถ่านที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงขึ้น โดยการเผาในเตาเผาแบบท่อในบรรยากาศการไหลของแก๊ส N_2 จากนั้นนำถ่านที่ได้มากระตุ้นต่อโดยการเผาในบรรยากาศของไอน้ำและแก๊ส CO_2 ซึ่งเนื้อถ่านจะทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นทำให้รูพรุนเดิมมีขนาดกว้างขึ้นและทำให้เกิดรูพรุนใหม่เพิ่มเติมขึ้น
2. ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมีทำโดยการนำวัสดุชีวมวลที่คัดขนาดแล้วมาแช่ในสารละลายของสารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น ได้แก่ H_3PO_4 แล้วเขย่าตามเวลาที่กำหนด จากนั้นนำไปอบแห้ง บันทึกน้ำหนักแล้วนำไปเผาในบรรยากาศของ N_2 ในเตาเผาแบบท่อ ซึ่งสารเคมีจะทำปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุชีวมวลที่อุณหภูมิสูงร่วมกับ

กลไกอื่น ทำให้เกิดการสร้างรูพรุนขึ้น จากนั้นนำมาล้างสารเคมีออกและทำให้แห้งก็จะ
ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์

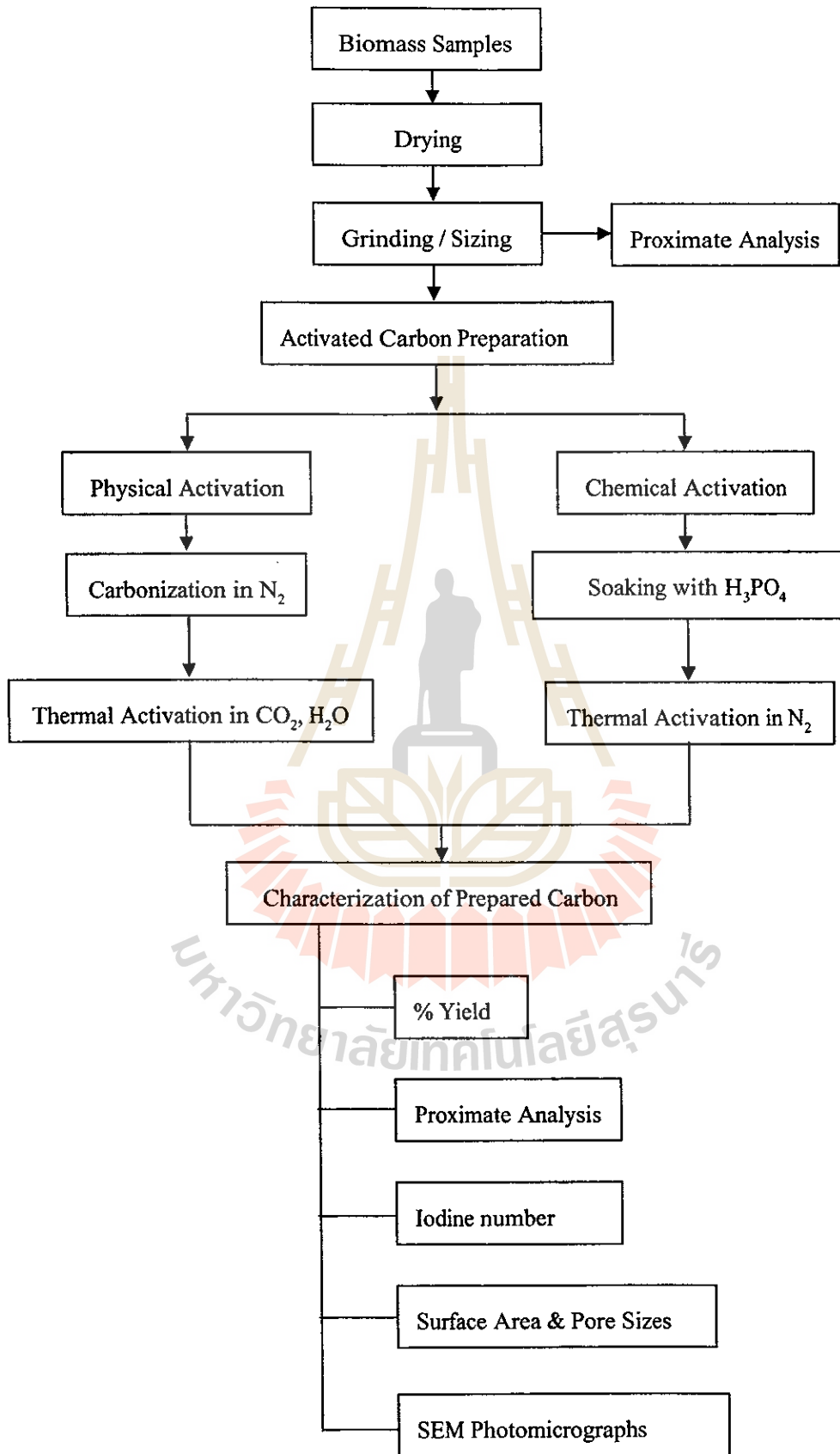
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วย

- การหาร้อยละผลผลิต (%yield)
- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาร้อยละของความชื้น (Moisture), สารระเหย (Volatile matter), เถ้า (Ash) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)
- การวิเคราะห์หาค่าตัวเลขไอโอดีน (Iodine number) สำหรับบางตัวอย่าง
- การวิเคราะห์ลักษณะการดูดซับในรูปของเส้นโค้งการดูดซับ (Adsorption isotherm), การวัดพื้นที่ผิว (Specific surface area) และการกระจายของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) โดยเครื่องมือ Surface area analyzer (ASAP 2010, Micromeritics)
- การถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

แผนภูมิข้างล่างสรุปขั้นตอนของการทดลอง

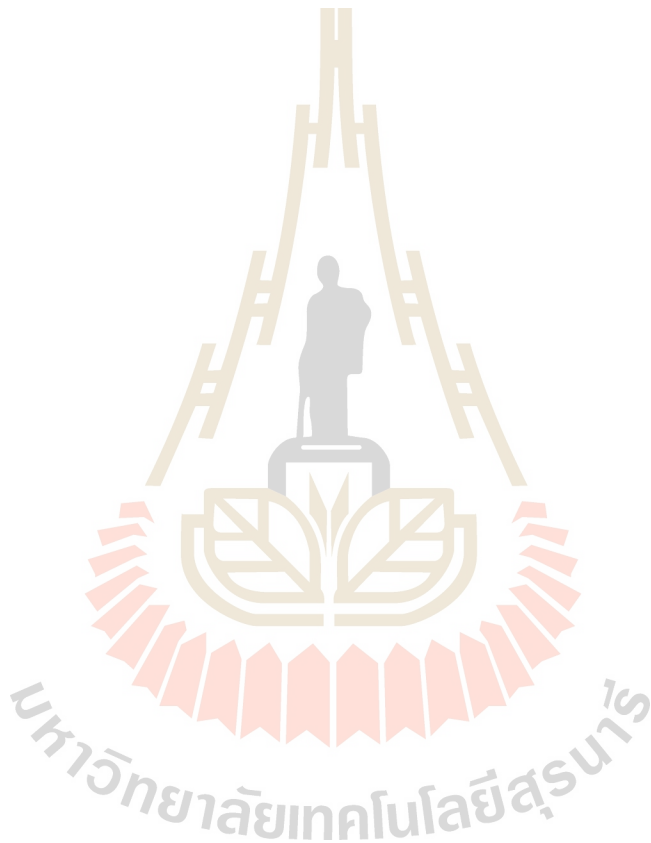


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สร้างองค์ความรู้เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการเตรียมและทราบสถานะที่เหมาะสมเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดีจากวัสดุชีวมวล
2. สามารถใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งในปริมาณมากจากกระบวนการผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางขึ้น
3. ข้อมูลการวิจัยที่ได้รับจะช่วยเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงอุตสาหกรรมโดยในขั้นต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Active carbon) จัดเป็นประเภทหนึ่งของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ซึ่งผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมากส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นวัสดุพิเศษที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างสมบัติพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์

2.1.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับแกรไฟต์ (Graphite) แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า แกรไฟต์มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (Benzene ring) แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.335 nm (นาโนเมตร) คาร์บอนอะตอมแต่ละอะตอมจะยึดกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันโดยพันธะเดี่ยวและมีระยะห่างระหว่างอะตอมในชั้นเดียวกันประมาณ 0.144 nm แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ซึ่งจัดเป็นแรงชนิดอ่อน โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เป็นโครงสร้างแกรไฟต์ที่ไม่สมบูรณ์มีการซ้อนเหลื่อมในแนวระนาบที่มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ ช่องว่างระหว่างชั้นจึงเกิดขึ้นมาก (รูปที่ 2.2) ช่องว่างที่เชื่อมต่อกันทำให้เกิดโครงสร้างของรูพรุนที่มีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แบบหลอดรูเล็ก (Capillary pores) หรือแบบแผ่นขนาน (Slit pores) เป็นต้น รูพรุนที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะมีขนาดต่าง ๆ กัน ทำให้เกิดการกระจายขนาดของรูพรุนได้มีการกำหนดและให้นิยามของช่วงขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดย IUPAC⁽¹⁷⁾ ดังนี้รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ได้แก่ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 nm รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีขนาดอยู่ระหว่าง 2.50 nm และรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 2 nm รูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงมีผลค่อนข้างน้อยต่อความจุในการดูดซับ ในขณะที่รูพรุนขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงมีบทบาทที่สำคัญที่สุดต่อความจุและกระบวนการดูดซับสาร วิธีการและสภาวะการผลิตถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ที่เกิดขึ้นในถ่านกัมมันต์

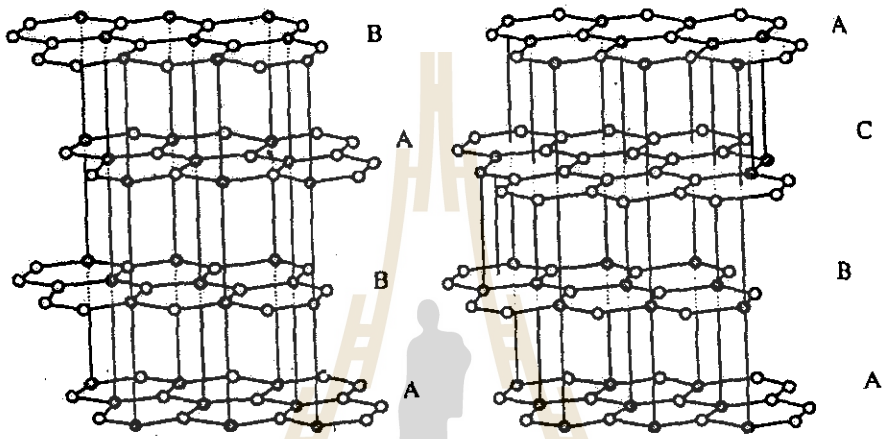
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพื้นที่ผิวและลักษณะความพรุนของถ่านกัมมันต์

ความหนาแน่นจริง (True density)	2.2 g/cm ³
ความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density)	0.73 g/cm ³
ความพรุนทั้งหมด (Total porosity)	0.71
ความพรุนของรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore porosity)	0.31
ความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore porosity)	0.40
ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore volume)	0.47 cm ³ /g
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume)	0.44 cm ³ /g
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)	1,200 m ² /g

หมายเหตุ

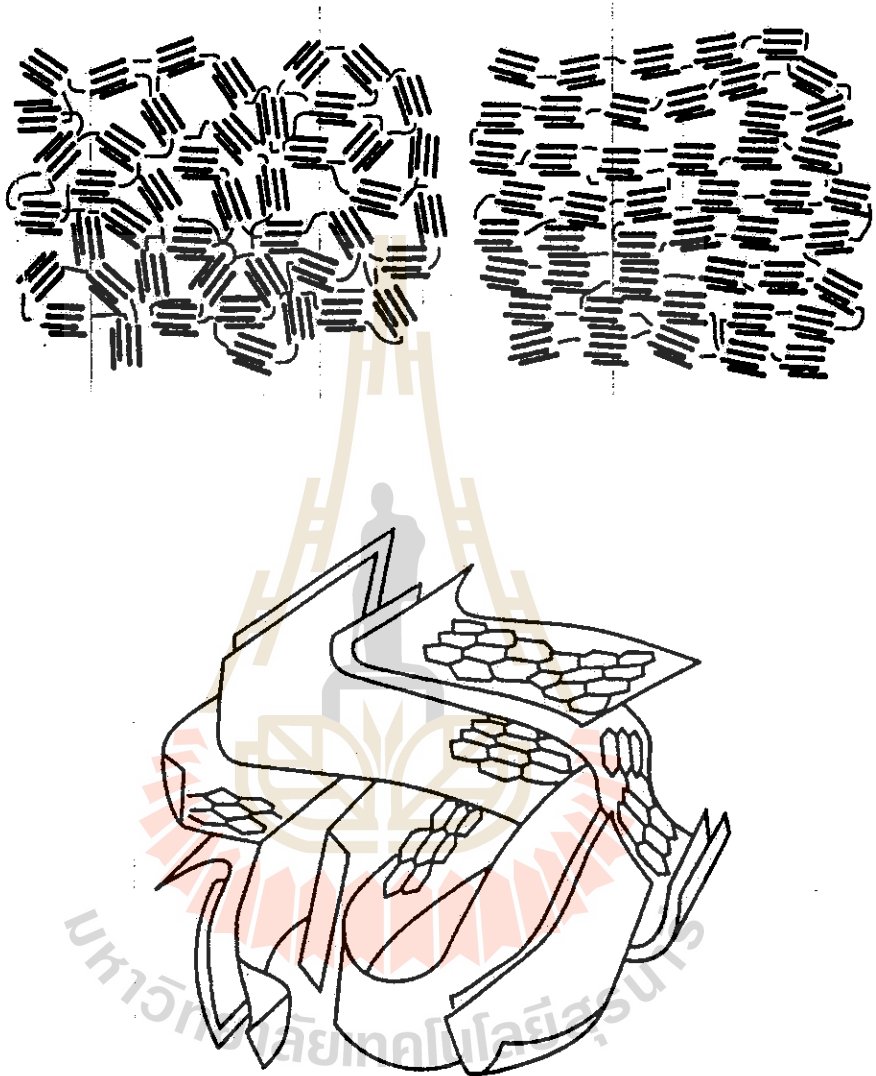
รูพรุนขนาดใหญ่ > 50 nm

รูพรุนขนาดเล็ก < 2 nm



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์นอกจากจะถูกกำหนดโดยพื้นที่ผิวแล้วยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของพื้นผิวด้วย ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์บริเวณดูดซับประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนแต่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นแรงดูดซับที่ค่อนข้างอ่อน แต่ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ด้วยการดูดซับจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่า โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีโอกาสหลุดออกได้ยากกว่า รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีทั้งพวกออกไซด์ของกรด เช่น หมู่ carbonyl, phenol lactone, aldehyde และ ketone เป็นต้น และพวกออกไซด์ของเบส เช่น หมู่ hydroxide, carbonate เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของกรดสามารถดูดซับ โมเลกุลที่แสดงความเป็นเบสได้ดี ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกไซด์ของเบสสามารถดูดซับ โมเลกุลที่แสดงความเป็นกรดได้ดี การมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพไม่เสถียรและมีเวเลนซ์ไม่เต็มตัว จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น การเกาะยึดกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเป็นพันธะทางเคมีที่ค่อนข้างแข็งแรงและกลายเป็นออกไซด์ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

2.1.2 กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีกระตุ้นทางเคมี

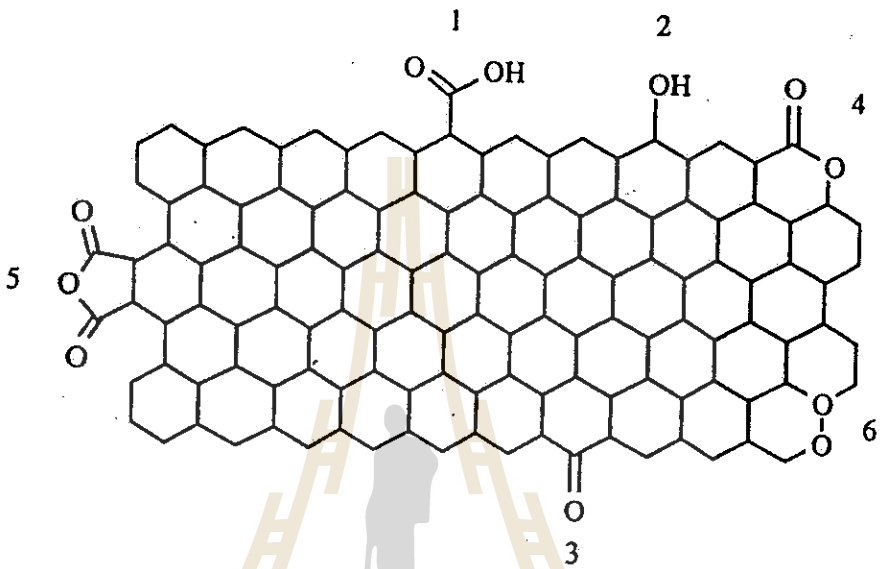
2.1.2.1 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ แบ่งได้เป็นสามขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) การเตรียมวัตถุดิบ (Preparation)

เป็นขั้นตอนการนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปผ่านขั้นตอนที่สองซึ่งได้แก่ การผลิตถ่านหรือกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในกรณีที่วัตถุดิบมีความแข็งหรือเหนียวมากก็อาจนำวัตถุดิบไปผ่านการคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการบดและคัดขนาด ถ้าวัตถุดิบตั้งต้นมีลักษณะเป็นผงก็อาจนำมาทำให้อยู่ในรูปเม็ดก่อนโดยใช้ตัวประสาน (Binder) เช่น แป้ง น้ำมันเตาหรือทาร์ (tar) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน จากนั้นจึงนำไปผ่านการคาร์บอนไนซ์และทำการกระตุ้นต่อไป

2) กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำที่เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า น้ำมันดินหรือทาร์ (Tar) และแก๊ส กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนเบื้องต้นในวัตถุดิบ โดยอาศัยความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของเหลวและแก๊ส ส่งผลให้ถ่านชาร์มีสัดส่วนของคาร์บอนที่สูงกว่าของวัตถุดิบตั้งต้น



รูปที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์

- | | | |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| 1 carboxylic acid | 2 phenol | 3 quinone |
| 4 lactone | 5 carboxyl anhydride | 6 cyclic peroxide |

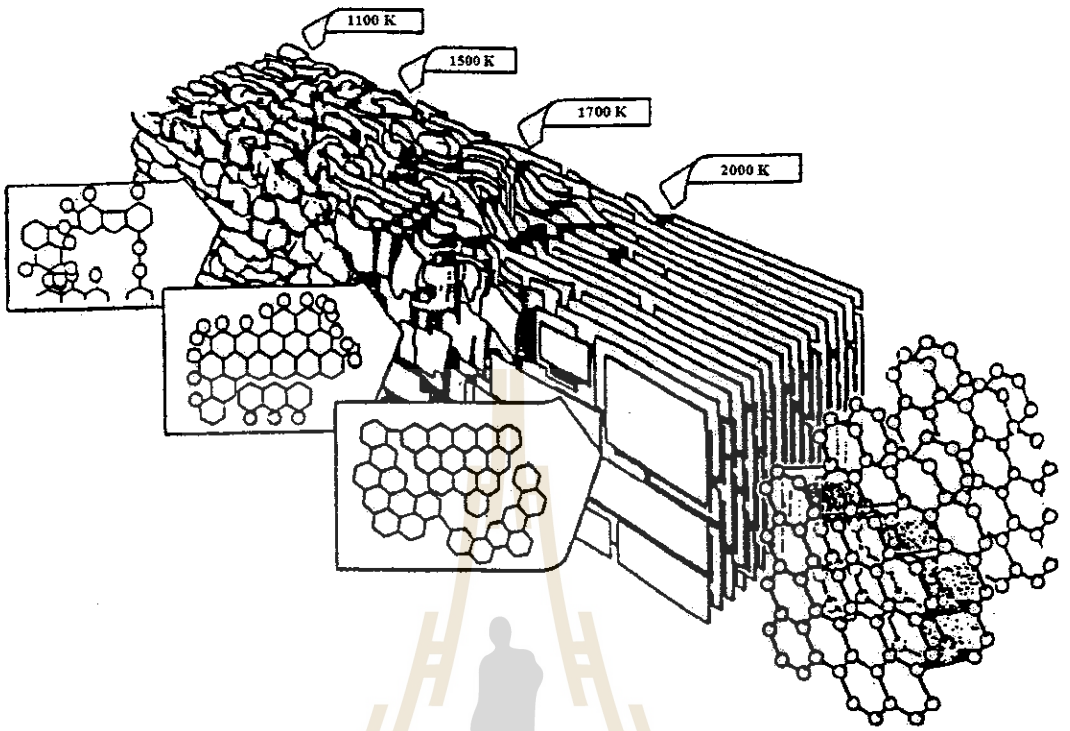
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กระบวนการคาร์บอนในเซชันมีการเปลี่ยนแปลงสองช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็นช่วงอ่อนตัว (Softening period) ในช่วงนี้ควรให้ความร้อนในอัตราที่ต่ำเพื่อให้เกิดและทาร์ที่สลายตัวสามารถหลุดออกได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นของแข็งซึ่งทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนและช่วงที่สองได้แก่ ช่วงหลังการอ่อนตัว (Post-Softening period) อัตราการให้ความร้อนปกติ เป็นช่วงที่คาร์บอนมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่าในช่วงแรก ถ่านชาร์ที่ได้จะมีความแข็งและความหนาแน่นสูงขึ้น แต่ยังสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากยังมีทาร์บางส่วนตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความพรุนต่อไป

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของถ่านชาร์ในช่วงของการคาร์บอนไนซ์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อนและชนิดของวัตถุดิบ อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญโดยตรงเนื่องจากเป็นตัวสะท้อนระดับของพลังงาน ซึ่งทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และแก๊สต่าง ๆ ส่วนของแข็งที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีการจัดโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบวงแหวนอะโรมาติก โดยคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ (รูปที่ 2.4) ส่วนอัตราการให้ความร้อนจะมีความสำคัญต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบด้วยอัตราที่ต่ำกว่า

3) การกระตุ้น (Activation)

ขั้นตอนการกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความพรุนมากขึ้น โดยการใช้สารกระตุ้น (Activating agent) ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากการเพิ่มของพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวต่อการดูดซับมากขึ้น นอกจากนี้ ปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังช่วยกำจัดสารต่าง ๆ ที่ค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนออกไปจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับอีกด้วย วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เกิดรูพรุนภายในขนาดต่าง ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้นด้วย โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศออกซิเจน เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 800 – 1,000°C ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ แก๊สออกซิไดซ์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ทำให้คาร์บอนอะตอมถูกใช้ไป เกิดรูพรุนด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น การเปิดของรูพรุนปิด การขยายรูพรุนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือการสร้างรูพรุนใหม่ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การจัดระเบียบโครงสร้างคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ ตามการเพิ่มของอุณหภูมิ

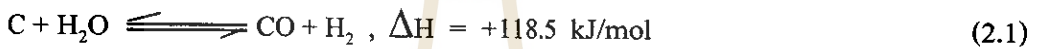
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทำให้ถ่านเกิดรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

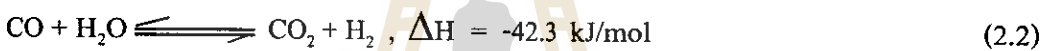
ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงกว่าวิธีกระตุ้นทางเคมี ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น ชนิดและอัตราส่วนของแก๊สออกซิไดซ์ และอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีจากการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์เป็นดังนี้

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมตามสมการ



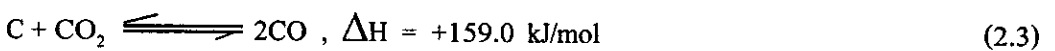
และยังมีปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและ CO ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดร่วมด้วย ดังสมการที่ 2.2



การกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยส่วนใหญ่พบว่า เมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น (% burn-off) มีค่าต่ำจะเกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเท่านั้น และเมื่อ % burn-off มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มปริมาตรของรูพรุนขนาดใหญ่ เกิดการกระจายขนาดของรูพรุนที่กว้างขึ้น รวมถึงมีปริมาตรรวมของรูพรุนเพิ่มตามด้วย เมื่อ % burn-off มีค่ามากกว่าร้อยละ 50 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในช่วงนี้จะเป็นการเพิ่มขนาดของรูพรุนมากกว่าการสร้างรูพรุนขนาดเล็ก⁽¹⁸⁾

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

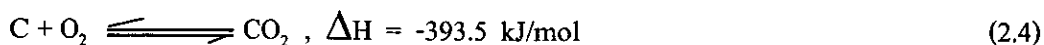
ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องจะเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างคาร์บอนอะตอมและ CO₂ ดังสมการที่ 2.3



เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วย CO₂ จะใช้พลังงานมากกว่าการใช้ไอน้ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงกว่า รูพรุนส่วนใหญ่ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย CO₂ จะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (< 2nm) โดยมีปริมาตรประมาณ 70% ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ซึ่งจะให้พื้นที่ผิวประมาณ 90% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด และยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เมื่อพื้นที่ผิวมีค่าใกล้เคียงกัน

การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ

ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังสมการที่ 2.4 และ 2.5



การกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ มีการเผาไหม้เกิดขึ้นทำให้ควบคุมปฏิกิริยาได้ยาก จึงมักไม่เป็นที่นิยมใช้

2.1.2.2 วิธีกระตุ้นทางเคมี

เป็นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียวโดยการคาร์บอนในซังวัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีซึ่งใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากในช่วง 400-600 °C ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประเภทเบสและกรดบางชนิด ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) และกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) เป็นต้น

กลไกการเกิดรูพรุนยังไม่ทราบชัดเจนและจะแตกต่างกันขึ้นกับสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ เป็นไปได้ว่าสารเคมีที่เติมลงไปจะไปทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบและขณะทำการคาร์บอนไนซ์สารอินทรีย์ในวัตถุดิบเกิดการสลายตัวและเชื่อมไขว่กันของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้นได้ สารระเหยบางประเภทไม่สามารถหลุดออกจากโครงสร้างนี้ได้ทำให้ได้เนื้อถ่านเพิ่มขึ้นและเกิดการร่อนย่อยลง ประกอบกับสารเคมีที่ใช้สามารถแทรกตัวอยู่ภายในทำให้เกิดการหดตัวน้อยเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มเติมขึ้นอีก

ข้อดีของวิธีกระตุ้นทางเคมีคือ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีกระตุ้นทางกายภาพ แต่มีข้อเสียคืออาจมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี

2.1.3 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถจำแนกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้หลายแบบขึ้นกับลักษณะและความต้องการของการนำไปใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์เป็นดังนี้

1. แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่สามารถนำไปใช้ในการดูดซับในระบบของเหลว

- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนขนาดเล็กกว่าและถูกใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหยต่าง ๆ

2. แบ่งตามขนาดอนุภาค

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีช่วงขนาดที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดและตัดเป็นก้อน ๆ หรือเป็นอนุภาคที่คัดแยกจากการลดขนาดของอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้จะถูกใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีช่วงขนาดผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตรไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงซึ่งได้จากการบด ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้จะถูกใช้ในระบบดูดซับของเหลว เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและความต้านทานการแพร่ในรูพรุนมีค่าน้อยกว่าแบบชนิดเม็ด

3. แบ่งตามขนาดของรูพรุน

การกำหนดขนาดของรูพรุนจะใช้เกณฑ์ของ International Union of Pure and Apply Chemistry หรือ IUPAC

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (nm) เป็นช่วงขนาดรูพรุนที่มีบทบาทมากที่สุดในการดูดซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2-50 nm เหมาะสำหรับการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น กระบวนการฟอกสี

- ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า 50 nm รูพรุนในช่วงขนาดนี้ใช้เป็นเพียงทางผ่านของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปสู่รูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางและมีผลค่อนข้างน้อยในการดูดซับสาร

4. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในงานดูดซับของสารละลาย เช่น การฟอกสีของสารละลายน้ำตาลดิบ หรือ การทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง มักใช้ในการดูดซับแก๊สพิษ หรือไอระเหย

5. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานเกี่ยวกับแก๊ส เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ประโยชน์ในการดูดซับแก๊สพิษ กลิ่นและไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์ที่มีความแข็ง เช่น ถ่านที่ได้จากเมล็ดในของผลไม้ หรือ ถ่านไม้ที่เผาภายใต้ความดันสูง เป็นต้น

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานฟอกสี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ประโยชน์ในการฟอกสีสารละลาย ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์ชนิดอ่อน ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากขาน้อย แกลบข้าว หรือถ่านจากกากน้ำตาล เป็นต้น

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกโลหะ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกโลหะต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยก เงิน ทองคำ แพลทินัม จากแร่ที่ขุดได้ เป็นต้น

6. แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างในสารละลาย

- ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรด เป็นถ่านกัมมันต์ที่เมื่ออยู่ในสารละลายแล้วแสดงคุณสมบัติของความเป็นกรด โดยมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl groups)

- ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง เป็นถ่านกัมมันต์ที่เมื่ออยู่ในสารละลายจะแสดงความเป็นด่าง เป็นถ่านกัมมันต์ที่เมื่ออยู่ในสารละลายจะแสดงความเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน (Quinine) ฟีนอล (Phenol) และคาร์บอกซิเลท (Carboxylate)

2.1.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดีจึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างหลากหลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ในการฟอกสีสารละลายน้ำตาล
2. อุตสาหกรรมเครื่องคั้นแอลกอฮอล์ ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดรสและกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากวิสกี้ ใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงในเบียร์เพื่อกำจัดตะกอนโปรตีนที่เอนไซม์ย่อยไม่ได้
3. การทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับคลอรีนและสารที่เป็นพิษอื่น ๆ ที่ปนมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล
4. อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ใช้ดูดซับสิ่งปลอมปนในน้ำมันพืช ใช้ดูดซับตัวขุ่นขี้โดยไม่ดูดสี
5. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ดูดซับสีและกลิ่นสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร
6. การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ เช่นการพิมพ์จะใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อนำไซลิโนและเบนซินกลับมาใช้ใหม่ การซักแห้งเพื่อนำไตรคลอโรมีเทนกลับมาใช้ใหม่ การผลิตเรยองเพื่อนำอีเทอร์ แอลกอฮอล์และอะซีโตนกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น
7. ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรซีน ใช้เป็นตัวพวยงเมอร์คิวริกคลอไรด์ (Catalyst support) ในอุตสาหกรรมผลิตไวน์วอลคลอไรด์จากอะเซทิลีนและกรดไฮโดรคลอริก ใช้เป็นตัวแยกสารในเครื่องโครมาโตกราฟฟีแก๊ส ใช้เป็นสารกรองสำหรับหน้ากากกันแก๊สพิษและไอพิษต่าง ๆ

2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ข้อมูลสมมูลการดูดซับของสารเดี่ยวเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ตลอดจนใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ระบบดูดซับของสารผสม

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ เป็นต้น ในระบบการดูดซับสารเดี่ยว ปริมาณของการดูดซับจะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และยิ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความดันสำหรับระบบดูดซับแก๊ส หรืออุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับสำหรับระบบดูดซับของเหลว ในรูปของสมการเขียนได้เป็น

สำหรับระบบดูดซับแก๊ส

$$q = f(P, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (2.6)$$

สำหรับระบบดูดซับของเหลว

$$q = f(C, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (2.7)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ซึ่งอาจอยู่ในหน่วยของ mol/g, g/g หรือ cm^3 STP/g สำหรับการดูดซับแก๊ส

T = อุณหภูมิ, $^{\circ}\text{C}$

P = ความดันย่อยของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊ส

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย, g/cm^3 หรือ mol/L

ถ้าการดูดซับของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่ง ๆ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ สมการ 2.6 และ 2.7 เขียนได้เป็น

$$q = f(P)_T \quad (2.8)$$

และ

$$q = f(C)_T \quad (2.9)$$

สำหรับระบบดูดซับแก๊ส ถ้าอุณหภูมิการดูดซับมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ สมการ 2.8 เขียนได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

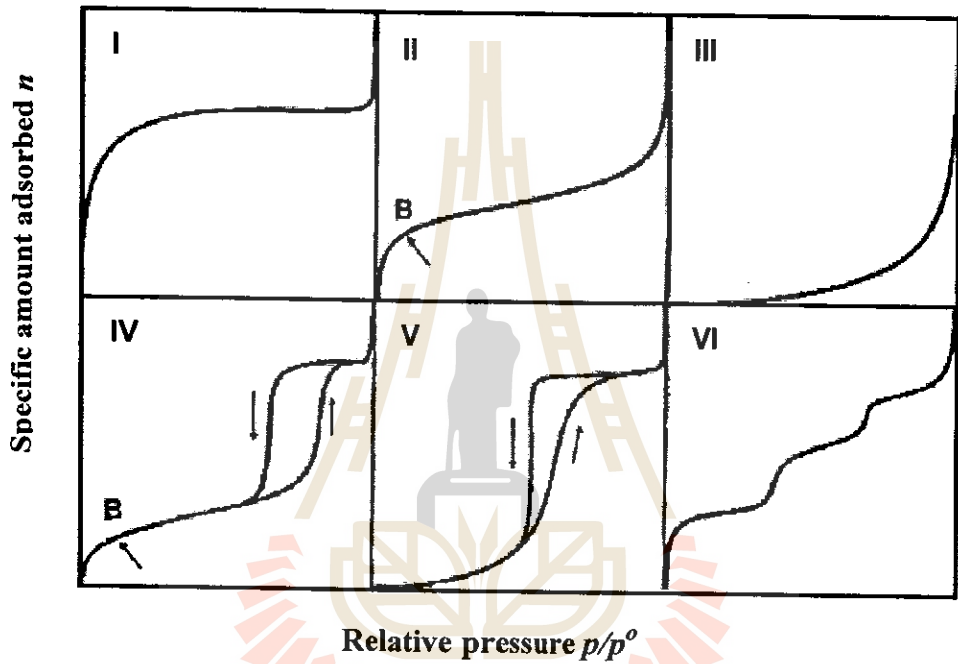
$$q = f(P/P^{\circ})_T \quad (2.10)$$

เมื่อ P° คือความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับที่อุณหภูมิการดูดซับ

ความสัมพันธ์ตามสมการ 9 และ 10 เรียกไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊ส หรือวัฏภาคของเหลวกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ โดยตัวดูดซับของแข็งที่สภาวะสมดุลเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับคงที่ ได้มีการจำแนกลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับของระบบดูดซับแก๊ส เป็น 6 แบบโดย Brunauer และคณะ⁽¹⁷⁾ รายละเอียดดังปรากฏในรูปที่ 2.5 โดยแบ่งได้ดังนี้

แบบที่ 1 (Type I)

เป็นการดูดซับของโมเลกุลของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้น (Monolayer adsorption) เป็นลักษณะการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวภายนอกต่ำ



รูปที่ 2.5 การแบ่งชนิดของไอโซเทอมการดูดซับ

แต่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ โดยตัวถูกดูดซับแก๊สจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนและเข้าสู่สมดุลที่ช่วงความดันต่ำ ๆ อย่างรวดเร็ว

แบบที่ 2 (Type II)

เป็นการดูดซับของโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer adsorption) เกิดกับการดูดซับของวัสดุไม่มีความพรุน (non-porous) หรือมีการกระจายขนาดของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ลักษณะของไอโซเทอมมีจุดเปลี่ยนกราฟ (จุด B) ซึ่งเป็นสถานะที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวจนสมบูรณ์แล้ว ที่ช่วงความดันสูงกว่านี้จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็นชั้น ๆ จนถึงสถานะที่ตัวถูกดูดซับแก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง ($P/P^\circ \approx 1$)

แบบที่ 3 (Type III)

เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีลักษณะคล้ายระจกเว้าเป็นลักษณะการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่การดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง

แบบที่ 4 (Type IV)

เป็นลักษณะไอโซเทอมที่พบในวัสดุที่มีช่วงรูพรุนขนาดกลาง (2–50 nm) เป็นส่วนใหญ่ เส้นไอโซเทอมในช่วงเพิ่มความดัน (Adsorption branch) จะคล้ายกับแบบที่ 2 แต่ไอโซเทอมในช่วงลดความดัน (Desorption branch) จากค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่งลงมา จะไม่ย้อนทับกับเส้นไอโซเทอมในช่วงขาขึ้น ทำให้เกิดบริเวณหรือพื้นที่ที่เรียก hysteresis loop ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ capillary condensation โดยที่ค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่ง (ความดันย่อยของตัวดูดซับในวัฏภาคแก๊สมีค่าใกล้เคียงค่าความดันไออิ่มตัว) ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในสถานะคล้ายของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดหรือช่องของรูพรุน ซึ่งจะมีแรงดึงผิวตรงบริเวณที่สัมผัสกับผนังของรูพรุนเข้ามาเกี่ยวข้อง การจะไล่ตัวถูกดูดซับออกจากรูพรุนจึงต้องลดความดันให้น้อยกว่าค่าความดันในช่วงขาขึ้น เพื่อเอาชนะแรงดึงผิวดังกล่าว เป็นสาเหตุให้เส้นไอโซเทอมของขาขึ้นและขาลงไม่ซ้อนทับกันเกิดเป็น loop ขึ้น พื้นที่ของ hysteresis loop จะแปรตามสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับ

แบบที่ 5 (Type V)

ลักษณะของไอโซเทอมจะคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีจุดเปลี่ยนกราฟที่ค่าความดันสัมพัทธ์มากกว่า 0.5 หรืออาจมากกว่านั้นและยังแสดงลักษณะของ hysteresis loop เหมือนไอโซเทอมแบบที่ 4 ดังที่กล่าวมาแล้ว เช่นเดียวกับแบบที่ 3 ไอโซเทอมแบบที่ 5 นี้ เกิดกับระบบดูดซับที่แรงดึงดูด

ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าอ่อน ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับไอน้ำ ซึ่งจัดเป็นสารมีขั้ว (polar) โดยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นสารไม่มีขั้ว (nonpolar) เป็นต้น

แบบที่ 6 (Type VI)

เป็นเส้นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่ไม่มีความพรุน (Non-porous) และมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการดูดซับเป็นช่วง ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากไอโซเทอมแบบที่ 2 ที่มีการดูดซับเป็นขั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับของแก๊สคริปตอเนบรอน carbon black หรือผลึก cadmium bromide เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์มีมานานแล้วและต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่รายงานถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณภาพดีจากวัตถุดิบต่าง ๆ กัน เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย เปลือกถั่ว เมล็ดในผลไม้ เป็นต้น โดยทั่วไปสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น วัตถุดิบที่ใช้ วิธีการเตรียม สารที่ใช้กระตุ้น โครงสร้างรูพรุนและเคมีพื้นผิวซึ่งจะช่วยให้สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ งานวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีมีเนื้อหาโดยสังเขปดังต่อไปนี้

Gomez – Serrano และคณะ⁽¹⁹⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นเกาลัด (chestnut wood) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรด ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นคือ 300, 400, 500 และ 600°C และอัตราส่วนของน้ำต่อกรดคือ 1 : 1,

1 : 2 และ 1 : 3 โดยน้ำหนัก พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นถ่านกัมมันต์แบบรูพรุนขนาดเล็กโดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 600°C พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 500°C โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 20 – 780 m²/g และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.009 – 0.44 cm³/g

Diao และคณะ⁽²⁰⁾ เตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดข้าวฟ่าง (grain sorghum) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก สภาวะการเตรียมเช่น เวลาในการกระตุ้น ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกและอุณหภูมิในการกระตุ้นถูกศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ให้พื้นที่ผิวสูงสุด (528 m²/g) คือ ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 600°C เวลาในการกระตุ้น 15 นาที และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก 35% โดยน้ำหนัก

Hayashi และคณะ⁽²¹⁾ เตรียมถ่านกัมมันต์จาก chickpea husk โดยกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นระหว่าง 500 – 900°C เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นถ่านกัมมันต์แบบรูพรุนขนาดเล็ก โดยพื้นที่ผิว

และปริมาณรุกรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นพื้นที่ผิวและปริมาณรุกรุนขนาดเล็กจะลดลงเล็กน้อย โดยพื้นที่ผิวสูงสุดที่ได้คือ $1,778 \text{ m}^2/\text{g}$

Yalcin และ Sevinc⁽²²⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกลบข้าว (rice husk) โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) และสารละลายเกลือต่าง ๆ เช่น เฟอร์รัสซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \text{Ferrous sulfate heptahydrate}$) เฟอริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ferric chloride}$) แคลเซียมคลอไรด์ ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Calcium chloride dihydrate}$) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โดยใช้ความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ 0–30% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของสารละลายเกลืออื่น ๆ ใช้ 30% โดยน้ำหนัก พบว่าสำหรับการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึง 10% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นพื้นที่ผิวจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวสูงสุดที่ได้คือ $480 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ระหว่าง 0–5% โดยน้ำหนักจะเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรุกรุนขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นตั้งแต่ 10% โดยน้ำหนักขึ้นไปจะมีโครงสร้างเป็นแบบรุกรุนขนาดกลาง ส่วนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสารละลายเกลือต่าง ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 13–110 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์ ($168 \text{ m}^2/\text{g}$)

Vernersson และคณะ⁽²³⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ (*Arundo donax cane*) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นระหว่าง $400 - 550^\circ\text{C}$ อัตราส่วนของกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบคือ 1.5 : 1 2 : 1 และ 2.5 : 1 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการกระตุ้น 0–1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $690 - 1,330 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบจาก 1.5 : 1 เป็น 2 : 1 จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณรุกรุนเพิ่มขึ้นและมีโครงสร้างรุกรุนเป็นแบบรุกรุนขนาดกลาง แต่เมื่ออัตราส่วนของกรดต่อวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 : 1 ทำให้ปริมาณรุกรุนลดลงเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปได้เข้าไปทำลายโครงสร้างรุกรุนของถ่านกัมมันต์

Zhang และคณะ⁽²⁴⁾ ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษไม้โอ๊ก (*Oak wood waste*) เปลือกข้าวโพด (*Corn hull*) และซังข้าวโพด (*Corn cob*) โดยใช้การกระตุ้นด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น พบว่าถ่านกัมมันต์จากเศษไม้โอ๊กมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $640 - 985 \text{ m}^2/\text{g}$ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกข้าวโพดมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $900 - 1,010 \text{ m}^2/\text{g}$ ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $430 - 710 \text{ m}^2/\text{g}$ และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็นถ่านกัมมันต์แบบรุกรุนขนาดเล็ก

Daud และ Ali⁽²⁵⁾ ศึกษาเปรียบเทียบการเกิดรุกรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850°C และใช้เวลาในการ

กระตุ้น 5–80 นาที เพื่อให้ได้ burn – off (ร้อยละของน้ำหนักถ่านที่หายไป) ที่ค่าต่าง ๆ พบว่า อัตราการกระตุ้น (Activation rate) ของถ่านซาร์จากกะลามะพร้าวสูงกว่าถ่านซาร์จากกะลาปาล์ม และพบว่าปริมาณรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มจะสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มจะมีปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง burn – off ที่ 30% หลังจากนั้นค่าจะลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่กับ burn – off ไม่มีผลมากนักแต่มีแนวโน้มที่ปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่จะ ลดลงเมื่อ burn – off มีค่าเพิ่มขึ้น

Yang และ Lua ⁽²⁶⁾ ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกถั่วพิสตาชิโอ (pistachio – nut) โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ในการกระตุ้นพบว่าอุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้อย่างมาก โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ให้พื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนสูงสุดคือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 800°C เวลาในการ กระตุ้น 2 ชั่วโมงครึ่ง อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 100 cm³/min โดยให้พื้นที่ผิว สูงสุด 1,064 m²/g

Chang และคณะ ⁽²⁷⁾ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด (corn cob) โดยการกระตุ้น ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C และใช้เวลาในการกระตุ้น 20 – 120 นาที พบว่าสำหรับการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเมื่อ burn – off เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวสูงสุดสำหรับการกระตุ้นด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเกิดขึ้นที่ 900°C โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะ ใช้เวลาในการกระตุ้น 80 นาที มี burn – off 71% โดยน้ำหนัก โดยให้พื้นที่ผิวสูงสุด 1,705 ตาราง เมตรต่อกรัมส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะใช้เวลาในการกระตุ้น 50 นาที มี burn – off 60% โดย น้ำหนักและให้พื้นที่ผิวสูงสุด 1,315 m²/g

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

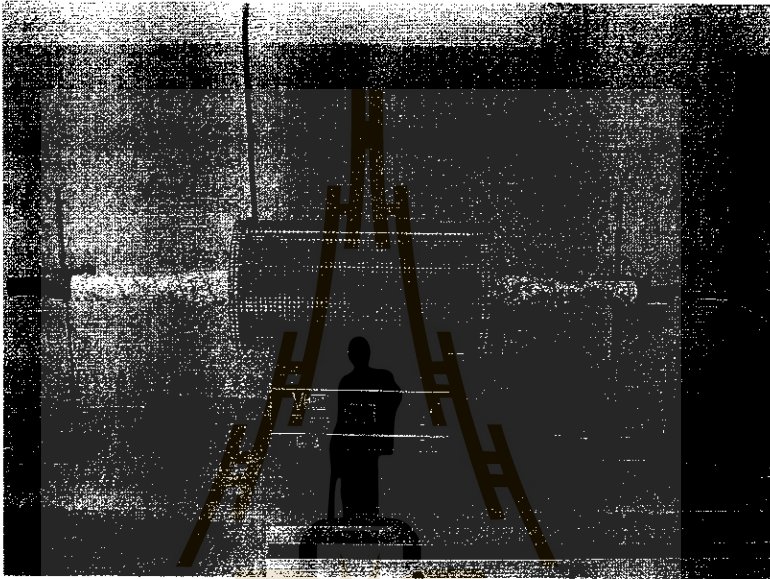
การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยและเมล็ดลำไยในงานวิจัยนี้ นั้น สำหรับการเตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพจะศึกษาโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้นหลัก การกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำนั้นจะเลือกศึกษาเป็นบางสภาวะเพื่อการเปรียบเทียบ เนื่องจากขาดอุปกรณ์การผลิตไอน้ำ (Boiler) จึงใช้วิธีป้อนน้ำให้เข้าสู่เตาเผาโดยตรง เพื่อให้ไอน้ำกลายเป็นไอ ซึ่งอาจทำให้การไหลของไอน้ำผ่านเตาเผาไม่สม่ำเสมอ สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมีจะเลือกใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นสารกระตุ้นเพียงชนิดเดียว เนื่องจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า กรดฟอสฟอริกเป็นสารเคมีที่ใช้ได้ดีกับวัสดุชีวมวลส่วนใหญ่

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อยี่ห้อ Vectar รุ่น VCTF4 พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี (รูปที่ 3.1)
2. เตาเผาแบบท่อยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 12/75/700/201 พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ รูปถ่ายของเตาเผาแสดงในรูปที่ 3.2
3. ตู้อบยี่ห้อ Memmert รุ่น 600 (รูปที่ 3.3)
4. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter) ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น CG840
5. โถดูดความชื้น (Dessicator)
6. ชุดตะแกรงร่อนและเครื่องเขย่าตะแกรงยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 digit (รูปที่ 3.4)
7. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและช่วงขนาดรูพรุน (Surface area analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2010 (รูปที่ 3.5)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 6400 (รูปที่ 3.6)

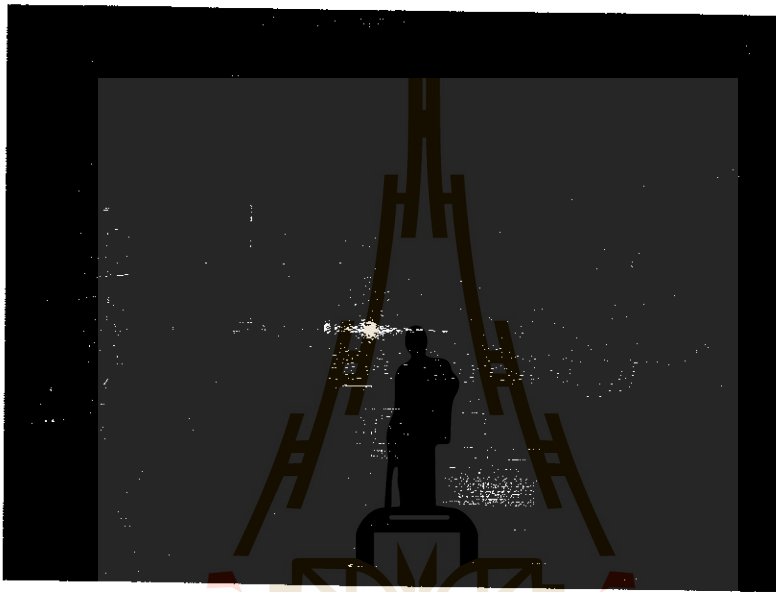
3.2 วัสดุและสารเคมี

1. ชานอ้อย (Bagasse) จากโรงงานน้ำตาลวังขนาย อำเภอแก่งสนามนาง จังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 3.7 ก)
2. เมล็ดลำไย (Longan seed) จากโรงงานมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม (รูปที่ 3.7 ข)
3. แก๊สไนโตรเจน (N_2) บริรจดังมีความบริสุทธิ์ 99.95% ของบริษัท Linde
4. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) บริรจดังมีความบริสุทธิ์ 99.8% ของบริษัท Linde
5. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)



รูปที่ 3.1 เตาเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



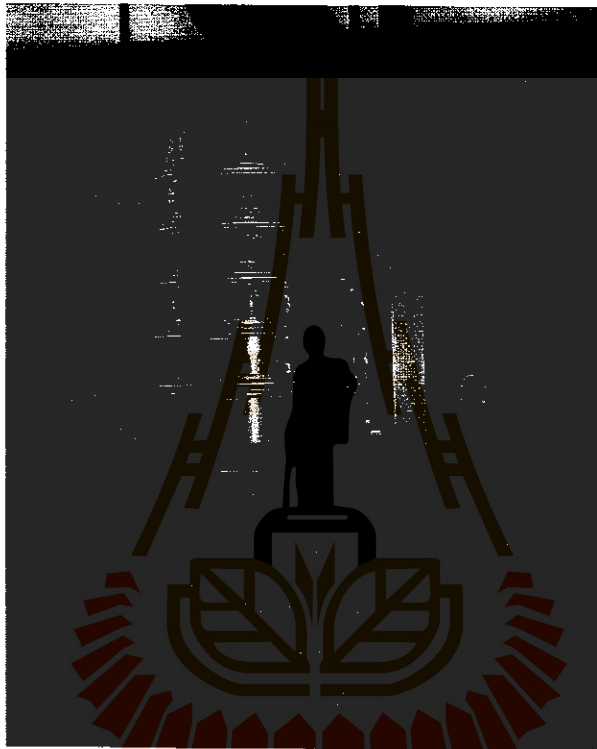
รูปที่ 3.2 เต้าเผาแบบท่อที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

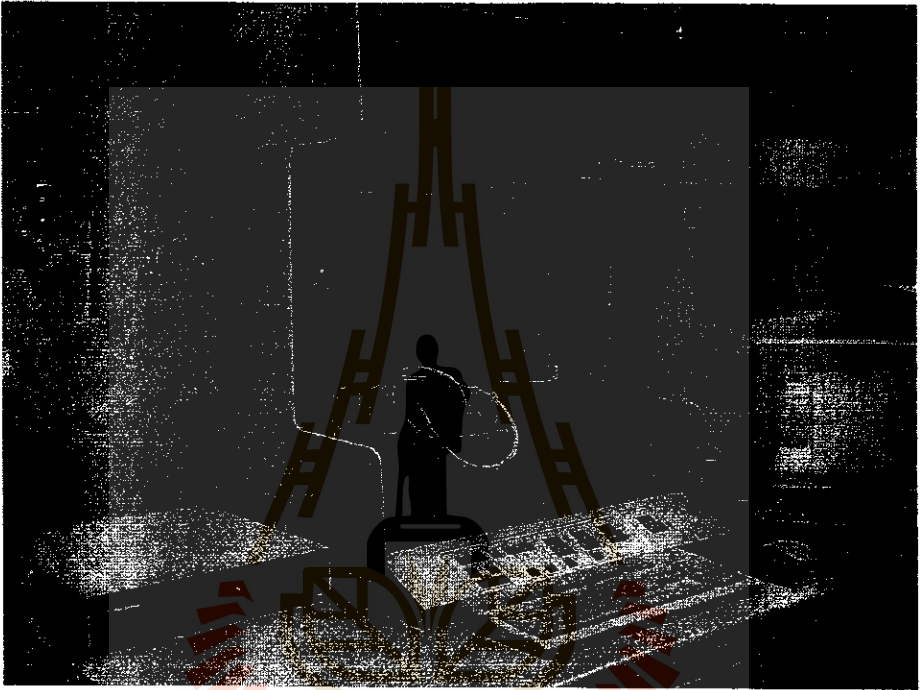


รูปที่ 3.3 ตู้อบสาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

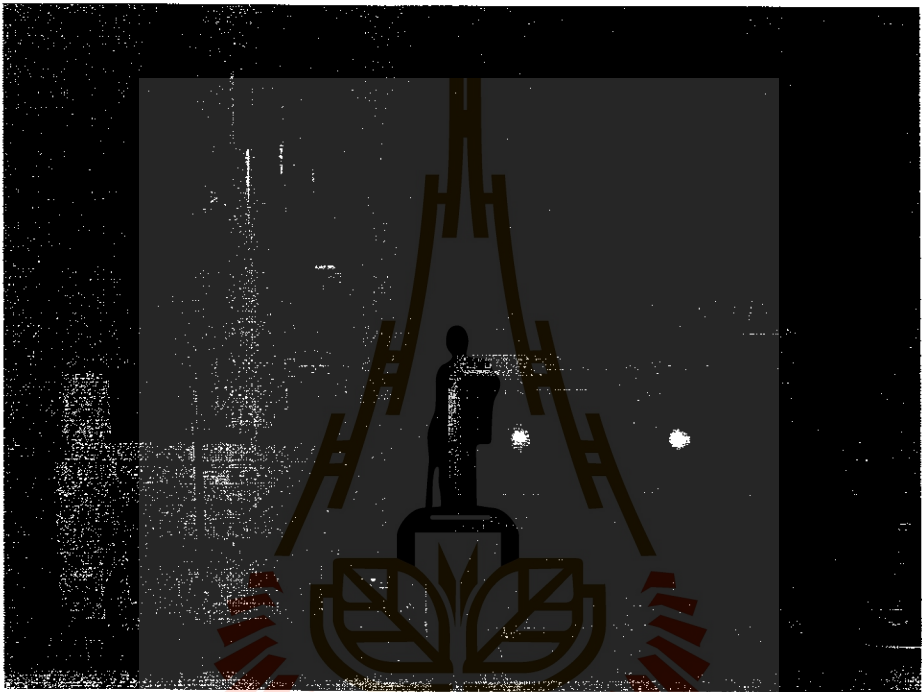


รูปที่ 3.4 ชุดตะแกรงร่อน และเครื่องเขย่าตะแกรง



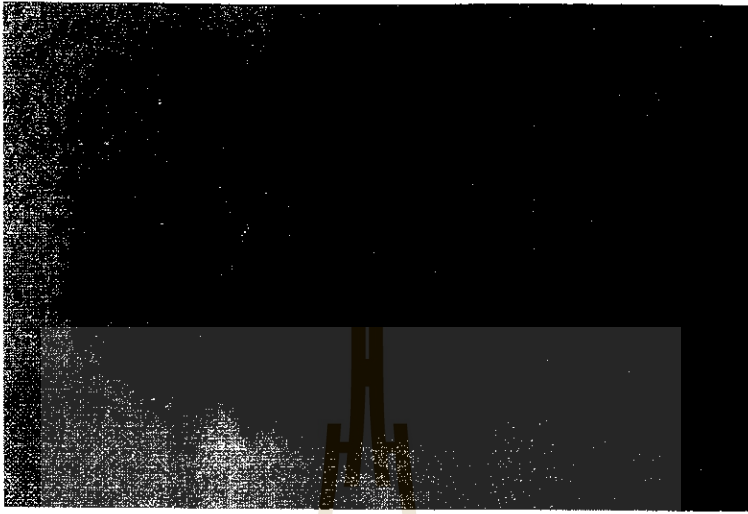
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (ASAP2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ชานอ้อย



เม็คลำไย

รูปที่ 3.7 รูปวัตถุคิบที่ใช้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้

3.3 วิธีทดลอง

3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

1. ทำความสะอาดชานอ้อยเพื่อกำจัดเศษดินที่ติดมาด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่
2. แยกชานอ้อยที่มีขนาดใหญ่กว่า 16 mesh (1.18 mm) ออกจากตัวอย่างชานอ้อยโดยใช้ตะแกรงและเครื่องเขย่า
3. นำชานอ้อยที่ถูกคัดขนาดแล้วไปให้ความร้อนภายใต้สภาวะการไหลของแก๊สไนโตรเจน (กระบวนการคาร์บอนในเซชัน) ในเตาเผาแบบท่อ โดยใช้อัตราการไหลเท่ากับ 100 ml/min สภาวะคาร์บอนในเซชันที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิระหว่าง 300-600°C เวลา 60 และ 120 นาที และอัตราการให้ความร้อน 10°C/min
4. นำถ่าน (Char) ที่ได้จากข้อ 3 ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเตาเผาแบบท่อ โดยใช้สภาวะการกระตุ้นดังนี้
 - สำหรับการกระตุ้นด้วย CO₂ ใช้อัตราไหลของแก๊สผสม CO₂ 25 cm³/min และ N₂ 75 cm³/min (ความเข้มข้นของ CO₂ เท่ากับ 25% โดยปริมาตร)
 - สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะผลิตไอน้ำโดยการป้อนน้ำในอัตรา 9 cm³/min เข้าสู่เตาเผาโดยตรงที่อุณหภูมิสูงจะได้อัตราไหลของไอน้ำประมาณเท่ากับ 50 cm³/min
 - เวลาของการกระตุ้นเท่ากับ 60 และ 120 นาที
 - อุณหภูมิของการกระตุ้นอยู่ในช่วง 600-850°C
 - อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10°C/min
5. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์และคำนวณหาร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

3.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

3.3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

1. นำชานอ้อยมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่
2. ผสมชานอ้อยกับสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยปรับให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเนื้อกรดต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1:1 แล้วแช่ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำตัวอย่างบรรจุลงใน ceramic boat แล้วนำไปให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 300°C นาน 60 นาที ภายใต้สภาวะการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 ml/min และที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/min

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 3 โดยเปลี่ยนระดับอุณหภูมิเป็น 400, 500 และ 600°C ตามลำดับ
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 4 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของเนื้อกรดต่อวัตถุคิบเป็น 0.5 : 1 และ 1.5 : 1 ตามลำดับ
6. ทำซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 3 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 400, 500 และ 600°C และเพิ่มเวลาเป็น 120 นาที
7. เมื่อเสร็จการทดลองที่แต่ละสภาวะทำการปิดเตาและให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องในบรรยากาศการไหลของแก๊สในโตรเจน
8. นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ออกจากเตาเผาแล้วนำไปล้างด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรด่างของน้ำที่ใช้ล้างได้มากกว่า 6.5 จากนั้นทำการล้างในครั้งสุดท้ายด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องโดยน้ำที่ใช้ในการล้างผลิตภัณฑ์เป็นน้ำกลั่นหรือน้ำที่ปราศจากไอออน
9. อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่
10. เก็บถ่านกัมมันต์ไว้ในโถสุญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2.2 การศึกษาการดูดซับโครเมียม

ถ่านกัมมันต์ที่นำไปใช้ศึกษาการดูดซับโครเมียมจากสารละลายเป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยด้วยกรดฟอสฟอริกที่สภาวะอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุคิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิการกระตุ้น 500°C นาน 60 นาที โดยศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ (ผลิตภัณฑ์ของบริษัทซีไอแกนติก จำกัด จังหวัดนครราชสีมา)

สารละลายโครเมียมที่ใช้ศึกษาเตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 500 mg/L (ppm) ก่อนนำไปศึกษาการดูดซับโครเมียมจากสารละลายถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดจะถูกบดและคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดเล็กลงว่า 150 μm

การศึกษาสมดุลการดูดซับโครเมียมใช้การศึกษาในระบบกะ (Batch) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ปริมาณ 200 mg ผสมกับถ่านกัมมันต์ 0.20 g จากนั้นปรับสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด่างเท่ากับ 2.5 แล้วนำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30°C ด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ใช้อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่พอที่ระบบการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล ส่วนการศึกษาผลของความเป็นกรด่างของสารละลายใช้สารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ปริมาตรสารละลาย 200 cm^3 และปรับค่าความเป็นกรด่างเป็น 2, 2.5, 3, 4, 5, 6 และ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการศึกษาค่าของอุณหภูมิได้ใช้อุณหภูมิการดูดซับที่ 30, 35 และ 40°C การวิเคราะห์ปริมาณ

ของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือในสารละลายภายหลังจากดูดซับใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (ASTM D1687-92)⁽²⁸⁾ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ปริมาณการดูดซับโครเมียมทั้งหมดโดยถ่านกัมมันต์คำนวณได้จากผลต่างของความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นในสารละลายที่สภาวะสมดุลภายหลังจากดูดซับ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์โครเมียมไอออนในสารละลายที่อยู่ในรูปต่าง ๆ

3.3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดถ่านไยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

ขั้นตอนการคาร์บอนเซชัน

1. ล้างเม็ดถ่านไยด้วยน้ำสะอาดแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำเม็ดถ่านไยแห้งมาบดด้วยเครื่องบดและคัดขนาดให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.1 mm โดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 8 และ 10 เมช
3. นำเม็ดถ่านไยที่คัดขนาดแล้วประมาณ 20 g ใส่ในที่ใส่ตัวอย่าง (ceramic boat) นำไปให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อภายใต้สภาวะการไหลของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 100 cm³/min โดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการในอัตราที่คงที่ (10°C/min) แล้วปล่อยให้ที่อุณหภูมินี้จนครบเวลาที่ต้องการ จากนั้นปิดเตาและปล่อยให้เตาเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องในบรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจน
4. นำถ่านชาร์ที่ได้มาชั่งน้ำหนักและเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อรอไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้นต่อไป

ขั้นตอนการกระตุ้น

1. นำถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนเซชันมาประมาณ 10 g บรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่าง แล้ววางเข้าไปในเตาเผาแบบท่อแนวนอน
2. เพิ่มอุณหภูมิเตาเผาจากอุณหภูมิห้องที่อัตราการเพิ่มความร้อนคงที่ (10°C/min) โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 cm³/min เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึงค่าที่ต้องการให้ปิดแก๊สไนโตรเจนแล้วเปลี่ยนเป็นแก๊สกระตุ้น (ไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) โดยใช้อัตราการไหลประมาณ 100 cm³/min แล้วควบคุมให้อยู่ที่อุณหภูมิสุดท้ายนี้จนครบเวลาที่ต้องการศึกษา จากนั้นปิดการไหลของแก๊สกระตุ้นทำการปิดเตาแล้วเปลี่ยนไปเปิดแก๊สไนโตรเจนให้ไหลเข้าเตาเผาแทน รอจนอุณหภูมิของเตาลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
3. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาชั่งน้ำหนักและเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ต่อไป

3.3.4 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดถ่านไยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

1. ล้างเม็ดถ่านไยด้วยน้ำสะอาดแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำเม็ดกล้าโฆมาบดด้วยเครื่องบดและคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.1 mm (อยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 และ 10 เมช)
3. นำอนุภาคเม็ดกล้าโฆที่ผ่านการคัดขนาดแล้วประมาณ 20 g มาแช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 50% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 20 cm³ นานประมาณ 1 ชั่วโมง
4. นำอนุภาคเม็ดกล้าโฆที่ผ่านการแช่สารเคมีแล้วมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำอนุภาคเม็ดกล้าโฆที่แช่สารเคมีและอบแล้ว น้ำหนักประมาณ 10 g มาให้ความร้อนในเตาเผาภายใต้สภาวะการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราไหล 100 cm³/min โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20°C /min จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (400–900°C) แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปิดเตาและปล่อยให้เตาเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยยังคงให้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านเตาตลอดเวลา
6. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น โดยแช่ในน้ำกลั่นและเปลี่ยนน้ำบ่อยๆ จนกว่าค่าความเป็นกรดค้างที่วัดได้จะมีค่าเป็นกลาง
7. อบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง ชั่งและบันทึกน้ำหนักสุดท้ายแล้วนำไปพักไว้ในโถสุญญากาศเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แบ่งเป็น

1. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากสูตร

$$\text{ร้อยละผลผลิตรวม} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบ}}$$

2. ความสามารถในการดูดซับในรูปของตัวเลขไอโอดีน (Iodine number) ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94⁽²⁹⁾
3. ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งประกอบด้วย
 - ร้อยละความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D2867-95⁽³⁰⁾
 - ร้อยละสารระเหย ตามมาตรฐาน ASTM D5832-95⁽³¹⁾
 - ร้อยละของเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D2866-95⁽³²⁾
 - ร้อยละคาร์บอนคงตัว (โดยผลต่าง)
4. ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของช่วงขนาดรูพรุน และการกระจายขนาดของรูพรุน โดยใช้ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C (77 K) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว Micromeritics รุ่น ASAP 2010 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มีดังนี้
 - ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)

- ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) คำนวณจากปริมาตรของ N_2 ที่ถูกดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P^0) เท่ากับ 0.98 แล้วแปลงเป็นปริมาตรของ N_2 ในสถานะของเหลว
 - ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume) คำนวณจากสมการของ Dubinin-Radushkevich (D-R Equation) ⁽¹⁷⁾
 - ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore volume) คำนวณด้วยสมการ BJH ⁽³³⁾
 - ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore volume) คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาตรรูพรุนรวมและปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางรวมกัน
 - ขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณจาก $4V/A$
เมื่อ V = ปริมาตรรูพรุนรวม และ A = พื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการ BET
 - ค่าการกระจายขนาดของรูพรุนช่วงต่าง ๆ (Pore size distribution) โดยใช้ทฤษฎี Density Functional Theory (DFT) ⁽³⁴⁾
5. ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วย CO₂

งานวิจัยในส่วนนี้ศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการคาร์บอน 300–600°C เวลาในการคาร์บอนที่ 60 และ 120 นาที อุณหภูมิการกระตุ้น 600–850°C และเวลากระตุ้น 60 และ 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ ร้อยละผลผลิต ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนขนาดต่าง ๆ ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ย

4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นภายใต้สภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์เตรียมที่ทุกสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณสารระเหยลดลง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบชานอ้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนให้สูงขึ้นในช่วง 300–600°C พบว่าที่เวลาการกระตุ้น 60 นาทีและ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไม่มีผลที่ชัดเจนต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ส่วนผลของเวลาการคาร์บอนนั้น การเพิ่มของเวลากลับทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของสารระเหยที่มีมากขึ้น

การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคาร์บอนคงตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 600–800°C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นให้สูงกว่า 800°C จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มเวลาการกระตุ้นโดยสภาวะการเตรียมอื่น ๆ คงที่ พบว่าเวลาไม่มีผลที่เด่นชัดต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ โดยมีค่าของคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 50–68 โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดเป็นของถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิคาร์บอน 600°C เวลา 60 นาทีและสภาวะอุณหภูมิกระตุ้น 800°C และเวลา 60 นาที สำหรับปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ ภายใต้สภาวะทั้งหมดที่ศึกษา พบว่ามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8–15 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่ามีความที่ไม่สูงมากนัก

4.1.2 ผลของสภาวะการเตรียมต่อร้อยละผลผลิตรวม

ผลของสภาวะอุณหภูมิคาร์บอนต่อร้อยละผลผลิตรวมแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าที่สภาวะของการกระตุ้นคงที่ การคาร์บอนที่อุณหภูมิทำให้ผลผลิตของถ่านกัมมันต์สูงกว่าการ

ตารางที่ 4.1 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติแบบประมาณ และร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

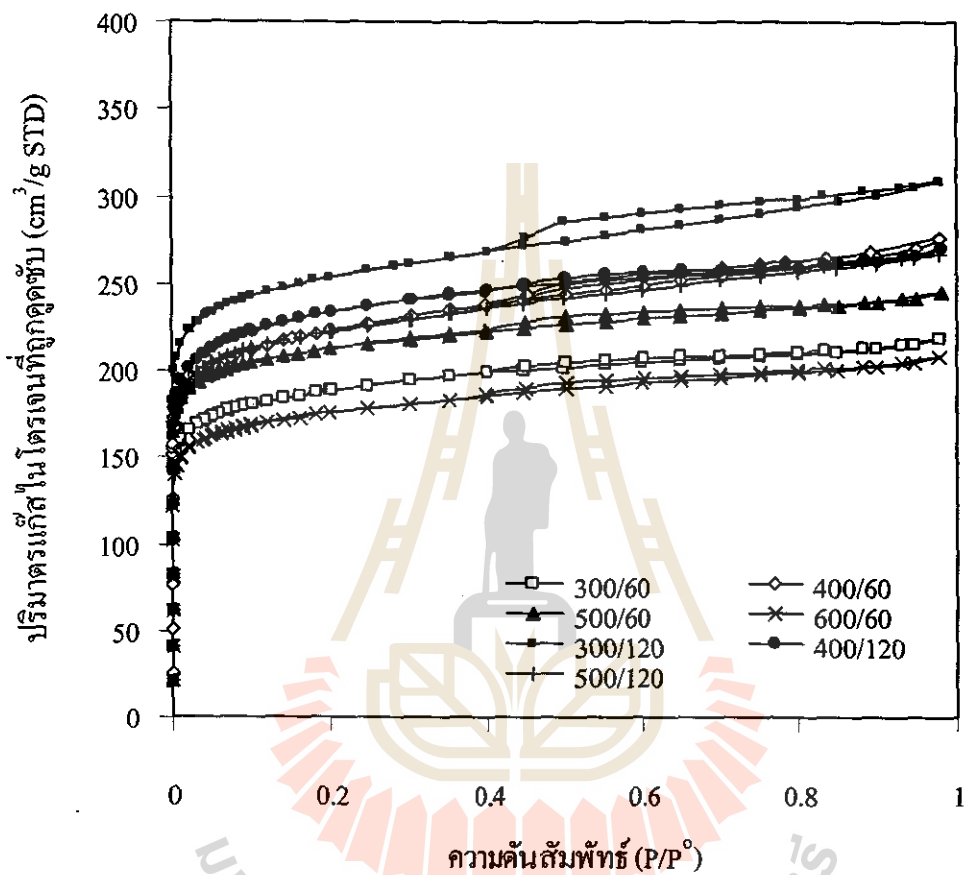
สภาวะคาร์บอนไนซ์		สภาวะกระตุ้น		สมบัติแบบประมาณ (ร้อยละ)			ร้อยละผลผลิตรวม
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	
300	60	800	60	11	25	64	29.6
400	60	800	60	8	28	64	14.8
500	60	800	60	12	29	59	13.5
600	60	800	60	9	23	68	12.9
400	60	600	60	8	33	59	20.9
400	60	700	60	9	30	61	19.0
400	60	800	60	8	28	64	14.8
400	60	850	60	15	32	53	9.9
300	60	800	120	7	27	66	30.8
400	60	800	120	11	27	62	16.4
500	60	800	120	10	24	66	14.5
600	60	800	120	12	37	51	12.6
300	120	800	60	12	33	56	21.0
400	120	800	60	11	39	50	17.0
500	120	800	60	12	27	61	8.8
ขานอ้อย				2	88	10	

คาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในช่วง 300 – 400°C ทำให้ร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนให้สูงกว่า 400°C พบว่าร้อยละผลผลิตมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นที่สภาวะการคาร์บอนซึ่งที่มีผลทำให้ร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้มาก สำหรับการเพิ่มเวลาในการคาร์บอนให้นานขึ้น พบว่าผลผลิตถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลง แต่การเพิ่มเวลากระตุ้นจาก 60 เป็น 120 นาที ทำให้ร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้น แต่มีผลไม่มากนัก โดยเฉพาะเมื่อทำการคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง เช่นที่ 600°C พบว่าร้อยละผลผลิตรวมของการเตรียมถ่านกัมมันต์มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9 – 31 โดยน้ำหนัก อาจสรุปได้ว่าถ้าต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละผลผลิตและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงควรเตรียมที่สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนที่ต่ำประมาณ 300°C และสภาวะอุณหภูมิกระตุ้นที่สูงและใช้เวลานาน

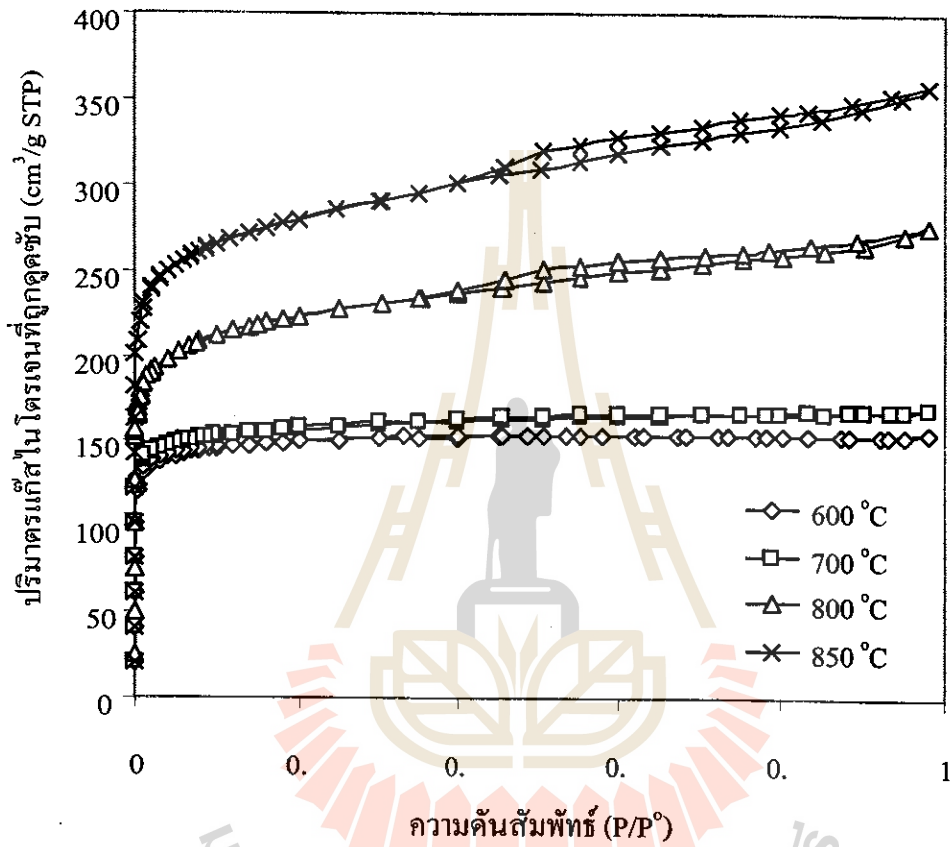
4.1.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตัวอย่างของกราฟไอโซเทอมสำหรับการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์เตรียมโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนในช่วง 300 – 400°C และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C นาน 60 นาที พบว่าปริมาตรการดูดซับแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาตรและพื้นที่ผิวของรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิคาร์บอน 300°C เป็นแบบ Type II ตามการจำแนกของ IUPAC แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่สภาวะนี้ประกอบด้วยทั้งรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง สำหรับที่อุณหภูมิคาร์บอน 400°C เส้นกราฟไอโซเทอมยังแสดงลักษณะไอโซเทอมแบบ Type II และแสดงวง hysteresis ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์เตรียมภายใต้สภาวะนี้มีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์คาร์บอนที่อุณหภูมิ 300°C แต่เมื่ออุณหภูมิคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 400 เป็น 600°C ปริมาตรการดูดซับแก๊สไนโตรเจนกลับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการยุบตัวของโครงสร้างของถ่านชาร์ เนื่องจากเกิดคาร์บอนที่อุณหภูมิคาร์บอนที่สูงขึ้นหรืออาจเกิดจากการอุดตันของรูพรุนของถ่านชาร์ เนื่องจากเกิดการตกค้างของน้ำมันดิน (tar) ที่มีมากขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยสารระเหยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสมมุติฐานนี้ต้องการทดสอบด้วยวิธีการทดลองต่อไป สำหรับผลของเวลาในการคาร์บอน พบว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนต่ำ (300°C) การเพิ่มเวลาคาร์บอนทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความสามารถดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่การคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 400°C ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นสูงขึ้นปริมาตรการดูดซับแก๊สไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2) ถ้ากระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C กราฟไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ที่ได้แสดงลักษณะเป็นแบบ Type I ซึ่งว่ารูพรุนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนขนาดเล็ก



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที (300/60 หมายถึง อุณหภูมิ/เวลาการคาร์บอนไนซ์)



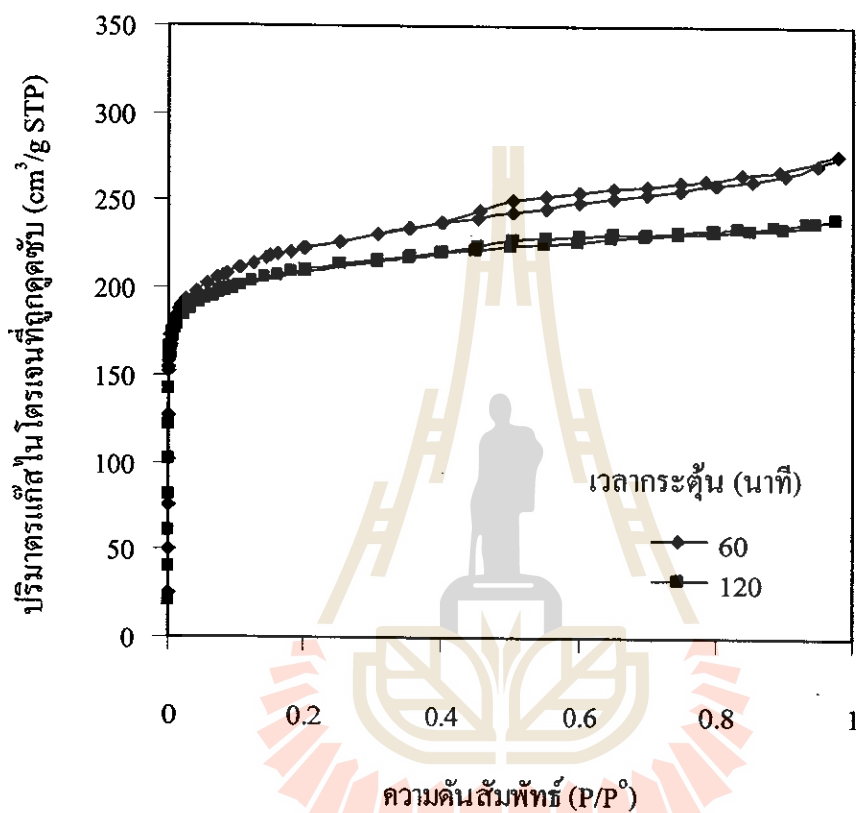
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของ ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เวลากระตุ้น 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที

การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 700°C ทำให้กราฟไอโซเทอมเปลี่ยนไปเป็นแบบ Type II และมีวง hysteresis เกิดขึ้นแสดงว่าเกิดรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น รูปที่ 4.3 แสดงผลของเวลากระตุ้นต่อลักษณะของกราฟไอโซเทอมที่สภาวะอุณหภูมิกระตุ้น 800°C พบว่าเมื่อเพิ่มเวลากระตุ้นจาก 60 นาทีเป็น 120 นาที ไอโซเทอมยังคงเป็นแบบ Type II แต่วง hysteresis มีขนาดลดลงและความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนก็ลดลงด้วย

ตารางที่ 4.2 สรุปสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายปริมาตรของรูพรุนขนาดต่าง ๆ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในช่วง 52 – 77% ขึ้นกับสภาวะการเตรียม และพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 535 – 993 m²/g โดยสภาวะที่ให้พื้นที่ผิวสูงสุดคือสภาวะอุณหภูมิกระตุ้น 850°C เวลากระตุ้น 60 นาที และสภาวะการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที โดยมีร้อยละผลผลิตรวมเท่ากับ 10 ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่า แสดงว่าเมื่อใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างมวลคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ส่งผลให้มีการพัฒนารูพรุนเกิดขึ้นมากด้วย สำหรับผลของขนาดรูพรุนพบว่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.99 – 2.23 nm โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นให้สูงขึ้นในช่วง 600 – 850°C ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่

รูปที่ 4.4 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะการกระตุ้น 800°C และเวลา 60 นาที พบว่าที่เวลาการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์จาก 300 เป็น 400°C ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิต่อไปพื้นที่ผิวมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มเวลาการคาร์บอนไนซ์เป็น 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าที่เวลาการคาร์บอนไนซ์ 60 นาทีและอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่ให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงสุดมีค่าลดลงอยู่ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300°C ผลที่ได้แสดงว่า การคาร์บอนไนซ์วัตถุประสงค์เพื่อผลิตถ่านชาร์จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาความพรุนของถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนการกระตุ้นเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมนี้จะทำให้ได้โครงสร้างรูพรุนที่ช่วยให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปสู่ภายในได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้รวดเร็ว ส่งผลให้เกิดความพรุนสูง

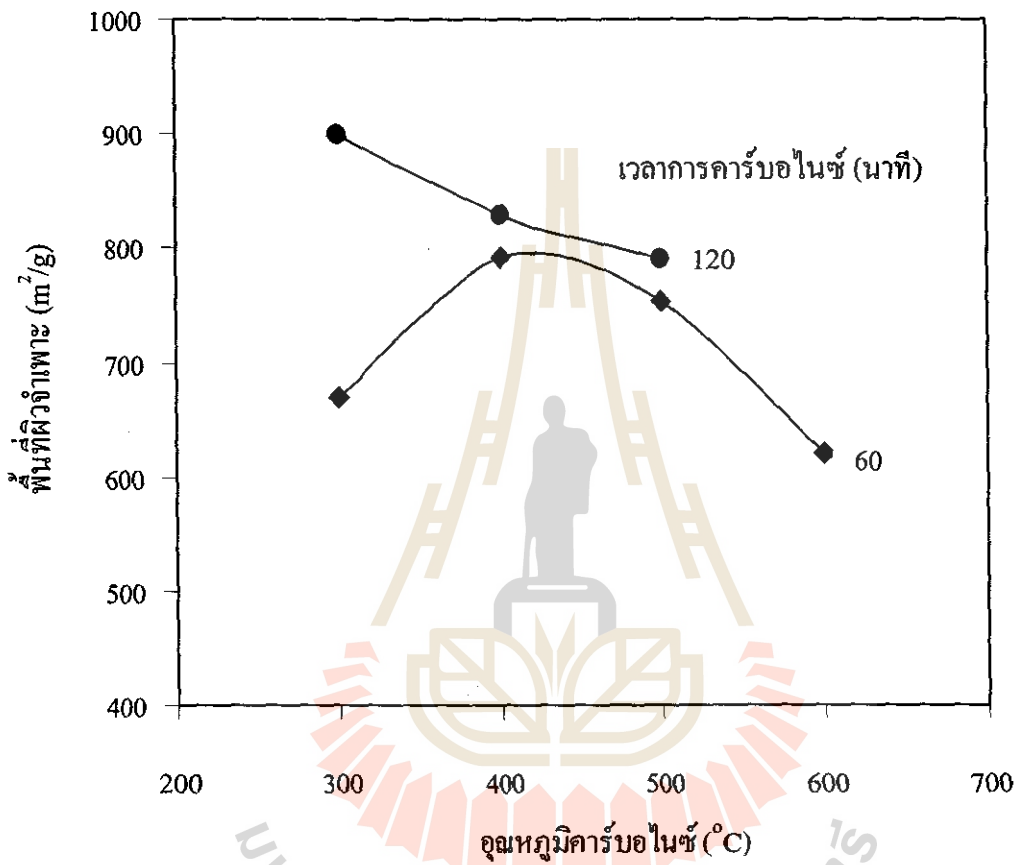
รูปที่ 4.5 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อการกระจายปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะกระตุ้น 800°C นาน 60 นาที พบว่าสำหรับการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ (300°C) การเพิ่มเวลาการคาร์บอนไนซ์จาก 60 นาทีเป็น 120 นาที จะช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นได้ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 300°C การเพิ่มเวลาการคาร์บอนไนซ์ไม่มีผลต่อปริมาตรรูพรุนแต่อย่างใด สำหรับผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ให้ปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์สูงสุดจะขึ้นกับเวลาของการคาร์บอนไนซ์ โดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดจะลดลงเมื่อใช้เวลาของการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น ดังนี้



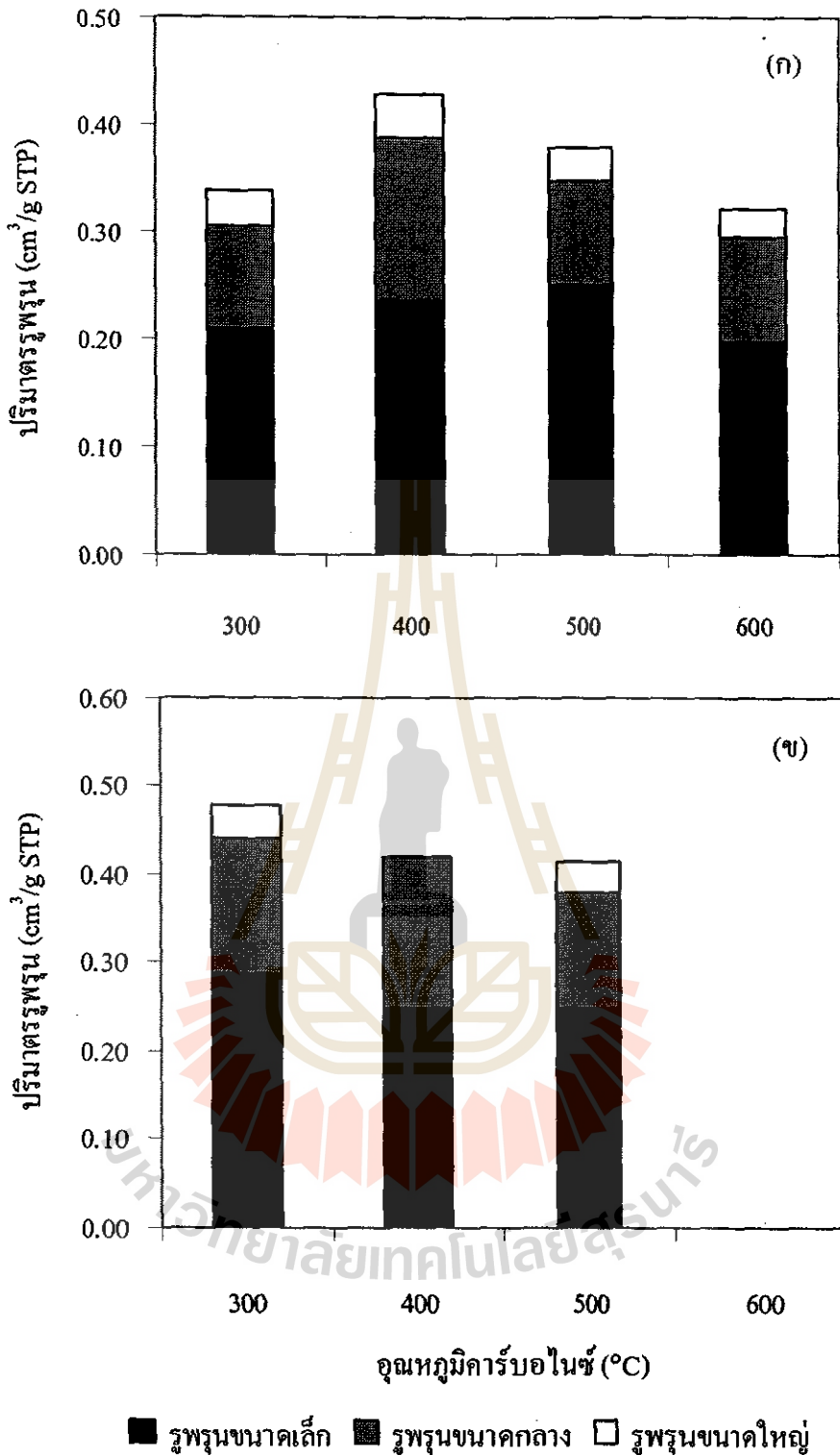
รูปที่ 4.3 ผลของเวลากระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที

ตารางที่ 4.2 ปริมาตรพูน ขนาดพูนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากขาน้อย โดยวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการป้อน		สภาวะกระตุ้น		ปริมาณพูน (cm ³ /g)				ขนาดพูนเฉลี่ย (nm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	ทั้งหมด		
300	60	800	60	0.21(61.7%)	0.10	0.03	0.34	2.02	669
400	60	800	60	0.24(55.8%)	0.15	0.04	0.43	2.16	792
500	60	800	60	0.25(65.8%)	0.10	0.03	0.38	2.07	754
600	60	800	60	0.20(62.5%)	0.10	0.03	0.32	2.07	621
400	60	600	60	0.20(83.3%)	0.03	0.02	0.24	1.99	535
400	60	700	60	0.20(76.9%)	0.04	0.02	0.26	2.16	556
400	60	800	60	0.24(55.8%)	0.15	0.04	0.43	2.16	792
400	60	850	60	0.29(52.7%)	0.21	0.05	0.55	2.23	993
300	60	800	120	0.26(54.2%)	0.18	0.04	0.48	2.00	870
400	60	800	120	0.20(54.1%)	0.10	0.08	0.37	2.03	747
500	60	800	120	0.20(62.5%)	0.09	0.03	0.32	2.04	626
600	60	800	120	0.23(63.9%)	0.10	0.03	0.36	2.03	703
300	120	800	60	0.29(60.4%)	0.15	0.04	0.48	2.12	899
400	120	800	60	0.25(59.5%)	0.17	0.00	0.42	2.02	828
500	120	800	60	0.25(61.0%)	0.13	0.03	0.41	2.10	789



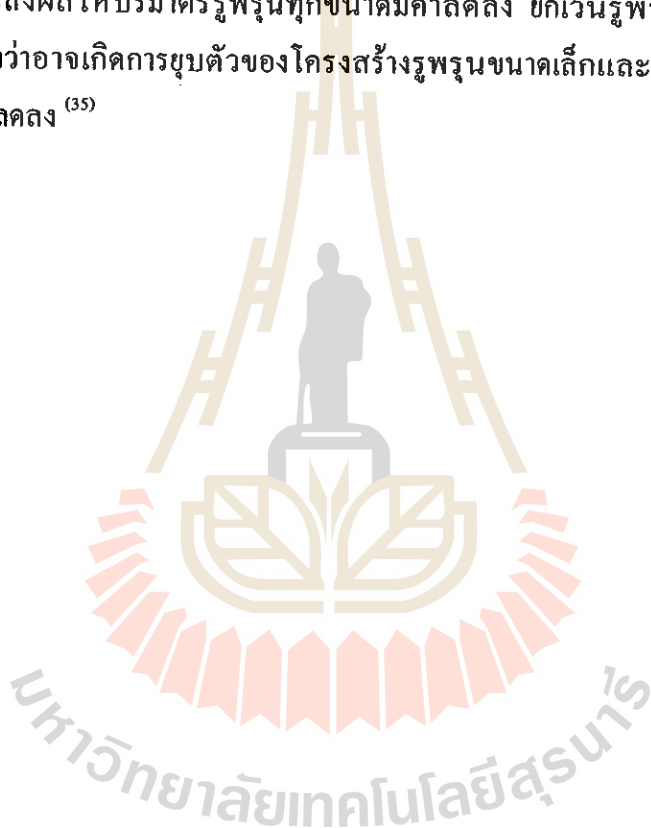
รูปที่ 4.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (อุณหภูมิกระตุ้น 800°C และ เวลากระตุ้น 60 นาที)

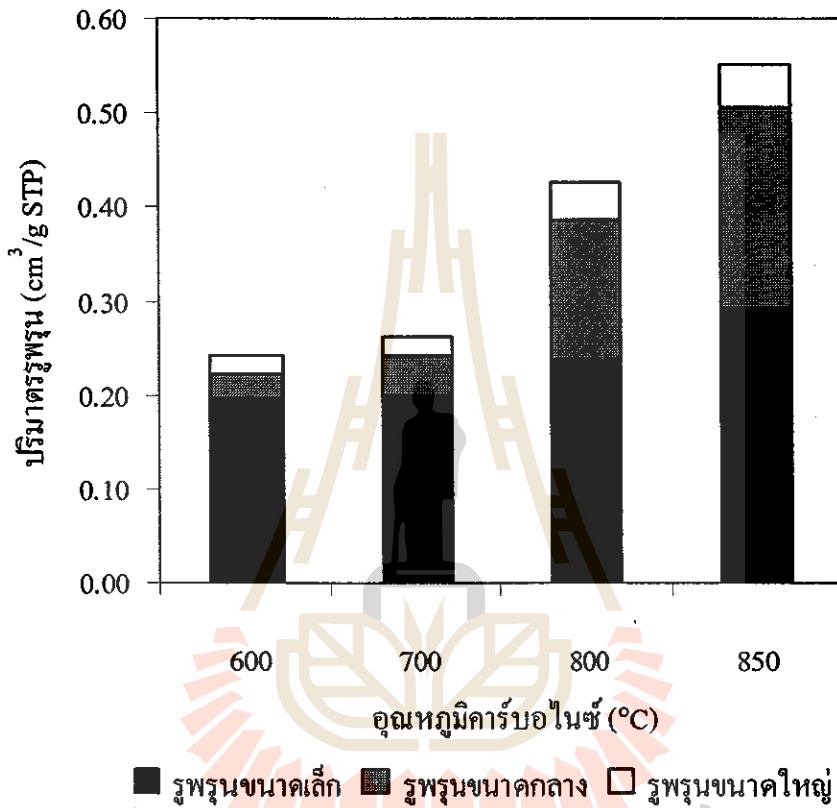


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (ก) 60 นาที และ (ข) 120 นาที ต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที

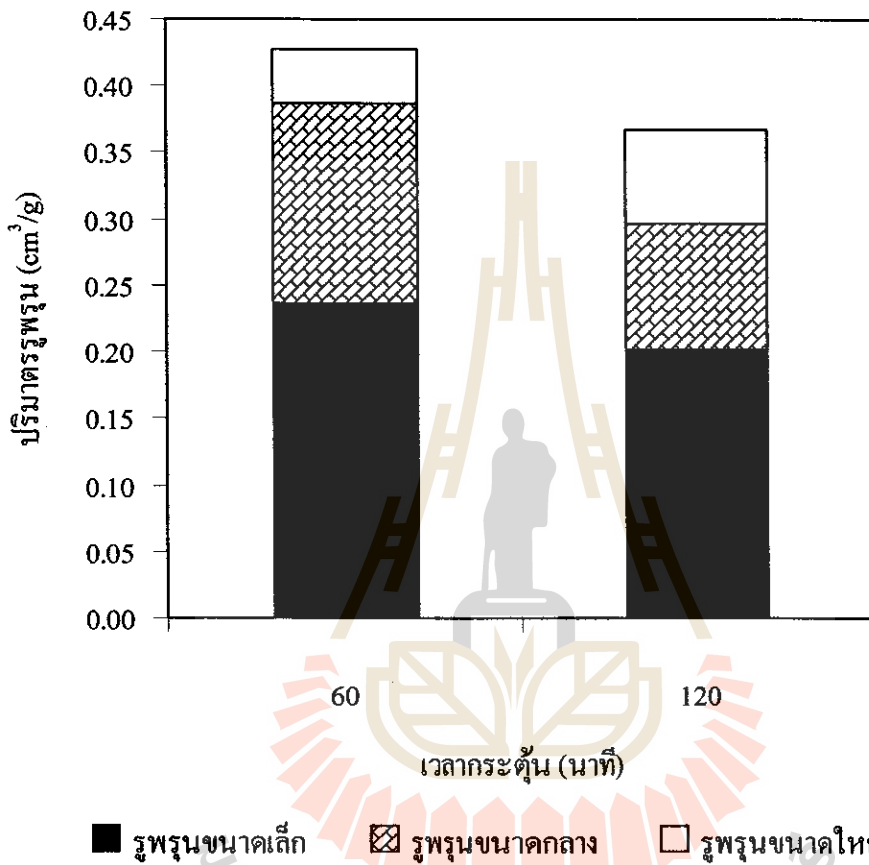
เมื่อใช้เวลาคาร์บอไนซ์ 60 นาทีและ 120 นาที อุณหภูมิคาร์บอไนซ์ที่ให้ปริมาตรรูพรุนสูงสุดอยู่ที่ 400 และ 300°C ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลของพื้นที่ผิวจำเพาะในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการกระตุ้นต่อการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มของปริมาตรรูพรุน โดยอุณหภูมิจะมีผลค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงกว่า 700°C โดยเฉพาะการเพิ่มของรูพรุนขนาดกลางจะเกิดมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมการกระจายขนาดของรูพรุนได้โดยตรงโดยการควบคุมอุณหภูมิของการกระตุ้น เมื่อพิจารณาผลของเวลาการกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนจากรูปที่ 4.7 พบว่าที่อุณหภูมิการกระตุ้นสูง (800°C) การใช้เวลาคาร์บอไนซ์นานขึ้นจาก 60 นาทีเป็น 120 นาทีจะส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนทุกขนาดมีค่าลดลง ยกเว้นรูพรุนขนาดใหญ่ที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น แสดงว่าอาจเกิดการยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางทำให้ปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าลดลง ⁽³⁵⁾





รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.7 ผลของเวลากระตุ้นต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากขาน้อยโดยการกระตุ้นด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการ คาร์บอไนซ์ 400°C นาน 60 นาที

4.2 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับขานอ้อย แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบขานอ้อย

การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ในช่วง 300 – 400°C ทำให้คาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นในช่วงประมาณ 3 – 10% ขึ้นกับเวลาที่ใช้กระตุ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกลับไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว ซึ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 400°C สารระเหยส่วนใหญ่ถูกปลดปล่อยออกมาเกือบหมดแล้วทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยมาก ส่วนการเพิ่มเวลาการคาร์บอนไนซ์ให้นานขึ้นที่สภาวะการเตรียมอื่น ๆ ลงที่ พบว่ามีผลทำให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวลดลงเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นให้สูงขึ้นเมื่อสภาวะคาร์บอนไนซ์และเวลากระตุ้นคงที่พบว่าทำให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 40% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 เป็น 1,000°C ส่วนการเพิ่มเวลากระตุ้นให้สูงขึ้นพบว่าไม่มีผลต่อร้อยละคาร์บอนคงตัว โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีร้อยละคาร์บอนคงตัวอยู่ระหว่าง 53 – 74 ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อย โดยวิธีกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละของถ่านมีค่าอยู่ระหว่าง 9 – 22 และสารระเหยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 4 – 40 ขึ้นกับสภาวะการเตรียม

4.2.2 ผลของสภาวะการเตรียมต่อร้อยละผลผลิตรวม

ผลของสภาวะอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าที่สภาวะการกระตุ้นคงที่ (800°C และ 60 นาที) และที่เวลาคาร์บอนไนซ์ต่ำ (60 นาที) การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ 300°C ให้ร้อยละผลผลิตรวมสูงสุด ประมาณร้อยละ 18 ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 – 400°C พบว่าค่าร้อยละผลผลิตลดลงและกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 400°C แต่ถ้าคาร์บอนไนซ์นาน 120 นาที ค่าร้อยละผลผลิตสูงสุดของถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 20) จะเกิดที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เท่ากับ 400°C ส่วนผลของเวลาคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นที่สภาวะคาร์บอนไนซ์คงที่นั้น พบว่ามีแนวโน้มให้ผลผลิตลดลงประมาณ 60% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 เป็น 1,000°C ส่วนเวลาการกระตุ้นไม่มีผลมากนักต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ โดยร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 -25 โดยประมาณ

ตารางที่ 4.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อผลวิเคราะห์แบบประมาณและร้อยละผลผลิตรวมของ ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

สภาวะคาร์บอนไนซ์		สภาวะกระตุ้น		ผลวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (ร้อยละ)			ร้อยละ ผลผลิต รวม
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	เถ้า	สาร ระเหย	คาร์บอน คงตัว	
300	60	800	60	11	27	62	17.7
400	60	800	60	15	17	68	12.1
500	60	800	60	16	20	64	15.9
600	60	800	60	9	24	67	15.1
400	60	600	60	7	40	53	23.3
400	60	700	60	8	37	55	19.5
400	60	800	60	15	17	68	12.1
400	60	900	60	16	20	64	15.6
400	60	1000	60	22	4	74	8.7
300	60	800	120	8	29	63	17.9
400	60	800	120	10	24	66	10.4
500	60	800	120	8	28	64	20.0
300	120	800	60	10	30	60	11.7
400	120	800	60	9	29	62	20.4
500	120	800	60	10	24	66	15.8
ชานอ้อย				2	88	10	

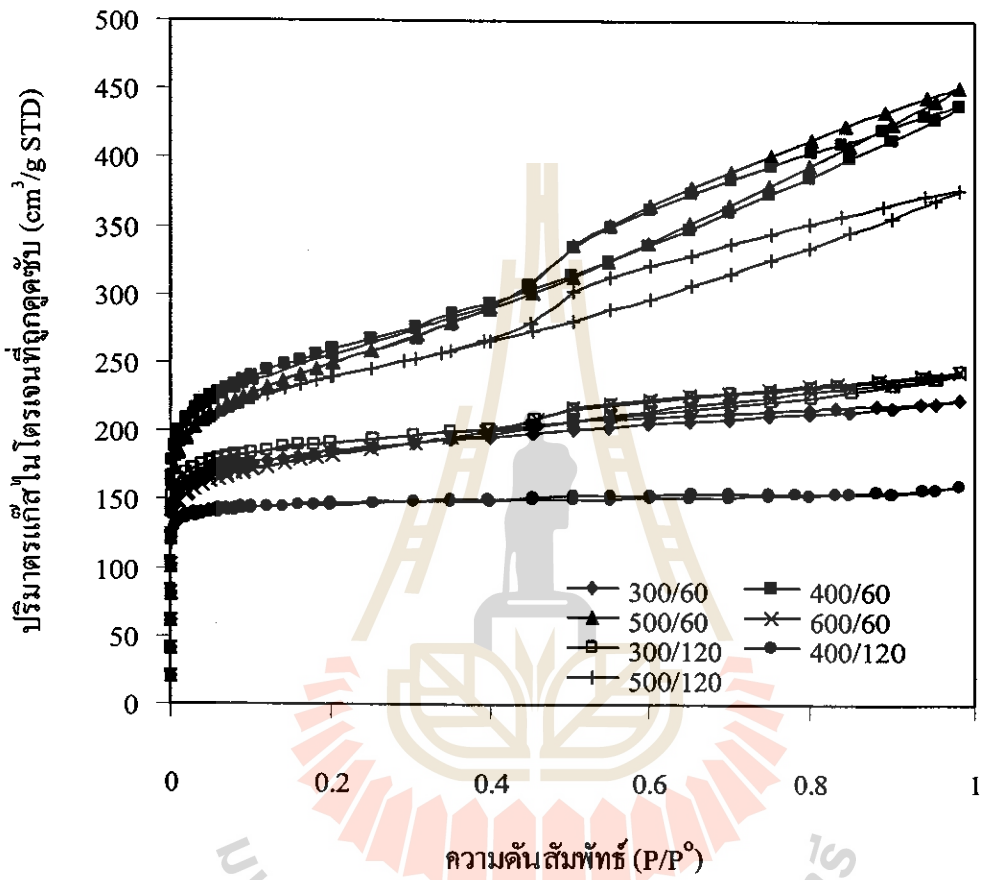
ขึ้นอยู่กับสภาวะการเตรียม ซึ่งอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.3 ผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

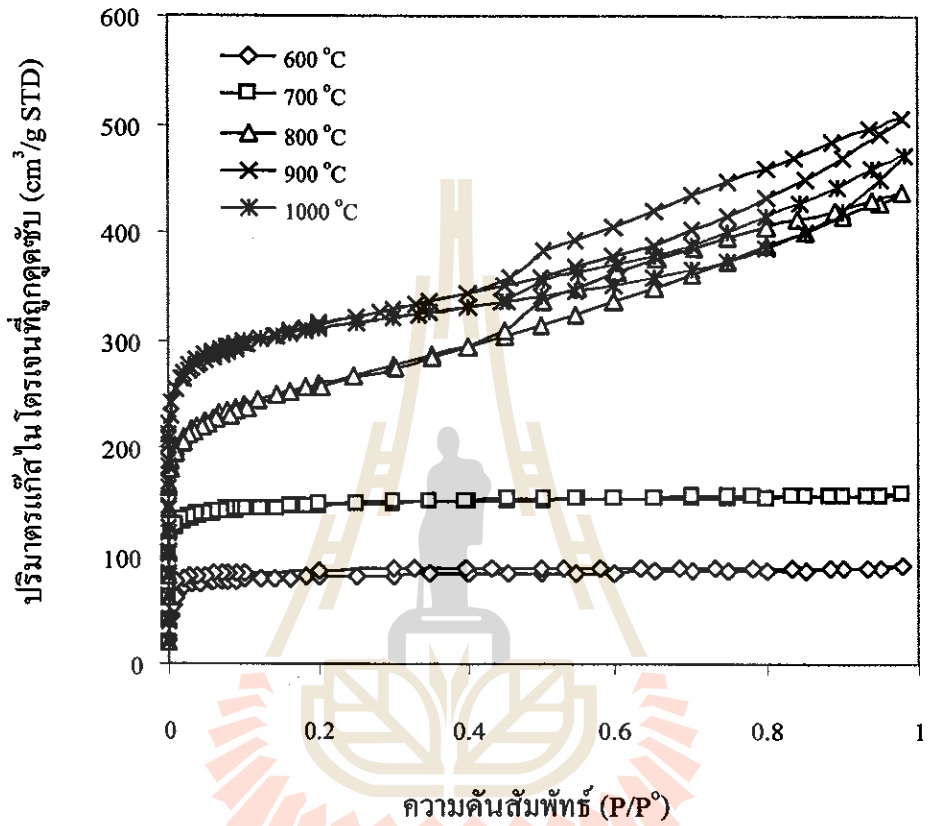
รูปที่ 4.8 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ต่อลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับแก๊สในโตรเจนของถ่านกัมมันต์เตรียมที่สภาวะกระตุ้นที่ 800°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าที่เวลาการคาร์บอนไนซ์ 60 นาที การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ทำให้ความสามารถในการดูดซับในโตรเจนเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนถึง 500°C และที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณการดูดซับมีค่าลดลงและลักษณะของกราฟไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนจาก Type I เป็นแบบ Type II เมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มสูงกว่า 300°C สำหรับผลของเวลาการคาร์บอนไนซ์ พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาจาก 60 นาทีเป็น 120 นาที ปริมาณการดูดซับในโตรเจนมีค่าลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ในช่วง $300 - 400^{\circ}\text{C}$ แต่กลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 400°C

ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นต่อลักษณะของไอโซเทอมแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับในโตรเจนของถ่านกัมมันต์โดยปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มของอุณหภูมิและมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 900°C เส้นกราฟไอโซเทอมเป็นแบบ Type I ที่สภาวะอุณหภูมิกระตุ้นต่ำกว่า 700°C และเปลี่ยนไปเป็นแบบ Type II ที่มี hysteresis loop ในช่วงอุณหภูมิ $700 - 1,000^{\circ}\text{C}$ โดยมีแนวโน้มว่าขนาดของ loop เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แสดงว่าอุณหภูมิกระตุ้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุนขนาดต่าง ๆ รูปที่ 4.10 แสดงผลของเวลาการกระตุ้น พบว่าเวลากระตุ้นมีผลน้อยมากต่อปริมาณการดูดซับในโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่ามากกว่า 0.5 การเพิ่มเวลากระตุ้นจาก 60 นาทีเป็น 120 นาที ทำให้ปริมาณการดูดซับมีค่าลดลงแต่มีผลไม่มากนัก กล่าวโดยสรุปแล้วเวลาของการกระตุ้นมีผลค่อนข้างน้อยต่อลักษณะของไอโซเทอมและความจุของถ่านกัมมันต์

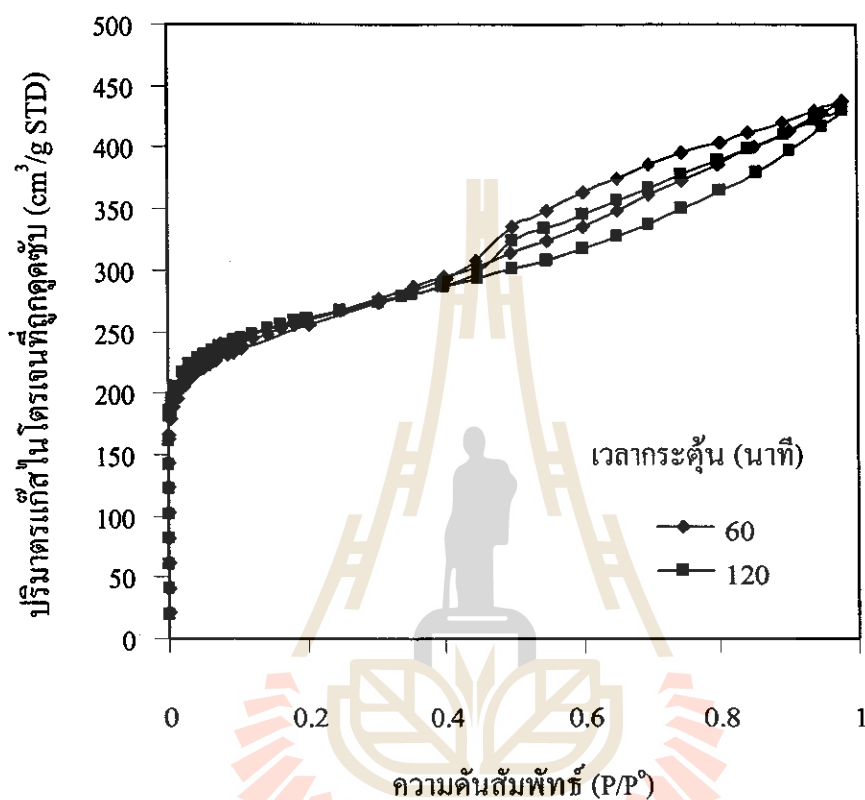
ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 แสดงผลของสภาวะการเตรียมต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ รูปที่ 4.11 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิกระตุ้น 800°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าที่เวลาการคาร์บอนไนซ์ต่ำ (60 นาที) พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์และแสดงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ประมาณ 450°C ในขณะที่เมื่อใช้เวลาการคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น (120 นาที) พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิประมาณ 400°C สำหรับผลของ



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและเวลาการคาร์บอนไนซ์ต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที (300/60 หมายถึง อุณหภูมิ/เวลาการคาร์บอนไนซ์)



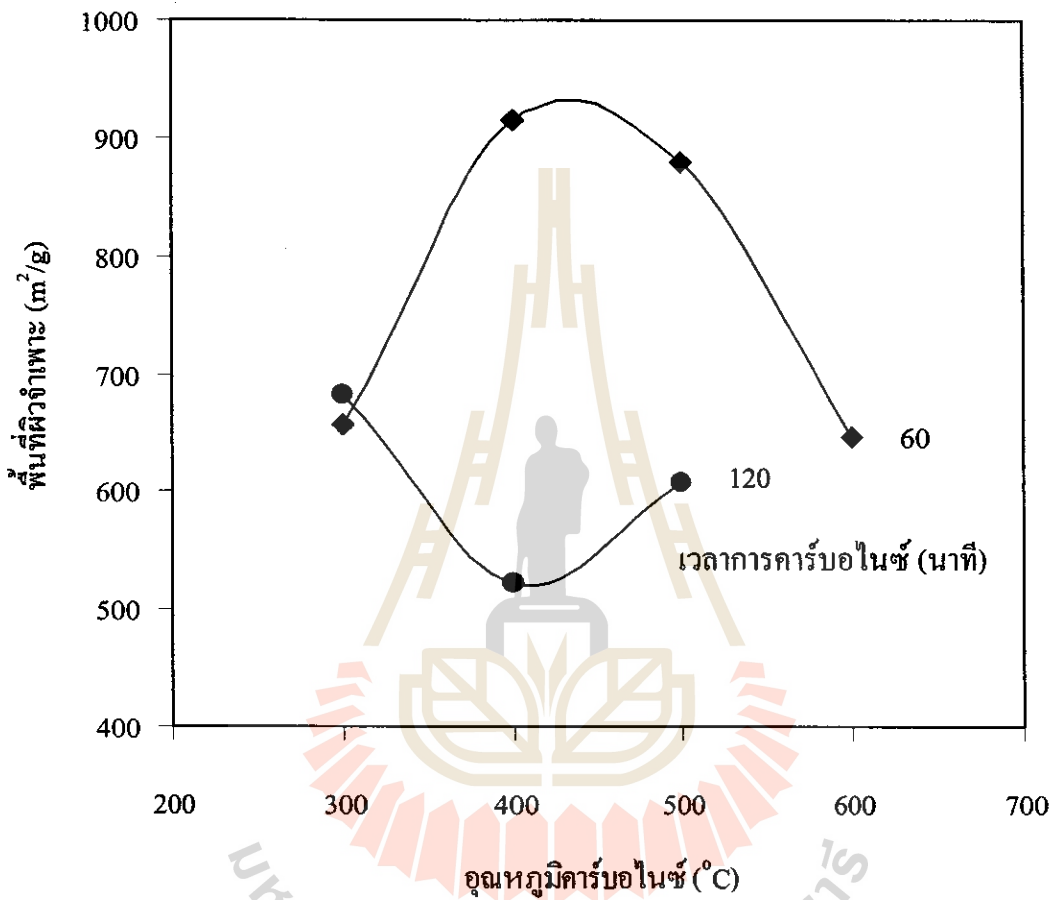
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้เวลากระตุ้น 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที



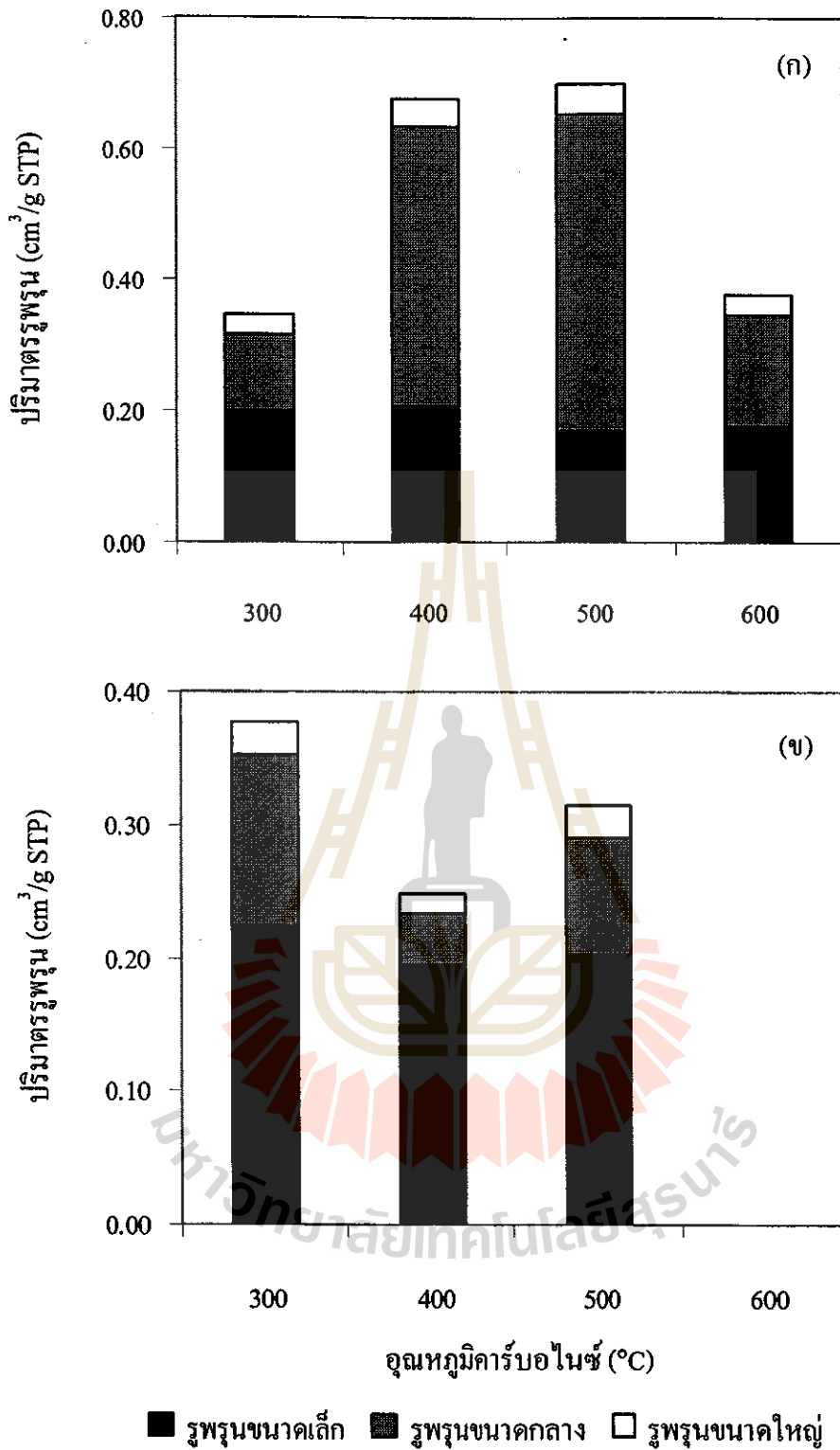
รูปที่ 4.10 ผลของเวลากระตุ้นต่อลักษณะเส้นกราฟการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที

ตารางที่ 4.4 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยวิธีการกระตุ่นด้วยไอน้ำ

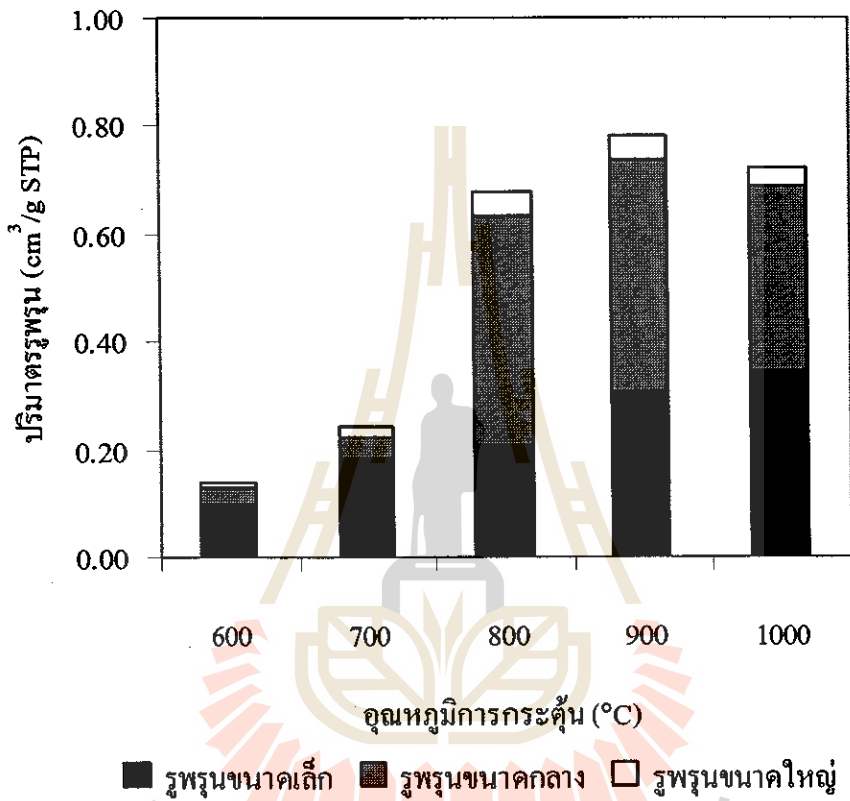
สถานะการบีบอัด		สถานะกระตุ่น		ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)				ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	ทั้งหมด		
300	60	800	60	0.20(57.1%)	0.11	0.03	0.35	2.10	656
400	60	800	60	0.21(30.8%)	0.43	0.04	0.68	2.96	916
500	60	800	60	0.17(24.3%)	0.49	0.05	0.70	3.18	879
600	60	800	60	0.18(47.4%)	0.17	0.03	0.38	2.33	647
400	60	600	60	0.10(71.4%)	0.03	0.01	0.14	1.95	288
400	60	700	60	0.18(75.0%)	0.04	0.02	0.24	1.88	520
400	60	800	60	0.21(55.3%)	0.43	0.04	0.68	2.96	916
400	60	900	60	0.31(39.7%)	0.43	0.05	0.78	2.80	1116
400	60	1000	60	0.35(47.9%)	0.34	0.04	0.73	2.63	1108
300	60	800	120	0.18(78.3%)	0.04	0.02	0.23	1.88	498
400	60	800	120	0.24(35.8%)	0.38	0.04	0.67	2.88	924
500	60	800	120	0.18(66.7%)	0.06	0.02	0.27	1.99	534
300	120	800	60	0.22(57.9%)	0.13	0.02	0.38	2.21	682
400	120	800	60	0.20(80.0%)	0.04	0.01	0.25	1.90	522
500	120	800	60	0.20(64.5%)	0.09	0.02	0.31	2.07	608



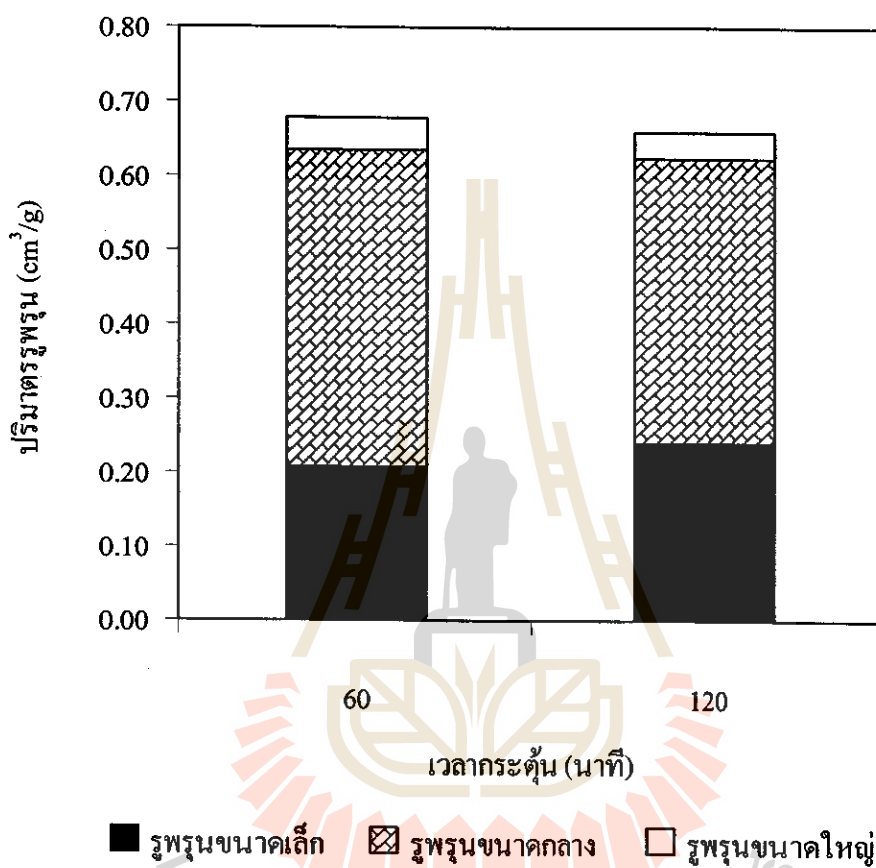
รูปที่ 4.11 ผลของเวลาและอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (อุณหภูมิกระตุ้น 800°C และเวลากระตุ้น 60 นาที)



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (ก) 60 นาที และ (ข) 120 นาที ต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 60 นาที คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปริมาณรูปทรงของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 60 นาที การบอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.14 ผลของเวลากระตุ้นต่อปริมาณรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิการคาร์บอน 400°C นาน 60 นาที

ปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าปริมาณรูพรุนรวมแสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.12) โดยที่เวลาคาร์บอนไนซ์ 60 นาที การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของรูพรุนขนาดกลาง แต่ปริมาณของรูพรุนขนาดเล็กค่อนข้างคงที่ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 600°C ปริมาตรรูพรุนรวมและปริมาณรูพรุนขนาดกลางมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิต่างๆ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้โครงสร้างรูพรุนเริ่มต้นเกิดการอุดตัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อพัฒนาการรูพรุนใหม่ในขั้นตอนการกระตุ้น ส่วนผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่อปริมาณรูพรุนที่เวลาคาร์บอนไนซ์ 120 นาที พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกับผลของพื้นที่ผิว โดยแสดงการลดลงและเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนทุกขนาด เมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น

ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นทำให้ปริมาณรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 900°C ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตลอดช่วงของอุณหภูมิกระตุ้นที่ศึกษา (600 – 1,000°C) ในขณะที่ปริมาณรูพรุนขนาดกลางมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิกระตุ้นเช่นเดียวกันแต่มีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 900°C แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นช่วยให้เกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนขนาดกลางพัฒนาจากการขยายของรูพรุนขนาดเล็กหรือจากการรวมตัวของรูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ติดกันเมื่อเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันมากขึ้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงเกินไปจะเกิดการทำลายโครงสร้างของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นหลัก ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนรวมมีค่าลดลงนั่นเอง รูปที่ 4.14 แสดงผลของเวลากระตุ้นต่อปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าการเพิ่มเวลาในขั้นตอนการกระตุ้นจาก 60 นาที เป็น 120 นาทีมีผลน้อยมากต่อการพัฒนาการรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำ

พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 288 – 1,116 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวมอยู่ระหว่าง 0.14 – 0.78 cm³/g ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กคิดเป็น 30 – 80% ของปริมาณรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.88 – 3.18 nm สภาวะที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด (1,116 m²/g) และปริมาณรูพรุนรวมสูงสุด (0.78 cm³/g) ได้แก่ อุณหภูมิกระตุ้น 900°C นาน 60 นาทีและสภาวะคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C นาน 60 นาที โดยมีร้อยละผลผลิตรวมประมาณ 16 สำหรับสภาวะกระตุ้นที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 60 นาที ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงเช่นเดียวกัน (1,108 m²/g) แต่ให้ร้อยละผลผลิตที่ต่ำมากเพียงร้อยละ 8.7

4.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก

4.3.1 องค์ประกอบและร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของขานอ้อยและของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าขานอ้อยมีปริมาณสารระเหยค่อนข้างสูง (ร้อยละ 88) แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อนำขานอ้อยมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์จะพบว่าที่ทุกสภาวะการเตรียมจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณสารระเหยลดลงและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นมากเกือบถึงร้อยละ 80 เมื่อไม่คิดค่าความชื้น ผลการศึกษาที่ทุกสภาวะของอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบพบว่าในช่วงอุณหภูมิจาก 300 ถึง 400°C ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาณสารระเหยลดลงและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิอย่างชัดเจน แต่การเตรียมในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 500 ถึง 600°C ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่ายส่วนใหญ่ได้ระเหยออกไปแล้วตั้งแต่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ดังนั้นอุณหภูมิการกระตุ้นสูงสุดที่ควรใช้จึงไม่ควรเกิน 500°C เมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ว่าการเพิ่มเวลาหรือการเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบไม่ทำให้สารระเหยและคาร์บอนคงตัวเปลี่ยนแปลงมากนัก

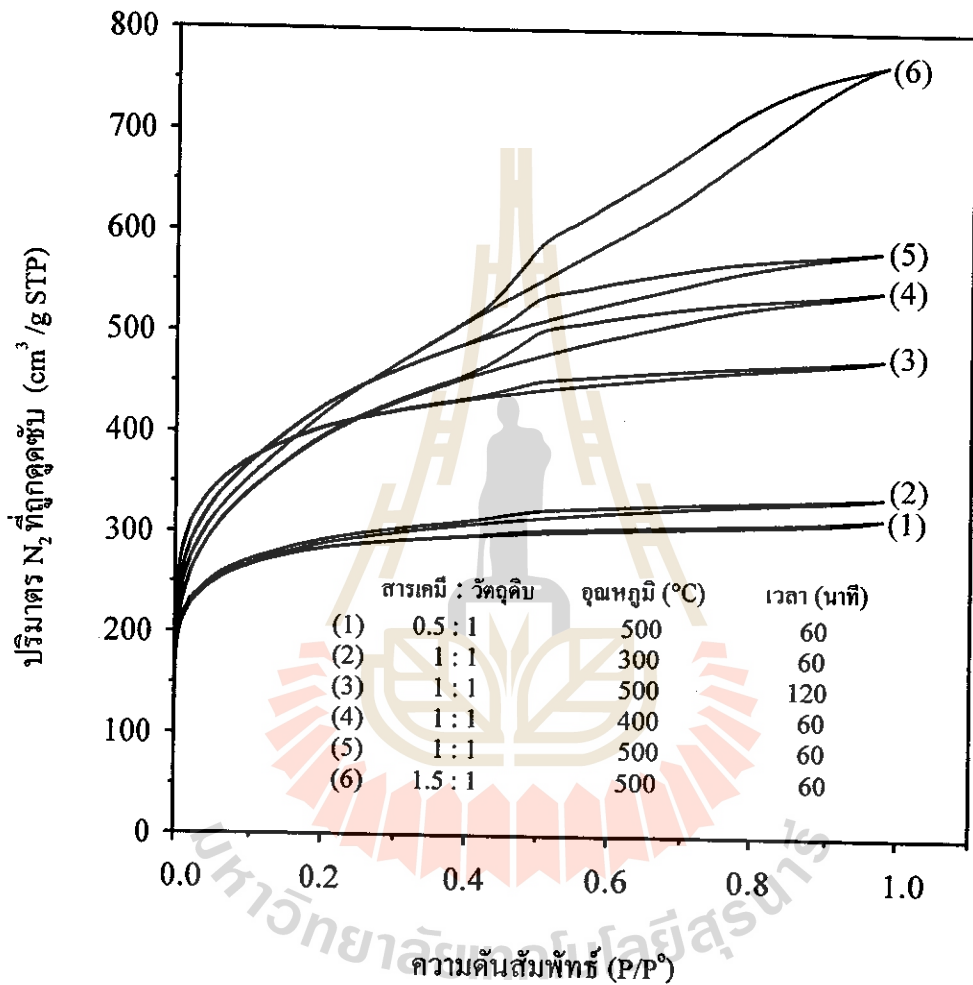
สำหรับผลของร้อยละผลผลิตซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นมีผลทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบมากขึ้นขณะมีการกระตุ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบส่งผลให้ร้อยละผลผลิตที่ได้แตกต่างกันไม่มาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองอาจเป็นปริมาณที่พอเพียงแล้วสำหรับร้อยละผลผลิตมากที่สุดประมาณร้อยละ 54 ได้จากสภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิ 300°C นาน 60 นาที และอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5 : 1.0

4.3.2 สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่างกราฟไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าที่อุณหภูมิการกระตุ้นต่ำ (300°C) หรือใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำ (0.5 : 1.0) เส้นกราฟไอโซเทอมแสดงลักษณะเป็นแบบที่ 1 (Type I) ตามระบบการจำแนกของ IUPAC⁽³⁶⁾ แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะดังกล่าวประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (< 2 nm) เป็นส่วนใหญ่ สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมโดยใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบสูงขึ้นไปเป็นลำดับ (1.0 : 1.0, 1.5 : 1.0) เส้นกราฟไอโซเทอมมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นแบบที่ 2 (Type II) กล่าวคือเส้นกราฟมีความชันมากขึ้นและยังเกิด hysteresis loop ระหว่างเส้นการดูดซับขาขึ้นและขาลง ในลักษณะที่มีความกว้างมากขึ้นด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านกัม

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซานอ้อยและถ่านกัมมันต์จากซานอ้อยและร้อยละ
ผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

สภาวะการกระตุ้น			ร้อยละ ผลผลิต	ผลวิเคราะห์แบบประมาณ (%โดยน้ำหนัก)		
H ₃ PO ₄ : ซานอ้อย (อัตราส่วนน้ำหนัก)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		เถ้า	สาร ระเหย	คาร์บอน คงตัว
0.5	60	300	50.2	6	37	57
		400	41.8	5	21	74
		500	41.5	5	19	76
		600	39.2	10	15	75
1.0	60	300	48.2	6	37	57
		400	44.3	5	25	70
		500	42.7	9	19	72
		600	41.5	8	19	73
1.5	60	300	53.9	5	33	62
		400	42.0	6	18	76
		500	41.1	7	16	77
		600	39.7	7	16	77
1.0	120	400	35.3	6	25	69
		500	32.3	5	20	75
		600	31.0	11	21	68
ซานอ้อย				2	88	10



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยโดยกระตุ้นด้วยกรรพอสฟอริก

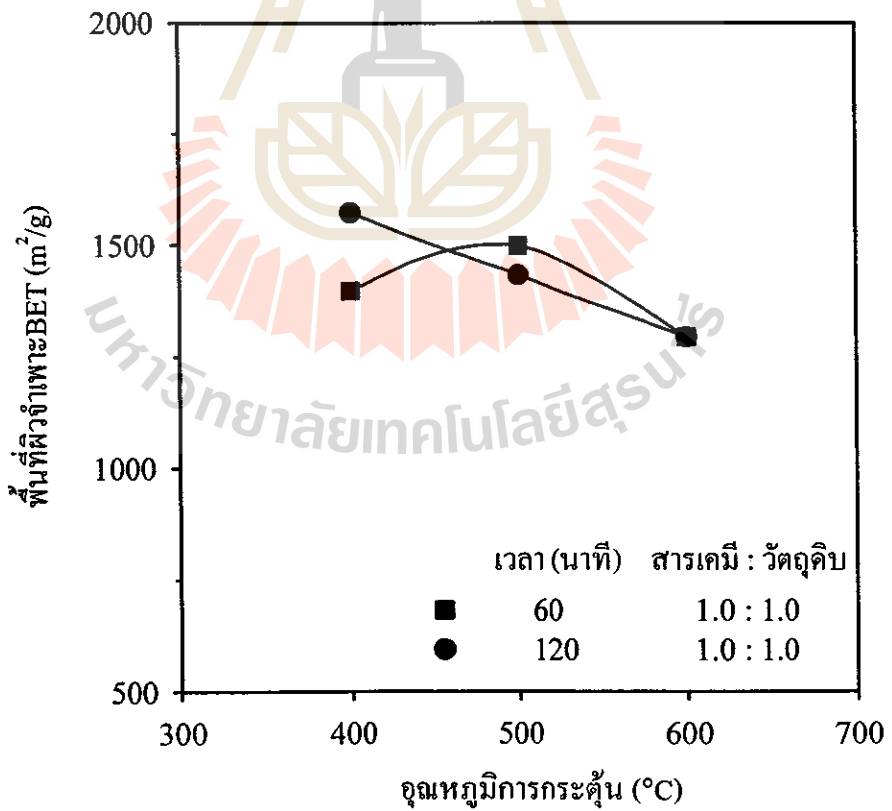
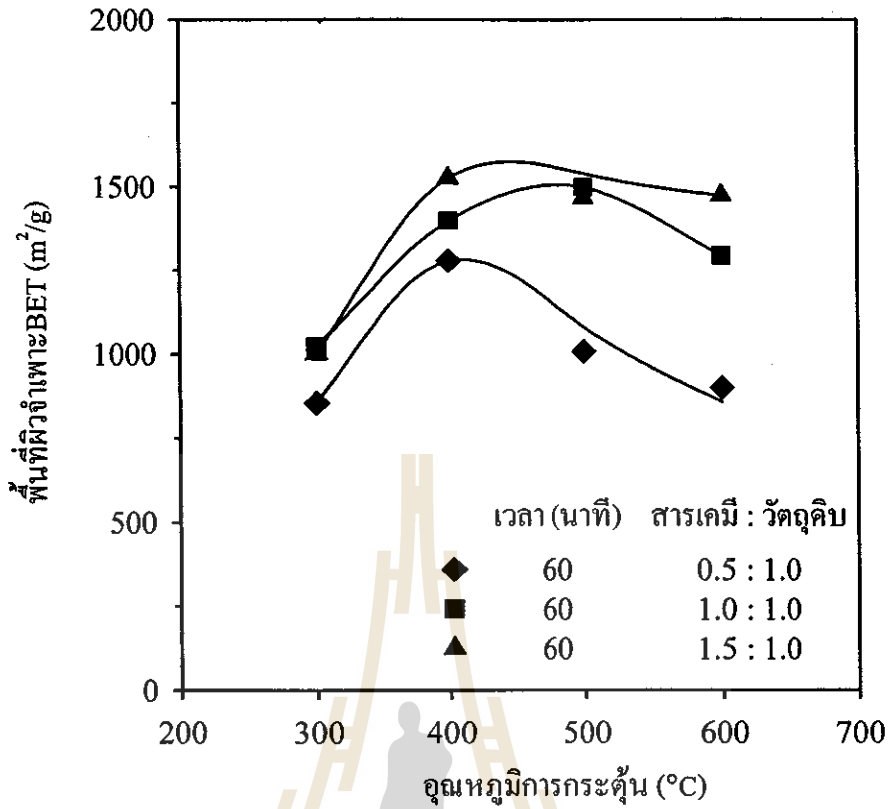
มันต์เตรียมที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือใช้สัดส่วนของสารกระตุ้นที่มากขึ้น จะทำให้เกิดปริมาณของรูพรุนขนาดกลาง (2–50 nm) ที่เพิ่มขึ้นด้วย

ผลของสภาวะกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.6 และในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ตามลำดับ สำหรับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำ (0.5 : 1.0) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 เป็น 400°C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีการเพิ่มปริมาตรของรูพรุนทุกขนาด แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มไปที่ 500°C ทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเริ่มมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 600°C จะมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับค่าที่ 300°C ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่สูงขึ้น (1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 ไปที่ 400 และ 500°C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิกระตุ้น 600°C ถ่านกัมมันต์เตรียมที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง ในขณะที่การใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.5 : 1.0 ยังคงให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 500°C สำหรับผลของระยะเวลาในการกระตุ้น พบว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400°C และอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 การใช้เวลาการกระตุ้นนานขึ้นจาก 60 เป็น 120 นาที ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 1,399 เป็น 1,574 m²/g (เพิ่ม 12.5 %) และจาก 0.84 เป็น 0.95 cm³/g (เพิ่ม 13.1 %) ตามลำดับ แต่ถ้ากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C การใช้เวลาการกระตุ้นนานขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมต่างกัมน้อยมาก (ลดลง ~2 % ที่อุณหภูมิ 500°C และค่อนข้างคงที่ที่ 600°C)

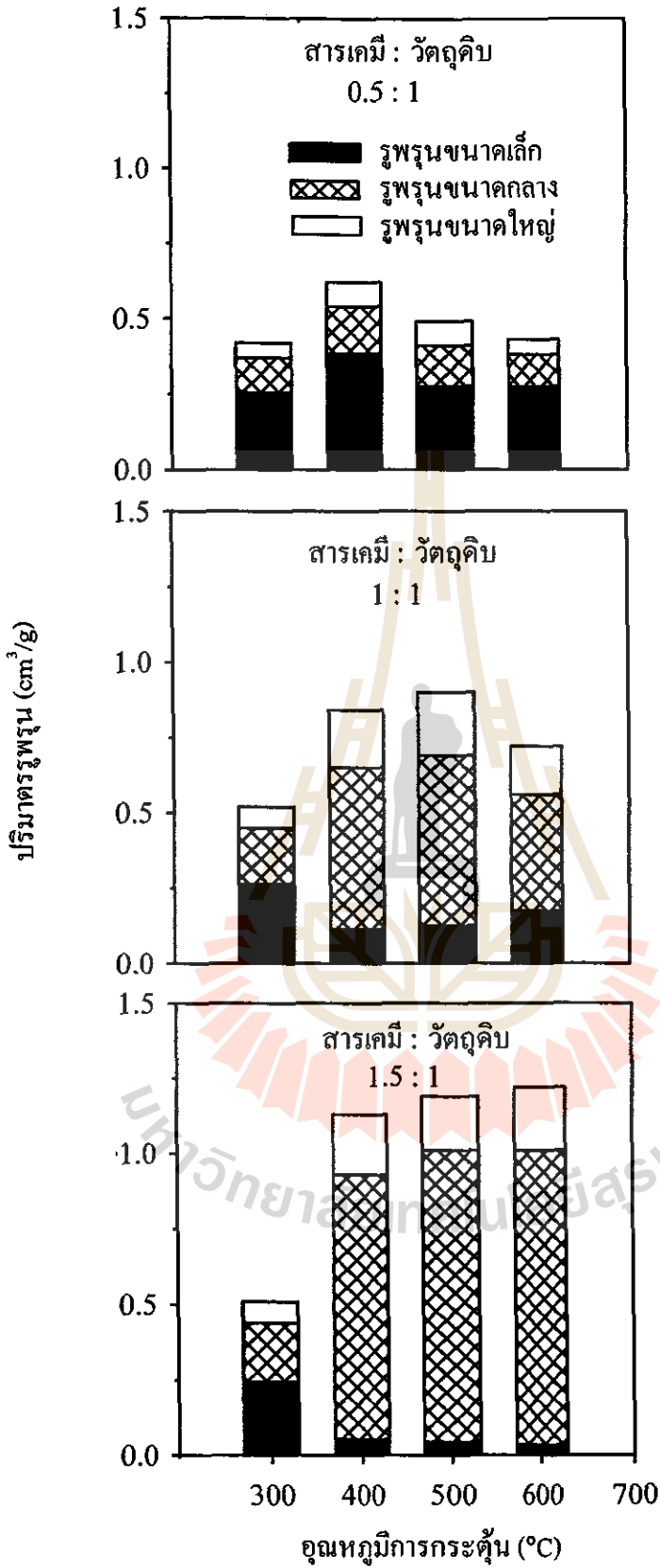
จากผลวิจัยที่ได้พบว่าการใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่มากจะช่วยให้กรดฟอสฟอริกสามารถทำปฏิกิริยากับชานอ้อยได้มากทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในวัตถุดิบหลุดออกไปในรูปของเหลวและแก๊สได้มาก มีผลทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและยังทำให้โครงสร้างรูพรุนขนาดกลางมีปริมาณมากขึ้น ส่วนผลของอุณหภูมินั้นสรุปได้ว่าเป็นที่อุณหภูมิการกระตุ้นสูงกว่า 400°C จะไม่มีผลมากนักต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่สูง (1.5 : 1.0) แต่มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารกระตุ้นที่ต่ำ (0.5 : 1.0) ผลที่ได้นี้อาจอธิบายได้ว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงสำหรับชานอ้อยที่ใช้กรดฟอสฟอริกในปริมาณมากจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) ในชานอ้อยได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบบริจิดเมทริกซ์ (Rigid matrix) ตามรายงานของ Jagtoyen and Derbyshire⁽³⁷⁾ ซึ่งจะช่วยลดการหดตัวของโครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์ ขณะเดียวกันยังทำให้โครงสร้างรูพรุนถ่างออกโดยฟอสเฟตเอสเทอร์สามารถกำจัดออกได้โดยการล้าง ทำให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น เกิดเป็นรูพรุนขนาดกลางที่มากขึ้นด้วย ส่วนในชานอ้อยที่มีกรดฟอสฟอริกอยู่น้อยเมื่ออุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.6 สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

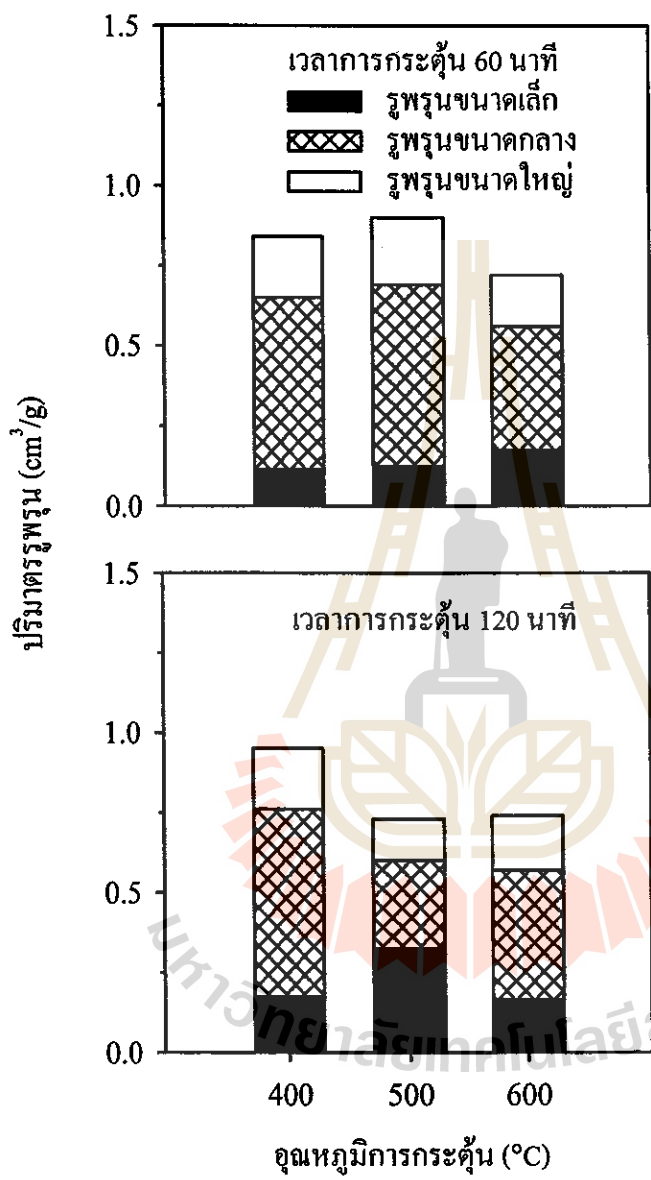
สภาวะการกระตุ้น			พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)				ขนาดรู พรุนเฉลี่ย (nm)
H ₃ PO ₄ : ชานอ้อย (อัตราส่วนโดย น้ำหนัก)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		ขนาดเล็ก (< 2 nm)	ขนาด กลาง (2-50 nm)	ขนาด ใหญ่ (>50 nm)	รวม	
0.5	60	300	855	0.26	0.11	0.05	0.42	1.97
		400	1279	0.39	0.15	0.08	0.62	1.92
		500	1008	0.28	0.13	0.08	0.49	1.95
		600	901	0.28	0.10	0.05	0.43	1.91
1.0	60	300	1024	0.27	0.18	0.07	0.52	2.05
		400	1399	0.12	0.53	0.19	0.84	2.42
		500	1500	0.13	0.56	0.21	0.90	2.40
		600	1294	0.18	0.38	0.16	0.72	2.23
1.5	60	300	1002	0.25	0.19	0.07	0.51	2.05
		400	1527	0.06	0.87	0.20	1.13	2.98
		500	1467	0.05	0.96	0.18	1.19	3.24
		600	1474	0.04	0.97	0.21	1.22	3.30
1.0	120	400	1574	0.18	0.58	0.19	0.95	2.42
		500	1434	0.33	0.27	0.13	0.73	2.06
		600	1294	0.17	0.40	0.17	0.74	2.30



รูปที่ 4.16 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย



รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิกระตุ้นและอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ ต่อการกระจาย ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ (เวลาการกระตุ้น 60 นาที)



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิการกระตุ่นและเวลา ต่อการกระจายปริมาณรู่พรุน ของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย (อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 1:1)

โครงสร้างถ่านกัมมันต์จะเกิดการหดตัวมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงได้

รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวรูพรุนของวัสดุคิบซานอ้อยและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนสูงและเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้กระตุ้นในช่วง 0.5 : 1.0 ถึง 1.5 : 1.0 พบว่าจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น

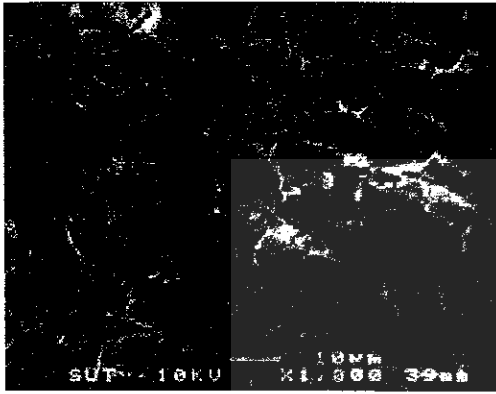
4.3.3 การดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์

- ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

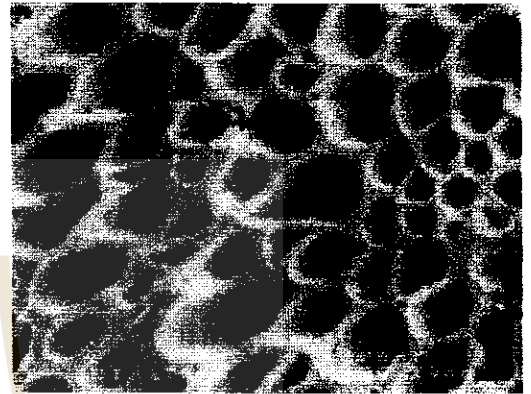
ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่นำไปศึกษาการดูดซับโครเมียมจากสารละลายเป็นตัวอย่าง ถ่านกัมมันต์เตรียมที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 500°C และเวลา 60 นาที ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,500 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.90 cm³/g รูปที่ 4.20 แสดงผลของเวลาต่อการลดลงของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 และ 500 mg/L สำหรับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (พื้นที่ผิว 1,180 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.60 cm³/g) และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (พื้นที่ผิว 1,500 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.90 (cm³/g) พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 20 ชั่วโมงแรกของการดูดซับและใช้เวลาประมาณ 50 ชั่วโมง จึงเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลที่ได้พอสรุปได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทั้งสองค่าไม่มีผลต่อเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ เป็นที่สังเกตว่าความเข้มข้นเริ่มต้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจากสารละลาย โดยเมื่อใช้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์คงที่พบว่าที่สภาวะสมดุล ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยสามารถกำจัดโครเมียมจากสารละลายด้วยประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 75 และร้อยละ 40 สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเท่ากับ 100 และ 500 mg/L ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมดีกว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10

- ผลของความเป็นกรดต่าง

ผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ แสดงในรูปที่ 4.21 ผลการศึกษาพบว่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดโครเมียม ทั้งจากการใช้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดสามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่า 50% เมื่อความเป็นกรดต่างของสารละลายมีค่าต่ำกว่า 3.0 โดยมีร้อยละการกำจัดโครเมียมสูงสุด (82 % และ 90 % สำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยและถ่านกัมมันต์เกรดการค้าตามลำดับ) ที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเท่ากับ 2.5 อธิบายได้ว่าที่สภาวะสารละลายมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำนั้น Cr(VI) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ HCrO₄⁽³⁸⁾ ซึ่งสามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้โดยตรง และยังมีบางส่วน



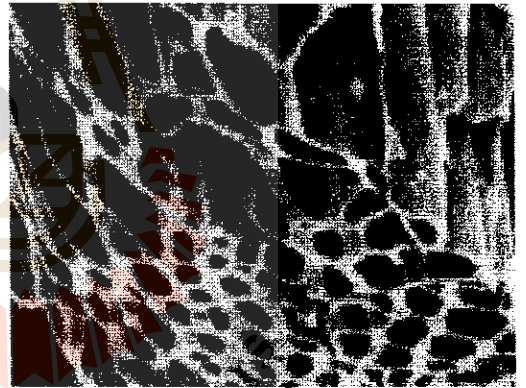
(ก)



(ข)

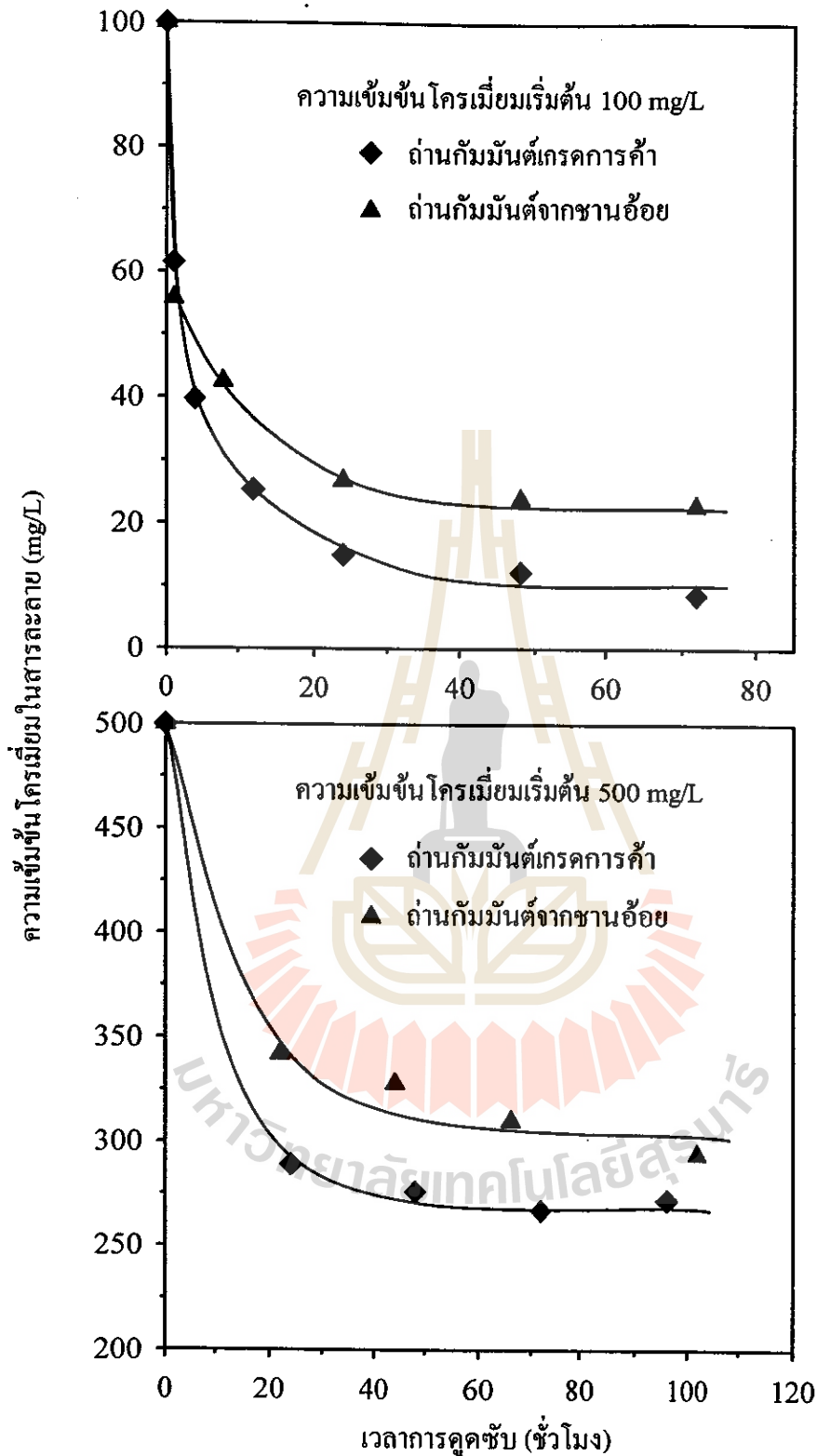


(ค)

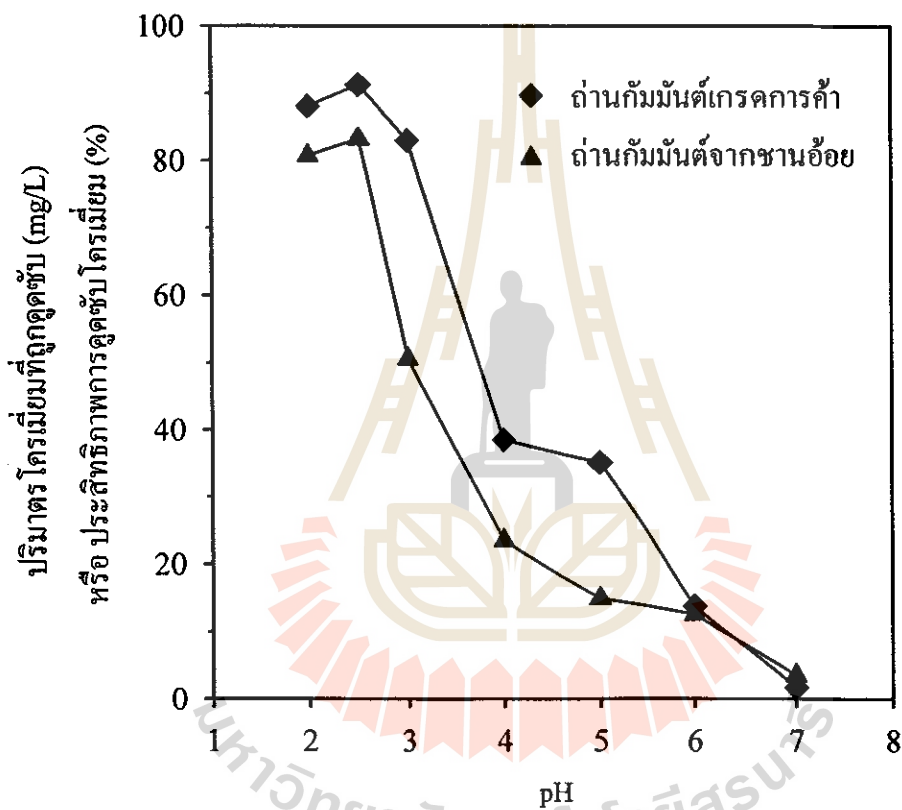


(ง)

รูปที่ 4.19 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะพื้นผิวของวัตุดิบ
 ขานอ้อย (ก) และของถ่านกัมมันต์เตรียมที่ อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตุดิบ/อุณหภูมิ/เวลา ดังนี้ (ข)
 0.5:1.0/500 °C/60 นาที, (ค) 1.0:1.0/500 °C/60 นาที และ (ง) 1.5:1.0/500 °C/60 นาที

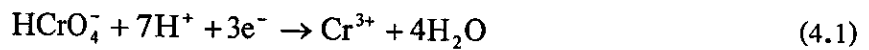


รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเป็นตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมสองค่า (อุณหภูมิ 30°C, pH = 2.5)



รูปที่ 4.21 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่อการดูดซับ โครเมียมจากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (อุณหภูมิ 30°C, ความเข้มข้นเริ่มต้น โครเมียม 100 mg/L)

เกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr(VI) ไปเป็น Cr(III) ดังสมการ



โดย Cr^{3+} ที่เกิดขึ้นสามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้เช่นกัน ปฏิกิริยารีดักชันดังกล่าวเกิดขึ้นได้เนื่องจาก Cr (VI) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง และสารละลายต้องมีความเป็นกรดต่างด่ำมีโปรตรอน (H^+) ในปริมาณมากแต่ในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้น โปรตรอนจะมีปริมาณน้อยลงจนเกือบไม่มีปฏิกิริยารีดักชัน นอกจากนี้ Cr (VI) ยังอยู่ในรูป CrO_4^{2-} และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ได้ด้วย ดังนั้นเมื่อไอออนลบเหล่านี้ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บางส่วนแล้วจะเกิดการกีดกันซึ่งกันและกันเนื่องจากแรงผลักรวมของไอออนชนิดเดียวกัน นอกจากนั้นสารละลายยังมีปริมาณ OH^- อยู่มาก ซึ่งอาจเข้าแย่งพื้นที่ในการดูดซับได้ด้วย ปัจจัยทั้งหมดนี้อาจประกอบกันเข้าส่งผลให้การดูดซับโครเมียมเกิดขึ้นได้น้อยในสภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้น

- ไอโซเทอมของการดูดซับ

รูปที่ 4.22 แสดงไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์จากขานฮ้อย พบว่าปริมาณการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งลักษณะของไอโซเทอมที่ได้นี้ น่าจะอธิบายได้ด้วย สมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ซึ่งมีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{1 + bC_e} \quad (4.2)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$C_e/q_e = (1/bq_m) + (C_e/q_m) \quad (4.3)$$

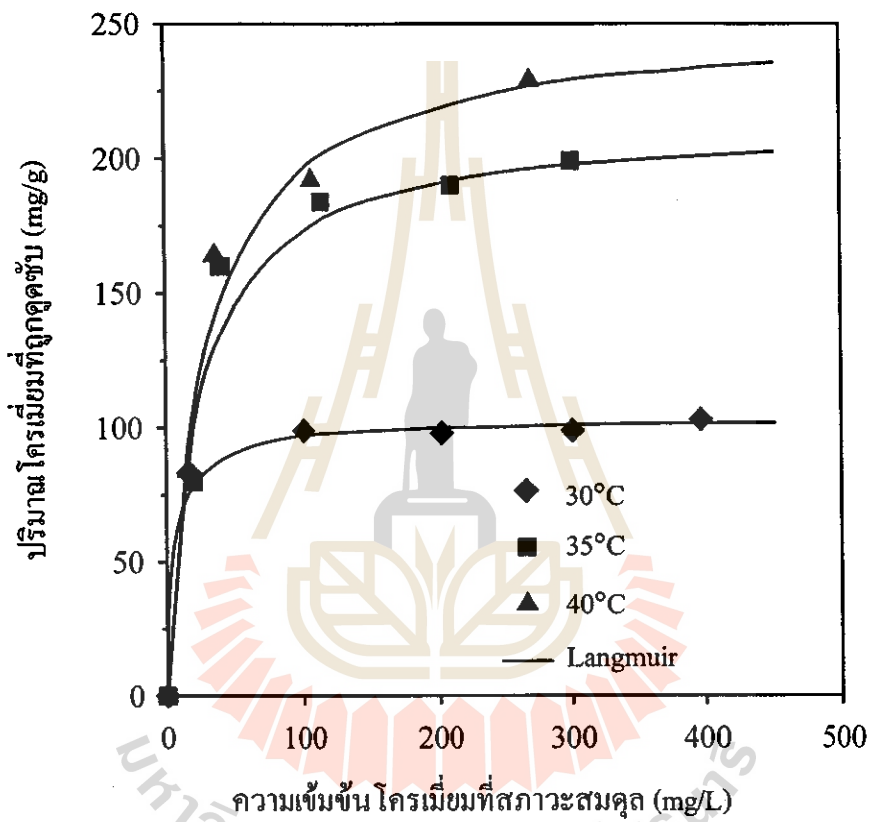
เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g carbon)

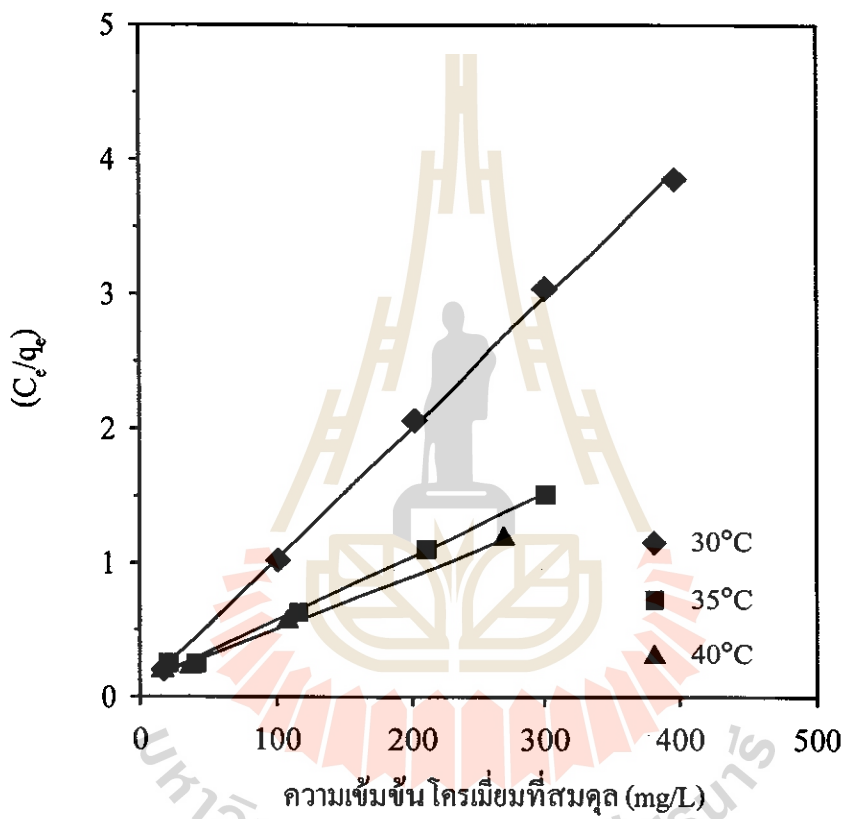
q_m = ปริมาณการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g carbon)

b = ค่าคงที่ของการดูดซับ (mg/L)⁻¹

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ได้กราฟเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงว่าสมการแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมได้ ค่า q_m และ b ที่คำนวณจากความชันและจุดตัดแกนของกราฟแสดงในตารางที่ 4.7 พร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient, r^2) จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมในรูปของ q_m มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการดูดซับในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 40°C ดังนั้นสรุปได้ว่าการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อนและเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมีมากกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Singh and Tiwari⁽³⁹⁾



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมจากสารละลาย ด้วยถ่านกัมมันต์เตรียมจากชานอ้อย (pH = 2.5, ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 100 mg/L)



รูปที่ 4.23 การทดสอบไอโซเทอมแลงเมียร์สำหรับการดูดซับโครเมียมจากสารละลาย โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 2.5)

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ในสมการแลงเมียร์ สำหรับอธิบายการดูดซับโครเมียมจากสารละลายโดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการดูดซับ (ค่าความเป็นกรด – ค่า 2.5)

อุณหภูมิการดูดซับ (°C)	q_m (mg/g)	b (mg/L) ⁻¹	r^2 (-)
30	103	0.1638	0.999
35	213	0.0434	0.995
40	250	0.0362	0.996

- จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

นอกจากศึกษาสมการการดูดซับโครเมียมจากสารละลายแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโครเมียม (ข้อมูลการดูดซับโครเมียมก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล) โดยใช้รูปแบบของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับ n ⁽⁴⁰⁾ ดังสมการ

$$\frac{dq}{dt} = k_n (q_e - q)^n \quad (4.4)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับที่เวลา t ใด ๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

k_n = ค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับ

n = อันดับของสมการอัตราเร็ว

ถ้าให้จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามสมการอัตราเร็วแบบอันดับหนึ่งจะได้

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (q_e - q) \quad (4.5)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ 4.5 แล้วจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\log (q_e - q) = \log q_e - (k_1 t / 2.303) \quad (4.6)$$

โดยที่ k_1 คือค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับและหาค่าได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (q_e - q)$ กับเวลา (t)

ถ้าอัตราเร็วการดูดซับเป็นไปตามสมการอัตราเร็วแบบอันดับสอง สมการ 4.4 เขียนได้เป็น

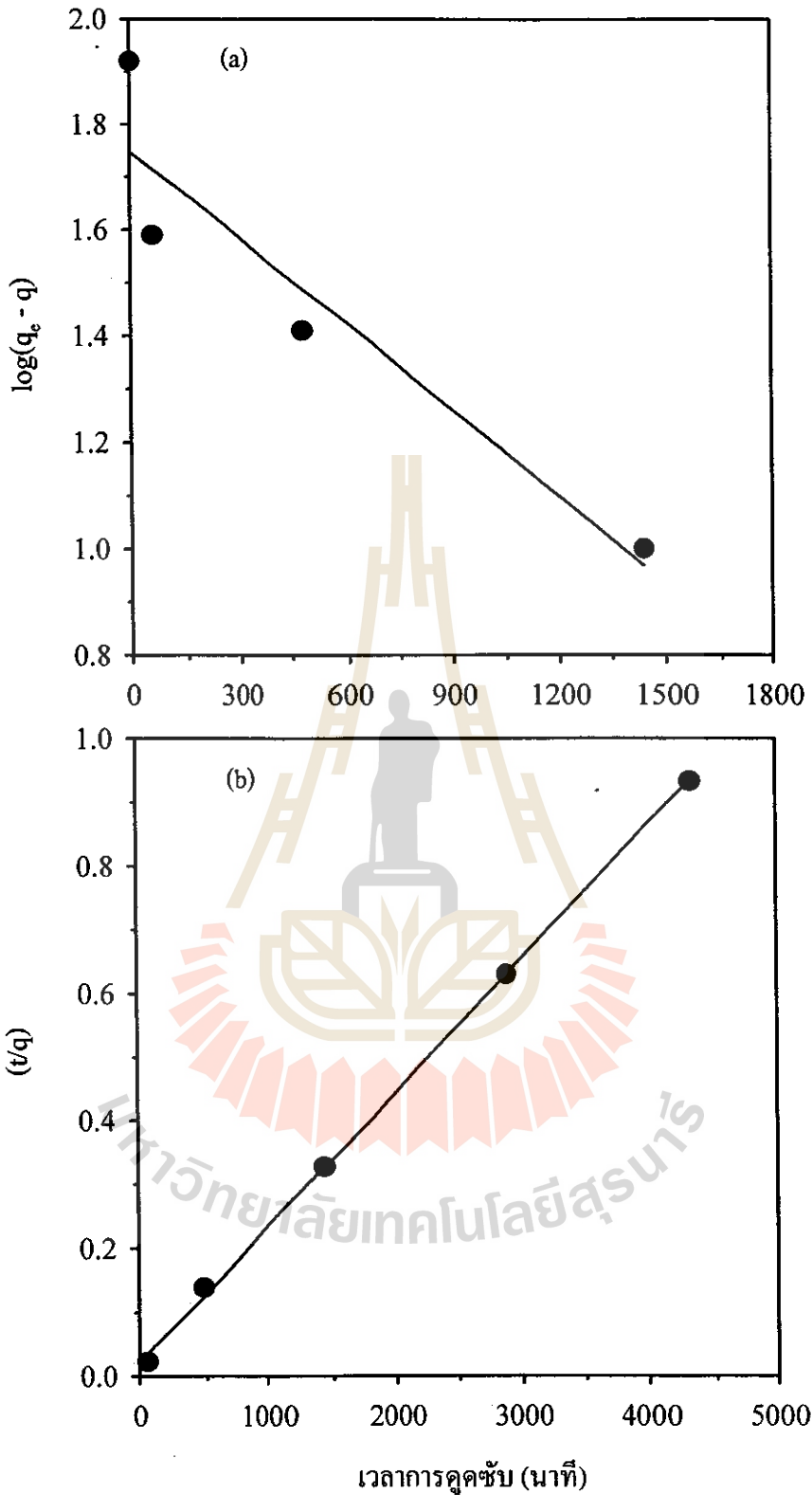
$$\frac{dq}{dt} = k_2 (q_e - q)^2 \quad (4.7)$$

หลังจากอินทิเกรตและจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้

$$(t/q) = (1/k_2 q_e^2) + (t/q_e) \quad (4.8)$$

โดยที่ k_2 คำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q กับเวลา (t)

จากการทดสอบรูปแบบของสมการอัตราเร็วทั้งสองแบบกับการดูดซับโครเมียมที่อุณหภูมิ 30°C ค่าความเป็นกรดค้างของสารละลาย 2.5 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 100 mg/L โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย พบว่าสมการอัตราเร็วแบบอันดับสองสามารถอธิบายข้อมูลจลนพลศาสตร์ของการดูดซับได้ดีที่สุด (รูปที่ 4.24) และค่า k_2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 11×10^{-5} g/mg-min สำหรับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าได้ค่า k_2 เท่ากับ 7.8×10^{-5} g/mg-min ค่า k_2 ที่หาได้นี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าที่รายงานโดย Kobya ⁽⁴¹⁾ ($k_2 = 7 \times 10^{-5}$ g/mg-min ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกของ Hazelnut โดยวิธีกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ความแตกต่างของค่า k_2 เป็นผลมาจากความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างรูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวิธีและสภาวะการเตรียม



รูปที่ 4.24 การทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ การดูดซับ โครเมียมจากสารละลายโดย ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (a) แบบจำลองอันดับหนึ่ง และ (b) แบบจำลองอันดับสอง (อุณหภูมิการดูดซับ 30°C, pH = 2.5, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 mg/L)

4.4 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

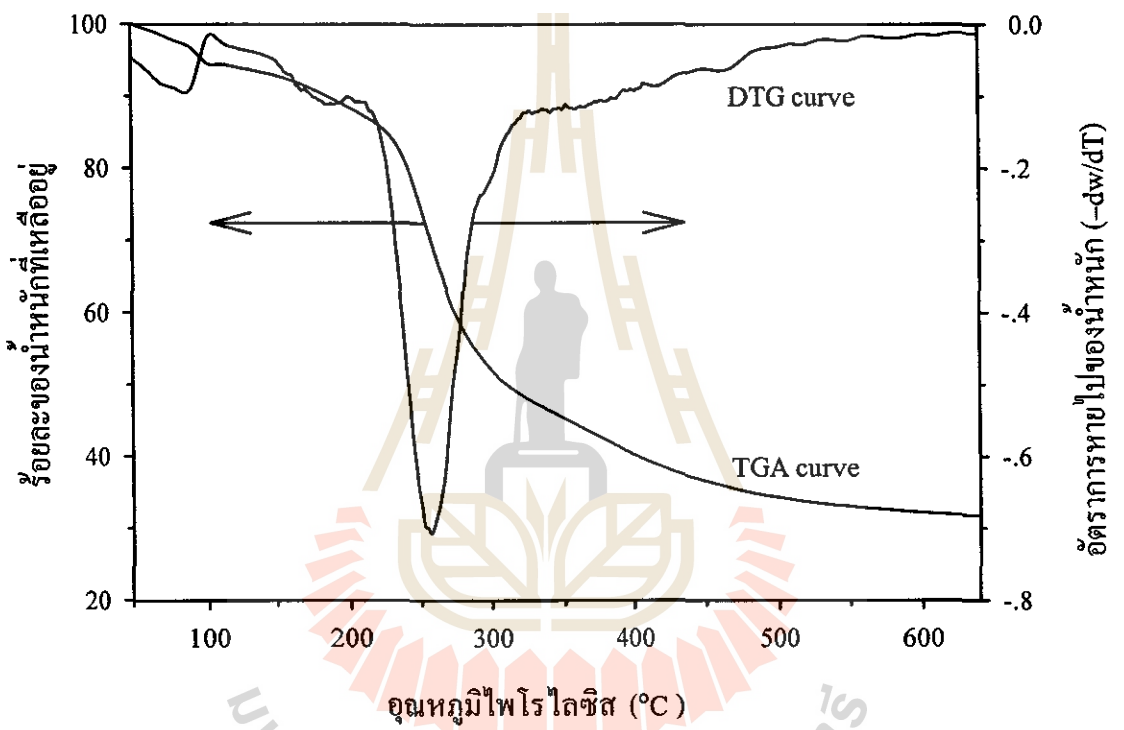
งานวิจัยในส่วนนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางความร้อนและสมบัติแบบประมาณของวัตถุดิบ ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ และในส่วนขั้นตอนการกระตุ้นนั้น ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ในช่วง 800–900°C และเวลาการกระตุ้น 30–180 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางพื้นผิว ได้แก่ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย โดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196°C

4.4.1 ผลวิเคราะห์ทางความร้อนของเมล็ดลำไย

ผลคาร์้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่ (TGA) และอัตราการหายไปของน้ำหนัก (DTG) ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (non-isothermal heating) ของเมล็ดลำไยขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.1 mm ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C/min โดยใช้ TGA (Thermogravimetric analysis) แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 พบว่ามวลของเมล็ดลำไยมีการลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการลดลงนั้นแตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิ โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการลดลงของน้ำหนัก ได้เป็นสามช่วงหลักๆ ดังนี้ ช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 210°C ในช่วงนี้ เกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำ การแตกตัวของพันธะอ่อนๆบางชนิด ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ปล่อยออกมาเป็นจำพวกไอน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิต่อมาเท่ากับ 210–290°C น้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้น้ำหนักลดลงมากที่สุด ประมาณร้อยละ 40 โดยเกิดการสลายตัวของส่วนประกอบ จำพวก เฮมิเซลลูโลส และ เซลลูโลส⁽⁴²⁾ จากนั้นในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300–650°C น้ำหนักลดลงอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

4.4.2 ผลวิเคราะห์แบบประมาณของเมล็ดลำไย ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย

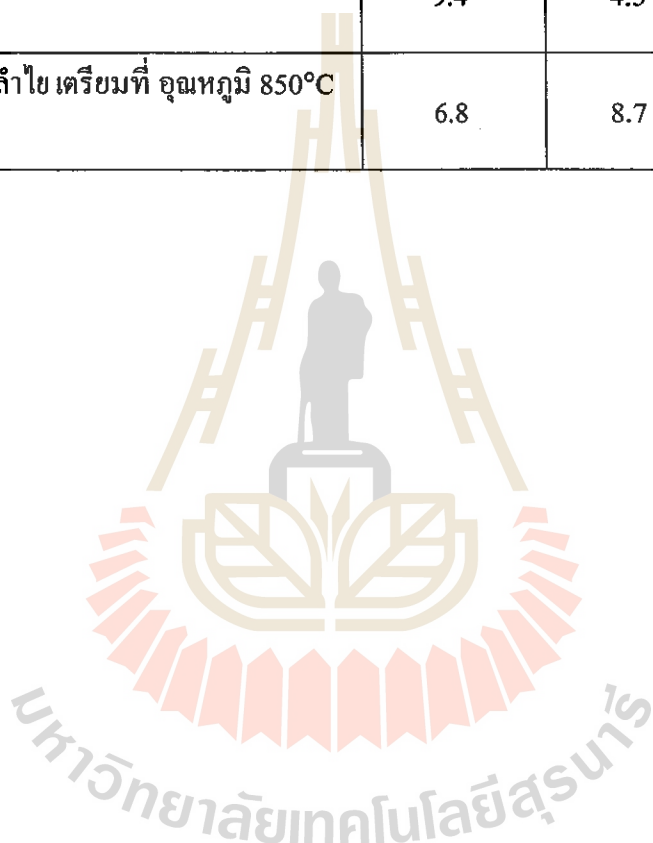
ผลวิเคราะห์แบบประมาณของเมล็ดลำไยและถ่านชาร์ที่เตรียมได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 พบว่าเมล็ดลำไย มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น เม็ดองุ่น (19.0%) และกะลาผลปาล์ม(19.8%)^(42, 43) ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงในวัสดุชีวมวลโดยทั่วไป การที่มีคาร์บอนคงตัวสูงถือว่าเป็นสมบัติเบื้องต้นที่ดีของวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเมื่อนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันเพื่อให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย ถ่านชาร์ที่ได้จะมีเนื้อถ่านที่เป็นคาร์บอนสูง เหมาะต่อการนำไปกระตุ้นต่อเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนมากและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง ซึ่งถ่านชาร์จากเมล็ดลำไยก็มีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 86.4 จึงเหมาะต่อการนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ต่อไป เมื่อนำถ่านชาร์ดังกล่าวนี้ไปกระตุ้นต่อด้วยแก๊ส



รูปที่ 4.25 ร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่และอัตราการหายไปของน้ำหนัก ในระหว่างการไพโรไลซิสเม็ดถ่าน

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเมล็ดลำไยและถ่านชาร์

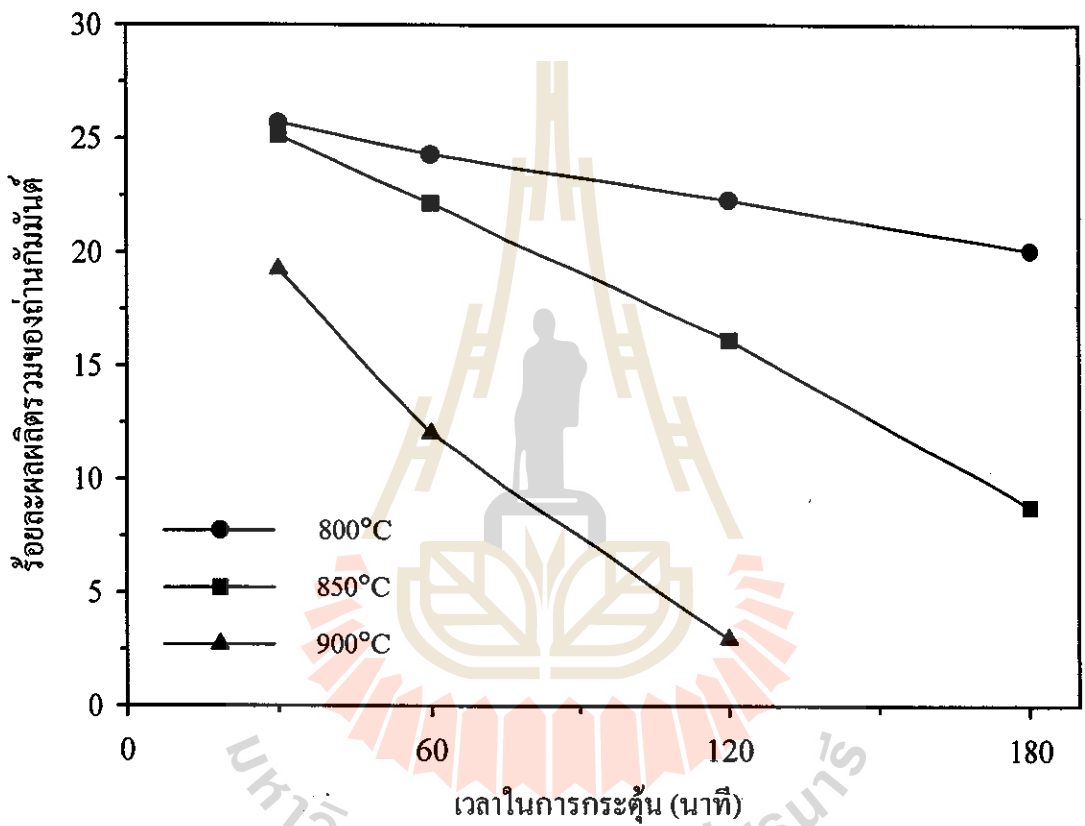
สาร	รายการวิเคราะห์แบบประมาณ (อ้างอิงโดยไร่ความชื้น), %โดยน้ำหนัก		
	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคง ตัว
เมล็ดลำไย	78.7	1.7	19.6
ถ่านชาร์จากเมล็ดลำไย เตรียมที่ อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	9.4	4.5	86.4
ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย เตรียมที่ อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	6.8	8.7	84.5



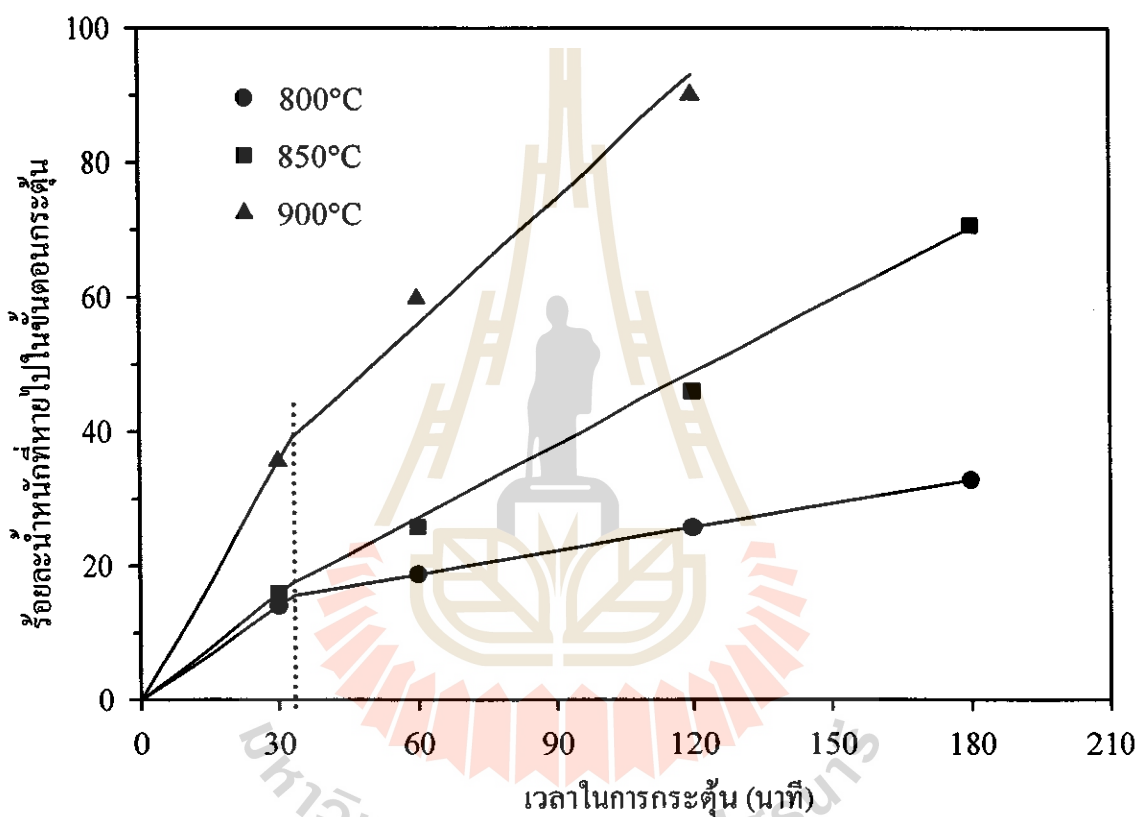
คาร์บอน ไดออกไซด์เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าร้อยละน้ำหนักของคาร์บอนคงตัวลดลงเท่ากับ 84.5 ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวบางส่วนได้ทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อก่อให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของอนุภาคถ่านกัมมันต์

4.4.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อผลผลิตถ่านกัมมันต์

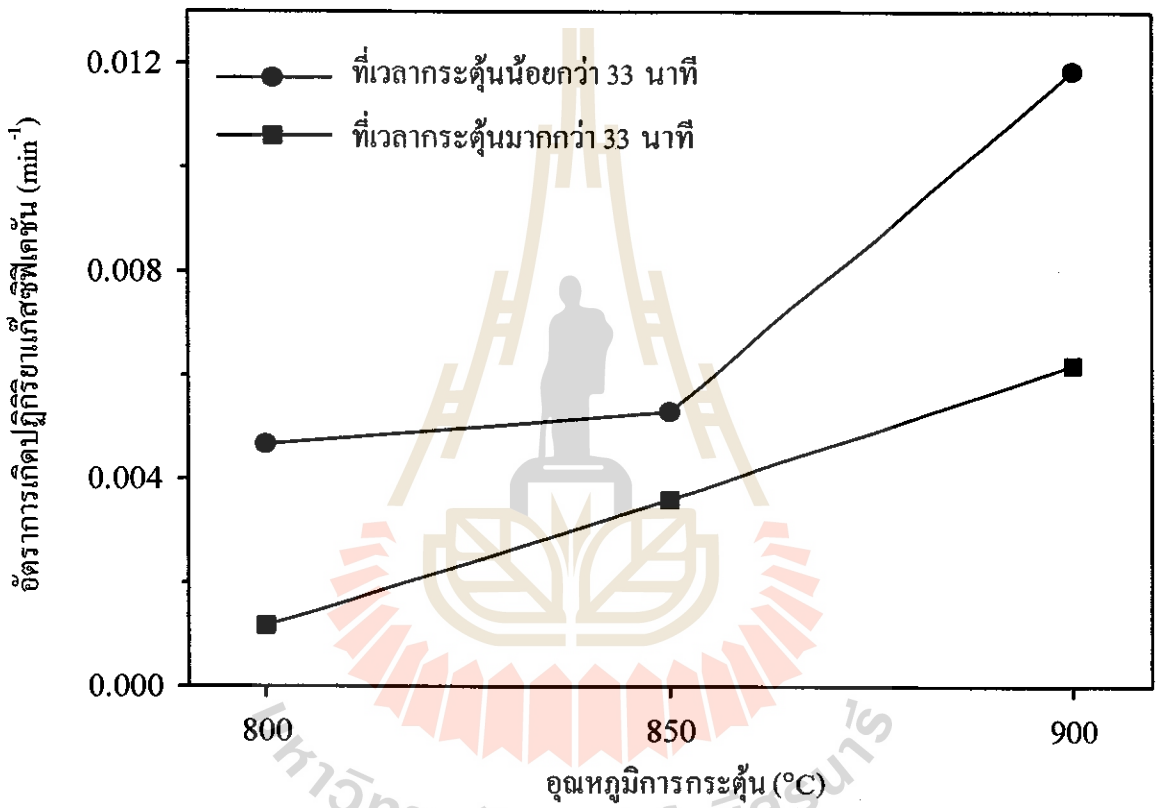
ผลของสภาวะอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่ออุณหภูมิคงที่การเพิ่มเวลาในการกระตุ้น ทำให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ลดลง และเมื่อเวลาในการกระตุ้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ลดลงเช่นเดียวกัน ในแต่ละอุณหภูมิผลของเวลาต่อร้อยละผลผลิตรวมจะไม่คงที่ เช่นที่อุณหภูมิ 800 และ 850°C ที่เวลา 30 นาที ร้อยละผลผลิตมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ร้อยละผลผลิตมีแนวโน้มลดลงและต่างกันมากขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 900°C นั้นร้อยละผลผลิตที่เวลา 30 นาที ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 850°C ประมาณร้อยละ 6 เมื่อเวลากระตุ้นมากขึ้นก็เช่นเดียวกันร้อยละผลผลิตรวมมีแนวโน้มต่างกันมากขึ้น ในขั้นตอนการกระตุ้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือแก๊สซิฟิเคชันระหว่างเนื้อคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดการพัฒนารูพรุนในถ่าน ดังนั้นการหาว่าในแต่ละสภาวะการกระตุ้นปฏิกิริยานี้เกิดได้มากน้อยเพียงใด สามารถพิจารณาได้จากผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปดังแสดงในรูปที่ 4.27 โดยร้อยละน้ำหนักที่หายไปมีค่าในทางตรงข้ามกับค่าร้อยละผลผลิตในขั้นตอนการกระตุ้น ซึ่งพบว่าผลจากการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น จากรูปนี้สังเกตได้ว่าในแต่ละอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการกระตุ้นกับร้อยละน้ำหนักที่หายไปเป็นแบบเส้นตรงและเกิดจากเส้นตรงสองเส้นที่มาบรรจบกันที่เวลาการกระตุ้น 33 นาที ซึ่งความชันของเส้นตรงเหล่านี้คือค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และที่เวลากระตุ้นน้อยกว่า 33 นาทีมีอัตราการเกิดปฏิกิริยามากกว่าที่เวลาการกระตุ้นนานกว่านี้ ทั้งนี้อาจเป็นผลในช่วงเริ่มต้นนั้นปฏิกิริยาเกิดขึ้นเฉพาะตรงผิวของอนุภาคถ่าน โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้โดยง่าย แต่เมื่อเวลามากขึ้น โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่เข้าไปในอนุภาคตามโครงสร้างรูพรุน จึงมีผลของความต้านทานการแพร่ของมวลเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง จากข้อมูลอัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันนี้สามารถหาค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของสภาวะกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จากรูปพบได้อย่างชัดเจนว่าค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปค่าหนึ่งๆ ถ้ากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยกว่า และถ้าค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นความแตกต่างของเวลาการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำและสูงจะแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้นกับอุณหภูมิดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปนี้จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงถึงผลของสภาวะการกระตุ้น เพราะเป็นการรวมทั้งผลของอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นไว้ด้วยกัน



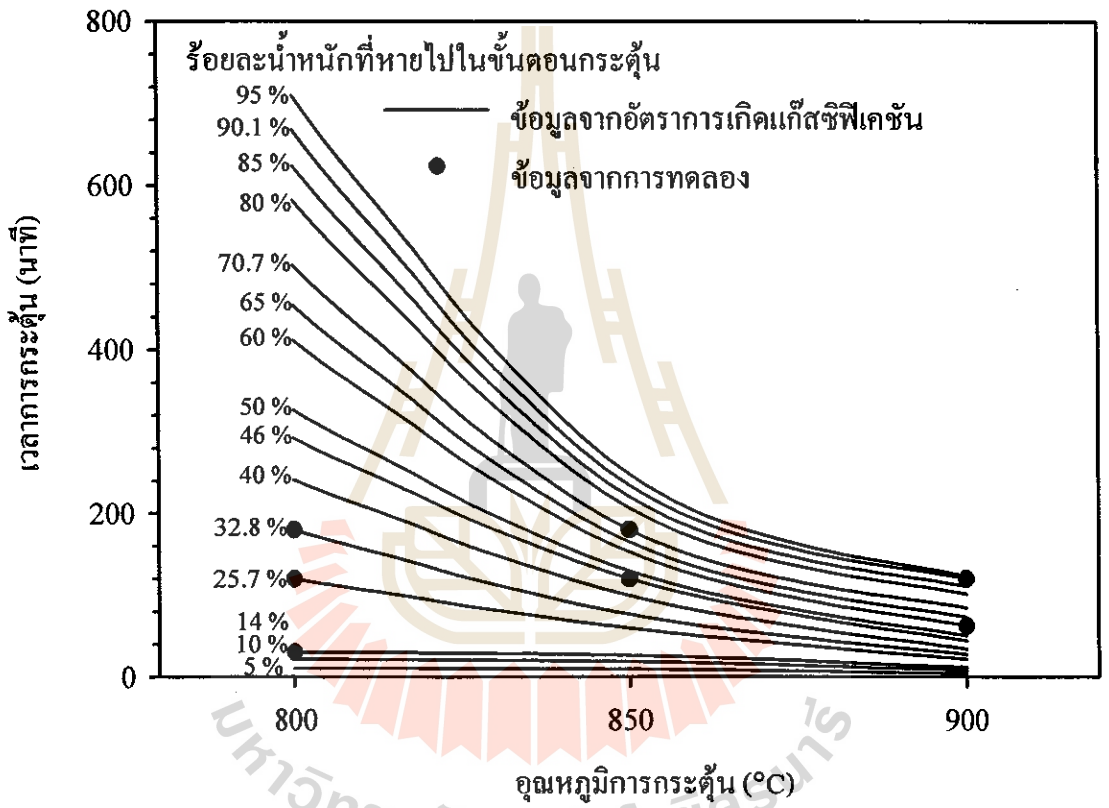
รูปที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละน้ำที่หายไปในช่วงขั้นตอนการกระตุ้น



รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนกระตุ้น



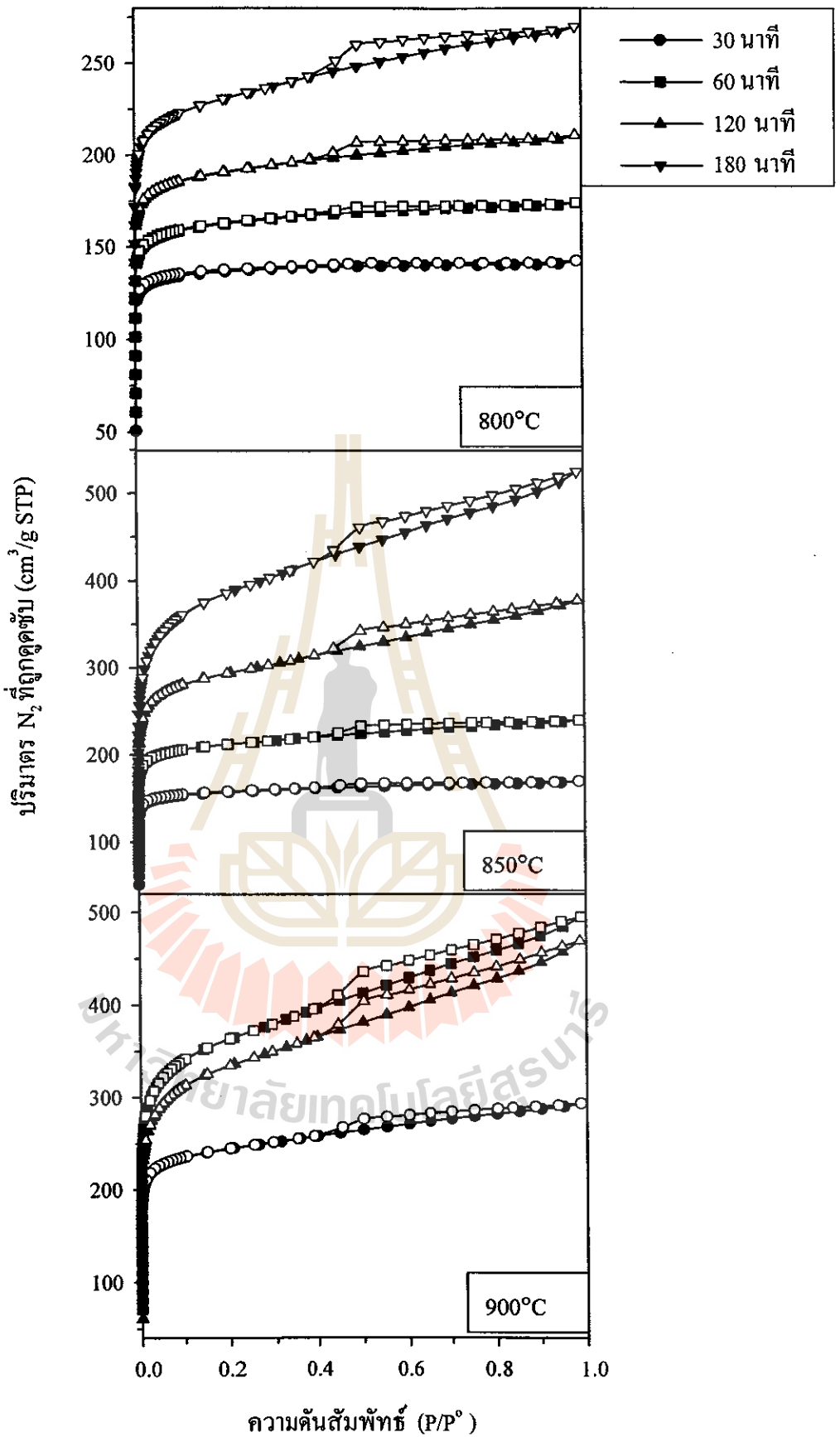
รูปที่ 4.29 ค่าร้อยละน้ำหนัที่หายไปในช่วงการกระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นค่า

4.4.4 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าที่อุณหภูมิ 800 และ 850°C เมื่อเวลาการกระตุ้นเพิ่มขึ้นในช่วง 30 นาที ถึง 180 นาที ปริมาตรแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น นอกจากนี้จะพบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นสองสภาวะนี้ที่เวลา 30 นาที ไอโซเทอมเป็นแบบ Type I ตามการจำแนกของ IUPAC จากผลนี้ทำให้ทราบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะเหล่านี้มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ (Micropores, $< 2\text{ nm}$) เมื่อเวลาการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นลักษณะไอโซเทอมเปลี่ยนไปเป็นแบบ Type IV และขนาดของ hysteresis loop กว้างขึ้นตามเวลาการกระตุ้นแสดงว่าสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (Mesopores, ระหว่าง 2 และ 50 nm; Macropores, $> 50\text{ nm}$) มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาในการกระตุ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่ 900°C ลักษณะไอโซเทอมเริ่มแสดงเป็นแบบ Type IV ตั้งแต่ที่เวลากระตุ้นเท่ากับ 30 นาทีและขนาดของ hysteresis loop กว้างขึ้นตามเวลาการกระตุ้น แต่ปริมาตรการดูดซับแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามเวลาการกระตุ้นในช่วง 30–60 นาที แต่จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นที่ 120 นาที เมื่อพิจารณาตามผลของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ พบว่าปริมาตรการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ยกเว้นที่ เวลา 120 นาที จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 900°C

สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่คำนวณจากไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนดังกล่าวข้างต้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้อยู่ในช่วง $451\text{--}1,278\text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $0.22\text{--}0.81\text{ cm}^3/\text{g}$ และสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (71–95%) สำหรับที่อุณหภูมิ 800 และ 850°C พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทุกขนาด ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาการกระตุ้น ส่วนที่ 900°C นั้นสมบัติรูพรุนเหล่านี้เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที แต่ลดลง เมื่อเวลาเพิ่มเป็น 120 นาที ยกเว้นแต่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ยังคงเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิสูงและเวลานานมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ได้มาก ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า อุณหภูมิ 900°C เป็นอุณหภูมิที่สูงในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการเลือกใช้อุณหภูมินี้ต้องมีการพิจารณาเวลาในการกระตุ้นอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติตามต้องการ สภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุดคือที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 180 นาที ที่สภาวะนี้จะให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์เป็นร้อยละ 29.3 ในขั้นตอนกระตุ้นและร้อยละผลผลิตรวมเท่ากับ 8.7 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $1,278\text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $0.81\text{ cm}^3/\text{g}$

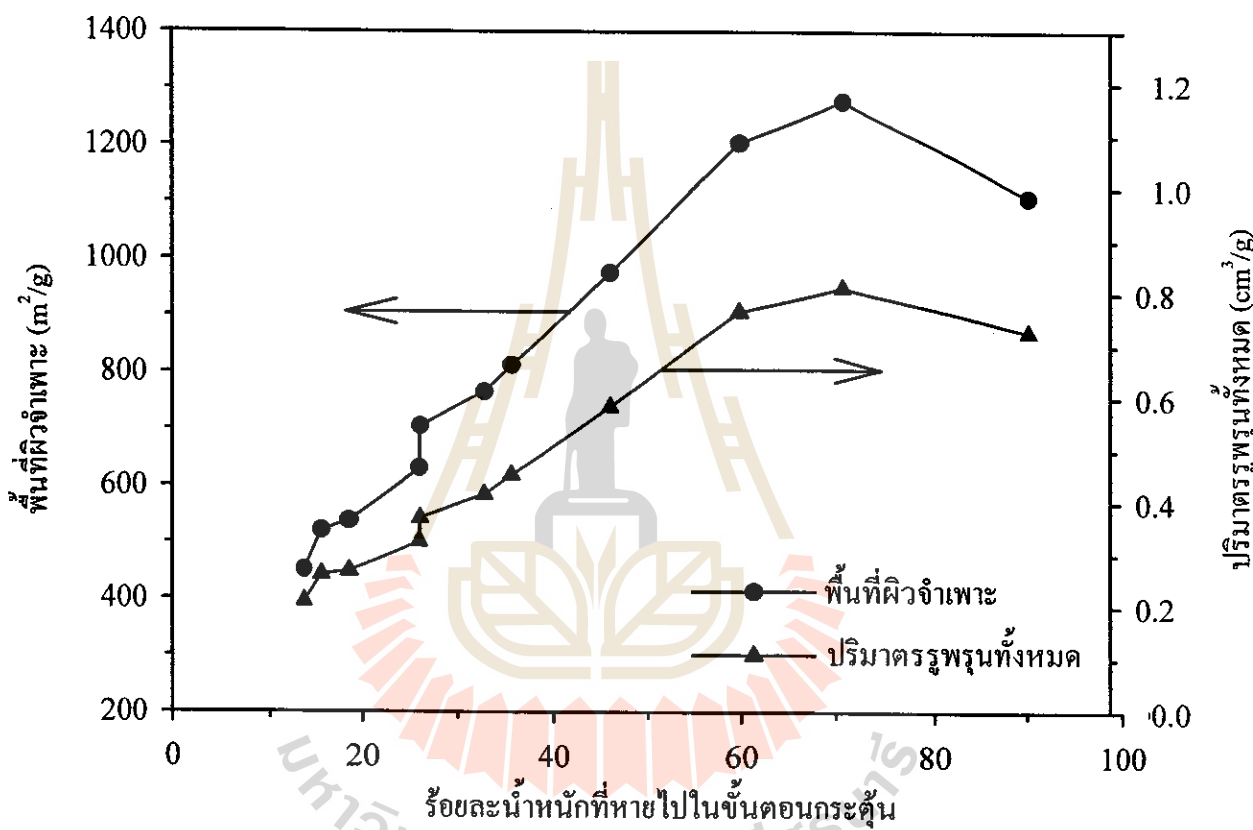
ในการอธิบายการเกิดและพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในขั้นตอนกระตุ้นนั้น สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนแต่ละขนาด และการกระจายขนาดรูพรุนกับร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงขั้นตอนกระตุ้น ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.31 รูปที่ 4.32 และ



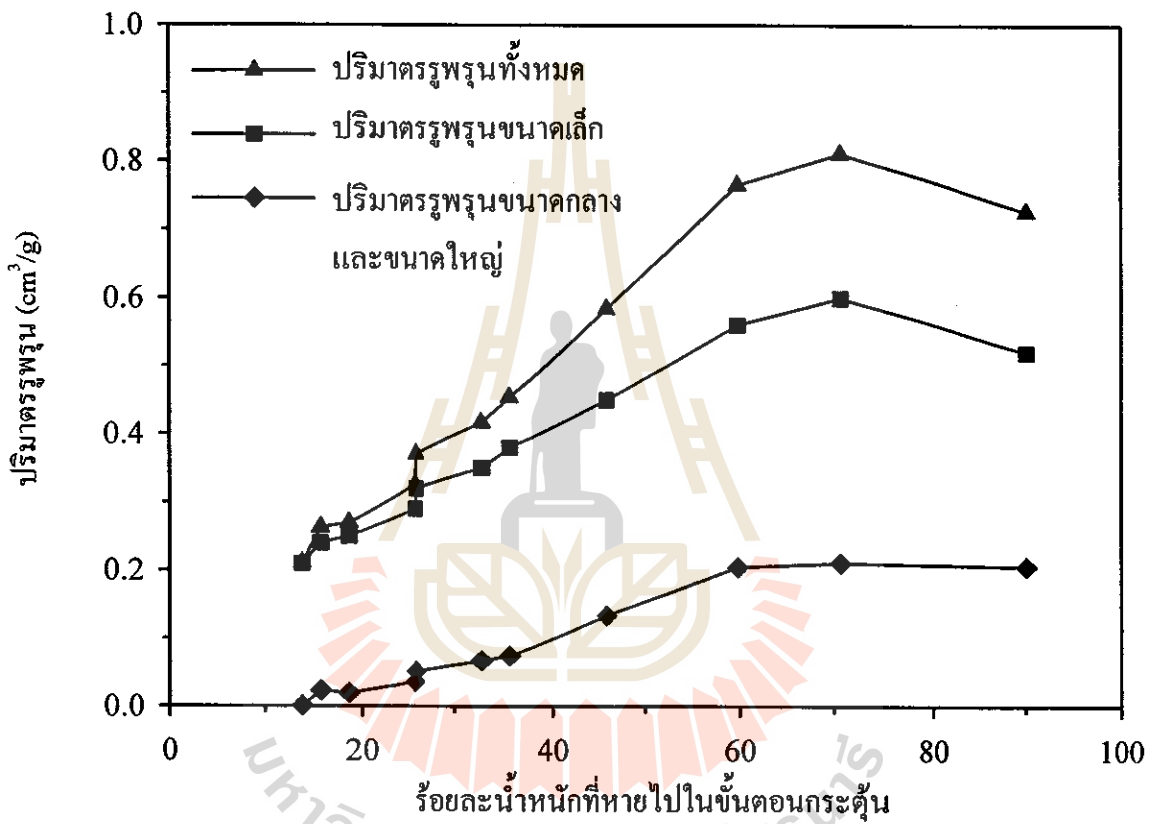
รูปที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $-196^\circ C$ ของถ่านกัมมันต์จากเม็ดถั่วเขียวที่เตรียมที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติพูนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดไผ่โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

สภาวะการกระตุ้น (อุณหภูมิ-เวลา)	ร้อยละ ผลผลิต รวม	ร้อยละ ผลผลิต ในชั้นตอน กระตุ้น	ร้อยละ น้ำหนักที่ หายไป ชั้นตอน	พื้นที่ผิว จำเพาะ BET (m ² /g)	ปริมาตรรู พูนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตรของรู พูนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตรรู พูนทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)
กระตุ้นที่ 800°C								
800-30	25.7	86.0	14.0	451	0.21(95%)	0.01	0.22	1.96
800-60	24.3	81.3	18.7	538	0.25(92%)	0.02	0.27	2.00
800-120	22.3	74.6	25.7	631	0.29(88%)	0.04	0.33	2.07
800-180	20.1	67.2	32.8	766	0.35(83%)	0.07	0.42	2.18
กระตุ้นที่ 850°C								
850-30	25.1	84.1	15.9	521	0.24(92%)	0.02	0.26	2.02
850-60	22.2	74.2	25.8	705	0.32(86%)	0.05	0.37	2.10
850-120	16.1	54.0	46.0	975	0.45(82%)	0.10	0.55	2.39
850-180	8.7	29.3	70.7	1278	0.60(74%)	0.21	0.81	2.54
กระตุ้นที่ 900°C								
900-30	19.2	64.4	35.6	813	0.38(84%)	0.07	0.45	2.23
900-60	12.0	40.2	59.8	1204	0.56(74%)	0.20	0.76	2.54
900-120	2.9	9.9	90.1	1108	0.52(71%)	0.21	0.73	2.62



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดกับร้อยละน้ำหนัที่หายไปในช่วงขั้นตอนการกระตุ้น



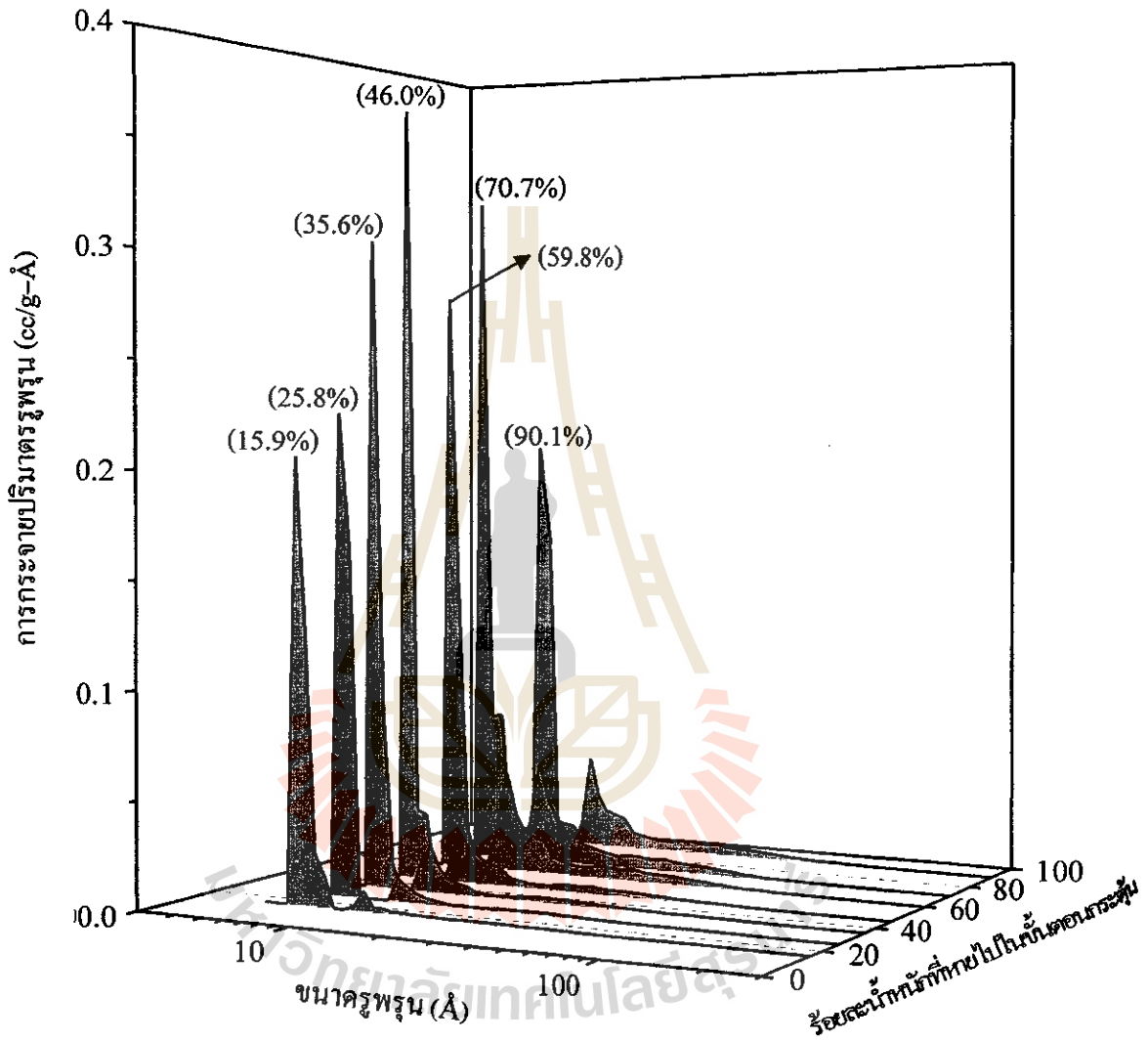
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ กับร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงชั้นตอนการกระตุ้น

รูปที่ 4.33 ตามลำดับ พบว่าสมบัติรูพรุนดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไป แต่จะลดลงหลังจากถึงจุดสูงสุดที่น้ำหนักหายไปเท่ากับร้อยละ 70.7 ยกเว้นแต่ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ในรูปที่ 4.32 ซึ่งมีแนวโน้มคงที่ จากผลนี้สามารถอธิบายขั้นตอนการพัฒนาของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้ ในช่วงเริ่มต้นที่น้ำหนักหายไปอยู่ในช่วงน้อยกว่าร้อยละ 20 รูพรุนที่เกิดขึ้นจะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ดังพบได้จากรูปที่ 4.32 ว่ามีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่น้อยมากและเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.33 ว่ารูพรุนโดยส่วนใหญ่มีขนาดน้อยกว่า 20 Å ในช่วงที่สองคือระหว่างร้อยละน้ำหนักที่หายไปประมาณ 20 ถึง 70 ในช่วงนี้รูพรุนขนาดเล็กยังคงมีการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการเพิ่มขึ้นของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ โดยรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่นี้เป็นผลมาจากการขยายขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก เมื่อน้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้นเกินร้อยละ 70 รูพรุนขนาดเล็กมีปริมาตรลดลง แสดงว่ารูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใหม่มีจำนวนลดลงในช่วงนี้ ส่วนรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ยังคงมีการพัฒนาจากรูพรุนขนาดเล็กที่มีอยู่ และนอกจากนี้จากการที่ในช่วงนี้พบว่าปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มีแนวโน้มคงที่ ไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งให้เห็นว่าอาจจะเกิดการที่รูพรุนใหญ่บางส่วนมีการยุบลงของผนังทำให้รูพรุนนั้นๆหายไป สัดส่วนของปริมาตรรูพรุนที่ลดลงจากปรากฏการณ์นี้จึงไปมีผลให้ปริมาตรรูพรุน โดยรวมของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ไม่เพิ่มขึ้น

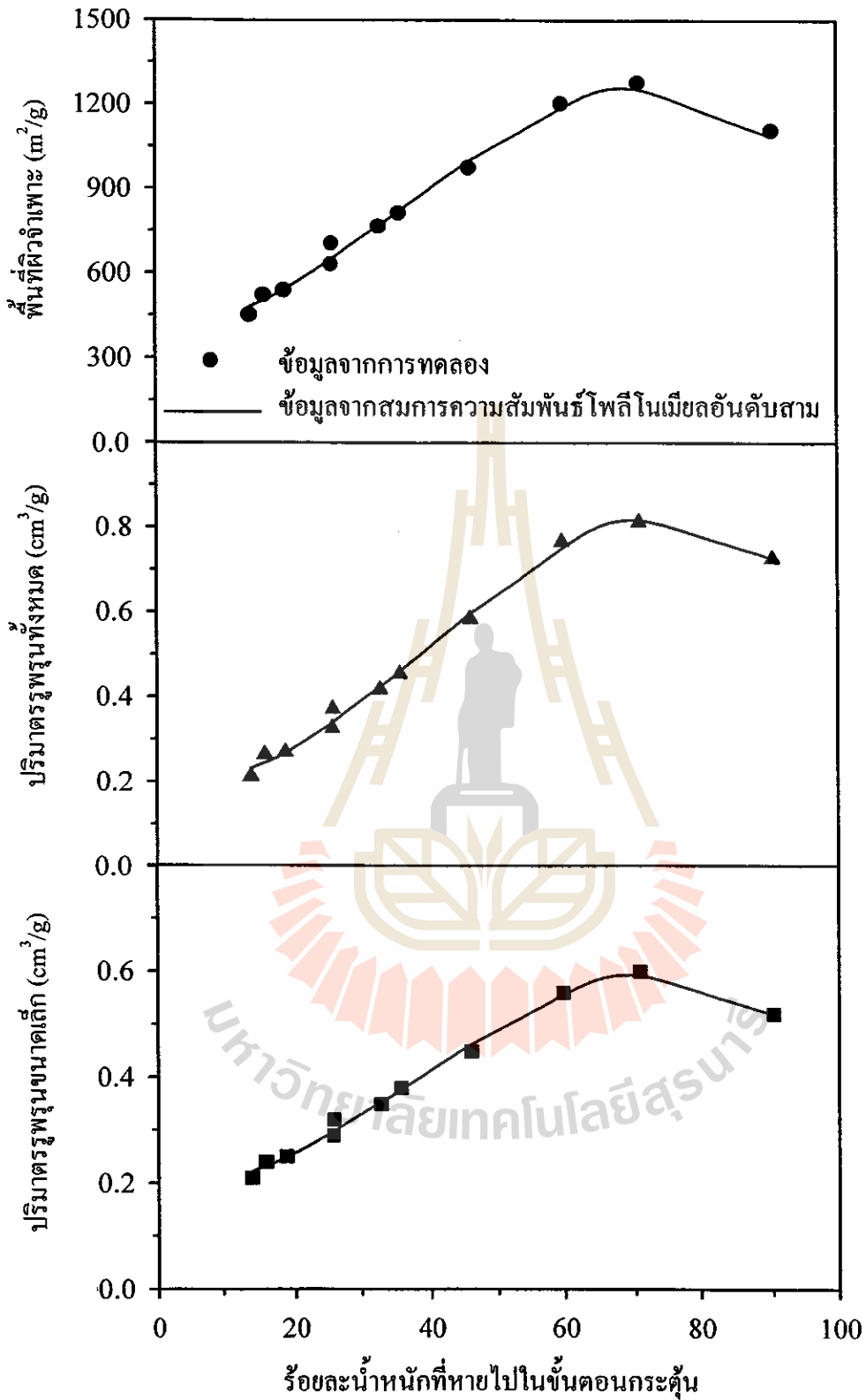
นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กกับร้อยละน้ำหนักที่หายไปในขั้นตอนกระตุ้น สามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการโพลีโนเมียลอันดับสามตามรูปแบบสมการดังนี้ $Y = a_1 + a_2X + a_3X^2 + a_4X^3$ โดย Y เป็นตัวแปรแสดงค่าสมบัติรูพรุนต่างๆของถ่านกัมมันต์ และ X เป็นตัวแปรแสดงค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปในขั้นตอนกระตุ้น ซึ่งผลความสัมพันธ์ตามสมการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.34 และค่าตัวแปรจากสมการแสดงในตารางที่ 4.10 นอกจากนี้พบว่าจากสมการสามารถประมาณค่าสมบัติพื้นผิวของถ่านชาร์ได้ โดยคำนวณจากสถานะที่ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปเป็นขั้นตอนกระตุ้นเท่ากับ 0 หรือมีค่าเท่ากับค่าของตัวแปร a_1 นั่นเอง พบว่าถ่านชาร์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ 380 m²/g และ 0.20 cm³/g และ 0.19 cm³/g ตามลำดับ วิธีนี้ถือว่าเป็นการประมาณค่าสมบัติพื้นผิวถ่านชาร์ที่วิธีการหนึ่ง เนื่องจากสมบัติของถ่านชาร์บางตัวอย่างไม่สามารถทำการทดลองโดยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ -196°C ได้เพราะรูพรุนที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ และโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นรูพรุนที่เล็กมาก ทำให้โมเลกุลไนโตรเจนยังไม่สามารถแพร่เข้าไปยังตำแหน่งของการดูดซับได้

4.5 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก(H₃PO₄)

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไย โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก สภาวะที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ 400–900°C ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริก 50% โดย



รูปที่ 4.33 การกระจายปริมาตรรูพรุนของรูพรุนแต่ละขนาด
ที่ค่าร้อยละน้ำหนัที่หายไปในแต่ละชั้น



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลอันดับสามระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก กับร้อยละน้ำหนัที่หายไปในช่วงขั้นตอนการกระตุ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรจากสมการความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลอันดับสามระหว่างสมบัติพื้นผิวและ ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงขั้นตอนกระตุ้น

ตัวแปร	สมบัติพื้นผิว		
	พื้นที่ผิวจำเพาะ	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก
a_1	380.2	0.20	0.19
a_2	1.47	-2.77×10^{-3}	-4.46×10^{-4}
a_3	0.46	4.06×10^{-4}	2.38×10^{-4}
a_4	-4.30×10^{-3}	-3.44×10^{-6}	-2.13×10^{-6}
R^2	0.993	0.994	0.994

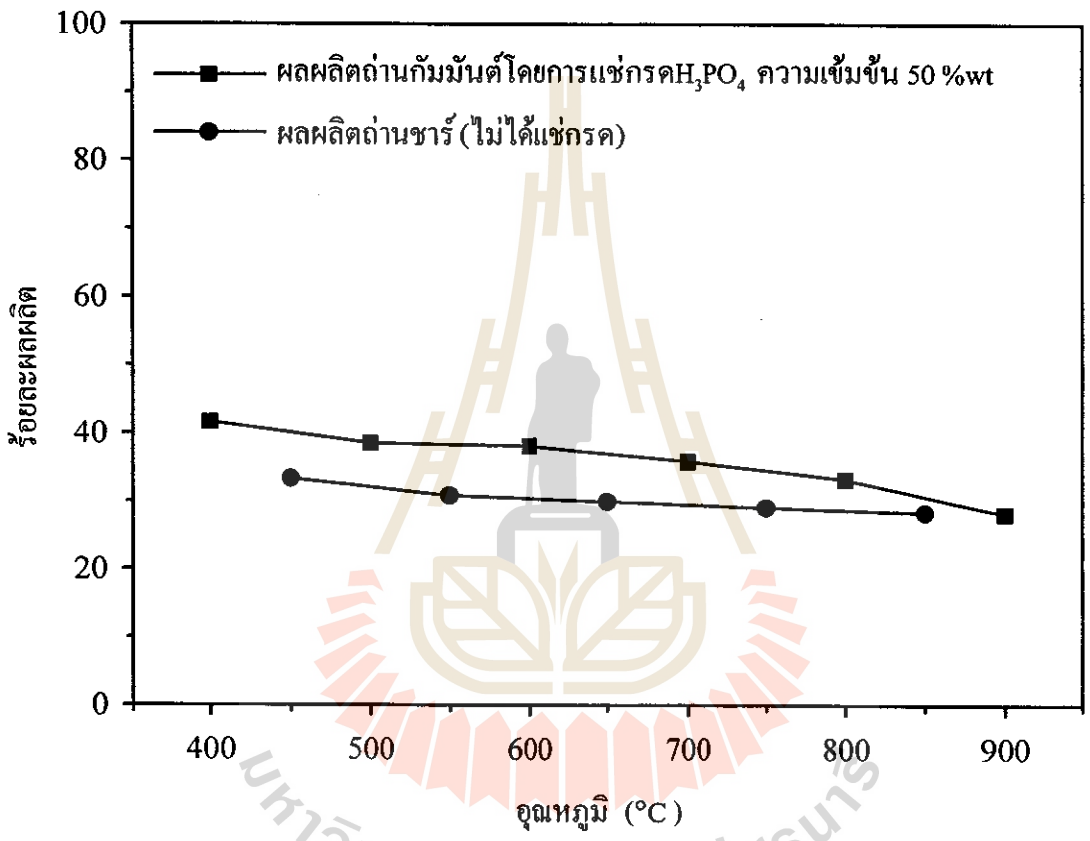
น้ำหนักเวลาการกระตุ้น 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางพื้นผิว ได้แก่ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย โดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196°C

4.5.1 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อร้อยละผลผลิต

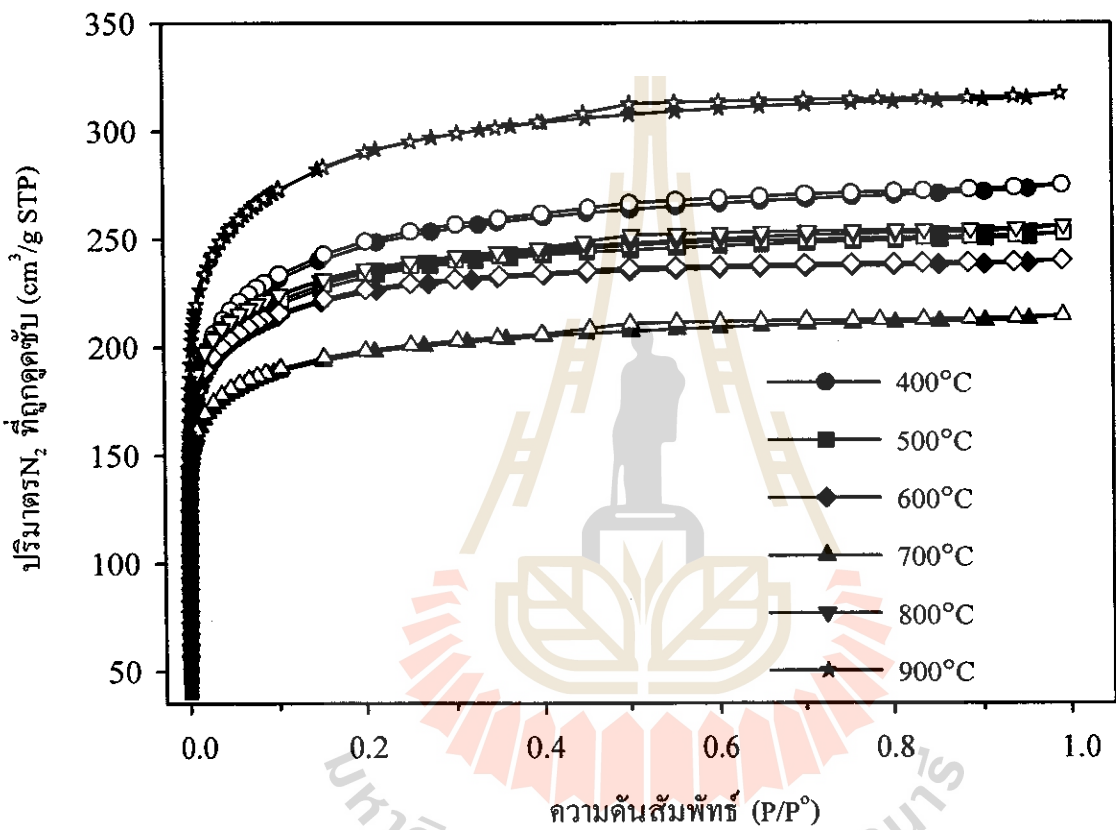
ผลของสภาวะอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์เตรียมจากความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 50% โดยน้ำหนัก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.35 พบว่าร้อยละผลผลิตมีค่าลดลงอยู่ระหว่างช่วงร้อยละ 41–28 ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วง $400\text{--}900^{\circ}\text{C}$ ซึ่งผลผลิตที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการสลายตัวของความร้อนของกลุ่มสารระเหย เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อนำผลผลิตของถ่านชาร์ซึ่งเตรียมจากวัตถุดิบเม็ดลำไยโดยไม่ได้มีการแช่กรดก่อน มาเปรียบเทียบกับ พบว่าในช่วงอุณหภูมิ $400\text{--}800^{\circ}\text{C}$ ผลผลิตถ่านกัมมันต์สูงกว่าของถ่านชาร์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลผลิตถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงมาใกล้เคียงกับค่าผลผลิตของถ่านชาร์ แสดงว่าการเติมกรดฟอสฟอริกในวัตถุดิบจะมีผลทำให้กลุ่มสารระเหยบางส่วนสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น(สลายตัวยากขึ้น) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับเนื้อคาร์บอนเปลี่ยนเป็นกลุ่มสารชนิดใหม่ที่ทนต่อการสลายตัวทางความร้อนมากขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็สามารถสลายตัวได้ ซึ่งพบว่าสารระเหยที่ถูกเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งได้ผลการวิจัยใกล้เคียงกับของ Gergis และคณะ⁽⁴⁴⁾ ที่ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดใบของผลอินทผลัมโดยกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก

4.5.2 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.36 ได้แสดงไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากอุณหภูมิต่างๆ พบว่าลักษณะเส้นไอโซเทอมเป็นแบบ Type I ซึ่งชี้ว่าถ่านกัมมันต์เหล่านี้มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างรูพรุน ปริมาตรการดูดซับไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิต่างๆเรียงลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ $700^{\circ}\text{C} < 600^{\circ}\text{C} < 500^{\circ}\text{C} < 800^{\circ}\text{C} < 400^{\circ}\text{C} < 900^{\circ}\text{C}$ ซึ่งปริมาตรการดูดซับนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติรูพรุน สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่คำนวณจากไอโซเทอมเหล่านี้ ได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.11 พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง $651\text{--}946\text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ $0.33\text{--}0.49\text{ cm}^3/\text{g}$ สัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่าร้อยละ 90 และขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 2 nm ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน รวมทั้งปริมาตรรูพรุนขนาดต่างๆ กับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ พบว่าในช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 ถึง 700°C พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมีค่าลดลง จากนั้นสมบัติพื้นผิวเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สภาวะอุณหภูมิที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดสูงสุดคือที่ 900°C สำหรับผลของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่



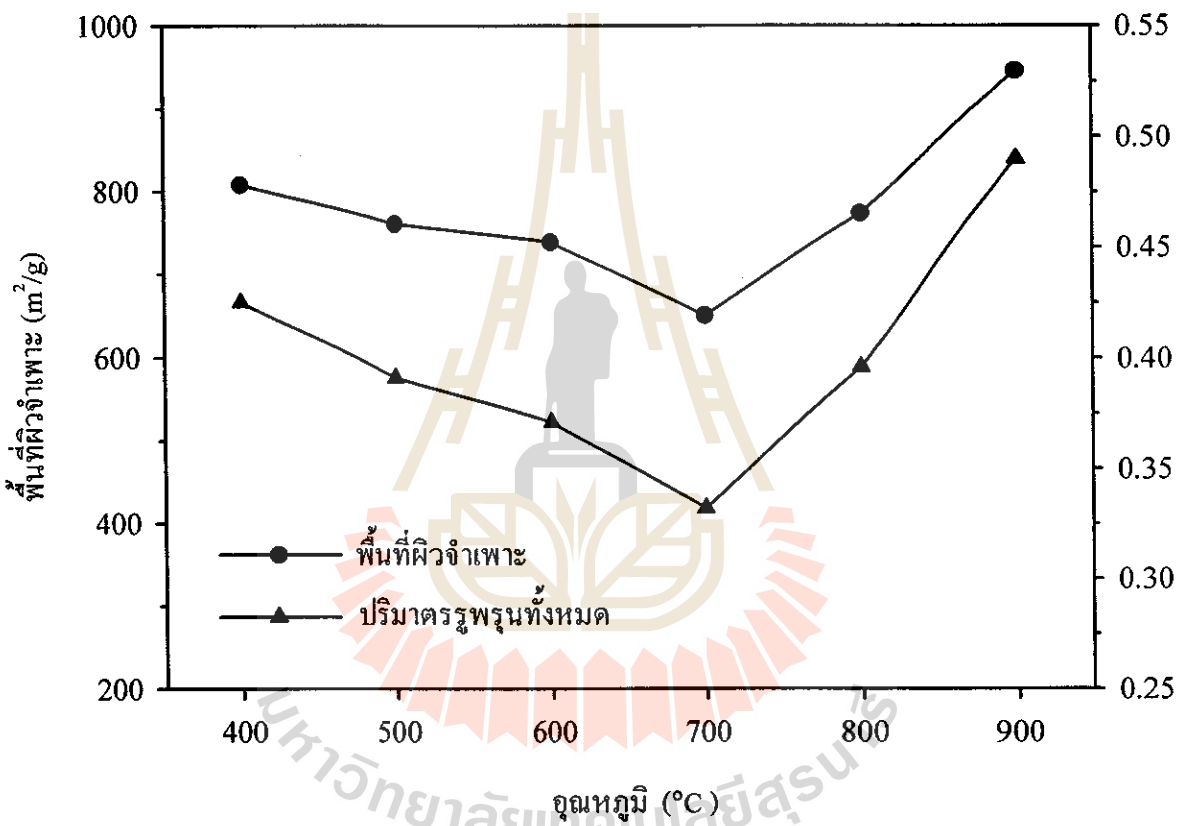
รูปที่ 4.35 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (H_3PO_4) ที่สภาวะ 60 นาที และ ความเข้มข้น H_3PO_4 50% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.36 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $-196^\circ C$ ของถ่านกัมมันต์เตรียมที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.11 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมี

อุณหภูมิ (°C)	สภาวะการกระตุ้น		ร้อยละ ผลผลิต	ร้อยละ น้ำหนักที่ หายไป	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตร พูนขนาดเล็ก (cm ³ /g)	ปริมาตรของ พูนขนาด กลางและใหญ่ (cm ³ /g)	ปริมาตร พูน ทั้งหมด (cm ³ /g)	ขนาด พูนเฉลี่ย (nm)
	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น H ₃ PO ₄ (%wt)							
400	60	50	41.6	58.4	808	0.38 (90%)	0.08	0.42	2.10
500	60	50	38.5	61.5	761	0.36 (92%)	0.03	0.39	2.05
600	60	50	38.1	61.9	739	0.35 (95%)	0.02	0.37	2.00
700	60	50	35.8	64.2	651	0.31 (94%)	0.02	0.33	2.03
800	60	50	33.2	66.8	774	0.36 (92%)	0.03	0.39	2.04
900	60	50	28.1	71.9	946	0.44 (90%)	0.05	0.49	2.07



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดกับอุณหภูมิการกระตุ้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการเตรียมถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับความพรุนสูงจากชีวมวลจากวัตถุดิบสองชนิด ได้แก่ ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลและเมล็ดลำไยจากโรงงานผลิตผลไม้กระป๋อง โดยวิธีเตรียมจะใช้ทั้งวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาสภาวะการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของกรดที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ จากผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีจากชานอ้อยและเมล็ดลำไย โดยวิธีกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์และการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ภายใต้สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุดให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า 1,000 m^2/g และคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเตรียมโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกให้สมบัติความพรุนดีที่สุด ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้สภาวะคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300-600°C เวลา 60 และ 120 นาที และสภาวะการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ 600-850°C และเวลา 60 และ 120 นาที พบว่า
 - ได้ถ่านกัมมันต์ที่ให้ร้อยละผลผลิตรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 10-30 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 50-70 และสารระเหยร้อยละ 25-40
 - การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์จาก 300°C เป็น 600°C ทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลงประมาณ 60% ในขณะที่การเพิ่มเวลาคาร์บอนไนซ์ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อร้อยละผลผลิตที่ได้
 - การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นจาก 600°C เป็น 850°C ทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลงประมาณ 53% ในขณะที่เวลากระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิต
 - ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาตรอยู่ในช่วง 53-83% ของปริมาตรรูพรุนรวม
 - ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 500-1,000 m^2/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.26-0.55 cm^3/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2-2.3 nm โดยสภาวะที่ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400°C เวลา 60 นาที และอุณหภูมิกระตุ้น 850°C นาน 60 นาที
 - เมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ โดยสภาวะการเตรียมอื่น ๆ คงที่พบว่าสมบัติความพรุนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 400°C ในขณะที่การเพิ่มเวลาคาร์บอนไนซ์ช่วยให้สมบัติรูพรุนเพิ่มขึ้นเฉพาะในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 400°C

- การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นทำให้สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนขนาดต่าง ๆ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น แต่เวลาการกระตุ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์
2. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ใช้สภาวะคาร์บอนไนซ์และสภาวะกระตุ้นเหมือนกับกรณีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และให้ผลดังนี้
- ร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้อยู่ในช่วงร้อยละ 10 - 25 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 55 - 74 และสารระเหยร้อยละ 4 - 40
 - การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์จาก 300°C เป็น 600°C ทำให้ร้อยละผลผลิตลดลงประมาณ 15% แต่เวลาการคาร์บอนไนซ์ไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตรวมของถ่านกัมมันต์
 - การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นจาก 600°C เป็น 1,000°C ทำให้ร้อยละผลผลิตลดลงประมาณ 60 % ในขณะที่เวลากระตุ้นไม่มีผล
 - ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาตรคิดเป็น 25 - 80% ของปริมาตรรูพรุนรวม
 - ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300 - 1,116 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.14 - 0.78 cm³/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.9 - 3.18 nm ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์เตรียมโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะการเตรียมที่ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ได้แก่ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400°C นาน 60 นาที และอุณหภูมิกระตุ้น 900°C นาน 60 นาที
 - การเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ ช่วยให้สมบัติความพรุนเช่นพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 400°C แต่การเพิ่มเวลาการคาร์บอนไนซ์ทำให้สมบัติความพรุนต่าง ๆ มีค่าลดลง
3. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก โดยใช้อัตราส่วนสารเคมีต่อวัตถุดิบ 0.5 - 1.0 เวลากระตุ้น 60 - 120 นาที และอุณหภูมิ 300 - 600°C พบว่าให้ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์อยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 50 ร้อยละคาร์บอนคงตัวในช่วง 57 - 77 และร้อยละสารระเหยในช่วง 15 - 37 พื้นที่ผิวในช่วง 900 - 1,600 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวมในช่วง 0.42 - 1.22 cm³/g สัดส่วนรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในช่วงร้อยละ 10 - 65 ของปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.91 - 3.30 nm โดยสภาวะการเตรียมที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด ได้แก่ สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 400°C และระยะเวลา 120 นาที การเพิ่มอุณหภูมิและ

เวลาของการกระตุ้นทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ลดลง สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ พบว่าไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิต แต่มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดรูพรุนขนาดกลางมากขึ้นด้วย การใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงกว่า 400°C ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากนัก แต่การใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400°C และอัตราส่วนของสารเคมีที่ต่ำจะมีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงได้

การนำถ่านกัมมันต์ไปทดสอบการกำจัดโครเมียมจากสารละลายโดยกระบวนการดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้ดีเกือบเท่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า โดยการกำจัดโครเมียมเกิดได้ดีเมื่อสารละลายมีความเป็นกรดต่างค่าเท่ากับ 2.5 และกำจัดได้มากขึ้นในสภาวะอุณหภูมิของสารละลายที่สูงขึ้น สมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมจากสารละลายได้ดี สำหรับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโครเมียม จากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าเป็นแบบอัตราเร็วอันดับสอง โดยมีค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับเท่ากับ 7.8×10^{-5} และ 11×10^{-5} g/mg-min สำหรับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าและถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยตามลำดับ

4. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้สภาวะคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 120 นาที และสภาวะกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 – 900°C เวลา 30 – 180 นาที พบว่าได้ถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละคาร์บอนคงตัวประมาณ 84 ร้อยละสารระเหย 7 และร้อยละของเถ้า 8.7 โดยมีร้อยละผลผลิตรวมอยู่ระหว่าง 3 – 25 ขึ้นกับสภาวะกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ระหว่าง 450 – 1,280 m^2/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.22 – 0.81 cm^3/g สัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในช่วง 70 – 95% และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.96 – 2.62 nm

การเพิ่มเวลากระตุ้นทำให้สมบัติรูพรุนต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C เมื่อใช้เวลากระตุ้นมากกว่า 60 นาที มีผลทำให้สมบัติความพรุนลดลง การเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นส่งผลให้สมบัติความพรุนเพิ่มขึ้นตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา แต่ทำให้สัดส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กลดลงด้วย นอกจากนี้ยังพบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงขั้นตอนการกระตุ้น (ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิการกระตุ้น) กับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนและได้เสนอสมการสหสัมพันธ์ เพื่อทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ด้วย

5. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ใช้สภาวะที่ศึกษาที่อุณหภูมิ 400 – 900°C ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และเวลากระตุ้น 60 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ให้ค่าร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง

28–42 พื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 650–950 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวมอยู่ระหว่าง 0.33–0.50 cm³/g สัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมากกว่า 90% และขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 2 nm โดยผลของการเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 400–700°C ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมลดลงและกลับเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 700°C

6. โดยสรุปแล้วการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลโดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ควรใช้อุณหภูมิกระตุ้นประมาณ 400°C เป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีคุณภาพในแง่ของร้อยละคาร์บอนคงตัวและโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม สำหรับขั้นตอนการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งในขั้นตอนที่สองนี้ควรใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นอยู่ในช่วง 800–900°C และใช้เวลากระตุ้นอย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง หากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกัมมันต์สูงมากและเกิดการแตกทำลายของโครงสร้างรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวมีค่าลดลง สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับสัดส่วนสารเคมีและอุณหภูมิกระตุ้นที่ใช้ โดยอุณหภูมิกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบชีวมวลในงานวิจัยนี้อยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 400°C ซึ่งจะประหยัดพลังงานกว่าเมื่อเทียบกับวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

7. งานที่ควรศึกษาต่อไปได้แก่

- การใช้วัตถุดิบชีวมวลประเภทต่างๆ ที่เป็นพืชเศรษฐกิจ และมีปริมาณเหลือทิ้งจำนวนมาก เช่น กะลาปาล์ม และไม้ไผ่เร็ว เป็นต้นมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์
- ควรศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ทางเคมีโดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์หรือโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงบทบาทและกลไกของสารเคมีต่อการพัฒนารูพรุนของถ่านกัมมันต์
- ควรศึกษาวิธีปรับสภาพเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ดูดซับสารต่างๆ จากแก๊สและสารละลายได้หลากหลายขึ้นเนื่องจากจะช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นขั้ว (polarity) มากขึ้น
- ควรศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ในระบบต่อเนื่อง เช่น ระบบเบดเคลื่อนที่ ระบบฟลูอิดไคซ์เบด ระบบสะเปาเตคเบด เป็นต้น เพื่อเป็นพื้นฐานในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับเชิงพาณิชย์ต่อไป

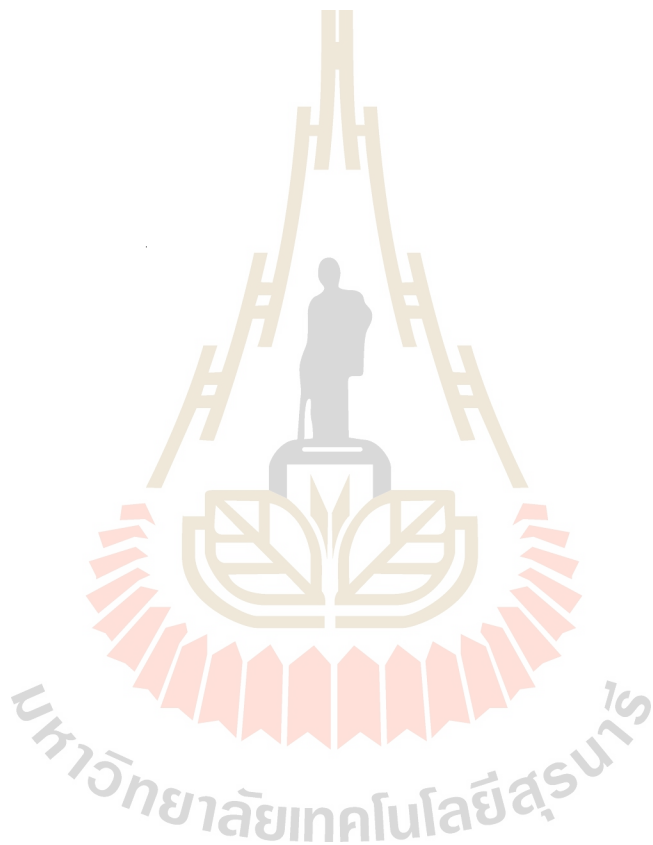
บรรณานุกรม

1. กรมศุลกากร. (2545) สถิติการนำเข้า-ส่งออก [ออนไลน์]. ได้จาก :
[http : // www.customs.go.th/](http://www.customs.go.th/)
2. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย รายงานการวิจัยเรื่องการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์.
ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2542 (75 หน้า)
3. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย รายงานการวิจัยเรื่องการผลิตถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธี
กระตุ้นทางเคมี. ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2543-2544 (64 หน้า)
4. ข้อมูลจากโรงงานน้ำตาลราชสีมา (กลุ่มวังขนาย) ตำบลแก้งสนามนาง อำเภอแก้งสนามนาง
จังหวัดนครราชสีมา (2543)
5. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2545) สถิติการเกษตร (ลำไย) (ออนไลน์). ได้จาก :
[http : //www.oae.go.th/zone/zone1/stat_longan.htm](http://www.oae.go.th/zone/zone1/stat_longan.htm)
6. M.G.Lussier, J.C.Shull and D.J.Miller, "Activated Carbon from Cherry Stones", Carbon, 32,
1493-1498, 1994.
7. F.Rodriguez-Reinoso, M.Molina-Sabio, and M.T.Conzalez, "The Use of Steam and CO₂ as
Activating Agents in the Preparation of Activated Carbons", Carbon, 33, 15-23, 1995.
8. A Ahmadpour and D.D.Do, "The Preparation of Active Carbons from Coal by Chemical and
Physical Activation", Carbon, 34, 471-479, 1996.
9. J.JPis, M.Mahamud, J.A.Pajares, J.B.Parra and R.C. Bansal, "Preparation of Active Carbons
from Coal Part III : Activation of Char", Fuel Processing Technology, 57, 149-161, 1998.
10. T.T.Al-khalid, N.M.Haimour, S.A.Sayed, and B.A.Akash, "Activation of Olive-Seed Waste
Residue using CO₂ in a Fluidized Bed Reactor", Fuel Processing Technology 57, 55-64,
1998.
11. S.Nagano, H.Tamon, T.Adzumi, K.Nakagawa and T.Suzuki, "Activated Carbon from
Municipal Waste", Carbon, 38, 915-920, 2000.
12. M.N.Alaya, B.S.Girgis, and W.E.Mourad "Activated Carbon from Some Agricultural Waste
under One-Step Steam Pyrolysis", J.of Porous Materials 7, 509-517, 2000.
13. Aik Chong Lua and Jia Guo, "Activated Carbon Prepared from Oil Palm Stone by One-Step CO₂
Activation for Gaseous Pollutant Removal", Carbon, 38, 1089-1097, 2000.
14. Toshiro Otowa, Ritsuo Taniba and Nasao Itoh, "Production and Adsorption Characteristics
of MAXSORB : High-Surface Area Active Carbon", Carbon, No.4, 241-245, 1993.

15. F.Rodriguez-Reinoso, M.Molina-Sabio, "Activated Carbons from Lignocellulosic Materials by Chemical and/or Physical Activation: An Overview", *Carbon*, 30, 1111-1118, 1992.
16. M.Ruiz and C.Rolz, "Activated Carbons from Sugar Cane Bagasses", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop.*, 10, 429, 1971.
17. F.Rouquerol, J.Rouquerol and K.Sing, "Adsorption by Powders and Porous Solids : Principles, Methodology and Applications, Academic Press, 1999.
18. Y.F.Jai, "Adsorption of Gold and Silver Species on Activated Carbon", Ph.D.Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom, 1998.
19. V.Gomez-Serrano, E.M.Cuerda-Correa, M.C.Fernandez-Gonzalez, M.F.Alexandre-Franco and A.Macias-Garcia, "Preparation of Activated Carbon from Chesnut Wood by Phosphoric Acid-Chemical Activation", *Materials Letters*, 59, 846-853, 2005.
20. Y.Diao, W.P.Walawender and L.T.Fan, "Activated Carbon Prepared from Phosphoric Acid Activation of Grain Sorghum", *Bioresource Technology*, 81, 45-52, 2002.
21. J.Hayashi, T.Horikawa, K.Muroyama and V.G.Gomes, "Activated Carbon from Chickpea Husk by Chemical Activation with K_2CO_3 : Preparation and Characterization", *Microporous and Mesoporous Materials*, 55, 63-68, 2002.
22. N.Yalcin and V.Sevinc, "Studies of the Surface Area and Porosity of Activated Carbons Prepared from Rice Husks", *Carbon*, 38, 1943-1945, 2000.
23. T.Vernersson, P.R.Bonelli, E.G.Cerrella and A.L.Cukierman," Arundo donax cane as a Precursor for Activated Carbons Preparation by Phosphoric Acid Activation", *Bioresource Technology*, 83, 95-104, 2002.
24. T.Zhang, W.P.Walawender, L.T.Fan, M.Fan, D.Daugaard and R.C.Brown, "Preparation of Activated Carbon from Forest and Agricultural Residues through CO_2 Activation", *Chemical Engineering Journal*, 105, 53-59, 2004.
25. W.Daud and W.Ali, "Comparison on Pore Development of Activated Carbon Produced from Palm Shell and Coconut shell", *Bioresource Technology*, 93, 63-69, 2004.
26. T.Yang and A.C.Lua, "Characteristics of Activated Carbons Prepared from Pistachio-Nut Shells by Physical Activation", *J.Colloid and Interface Science*, 267, 408-417, 2003.
27. C.F.Chang, C.Y.Chang and W.T. Tsai, "Effects of Burn-off and Activation Temperature on Preparation of Activated Carbon from Corn-Cob Agrowaste by CO_2 and Steam, *J.Colloid and Interface Science*, 232, 45-49, 2002.

28. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Chromium in water", D1687-92. 11.01, United States of America, 1998.
29. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, D4607-94. 15.01.755-759, United States of America, 1998.
30. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon", D2867-95. 15.01.709-11, United State of America, 1998.
31. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples", D5832-95. 15.01.782, United States of America, 1998.
32. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon", D2866-94. 15.01.707-708, United States of America, 1998.
33. T.Allen, "Particle Size Measurement : Surface Area and Pore Size Determination", 5th ed., Kluwer Academic Publishers, p.122-130, 1999.
34. J.P.Olivier, "Modeling Physical Adsorption on Porous and Nonporous Solids using Density Functional Theory", Journal of Porous Materials, 2, 9, 1995.
35. S.Junpirom, C.Tangsathitkulchai and M.Tangsathitkulchai, "Activated Carbon from Longan Seed by Carbon Dioxide Activation", Proceedings of Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004), Bangkok, Dec 1-3, 2004.
36. S.J.Gregg and K.S.W. Sing, "Adsorption, Surface Area and Porosity", 2nd ed., Academic Press, p.37-38, 1982.
37. M.Jagtoyen and F.Derbyshire, "Activated Carbons from Yellow Poplar and White Oak by H₃PO₄ Activation", Carbon, 36, 1085-1097, 1998.
38. C.Selomulya, V.Meeyoo and R.Amal, "Mechanism of Cr(vi) Removal from Water by Various Types of Activated Carbons", J.Chem. Tech. Biotechnol., 74, 111-122, 1999.
39. K.Singh and N.Tiwari, "Removal and Recovery of Chromium (vi) from Industrial Wastewater", J.Chem. Tech. Biotechnol, 69, 376-382, 1997.
40. K.Hanadi, X.D. Chen, M.Farid and G.Q. Lu, "Adsorption Kinetics for the Removal of Chromium (vi) from Aqueous solution by Adsorbents Derived from Used Tyres and Sawdust", Chem. Eng. J., 84, 95-105, 2000.
41. M.Koby, "Adsorption, Kinetic and Equilibrium Studies of Cr(vi) by Hazelnut Shell Activated Carbon", Adsorption Science & Technology, 22(1), 51-64, 2004.
42. J.Guo and A.C. Lua, "Kinetic Study on Pyrolysis Process of Oil-Palm Solid Waste using Two-Step Consecutive Reaction Model", Biomass and Bioenergy, 20, 223-233, 2001.

43. K.Gergova, N.Petrov and S.ESer, “Adsorption Properties and Microstructure of Activated Carbons Produced from Agricultural By-Products by Steam Pyrolysis”, Carbon, 32, 693-702, 1994.
44. B.S.Girgis and A-N.A.El-Hendawy, “Porosity Development in Activated Carbons Obtained from Date Pits under Chemical Activation with Phosphoric Acid”, Microporous and Mesoporous Materials, 52, 105-117, 2002.



ภาคผนวก ก
ประวัตินักวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้ร่วมวิจัย

1. ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

นายชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย (Chaiyot Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2519	ตรี	วทบ.(เกียรตินิยม)	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.App.Sc.	วิศวกรรมเคมี	University of Adelaide, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Mineral Processing	Pennsylvania State University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- การบดขยี้วัสดุ
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยด้านถ่านหินและเทคโนโลยีอนุภาค รวม 50 เรื่อง (ดังเอกสารแนบ)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

ชื่อเรื่อง	แหล่งทุน	ปีที่ทำเสร็จ	สถานะภาพ
1. Improved Producer Gas Cleaning System	USAID	2533	ผู้ร่วมวิจัย
2. การพัฒนาระบบฟลูอิดไดซ์เบดหมุนเวียน	สภาวิจัยแห่งชาติ	2535	หัวหน้าโครงการ
3. ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบข้าว	สภาวิจัยแห่งชาติ	2537	ผู้ร่วมวิจัย
4. การพัฒนาหม้อต้มไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	ASEAN-Australian Energy Program	2537	ผู้ร่วมวิจัย
5. การจำแนกถ่านลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากแม่เมาะเพื่อใช้ในงานคอนกรีต	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	2541	ผู้ร่วมวิจัย
6. กระบวนการซินเทอริงของถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2542	หัวหน้าโครงการ
7. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2542	หัวหน้าโครงการ
8. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2544	หัวหน้าโครงการ
9. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและทางเคมีของน้ำมันปาล์ม	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)	2546	หัวหน้าโครงการ
10. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์ด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมี	ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2543-2544	หัวหน้าโครงการ

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

เรื่อง	แหล่งทุน	ระยะเวลา	สถานภาพ
1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน	เงินอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	2545-2546	หัวหน้าโครงการ
2. สมดุลย์และจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดลำไย	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 3	2543-2547	หัวหน้าโครงการ
3. การเตรียมและวัดสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกะลาและเส้นใยปาล์มน้ำมัน	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 4	2544-2548	หัวหน้าโครงการ
4. การปรับสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้โตเร็ว	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 5	2545-2549	หัวหน้าโครงการ
5. กระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุชีวมวล	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 6	2546-2550	หัวหน้าโครงการ
6. วัสดุแก้วพรุนจากเถ้าลอยลิกไนท์	ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 7	2547-2551	หัวหน้าโครงการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิจัย (รศ.ดร.ชัยยศ ตั้งสติษฐ์กุลชัย)

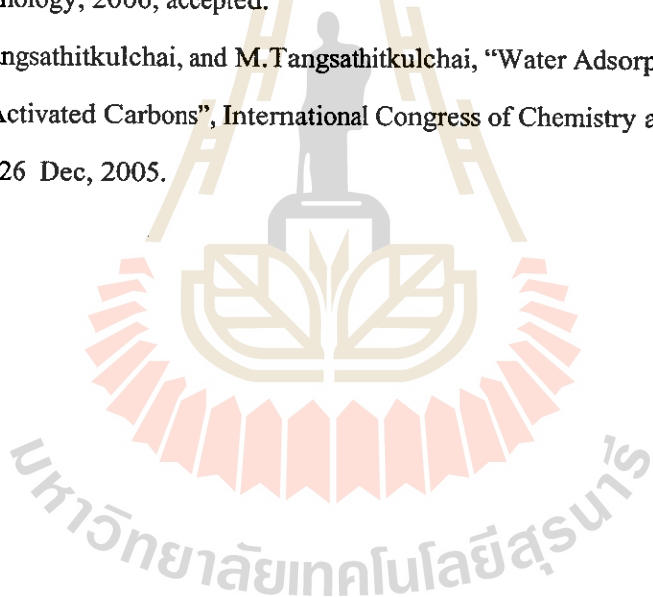
1. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "The Effect of Slurry Density on Breakage Parameters of Quartz, Coal and Copper Ore in a Laboratory Ball Mill", Powder Technology, vol. 42, 287-296, 1985.
2. C. Tangsathitkulchai, "The Rheological Behavior of Homogeneous Suspensions of Coal and Quartz Slurries", KMITT Research and Development Bulletin, vol.10, No.1, 34-59, 1987.
3. L.G. Austin, and C. Tangsathitkulchai, "Comparison of Methods for Sizing Ball Mills Using Open-Circuit Wet Grinding of Phosphate Ore as a Test Example", Ind. Eng. Chem. Res., vol.26, 997-1003 (1987).
4. T. Sakulpanich, P. Thitthiwong, D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, "Gasification of Coconut Shell with a Purpose of Charcoal Production", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 Dec, 1987.
5. C. Tangsathitkulchai, "Fluidized - Bed Cooling Tower", Proceedings of the Regional Symposium on Petrochemical Technology' 87, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand, 14-17 Dec, 1987.
6. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Rheology of Concentrated Slurries of Particles of Natural Size Distribution Produced by Grinding", Powder Technology, vol. 56, 293 - 299, 1988.
7. C. Tangsathitkulchai, "Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding", paper presented at Joint Technical Seminar on Powder Technology (Thai - Japan), Technological Promotion Association (Thai - Japan), Bangkok, 21 Nov, 1988.
8. C. Tangsathitkulchai, and L.G. Austin, "Slurry Density Effects on Ball Milling in a Laboratory Ball Mill, Powder Tech. vol. 59, No. 4, 285 -289, 1989.
9. D. Khummongkol, and C. Tangsathitkulchai, " A Model for Tar - Removal Efficiency from Biomass - Produced Gas Impinging on a Water Surface", Energy, Vol. 14, No. 3, 113 -121, 1989.
10. C. Tangsathitkulchai, "Evaporative Cooling of Water in a Spouted Bed Contactor", Technical Meeting on Heat, Mass and Momentum Transfer, The Engineering Institute of Thailand, 12 - 13 Dec, 1989.
11. C. Tangsathitkulchai, " Slowing - Down Effect in Fine Wet Grinding, TIZ International Powder Magazine, vol.113, No.10, 802 -804, 1989.

12. C. Tangsathitkulchai, and D. Khummongkol, "Cleaning of Producer Gas from a Rice Husk Gasifier by Impingement on a Water Surface", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov, 1990.
13. M. Tangsathitkulchai and C. Tangsathitkulchai "Study of Boiler Slag Deposit Formation Using a Vertical Externally - Heated Tube Furnace", International Conference on Energy & Environment, Tara Hotel, Bangkok, 27 - 30 Nov, 1990.
14. C. Tangsathitkulchai, "Water Cooling in a Three - Phase Spouted Bed", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17-19 Dec, 1990.
15. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, S. Tia, and V. Kritpiphat, "A Multifuel Fluidized Bed Boiler for Small Scale Industrial Use: System Design", the First National Chemical Engineering Conference, Siam Intercontinental Hotel, Bangkok, 17 -19 Dec, 1990.
16. C. Tangsathitkulchai, "Sizing of Ball Mills Using a Size - Mass Balance Approach", 2nd Japan - Thailand Symposium on Powder Technology - Applications to Environmental Protection, New Material and Industrial Pharmacy, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 22 - 23 Aug, 1991.
17. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, บทความวิชาการ เรื่อง "ปัญหามลภาวะจากการใช้ถิกไนต์และการป้องกัน", วารสารเทคโนโลยี สจข., ฉบับที่ 1 ปีที่ 4 เดือนตุลาคม 2534.
18. C. Tangsathitkulchai, S. Tia, S. Suwanayuen, A. Dararuja and P. Reungsin, "Mixing of Rice Husk in a Fluidized Bed of Sand", Conference on Advance in Chemical Engineering, B.P. Grand Tower Hotel, Songkla, 25 -26 Jun, 1991.
19. S. Suwanayuen, T. Chayawattana, Y. Surachpakorn, S. Tia, and C. Tangsathitkulchai, "Combustion of Rice Hull in a Fluidized Bed Furnace", ASEAN J. Sci & Tech., vol 9, No. 2, 107 - 115, 1992.
20. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, P. Raungsin, and A. Dararuja, "Mixing of Fuel Particles in a Fluidized Bed of Sand, ASEAN J. Sci & Tech., vol 9, No.2, 143 -150, 1992.
21. S. Suwanayuen, S. Tia, C. Tangsathitkulchai, T. Pursakasemsug, and W. Promboon, "A Cold Model Study of Erosion in a Gas Fluidized Bed of Sand", Res. Dev. J. of Eng. Inst. Thailand, vol.3, No. 2, 1992.
22. S. Suwanayuen, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Lignite Fluidized Bed Combustor for Small - Scale Industrial Use", ASEAN FBC Workshop, Bundung, Indonesia, 12-14 Apr, 1993.
23. C. Tangsathitkulchai et.al., "Fluidized Bed Combustion of Rice Hull", proceeding of 1st Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 8 - 9 Jun, 1993.

24. S. Suwanayeeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia. "Performance of KMITT - Prototype Fluidized Bed Boiler : Effects of Fuel Type & Size", the 5th ASEAN Conf. on Energy Tech., Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
25. S. Suwanayeeun, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Emission Characteristics of KMITT Prototype Fluidized Bed Boiler", the 5th ASEAN Conf. on Energy Tech, Tara Hotel, Bangkok, 25 -27 Apr, 1994.
26. C. Tangsathitkulchai, C. Kuvarananchareon, and M. Tangsathitkulchai, " Sintering Study of Thai Lignite Ashes", 2nd Technical Meeting of Engineering Faculty, KMITT, 7 - 8 Jun, 1994.
27. C. Tangsathitkulchai, S. Suwanayeeun, and S. Tia "Evaluation of a 2MW Fluidized Bed Boiler Burning Thai Lignite", 4th ASIAN Conf. on Fluidized Bed and Three - Phase Reactors, Fukuoka, Japan, 28-30 Nov, 1994.
28. C. Tangsathitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rate in a Laboratory Wet Ball Mill", Mining Engineering Conf., B.P. Grand Tower, Songkla, 24 - 25 Nov, 1994.
29. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai, "Sintering of Coal Ashes : Effects of Temperature and Atmosphere", 4th Chem. Eng. Conf., Khonkaen Univ., 20-21 Oct, 1994.
30. M. Tangsathitkulchai, and C. Tangsathitkulchai "Sintering of Coal Ashes : Effects of Extraction and Addition of Alkali Glass Materials, Suranaree J. Sci. Technol., 1, No.2, 123 - 132, 1994.
31. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Environment Atmosphere on the Sintering of Thai Lignite Fly Ashes", Eng. Found. Conf. on Application of Advanced Technologies to Ash - Related Problem in Boilers, New Hampshire, USA, 16-21 July, 1995.
32. S. Tia, C. Tangsathitkulchai, and P. Dumronglaohapun, "Continuous Drying of Slurry in a Jet Spouted Bed", Drying Technology, 13 (8&9), 1825 - 1840, 1995.
33. C. Tangsathitkulchai and M. Tangsathitkulchai, "Study of Slag Deposit Formation using Synthetic Coals", 7th APCCHE Congress, Taipei, Mar 4 - 6, 1996.
34. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล, พุธร เกตุกราย, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, พิชัย นิมิตรยงสกุล, ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, ทิน เกตุรัตน์บวร "การคัดเลือกถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต (Classified Fly Ash for Concrete Utilization)", บทความเสนอในการประชุมใหญ่ทางวิชาการ ประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 15-18 สิงหาคม 2539, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

35. S.Tia, S. Suwanayuen, C. Tangsatitkulchai, C. Phromvichit and W. Nimipal, "Heat Transfer Characteristics in a Small - Scale Fluidized Bed Boiler", *Int. J. Energy Research*, vol.20, 521- 530, 1996.
36. C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", *Proceedings of 8th Chemical Engineering Conference, Mahidol University*, 17-18 Dec, 1998.
37. C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Effect of Fluidized Bed Materials on Sintering Behavior of Coal Ashes", *Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University*, 22 - 24 Nov, 1999.
38. C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Effect of Bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to Agglomeration in Fluidized Bed Combustion", *Fuel Processing Technology*, 72, 163-183, 2001.
39. C. Tangsatitkulchai, "Acceleration of Particle Breakage Rates in Wet Batch Ball Milling", *Powder Technology*, 124, 67-75, 2002.
40. C.Tangsatitkulchai, "The Effect of Slurry Rheology on Fine Grinding in a Laboratory Ball Mill", *International Journal of Mineral Processing*, 69, 29-47, 2003.
41. C.Tangsatitkulchai, "Effects of Slurry Concentration and Powder Filling on the Net Mill Power of a Laboratory Ball Mill", *Powder Technology*, 137, 131-138, 2003.
42. C.Tangsatitkulchai, Y.Sittichaitaweekul and M.Tangsatitkulchai, "Temperature Effect on The Viscosities of Palm Oil and Coconut Oil Blended with Diesel Oil", *Journal of American Oil Chemists' Society*, 81, 401-405, 2004.
43. C.Tangsatitkulchai, "The Effect of Medium Viscosity on Breakage Parameters of Quartz in a Laboratory Ball Mill, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 2104-2112, 2004.
44. S. Junpirom, D. Do. Do, C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "A Carbon Activation Model with Application to Longan Seed Char Gasification", *Carbon*, 43, 1936-1943, 2005.
45. S. Junpirom, C. Tangsatitkulchai, and M. Tangsatitkulchai, "Activated Carbon from Longan Seed by Carbon Dioxide Activation", paper presented at the *Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2004)*, Grand Hotel, Bangkok, 1-3 Dec, 2004.
46. Y.Ngernyen, C.Tangsatitkulchai, and M.Tangsatitkulchai, "The Modification of Acidic Surface Functionality of Wood-Based Activated Carbon", *Carbon Conference-Carbon 2005*, Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.

47. P.Luangkiattikhum, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Porous Characteristics of Activated Carbon Produced from Oil-Palm Solid Wastes by Carbon Dioxide Activation", Carbon Conference-Carbon 2005, Hilton Hotel, Gyeongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
48. S.Kruaysawat and C.Tangsathitkulchai, "Increasing Adsorption Efficiency of Activated Carbon for H₂S Removal by Surface Oxidation and Metal Addition", The 16th International Conference on Quantitative Methods for the Environmental Sciences, Friendship Hotel, Beijing, China, 21-26 Aug, 2005.
49. N.Punsuwan, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 2006, accepted.
50. N.Jiwalak, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Activated Carbon from Lignite Coal by Chemical Activation with Potassium Hydroxide" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 2006, accepted.
51. S.Junpirom, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Water Adsorption Equilibrium of Longan Seed Activated Carbons", International Congress of Chemistry and Environment, Indore, India, 24-26 Dec, 2005.



2. ประวัติผู้ร่วมงานวิจัย

นางมาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย (Malee Tangsathitkulchai)

ตำแหน่งปัจจุบัน

รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาเคมี

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันที่จบ
พ.ศ. 2515	ตรี	วทบ.	เคมี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2517	โท	วทม.	เคมีอินทรีย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2523	โท	M.S.	Inorganic Chemistry	Flinders University, Australia.
พ.ศ. 2529	เอก	Ph.D.	Fuel Science	Pennsylvania State University, U.S.A.

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

- เทคโนโลยีถ่านหิน
- ถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

ประสบการณ์งานวิจัย

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- (1) Reactions at Noble Metal/Ceramic Interfaces
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2520-2523)
- (2) Fundamental Studies of the Mechanisms of Slag Deposit Formation
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2525-2529)
- (3) Sintering and Slag Deposit Formation of Thai Lignite Ashes
(ผู้ร่วมวิจัย, พ.ศ. 2534-2537)
- (4) กระบวนการซินเทอริงของถ่านหินภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2540-2542)
- (5) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2541-2542)
- (6) การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนท์โดยวิธีกระตุ่นทางเคมี
(ผู้ร่วมวิจัย, ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2543-2544)

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

- (1) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน (ผู้ร่วมวิจัย, ทูลอุดมทุนการวิจัยปี 2545-2546 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ่านหิน กระบวนการซินเทอริงและพลังงานรวม 22 เรื่อง (ตั้งเอกสารแนบ)



บทความวิจัย (รศ.ดร.มาตี ตั้งสติกุลชัย)

1. Bruin, H.J. de., and Tangtreeratana, M., "Diffusion of Palladium Into MgO", Technical note, J. of Physics and Chemistry of Solids, vol. 42(4), 333-334, 1981.
2. Austin, L.G., Kinnman, W.P., Abbott, M.F., and Tangsathitkulchai, M., Ash Deposition in Syngas Coolers of Slagging Gasifiers", Electric Power Research Institute Project 1654-11, Final Report, 1984.
3. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., " Studies of Sintering of Coal Ash Relevant to Pulverized Coal Utility Boilers: Part 2: Preliminary Studies of Compressive Strength of Fly Ash Sinters", Fuel, vol 64, 86-92, 1985.
4. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., " Studies of Slag Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", American Society of Mechanical Engineering Paper No. 85.- JPGC - Pwr-45 presented at the Jt. ASME/IEEE Power Generation Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA, 20-24 Oct, 1985.
5. Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., "Nature of the Surface Involved in Fly Ash Adhesion on Boiler Steel", Short Communications, Fuel, vol. 64, 1764-1765, 1985.
6. Benson, S.A., Tangsathitkulchai, M., and Austin, L.G., " Studies of Ash Deposit Formation Using a Laboratory Furnace", Proceeding of an Annual Pittsburgh Coal Conference, 689-694, 1985.
7. Austin, L.G., Benson, S.A., Schobert, H.H., and Tangsathitkulchai, M., "Fundamental Studies of the Mechanism of Slag Deposit Formation", U.S. Department of Energy Report DOE/FE-70770, 1987.
8. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., " Studies of Boiler Slag Deposit Formation Using a Vertical Externally-Heated Tube Furnace", International Conference of Energy and Environment, Tara Hotel, Bangkok, November 27-30, 1990.
9. Tangsathitkulchai, C., Kuvarananchareon, C., and Tangsathitkulchai, M., "Sintering Study of Thai Lignite Ashes", 2nd Technical Meeting, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Thonburi, 7-8 Jun, 1994.
10. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., "Sintering of Coal Ashes: Effects of Temperature and Atmosphere", 4th National Chemical Engineering Conference, Khon Kaen University, 20-21 Oct, 1994.

11. Tangsathitkulchai, M., and Tangsathitkulchai, C., "Sintering of Coal Ashes: Effects of Extraction and Addition of Alkali - Glass Materials", Suranaree Journal of Science and Technology, vol. 1, No.2, 123-132, 1994.
12. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., " Effect of Environment Atmosphere on The Sintering of Thai Lignite Fly Ashes," Presented at the Engineering Foundation Conference:Application of Advanced Technology to Ash - Related Problems in Boilers,16-21 July, New Hampshire, USA, 1995.
13. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Study of Slag Deposit Formation Using Synthetic Coals," Presented at the 7th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers, Congress of Taipei Chem Exhibition. Taipei, Taiwan, March 4-6, 1996.
14. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Sintering Behavior of Coal Ashes under Fluidized Bed Combustion Conditions", 8th National Chemical Engineering Conference, Mahidol University, 17-18 Dec, 1998.
15. Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., "Effect of Fluidized Bed Materials on the Sintering Behavior of Coal Ashes", Regional Symposium on Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, 22-24 Nov, 1999.
16. C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Effect of Bed Materials and Additives on the Sintering of Coal Ashes Relevant to Agglomeration in Fluidized Bed Combustion", Fuel Processing Technology, 72, 163-183, 2001, 2000.
17. C.Tangsathitkulchai, Y.Sittichaitaweekul and M.Tangsathitkulchai, "Temperature Effect on the Viscosities of Palm Oil and Coconut Oil Blended with Diesel Oil", J.Am. Oil Chemists' Soc., 81, 401-405, 2004.
18. Y.Ngernyen, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "The Modification of Acidic Surface Functionality of Wood-Based Activated Carbon", Carbon Conference-Carbon 2005, Hilton Hotel, Gyoongju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
19. P.Luangkiattikhum, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Porous Characteristics of Activated Carbon Produced from Oil-Palm Solid Wastes by Carbon Dioxide Activation", Carbon Conference-Carbon 2005, Hilton Hotel, Gyengju, Korea, 3-7 Jul, 2005.
20. N.Punsuwan, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon" (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 2006, accepted.

21. N.Jiwalak, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, “Activated Carbon from Lignite Coal by Chemical Activation with Potassium Hydroxide” (in Thai), Suranaree Journal of Science and Technology, 2006, accepted.
22. S.Junpirom, C.Tangsathitkulchai, and M.Tangsathitkulchai, “Water Adsorption Equilibrium of Longan Seed Activated Carbons”, International Congress of Chemistry and Environment, Indore, India, 24-26 Dec, 2005.

