บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 การคัดขนาดขี้เลื่อยไม้ยางพารา

ผลการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 10, 20, 35 และ 48 (มาตรฐานไทเลอร์) เพื่อเลือกขนาดขี้เลื่อยที่เป็นปริมาณส่วนใหญ่ของวัตถุดิบ พบว่าขี้เลื่อยส่วนใหญ่จะอยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 35 และถูกนำมาทดสอบเพื่อยืนยันผลการกระจายขนาดกับเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

จากผลการทดลองการกระจายขนาดอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และตกค้างบนตะแกรงเบอร์ 35 จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 356 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดพบว่าขนาดอนุภาคบนฐานพื้นที่ผิวเป็น 393 ไมครอน ในขณะที่การกระจายขนาดในช่วงร้อยละ 50 มีค่าไม่เกิน 488 ไมครอน นั่นคือมีอนุภาคที่เล็กและใหญ่กว่า 488 ไมครอน อยู่อย่างละร้อยละ 50 และในช่วงร้อยละ 90 มีค่าไม่เกิน 827 ไมครอน นั่นคือมีอนุภาคที่เล็กกว่า 827 ไมครอน อยู่ร้อยละ 90 ดังนั้นผลการกระจายขนาดจากการร่อนตะแกรงจึงให้ผลสอดคล้องกับเครื่องวิเคราะห์ขนาด สำหรับการคัดขนาดของขี้เลื่อยเพื่อป้องกันปัจจัยของขนาดที่อาจมีผลกระทบต่อผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามวิธีที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก ของขี้เลื่อยไม้ยางพารา พบว่าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณเถ้าร้อยละ 3.01 ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าร้อยละ 25.75 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 61.66 และความชื้นร้อยละ 9.58 จากการสำรวจเอกสารพบว่าวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณสมบัติที่ดี ต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงและปริมาณเถ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นที่มักนิยมนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและวัตถุดิบชนิดอื่นแสดงในตารางที่ 4

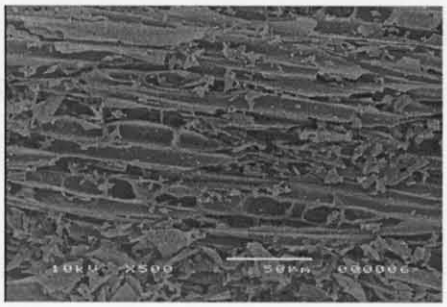
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและวัตถุดิบชนิดอื่น

วัตถุดิบ	ร้อยละ			
	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	ความชื้น
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา[1] (wet basis)	3.01	61.66	25.75	9.58
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา[2] (wet basis)	0.74	69.68	23.38	6.2
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา[3] (wet basis)	4.95	62.95	24.15	7.95
กะลาปาล์ม[4] (wet basis)	2.2	69.87	16.06	11.87
กะลาตาลโตนด[5] (dry basis)	1.9	80.1	18	-
แกลบ[6] (dry basis)	20	62.6	17.4	-
ฟางข้าว[7] (dry basis)	7.3	74.4	18.3	-
เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์[8] (dry basis)	1.9	92.45	5.65	-

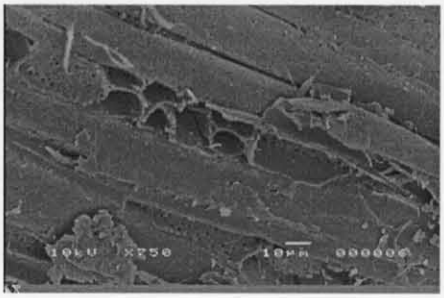
ที่มา: [1] จากงานทดลองในงานวิจัย, [2] Srinivasakannan และ Bakar (2004), [3] Kumar *et al.* (2006), [4] ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ (2540), [5] บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537), [6,7] จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และคณะ (2549), [8] ชิตวรรณ นาคฤทธิ์ (2544)

4.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว

ลักษณะพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพาราที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 9 ถึง 11 เป็นการถ่ายด้วยกำลังขยาย 500 เท่าและ 750 เท่า พบว่าโครงสร้างพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราหลังการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมมาก โดยพบว่าโครงสร้างมีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากหลังจากการกระตุ้น ทั้งกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเข้าไปขจัดเถ้าและสารระเหยต่างๆที่อยู่ในรูพรุนของขี้เลื่อยออกจากรูพรุน จึงส่งผลให้ถ่านที่ได้มีโครงสร้างของกลุ่มรูพรุนทรงกระบอกเพิ่มขึ้นจากเดิม จึงสังเกตรูพรุนได้ชัดเจนขึ้นและมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับรูพรุนที่เกิดในถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่าเป็นรูพรุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาวและไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างกัน (cross link) ซึ่งเป็นลักษณะของไม้เนื้ออ่อน Kumer *et al.* (2006)

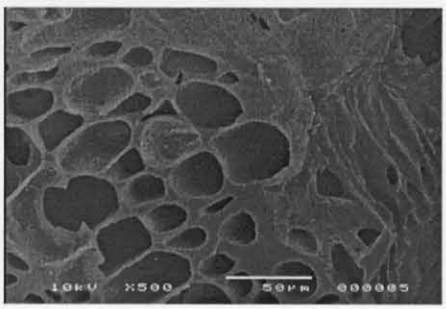


(a)

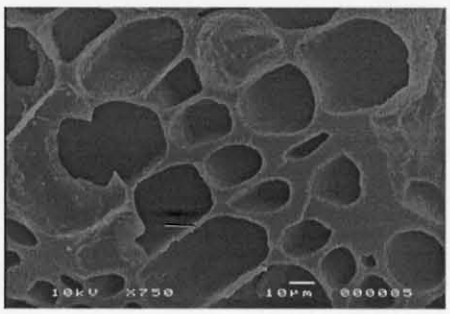


(b)

รูปที่ 9 โครงสร้างพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราด้วยเครื่องวิเคราะห์ SEM ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 750 เท่า

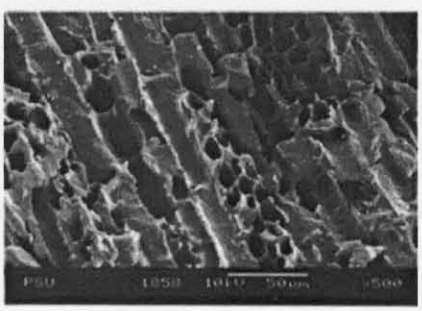


(a)

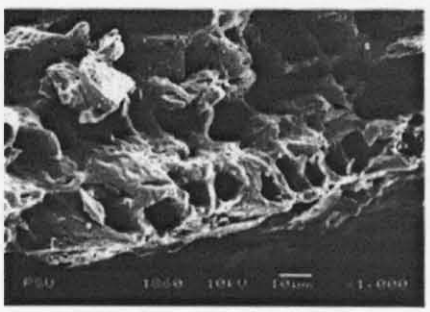


(b)

รูปที่ 10 โครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกผ่านเครื่องวิเคราะห์ SEM ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 750 เท่า



(a)



(b)*

รูปที่ 11 โครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยไอน้ำผ่านเครื่องวิเคราะห์ SEM ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 1000 เท่า*

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

ผลการทดลองการศึกษา 3 ปัจจัยหลัก (ได้แก่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดในช่วง 1:1-1:3, อุณหภูมิการกระตุ้น 500-700 องศาเซลเซียส, และเวลาการกระตุ้น 45-90 นาที) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่สภาวะต่างๆ

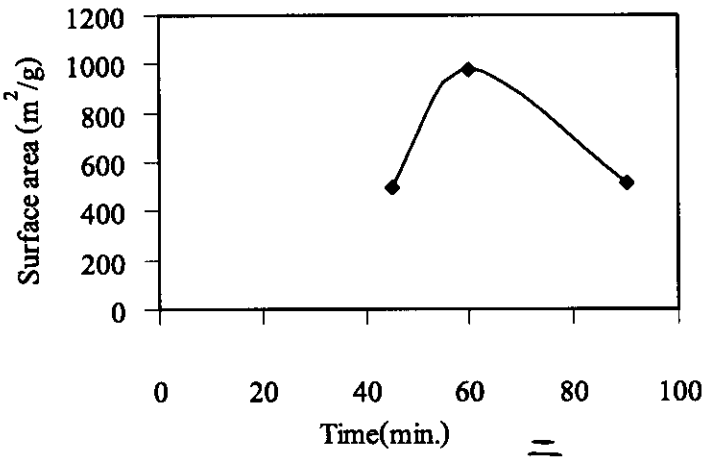
Conditions			Properties				
Ratio	Temp. (°C)	Time (min.)	Surface area (m^2/g)	Bulk Density (g/cm^3)	Iodine Ads. (mg/g)	pH	% yield
Experiment I							
1:2	500	45	499	0.2922	232	3.101	49.03
1:2	500	60	997	0.2836	341	3.044	48.54
1:2	500	90	513	0.2783	215	2.985	44.81
Experiment II							
1:2	400	60	417	0.3447	268	2.847	54.68
1:2	500	60	997	0.2836	341	3.044	48.54
1:2	600	60	1045	0.2798	364	3.207	46.80
1:2	700	60	323	0.2798	193	3.019	46.89
Experiment III							
1:1	500	60	500	0.3075	194	3.326	55.62
1:2	500	60	997	0.2836	341	3.044	48.54
1:3	500	60	490	0.2555	246	2.595	47.07

* ผลการทดลองที่แสดงมาจากค่าเฉลี่ยของการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (ทุกสภาวะ)

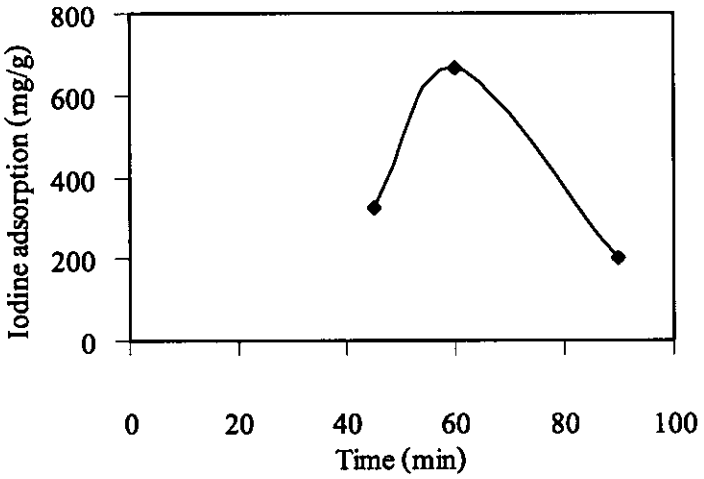
4.4.1 ผลของเวลาการกระตุ้น

จากการศึกษาผลของเวลาการกระตุ้นต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดคงที่เป็น 1:2 พบว่าเวลามีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงได้ในรูปที่ 12-16 ดังต่อไปนี้ รูปที่ 12 แสดงถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงสุดที่เวลาค่าหนึ่ง หลังจากนั้น

การเพิ่มของเวลาจะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เป็นเพราะหากถ่านถูกออกซิไดซ์เป็นเวลานาน ผนังของรูพรุนจะเกิดการยุบตัว ทำให้โครงสร้างของรูพรุนไมโครพอร์มีจำนวนลดลง สำหรับค่าการดูดซับไอโอดีนพบว่าทุกสภาวะการทดลองมีค่าค่อนข้างน้อย แสดงถึงจำนวนรูพรุนเมโซพอร์ที่น้อยนั่นเอง อย่างไรก็ตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับไอโอดีนมีความคล้ายคลึงกับแนวโน้มของพื้นที่ผิวจำเพาะต่อเวลา

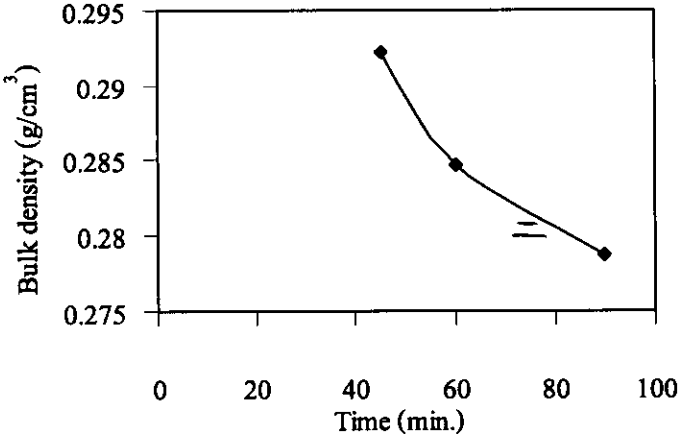


รูปที่ 12 ผลของเวลาต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และอุณหภูมิ 500 °C

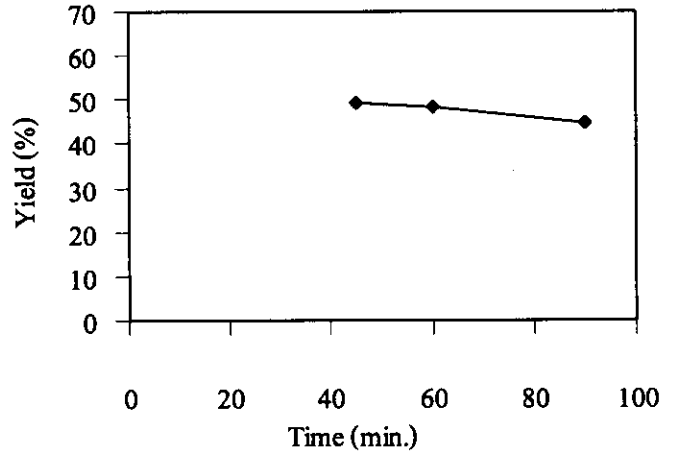


รูปที่ 13 ผลของเวลาต่อการดูดซับไอโอดีน เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และอุณหภูมิ 500 °C

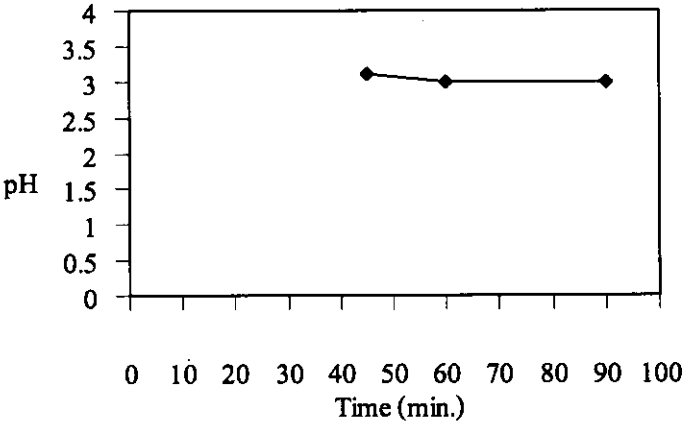
การเพิ่มเวลาการกระตุ้นส่งผลโดยตรงต่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพราะทำให้มวลและโครงสร้างไม้เปลี่ยน โดยมวลของไม้จะลดลงและโครงสร้างของไม้เกิดสารระเหยต่างๆ เข้าสู่สถานะแก๊สมากขึ้น ดังนั้นจึงพบแนวโน้มของความหนาแน่นปรากฏลดลงเมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 14 ในทำนองเดียวกันค่าร้อยละผลได้ให้แนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 15 สำหรับค่าความเป็นกรดด่างมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 16 ทั้งนี้การใช้เวลาการผลิตที่นานจะทำให้กรดมีการดูดซับเข้าในเนื้อไม้ได้มากขึ้นนั่นเอง ความเป็นกรดจึงเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีนัยยะที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงเวลาการเตรียมวัตถุดิบให้กรดซึมซาบเข้าสู่เนื้อไม้ได้ตั้งทิ้งไว้นานถึง 24 ชั่วโมงแล้ว สำหรับการศึกษาด้วยเทคนิค RSM จะเลือกช่วงเวลาในการกระตุ้นที่ 45 – 90 นาที เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต



รูปที่ 14 ผลของเวลาต่อความหนาแน่นปรากฏ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และอุณหภูมิ 500 °C



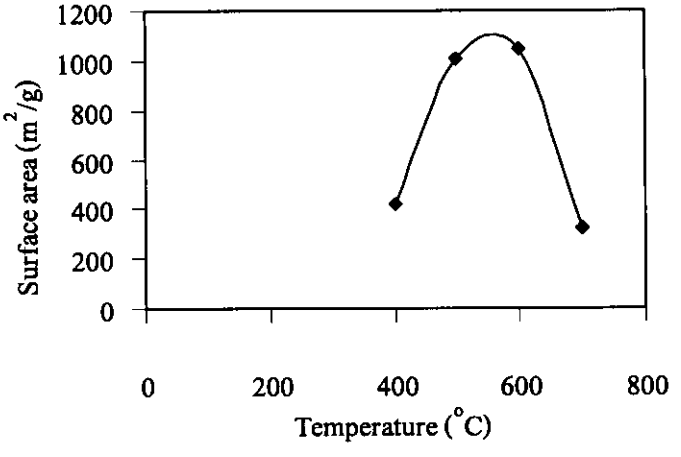
รูปที่ 15 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และอุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ 16 ผลของเวลาต่อค่าความเป็นกรดด่าง เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และอุณหภูมิ 500 °C

4.4.2 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้น

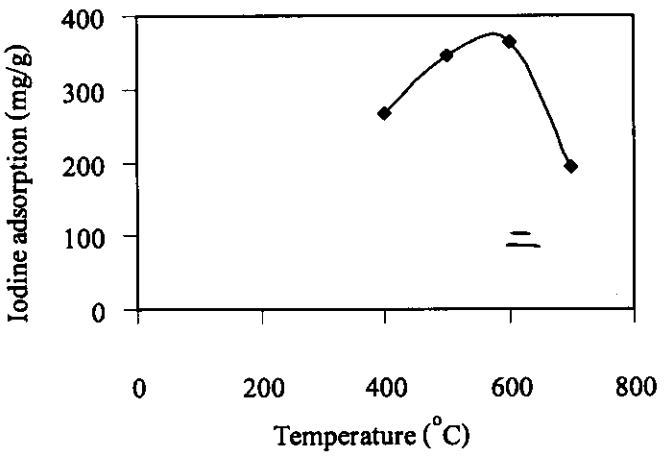
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการกระตุ้นต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อเวลาการกระตุ้น 60 นาที อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:2 พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงได้ในรูปที่ 17-20 ดังต่อไปนี้ รูปที่ 17 แสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น โดยพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.4.1 นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั้น ความสามารถในการไล่น้ำมันทาร์กับสารระเหยต่างๆ ออกจากผิวถ่านเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ความเป็นรูพรุนเกิดได้ดี อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิสูงเกินไป การคาร์บอไนเซชันที่เกิดอย่างต่อเนื่องจะส่งผลทำให้ผนังของรูพรุนเกิดการยุบตัว และทำลายสภาพความเป็นรูพรุนได้ เพราะการเพิ่มอุณหภูมิจะเกิด



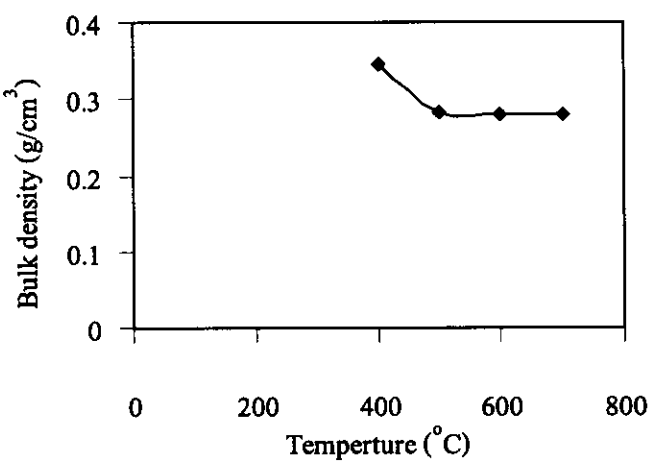
รูปที่ 17 ผลของอุณหภูมิต่อค่าพื้นที่ผิว เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และเวลา 60 นาที

การออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวถ่าน ถ่านกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิสูงมากจึงมีพื้นที่ผิวน้อยลง ผลการทดลองการดูดซับไอโอดีนในรูปที่ 18 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองในส่วนของพื้นที่ผิว โดยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด หลังจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิสูงจะไม่มีผลต่อการดูดซับมากนัก

จากผลการศึกษาข้อ 4.4.1-4.4.2 อาจกล่าวได้ว่าในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นมาถึงระดับค่าที่เหมาะสมนั้น จะเกิดรูพรุนไมโครพอร์จำนวนมาก และพร้อมๆ กันนั้นรูพรุนเมโซพอร์เกิดด้วยเช่นกัน จึงพบว่าค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นโดยตลอด อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิและเวลาสูงกว่าค่าที่เหมาะสมแล้ว จำนวนรูพรุนที่เพิ่มมักเป็นรูพรุนแบบเมโซพอร์เป็นหลัก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จะเสียรูพรุนไมโครพอร์ไป ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มลดลงหากอุณหภูมิกระตุ้นสูงเกินไปและ/หรือเวลากระตุ้นนานเกินไป

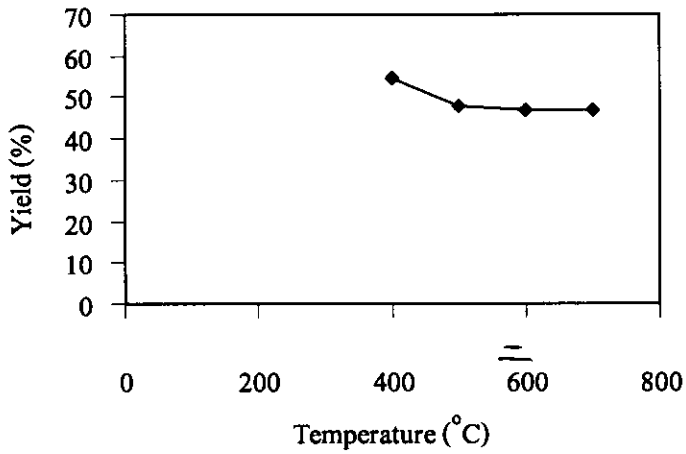


รูปที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอโอดีน เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และเวลา 60 นาที

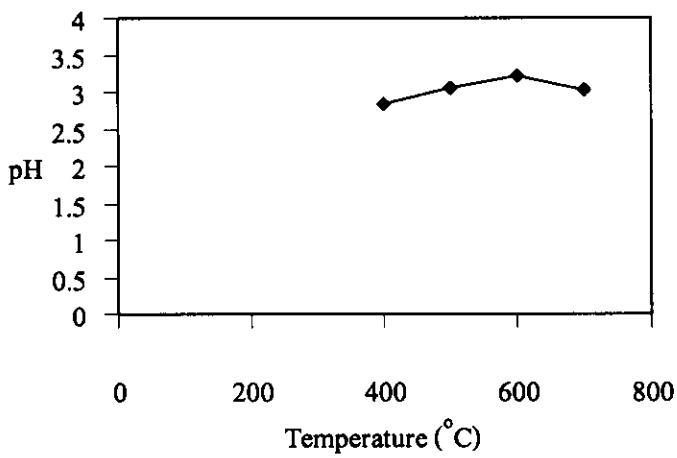


รูปที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นปรากฏ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และเวลา 60 นาที

สำหรับผลการทดลองของอุณหภูมิการกระตุ้นต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ และร้อยละผลได้แสดงในรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ โดยพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.4.1 นั่นคือการเพิ่มอุณหภูมิการเผามีผลโดยตรงต่อน้ำหนักและโครงสร้างไม้ ส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้จะลดลง โดยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงแรก หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม้ถึงจุดสมดุลของมัน สำหรับผลการทดลองค่าความเป็นกรดด่างแสดงดังรูปที่ 21 ความเป็นกรดด่างมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย สำหรับการศึกษาด้วยเทคนิค RSM จะเลือกอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 400-700 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตจึงเป็นช่วงที่เลือกเพื่อศึกษาร่วมกับ RSM



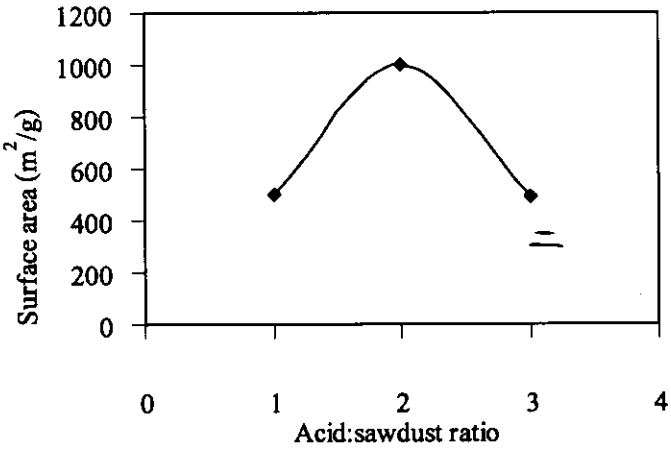
รูปที่ 20 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และเวลา 60 นาที



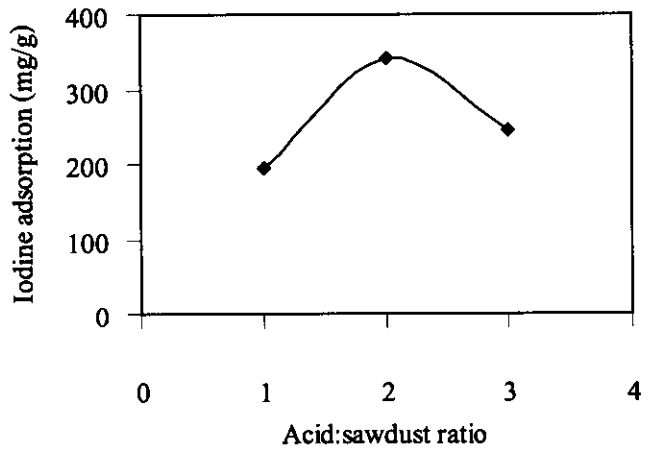
รูปที่ 21 ผลของอุณหภูมิต่อความเป็นกรดด่าง เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด 1:2 และเวลา 60 นาที

4.4.3 ผลของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด

การศึกษาผลของของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อเวลาการกระตุ้น 60 นาที อุณหภูมิกระตุ้น 500 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 22-26 ดังต่อไปนี้ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเพิ่มขึ้นแล้วถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนค่าหนึ่ง (สูงสุดที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:2) หลังจากนั้นการเพิ่มของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดจะทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงดังแสดงในรูปที่ 22 ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาผลการทดลองค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 23 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองของ

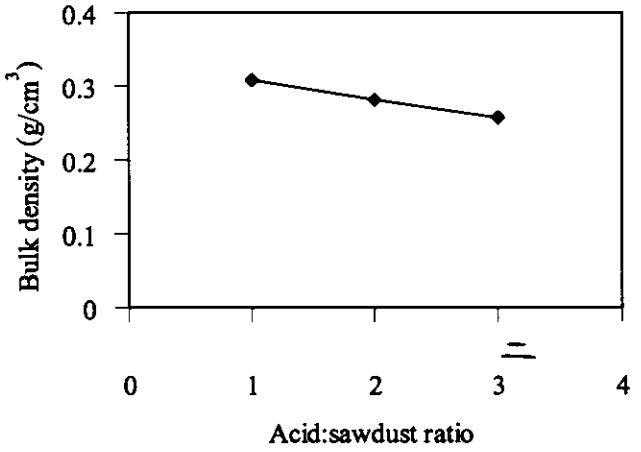


รูปที่ 22 ผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อค่าพื้นที่ผิว เมื่ออุณหภูมิ 500 °C และเวลา 60 นาที

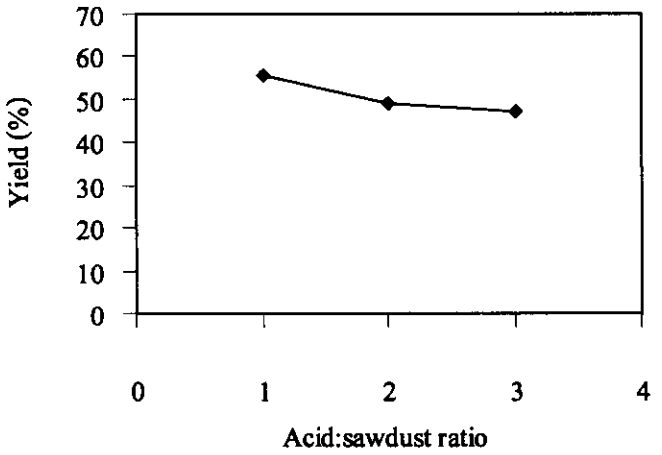


รูปที่ 23 ผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่ออุณหภูมิ 500 °C และเวลา 60 นาที

พื้นที่ผิวจำเพาะ ทั้งนี้เป็นเพราะที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดมีค่าน้อยนั้น จะทำให้กรดไม่สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ส่งผลทำให้ความสามารถในการไล่น้ำมันกับสารระเหยต่างๆ ออกจากผิวถ่านจึงเกิดได้ไม่ดี จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ่านได้น้อย พื้นที่ผิวจึงมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณกรดที่มากเกินจะไม่ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะกรดส่งผลต่อการสูญเสียองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนเช่นกัน สำหรับค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงไปด้วย ดังรูปที่ 24 และ 25 ตามลำดับ

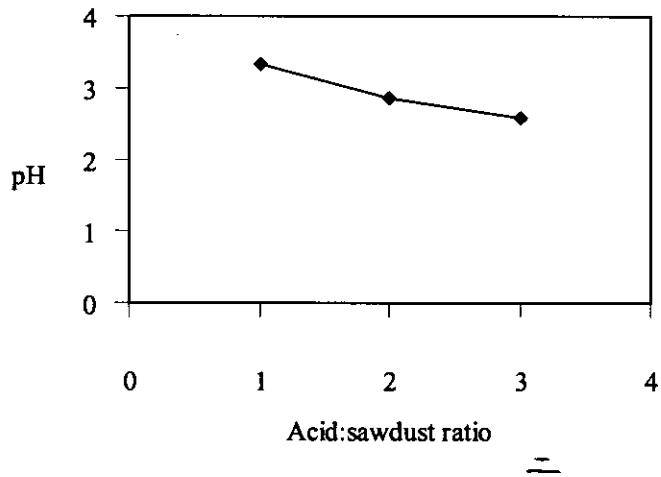


รูปที่ 24 ผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อความหนาแน่นปรากฏ เมื่ออุณหภูมิ 500 °C และเวลา 60 นาที



รูปที่ 25 ผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อร้อยละผลได้เมื่ออุณหภูมิ 500 °C และเวลา 60 นาที

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนกรดเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดของถ่านเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์นั่นเอง ดังรูปที่ 26 ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนในช่วง 1:1-1:2 เพื่อศึกษากับ RSM เพราะอัตราส่วนที่สูงกว่านี้ไม่มีผลต่อคุณสมบัติที่ดีของถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี



รูปที่ 26 ผลอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อความเป็นกรดด่าง เมื่ออุณหภูมิ 500 °C และเวลา 60 นาที

4.5 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

ผลการทดลองที่ได้ออกแบบไว้แสดงในตารางที่ 6 และสามารถนำมาสร้างแบบจำลองชนิดยกกำลังสองโดยใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม Essential Regression เพื่อหาผลตอบสนองต่อค่าพื้นที่ผิว BET (Y_1), ค่าการดูดซับไอโอดีน (Y_2), และร้อยละผลได้ (Y_3) แสดงในตารางที่ 7 สำหรับตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA โดยข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบจำลองจากการวิเคราะห์การถดถอยมีระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้แบบจำลองแสดงค่า R^2 และ R^2 adjusted ที่สูง ในขณะที่ค่า CV มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองที่ดี นั่นคือ อาจกล่าวได้ว่าความผันแปรทั้งหมดของพื้นที่ผิวหรือค่าการดูดซับไอโอดีน หรือร้อยละผลได้มีความเกี่ยวพันหรือมีสาเหตุมาจากความผันแปรของตัวแปรอิสระทั้งสามคือ อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด เวลาการกระตุ้น และอุนหภูมิการกระตุ้นอย่างชัดเจน ซึ่งเปอร์เซนต์ส่วนที่เหลือของความผันแปรตามจะเกิดจากสาเหตุอื่นๆ เช่น กระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ เป็นต้น หรือกล่าวได้ว่าตัวแปรตามทุกตัวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระทั้งสามอย่างมีนัยสำคัญ การสรุปผลยอมรับแบบจำลองใช้เกณฑ์ค่า Sig.F < 0 0.05 (95% confidence) พบว่าทุกแบบจำลองสอดคล้องกับเงื่อนไข ในทำนองเดียวกันการทดสอบ Lack of Fit F-test เพื่อตรวจสอบแบบจำลองสามารถใช้อธิบายข้อมูลการทดลอง ซึ่งในที่นี้จะใช้เงื่อนไขค่า Sig.F > 0.05 เมื่อ Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้ของ Y_1, Y_2 และ Y_3 จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทำนายค่า

สำหรับตารางที่ 9 แสดงค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) และ p-value ของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง เพื่อตัดสินระดับความสำคัญของสัมประสิทธิ์ สำหรับ p-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสัมประสิทธิ์นั้นมีความสำคัญ หรือหากค่า p-value มากกว่า 0.1 แสดงถึงความไม่สำคัญของสัมประสิทธิ์เทอมนั้น ดังนั้น สัมประสิทธิ์แบบจำลองของพื้นที่ผิวทุกเทอมแสดงความสำคัญต่อการทำนายพื้นที่ผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอมยกกำลังสองของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด สำหรับแบบจำลองของการดูดซับไอโอดีนพบว่าเทอมที่มีความสำคัญต่อการทำนายคือ $x_1, x_1^2, x_1x_3, x_2^2, x_2x_3, x_3^2$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอมยกกำลังสองของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด และเทอมผลคูณระหว่างอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น ในทำนองเดียวกันเทอมที่มีความสำคัญต่อแบบจำลองของร้อยละผลได้คือเทอมผลคูณของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดและเวลาการกระตุ้น

กราฟพื้นผิวของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 2 ตัวเทียบกับค่าตัวแปรตามของแบบจำลองได้แสดงในรูปที่ 27-35 ดังนี้ กราฟรูปที่ 27-29 แสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรอิสระต่อพื้นที่ผิว BET โดยแสดงความสัมพันธ์แบบกราฟ 3 มิติ และแบบคอนทัวร์ (contour plot) สำหรับกราฟพื้นผิวแสดงอย่างผลความเป็นควอดราติก (หรือยกกำลังสอง) อย่างชัดเจนระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรอิสระ ซึ่งจากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวสูงสุดแสดงได้เป็นจุดสูงสุดของกราฟพื้นผิว หรือเป็นจุดเล็กๆ ในวงรีชั้นในด้านบนของคอนทัวร์พล๊อตดังรูปที่ 27 ในที่นี้พบว่าพื้นที่ผิวมีค่าสูงสุด 1271 m^2/g ณ สภาวะการผลิตคืออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.6 อุณหภูมิการกระตุ้น 552 องศาเซลเซียส และเวลา 73 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองพบว่าสภาวะที่ให้ค่าพื้นที่ผิวดีที่สุด 1332 m^2/g คือสภาวะที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:1.5 อุณหภูมิการกระตุ้น 550 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้โดยใช้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง

สำหรับกราฟรูปที่ 30-32 แสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรอิสระต่อการดูดซับไอโอดีน พบว่ากราฟดังกล่าวมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟพื้นผิวของค่าพื้นผิวจำเพาะ ในที่นี้พบว่าค่าสูงสุดของการดูดซับไอโอดีน 678 mg/g ณ สภาวะการผลิตคืออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:1.6 อุณหภูมิกระตุ้น 400 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

ในทำนองเดียวกันกราฟรูปที่ 33-35 แสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรอิสระต่อร้อยละผลได้ พบว่ากราฟพื้นผิวของร้อยละผลได้จะมีค่าสูงสุดที่หลายจุด ซึ่งแตกต่างไปจากกราฟพื้นผิวของพื้นที่ผิวและการดูดซับไอโอดีน ทั้งนี้เนื่องจากร้อยละผลได้ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิเป็นสำคัญ เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโครงสร้างไม้อย่างเกี่ยวเนื่องและต่อเนื่องอย่างชัดเจน ซึ่งปรากฏในแบบจำลองว่าเทอมผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิมีความสำคัญสูงมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่นๆ ในที่นี้พบว่าร้อยละผลได้ที่ค่าสูงสุด 75 ณ สภาวะการผลิตคืออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.4 อุณหภูมิการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบ

ลำดับที่	สภาวะการทดลอง			สมบัติถ่านกัมมันต์		
	อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด X_1	อุณหภูมิการกระตุ้น X_2 (°C)	เวลาการกระตุ้น X_3 (min)	ค่าพื้นที่ผิว Y_1 (m^2/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน Y_2 (mg/g)	ร้อยละผลได้ Y_3 (%)
1	1:1.2	639	55	402	74	58.41
2	1:1.8	461	55	52	520	72.11
3	1:2	550	68	362	254	53.29
4	1:1.5	550	90	1115	344	54.76
5	1:1.8	639	55	432	284	59.75
6	1:1.5	700	68	785	394	52.34
7	1:1.2	639	81	306	462	79.78
8	1:1.2	461	81	301	258	67.52
9	1:1.8	639	81	975	553	47.5
10	1:1.5	550	45	868	376	50.95
11	1:1.5	550	68	1332	580	52.29
12	1:1.2	461	55	666	379	58.65
13	1:1.5	400	68	891	328	43.16
14	1:1	550	68	940	315	66.36
15	1:1.5	461	81	476	216	50.76

* ผลการทดลองที่แสดงมาจากค่าเฉลี่ยของการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (ทุกสภาวะ)

ตารางที่ 7 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

$$Y_1 = -106305 + 65427X_1 + 24.69X_2 - 35821X_1^2 + 63.15X_1X_3 - 0.02237X_2^2 - 0.674X_3^2$$

$$Y_2 = -1239.4 + 4169.6X_1 - 5.066X_2 - 2.213X_3 - 1359.0X_1^2 + 2.685X_1X_2 - 21.57X_1X_3 - 0.00865X_2^2 + 0.158X_2X_3 - 0.383X_3^2$$

$$Y_3 = 46.13 + 50.48X_1 + 0.06671X_2 - 0.969X_3 + 45.03X_1^2 - 0.06839X_1X_2 - 2.464X_1X_3 - 0.000160X_2^2 + 0.00337X_2X_3 + 0.01930X_3^2$$

Y_1 คือพื้นที่ผิว (m^2/g), Y_2 คือค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g), Y_3 คือร้อยละผลได้ (%)

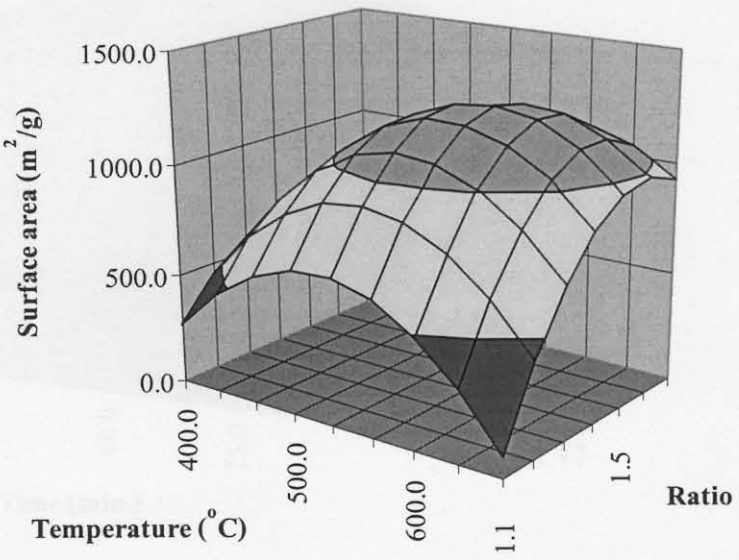
ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของแบบจำลองในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

source	SS	DF	MS	F-value	Sig.F*
1. แบบจำลอง Y_1 (R^2=0.88, R^2 adjusted = 0.81)					
Regression	1572888	6	262148	12.12	0.000438*
Residual	216239	10	21623.9		
LOF Error	181723	7	25960.4	2.2564	0.270
Pure Error	34516.1	3	11505.4		
Total	1789126	16			
2. แบบจำลอง Y_2 (R^2=0.92, R^2 adjusted = 0.83)					
Regression	231876	9	25764.0	9.358	0.00376*
Residual	19271.9	7	2753.1		
LOF Error	7665.6	4	1916.4	0.4954	0.746
Pure Error	11606.3	3	3868.8		
Total	251148	16			
3. แบบจำลอง Y_3 (R^2=0.94, R^2 adjusted = 0.85)					
Regression	1303.3	9	144.81	11.42	0.00204*
Residual	88.77	7	12.68		
LOF Error	67.73	4	16.93	2.4143	0.247
Pure Error	21.04	3	7.013		
Total	1392.1	16			

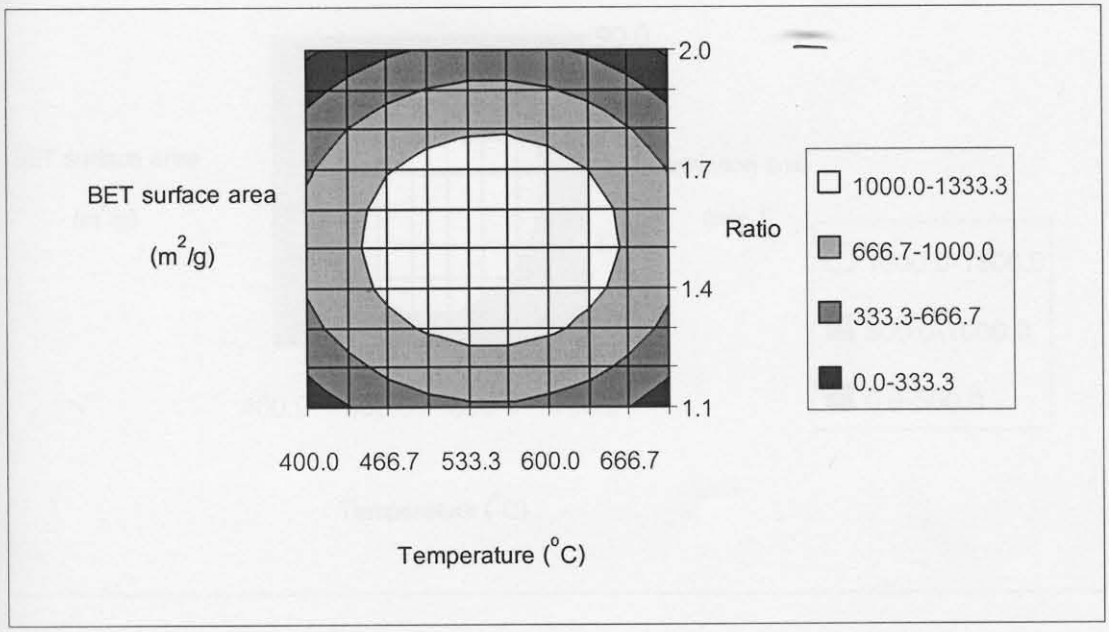
*Significant at "Sig.F < 0.05"

ตารางที่ 9 ข้อมูลสถิติของแบบจำลองในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

Model term	Coefficient estimate	Standard Error	P-value
Intercept	-10630.5	2108.2	0.000505
X_1	6542.7	1738.9	0.00371
X_2	24.69	5.703	0.00149
X_1^2	-3582.1	525.52	4.65E-05
X_1X_3	63.15	12.78	0.000586
X_2^2	-0.02237	0.00514	0.00144
X_3^2	-0.674	0.138	0.000625
2. แบบจำลอง Y_2			
Intercept	-1239.4	1343.8	0.387
X_1	4169.6	807.56	0.00130
X_2	-5.066	3.303	0.169*
X_3	-2.213	16.04	0.894*
X_1^2	-1359.0	218.53	0.000437
X_1X_2	2.685	1.196	0.05960*
X_1X_3	-21.57	8.187	0.03370
X_2^2	-0.00865	0.00195	0.00305
X_2X_3	0.158	0.02518	0.000415
X_3^2	-0.383	0.08688	0.00311
3. แบบจำลอง Y_3			
Intercept	46.13	90.31	0.625*
X_1	50.48	52.99	0.373*
X_2	0.06671	0.179	0.721*
X_3	-0.969	1.296	0.479*
X_1^2	45.03	13.51	0.01252
X_1X_2	-0.06839	0.05404	0.246*
X_1X_3	-2.464	0.370	0.000288
X_2^2	-0.000160	0.000129	0.256*
X_2X_3	0.00337	0.00114	0.02101
X_3^2	0.01930	0.00749	0.03668

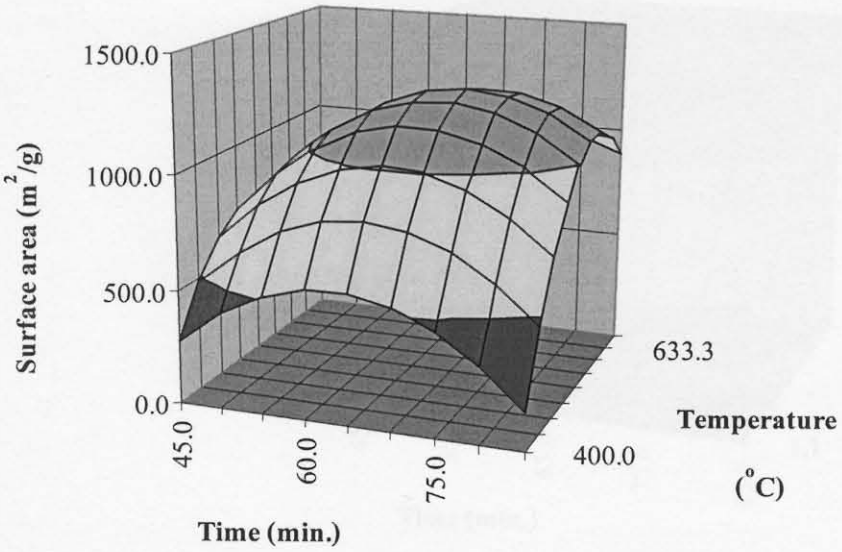


(a)

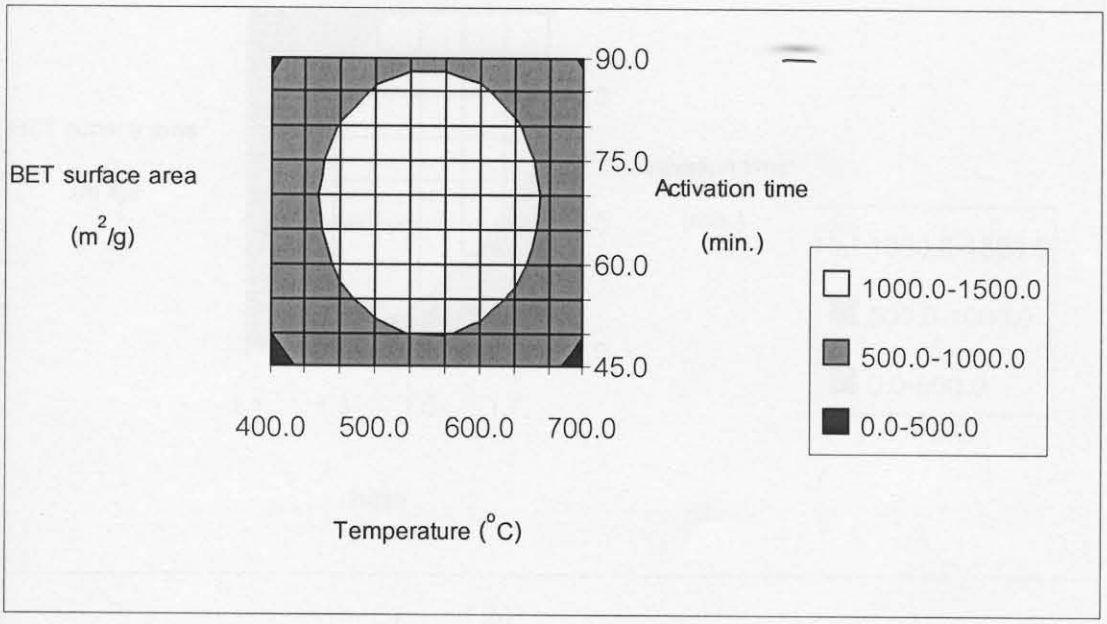


(b)

รูปที่ 27 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ (a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต

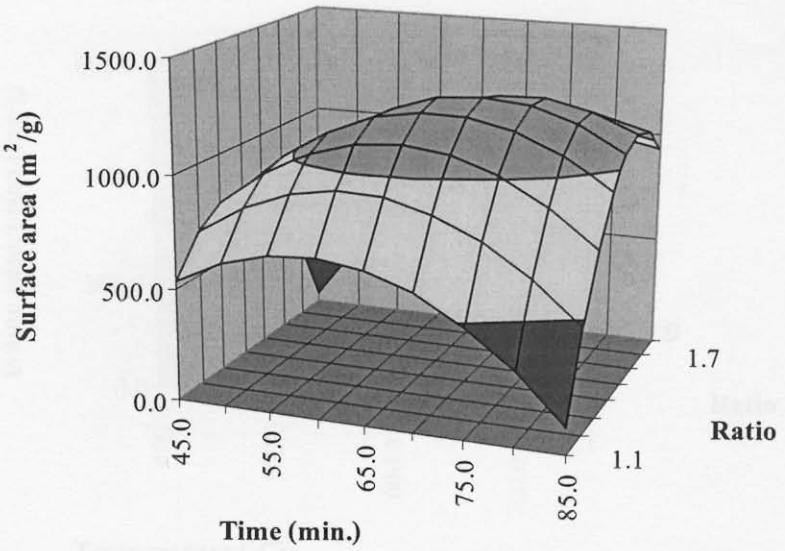


(a)

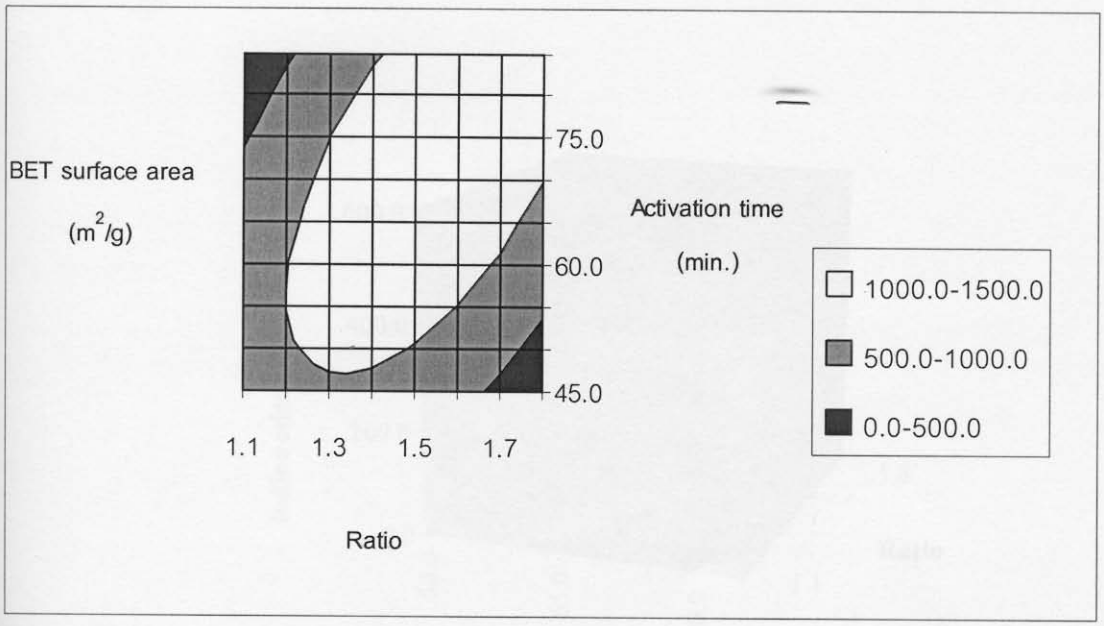


(b)

รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ
(a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต

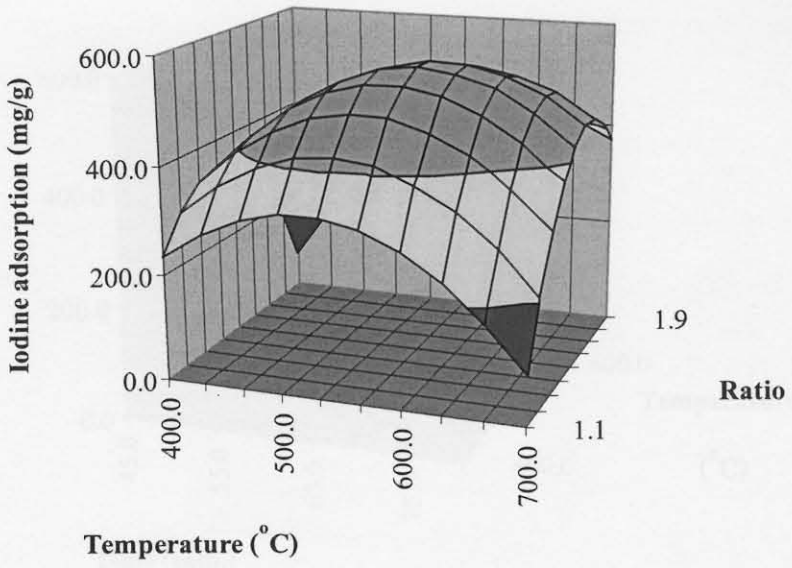


(a)

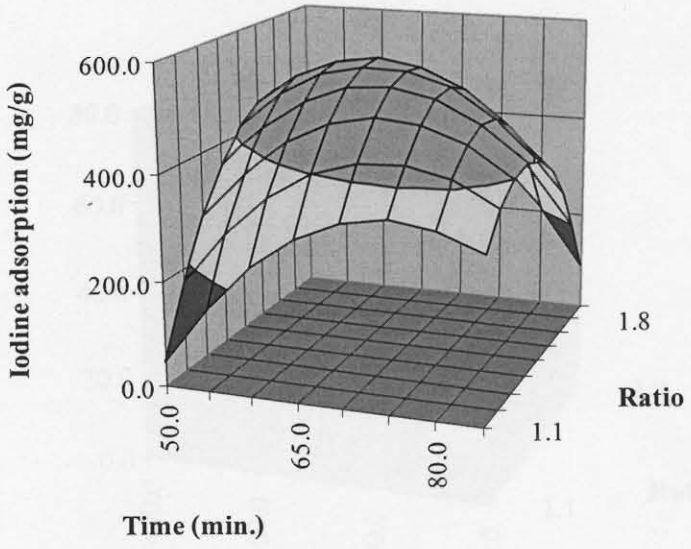


(b)

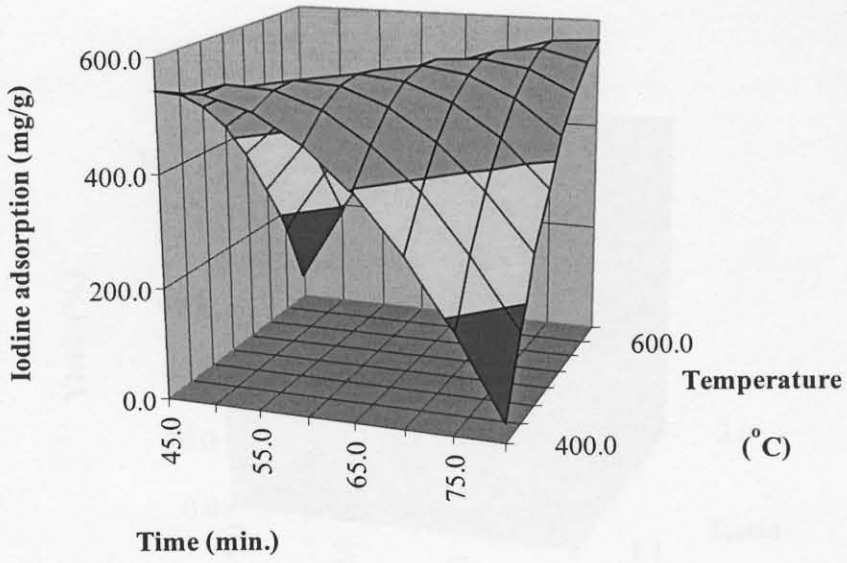
รูปที่ 29 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ (a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต



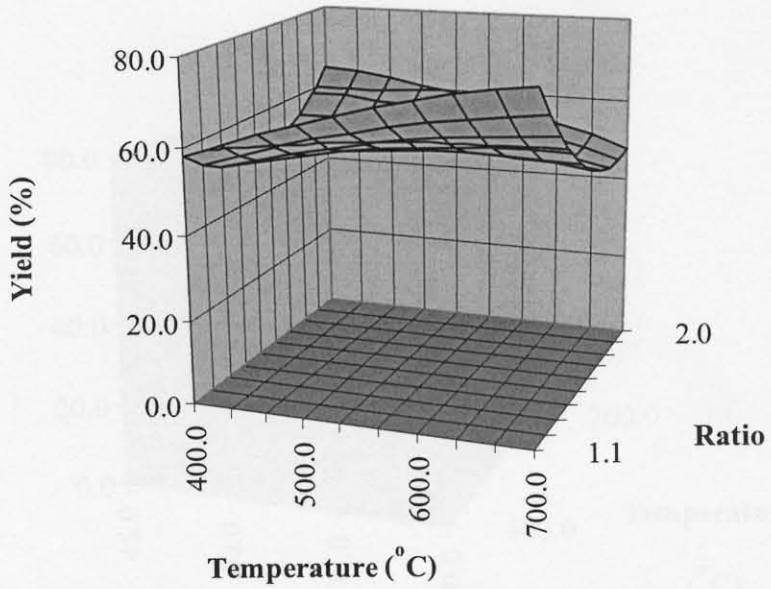
รูปที่ 30 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน



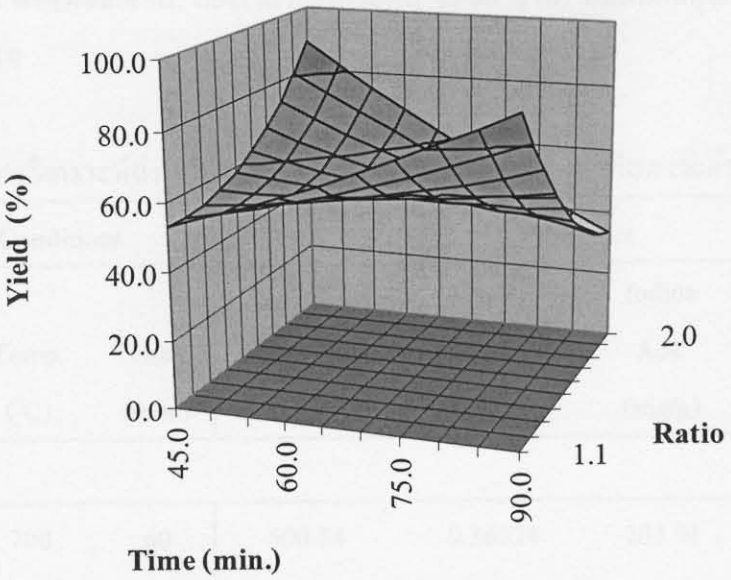
รูปที่ 31 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน



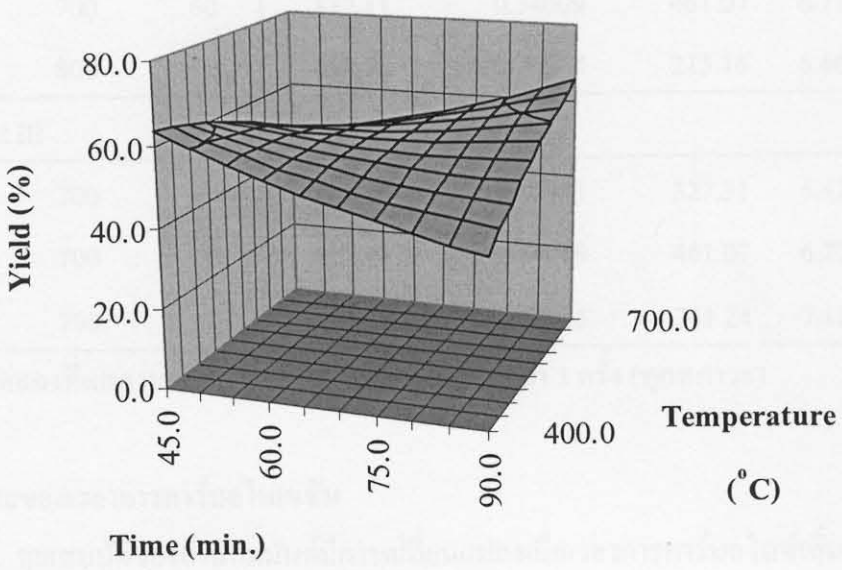
รูปที่ 32 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน



รูปที่ 33 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้



รูปที่ 34 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้



รูปที่ 35 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้

4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ

ผลการทดลองการศึกษา 3 ปัจจัยหลัก (เวลาการคาร์บอไนซ์ในช่วง 30-60 นาที, อุณหภูมิการกระตุ้น 500-800 องศาเซลเซียส, และเวลาการกระตุ้น 45-90 นาที) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ

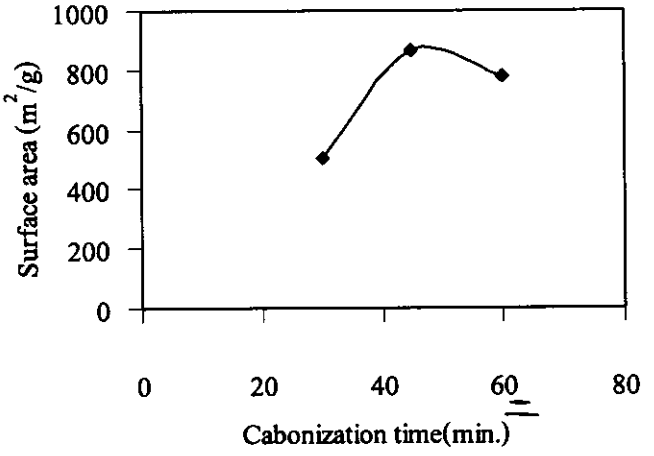
Conditions			Properties				
Time Carbonize (min)	Temp. (°C)	Time (min.)	Surface area (m^2/g)	Bulk Density (g/cm^3)	Iodine Ads. (mg/g)	pH	% yield
Experiment I							
30	700	60	500.54	0.36024	203.91	7.029	49.79
45	700	60	887.11	0.34009	461.07	6.772	47.45
60	700	60	778.16	0.32600	462.89	6.801	47.14
Experiment II							
45	500	60	160.66	0.42226	57.61	6.163	48.60
45	600	60	748.75	0.40038	407.15	6.453	48.01
45	700	60	887.11	0.34009	461.07	6.772	47.45
45	800	60	699.52	0.29874	213.16	6.668	46.58
Experiment III							
45	700	45	620.65	0.35381	327.31	6.476	47.71
45	700	60	887.11	0.34009	461.07	6.772	47.45
45	700	90	601.33	0.30065	201.24	7.134	46.28

* ผลการทดลองที่แสดงมาจากค่าเฉลี่ยของการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (ทุกสภาวะ)

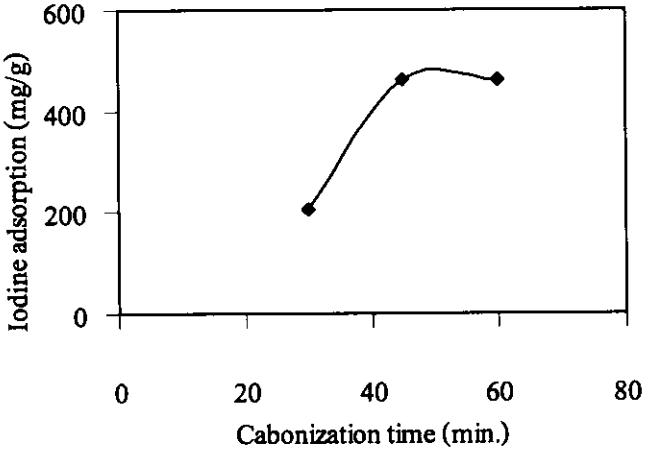
4.6.1 ผลของเวลาการคาร์บอไนเซชัน

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อสภาวะอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นคงที่ ผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยพบว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้น และเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งดังรูปที่ 36 หลังจากนั้นค่าพื้นที่ผิวจะลดลงอย่างช้าๆ ในทำนองเดียวกันแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับ

ไอโอดีนคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวต่อเวลาการคาร์บอไนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 37 ทั้งนี้เป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไม้เกิดจากการปฏิกิริยาไพโรไลซิส หากเวลาการคาร์บอไนซ์สั้นเกินไปแล้ว การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นถ่านขั้นต้นยังเกิดแบบไม่สมบูรณ์ ความพรุนต่ำ ซึ่งการเพิ่มเวลาการคาร์บอไนซ์ทำให้เกิดการขับไล่กลุ่มสารระเหยที่ไม่ได้อยู่บนผิวถ่านหรือมีโมเลกุลใหญ่ (ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานในการไล่) ได้ดีกว่า ดังนั้นการเพิ่มเวลาการคาร์บอไนซ์จึงสามารถไล่สารระเหยพวกนี้ออกไปได้ ส่งผลให้ถ่านมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากขึ้น และสามารถดูดซับสารได้มากขึ้น

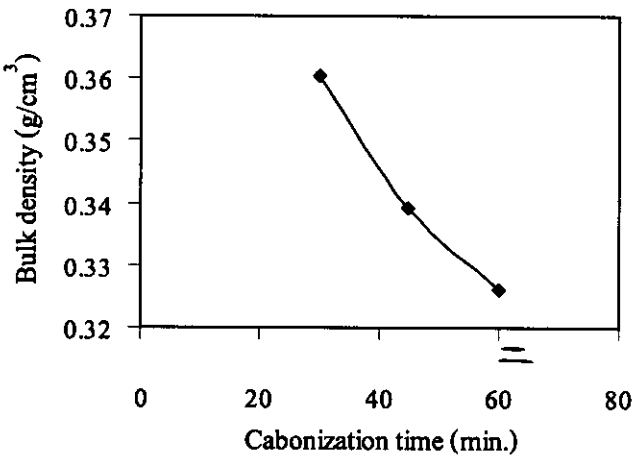


รูปที่ 36 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อค่าพื้นที่ผิว เมื่ออุณหภูมิ 700 °C และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

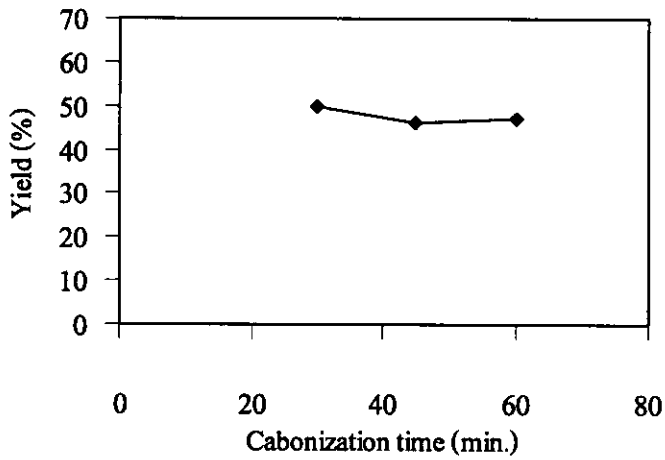


รูปที่ 37 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อการดูดซับไอโอดีน เมื่ออุณหภูมิ 700 °C และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

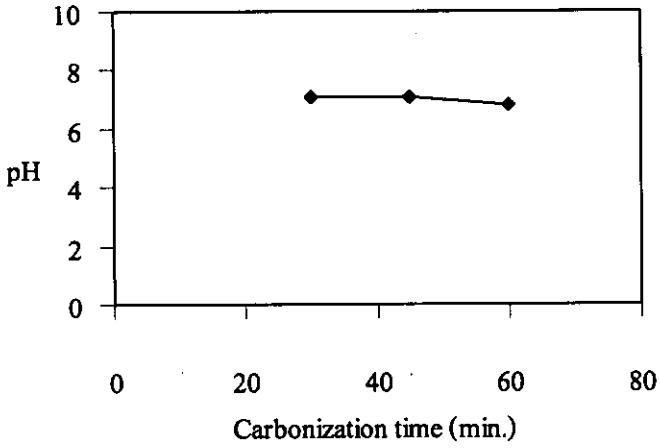
ค่าความหนาแน่นปรากฏมีค่าลดลงและค่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 38 ถึง 39 ทั้งนี้เวลาการคาร์บอไนซ์เซชันเป็นปัจจัยช่วงต้นของกระบวนการเท่านั้น ค่าสมบัติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากในกระบวนการกระตุ้น สำหรับรูปที่ 43 แสดงผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อค่าความเป็นกรดด่าง พบว่าค่าความเป็นกรดด่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการผลิตไม่มีการใช้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับขี้เลื่อยไม้ยางพารา สำหรับการศึกษาร่วมกับ RSM จึงเลือกเวลาการคาร์บอไนซ์ช่วง 30-60 นาที



รูปที่ 38 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อความหนาแน่นปรากฏ เมื่ออุณหภูมิ 700 °C และเวลาการกระตุ้น 60 นาที



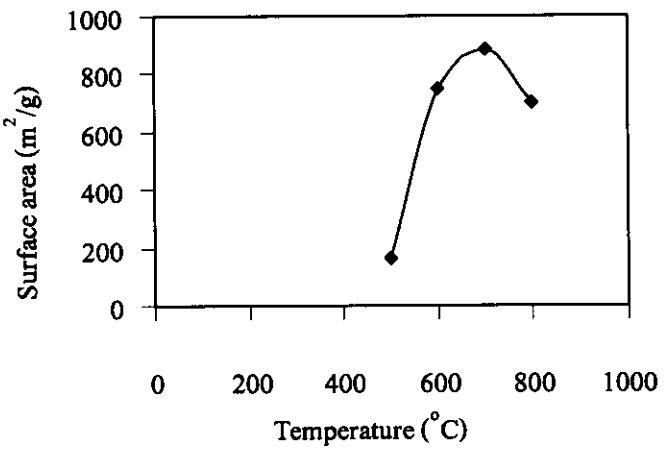
รูปที่ 39 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อร้อยละผลได้ เมื่ออุณหภูมิ 700 °C และเวลาการกระตุ้น 60 นาที



รูปที่ 40 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์ต่อความเป็นกรดด่าง เมื่ออุณหภูมิ 700 °C และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

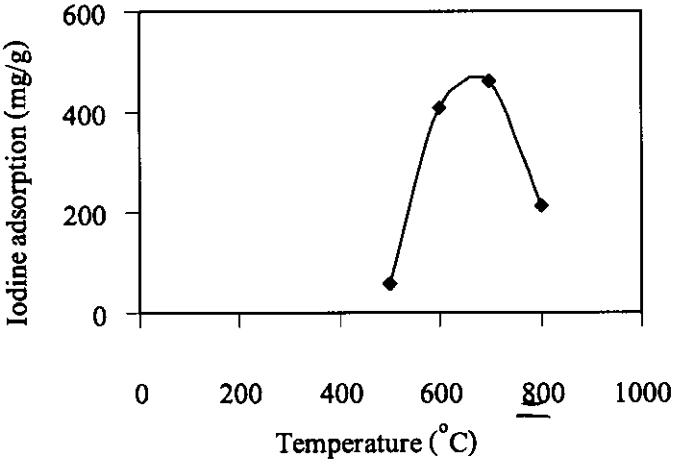
4.6.2 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้น

สมบัติของถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนต่ออุณหภูมิการกระตุ้น เมื่อเวลาการคาร์บอไนเซชันและเวลาการกระตุ้นคงที่ผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ และความสามารถในการดูดซับไอโอดีน โดยพบว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าต่ำมากที่อุณหภูมิการกระตุ้นต่ำๆ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งดังรูปที่ 41 หลังจากนั้นหากยังเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้นแล้ว ค่าพื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก ในทำนองเดียวกันแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับไอโอดีนในรูปที่ 42 คล้ายคลึงกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิว ทั้งนี้เป็น

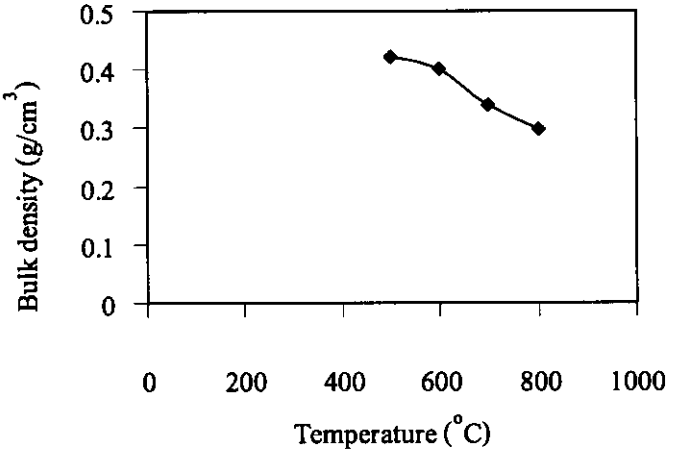


รูปที่ 41 ผลของอุณหภูมิต่อค่าพื้นที่ผิว เมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

เพราะการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นจะทำให้อัตราของโมเลกุลไอน้ำเกิดการแทรกซึมเข้าสู่เนื้อไม้ได้เพิ่มขึ้นมาก เกิดรูพรุนได้หลากหลายขนาด จึงทำให้พื้นที่ผิวมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Kumar et al., 2006) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับไอโอดีนแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของรูพรุนขนาดเมโซพอร์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากๆ ทำให้พื้นผิวเกิดความเสียหายจากอัตราการแทรกซึมของไอน้ำเข้าสู่เนื้อไม้ที่สูง ส่งผลให้ผนังที่กั้นระหว่างรูพรุนเกิดการยุบตัวทำให้รูพรุนขยายตัวเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น รูพรุนจึงถูกทำลายลง ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวลดลงได้

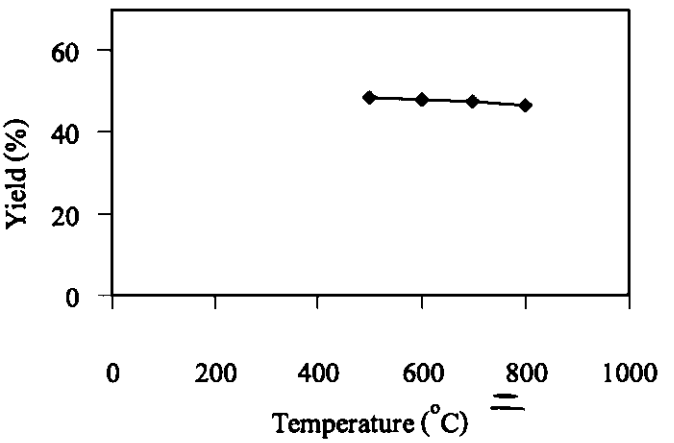


รูปที่ 42 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอโอดีน เมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

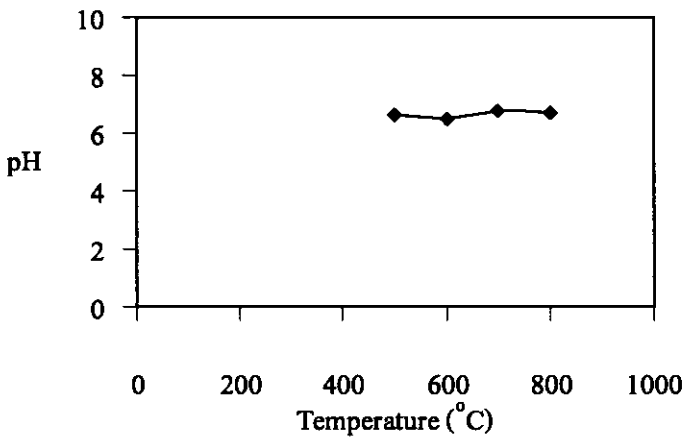


รูปที่ 43 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และเวลาการกระตุ้น 60 นาที

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นปรากฏในรูปที่ 43 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏจะลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ สำหรับรูปที่ 44 แสดงค่าร้อยละผลได้พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกสภาวะ ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดด่างต่ออุณหภูมิการกระตุ้นแสดงได้ในรูปที่ 45 ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรดด่างใกล้เคียงกันทุกสภาวะโดยอยู่ในช่วง 6-7 สำหรับช่วงของอุณหภูมิที่ใช้กับ RSM ของงานวิจัยนี้คือ 500-700 องศาเซลเซียส



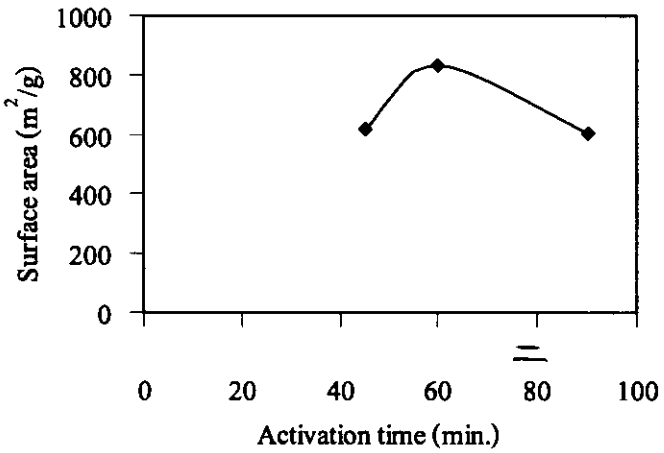
รูปที่ 44 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และเวลาการกระตุ้น 60 นาที



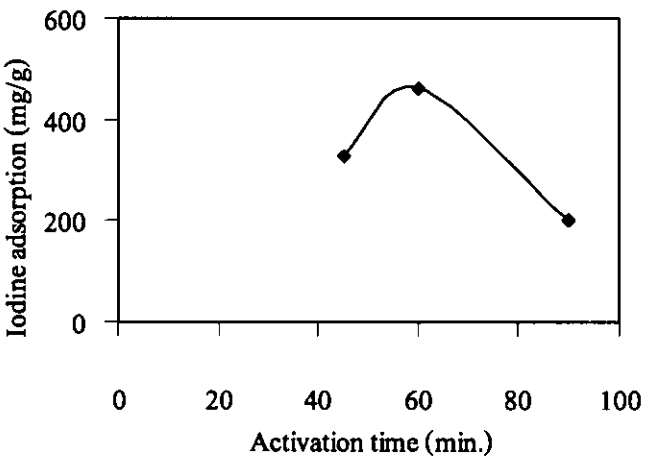
รูปที่ 45 ผลของอุณหภูมิต่อความเป็นกรดด่าง เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และเวลาในการเผา 60 นาที

4.6.3 ผลของเวลาการกระตุ้น

เมื่อเวลาการคาร์บอไนเซชันและอุณหภูมิการกระตุ้นคงที่แล้ว ผลการทดลองแสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซับไอโอดีน เมื่อเวลาการกระตุ้นเพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสูงขึ้น โดยจะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งดังรูปที่ 46 หลังจากนั้นถึงแม้จะเพิ่มเวลาการกระตุ้นให้สูงขึ้นก็ตาม ค่าพื้นที่ผิวจะลดลง ในทำนองเดียวกัน แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับไอโอดีนคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 47 ทั้งนี้เป็นเพราะการเวลาการกระตุ้นจะทำให้โมเลกุลไอน้ำเกิดการแทรกซึมเข้าสู่เนื้อไม้ได้ยาวนานขึ้น



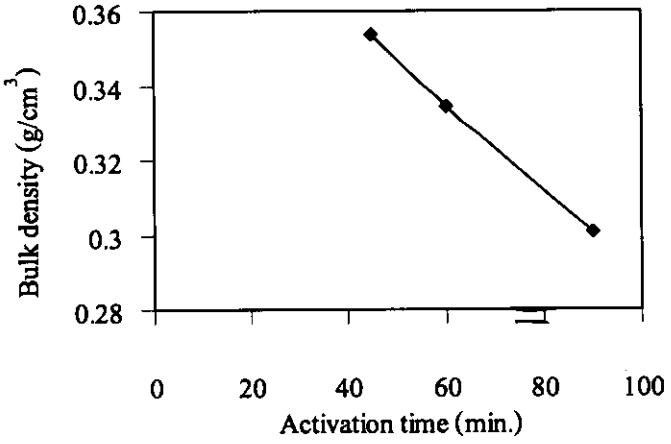
รูปที่ 46 ผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิว เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และอุณหภูมิ 700 °C



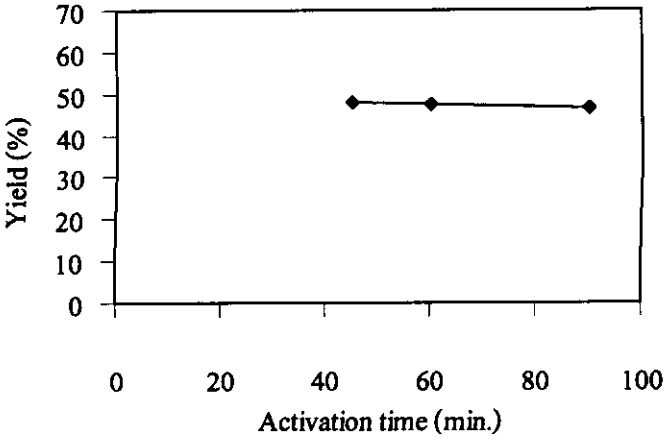
รูปที่ 47 ผลของเวลาการกระตุ้นต่อการดูดซับไอโอดีน เมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และอุณหภูมิ 700 °C

ทำให้โครงสร้างพื้นผิวของถ่านเปลี่ยนแปลง เกิดรูพรุนได้หลากหลายขนาด ทำให้พื้นที่ผิวมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มช่วงเวลาที่นานเกินไป ทำให้พื้นผิวเกิดความเสียหายจากการแทรกซึมของไอน้ำเข้าสู่เนื้อไม้ได้เช่นกันดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา

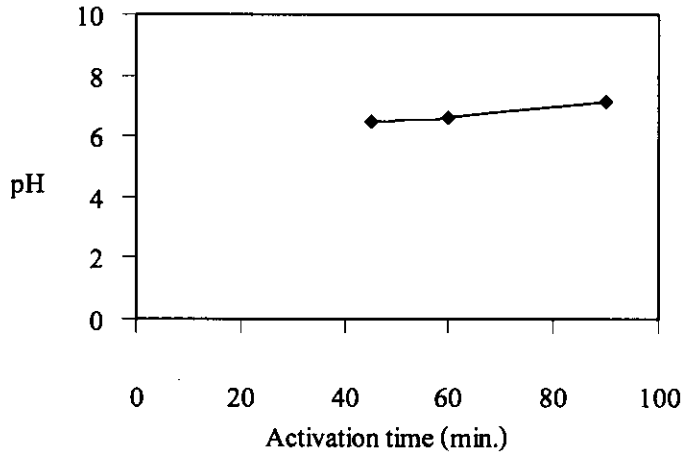
การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นปรากฏแสดงในรูปที่ 48 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏจะลดลง สำหรับรูปที่ 49 แสดงค่าร้อยละผลได้พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกสภาวะ ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดด่างต่ออุณหภูมิการกระตุ้นแสดงได้ในรูปที่ 50 ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรดด่างใกล้เคียงกันทุกสภาวะ สำหรับช่วงเวลาที่เหมาะสมในการนำไปใช้กับ RSM เป็นช่วงเวลาในการกระตุ้นที่ 45 – 90 นาที



รูปที่ 48 ผลของเวลาการกระตุ้นต่อความหนาแน่นปรากฏ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และอุณหภูมิ /00 °C



รูปที่ 49 ผลของเวลาการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และอุณหภูมิ 700 °C



รูปที่ 50 ผลของเวลาการกระตุ้นต่อความเป็นกรดด่าง เมื่อเวลาการคาร์บอไนซ์ 45 นาที และอุณหภูมิ 700 °C

4.7 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นของไอน้ำ

ผลการทดลองการกระตุ้นด้วยไอน้ำได้ออกแบบไว้แสดงในตารางที่ 11 และสามารถนำมาสร้างแบบจำลองชนิดยกกำลังสองโดยใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม Essential Regression เพื่อหาผลตอบสนองต่อค่าพื้นที่ผิว BET (Z_1), ค่าการดูดซับไอโอดีน (Z_2) และร้อยละผลได้ (Z_3) แสดงในตารางที่ 12 สำหรับตารางที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA โดยข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบจำลองจากการวิเคราะห์การถดถอยมีระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า R^2 และ R^2 adjusted ที่สูง แสดงถึงแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองที่ดี นั่นคือตัวแปรอิสระทั้งสาม (เวลาการคาร์บอไนซ์ เวลาการกระตุ้น และอุณหภูมิการกระตุ้น) มีความสัมพันธ์กับค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันกับการกระตุ้นด้วยกรดพบว่าแบบจำลองที่ได้ของ Z_1, Z_2 และ Z_3 จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทำนายค่า (เมื่อพิจารณาจาก Sig.F และเงื่อนไข lack of fit F-test ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5) สำหรับตารางที่ 14 แสดงค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและ p-value ของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง พบว่าเทอมที่มีความสำคัญต่อการทำนายค่าพื้นที่ผิวคืออุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาการกระตุ้น $X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2$ โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้นจะมีผลต่อพื้นที่ผิวอย่างมีนัยสำคัญสูง สำหรับแบบจำลองของการดูดซับไอโอดีนพบว่าเทอมที่มีความสำคัญต่อการทำนายคือ X_2, X_2^2 นั่นคืออุณหภูมิการกระตุ้นมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการคาร์บอไนซ์และเวลาการกระตุ้น ในทำนองเดียวกันเทอมที่มีความสำคัญต่อแบบจำลองของร้อยละผลได้คือ X_3, X_2X_3, X_3^2 แสดงถึงเวลาการกระตุ้นมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ การศึกษาแบบจำลองทั้งสามค่าของตัวแปรตามพบว่า อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้นมีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กราฟพื้นผิวของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 2 ตัวเทียบกับค่าตัวแปรตามของแบบจำลองได้แสดงในรูปที่ 51-59 ดังนี้ กราฟรูปที่ 51-53 แสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรอิสระต่อพื้นที่ผิว BET

ตารางที่ 11 ผลการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบ

ลำดับที่	สภาวะการทดลอง			สมบัติถ่านกัมมันต์		
	เวลาการคาร์บอไนซ์ (min)	อุณหภูมิการกระตุ้น (°C)	เวลาการกระตุ้น (min)	ค่าพื้นที่ผิว Z_1 (m^2/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน Z_2 (mg/g)	ร้อยละผลได้ Z_3 (%)
1	45	650	68	978	646	44.88
2	45	650	45	572	358	47.03
3	54	740	81	214	265	54.06
4	37	740	55	253	111	53.67
5	54	740	55	287	102	50.86
6	37	561	81	353	228	62.98
7	37	561	55	340	211	63.28
8	45	650	90	601	322	47.97
9	45	500	68	311	228	62.49
10	60	650	68	734	238	49.59
11	54	561	55	358	225	64.62
12	54	561	81	368	247	59.33
13	37	740	81	306	111	56.16
14	30	650	68	673	396	48.51
15	45	800	68	231	250	49.75

ผลการทดลองที่แสดงมาจากค่าเฉลี่ยของการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (ทุกสภาวะ)

ตารางที่ 12 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

$$Z_1 = -31031.4 + 156.25X_1 + 72.27X_2 + 128X_3 - 1.476X_1^2 - 0.0189X_1X_2 - 0.145X_1X_3 - 0.05356X_2^2 - 0.894X_3^2$$

$$Z_2 = -20547.8 + 74.23X_1 + 54.64X_2 + 44.3X_3 - 0.745X_1^2 - 0.01418X_1X_2 - 0.04074X_2^2 - 0.00813X_2X_3 - 0.291X_3^2$$

$$Z_3 = 553.52 - 0.840X_1 - 1.352X_2 - 0.769X_3 + 0.01137X_1^2 + 0.00202X_1X_2 - 0.02088X_1X_3 + 0.000763X_2^2 + 0.00277X_2X_3$$

Z_1 คือพื้นที่ผิว (m^2/g), Z_2 คือค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g), Z_3 คือร้อยละผลได้ (%)

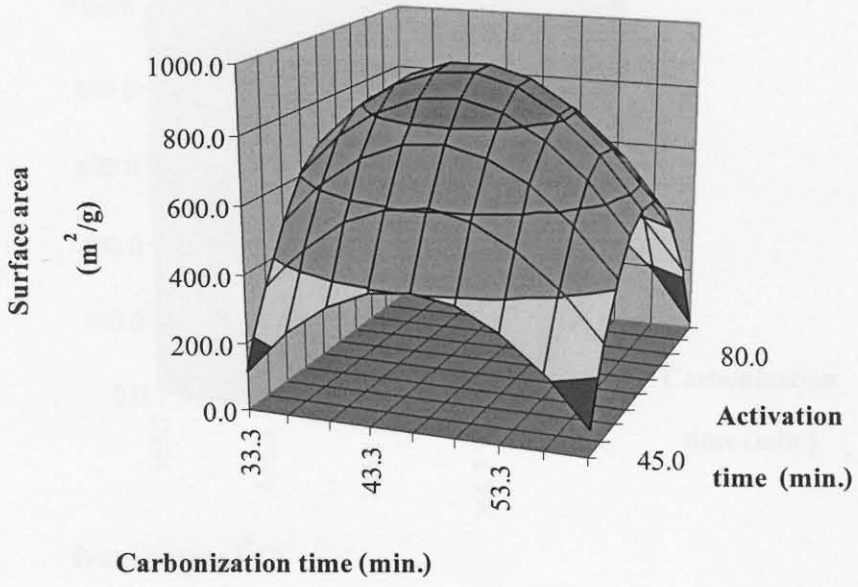
ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ของแบบจำลองในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

source	SS	DF	MS	F-value	F-Sig.
1. แบบจำลอง Z_1 (R^2=0.90, R^2 adjusted = 0.80)					
Regression	1708004.7	8	213501	9.136	0.00259
Residual	186951	8	23368.9		
LOF Error	182030	5	36406.0	22.1951	0.01416
Pure Error	4920.8	3	1640.3		
Total	1894955.5	16			
2. แบบจำลอง Z_2 (R^2=0.90, R^2 adjusted = 0.78)					
Regression	565560	8	70695.0	7.811	0.00682
Residual	63356.0	7	9050.9		
LOF Error	9927.2	4	2481.8	0.1394	0.956
Pure Error	53428.8	3	17809.6		
Total	628916	15			
3. แบบจำลอง Z_3 (R^2=0.89, R^2 adjusted = 0.76)					
Regression	557.25	8	69.66	6.981	0.00943
Residual	69.84	7	9.978		
LOF Error	56.75	4	14.19	3.2518	0.180
Pure Error	13.09	3	4.363		
Total	627.09	15			

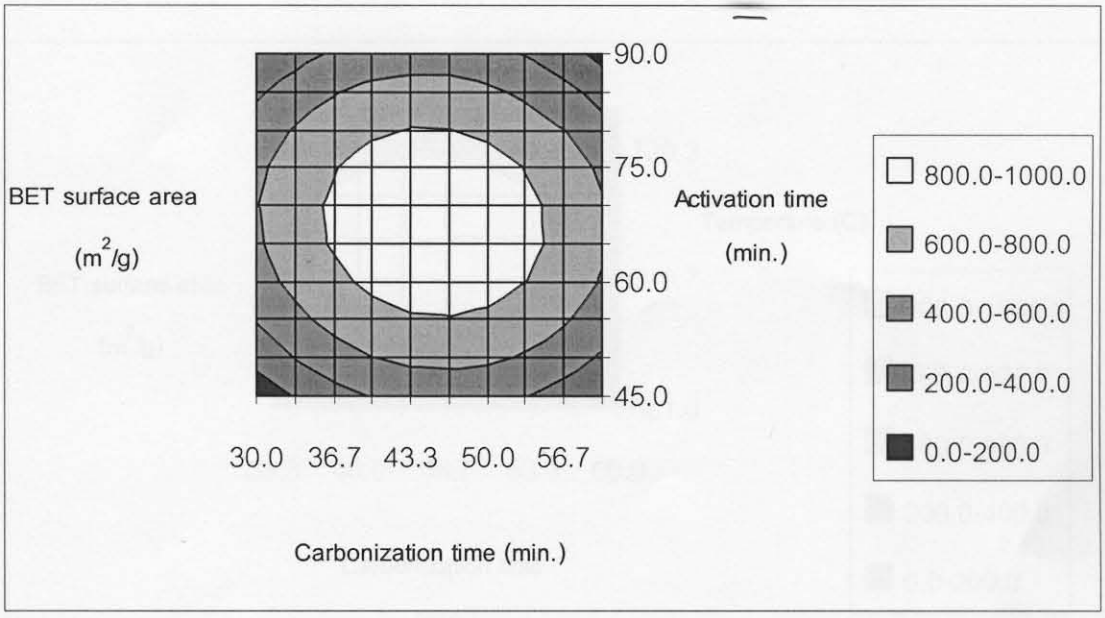
ด้วยกราฟ 3 มิติ และแบบคอนทัวร์ พบว่ากราฟของตัวแปรอิสระมีแนวโน้มการตอบสนองต่อตัวแปรตามคล้ายคลึงกับกราฟที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรด นั่นคือมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลง ในที่นี้พบว่าสภาวะที่ให้ค่าพื้นที่ผิวดีที่สุดคือจุดด้านบนสุดของเส้นกราฟพื้นผิว นั่นคือพื้นที่ผิวสูงสุด 946 m^2/g ณ สภาวะการผลิตคือเวลาการคาร์บอไนซ์ 46 นาที อุณหภูมิการกระตุ้น 667 องศาเซลเซียส เวลาการกระตุ้น 68 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองพบว่าค่าพื้นที่ผิวสูงสุด 978 m^2/g ณ สภาวะที่เวลาการคาร์บอไนซ์ 45 นาที อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลากระตุ้น 68 นาที ซึ่งพบว่าสภาวะจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับสภาวะจากการทดลอง

ตารางที่ 14 ข้อมูลสถิติของแบบจำลองในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

Model term	Coefficient estimate	Standard error	P-value
Intercept	-31031.4	4462.4	0.000118
X_1	156.25	76.25	0.07461
X_2	72.27	9.805	7.84E-05
X_3	128.00	40.37	0.01318
X_1^2	-1.476	0.561	0.03007
X_1X_2	-0.01890	0.07103	0.797
X_1X_3	-0.145	0.489	0.774
X_2^2	-0.05356	0.00690	5.43E-05
X_3^2	-0.894	0.249	0.00702
2. แบบจำลอง Y,			
Intercept	-20547.8	3175.0	0.000343
X_1	74.23	43.94	0.135
X_2	54.64	8.408	0.000334
X_3	44.38	29.01	0.170
X_1^2	-0.745	0.365	0.08076
X_1X_2	-0.01418	0.04421	0.758
X_2^2	-0.04074	0.00608	0.000278
X_2X_3	-0.00813	0.02891	0.787
X_3^2	-0.291	0.163	0.117
3. แบบจำลอง Y,			
Intercept			
X_1	553.52	100.30	0.000889
X_2	-0.840	1.552	0.605
X_3	-1.352	0.226	0.000547
X_1^2	-0.769	0.780	0.357
X_1X_2	0.01137	0.01124	0.345
X_1X_3	0.00202	0.00170	0.273
X_2^2	-0.02088	0.01165	0.116
X_2X_3	0.000763	0.000142	0.00106
X_3^2	0.00277	0.00112	0.04174

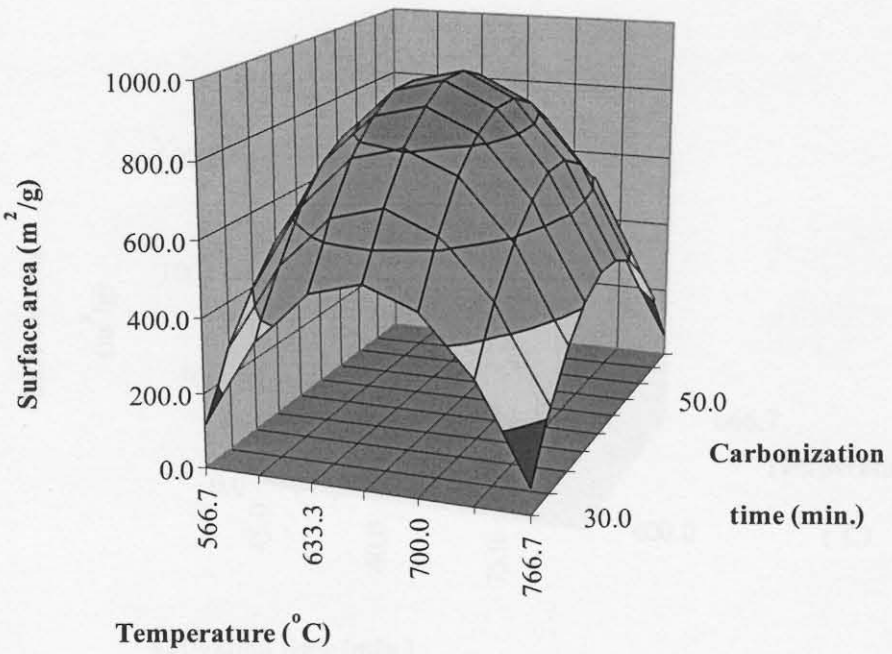


(a)

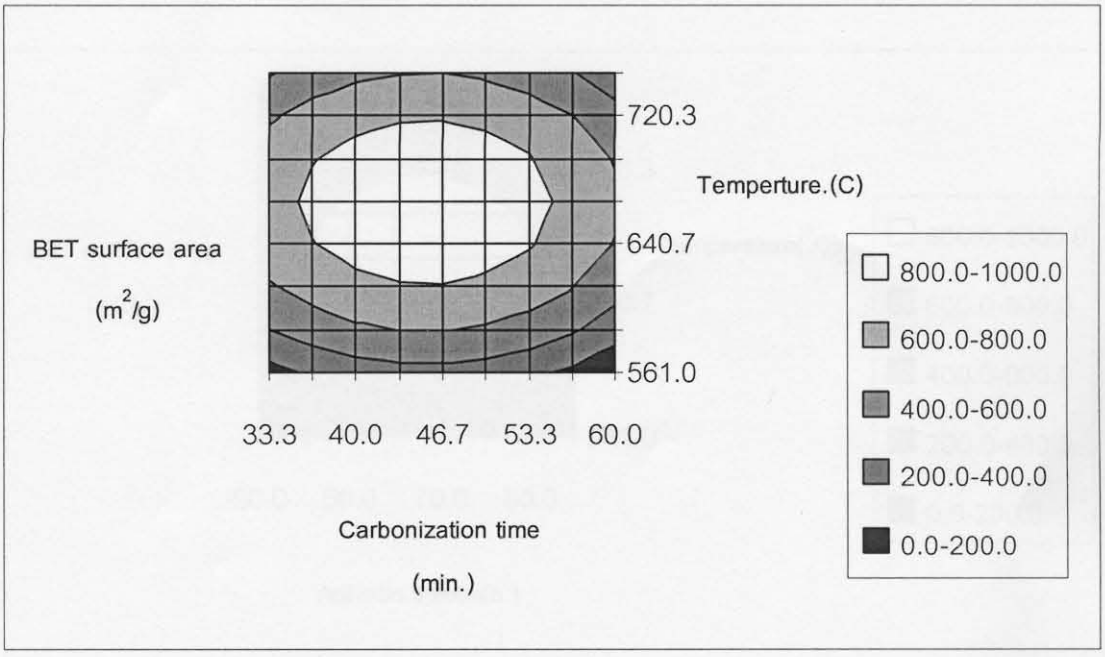


(b)

รูปที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกระตุ้นและเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีผลต่อพื้นที่ผิว
(a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต

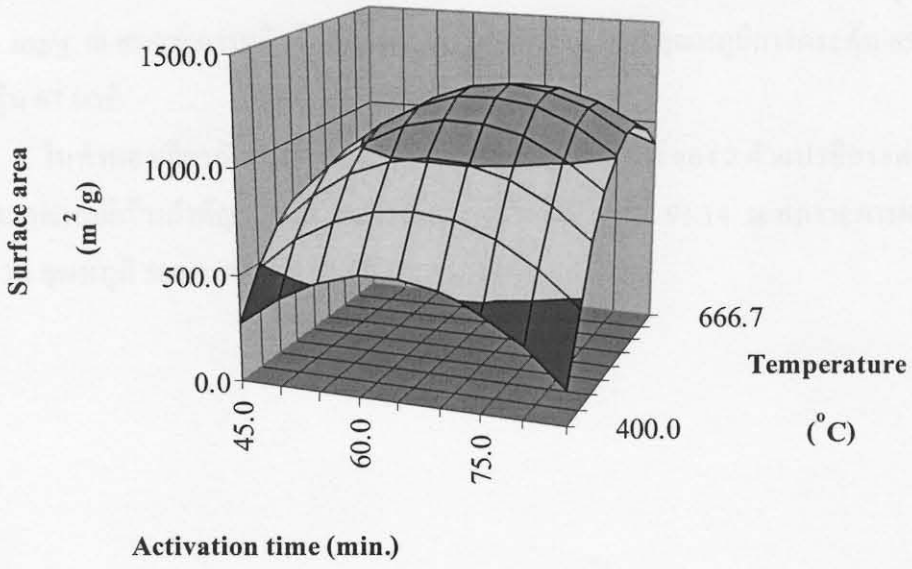


(a)

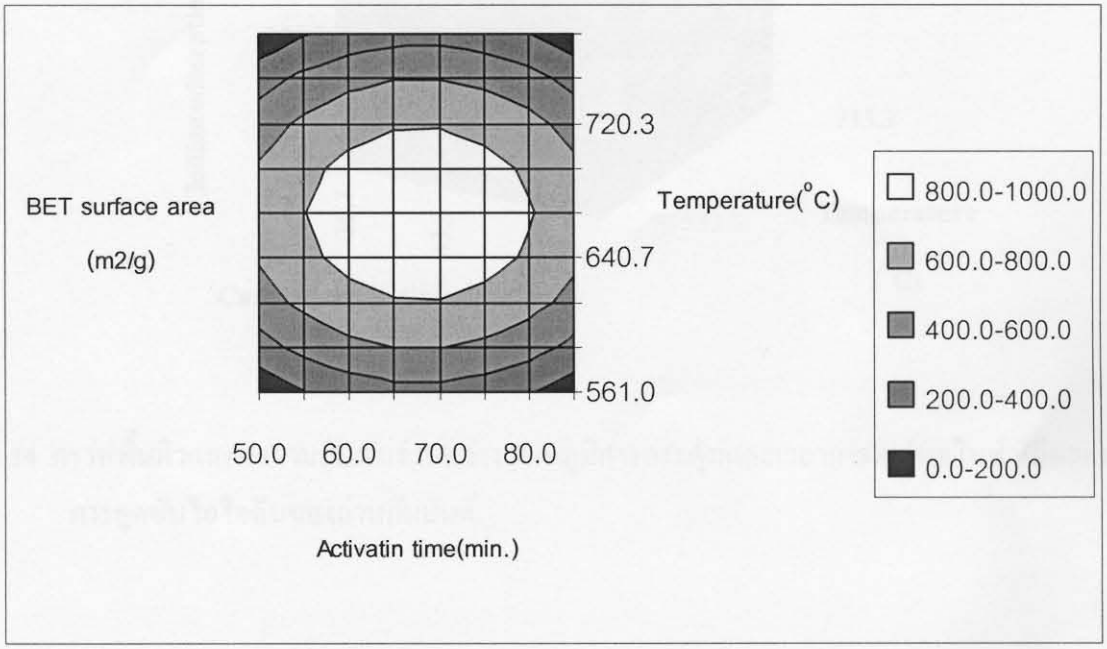


(b)

รูปที่ 52 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาการคาร์บอไนซ์ที่มีผลต่อพื้นที่ผิว (a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต



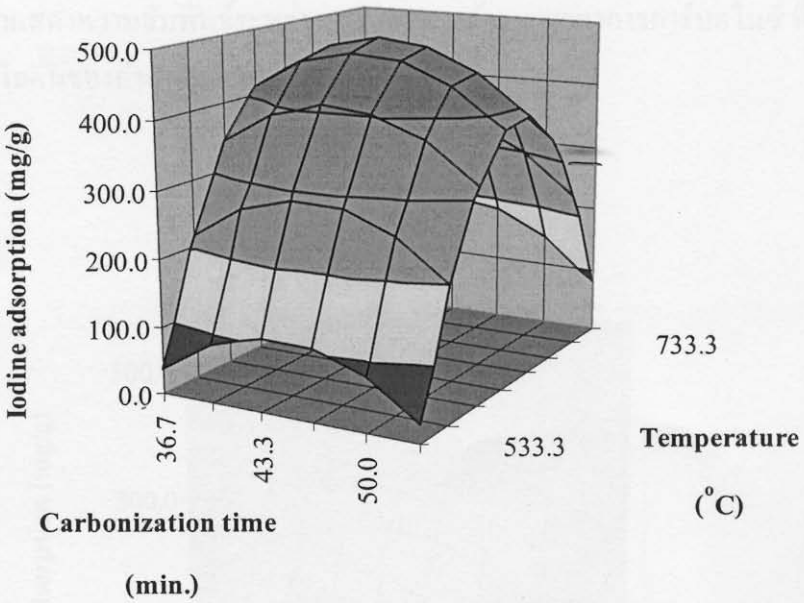
(a)



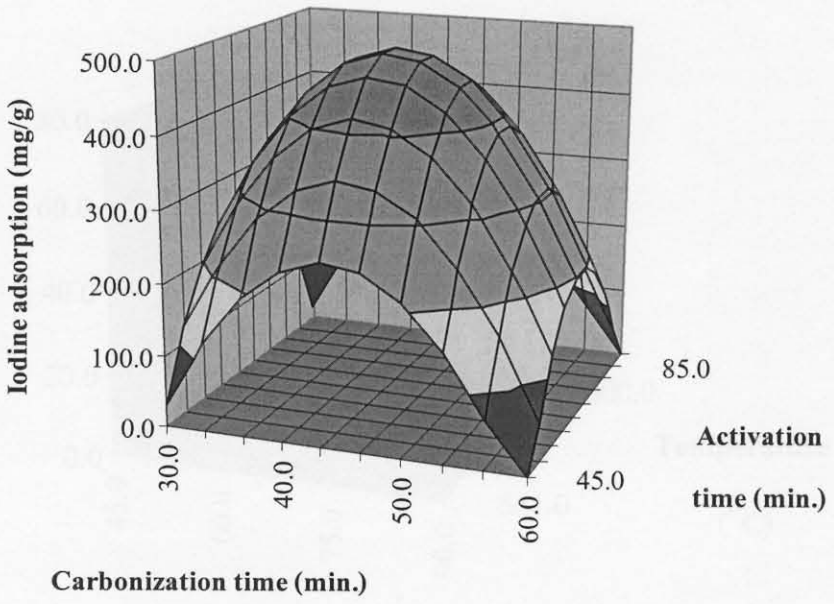
รูปที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการกระตุ้น และเวลาการกระตุ้นที่มีผลต่อพื้นที่ผิว
(a) กราฟพื้นผิว (b) คอนทัวร์พล๊อต

สำหรับกราฟรูปที่ 54-56 แสดงความสัมพันธ์ของ2 ตัวแปรอิสระต่อการดูดซับไอโอดีน พบว่ากราฟดังกล่าวมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟพื้นผิวของค่าพื้นผิวจำเพาะเช่นกัน ในที่นี้พบว่าค่าสูงสุดของการดูดซับไอโอดีน 489 mg/g ณ สภาวะการผลิตคือเวลาการคาร์บอไนซ์ 44 นาที อุณหภูมิการกระตุ้น 657 องศาเซลเซียส เวลาการกระตุ้น 67 นาที

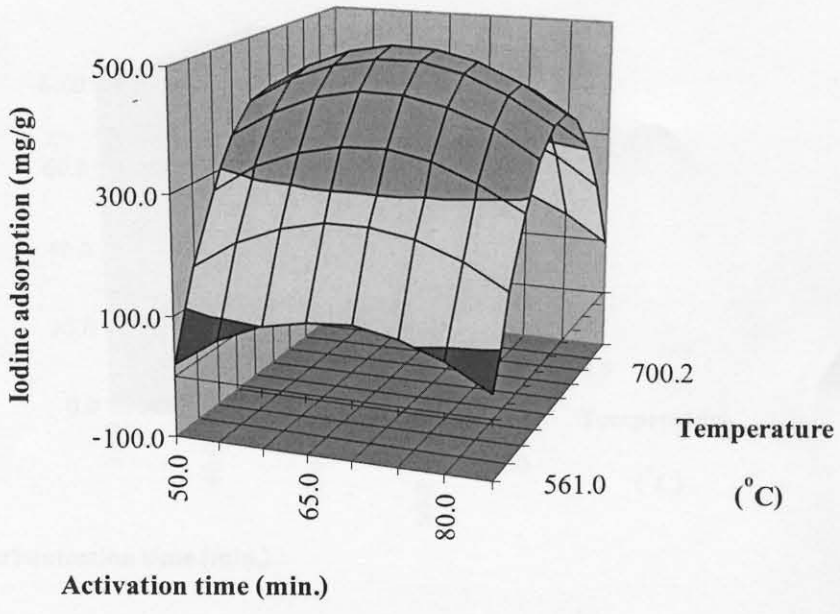
ในทำนองเดียวกันกราฟรูปที่ 57-59 แสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรอิสระต่อร้อยละผลได้ ซึ่งขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในที่นี้พบว่าร้อยละผลได้ที่ค่าสูงสุด 93.14 ณ สภาวะการผลิตคือเวลาการคาร์บอไนซ์ 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาการกระตุ้น 45 นาที



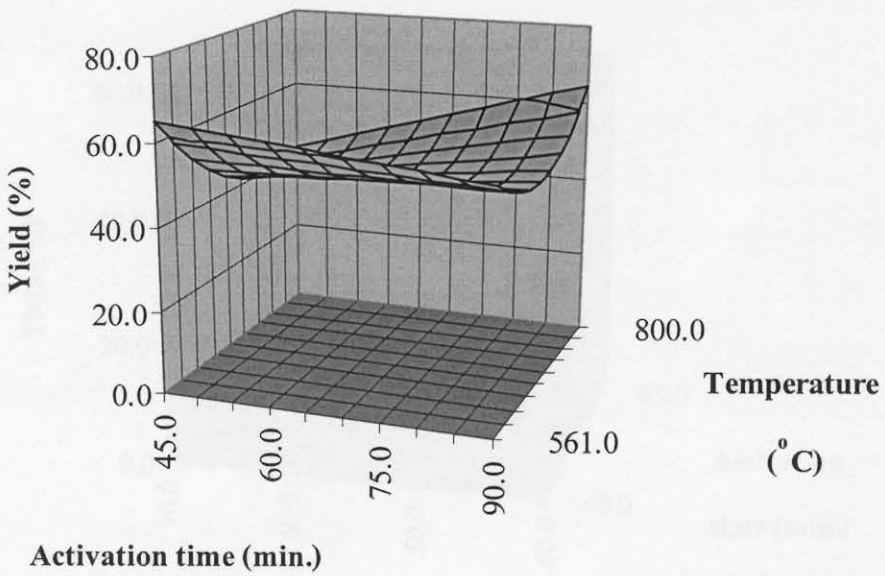
รูปที่ 54 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการกระตุ้นและเวลาการคาร์บอไนซ์ ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์



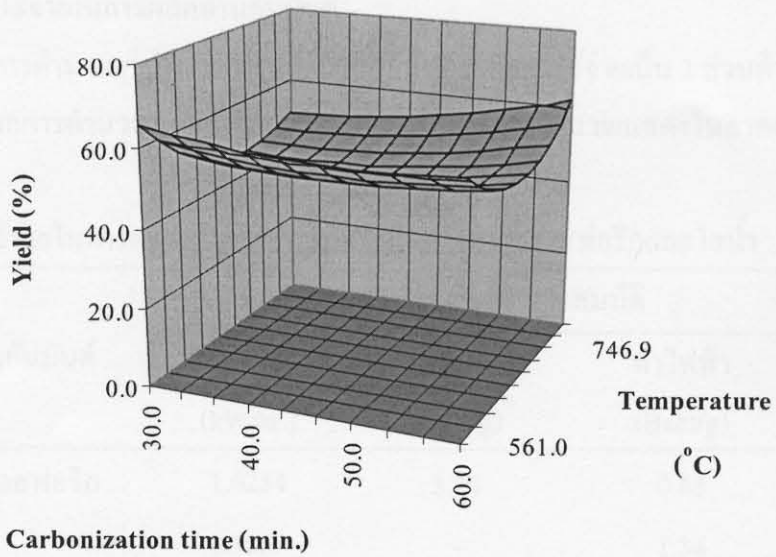
รูปที่ 55 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกระตุ้นและเวลาการคาร์บอไนซ์ ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์



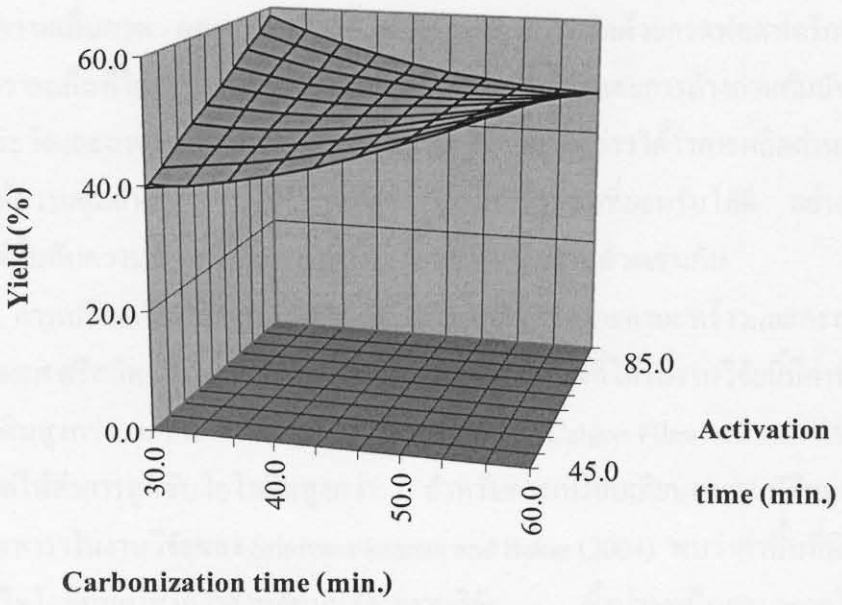
รูปที่ 56 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกระตุ้นและอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 57 พื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกระตุ้นและอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลได้



รูปที่ 58 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคาร์บอไนซ์ และอุณหภูมิการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 59 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคาร์บอไนซ์ และเวลาการกระตุ้นที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

4.8 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์

การคำนวณค่าใช้จ่ายการผลิตถ่านกัมมันต์จะคิดค่าใช้จ่ายเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า ซึ่งผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 15 โดยวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 15 ค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำ

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์	คุณสมบัติ			
	พลังงาน (kW/hr.)	ค่าสารเคมี (Baht/g)	ค่าไฟฟ้า (Baht/g)	รวม (Baht/g)
กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	1.0254	3.20	0.63	3.83
กระตุ้นด้วยไอน้ำ	1.1859	-	1.34	1.34

* พลังงานที่ใช้ในการคำนวณมาจากฐานพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น

จากตารางที่ 15 พบว่าถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าการใช้กรดฟอสฟอริกอย่างมาก นอกจากนี้หากคำนวณบนฐานการผลิตไอน้ำด้วยแก๊สหุงต้มแล้ว จะพบว่า

ต้นทุนการผลิตจะลดต่ำกว่ามาก จากตารางที่ 16 พบว่าถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีค่าพื้นที่จำเพาะสูงกว่าแบบไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะเดียวกันค่าความเป็นกรดด่างของการผลิตด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีความเป็นกรด ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตด้วยกรดฟอสฟอริกจะสูงกว่าการผลิตด้วยไอน้ำ เพราะแก๊สที่ได้จากการคาร์บอไนเซชันมีความเป็นกรดและการล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้จะต้องล้างด้วยความระมัดระวังและอาจต้องใช้น้ำล้างในปริมาณสูง จึงอาจกล่าวได้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำน่าจะเป็นวิธีที่ให้ความคุ้มค่าต่อการผลิตที่ดีโดยยังคงสมบัติการดูดซับที่ยอมรับได้ดี อย่างไรก็ตามการเลือกผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นกับความต้องการในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานด้วยเช่นกัน

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ได้จากการทดลองของธเรศ ศรีสถิตและพจนีย์ คุ่ยเสงี่ยม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิว BET และการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า นอกจากนี้การเปรียบกับเกรดการค้า Calgon Filtrasorb 300 พบว่าคุณสมบัติด้านพื้นที่ผิวต่ำกว่าแต่ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า สำหรับการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในงานวิจัยของ Srinivasa-kannan and Bakar (2004) พบว่าค่าพื้นที่ผิวมีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากงานวิจัย ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากโครงสร้างรูพรุนที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบคุณสมบัติถ่านกัมมันต์เกรดการค้า 2 ชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการทดลองนี้ให้สมบัติด้านพื้นที่ผิวที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับเกรดการค้า ดังนั้นสภาวะการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงมีความน่าสนใจต่อผู้ประกอบการที่มีความสนใจด้านนี้ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบด้านต้นทุนของงานวิจัยนี้และถ่านกัมมันต์จากแหล่งอื่นทำได้ยาก เพราะที่มาของต้นทุนไฟฟ้าและสารเคมีหลายรายการมีความแตกต่างกันมาก ทำให้การประเมินมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการผลิตโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำ รวมทั้งถ่านกัมมันต์เกรดการค้า 2 ชนิด

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์	คุณสมบัติ						
	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ร้อยละผลได้	pH	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)	ค่าใช้จ่าย (Baht/g)	พลังงาน (kW/hr.)
กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	1271	552	49.96	3.5	0.285	3.86	1.025
กระตุ้นด้วยไอน้ำ	946	646	44.88	7.1	0.422	1.32	1.186
กะลามะพร้าว[1]	492	532	-	-	-	-	-
กะลาปาล์ม[1]	386	486	-	-	-	-	-
เกรดการค้า Calgon Filtrasorb 300[1]	956	900	-	-	-	-	-
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา	1496	1096	35	-	-	-	-
เกรดการค้าชนิด 1[2]	1100	1050	-	9-11	0.48	-	-
เกรดการค้าชนิด 2[3]	1293	1089.6	-	7.3	0.49	-	-

*[1] ธเรศ ศรีสถดิย์และสุจนีย์ คุ่ยเสี่ยม (2546), [2] Srinivasakannan and Bakar (2004), [3] ผลิตจากกะลามะพร้าว, [3] ไม่ระบุและเป็นถ่านกัมมันต์แบบเม็ด