# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิจารณ์

## 4.1 การคัดขนาดขี้เลื่อยไม้ยางพารา

การทดลองจากการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 10, 20, 35 และ 48 (มาตรฐานไทเลอร์) และเลือกขี้เลื่อยที่อยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 35 นำมาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเพื่อยืนยันผลการกระจายขนาด

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 ดังนั้นผลการกระจายขนาดจากการร่อนตะแกรงจึงให้ผลที่สอดคล้องกับเครื่องวิเคราะห์ขนาด

## 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามภาคผนวก ข ของขี้เลื่อยไม้ยางพารา พบว่าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณเถ้าร้อยละ 3.01 ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าร้อยละ 25.75 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 61.66 และความชื้นร้อยละ 9.58 จากการสำรวจเอกสารพบว่า วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณสมบัติที่ดี ต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงและปริมาณเถ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นที่มักนิยมนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของขี้เลื่อยไม้ยางพาราแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 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] C. Srinivasakannan และ Mohamad Zailani Abu Bakar (2004)

[3] B.G. Prakash Kumar *et al* (2006)

[4] ภัทรา ปัญญวัฒนกิจ (2540)

[5] บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537)

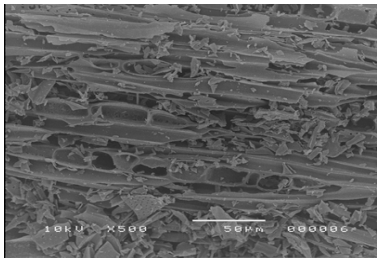
[6,7] จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และคณะ (2549)

[8] ชิตวรรณ นาคฤทธิ์ (2544)

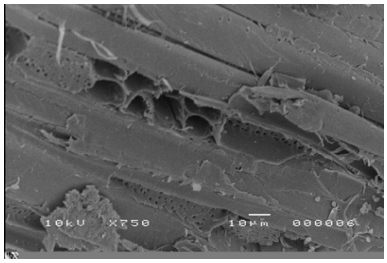
## 4.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว

ลักษณะพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราและถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพารา แสดงในภาพประกอบที่ 12 ถึง 14 ซึ่งได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 500 เท่าและ 1000 เท่า พบว่าโครงสร้างพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราหลังการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมมาก โดยพบว่าโครงสร้างมีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากหลังจากการกระตุ้น ทั้งกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเข้าไปขจัดเถ้าและสารระเหยต่างๆที่อยู่ในรูพรุนของขี้เลื่อยออกจากรูพรุนของขี้เลื่อย จึงส่งผลให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนเพิ่มขึ้นจากเดิม ภาพถ่ายที่ได้จึงสังเกตเห็นลักษณะของรู

พรุนได้ชัดเจนขึ้น และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของรูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดเปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่าขนาดของรูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำเล็กกว่ารูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดเล็กน้อย

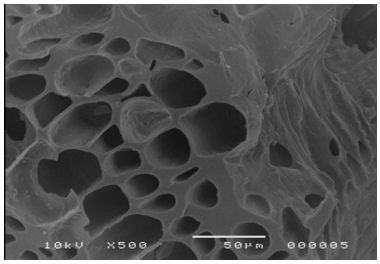



(a)

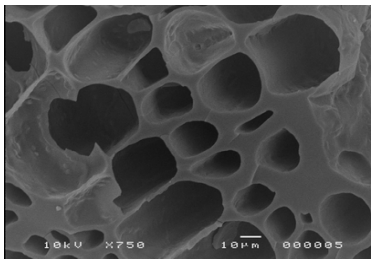



(b)

ภาพประกอบที่ 12 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของขี้เลื่อยไม้ยางพาราโดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 750 เท่า

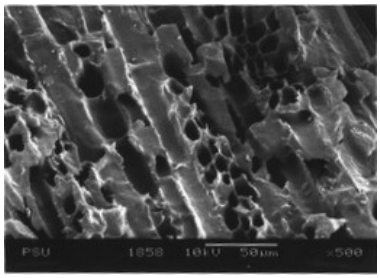



(a)

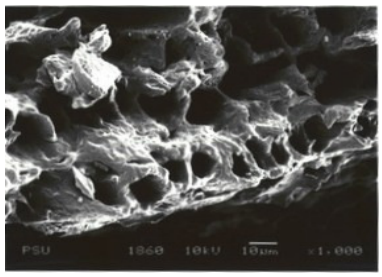



(b)

ภาพประกอบที่ 13 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกโดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 750 เท่า




(a)




(b)

ภาพประกอบที่ 14 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยไอน้ำโดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ที่กำลังขยาย (a) 500 เท่า และ (b) 1000 เท่า

## 4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

จากผลการทดลองในการศึกษาปัจจัยของ อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดในช่วง 1:1-1:2 อุณหภูมิในการเผา 500-700 องศาเซลเซียส และเวลาในการเผา 45-90 นาที ต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

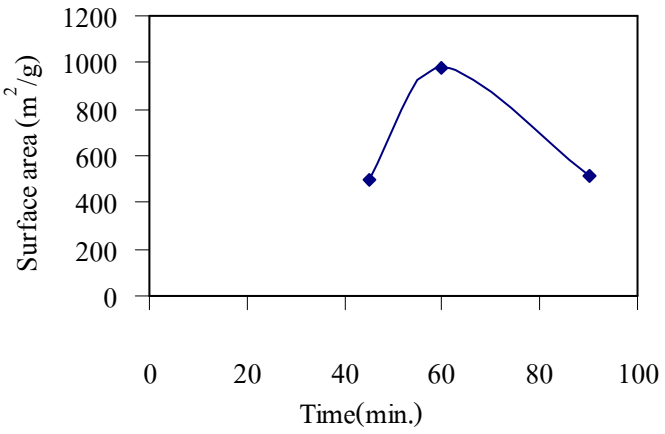
| Conditions | | | Properties | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ratio | Temp. ($^{o}$C) | Time (min.) | Surface area ($m^2/g$) | Bulk Density ($g/cm^3$) | Iodine Ads. (mg/g) | pH | % yield |
| Experiment I | | | | | | | |
| 1:2 | 500 | 45 | 498.73 | 0.29217 | 231.81 | 3.101 | 49.03 |
| 1:2 | 500 | 60 | 981.05 | 0.28467 | 349.79 | 3.004 | 48.54 |
| 1:2 | 500 | 90 | 513.20 | 0.27827 | 215.03 | 2.985 | 44.81 |
| Experiment II | | | | | | | |
| 1:2 | 400 | 60 | 417.24 | 0.34473 | 267.51 | 2.847 | 54.68 |
| 1:2 | 500 | 60 | 1009.61 | 0.28355 | 334.66 | 3.044 | 47.66 |
| 1:2 | 600 | 60 | 1045.17 | 0.2798 | 363.74 | 3.207 | 46.80 |
| 1:2 | 700 | 60 | 323.45 | 0.27977 | 192.96 | 3.019 | 46.89 |
| Experiment III | | | | | | | |
| 1:1 | 500 | 60 | 500.08 | 0.30753 | 194.27 | 3.326 | 55.62 |
| 1:2 | 500 | 60 | 997.12 | 0.2799 | 341.04 | 2.863 | 48.81 |
| 1:3 | 500 | 60 | 490.41 | 0.25554 | 246.04 | 2.595 | 47.07 |

**4.4.1 ผลของเวลา**

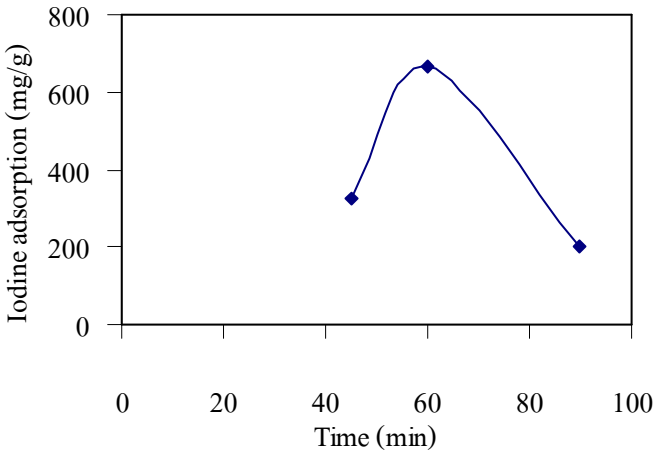
จากการศึกษาผลของเวลาต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่ออุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดคงที่เป็น 1:2 พบว่าเวลามีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ จากข้อมูลในตารางที่ 10 พบว่าเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นโดยค่าพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 498.73 $m^2/g$ ที่เวลาในการเผา 45 นาที เป็น 981.05 $m^2/g$ ที่เวลาในการเผา 60 นาที หลังจากนั้นค่าพื้นที่ผิวจะลดลงเป็น 513.20 $m^2/g$ ที่เวลาในการเผา 90 นาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 15 แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงสุดที่เวลาค่าหนึ่ง หลังจากนั้นการเพิ่มของเวลาจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์อีก เนื่องจากถ่านถูกออกซิไดซ์เป็นเวลานานผนังของรูพรุนจะเกิดการยุบตัว ทำให้โครงสร้างของรูพรุนเปลี่ยนไปจึงเกิดการดูดซับสารได้น้อยลง สังเกตได้จากค่าการดูดซับไอโอดีนดังแสดงกราฟในภาพประกอบที่ 16 ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้นเมื่อเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น โดยค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 231.81 mg/g ที่เวลาในการเผา 45 นาที เป็น 349.79 mg/g ที่เวลาในการเผา 60 นาที หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะลดลงเป็น 215.03 mg/g ที่เวลาในการเผา 90 นาที

สำหรับความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้ที่เวลาในการเผาต่างๆแสดงดังภาพประกอบที่ 17 และ 18 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างและมวลของไม้มีการเปลี่ยนแปลง โดยมวลของไม้จะลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละผลได้ลดลง ในส่วนของค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์ ดังภาพประกอบที่ 19 จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น

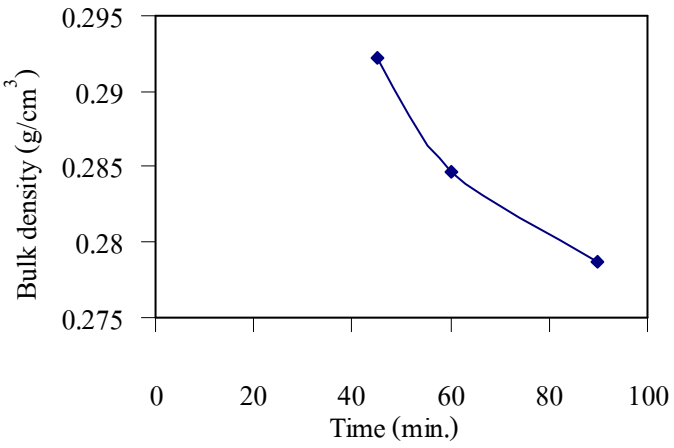
ดังนั้นจึงเลือกช่วงเวลาในการกระตุ้นที่ 45 – 90 นาที เพื่อใช้ในการทดลองร่วมกับเทคนิค RSM



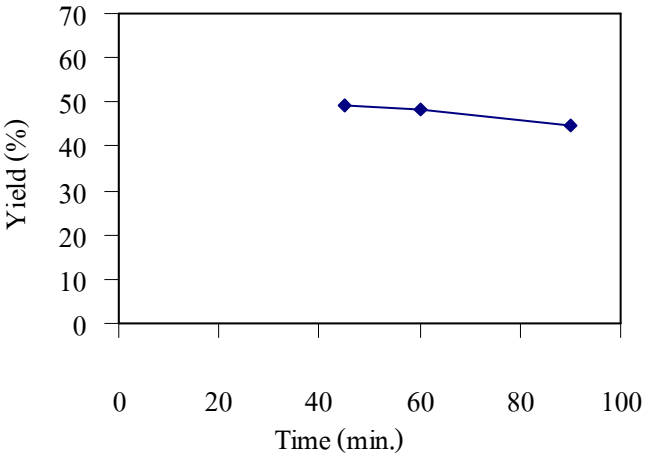

ภาพประกอบที่ 15 แสดงผลของเวลาต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด และอุณหภูมิคงที่ที่ 1:2 และ 500 °C ตามลำดับ



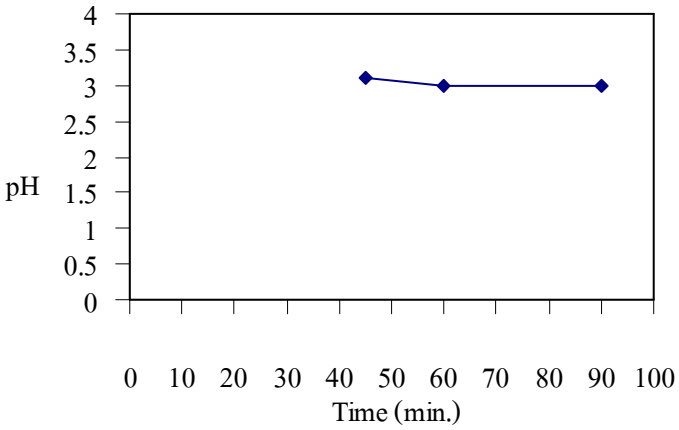

ภาพประกอบที่ 16 แสดงผลของเวลาต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย: กรดและอุณหภูมิคงที่ที่ 1:2 และ 500 °C ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 17 แสดงผลของเวลาต่อค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย: กรดและอุณหภูมิคงที่ที่ 1:2 และ 500 °C ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 18 แสดงผลของเวลาต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดและอุณหภูมิคงที่ที่ 1:2 และ 500 °C ตามลำดับ

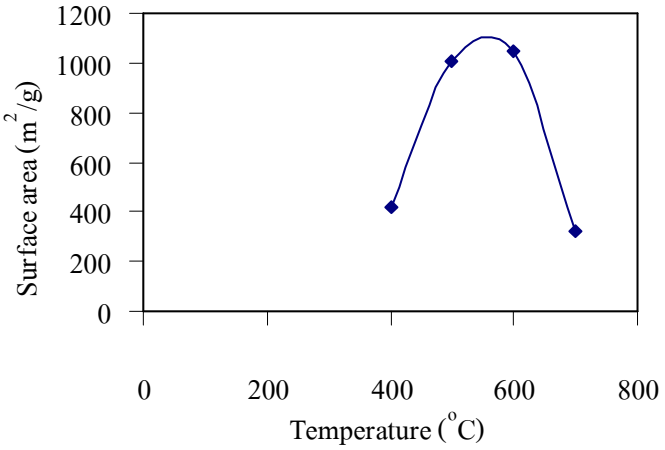



ภาพประกอบที่ 19 แสดงผลของเวลาต่อค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดและอุณหภูมิคงที่ที่ 1:2 และ 500 $^{o}$C ตามลำดับ

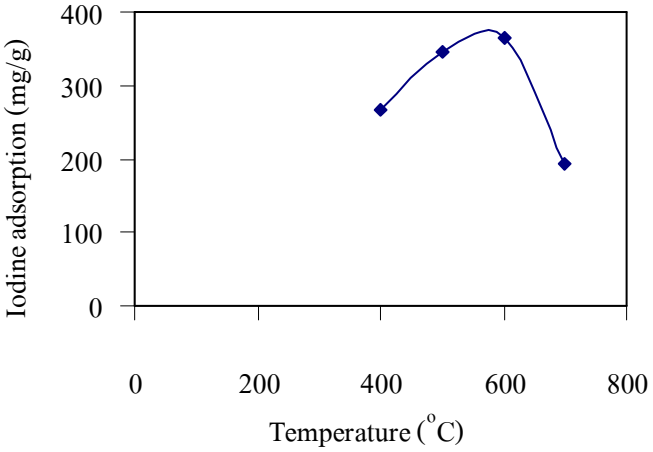
**4.4.2 ผลของอุณหภูมิ**

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อเวลาคงที่ 60 นาที อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:2 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นโดยค่าพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 417.24 $m^2/g$ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็น 1045.17 $m^2/g$ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุด ซึ่งในทำนองเดียวกันค่าการดูดซับไอโอดีนก็มีแนวโน้มในแบบเดียวกัน นั่นคือถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้น โดยเพิ่มจาก 267.51 mg/g ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็น 363.74 mg/g ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าการดูดซับสูงสุด หลังจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิสูงจากจุดนี้จะไม่มีผลต่อการดูดซับที่สูงขึ้นของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการไล่น้ำมันทาร์กับสารระเหยต่างๆ ออกจากผิวถ่านเกิดได้ดี แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิมากกว่านี้จะเกิดการออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวถ่านจึงไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ถ่านกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิสูงมากจึงมีพื้นที่ผิวน้อยลงส่งผลให้ดูดซับสารได้น้อยลง ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติต่างๆแสดงดังภาพประกอบที่ 20 และ 21

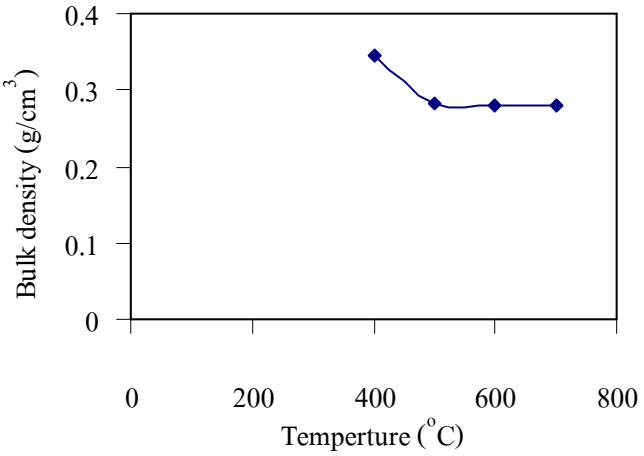
สำหรับภาพประกอบที่ 22 และ 23 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ และร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ผลว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้จะลดลง โดยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงแรก หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับค่าความเป็นกรดด่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบที่ 24 ดังนั้นอุณหภูมิ 400-700 องศาเซลเซียส จึงเป็นช่วงที่เลือกเพื่อศึกษาร่วมกับ RSM



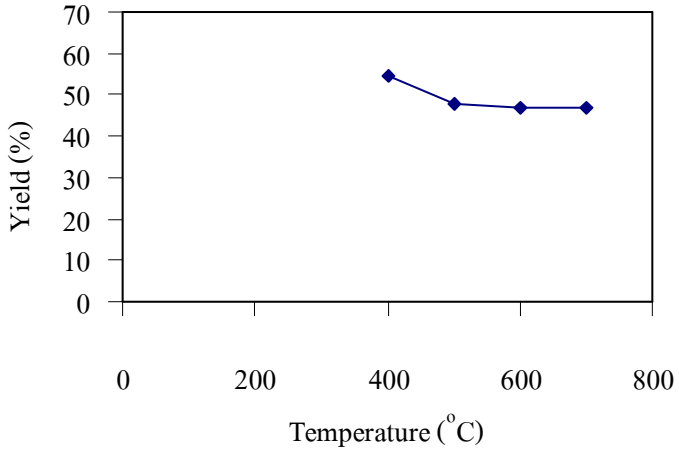

ภาพประกอบที่ 20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด และเวลาคงที่ที่ 1:2 และ 60 นาที ตามลำดับ



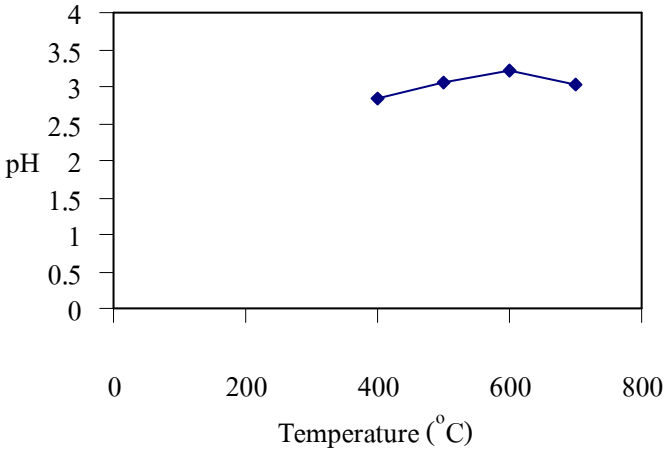

ภาพประกอบที่ 21 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดและเวลาคงที่ที่ 1:2 และ 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 22 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดและเวลาคงที่ที่ 1:2 และ 60 นาที ตามลำดับ



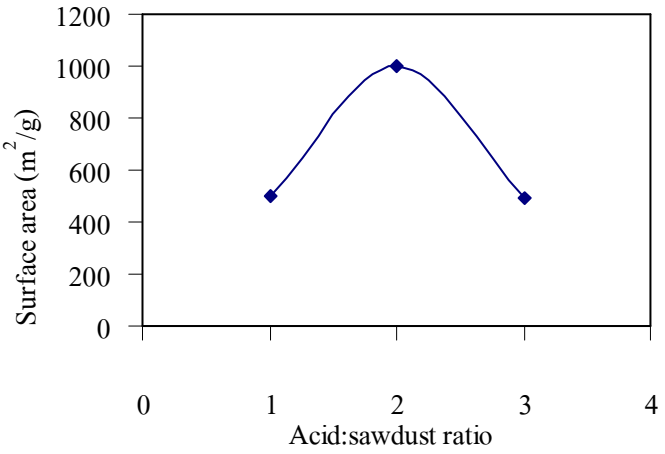

ภาพประกอบที่ 23 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย: กรดและเวลาคงที่ที่ 1:2 และ 60 นาที ตามลำดับ



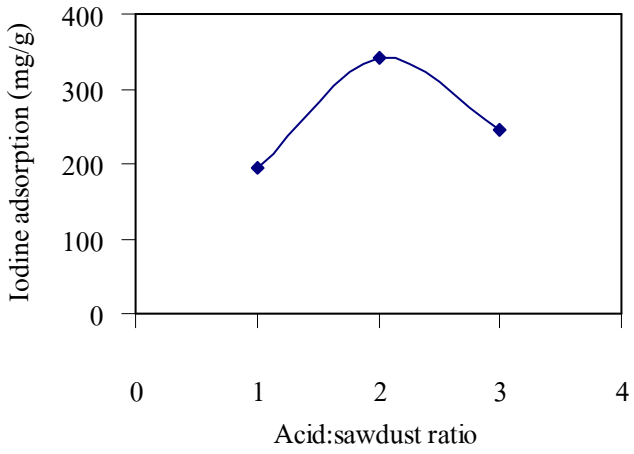

ภาพประกอบที่ 24 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์เมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดและเวลาคงที่ที่ 1:2 และ 60 นาที ตามลำดับ

**4.4.3 ผลของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด**

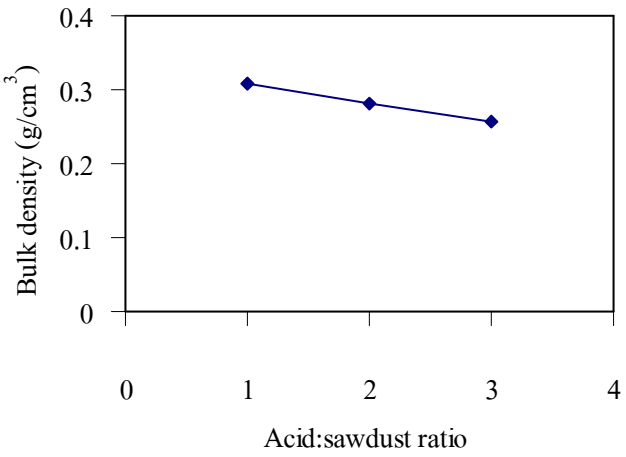
จากตารางที่ 10 แสดงผลของอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิว เมื่อเวลาคงที่ 60 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจาก 500.08 $m^2/g$ ที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1 เป็น 997.12 $m^2/g$ ดังภาพประกอบที่ 25 ที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:2 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนขี้เลื่อย:กรดสูงขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มจาก 194.27 mg/g ที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1 เป็น 341.04 mg/g ดังภาพประกอบที่ 26 ที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:2 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดน้อย ทำให้กรดไม่สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ความสามารถในการไล่น้ำมันกับสารระเหยต่างๆ ออกจากผิวถ่านจึงเกิดได้ไม่ดี ส่งผลให้โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ่านมีน้อย ทำให้ค่าการดูดซับที่ได้มีค่าต่ำ และพบว่าปริมาณกรดที่มากเกินไม่ได้ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดส่งผลต่อการสูญเสียองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ลดลงไปด้วย ดังภาพประกอบที่ 27 และ 28 เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนกรดเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดของถ่านเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์ ดังภาพประกอบที่ 29 ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนในช่วง 1:1-1:2 เพื่อศึกษากับ RSM เพราะอัตราส่วนที่สูงกว่านี้ไม่มีผลต่อคุณสมบัติที่ดีของถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี



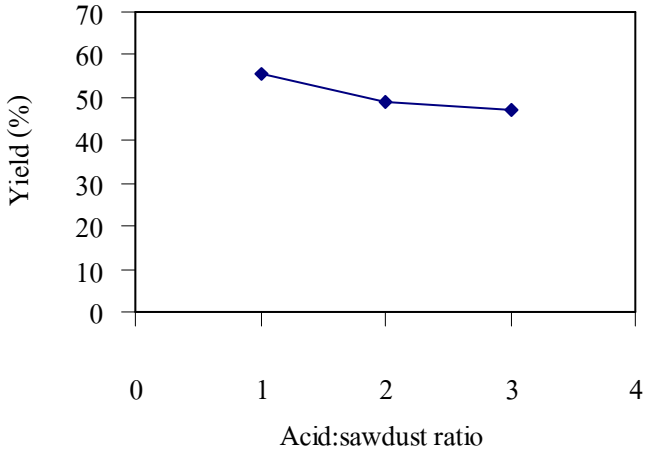

ภาพประกอบที่ 25 แสดงผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาคงที่ที่ 500 $^{o}C$ 60 นาที ตามลำดับ



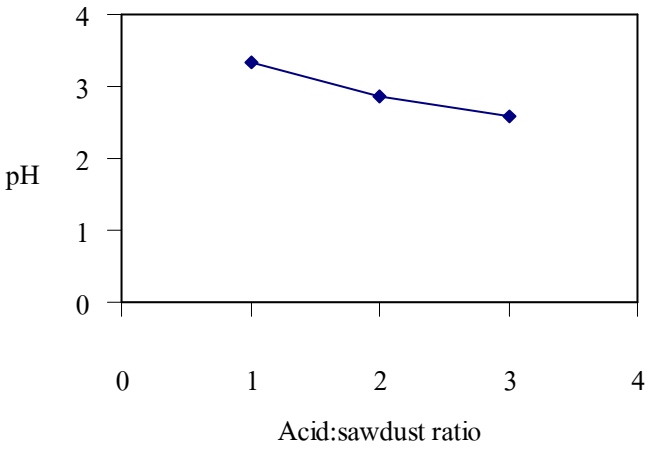

ภาพประกอบที่ 26 แสดงผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อค่าการดูดซับไอโอดีของถ่านกัมมันต์เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาคงที่ที่ 500 °C 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 27 แสดงผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัม-มันต์เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาคงที่ที่ 500 °C 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 28 แสดงผลของอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาคงที่ที่ 500 °C 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 29 แสดงผลอัตราส่วนกรดต่อขี้เลื่อยต่อความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาคงที่ที่ 500 °C 60 นาที ตามลำดับ

## 4.5 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

จากการออกแบบสภาวะการทดลองโดยใช้โปรแกรม RSM ที่กำหนดตัวแปรต้น 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด อุณหภูมิในการเผา และเวลาในการเผา และตัวแปรตาม 3 ตัวแปร คือ ร้อยละผลได้ ค่าพื้นที่ผิว และค่าการดูดซับไอโอดีน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงสภาวะการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้ พื้นที่ผิว และการดูดซับไอโอดีน

| สภาวะที่ | ร้อยละผลได้ (%) | ค่าพื้นที่ผิว ($m^2/g$) | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) |
|---|---|---|---|
| 1 | 58.41 | 402.29 | 73.79 |
| 2 | 72.11 | 51.89 | 520.44 |
| 3 | 53.29 | 361.95 | 254.32 |
| 4 | 54.76 | 1115.37 | 344.27 |
| 5 | 59.75 | 431.73 | 283.67 |
| 6 | 52.34 | 785.13 | 393.64 |
| 7 | 79.78 | 306.19 | 461.81 |
| 8 | 67.52 | 301.45 | 257.69 |
| 9 | 47.5 | 974.58 | 553.16 |
| 10 | 55.78 | 1084.44 | 474.6 |
| 11 | 50.95 | 867.54 | 375.63 |
| 12 | 49.97 | 1280.72 | 619.41 |
| 13 | 52.29 | 1331.82 | 580.32 |
| 14 | 58.65 | 665.65 | 379.4 |
| 15 | 43.16 | 891.48 | 328.11 |
| 16 | 66.36 | 939.84 | 314.95 |
| 17 | 54.97 | 1225.56 | 535.56 |
| 18 | 50.76 | 475.46 | 216.41 |

## 4.6 แบบจำลองอธิบายผลของสภาวะดำเนินการในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

### 4.6.1 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อพื้นที่ผิว

จากข้อมูลค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้โปรแกรม Essential regression ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ ดังแสดงในสมการที่ 15

$$y = -10630.5 + 6542.7x_1 + 24.69x_2 - 3582.1x_1^2 + 63.15x_1x_3 - 0.02237x_2^2 - 0.674x_3^2 \quad (15)$$

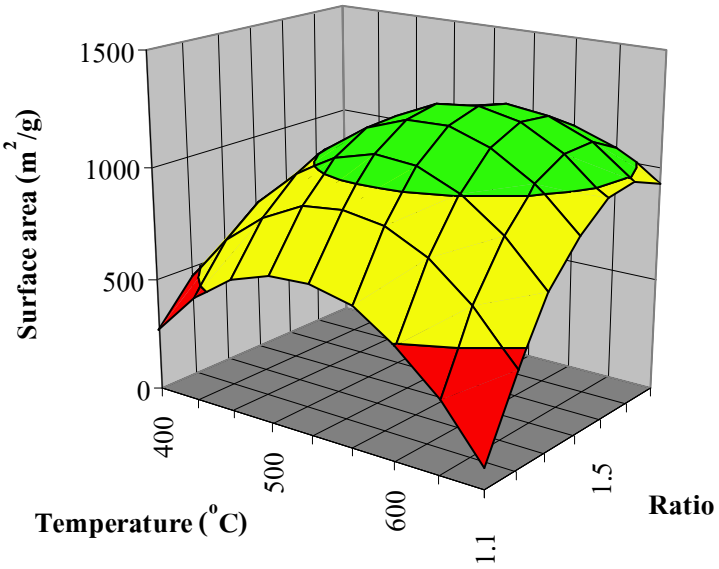
กำหนดให้ y = ค่าพื้นที่ผิว ($m^2/g$)

$x_1$ = อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด

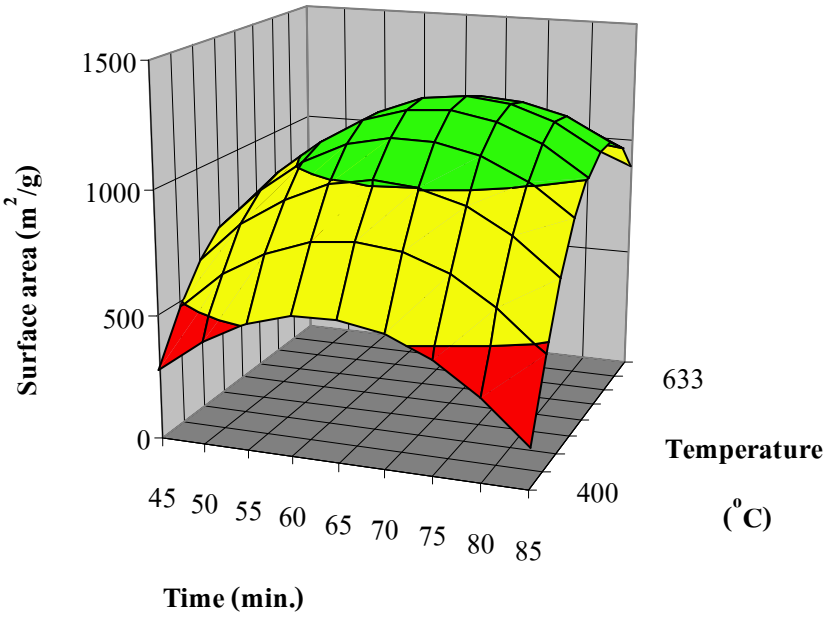
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

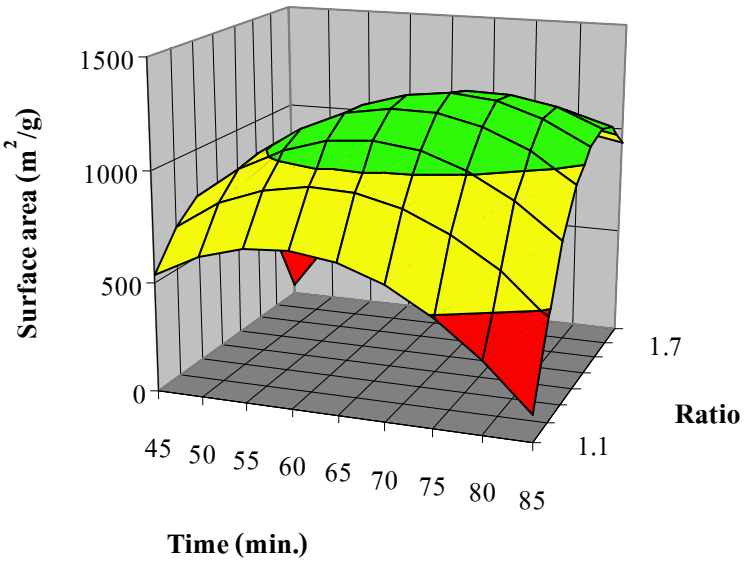
จากสมการที่ 15 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P value ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละเทอมเพื่อดูถึงความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้ โดยเทอมที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านอย่างมีนัยสำคัญจะให้ P value ที่ต่ำกว่า 0.05 และจะมีผลต่อค่าพื้นที่ผิวอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้นถ้า P value มีค่าต่ำมากๆ ซึ่งจากแบบจำลองเทอมที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด ซึ่งมี P value = $4.65 \times 10^{-5}$ ดังแสดงในภาคผนวก ง โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.879 และ 0.807 ตามลำดับ ซึ่งค่า $R^2$ จะบอกถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้ หากค่า $R^2$ adjusted มีค่าใกล้เคียงกับค่า $R^2$ แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ จากข้อมูลของแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ในรูปของกราฟพื้นผิว (surface plot) ดังภาพประกอบที่ 30 ถึง 32




ภาพประกอบที่ 30 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 31 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผา และเวลาในการเผาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 32 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาและอัตราส่วนขี้เลื่อย: กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากแบบจำลองในสมการที่ 15 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่12

ตารางที่ 12 แสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการทดลอง ($m^2/g$) | ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากแบบจำลอง($m^2/g$) |
|---|---|---|
| 1 | 402.29 | 833.05 |
| 2 | 51.89 | 715.16 |
| 3 | 361.95 | 410.44 |
| 4 | 1115.37 | 1002.05 |
| 5 | 431.73 | 395.04 |
| 6 | 785.13 | 769.08 |
| 7 | 306.19 | 420.53 |
| 8 | 301.45 | 406.33 |
| 9 | 974.58 | 967.72 |
| 10 | 1084.44 | 1260.46 |
| 11 | 876.54 | 833.13 |
| 12 | 1280.72 | 1260.46 |
| 13 | 1331.82 | 1260.46 |
| 14 | 665.65 | 818.85 |
| 15 | 891.48 | 745.16 |
| 16 | 939.84 | 690.93 |
| 17 | 1255.56 | 1260.46 |
| 18 | 475.46 | 1002.31 |

เมื่อนำแบบจำลองในสมการที่ 15 ไปหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิว 1271.19 $m^2/g$ คืออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.6 อุณหภูมิในการเผาที่ 552 องศาเซลเซียส เวลา 73 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ให้ค่าพื้นที่ผิวดีที่สุดคือสภาวะที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด 1:1.5 อุณหภูมิในการเผาที่ 550 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้โดยใช้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ

**4.6.2 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน**

จากข้อมูลค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลอง ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ได้ แบบจำลองแสดงดังสมการที่ 16

$$y = -1239.4 + 4169.6x_1 - 5.066x_2 - 2.213x_3 - 1359.0x_1^2 + 2.685x_1x_2 - 21.57x_1x_3$$

$$- 0.00865x_2^2 + 0.158x_2x_3 - 0.383x_3^2 \qquad (16)$$

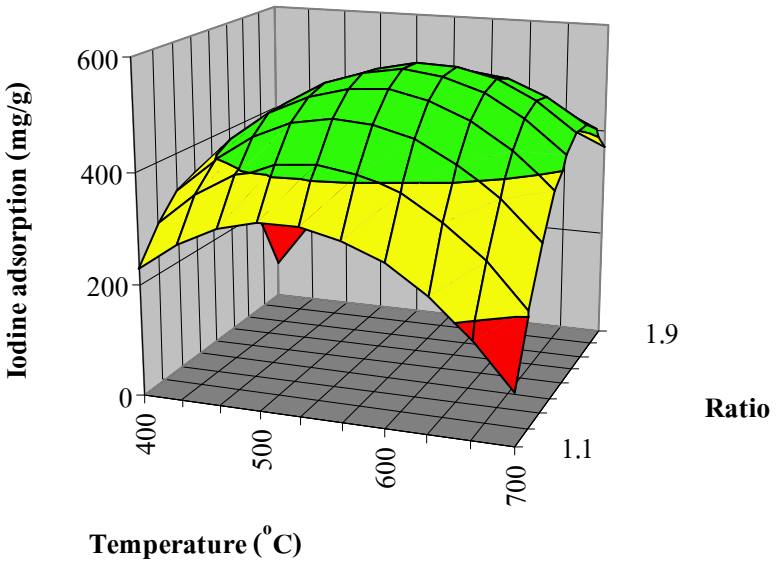
กำหนดให้ y = ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)

$x_1$ = อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด

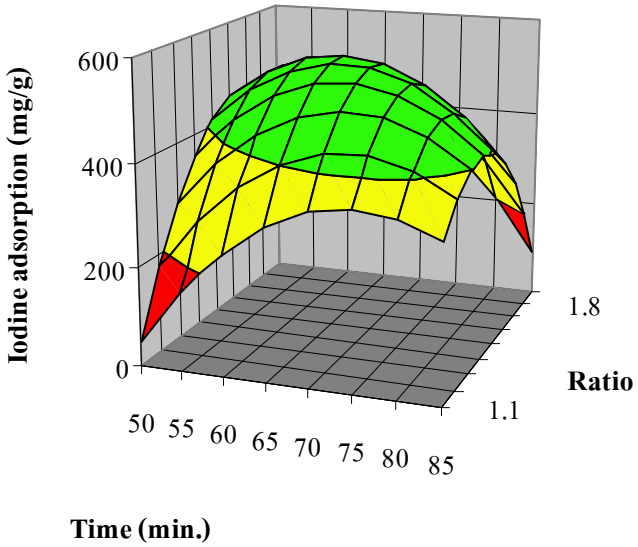
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

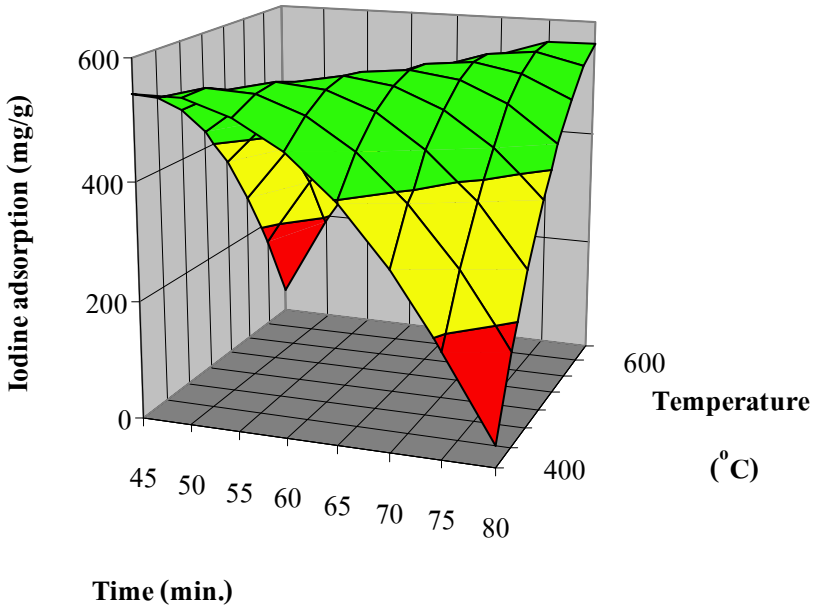
จากสมการที่ 16 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาค่า P value ในภาคผนวก ง ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละเทอม เทอมที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อุณหภูมิและเวลาในการเผา ซึ่งมี P value = $4.15 \times 10^{-4}$ และแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.923 และ 0.825 ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณกรดที่มากเกินไปจะส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงเนื่องจากกรดจะทำให้รูพรุนของถ่านมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบที่ 33 ซึ่งเป็นกราฟพื้นผิวระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดพบว่าที่อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.7 กลับให้ค่าการดูดซับที่ดีกว่าที่อัตราส่วน 1:1.1 ซึ่งมีผลจากอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลมากกว่าอัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรด ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์สามารถแสดงในรูปของกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 33 ถึง 35




ภาพประกอบที่ 33 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 34 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 35 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาและอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ จากแบบจำลองในสมการที่ 16 เปรียบเทียบกับข้อมูลการคำนวณ (ตามภาคผนวก ค) ที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ค่าการดูดซับไอโอดีนจากการทดลอง (mg/g) | ค่าการดูดซับไอโอดีนจากแบบจำลอง (mg/g) |
|---|---|---|
| 1 | 75.15 | 54.13 |
| 2 | 520.44 | 507.37 |
| 3 | 254.32 | 268.58 |
| 4 | 344.27 | 377.03 |
| 5 | 283.67 | 319.05 |
| 6 | 393.64 | 390.98 |
| 7 | 461.61 | 486.07 |
| 8 | 257.69 | 229.93 |
| 9 | 553.16 | 522.76 |
| 10 | 474.6 | 557.03 |
| 11 | 375.63 | 348.81 |
| 12 | 619.4 | 557.03 |
| 13 | 580.32 | 557.03 |
| 14 | 379.4 | 420.95 |
| 15 | 328.11 | 333.83 |
| 16 | 314.95 | 298.56 |
| 17 | 535.56 | 557.03 |
| 18 | 216.41 | 227.20 |

เมื่อนำแบบจำลองในสมการที่ 16 ไปหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 677.78 mg/g คือ อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.6 อุณหภูมิในการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

**4.6.3 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้**

จากข้อมูลค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แบบจำลองดังแสดงในสมการที่ 17 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ได้

$$y = 46.13 + 50.48x_1 + 0.06671x_2 - 0.969x_3 + 45.03x_1^2 - 0.06839x_1x_2 - 2.464x_1x_3 - 0.000160x_2^2 + 0.00337x_2x_3 + 0.01930x_3^2 \quad (17)$$

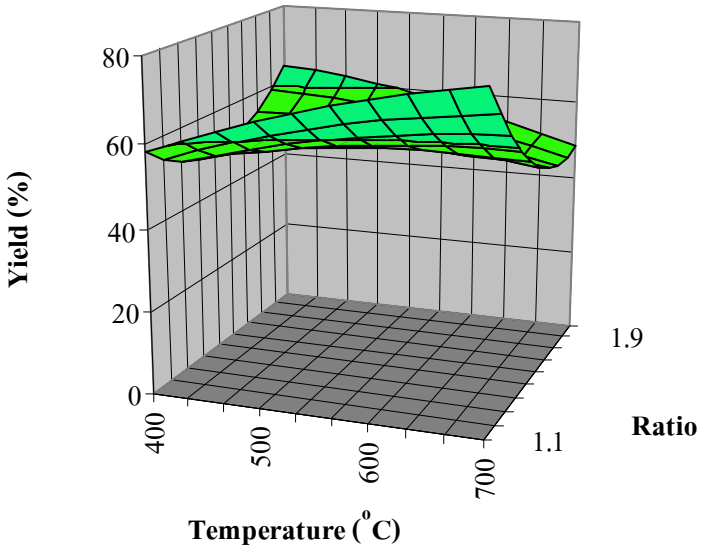
กำหนดให้ y = ร้อยละผลได้

$x_1$ = อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด

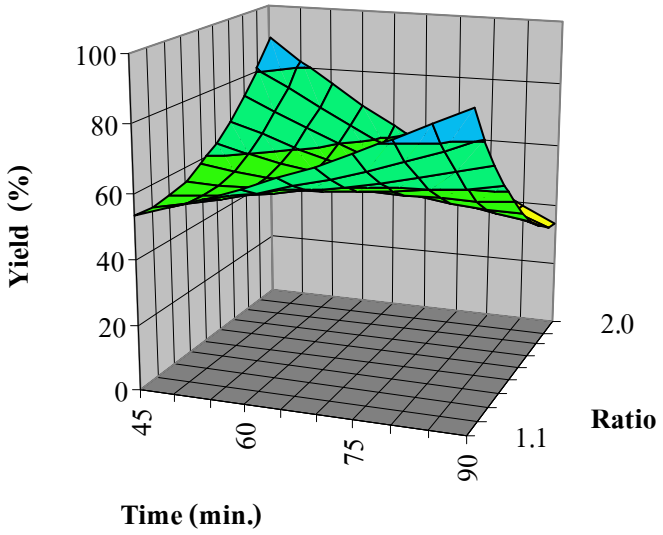
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

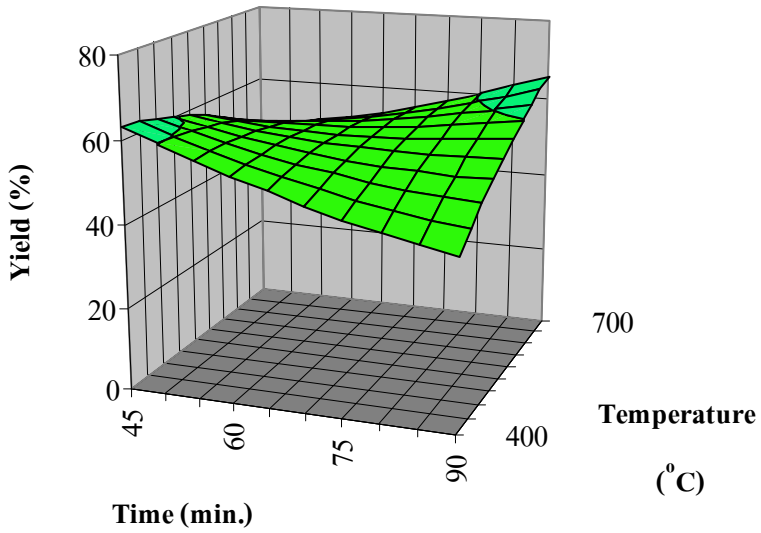
จากสมการที่ 17 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P value ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละเทอม เทอมที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด และเวลาในการเผา ซึ่งมี P value = $2.88 \times 10^{-4}$ โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.936 และ 0.854 ตามลำดับ จากกราฟพื้นผิวของอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด อุณหภูมิ และเวลาต่อผลของร้อยละผลได้ทั้งสามแบบจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จะมีแนวโน้มแตกต่างจากผลของพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีน คือมีค่าสูงสุดที่หลายจุด โดยข้อมูลของแบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ในรูปของกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 36 ถึง 38




ภาพประกอบที่ 36 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 37 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาและอัตราส่วนขี้เลื่อย:กรด (บนฐานของขี้เลื่อย 1 ส่วน) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 38 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และอุณหภูมิในการเผา ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์จากแบบจำลองในสมการที่ 17 เปรียบเทียบกับข้อมูลการคำนวณ (ตามภาคผนวก ค) ที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่14

ตารางที่ 14 แสดงค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ค่าร้อยละผลได้จากการทดลอง | ค่าร้อยละผลได้จากแบบจำลอง |
|---|---|---|
| 1 | 58.41 | 57.31 |
| 2 | 72.11 | 69.49 |
| 3 | 53.29 | 54.56 |
| 4 | 54.76 | 58.33 |
| 5 | 59.75 | 61.11 |
| 6 | 52.34 | 52.09 |
| 7 | 79.78 | 57.31 |
| 8 | 67.52 | 79.47 |
| 9 | 47.50 | 64.94 |
| 10 | 55.78 | 44.84 |
| 11 | 50.95 | 67.60 |
| 12 | 49.97 | 53.10 |
| 13 | 52.29 | 53.10 |
| 14 | 58.65 | 58.38 |
| 15 | 43.16 | 46.90 |
| 16 | 66.36 | 68.14 |
| 17 | 54.97 | 53.10 |
| 18 | 50.76 | 47.23 |

เมื่อนำแบบจำลองในสมการที่ 17 ไปหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าร้อยละผลได้ 75 คืออัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.4 อุณหภูมิในการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที

## 4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ

จากผลการทดลองในการศึกษาปัจจัยของเวลาในการคาร์บอไนซ์ในช่วง 30-60 นาที อุณหภูมิในการกระตุ้น 500-800 องศาเซลเซียส และเวลาในการกระตุ้น 45-90 นาที ต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 15

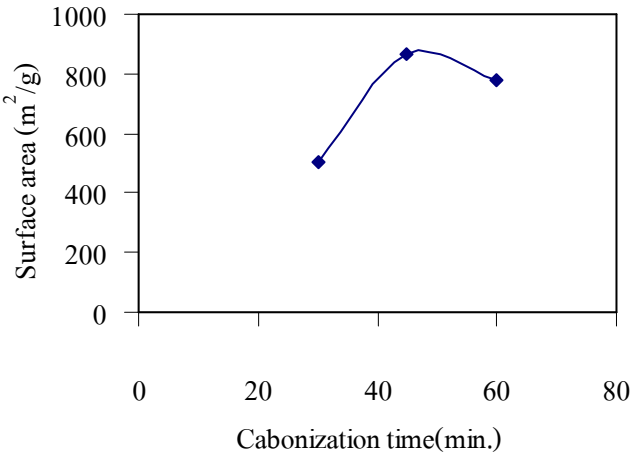
ตารางที่ 15 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

| Conditions | | | Properties | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Time Carbonize (min) | Temp. ($^{o}$C) | Time (min.) | Surface area ($m^2/g$) | Bulk Density ($g/cm^3$) | Iodine Ads. (mg/g) | pH | % yield |
| Experiment I | | | | | | | |
| 45 | 700 | 45 | 620.65 | 0.35381 | 327.31 | 6.476 | 47.71 |
| 45 | 700 | 60 | 835.01 | 0.33422 | 463.67 | 6.576 | 47.63 |
| 45 | 700 | 90 | 601.33 | 0.30065 | 201.24 | 7.134 | 46.28 |
| 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 | | | | | | | |
| 30 | 700 | 60 | 500.54 | 0.36024 | 203.91 | 7.029 | 49.79 |
| 45 | 700 | 60 | 866.18 | 0.33910 | 463.39 | 7.102 | 46.22 |
| 60 | 700 | 60 | 778.16 | 0.32600 | 462.89 | 6.801 | 47.14 |

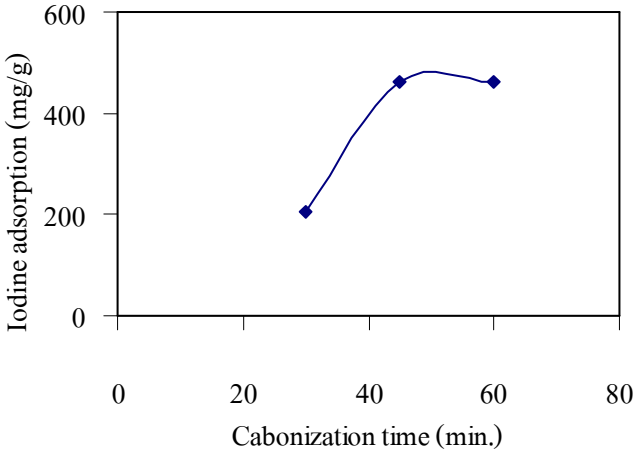
**4.7.1 ผลของเวลาในการคาร์บอไนซ์**

จากตารางที่ 15 พบว่าค่าคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิว พบว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามเวลาในคาร์บอไนซ์ที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ดังภาพประกอบที่ 39 โดยเพิ่มจาก 620.65 $m^2/g$ ที่เวลาในการคาร์บอไนซ์ 30 นาที เป็น 835.01 $m^2/g$ ที่เวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที หลังจากนั้นค่าพื้นที่ผิวจะลดลงเป็น 778.16 $m^2/g$ แสดงให้เห็นว่าสารระเหยที่ไม่ได้อยู่บนผิวถ่านหรือมีโมเลกุลใหญ่ๆซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานในการไล่ ดังนั้น การเพิ่มเวลาในการคาร์บอไนซ์จึงสามารถไล่สารระเหยจำพวกนี้ออกไปได้ ส่งผลให้ถ่านมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากขึ้นทำให้สามารถดูดซับสารได้มากขึ้น สังเกตจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นดังภาพประกอบที่ 40 โดยค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มจาก 203.91 mg/g ที่เวลาในการคาร์บอไนซ์ 30 นาที เป็น 663.39 mg/g ที่เวลาในการคาร์บอไนซ์ 45 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะที่เผาโดยใช้เวลาในการคาร์บอไนซ์ 60 นาที

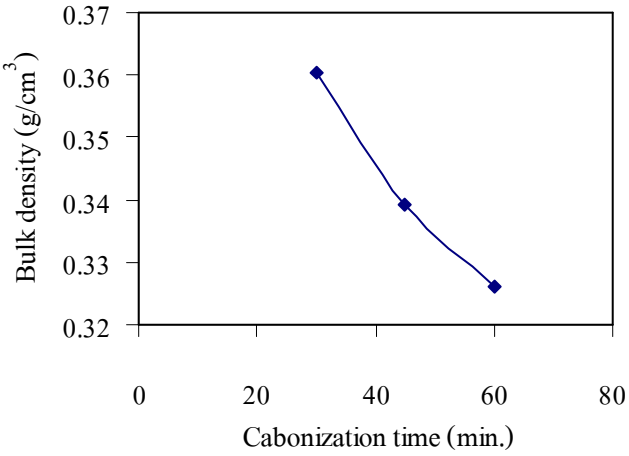
ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบที่ 41 ถึง 42 และในภาพประกอบที่ 43 แสดงผลของเวลาในการคาร์บอไนซ์ต่อค่าความเป็นกรดด่าง พบว่าค่าความเป็นกรดด่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการศึกษาร่วมกับ RSM จึงเลือกเวลาคาร์บอไนซ์ช่วง 30-60 นาที



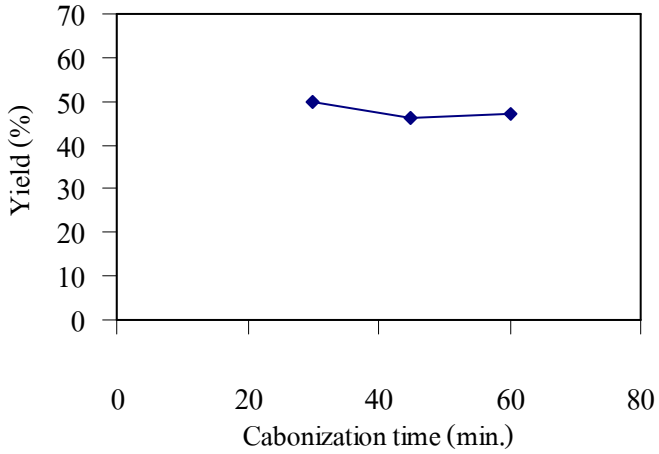

ภาพประกอบที่ 39 แสดงผลของเวลาคาร์บอไนซ์ต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นคงที่ที่ 700 $^{o}C$ และ 60 นาที ตามลำดับ



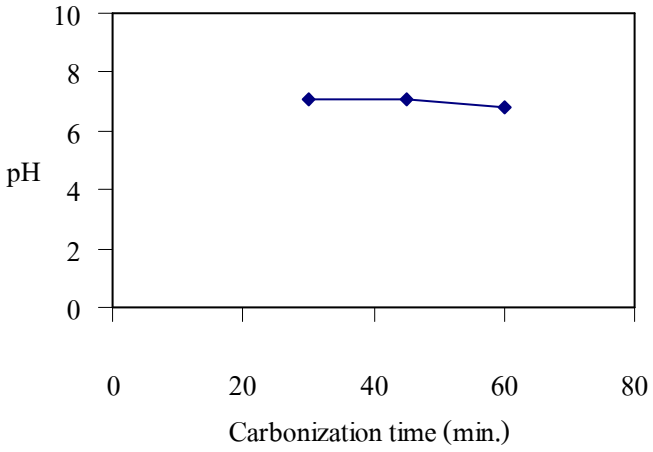

ภาพประกอบที่ 40 แสดงผลของเวลาคาร์บอไนซ์ต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นคงที่ที่ 700 °C และ 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 41 แสดงผลของเวลาคาร์บอไนซ์ต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นคงที่ที่ 700 °C และ 60 นาที ตามลำดับ




ภาพประกอบที่ 42 แสดงผลของเวลาคาร์บอไนซ์ต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นคงที่ที่ 700 °C และ 60 นาที ตามลำดับ

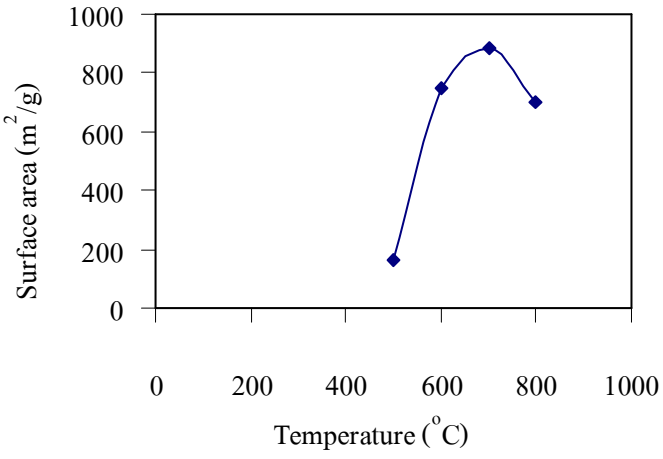



ภาพประกอบที่ 42 แสดงผลของเวลาคาร์บอไนซ์ต่อความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นคงที่ที่ 700 °C และ 60 นาที ตามลำดับ

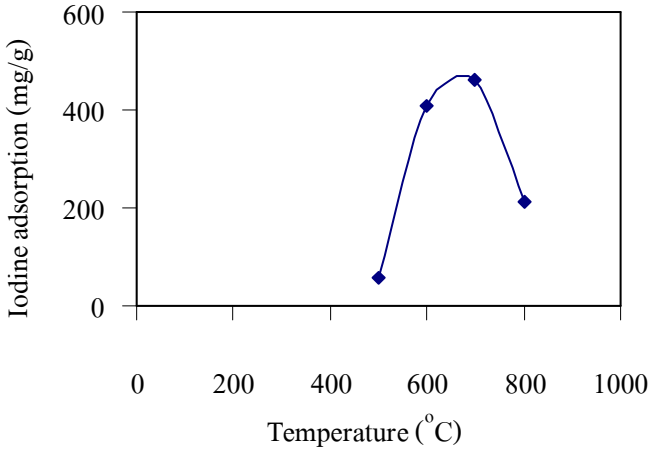
**4.7.2 ผลของอุณหภูมิ**

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในตารางที่ 15 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้นโดยจะเพิ่มจนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง พบว่าค่าพื้นที่ผิวจะเพิ่มจาก 160.66 $m^2/g$ เป็น 887.11 $m^2/g$ จากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็น 700 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าพื้นที่ผิวจะลดลงเป็น 699.52 $m^2/g$ ดังภาพประกอบที่ 44 ส่วนค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 500 องศาเซลเซียส จนถึง 700 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่อถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มจาก 57.61 mg/g เป็น 661.07 mg/g และลดลงเป็น 407.15 mg/g ดังแสดงในภาพประกอบที่ 45 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ผนังที่กั้นระหว่างรูพรุนเกิดการยุบตัวทำให้รูพรุนขยายตัวเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

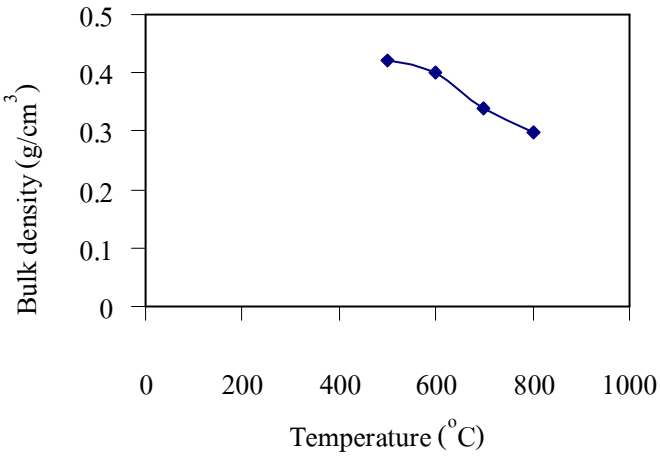
เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้ในภาพประกอบที่ 46 และ 47 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้จะลดลง เนื่องจากรูพรุนเกิดการขยายตัวเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำหนักถ่านลดลงค่าร้อยละผลได้และความหนาแน่นปรากฏจึงลดลง ในส่วนของค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์จะอยู่ในช่วง 6-7 และเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น จึงเลือกช่วงของอุณหภูมิที่ใช้กับ RSM เป็น 500-700 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเลือกอุณหภูมิสูงกว่านี้ไม่ได้ส่งผลให้ถ่านมีคุณภาพดีขึ้น



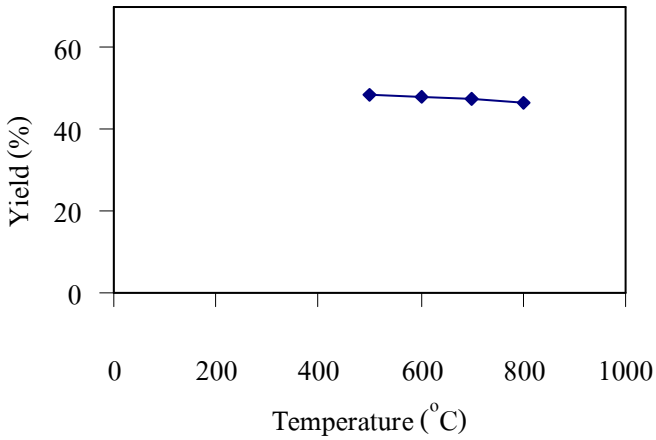

ภาพประกอบที่ 44 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และเวลาในการเผาคงที่ที่ 60 นาที



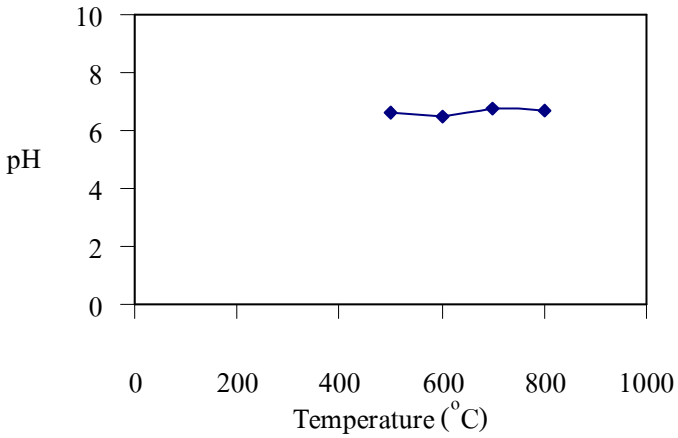

ภาพประกอบที่ 45 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และเวลาในการเผาคงที่ที่ 60 นาที




ภาพประกอบที่ 46 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และเวลาในการเผาคงที่ที่ 60 นาที




ภาพประกอบที่ 47 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และเวลาในการเผาคงที่ที่ 60 นาที

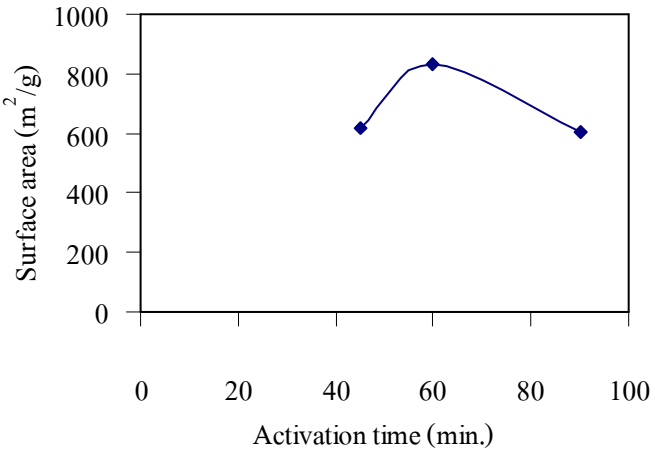



ภาพประกอบที่ 48 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และเวลาในการเผาคงที่ที่ 60 นาที

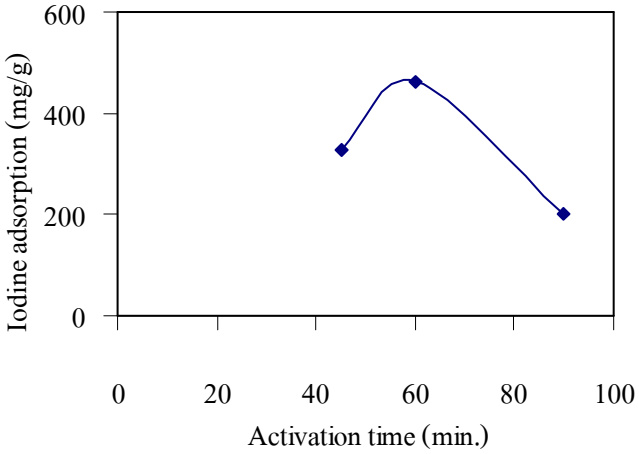
**4.7.3 ผลของเวลาในการกระตุ้น**

จากการศึกษาผลของเวลาต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ พบว่าค่าคุณสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนไปเป็นผลมาจากเวลาที่เปลี่ยนไป จากข้อมูลในตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันคือ มีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการกระตุ้นสูงขึ้น โดยค่าพื้นที่ผิวเพิ่มจาก 620.65 $m^2/g$ ที่เวลาในการเผา 45 นาที เป็นค่าสูงสุด 835.01 $m^2/g$ ที่เวลาในการเผา 60 นาที ดังภาพประกอบที่ 49 แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นจนได้ค่าสูงสุดที่เวลาค่าหนึ่ง เนื่องจากถ่านถูกออกซิไดซ์เป็นเวลานานทำให้เกิดการยุบตัวของผนังรูพรุน ส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัว ค่าความสามารถในการดูดซับโอดีนจึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าพื้นที่ผิว ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 327.31 mg/g ที่เวลาในการเผา 45 นาที เป็น 663.67 mg/g ที่เวลาในการเผา 60 นาที หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะลดลงเป็น 201.24 mg/g ที่เวลาในการเผา 90 นาที ดังภาพประกอบที่ 50

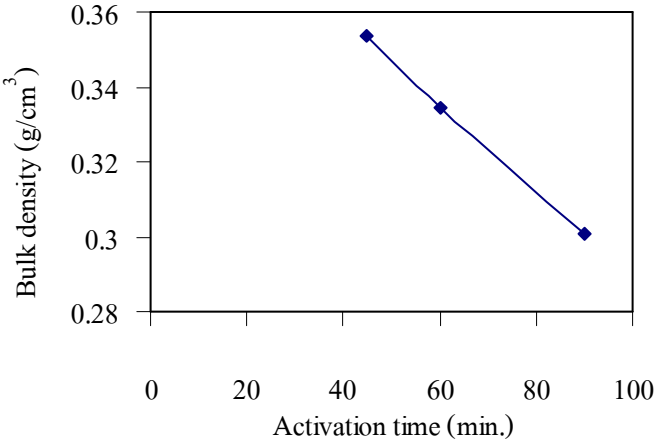
ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างและมวลของไม้มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 51 และ 52 ส่วนค่าความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแสดงในภาพประกอบที่ 53 ดังนั้นช่วงของเวลาที่เหมาะสมในการนำไปใช้กับ RSM จึงเป็นช่วงเวลาในการกระตุ้นที่ 45 – 90 นาที



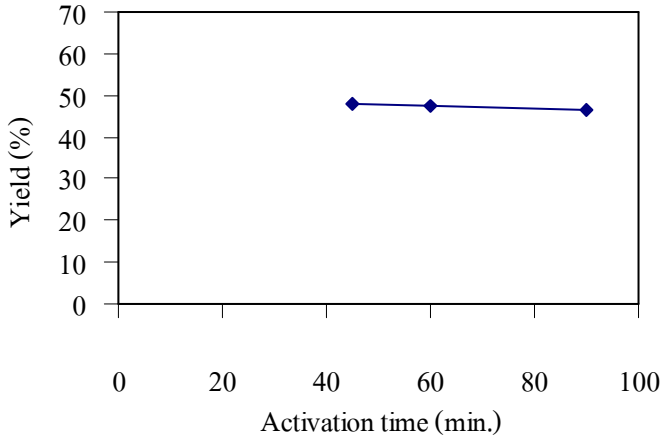

ภาพประกอบที่ 49 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และอุณหภูมิคงที่ที่ 700 $^{o}C$



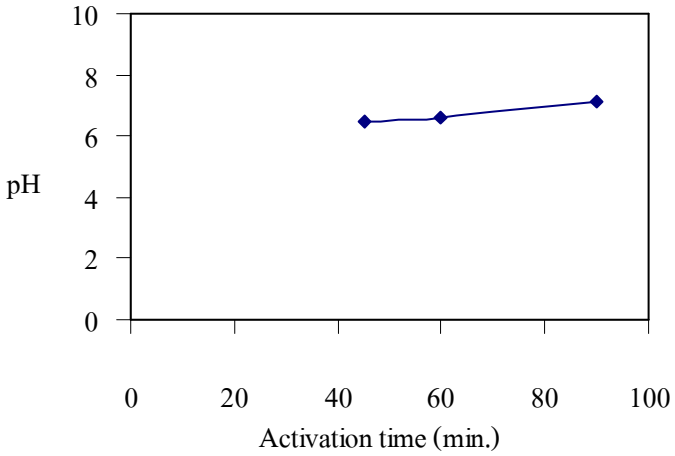

ภาพประกอบที่ 50 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และอุณหภูมิคงที่ที่ 700 $^{o}$C




ภาพประกอบที่ 51 แสดงผลของเวลาการกระตุ้นต่อความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และอุณหภูมิคงที่ที่ 700 $^{o}$C




ภาพประกอบที่ 52 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และอุณหภูมิคงที่ที่ 700 °C




ภาพประกอบที่ 53 แสดงผลของเวลาในการกระตุ้นต่อความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาในการคาร์บอไนซ์คงที่ที่ 45 นาที และอุณหภูมิคงที่ที่ 700 °C

## 4.8 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

จากการออกแบบสภาวะการทดลองโดยใช้โปรแกรม RSM ที่กำหนดตัวแปรต้น 3 ตัวแปร คือ เวลาในการคาร์บอไนซ์ อุณหภูมิในการเผา และเวลาในการเผา และตัวแปรตาม 3 ตัวแปร คือ ร้อยละผลได้ ค่าพื้นที่ผิว และค่าการดูดซับไอโอดีนได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่16

ตารางที่ 16 แสดงสภาวะการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่มีผลต่อร้อยละผลได้ พื้นที่ผิว และการดูดซับไอโอดีน

| สภาวะที่ | ร้อยละผลได้ | ค่าพื้นที่ผิว ($m^2/g$) | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) |
|---|---|---|---|
| 1 | 44.88 | 978.03 | 645.73 |
| 2 | 47.03 | 572.32 | 358.32 |
| 3 | 54.06 | 214.28 | 65.24 |
| 4 | 53.67 | 252.56 | 110.60 |
| 5 | 50.86 | 286.63 | 101.81 |
| 6 | 62.98 | 52.945 | 8.327 |
| 7 | 63.28 | 39.60 | 11.172 |
| 8 | 47.97 | 601.33 | 322.00 |
| 9 | 47.18 | 937.60 | 553.02 |
| 10 | 62.49 | 11.106 | 7.524 |
| 11 | 49.59 | 734.48 | 237.60 |
| 12 | 64.62 | 58.303 | 5.052 |
| 13 | 59.33 | 67.877 | 47.404 |
| 14 | 48.91 | 902.19 | 356.67 |
| 15 | 56.16 | 306.19 | 110.72 |
| 16 | 49.55 | 887.11 | 403.81 |
| 17 | 48.51 | 672.97 | 396.28 |
| 18 | 49.75 | 230.61 | 49.71 |

## 4.9 แบบจำลองอธิบายผลของสภาวะดำเนินการในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

### 4.9.1 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อพื้นที่ผิว

เมื่อนำข้อมูลค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้โปรแกรม Essential regression ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ ดังแสดงในสมการที่

$$y = -31031.4 + 156.25x_1 + 72.27x_2 + 128x_3 - 1.476x_1^2 - 0.0189x_1x_2 - 0.145x_1x_3 - 0.05356x_2^2 - 0.894x_3^2 \quad (18)$$

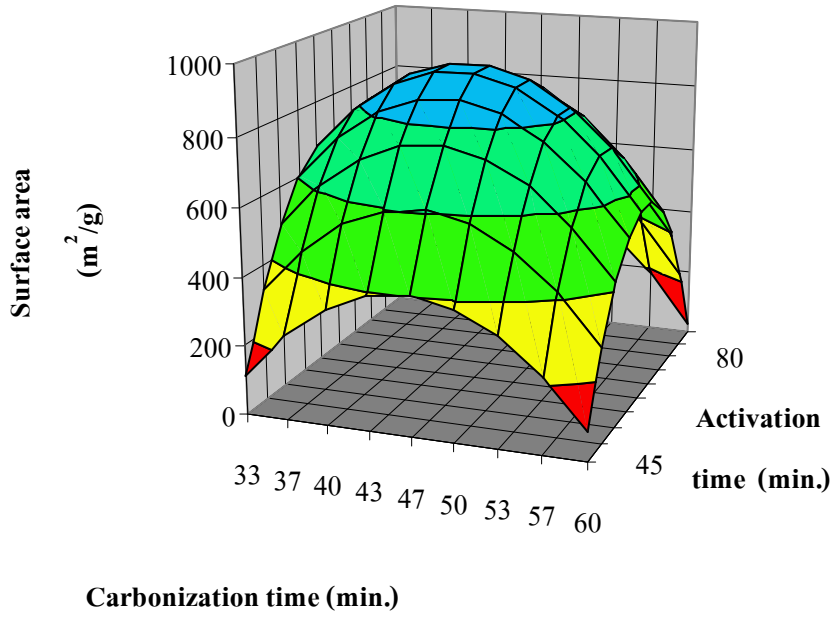
กำหนดให้ y = ค่าพื้นที่ผิว ($m^2/g$)

$x_1$ = เวลาในการคาร์บอไนซ์ (นาที)

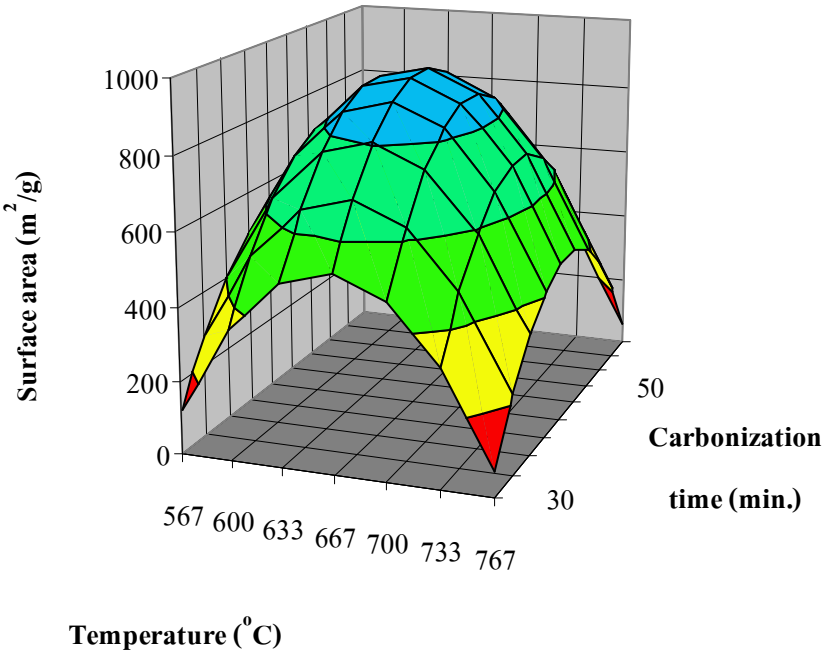
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

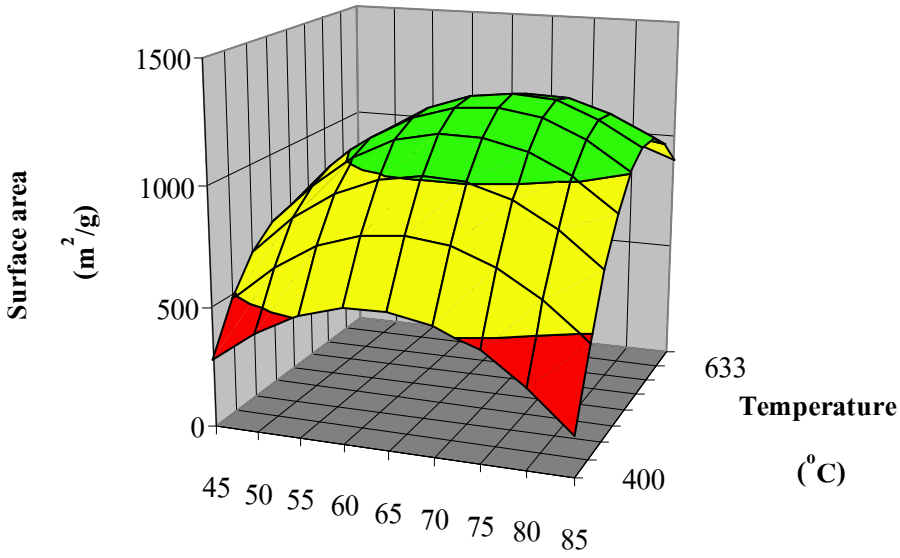
จากสมการที่ 18 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากแบบจำลองเทอมที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อุณหภูมิในการเผา ซึ่งมี P value = $7.84 \times 10^{-5}$ โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.901 และ 0.803 ตามลำดับ หากค่า $R^2$ adjusted มีค่าใกล้เคียงกับค่า $R^2$ แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวพบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับการศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อถ่านกัมมันต์ คือมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยมีทั้งสามมีผลร่วมกันต่อค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังภาพประกอบที่ 54 ถึง 56




ภาพประกอบที่ 54 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และเวลาในการคาร์บอไนซ์ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 55 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผา และเวลาในการคาร์บอไนซ์ที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 56 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผา และเวลาในการเผาที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจากแบบจำลองในสมการที่ 18 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 แสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการทดลอง ($m^2/g$) | ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากแบบจำลอง($m^2/g$) |
|---|---|---|
| 1 | 978.03 | 930.97 |
| 2 | 572.32 | 460.55 |
| 3 | 214.28 | 365.42 |
| 4 | 252.56 | 402.64 |
| 5 | 286.63 | 402.18 |
| 6 | 52.95 | 91.81 |
| 7 | 39.60 | 64.47 |
| 8 | 601.33 | 495.88 |
| 9 | 937.60 | 930.97 |
| 10 | 11.11 | 542.86 |
| 11 | 734.48 | 617.84 |
| 12 | 58.30 | 121.54 |
| 13 | 67.88 | 84.78 |
| 14 | 902.19 | 930.97 |
| 15 | 306.19 | 429.97 |
| 16 | 887.11 | 930.97 |
| 17 | 672.97 | 579.89 |
| 18 | 230.61 | 5.406 |

เมื่อนำแบบจำลองในสมการที่ 18ไปหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิว 946.11 $m^2/g$ คือเวลาในการคาร์บอไนซ์ 46 นาที อุณหภูมิในการเผาที่ 667 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ให้ค่าพื้นที่ผิวดีที่สุดคือสภาวะที่เวลาในการคาร์บอไนซ์เป็น 45 นาที อุณหภูมิในการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้โดยใช้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ

**4.9.2 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน**

จากข้อมูลค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลอง ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ได้ แบบจำลองแสดงดังสมการที่ 19

$$y = -20547.8 + 74.23x_1 + 54.64x_2 + 44.38x_3 - 0.745x_1^2 - 0.01418x_1x_2 - 0.04074x_2^2 - 0.00813x_2x_3 - 0.291x_3^2 \quad (19)$$

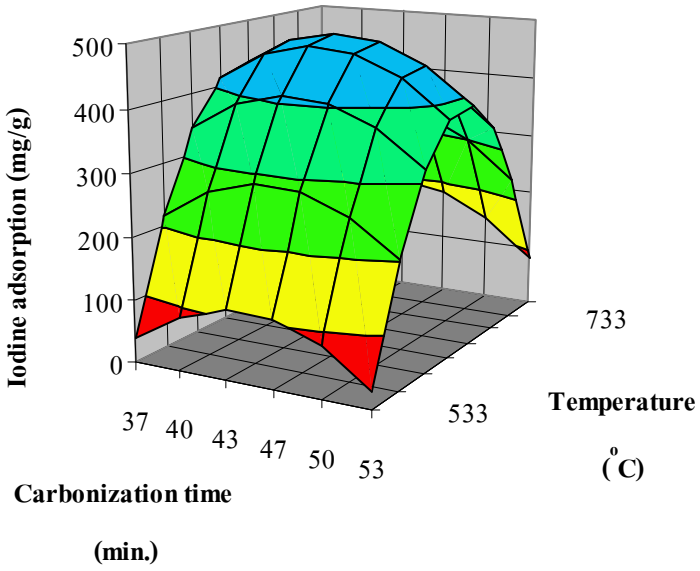
กำหนดให้ y = ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)

$x_1$ = เวลาในการคาร์บอไนซ์ (นาที)

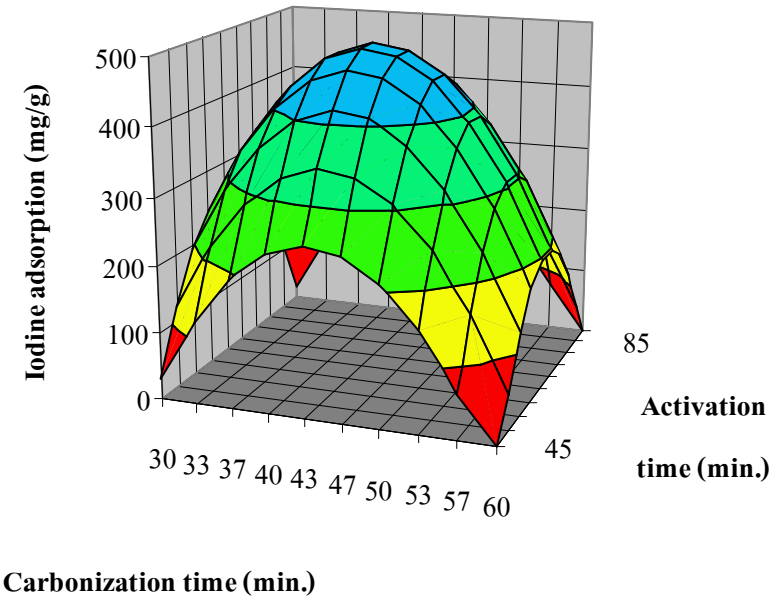
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

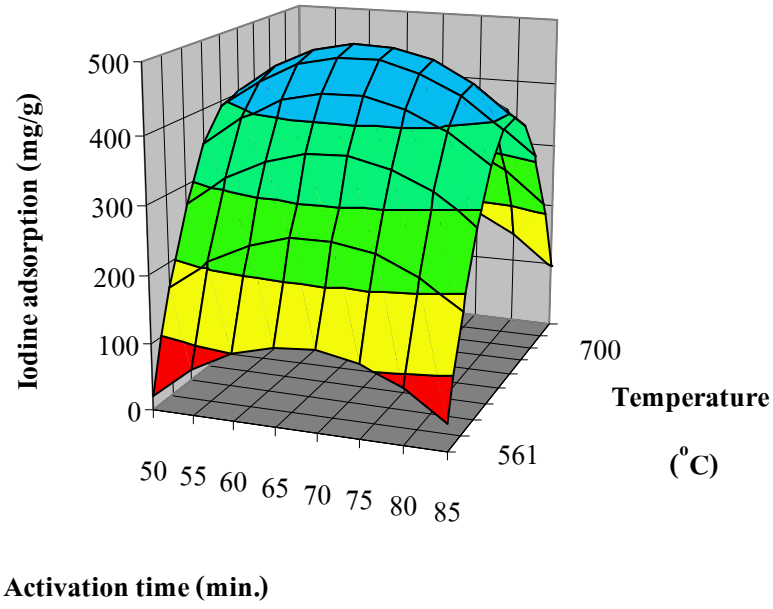
จากสมการที่ 19 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P value ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละเทอม เทอมที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อุณหภูมิในการเผา ซึ่งมี P value = $2.78 \times 10^{-4}$ โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.899 และ 0.784 ตามลำดับ จากข้อมูลของแบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ในรูปของกราฟพื้นผิว ดังภาพประกอบที่ 57 ถึง 59




ภาพประกอบที่ 57 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผา และเวลาในการคาร์บอไนซ์ ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 58 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และเวลาในการคาร์บอไนซ์ ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 59 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และอุณหภูมิในการเผา ที่มีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จากแบบจำลองในสมการที่ 19 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่18

ตารางที่ 18 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ค่าการดูดซับไอโอดีนจากการทดลอง (mg/g) | ค่าการดูดซับไอโอดีนจากแบบจำลอง (mg/g) |
|---|---|---|
| 1 | 645.73 | 485.42 |
| 2 | 358.32 | 342.53 |
| 3 | 65.24 | 44.16 |
| 4 | 110.60 | 144.67 |
| 5 | 101.81 | 75.68 |
| 6 | 8.33 | 31.87 |
| 7 | 11.17 | 25.55 |
| 8 | 322.00 | 334.00 |
| 9 | 553.02 | 485.42 |
| 10 | 7.52 | 4394.29 |
| 11 | 237.60 | 287.24 |
| 12 | 5.05 | 0.28861 |
| 13 | 47.40 | 6.03 |
| 14 | 356.67 | 485.42 |
| 15 | 110.72 | 113.145 |
| 16 | 403.81 | 485.42 |
| 17 | 396.28 | 348.35 |
| 18 | 49.71 | 332.57 |

สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสามารถคำนวณจากสมการที่ 19 เพื่อให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงสุด พบว่า สภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด 488.63 mg/g คือ เวลาในการคาร์บอไนซ์ 44 นาที อุณหภูมิในการเผาที่ 657 องศาเซลเซียส เวลา 67 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนดีที่สุดคือสภาวะที่เวลาในการคาร์บอไนซ์เป็น 45 นาที อุณหภูมิในการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที พบว่าสภาวะทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ

**4.9.3 แบบจำลองอธิบายสภาวะการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้**

จากข้อมูลค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แบบจำลองดังแสดงในสมการที่ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ได้

$$y = 553.52 - 0.840x_1 - 1.352x_2 - 0.769x_3 + 0.01137x_1^2 + 0.00202x_1x_2 - 0.02088x_1x_3 + 0.000763x_2^2 + 0.00277x_2x_3 \quad (20)$$

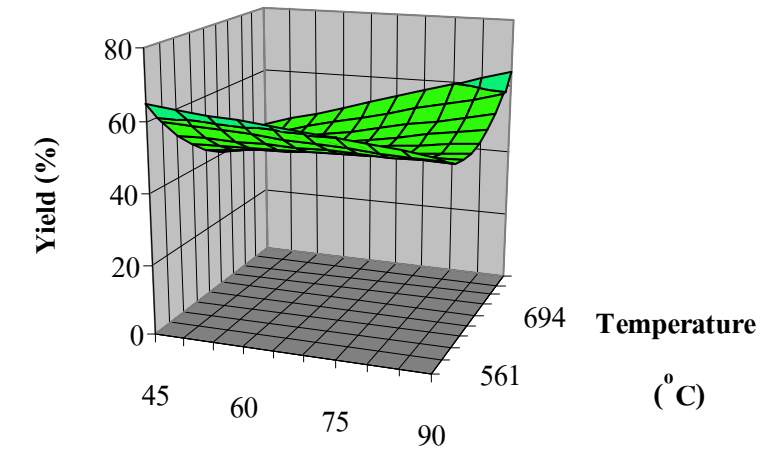
กำหนดให้ y = ค่าร้อยละผลได้

$x_1$ = เวลาในการคาร์บอไนซ์ (นาที)

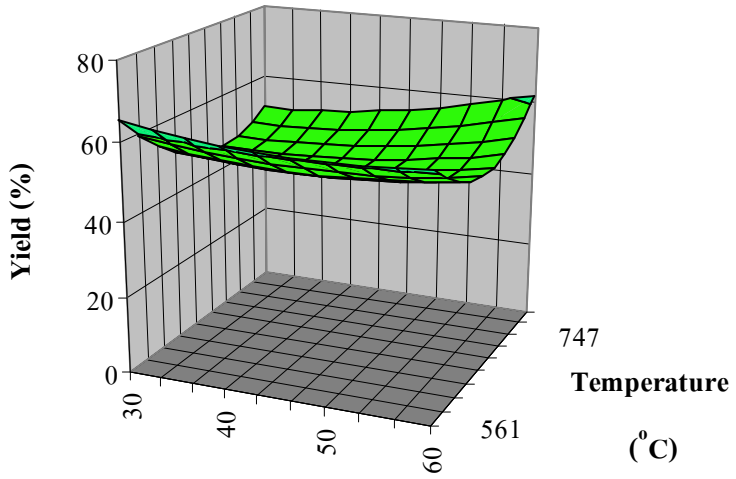
$x_2$ = อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

$x_3$ = เวลาในการเผา (นาที)

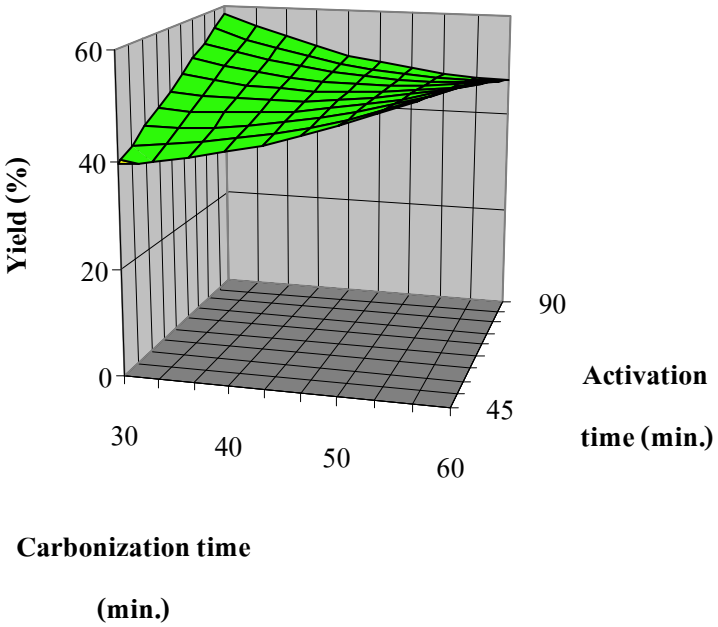
จากสมการที่ 20 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P value ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละเทอม เทอมที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์มากที่สุดคือ อุณหภูมิในการเผา ซึ่งมี P value = $5.47 \times 10^{-4}$ โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2$ และ $R^2$ adjusted เท่ากับ 0.889 และ 0.761 ตามลำดับ จากข้อมูลของแบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ ในรูปของกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 60 ถึง 62




ภาพประกอบที่ 60 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผา และอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 61 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาคาร์บอไนซ์ และอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์




ภาพประกอบที่ 62 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคาร์บอไนซ์ และเวลาในการเผา ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์

เมื่อคำนวณค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจากแบบจำลองในสมการที่ 20 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าร้อยละผลได้ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่19

ตารางที่ 19 แสดงค่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

| สภาวะที่ | ร้อยละผลได้ที่ได้จากการทดลอง | ร้อยละผลได้ที่ได้จากแบบจำลอง |
|---|---|---|
| 1 | 44.88 | 47.45 |
| 2 | 47.03 | 45.33 |
| 3 | 54.06 | 51.59 |
| 4 | 53.67 | 52.73 |
| 5 | 50.86 | 47.60 |
| 6 | 62.98 | 62.40 |
| 7 | 63.28 | 62.08 |
| 8 | 47.97 | 49.47 |
| 9 | 47.18 | 47.45 |
| 10 | 62.49 | 54.53 |
| 11 | 49.59 | 51.15 |
| 12 | 64.62 | 65.13 |
| 13 | 59.33 | 56.22 |
| 14 | 48.91 | 47.45 |
| 15 | 56.16 | 51.62 |
| 16 | 49.55 | 47.45 |
| 17 | 48.51 | 48.86 |
| 18 | 49.75 | 52.49 |

สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่คำนวณจากสมการที่ 20 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งให้ค่าร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 83.14 คือเวลาในการคาร์บอไนซ์ 30 นาที อุณหภูมิในการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

## 4.10 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์

ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นจะคิดค่าใช้จ่ายเป็น 2 ส่วน ด้วยกัน คือ ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า โดยวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 20 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำ

| วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ | คุณสมบัติ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | พลังงาน (kW/hr.) | ค่าสารเคมี (Baht/g) | ค่าไฟฟ้า (Baht/g) | รวม (Baht/g) |
| กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก | 1.0254 | 3.271 | 0.586 | 3.857 |
| กระตุ้นด้วยไอน้ำ | 1.1859 | - | 1.3191 | 1.3191 |

จากตารางที่ 20 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์แต่ละประเภท พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ คือมีค่าเท่ากับ 3.857 บาทต่อกรัม ถึงแม้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า แต่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกสามารถให้พื้นที่ผิวที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งพื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการเลือกถ่านกัมมันต์ไปใช้งาน และเมื่อเปรียบเทียบในด้านของพลังงานแล้วพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะสูงกว่าที่กระตุ้นด้วยกรดเล็กน้อย ดังนั้นการเลือกผลิตถ่านกัมมันต์จึงขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งาน โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไอน้ำแสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากการผลิตทั้ง 2 วิธี

| วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ | คุณสมบัติ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | พื้นที่ผิว ($m^2/g$) | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) | ร้อยละผลได้ | pH | ความหนาแน่นปรากฏ ($g/cm^3$) | ค่าใช้จ่าย (Baht/g) | พลังงาน (kW/hr.) |
| กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก | 1331.82 | 580.32 | 52.29 | 3.5 | 0.28453 | 3.857 | 1.0254 |
| กระตุ้นด้วยไอน้ำ | 978.03 | 645.73 | 44.88 | 7.1 | 0.42226 | 1.3191 | 1.1859 |