

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสาร

2.1 ไม้ยางพารา

ไม้ยางพารา (rubber wood) เรียกตามภาษาพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensi* หรือชื่อทั่วไปเรียกว่ายางพาราหรือต้นยางพารา (para rubber) ปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางพาราธรรมชาติได้มากที่สุดในโลกมีเนื้อที่ปลูกประมาณ 12.3 ล้านไร่ มีผลผลิตส่งออกปีละประมาณ 2.4 ล้านตัน มูลค่า 100,000 ล้านบาท/ปี ส่งออกไปในรูปน้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางอบแห้ง และยางแท่ง สำหรับไม้ยางพาราจะถูกโค่นในช่วงอายุ 25 – 30 ปี เพื่อนำไปแปรรูปเป็นไม้ยางพาราแปรรูปของอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ โดยจะมีเศษไม้และขี้เลื่อยจากยางพาราในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก สำหรับองค์ประกอบต่างๆของขี้เลื่อยไม้ยางพาราแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของขี้เลื่อยไม้ยางพารา

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	
	(1)	(2)
ความชื้น	6.20	7.95
คาร์บอนคงตัว	23.38	24.15
สารระเหย	69.68	62.95
เถ้า	0.74	4.95

ที่มา: ⁽¹⁾ Srinivasakannan และ Bakar (2004)

⁽²⁾ Kumar *et al.* (2006)

2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีกระตุ้นหรือถ่านกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน พื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆได้เป็นอย่างดี (มอก. 900-2532) ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐานชนิดหนึ่งแต่ถูกสร้างขึ้นมาโดยการกระตุ้น ทำให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก หากศึกษาด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (x-ray diffraction) พบว่าโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่มีข้อบกพร่องไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติ

เหล่านี้ทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านอื่น เช่น ถ่านหิน ลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์มีดังต่อไปนี้

2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มีราคาถูก หาง่าย ปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ และสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม้สลายตัวเมื่อเก็บ สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้ ปริมาณการใช้วัตถุดิบต่างๆในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบ	ตันต่อปี
ไม้	130,000
ถ่านหิน	100,000
ลิกไนท์	50,000
กะลามะพร้าว	35,000
พีท (Peat)	35,000
อื่นๆ	10,000

ที่มา: Bansal *et al.* (1998)

วัตถุดิบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์โดยตรงมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่ และสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ กลุ่มเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้อ้อย ชานอ้อย เป็นต้น กลุ่มถ่านหิน ได้แก่ ลิกไนต์ พีท และส่วนต่างๆของสัตว์ เช่น กระดุก เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีผลต่อลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 ในการเลือกวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมืองค์ประกอบของคาร์บอนมากและมีปริมาณเถ้าต่ำ วัตถุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีสารระเหยสูงเช่น ไม้ ลิกนิน จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณรุกรุนสูงและความหนาแน่นต่ำจึงดูดซับแก๊สได้ไม่ดีนัก ส่วนวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าวจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรุกรุนขนาดเล็กสูงสามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต สภาพที่ใช้ เป็นต้น

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตและคุณภาพถ่านกัมมันต์

Raw Material	Carbon (wt.%)	Volatiles (wt.%)	Density ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	Ash (wt.%)	Texture of Activated Carbon
Soft wood	40-45	55-60	0.4-0.5	0.3-1.1	soft, large pore volume
Hard wood	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	soft, large pore volume
Lignin	35-40	58-60	0.3-0.4	-	soft, large pore volume
Nutshells	40-45	55-60	1.4	-	hard, large pore volume
Lignite	55-70	25-40	1.0-1.35	5-6	hard, small pore volume
Soft coal	65-80	20-30	1.25-1.50	2-12	Medium hard, Medium pore volume
Petroleum coke	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	Medium hard, Medium pore volume
Semi-hard coal	70-75	10-15	1.45	5-15	hard, large pore volume
Hard coal	85-95	5-10	1.5-1.8	2-15	hard, large pore volume

ที่มา: Bansal *et al.* (1998)

2.2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 2 ขั้นตอนดังนี้

2.2.2.1 การคาร์บอนไนเซชัน

การคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส โดยคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ควรมีลักษณะดังนี้ คือมีสีน้ำตาล เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่มันเงา ปลายที่หักแหลมคม ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์มีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะการทำให้ได้ถ่านโดยใช้อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ทำให้ยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นเป็นกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการคาร์บอนไนซ์

2.2.2.2 การกระตุ้น

การกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยเหล่านี้

1. การเพิ่มพื้นที่ผิว โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
2. การทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น หมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
3. การกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

ประสิทธิภาพการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆที่ทำก่อนการกระตุ้นด้วย โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ

1. การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) เป็นการทำให้ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการกระตุ้นโดยตรงจากแก๊สที่ใช้ โดยใช้แก๊สออกซิไดซ์ผ่านไปยังวัตถุดิบโดยตรง ตัวอย่างของแก๊สออกซิไดซ์ได้แก่ ไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำยิ่งยวด คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 800-1000 องศาเซลเซียส สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือไม่มีสารเคมีตกค้าง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นขึ้นกับชนิดของแก๊สและวัตถุดิบแต่มักไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาส่วนใหญ่อยู่อในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส หรือบางกรณีอาจใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

2. การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน ซึ่งมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน นอกจากนี้ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อการเลือกใช้ชนิดของกรดด้วยเช่นกัน

สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์สามารถประเมินได้จากค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นสมบัติที่นิยมใช้แสดงคุณภาพถ่านกัมมันต์ การหาพื้นที่ผิวจำเพาะมีข้อจำกัดคือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียว ในลักษณะที่ปกคลุมผิวของถ่านกัมมันต์พอดี โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนดาข่ายที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวจะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น
2. ปริมาณเถ้า หมายถึง การหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูง และปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ ถ้าทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากเถ้าจะอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูงควรนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำหรือสารละลายกรด ซึ่งช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น
3. ความเป็นกรดด่าง มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรดด่างของผลิตภัณฑ์เป็นอันมาก ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือด่างลงได้ โดยเติมสารที่มีความเป็นกรด-ด่างตรงกันข้าม เพื่อปรับให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นกรดด่างตามต้องการ
4. ความหนาแน่นบัลค์หรือความหนาแน่นปรากฏ หมายถึง การหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้เป็นปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาค และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3-0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคืออนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น
5. การดูดซับเมทิลีนบลู เป็นการทดสอบการดูดสีของถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำมัน โดยใช้สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจากสารเมทิลีนบลู เชื่อว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม สามารถดูดซับ โมเลกุลของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด
6. การดูดซับไอโอดีน เป็นการทดสอบคุณสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารถูกดูดซับ เนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพประกอบที่เป็นแก๊ส เชื่อว่ารูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอมใช้ในการดูดซับไอโอดีนได้ดี
7. การดูดซับฟีนอล เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดกลิ่นในน้ำ ปริมาณคาร์บอนที่ต้องใช้ในการลดความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำให้เหลือ 0.1-0.001 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เรียกว่า phenol number
8. ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขัดสี ถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตทำให้เกิดการขัดสีกันเองระหว่างอนุภาคถ่านกับอนุภาคอื่นๆ ที่ปนมากับกระแสของของไหล ผลคือเกิดการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วน และหลุดออกมากับกระแสไหลออกของของไหล ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการขัดสีต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้ ส่วนความ

แข็งแรงของถ่านกัมมันต์ สามารถวัดและเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เริ่มใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ ถ่านกัมมันต์บางส่วนมีการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ซึ่งถูกนำมาคำนวณและเปรียบเทียบออกมาเป็น ความแข็งแรงอีกขั้นตอนหนึ่ง

2.3 วิธีการหาผลตอบสนองของพื้นผิว (Response Surface Methodology : RSM)

เทคนิค RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ มักถูกนำมาใช้เพื่อหาจุดเหมาะสมของกระบวนการ หรือหาผลกระทบของตัวแปรอิสระในกระบวนการผลิต เทคนิค RSM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการตอบสนองของพื้นที่ผิวต่อตัวแปรอิสระ ในที่นี้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การถดถอย ดำเนินการคำนวณด้วยโปรแกรม Essential Regression ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

2.3.1 กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา (ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม) การระบุตัวแปรอิสระจะเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการผลิตและต้องระบุช่วงการศึกษาให้ชัดเจน ตัวแปรอิสระเหล่านี้สามารถกำหนดทิศทางการพัฒนากระบวนการผลิตได้ ในที่นี้ตัวแปรอิสระที่ถูกคัดเลือกเพื่อศึกษาได้แก่

2.3.1.1 ตัวแปรอิสระของการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกได้แก่ อัตราส่วนของขี้เถ้าต่อกรด อุณหภูมิการกระตุ้น และเวลาการกระตุ้น

2.3.1.2 ตัวแปรอิสระของการกระตุ้นด้วยไอน้ำได้แก่ เวลาการคาร์บอนในเซชัน อุณหภูมิการกระตุ้น และเวลาการกระตุ้น

สำหรับการระบุคุณภาพของกระบวนการผลิตสามารถกำหนดได้จากตัวแปรตาม ซึ่งในที่นี้จะคัดเลือก 3 ค่าคือ พื้นที่ผิว BET ค่าการดูดซับไอโอดีน และร้อยละผลได้

2.3.2 กำหนดรหัส (Code) ของช่วงตัวแปรอิสระที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการออกแบบสภาวะการทดลอง โดยใช้วิธีการ Central Composite Design (CCD) โดยการแปลงค่าของรหัสตัวแปรอิสระ (code variable) แสดงดังสมการที่ (1)

$$x = \frac{X - [X_{\max} + X_{\min}]/2}{[X_{\max} - X_{\min}]/2} \quad (1)$$

โดยที่ x = รหัสตัวแปรอิสระ

X = ตัวแปรอิสระ

X_{\max}, X_{\min} = ค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

2.3.3 ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้ออกแบบไว้

2.3.4 แสดงผลของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง ในรูปพื้นผิวดตอบสนองสามมิติ

2.3.5 สร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการยกกำลังสองหรือสมการควอดราติก (quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

โดย $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}$ และ β_{ij} คือค่าคงที่, สัมประสิทธิ์ถดถอยแบบเชิงเส้น, สัมประสิทธิ์ถดถอยแบบกำลังสองและสัมประสิทธิ์ถดถอยแบบเชื่อมโยง (cross product term coefficient) ตามลำดับ X_i และ X_j เป็นตัวแปรอิสระ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม (2545) เปรียบเทียบการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ 3 วิธีคือ กระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำ การกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการกระตุ้น อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 400-700 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเผาอยู่ในช่วง 30-60 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำคืออุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะได้พื้นที่ผิว 421 m²/g และค่าดูดซับโทลูอินและไอระเหยของโทลูอินได้ 11.92% และ 7.94% โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้พื้นที่ผิว 347 m²/g และดูดซับโทลูอินและไอระเหยของโทลูอินได้ 23.35% และ 51.95% โดยน้ำหนักตามลำดับ

ธเรศและสุชนีย์ (2546) ทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ใช้การกระตุ้นจากโซเดียมคลอไรด์ เพื่อกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยมีสภาวะการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นดังนี้ สภาวะการคาร์บอนไนซ์และกระตุ้นคือ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนของโซเดียมคลอไรด์เป็น 1:3 พบว่าค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและถ่านกัมมันต์ทางการค้าเป็น 532.29, 486.45 และ 900 mg/g ตามลำดับ และค่า BET ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ทางการค้าเป็น 492.42, 385.91 และ 955.70 m²/g ตามลำดับ

ธเรศ ศรีสถิตย์ และคณะ (2547) ศึกษาชนิดสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย สารเคมีที่ใช้คือโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยต่อสารเคมีและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์คือ ใช้น้ำหนักของขี้เลื่อยต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1:1 และอุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนสภาวะที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์คือ ใช้น้ำหนักขี้เลื่อยต่อซิงค์คลอไรด์เป็น 1:1 และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านที่ได้จากการกระตุ้น

ด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ 519.4 และ 1,021.3 mg/g ตามลำดับ และมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 593.79 และ 1,572.51 m²/g ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว (ความเข้มข้น 10 mg/l) ที่ pH 8 เท่ากับ 9.96 mg/l ของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว (ความเข้มข้น 10 mg/l) ที่ pH 7 เท่ากับ 99.7 mg/g ของถ่านกัมมันต์ เมื่อทดลองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ระดับความลึกของถ่านกัมมันต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l ที่จุดเบรคทรูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์เป็น 1.21 l, 14.17 l, 186.04 l และ 209.17 l ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้ 4.0 l, 21.5 l, 337.25 l และ 829.5 l

Tancredi *et al.* (1996) ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากจีเลื่อยไม้ชนิด *Pinus Cariba* ด้วยการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยอุณหภูมิการกระตุ้น 600-800 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันแต่โครงสร้างความพรุนจากการใช้ไอน้ำดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งความกว้างของรูพรุนเป็นผลมาจากอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่สูงขึ้นด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเป็นเมโซพอร์ โดยมีคุณภาพดีเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Badie *et al.* (2002) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเตรียมถ่านจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ คือ กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ 500 องศาเซลเซียส ขนาดของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกรดต่อเปลือกถั่วลิสงเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนเท่ากับ 1.0 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ เมื่อคาร์บอนไนซ์ที่ 700-900 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีปริมาณรูพรุนต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้รูพรุนขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 500-700 องศาเซลเซียส พบว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลน้อยมากในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี และรูพรุนที่ได้มีขนาดกลางรวมทั้งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถดูดซับเมทธิลินบลู 200-400 mg/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำสามารถดูดซับได้ 30-100 mg/g ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุดสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกโดยใช้อัตราส่วน 1:1 และเผาที่ 500 องศาเซลเซียส

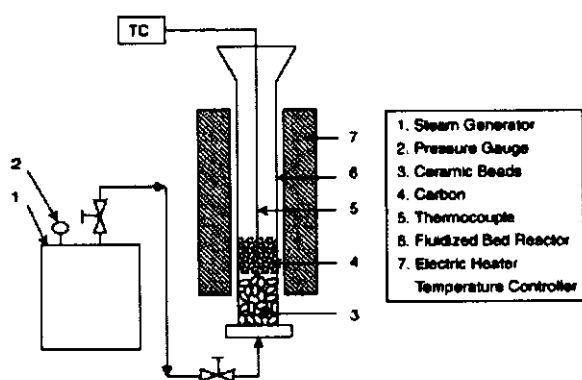
Srinivasakannan and Bakar (2004) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากจีเลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ขอบเขตการทดลองคือ อัตราส่วนจีเลื่อยต่อกรด 1.0, 1.5 และ 2.0 อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้นคือ 30, 45, 60 และ 90 นาที จากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดเตรียมได้จากการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 200 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างซีลีอกับกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1.5 ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 1,096 มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,496 m^2/g และร้อยละของผลึกภัณฑ์ที่ได้เท่ากับ 35%

Diaz-Diez *et al.* (2004) ศึกษาการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเศษไม้ (chestnut, walnut และ cedar) ของโรงงานเฟอร์นิเจอร์ในสเปน และใช้การกระตุ้นจากกรดฟอสฟอริก พบว่าสถานะความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นเป็น 36% โดยน้ำหนัก

Wu *et al.* (2005) ศึกษาถึงคุณสมบัติของรูพรุน และการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกถั่ว โดยการกระตุ้นด้วย KOH และไอน้ำ ในการกระตุ้นด้วย KOH ใช้อัตราส่วน KOH/char เท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าได้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 731 m^2/g เป็น 1687 m^2/g ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเป็น 80-92% ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำทำโดยคาร์บอนไนซ์เปลือกถั่วจากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขณะเดียวกันก็ให้ไอน้ำไหลผ่านด้วยอัตรา 3 cm^3/min เป็นเวลา 90 นาที หลังจากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว 821 m^2/g ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเป็น 42% ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

Kumar *et al.* (2006) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซีลีอกไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบฟลูอิดไดเซชัน โดยทำการคาร์บอนไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 700 และ 750 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 1-4 ชั่วโมง โดยจัดชุดการทดลองดังรูปที่ 1 พบว่าสถานะที่ดีที่สุดในการทดลอง คือ การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้ซีลีอกขนาด 0.46 มิลลิเมตร ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน 765 mg/g ค่าพื้นที่ผิว BET เท่ากับ 1092 m^2/g และค่า EGME surface area เท่ากับ 867 m^2/g



รูปที่ 1 อุปกรณ์การกระตุ้นด้วยไอน้ำแบบฟลูอิดไดเซชันของงานวิจัย Kumar *et al.* (2006)

Budinova *et al.* (2006) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ห่วย ด้วยวิธีการผลิต 3 แบบ แบบที่หนึ่งทำการแช่เศษไม้ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 20-50% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนกรดต่อเศษไม้เป็น 1, 1.5 และ 2 หลังจากนั้นทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แบบที่สอง

ทำการทดลองโดยใช้สภาวะเดียวกับแบบที่หนึ่ง หลังจากนั้นทำการกระตุ้นต่อ โดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และแบบที่สามทำการทดลองในสภาวะเดียวกับแบบที่หนึ่ง หลังจากนั้นกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าแบบที่สามจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด คือมีพื้นที่ผิว $1360 \text{ m}^2/\text{g}$ และค่าการดูดซับ ไอโอดีน 1280 mg/g

Karacan *et al.* (2007) ศึกษาสภาวะการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก Turkish lignite โดยการกระตุ้นของ K_2CO_3 โดยใช้เทคนิค RSM เพื่อออกแบบการทดลองแบบ central composite design จากนั้นข้อมูลการทดลองถูกนำไปวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาแบบจำลองควอตราดิกของพื้นที่ผิว BET ร้อยละผลได้ และปริมาณของรุกรุน การตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบจำลองและอิทธิพลของตัวแปรถูกนำมาศึกษาทางหลักสถิติและการวิเคราะห์การแปรปรวน จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคืออัตราส่วนของลิกไนต์ต่อสารเคมีคือ 1:2.05 อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส

Tan *et al.* (2007) ศึกษาสภาวะการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าวด้วยการกระตุ้นของ KOH โดยใช้เทคนิค RSM เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิการกระตุ้น เวลาการกระตุ้นและอัตราส่วนขี้เถ้าต่อสารเคมีที่มีผลต่อการตอบสนองค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูและร้อยละผลได้ แบบจำลองที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์การแปรปรวนเพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรต่อค่าตอบสนอง โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนของลิกไนต์ต่อ KOH คือ 1:3.9 อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 816 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้น 1 ชั่วโมง