

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 ไม้ยางพารา

ไม้ยางพารา (rubber wood) เรียกตามภาษาพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* สามีญชนทั่วไป เรียกว่า ยางพารา หรือ ต้นยางพารา (para rubber) ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อประมาณ 100 ปีมาแล้ว ยางชนิดที่กล่าวนี้ซื้อขายกันที่เมืองพารา ประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้เพียงแห่งเดียวเท่านั้น เพื่อสะดวกแก่การซื้อขายกันในครั้งนั้นจึงเรียกยางชนิดนี้ว่า "ยางพารา" ในระยะนั้นมียางที่ได้จากต้นไม้หลายชนิด เช่น ยางแคสตีลลาในอเมริกากลาง ยางพันธุเมียจากแอฟริกา และยางอินเดียรับเบอร์ในเอเชียตอนใต้ ถิ่นเดิมของต้นยางพาราอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศบราซิล ต้นยางพาราเป็นไม้ป่าขึ้นกระจัดกระจายอยู่ห่างๆกัน ทั้งในที่ดอนและที่ลุ่มของแม่น้ำอะเมซอนจนถึงประเทศเปรู ชาวพื้นเมืองคือชาวอินเดียนแดงในอเมริกาใต้และอเมริกากลางรู้จักยางมานาน และได้นำมาใช้ทำประโยชน์มาหลายร้อยปี ก่อนที่ชาวยุโรปจะไปพบโลกใหม่หรือทวีปอเมริกา ซึ่งเป็นถิ่นเดิมของต้นยางพารา ชาวอินเดียนแดงได้ใช้ยางทำลูกบอล ทำผ้ากันฝน และทำถุงเก็บน้ำปากแคบเป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยประมาณปี พ.ศ.2442 พระยารัษฎานุประดิษฐ์ซึ่งขณะนั้นดำรงตำแหน่งเจ้าเมืองตรัง ได้นำยางพาราจากมาเลเซียเข้ามาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง เป็นแห่งแรก และต้นยางต้นดังกล่าวปัจจุบันก็ยังอยู่ ปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางพาราธรรมชาติได้มากที่สุดในโลกมีเนื้อที่ปลูกประมาณ 12.3 ล้านไร่ มีผลผลิตส่งออกปีละประมาณ 2.4 ล้านตัน มูลค่า 100,000 ล้านบาท/ปี ส่งออกไปในรูปน้ำยางข้น (Concentrate Latex) ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet : RSS) ยางอบแห้ง (Air Dried Sheet : ADS) และยางแท่ง (Standard Thai Rubber : STR) และที่ตลาดต้องการมากที่สุดคือยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) และยางแท่งเบอร์ 20 (STR 20) เพราะยางทั้งสองชนิดนี้นำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำยางรถยนต์ ไม้ยางพารามีการใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อยๆ ประมาณได้ว่าพื้นที่สวนยาง 1 ไร่ สามารถให้ไม้ยางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วขึ้นไป ประมาณ 40 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามขนาดของไม้ที่ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- ไม้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้วขึ้นไป จำนวน 2 ลูกบาศก์เมตร ไม้ประเภทนี้นำไปใช้ผลิตไม้อัด (veneer)

- ไม้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 - 8 นิ้ว จำนวน 23 ลูกบาศก์เมตร ไม้ประเภทนี้นำไปเลื่อยเป็นไม้แปรรูปขนาดต่างๆได้ประมาณ 8 ลูกบาศก์เมตร ส่วนที่เหลือ 15 ลูกบาศก์เมตร เป็นขี้เลื่อย และปอกไม้ ซึ่งนำไปผลิตเป็นไม้แผ่นปาร์ติเกิ้ล (Particle Board) และไม้แผ่นเอ็ม ดี เอฟ หรือแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fibreboard)

- ไม้ขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-6 นิ้ว จำนวน 15 ลูกบาศก์เมตร ไม้ประเภทนี้นำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ไม้พิน และวัตถุดิบในโรงงานผลิตปาร์ติเกิ้ล และ เอ็ม ดี เอฟ

ในระหว่างกระบวนการแปรรูปไม้ยางพาราจะได้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีมูลค่าต่ำซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยเซลลูโลส 49% เฮมิเซลลูโลส 17-24 % ลิกนิน 18-24 % และเถ้า 0.86 % โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบต่างๆของขี้เลื่อยไม้ยางพาราแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของขี้เลื่อยไม้ยางพารา

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

ที่มา: <sup>(1)</sup> C. Srinivasakannan และ Mohamad Zailani Abu Bakar (2004)

<sup>(2)</sup> B.G. Prakash Kumar *et al* (2006)

## 2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีถ่านกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน พื้นที่ผิวสูง และสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ( มอก. 900-2532)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่งแต่ถูกคิดขึ้นมาเป็นพิเศษโดยการกระตุ้น (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก หากศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อกระทบวัตถุโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก (crystallites) อยู่บ้าง แต่มีข้อบกพร่องไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหินลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ที่ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก ความจุในการดูดซับสูง ผิวที่โครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นบนผิวหน้าและการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซาโกนัล (hexagonal) ทำให้พื้นที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์สูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) ทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารได้มากกว่า ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์มีดังต่อไปนี้

### 2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มีราคาถูก หาง่าย ปริมาณคาร์บอนสูง ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ และสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม้สลายตัวเมื่อเก็บ สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้ ปริมาณการใช้วัตถุดิบต่างๆ ในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 2 โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรงมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ พวกเซลล์โลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว จี้เลื้อย ชานอ้อย เป็นต้น พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท และส่วนต่างๆ ของสัตว์ เช่น กระดุก เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีผลต่อลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบ	ตันต่อปี
Wood	130,000
Coal	100,000
Lignite	50,000
Coconut shell	35,000
Peat	35,000
Other	10,000

ที่มา: Bansal R.C *et al.* (1998)

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

Raw Material	Carbon (wt.%)	Volatiles (wt.%)	Density (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	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 R.C *et al.* (1998)

ในการเลือกวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมียอดประกอบของคาร์บอนมากและมีปริมาณเถ้าต่ำ วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีสารระเหยสูงเช่น ไม้ ลิกนิน จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนสูงและความหนาแน่นต่ำจึงดูดซับก๊าซได้ไม่ดีนัก ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าวจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กสูงสามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและก๊าซ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต สภาพที่ใช้ เป็นต้น

### 2.2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 2 ขั้นตอนดังนี้

#### การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ที่เกิดในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และก๊าซ อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น การคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนการเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ โดยคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังนี้ คือมีสีดำตลอดเมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่มันเงา ปลายที่หักแหลมคม ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะการทำให้ได้ถ่านโดยใช้อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ทำให้อยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านขบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นเป็นกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการคาร์บอนไนเซชัน

วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ต้องการคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้ สารระเหยต่ำ ค่าคาร์บอนคงตัวสูง ความพรุนสูง มีความแข็งต่อการขัดสี ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นต้องทำการคาร์บอนไนเซชันให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์ แล้วเปลี่ยนเป็นโค้ก การคาร์บอนไนเซชันให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยปรับสภาวะการไพโรไลซิสให้เหมาะสม

### **การกระตุ้น**

การกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

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

ประสิทธิภาพการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ทำก่อนการกระตุ้นด้วย โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ

#### 1.การกระตุ้นทางกายภาพ (physical Activation)

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการทำให้ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการกระตุ้นโดยตรงจากก๊าซที่ใช้ โดยใช้ก๊าซออกซิไดซ์ผ่านไปยังวัตถุดิบโดยตรง ตัวอย่างของก๊าซออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ ไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำยิ่งยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) อากาศ ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 800-1000 องศาเซลเซียส สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นขึ้นกับชนิดของก๊าซและวัตถุดิบ แต่มักไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาส่วนใหญ่อยูในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส หรือบางกรณีอาจใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

กระบวนการกระตุ้นด้วยกายภาพของก๊าซต่างๆแสดงได้ดังต่อไปนี้

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การใช้ไอน้ำในที่นี้ คือ ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ปฏิกิริยาพื้นฐานกับคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้



ในระบบนี้ไม่เพียงแต่เกิดปฏิกิริยาของการกระตุ้นเท่านั้น แต่ยังเกิดผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาของน้ำและก๊าซ ซึ่งจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ขึ้น ความดันส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลกระทบต่อความดันของระบบ

โดยไอน้ำถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายที่ใช้น้อยมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดี คือ

1. โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน
2. เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้
3. เกิดปฏิกิริยารวดเร็วโดยเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่าที่

สภาวะ 10 กิโลพาสคัลและอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

การใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นจะทำให้ช่วงอุณหภูมิ 750-950 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พวกละหะอัลคาไล เหล็ก ทองแดง สารประกอบของออกไซด์และคาร์บอนเนต เป็นต้น

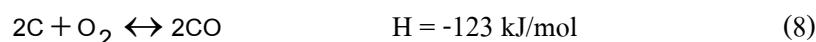
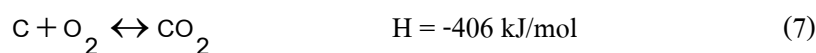
- การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส กลไกปฏิกิริยาของคาร์บอนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อธิบายได้ 2 กลไก ดังสมการ



- การกระตุ้นด้วยออกซิเจนหรืออากาศ

กลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่ชัด ทราบแต่เพียงว่าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ที่เกิดง่ายและเร็วกว่าไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นดังนี้



ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อน ปัจจุบันมองว่าทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้น และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่ จะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่ผิวเป็นจำนวนมาก แต่มักไม่นิยมนำอากาศมาใช้เป็นตัวกระตุ้นเพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ออกซิเจนจึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

## 2. การกระตุ้นทางเคมี (chemical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน ซึ่งมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $\text{ZnCl}_2$ ) แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างกระบวนการกระตุ้นทางเคมีมีดังต่อไปนี้

- การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ซิงค์คลอไรด์เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ ลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความหนาแน่น  $2.91 \text{ g/cm}^3$  และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 136.28 ซิงค์คลอไรด์ละลายได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5-1 นอร์มัล ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้นจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน  $[\text{ZnCl}_3]^-$  หรือ  $[\text{ZnCl}_4]^{2-}$  สารละลายเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์มีความเป็นกรดสูง สามารถละลายแป้ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ วัตถุประสงค์ที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์กระตุ้น ควรใช้เซลลูโลสมาก เช่น ชานอ้อย เป็นต้น สำหรับการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง



### - การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเริ่มจากการนำสารละลายกรดฟอสฟอริกผสมกับ วัตถุคิบแห้งในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วนำไปอบแห้ง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส กระบวนการกระตุ้นเกิดจากการควบแน่นของฟอสฟอริก ซึ่งคล้ายกับกระบวนการกระตุ้น ด้วยซิงค์คลอไรด์ ถ่านที่ได้ถูกนำไปเผาต่อทันทีที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะเกิดการออกซิไดซ์ของคาร์บอน โดยกรดฟอสฟอริกจะกลายเป็นฟอสฟอรัส และสารประกอบไฮไดรด์ (hydrides) ผลผลิตที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีสภาพเป็นก๊าซ ซึ่งจะถูกรอกซิไดซ์ กลับเป็นกรดฟอสฟอริกในทันที กลับไปกลับมาเป็นวัฏจักร นอกจากนี้กรดฟอสฟอริกยังใช้เป็น สารช่วยในการกระตุ้นได้อีกด้วย เช่น หลังจากกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้วจะนำถ่านที่ได้ไปแช่กรด ฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 25 เพื่อช่วยให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้น ตัวอย่างวัตถุคิบ ที่เหมาะสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เช่น ขี้เลื่อย เปลือกถั่ว เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีสามารถทำได้ด้วยกรดอื่นๆ อีก เช่น กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) อย่างไรก็ตามพบว่าคุณภาพของถ่านที่ได้จะด้อยกว่า นอกจากนี้ปัจจัยด้าน สิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อการเลือกใช้ชนิดของกรดด้วยเช่นกัน

### 2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งประเภทโดยใช้หลักเกณฑ์ต่างๆดังต่อไปนี้

#### 1. แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  และ  $KOH$  เป็นต้น ถ่านที่ได้มักมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าการกระตุ้นทางกายภาพ
- การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ก๊าซเป็นตัวกระตุ้น เช่น ไอน้ำ,  $CO_2$  และอากาศ เป็นต้น

#### 2. แบ่งตามขนาดของรูพรุน

- รูพรุนขนาดเล็ก หรือไมโครพอร์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 10 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มักมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อกรัม รูพรุนขนาดเล็กจัดเป็นรูพรุนที่มีความสำคัญกับการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและ พลังงานในการดูดซับสูง ทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ความดันต่ำๆส่วนมากใช้ในการดูดซับ ไอระเหย

- รูพรุนขนาดกลาง หรือเมโซพอร์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนในช่วง 20-50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มักมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินาเจล (alumina gel) ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate catalyst) เป็นต้น รูพรุนขนาดกลางสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง มักจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

- รูพรุนขนาดใหญ่ หรือแมโครพอร์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มักมีปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วรูพรุนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก มักจะใช้ในการฟอกสีหรือบำบัดน้ำเสีย

### 3. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาล หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง มักใช้งานกับวัฏภาคก๊าซ เช่น ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

### 4. แบ่งตามรูปร่างและขนาด

- ชนิดผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 0.015-0.025 มิลลิเมตร มีอัตราการถ่ายโอนมวลการแพร่ต่ำ อัตราการดูดซับสูง ซึ่งสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เหมาะสำหรับการใช้งานในวัฏภาคของเหลวที่เป็นสารละลาย ซึ่งใช้ในการฟอกสีหรือการผลิตยา คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดผงแบบต่างๆแสดงดังภาคผนวก ก

- ชนิดเม็ด (granulated) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 1-5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวภายในและอัตราการแพร่สูง เหมาะสำหรับใช้แยกก๊าซหรือถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่มากกว่า ใช้ในวัฏภาคของเหลวที่มีความหนืดต่ำ

- ชนิดก้อนกลม (pellets or spherical) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาด 2-5 มิลลิเมตร มีความแข็งแรงเชิงกลสูง สามารถใช้งานได้เหมือนกับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด แต่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซ  $\text{SO}_2$  และ  $\text{NO}_2$  ได้ดี

### 5. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ใช้ดูดซับก๊าซ เช่น คูดก๊าซพิษ กลิ่นไอของสารอินทรีย์

- ใช้ฟอกสี คือใช้เป็นตัวฟอกสี

- ใช้ดูดซับพวกโลหะ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้แยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ใช้ในการ

แยกทอง เงิน ทองคำขาวจากแร่

#### 6. แบ่งตามสภาวะการใช้งาน

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในวัฏภาคก๊าซ (gas-phase activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับแยกก๊าซ ดูดซับก๊าซ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต้องรูพรุนมากๆ และมีขนาดของรูพรุนในระดับไมโครพอร์ ซึ่งควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 300 ตารางเมตรต่อกรัม ถึง 3,000 ตารางเมตรต่อกรัม

- ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในวัฏภาคของเหลว (liquid-phase activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับกระบวนการของของเหลว ถ่านกัมมันต์ที่ใช้มีขนาดรูพรุนอยู่ในระดับเมคโคพอร์ซึ่งช่วยให้การดูดซับเกิดได้เร็วสำหรับการดูดซับในปริมาณที่ไม่มากนัก

### 2.2.4 สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

#### พื้นที่ผิวจำเพาะ (*specific surface area*)

สมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะใช้แสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ มากกว่าการแสดงคุณภาพโดยการหาปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกของการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวจำเพาะมีข้อจำกัด คือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องเรียงตัวแบบชั้นเดียวในลักษณะที่ปกคลุมผิวของสารดูดซับ หรือถ่านกัมมันต์พอดิ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลานานการกระตุ้นเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวจะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

#### เถ้า (*ash content*)

หมายถึง การหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูง และปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เถ้าทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากเถ้าจะอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูงควรนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำหรือสารละลายกรด ซึ่งช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น

#### ความเป็นกรด-ด่าง (*pH*)

ความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ อาจจำกัดความเหมือนกับความเป็นกรด-ด่างของสารแขวนลอยของถ่านกัมมันต์ในน้ำกลั่น ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารละลายที่ใช้น้ำ ความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรด-ด่างของผลิตภัณฑ์เป็นอันมาก ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือด่างลงได้ โดยเติมสารที่มีความเป็นกรด-ด่างตรงกันข้าม เพื่อปรับให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นกรด-ด่างตามต้องการ

### **ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density)**

หมายถึง การหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้เป็นปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาค และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาด และความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3 - 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น

### **การดูดซับเมทิลีนบลู**

เป็นการทดสอบการดูดสีของถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำมัน โดยใช้สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจากสารเมทิลีนบลู เชื่อว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม สามารถดูดซับ โมเลกุลของเมทิลีนบลู ได้ดีที่สุด

### **การดูดซับไอโอดีน**

เป็นการทดสอบคุณสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารดูดซับ เนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกักต้อนสูง โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพประกอบที่เป็นก๊าซ เชื่อว่ารูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอมใช้ในการดูดซับ ไอโอดีน ได้ดี

### **การดูดซับฟีนอล**

เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดกลิ่นในน้ำ ปริมาณคาร์บอนที่ต้องใช้ในการลดความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำให้เหลือ 0.1-0.001 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เรียกว่า phenol number

### **ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขัดสี**

ถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตทำให้เกิดการขัดสีกันเองระหว่างอนุภาคถ่านกับอนุภาคอื่นๆ ที่ปนมากับกระแสของของไหล ผลคือเกิดการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วน และหลุดออกมาพร้อมกับกระแสไหลออกของของไหล ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการขัดสีต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้

ส่วนความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์ สามารถวัดและเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เริ่มใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ ถ่านกัมมันต์บางส่วนมีการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ซึ่งถูกนำมาคำนวณและเปรียบเทียบออกมาเป็นความแข็งแรงอีกขั้นตอนหนึ่ง

## 2.2.5 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ( <http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002> วันที่ 08 /12 / 04)

**ประเภทใช้กับของเหลว** อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ทำให้น้ำมันหรือไขมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง มีรสดีขึ้น นอกจากนี้ใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร้อออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย

- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร

- อุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำอัดลม เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ ทำให้เครื่องดื่มนั้นมีรสชาติดีขึ้น

- อุตสาหกรรมเคมีและยา

- อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี

- อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน (petroleum oil-well brines) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด

- ขบวนการที่มีการใช้สารเร่ง (catalytic process) ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง (Catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิด รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

**ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ** ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำน้ำกากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ

- อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับก๊าซพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน

- อุตสาหกรรมบุหรี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นก้นกรองบุหรี

## 2.3 กระบวนการดูดซับและการหาพื้นที่ผิว

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบในของไหล โดยเลือกดูดซับองค์ประกอบหรือกลุ่มองค์ประกอบบางชนิด (adsorbate) ลงบนพื้นผิวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งเป็นของแข็งพรุนที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก ตัวดูดซับมักจะถูกบรรจุเป็นเบดนิ่ง (fixed bed) อยู่ในหอดูดซับ (adsorber) โดยมีของไหลเคลื่อนที่เข้าสู่หอดูดซับ เมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างของไหลกับตัวดูดซับที่สามารถดูดซับองค์ประกอบบางชนิดในของไหลได้แล้ว จะเกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟสทั้งสอง การดูดซับจะดำเนินจนกระทั่งตัวดูดซับเข้าใกล้สภาวะอิ่มตัว จึงหยุดปฏิบัติการ เพราะประสิทธิภาพของตัวดูดซับจะลดลงตามเวลา จากนั้นตัวดูดซับในหอดูดซับจะทำความสะอาดโดยกระบวนการคายซับหรือการดีซอร์ปชัน (desorption) เพื่อกำจัดสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งให้ออกไปมากที่สุด ขั้นตอนการดีซอร์ปชันนี้เรียกว่าการฟื้นฟูสภาพหรือการรีเจนเนอเรท (regenerate) ก่อนที่จะนำเอาของแข็งกลับมาใช้ในกระบวนการดูดซับครั้งต่อไป การดูดซับเป็นเทคโนโลยีการแยกสารอีกแบบหนึ่ง ถูกนำมาใช้เพื่อแยกสารป้อนที่เป็นสารผสมให้มีความบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งเป็นการแยกแบบกำจัด (purification) หรือสามารถใช้เพื่อแยกแบบบัลค์ (bulk separation) ก็ได้ ซึ่งเกณฑ์กำหนดการแยกนี้จะใช้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการดูดซับในสารป้อน โดยอาจประมาณแบบคร่าวๆ ที่ความเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก หรืออาจมีค่าแตกต่างจากนี้ได้ ตัวอย่างการดูดซับเพื่อทำให้บริสุทธิ์ขึ้น ได้แก่ การบำบัดกลิ่นหรือสีของน้ำโดยใช้ผงถ่านเป็นตัวดูดซับ เป็นต้น สำหรับการแยกแบบบัลค์ ได้แก่ การใช้ระบบดูดซับแบบปรับความดัน (pressure swing adsorption) เพื่อแยกอากาศออกให้ได้เป็นไนโตรเจนและออกซิเจน เป็นต้น นอกจากนี้การดูดซับยังถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการพิเศษอื่นๆ ได้ เช่น การทำโครมาโทกราฟี การแลกเปลี่ยนประจุสำหรับลดความกระด้างของน้ำหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้เบดของแข็งที่เป็นพวกเรซินที่มีความสามารถดูดซับประจุที่อยู่ในน้ำ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างการดูดซับอีกมากมาย เช่น การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซผสมโดยใช้ของแข็งพวกซีโอไลต์ การกำจัดไฮโดรคาร์บอนออกจากก๊าซผสม เป็นต้น

โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับของก๊าซแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) มีรายละเอียดดังนี้

**2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ** เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมบนผิวหน้าของตัวดูดซับ (adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ van der waals จึงเป็นการจับกันที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ความร้อนของการดูดซับต่ำประมาณ 8.4-25.1 kJ/mol เป็น

กระบวนการที่คายความร้อน มีพลังงานกระตุ้นต่ำ และไม่มีการแตกหักของพันธะ สามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่กรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูง อัตราการดูดซับจะช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยความเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน ปริมาณการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

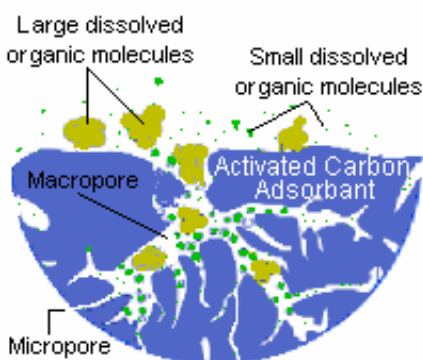
**2.3.2 การดูดซับทางเคมี** มีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่อยู่ผิวหน้ากับอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นการจับที่แข็งแรง ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 62.8-83.7 kJ/mol ซึ่งเป็นแบบเฉพาะเจาะจง กล่าวคือ ขึ้นกับชนิดของก๊าซและชนิดของพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับก๊าซที่ผิวหน้าเป็นแบบชั้นเดียว การที่จะให้การดูดซับทางเคมีเข้าสู่สมดุลนั้นจะต้องใช้เวลาาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณไอที่ถูกดูดซับมีค่ามากกว่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารนั้นมาก ปริมาณการดูดซับจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิต่ำและมีค่าน้อย เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว คุณสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสามารถได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงลักษณะที่แตกต่างกันของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

Property	Physical Adsorption	Chemical Adsorption
Heat of Adsorption (kJ/mol)	20-40 (comparable to heats of liquefaction)	> 80 (comparable to bulk- phase chemical reaction)
Rate of Adsorption (at 273 K)	Fast	Slow
Temperature dependence with increasing temperature	Decrease	Increase
Desorption	Easy by reducing, pressure or increasing temperature	Difficult, high temperature is required to break bonds
Desorbed species	Non-specific	Very specific
Monolayer coverage	Mono or multilayer dependening on condition	Monolayer

ที่มา: ชัยยศ ตั้งสติกษ์กุลชัย และ มาลี ตั้งสติกษ์กุลชัย (2542)

### How Activated Carbon Works



ภาพประกอบที่ 1 แสดงการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์  
ที่มา: <http://www.pantown.com> วันที่ 08/01/07

สำหรับตัวดูดซับที่ขายในทางการค้ามักก่อให้เกิดการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี ตัวดูดซับที่ใช้ในปัจจุบันมีชื่อทางการค้ามากมาย และแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น

1. คาร์บอนแอคทีเวท (Activated carbon) หรือถ่านกัมมันต์ เป็นของแข็งที่มีความพรุนสูงชนิดหนึ่ง ได้จากการเผาของไม้หรือกะลาพืชผลต่างๆ โดยทั่วไปมักมีพื้นที่ผิว 300-1200  $m^2/g$  และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 10-60 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากหาง่ายและราคาถูก และมักนำมาใช้ในการกำจัดกลิ่นและสีที่ไม่ต้องการออก

2. ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นตัวดูดซับที่ผลิตจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของโซเดียมซิลิเกต โดยทั่วไป จะเป็นเม็ดแข็ง มีความพรุนสูงและมักมีพื้นที่ผิว 600-800  $m^2/g$  และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 20-50 อังสตรอม ซิลิกาเจลใช้ในการกำจัดน้ำหรือความชื้น หรือใช้ในการแยกพวกไฮโดรคาร์บอน

3. อะลูมินาแอคทีเวท (Activated alumina) ได้จากการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำออกให้เป็นไฮดรอกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ตัวดูดซับชนิดนี้มีพื้นที่ผิว 200-500  $m^2/g$  และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 20-140 อังสตรอม อะลูมินาแอคทีเวทนิยมใช้เพื่อกำจัดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกจากก๊าซและของเหลว

4. โมเลกูลาร์ซีฟซีโอไลต์ (Molecular sieve zeolite) ซีโอไลต์เป็นผลึกของอะลูมิโนซิลิเกต ขนาดรูพรุนจึงมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับประเภทอื่นซึ่งขนาดรูพรุนเป็นค่าเฉลี่ย กลุ่มซีโอไลต์มีขนาดรูพรุนเล็กมากประมาณ 3-10 อังสตรอม ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการแยกกลุ่มไฮโดรคาร์บอน



5. พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) หรือเรซิน (resin) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบอย่างกว้างๆ คือ พวกพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผลิตจากอะโรมาติกพวกสไตรีนและไดวินิลเบนซีน มักนิยมใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วออกจากสารละลาย และอีกกลุ่มที่ผลิตจากอะครีลิคเอสเทอร์ซึ่งมักใช้ในการดูดซับพวกตัวถูกละลายที่มีขั้วออกจากสารละลาย พอลิเมอร์สังเคราะห์มักถูกนำมาใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุเพื่อปรับสภาพของน้ำใช้ และสามารถฟื้นฟูสภาพดูดซับได้โดยโดยใช้กระบวนการดีซอปชันกับสารละลายกลุ่มอัลกอฮอล์หรือคีโตนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ปัจจุบันการดูดซับในอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ การกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนั้นน่าจะใช้ตัวดูดซับหลายชนิดรวมกันอยู่ภายในเบดเดียวเรียกว่าเบดรวม และพบว่าประสิทธิภาพการทำงานดี และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่น การใช้เบดรวมแทนที่จะใช้โมเลกูลาร์ซีฟอย่างเดียวก่อนกำจัดน้ำออกจากก๊าซธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมินาแอคทีฟมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเมื่อสารป้อนมีพวกเอมีนปนอยู่ ซึ่งแตกต่างไปจากโมเลกูลาร์ซีฟที่อาจจะเสื่อมสภาพเร็วกว่า สำหรับการเลือกใช้ตัวดูดซับนั้นควรต้องพิจารณาทั้งสมบัติความพรุนและสมบัติอื่นอีกหลายประการ เช่น ควรมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ไม่ละลายเปลี่ยนรูปเมื่อสัมผัสกับของไหล มีน้ำหนักเบา เคลื่อนที่ได้ง่ายเพื่อความสะดวกในการส่งเข้าสู่หอดูดซับหรือดึงออกจากระบบ ราคาไม่แพง หาง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรมีความสามารถในการดูดซับองค์ประกอบที่ต้องการแยกในของไหลเป็นอย่างดี รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่ต้องการ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms) คือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับก๊าซไอโซเทอมของการดูดซับจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยเริ่มจากศูนย์เมื่อ  $P/P^0 = 0$  จนถึง infinity เมื่อ  $P/P^0 = 1$  ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ การเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

รูปร่างของไอโซเทอมขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการดูดซับบนพื้นผิวที่ขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ ชนิดของสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับ และตัวถูกละลาย ถ้าให้  $n$  เป็นปริมาณของการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับจะแสดงความสัมพันธ์ ตามสมการได้ดังนี้

$$n = f(P, T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}) \quad (9)$$

ถ้าให้อุณหภูมิคงที่ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับคู่หนึ่งๆเขียนได้ว่า

$$n = f(P)_{T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}} \quad (10)$$

$$n = f(P/P^0)_{T, \text{adsorbent}, \text{adsorbate}} \quad (11)$$

เมื่อ  $P/P^0$  = ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure)  
 $P$  = ความดันของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับ  
 $P^0$  = ความดันไออิ่มตัวของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมินั้น

การวัดพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากข้อมูลการดูดซับของก๊าซ หรือของเหลวบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้ประโยชน์จากการดูดซับแบบกายภาพ ซึ่งมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของไอโซเทอมแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด

ชนิดที่ 1 (Type I) เรียกว่าแบบ Langmuir สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว เป็นแบบที่ง่ายที่สุด แต่มักเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำแต่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นไมโครพอร์ เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ กรณีเช่นนี้ ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้ เป็นของแข็งที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์ โดยก๊าซจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่  $P/P^0 < 1$  รูพรุนมีขนาด  $< 2$  nm ลักษณะของไอโซเทอมชนิดนี้แสดงในภาพประกอบที่ 2

ชนิดที่ 2 (Type II) บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-Shaped isotherm มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนแบบแมคโครพอร์ดังตำแหน่ง B ในภาพประกอบที่ 2 ซึ่งแสดงลักษณะคล้ายหัวเข่า (knee) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียว และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้นที่ความดันสูงขึ้นไป โดยจะเกิดแบบชั้นเดียวก่อน ตามด้วยแบบหลายชั้นที่  $P/P^0$  มีค่าสูง

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้วและไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่พบบ่อยนัก มักเกิดกับการดูดซับที่อ่อน ขนาดรูพรุนเป็นแบบของแข็งไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่อ่อนมากทำให้ดูดซับได้น้อย (curve เว้าเข้า) แสดงดังภาพประกอบที่ 2

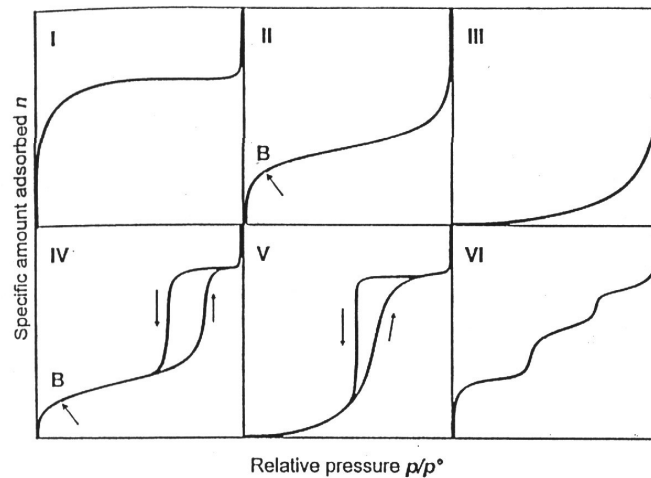
เกิดการดูดซับแบบขั้นเดียวที่  $P/P^0$  ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับหลายชั้น จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่  $P/P^0$  ที่มีสูง

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักจะพบในวัสดุที่มีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนแบบมีโซพอร์ ในช่วงแรกซึ่งมีค่า  $P/P^0$  ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $P/P^0$  มาก เกิดจากการที่เกิดการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วงดีซอร์พชัน ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่องแคปิลลารี สามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งแบบมีโซพอร์ได้ การควบแน่นแคปิลลารีทำให้การดีซอร์พชัน มีปริมาณที่สูงกว่าการดูดซับที่ความดันเท่ากัน ลักษณะของไอโซเทอมชนิดนี้แสดงในภาพประกอบที่ 2

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า  $P/P^0$  สูงกว่า ไอโซเทอมแบบนี้จะไม่พบบ่อยนักแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2

ชนิดที่ 6 (Type VI) หรือที่เรียกว่า stepped isotherm เกิดขึ้นในของแข็งที่ไม่มีรูพรุนแบบเนื้อเดียว (homogeneous nonporous solid) โดยเกิดการดูดซับแบบขั้นเดียวสมบูรณ์ก่อนแล้วจึงเกิดขึ้นต่อไปจนสมบูรณ์ ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2

การดูดซับมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความดันหรือความเข้มข้น ชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ การดูดซับโดยทั่วไปมักทำภายใต้อุณหภูมิคงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ขึ้นกับขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ ข้อมูลจากไอโซเทอมของการดูดซับสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนและการกระจายขนาดของรูพรุนได้



ภาพประกอบที่ 2 แสดงชนิดของเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 6 แบบ  
ที่มา: ชัยยศ ตั้งสติษฐ์กุลชัย และ มาลี ตั้งสติษฐ์กุลชัย (2542)

## 2.4 วิธีการหาผลตอบสนองของพื้นผิว (Response Surface Methodology : RSM)

RSM คือ การรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนา การเพิ่มประสิทธิภาพ และการหาจุดเหมาะสมของกระบวนการซึ่งการใช้เทคนิคนี้จะเกิดโดยตัวแปรหลายตัว RSM มีความสำคัญในงานประยุกต์เกี่ยวกับการออกแบบ การพัฒนา และการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ และมีประโยชน์เป็นอย่างมากในการพัฒนาของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ ซึ่งมักจะใช้หาผลกระทบของตัวแปรอิสระ ไม่ว่าจะเป็นตัวเดียวหรือหลายตัวในกระบวนการผลิต ในส่วนต่างๆของการวิเคราะห์หาผลกระทบของตัวแปรอิสระนี้ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะสร้างแบบคำนวณทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอธิบายถึงกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้อง

RSM ประกอบไปด้วยกลุ่มของค่าต่างๆตามเทคนิคซึ่งเกี่ยวกับทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติ ซึ่งถูกใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ RSM สร้างมาจากผลของตัวแปรอิสระ ไม่ว่าจะเป็นอยู่เพียงตัวเดียวลำพังหรืออยู่ในรูปแบบที่ผสมกัน ในกระบวนการก็ตาม สำหรับการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดจากของตัวแปรอิสระ จากผลการทดลองที่ได้มานั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของ วิธีการหาผลตอบสนองของพื้นที่ผิว (Response Surface Methodology) ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบจะอยู่ในสมการที่ (12)

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \pm \varepsilon \quad (12)$$

โดยที่	$y$	คือ	ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
	$f$	คือ	ฟังก์ชันของตัวแปรตาม
	$x_1, x_2, x_3, \dots x_n$	คือ	ตัวแปรอิสระ
	$\varepsilon$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวมเอาไว้ใน $f$ ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด มันจะถูก คัดคะแนนด้วยค่า $\varepsilon$ ซึ่งมีการกระจายด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์ และค่าความแปรปรวน

การออกแบบการทดลองมีขั้นตอนมี ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมีนั้น สามารถได้รับผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆที่จะเกิดได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวออกมาเป็นพวกที่สร้างผลกระทบได้โดยตรง การคัดเลือก โดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ หลังจากการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ จะสามารถกำหนดทิศทางการพัฒนารูปแบบขึ้น ซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุระดับความสำคัญต่างๆมีความสำคัญเพราะความสำเร็จจากกระบวนการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญนั้นส่งผลถึงความผิดพลาดในการหาจุดที่เหมาะสมได้

2. กำหนดรหัส (Code) ของช่วงตัวแปรอิสระที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการออกแบบสถานะในการทำการทดลอง โดยใช้วิธีการ Central Composite Design (CCD) การแปลงค่าของรหัสตัวแปรอิสระ (code variable) เป็นตัวแปรเดิม โดยใช้สมการที่ (13)

$$X = \frac{x - [x_{\max} + x_{\min}]/2}{[x_{\max} - x_{\min}]/2} \quad (13)$$

โดยที่  $X$  = coded variable  
 $x$  = ตัวแปรอิสระ  
 $x_{\max}, x_{\min}$  = ค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้ออกแบบไว้
4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง ในรูปแบบของ surface plot
5. สร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่าง ๆ กับตัวแปรตาม โดยใช้ โปรแกรม Regression Analysis ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic) ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (14)$$

ซึ่งค่า  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสองและสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ  $X_i$  และ  $X_j$  ถูกวิเคราะห์เป็นตัวแปรอิสระ

RSM มีคุณประโยชน์มากมายถ้าเปรียบเทียบกับระหว่างการทดลองในแบบอดีตกับการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือ การทดลองโดยใช้ RSM จะมีจำนวนครั้งการทดลองไม่มาก ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบเก่าที่จะต้องทดลองหลายๆการทดลอง เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ นอกจากนั้น RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (interaction effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี ซึ่งผลกระทบภายในดังกล่าวจะมีผลอย่างมากต่อระบบ โมเดลสมการอย่างง่ายจะเพิ่มความเข้าใจถึงผลที่เกิดร่วมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม (2545) ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำ การกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการกระตุ้น โดยใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 400-700 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเผาอยู่ในช่วง 30-60 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำคืออุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะได้พื้นที่ผิว 421 m<sup>2</sup>/g และดูดซับโทลูอินและไอระเหยของโทลูอินได้ 11.92% และ 7.94% โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คืออุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้พื้นที่ผิว 347 m<sup>2</sup>/g และดูดซับโทลูอินและไอระเหยของโทลูอินได้ 23.35% และ 51.95% โดยน้ำหนักตามลำดับ

ธเรศและสุนีย์ (2546) ทดลองการใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ใช้การกระตุ้นจากโซเดียมคลอไรด์ เพื่อกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยมีสภาวะการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นดังนี้ สภาวะการคาร์บอนไนซ์และกระตุ้นคือ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราส่วนของโซเดียมคลอไรด์เป็น 1:3 พบว่าค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ทางการค้าเป็น 532.29, 486.45 และ 900 mg/g ตามลำดับ และค่า BET ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ทางการค้าเป็น 492.42, 385.91 และ 955.70 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ

ธเรศ ศรีสถิตย์ และคณะ (2547) ได้ศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า สารเคมีที่ใช้คือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน โดยน้ำหนักของขี้เถ้าต่อสารเคมีและอุณหภูมิที่ใช้เผากระตุ้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นคือ ใช้ น้ำหนักของขี้เถ้าต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1:1 และอุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนสภาวะที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์คือ ใช้ น้ำหนักขี้เถ้าต่อซิงค์คลอไรด์เป็น 1:1 และอุณหภูมิกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการล้างสารเคมีด้วย น้ำร้อนและกรดเจือจาง ถ่านที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์มีค่า ไอโอดีนนัมเบอร์ 519.4 และ 1,021.3 mg/g ตามลำดับ มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 593.79 และ 1,572.51 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว (ความเข้มข้น 10 mg/l) ที่ pH 8 เท่ากับ 9.96 mg/l ของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย

ซิงค์คลอไรด์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่ว (ความเข้มข้น 10 mg/l) ที่ pH 7 เท่ากับ 99.7 mg/g ของถ่านกัมมันต์ เมื่อทดลองถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ระดับความลึกของถ่านกัมมันต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l ที่จุดเบรคทรุษของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์เป็น 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

Badie S. Girgis *et al.* (2002) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสง โดยเปรียบเทียบถึงผลที่ได้จากการเตรียมถ่านจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ คือ กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยแบ่งการทดลองเป็น 12 ชุดดังตารางที่ 5 ผลที่ได้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นจากเปลือกถั่วที่ 500 องศาเซลเซียส ที่แช่ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ขนาดของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกรดต่อเปลือกถั่วลิสงเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนเท่ากับ 1.0 ผลผลิตก๊าซที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ เมื่อคาร์บอนไนซ์ที่ 700-900 องศาเซลเซียส ผลผลิตก๊าซที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีปริมาณรูพรุนต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะได้รูพรุนขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 500-700 องศาเซลเซียส พบว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลน้อยมากในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี และรูพรุนที่ได้มีขนาดกลางรวมทั้งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถดูดซับเมทิลลิโนบลูได้ 200-400 mg/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นด้วยไอน้ำสามารถดูดซับได้ 30-100 mg/g ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุดสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกโดยแช่ในอัตราส่วน 1:1 และเผาที่ 500 องศาเซลเซียส



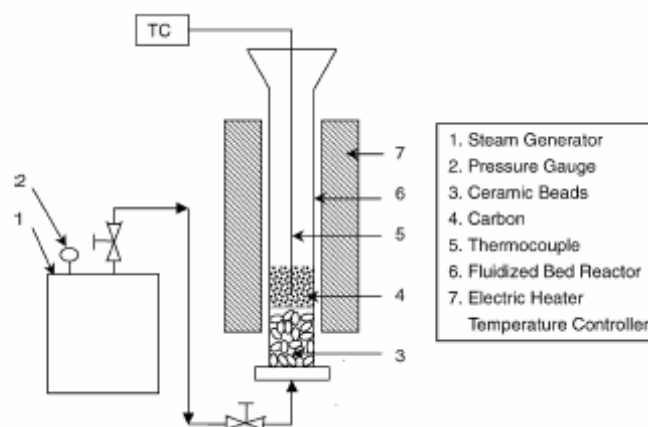
ตารางที่ 5 แสดงสภาวะการทดลองในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีต่างๆ

สภาวะที่	สภาวะที่ใช้เตรียมถ่าน
1	คาร์บอนไนซ์ที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
2	ทำเหมือนตัวอย่างที่ 1 แต่เผาที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3	กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ 600 องศาเซลเซียส
4	แช่ใน 50 % ซิงค์คลอไรด์ แล้วเผาที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วเผาต่อที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5	แช่ในโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วน 1:1 เผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6	ทำเหมือนตัวอย่างที่ 5 แต่เผาที่ 700 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
7-10	แช่ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 0.5 0.75 1.0 และ 1.6 แล้วเผาที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
11-12	แช่ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 41% โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1 แล้วเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง

B.G. Prakash Kumar *et al.* (2005) ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากจีเลื่อยไม้ยางพารา เพื่อเปรียบเทียบการดูดซับสีจากการกระตุ้นทั้ง 3 วิธี วิธีแรกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกอัตราส่วน ถ่านต่อกรดเป็น 0.45 แล้วกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิธีที่สองกระตุ้น กระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่อัตราการไหล 4 ml/min อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง วิธีที่สาม แช่ด้วยกรดฟอสฟอริกอัตราส่วนถ่านต่อกรดเป็น 0.45 แล้วตามด้วยกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำเป็น 5 ml/min ได้พื้นที่ผิวเท่ากับ 822, 1,092 และ 954  $m^2/g$  ค่าการดูดซับเมทธิลินบลูเท่ากับ 255, 255 และ 375 ค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 835, 765 และ 1052 ตามลำดับ

B.G. Prakash Kumar *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากจีเลื่อยไม้ ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทำการคาร์บอนไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 700 และ 750 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 1-4 ชั่วโมง โดยจัดชุดการทดลองดังภาพประกอบที่ 3 พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการทดลอง คือ การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้จีเลื่อยขนาด 0.46

มิลลิเมตร ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน 765 mg/g ค่าพื้นที่ผิว BET เท่ากับ 1092 m<sup>2</sup>/g และค่าEGME surface area เท่ากับ 867 m<sup>2</sup>/g



ภาพประกอบที่ 3 แสดงเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบดของ B.G. Prakash Kumar

C. Srinivasakannan and Mohamad Zailani Abu Bakar (2004) ได้ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งอัตราส่วนที่ศึกษาคือ 1.0, 1.5 และ 2.0 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส และศึกษาถึงเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นคือ 30, 45, 60 และ 90 นาที จากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดเตรียมได้จากการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และอัตราส่วนระหว่างขี้เลื่อยกับกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 1,096 มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,496 m<sup>2</sup>/g และร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้เท่ากับ 35%

Deniz Bas and Ismail H. Boyac (2007) ศึกษาถึงข้อจำกัดเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ RSM คือ RSM สามารถใช้ในงานที่เกี่ยวกับกระบวนการเคมีและกระบวนการชีวเคมี โดยปราศจากข้อจำกัดได้หรือไม่ และวิธี RSM สามารถใช้งานกับวัตถุประสงค์อื่นๆได้อีกหรือไม่ เช่น การคำนวณหาการเกิดปฏิกิริยา ความเสถียร หรือ ค่าคงที่จลน์ และอื่นๆ จากการศึกษพบว่า RSM ไม่สามารถใช้ในกระบวนการทางเคมีและทางชีวเคมีโดยปราศจากข้อจำกัดได้ และไม่สามารถใช้คำนวณหาการเกิดปฏิกิริยา ความเสถียร หรือ ค่าคงที่จลน์ได้

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

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

Tancredi *et al.* (1996) ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากซีเลื้อยไม้ชนิด *Pinus Cariba* ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพระหว่างการใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่โครงสร้างความพรุนจากการใช้ไอน้ำดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งความกว้างของรูพรุนเป็นผลมาจากอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่สูงขึ้นด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเป็นเมโซพอร์ โดยมีคุณภาพดีเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

T. Budinova *et al.* (2006) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษไม้หวาย ด้วยวิธีการผลิต 3 แบบ แบบที่หนึ่งทำการแช่เศษไม้ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 20-50% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนกรดต่อเศษไม้เป็น 1, 1.5 และ 2 หลังจากนั้นทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แบบที่สองทำการทดลองโดยใช้สภาวะเดียวกับแบบที่หนึ่ง หลังจากนั้นทำการกระตุ้นต่อโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และแบบที่สามทำการทดลองในสภาวะเดียวกับแบบที่หนึ่ง หลังจากนั้นกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าแบบที่สามจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด คือมีพื้นที่ผิว 1360 m<sup>2</sup>/g และค่าการดูดซับไอโอดีน 1280 mg/g

ข้อสรุปข้อมูลจากการค้นคว้า: งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมาย ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ได้แก่ ชนิดสารเคมี อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และระยะเวลา จากการศึกษาค้นคว้า พบว่ากรดฟอสฟอริกและซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น เพราะจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี อย่างไรก็ตามซิงค์คลอไรด์มักก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ในปัจจุบันจึงนิยมใช้กรดฟอสฟอริก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเลือกการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น ร่วมกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต ทั้งนี้เป็นเพราะงานวิจัยการศึกษาเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าไม้ยางพารา โดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นในประเทศไทยยังคงมีอยู่น้อยมาก หรืออาจแทบไม่มีเลย รวมทั้งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพหรือการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ไม่ได้ใช้เทคนิค RSM

สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพจะเลือกใช้ไอน้ำในการกระตุ้น ทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของไอน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้น้ำแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุน และเนื่องจากโมเลกุลที่เล็กจะสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่า นอกจากนี้อุณหภูมิการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้ช่วงอุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงกว่าของไอน้ำ และโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ส่วนใหญ่จะดีกว่าที่ได้จากการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (<http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002> วันที่ 08 /12 / 04) โดยข้อมูลเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีผู้วิจัยมาก่อนหน้านี้แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษชีวมวลที่ผ่านมา

Researcher	Material	Conditions	Properties
สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม	แกลบ	- กระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 700 °C 60 min. - กระตุ้นด้วย NaOH 500 °C 30 min.	- S.A 421 m <sup>2</sup> /g - S.A 347 m <sup>2</sup> /g
ชเรศและศุภณีย์	กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม	- กระตุ้นด้วย NaCl 800 °C 1 hr. I.R วัตถุประสงค์: NaCl เป็น 1:3	- S.A 492.42 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 532.29 mg/g - S.A 385.91 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 486.45 mg/g
ชเรศและคณะ	ขี้เลื่อย	- กระตุ้นด้วย NaCl 800 °C 1 hr. I.R ขี้เลื่อย: NaCl เป็น 1:1 - กระตุ้นด้วย ZnCl <sub>2</sub> 700 °C 1 hr. I.R ขี้เลื่อย: ZnCl <sub>2</sub> เป็น 1:1	- S.A 593.79 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 519.40 mg/g - S.A 1,572.51 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 1,021.3 mg/g
B.G. Prakash Kumar <i>et al.</i>	ขี้เลื่อยไม้ ยางพารา	- กระตุ้นด้วย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 400 °C 1 hr. I.R ถ่าน: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> เป็น 0.45 - กระตุ้นด้วยไอน้ำ 750 °C 1 hr. อัตรา 4 ml/min. - แชะด้วย H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> I.R ถ่าน: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> เป็น 0.45 ตามด้วยไอน้ำ 750 °C 1 hr. อัตรา 5 ml/min.	- S.A 822 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 835 mg/g - S.A 1,092 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 765 mg/g - S.A 954 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 1,052 mg/g
B.G. Prakash Kumar <i>et al.</i>	ขี้เลื่อยไม้ ยางพารา	- คาร์บอนไนซ์ที่ 400 °C 1 hr. กระตุ้นด้วยไอน้ำ 750 °C 1 hr.	- S.A 1,092 m <sup>2</sup> /g Iodine Ads. 765 mg/g
C.	ขี้เลื่อยไม้	- คาร์บอนไนซ์ที่ 200 °C 15 min.	- S.A 1,496 m <sup>2</sup> /g
Srinivasakannan and Mohamad Zailani Abu Bakar	ยางพารา	กระตุ้นที่ 500 °C 45 min. I.R ขี้เลื่อย: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> เป็น 1.5	Iodine Ads. 1,096 mg/g

โดยภาพรวมในบทนี้ได้กล่าวถึง ความเป็นมาของไม้ยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และในส่วนของถ่านกัมมันต์ได้อธิบายถึงการเลือกวัตถุดิบ กรรมวิธีในการผลิต ชนิดของถ่านกัมมันต์ หลักการในการดูดซับสารต่างๆทั้งทางเคมีและทางกายภาพ พร้อมทั้งเสนอไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ในทางอุตสาหกรรม รวมถึงวิธีในการใช้ RSM ซึ่งเป็นโปรแกรมในการออกแบบการทดลองที่ช่วยให้การทดลองทำได้เร็วขึ้น และยังช่วยในเรื่องของการประหยัดต้นทุนในการผลิต โดยในที่สุดท้ายของบทเป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์ ทั้งที่กระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ รวมถึงงานวิจัยที่ใช้ RSM หาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป ซึ่งวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกับการใช้ RSM โดยรายละเอียดในการทำการทดลองจะได้ทราบในบทต่อไป