

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำบาดาล

**น้ำ** คือทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถทดแทนได้ โดยธรรมชาติแล้วน้ำจะหมุนเวียนเป็นวัฏจักร มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง ตั้งแต่ไอน้ำผ่นแปรเป็นสภาพเมฆฝน ฝนที่เกิดขึ้นนั้นจะตกลงสู่ผิวโลกและจะถูกเก็บไว้ในดิน แหล่งน้ำและในต้นไม้ น้ำเหล่านั้นจะระเหยเป็นไอน้ำสู่บรรยากาศ ซึ่งถ้ามีความเย็นเพียงพอ มีแกนฝุ่นดูดความชื้นและมีไอน้ำปริมาณที่เพียงพอ ก็จะตกเป็นฝนวนเวียนอยู่ในวัฏจักร ในขณะที่ฝนตกนั้นพืชจะดูดซับไว้ส่วนหนึ่ง และบางส่วนจะซึมลงดินไปถึงชั้นดินที่น้ำผ่านไม่ได้ซึ่งอยู่บนดินชั้นนั้น กลายเป็นแหล่งน้ำใต้ดิน แต่บางส่วนไม่สามารถซึมผ่านผิวดินได้ทันที ประกอบกับสภาพพื้นที่ที่มีความลาดเอียงจึงไหลบ่าหน้าดินสู่แม่น้ำ ลำธาร ทะเล หรือมหาสมุทร โดยแปรเป็นแหล่งน้ำผิวดิน โดยกิจกรรมต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้แบ่งคุณภาพน้ำออกเป็นลักษณะใหญ่ๆ ได้ 3 ลักษณะ คือ

**คุณภาพน้ำทางกายภาพ** (physical characteristics) เกิดจากสิ่งเจือปนที่ทำให้ลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะทางกายภาพนี้ สามารถสัมผัสได้ด้วยประสาทสัมผัสทั้ง 5 ได้แก่ การดมกลิ่น ชิมรส ดูสี และสัมผัสด้วยผิวหนัง ข้อมูลสำคัญที่บ่งบอกคุณภาพน้ำทางกายภาพคือ สี กลิ่น รส ความขุ่น อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอย การนำไฟฟ้า และลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น

**คุณภาพน้ำทางเคมี** (chemical characteristics) เกิดจากการมีแร่ธาตุต่างๆและสารเคมีละลายหรือเจือปนกับน้ำธรรมชาติ ซึ่งทำให้คุณภาพของน้ำเปลี่ยนแปลงไปและไม่ปลอดภัยที่จะใช้ดื่ม เพราะสารบางตัวเป็นพิษต่อมนุษย์ คุณสมบัติของคุณภาพน้ำทางเคมีที่สำคัญได้แก่ ความกระด้าง ความเป็นกรดต่าง ออกซิเจนละลายในน้ำ บีโอดี ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม โปรท เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี และวัตถุมีพิษ ได้แก่ กลุ่มออร์กาโนคลอรีน ซึ่งประกอบด้วย DDT, alfa BHC, dieldrin, aldrin, heptachlor, heptachlor epoxide และ endrin เป็นต้น

**คุณภาพน้ำทางชีวภาพ** (biological characteristics) มีดัชนีบ่งชี้ที่สำคัญคือ จุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำ และเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีหรือสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำ ซึ่งทำให้น้ำมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นแล้วยังมีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคได้ปนอยู่ด้วย เช่น แบคทีเรีย โปรโตซัว แอจจี ฟังไจ ไวรัส และพยาธิ ทำให้มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่นำน้ำไปบริโภค ตัวอย่างแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค เช่น แบคทีเรียในตระกูลซัลโมเนลล่า (Salmonella) ชิเจลล่า (Shigella) และวibriโอ (vibrio) แบคทีเรียที่ก่อโรคเหล่านี้กระจายได้ง่าย โดยทางเดินอาหารและน้ำ การแพร่กระจายของโรคมักเกิดจากการปนเปื้อนของเชื้อโรคจากสิ่งปฏิกูลของ

คนและสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งอาจมีการแพร่กระจายโดยตรงหรือทางอ้อม ทำให้เกิดการระบาดของโรคติดต่อจากแบคทีเรีย เช่น โรคไทฟอยด์ โรคพาราไทฟอยด์ โรคอุจจาระร่วง อหิวาตกโรค บิด ฯลฯ การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย จึงเป็นการให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำทางชีวภาพ การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในแหล่งน้ำจืดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำนั้นๆ ด้วยการชะล้าง (erosion) เกิดจากการที่ฝนตกถึงผิวหน้าดิน เม็ดดินที่จะทำลายเม็ดดินผิวหน้า แตกกระจายเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งจะไปอุดรูดินทำให้น้ำซึมผ่านผิวหน้าดินได้น้อยลงเกิด surface flow และไหลไปตามผิวหน้าดินลงสู่ที่ต่ำ ซึ่งฝนจะชะล้างจุลินทรีย์ และสิ่งสกปรกต่างๆบนพื้นดิน ลงสู่แหล่งน้ำได้มากขึ้น จนทำให้เกิดมลพิษในน้ำได้ โดยเฉพาะการที่ฝนตกหนักหลังจากที่ผ่านระยะเวลาแห้งแล้งมานาน น้ำฝนจะชะล้างจุลินทรีย์หน้าดินลงสู่แหล่งน้ำได้มากขึ้นแต่ภายหลังที่ฝนตกติดต่อกันเป็นประจำจะมีผลทำให้แบคทีเรียลดลง (ปราโมช เขียวชาญ , 2552)

**แบคทีเรีย** เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดโตกว่าไวรัส สามารถมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โรคที่เกิดจากแบคทีเรียที่มีน้ำเป็นสื่อที่สำคัญมีหลายโรค เช่น อหิวาตกโรค (Cholera) ซึ่งเกิดจาก *Vibrio cholera* โรคบิด (Bacillary Dysentery) ซึ่งเกิดจากแบคทีเรีย พวก *Shigella flexneri* หรือ *Shigella dysenteriae* โรคไขรากสาดหรือไข้ไทฟอยด์ (Typhoid Fever) ซึ่งเกิดจาก *Samonella paratyphoid A B* หรือ *C* เป็นต้น

ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform bacteria, TCB) คือ กลุ่มแบคทีเรียชนิดหนึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในลำไส้มนุษย์หรือสัตว์ แต่บางครั้งอาจพบในบริเวณอื่น อาทิเช่น พืชดิน เมล็ดธัญพืช เป็นต้น การตรวจแบคทีเรียชนิดนี้ในแหล่งน้ำจะแสดงถึงความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนหรือแพร่กระจายของเชื้อโรคในระบบทางเดินอาหาร ในแหล่งน้ำ อาทิ โรคอหิวาต์ บิด ไทฟอยด์ หรืออุจจาระร่วง เป็นต้น ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดมีหน่วยวัดเป็น MPN (เอ็มพีเอ็น) /100 มิลลิลิตร (มล.) , Most Probable Number /100 mL ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินกำหนดให้แหล่งน้ำที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในการผลิตประปา และสามารถว่ายน้ำ เล่นกีฬาทางน้ำได้ ไม่ควรมีค่าปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดเกินกว่า 5000 หน่วย (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร) ขณะที่แหล่งน้ำที่เหมาะสมจะอนุรักษ์ไว้เพื่อใช้สำหรับกิจกรรมการเกษตรกรรมไม่ควรมีค่าปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดเกินกว่า 20000 หน่วย

ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform bacteria,FCB) คือ ปริมาณเชื้อโรคแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ที่มีอยู่ในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น การตรวจพบแบคทีเรียชนิดนี้ในแหล่งน้ำ จะบ่งชี้เฉพาะหรือยืนยันเพิ่มขึ้นจากค่าการตรวจวัดปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดว่าแหล่งน้ำนั้นมีโอกาสปนเปื้อนหรือมีการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่ทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารสูง ส่วนใหญ่แบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์มจะตรวจพบมากในแหล่งน้ำที่ไหลผ่านชุมชนที่ระบายน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรง ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์มมีหน่วยวัดเช่นเดียวกับปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด ตามมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน แหล่งน้ำที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในการผลิตประปาและสามารถว่ายน้ำหรือเล่นกีฬาทางน้ำไม่ควรมีค่าปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์ม เกินกว่า 1000 หน่วย (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร) ขณะที่แหล่งน้ำที่เหมาะสมจะอนุรักษ์ไว้เพื่อใช้สำหรับกิจกรรมการเกษตรกรรมไม่ควรมีค่าปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์ม เกินกว่า

4000 หน่วย พีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย มีลักษณะคุณสมบัติเช่นเดียวกับโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่มีความสามารถในการหมักย่อยน้ำตาลแลคโทสที่อุณหภูมิ  $44.5 \pm 0.2$  องศาเซลเซียส และให้ผลผลิตเป็นกรดและแก๊สภายในเวลา 24 ชั่วโมง สามารถมีชีวิตรอดอยู่นอกลำไส้ของคนและสัตว์เลื้อยคลานได้หลายวัน โดยขึ้นกับความเหมาะสมของสภาพแวดล้อม พีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่สำคัญ ได้แก่ Escherichia Coli โดยทั่วไปแล้วจะไม่พบในน้ำบริสุทธิ์ มักปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่มีการปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรค และมีจำนวนแปรผันตรงตามจำนวนของแบคทีเรียก่อโรค มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่ก่อโรค (ศิริพล กำแพงทอง , 2556)

สำหรับมาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำบาดาลแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
ทางกายภาพ	1.สี (Color)	แพลทินัม-โคบอลต์	5	15
	2. ความขุ่น (Turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20
	3.ความเป็นกรด-ด่าง	-	7.0-8.5	6.5-9.2
ทางเคมี	4.เหล็ก (Fe)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.5	1.0
	5.แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5
	6.ทองแดง (Cu)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5
	7.สังกะสี (Zn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 5.0	15.0
	8.ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> )	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
	9.คลอไรด์ (Cl)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 250	600
	10.ฟลูออไรด์ (F)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.7	1.0
	11.ไนเตรด (NO <sub>3</sub> )	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 45	45
	12. ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness as CaCO <sub>3</sub> )	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 300	500
	13.ความกระด้างถาวร (Non carbonate hardness as CaCO <sub>3</sub> )	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค (ต่อ)

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
	14.ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (Total dissolved solids)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 600	1,200
สารพิษ	15.สารหนู (As)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	16.ไซยาไนด์ (CN)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.1
	17.ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	18.ปรอท (Hg)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.001
	19.แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
	20.ซีลีเนียม (Se)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
ทางแบคทีเรีย	21.แบคทีเรียที่ตรวจพบโดยวิธี Standard plate count	โคโลนีต่อล.ชม.	ไม่เกินกว่า 500	-
	22.แบคทีเรียที่ตรวจพบโดยวิธี Most Probable Number (MPN)	เอ็ม.พี.เอ็น ต่อ 100 ล.ชม.	น้อยกว่า 2.2	-
	23.อี.โคไล (E.coli)	-	ต้องไม่มีเลย	-

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม(เข้าถึงได้จาก [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water01.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html))

## 2.2 วัสดุบำบัดน้ำ

### 2.2.1 ถ่านไม้ไผ่

ไผ่ เป็นพันธุ์ไม้ยืนต้น เป็นไม้พุ่มหลายชนิดและหลายสกุลใน วงศ์หญ้า และเป็นตระกูลหญ้าที่มีลำต้นสูงที่สุดในโลก (วงศ์ Poaceae; เดิมคือวงศ์ Gramineae) วงศ์ย่อย Bambusoideae ลำต้นแตกเป็นกอเป็น กอหนึ่งมีประมาณ 20-25 ต้น ลำต้นโตเต็มที่ที่มีความสูงประมาณ 5-15 เมตร ลักษณะลำต้นเป็นข้อปล้อง ผิวเกลี้ยงแข็งมีสีเขียวหรือเหลืองแถบเขียว ขนาดและสีขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของไผ่ ใบเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว ออกดอกเป็นช่อตามปลายยอด ผลหรือลูกคล้ายเมล็ดข้าวสาร

**ถิ่นกำเนิดของไม้** มีถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์อย่างกว้างขวาง เป็นไม้ที่ขึ้นง่ายและเติบโตเร็ว ขึ้นได้ดีในทุกสภาวะอากาศดำรงอยู่ในพื้นดินทุกชนิด เจริญเติบโตได้ดีทุกทวีป แต่พบมากที่สุดทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในเขตอบอุ่นพบไม้มีสกุลน้อยกว่าเขตร้อน

**ประเภทของไม้** แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

- (1) ไม้เนื้อแข็งที่ใช้ประโยชน์ในการ อุปโภค-บริโภค
- (2) ไม้เนื้ออ่อนที่หลากหลายสี รนเช่น ดำ เหลือง ทอง
- (3) ไม้เนื้อนุ่มที่สวยงามแปลกตา เช่น ไม้เนื้อดำ น้ำเต้าลาย-ทอง

**ประโยชน์ของไม้** ไม้มีประโยชน์หลายประการ ทั้งประโยชน์ทางตรงและทางอ้อม เราสามารถนำไม้ไปมาใช้สอยในชีวิตประจำวัน สำหรับไม้เนื้อแข็งใช้ได้ทุกส่วนตั้งแต่ หน่อ ลำต้น ใบ ราก เยื่อไม้ ขุยไม้ ประโยชน์ของไม้มีหลายด้านเช่น ด้านการอนุรักษ์ธรรมชาติ สามารถใช้ป้องกันการพังทลายของดินตามริมฝั่ง เป็นแนวป้องกันลมพายุ ชะลอความเร็วของกระแสน้ำป่าเมื่อฤดูน้ำหลาก ป้องกันภาวบน้ำท่วมฉับพลัน ให้ความร่มรื่น และยังสามารถใช้ประดับสวน ด้านประโยชน์จากลักษณะทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง เนื้อไม้ใช้ขัดเป็นเยื่อกระดาษ เนื้อไม้บางชนิดสามารถสกัดทำยารักษาโรคได้ เส้นใยใช้ทำเป็นไหมเทียมได้ ใช้ในงานอุตสาหกรรมนานาชนิด ด้านประโยชน์จากลักษณะทางฟิสิกส์ จากความแข็งแรง ความเหนียว การยืดหด ความโค้งงอ และการสปริงตัว ซึ่งเป็นคุณลักษณะประจำตัวของไม้เนื้อแข็ง จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมในงานคอนกรีต เป็นส่วนต่างๆ ของการสร้างสิ่งก่อสร้างแบบประหยัดได้ ทางด้านการบริโภค เช่น การนำต้นอ่อนไม้หรือหน่อไม้เนื้ออ่อนมาทำเป็นอาหาร และด้านการใช้ไม้เนื้ออ่อนในผลิตภัณฑ์หัตถกรรม และอุตสาหกรรม เช่น กระบุง กระด้ง กระช้ำผลไม้ ชะลอม ข้องใส่ปลา โต๊ะ คันเบ็ด ราวตากผ้า ทำแคร์ ตะเกียบ ไม้เสียบอาหาร สุ่มไก่ รวมไปถึงการทำถ่านไม้เนื้ออ่อนใช้ในครัวเรือน

**ประโยชน์ของถ่านไม้เนื้อแข็ง** สามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายทั้งในครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมได้ นอกจากใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มอาหารในครัวเรือน แล้วถ่านไม้มีคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถดูดซับกลิ่นเหม็นอับไม่พึงประสงค์ได้ เช่นการนำถ่านมาไว้ในตู้เย็นเพื่อให้ตู้เย็นไม่มีกลิ่นเหม็นคาวจากของสดหรืออาหารที่มีกลิ่นแรง ใส่ไว้ในตู้เสื้อผ้าเพื่อไม่ให้มีกลิ่นเหม็นอับจากตู้ เนื่องจากโครงสร้างของถ่านไม้เนื้อแข็งมีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ มากมาย โดยกลิ่นเหม็นอับจะถูกดูดเข้ารูพรุน หากถ่านมีรูพรุนมากเท่าไรก็จะทำให้ดูดซับกลิ่นได้มากตามไปด้วยเช่นกัน (ปริณฑร เต็มญารศิลป์, 2551)

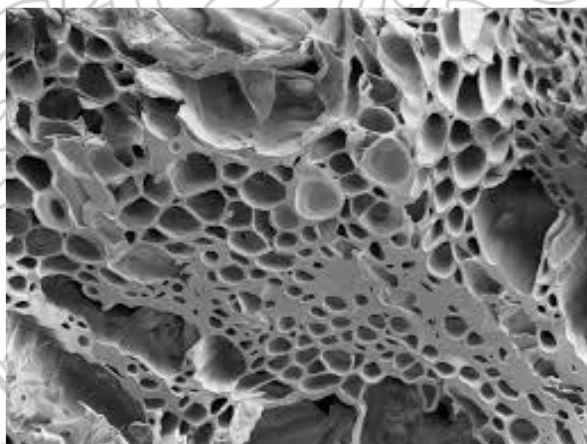
### 2.2.2 ถ่านกัมมันต์

**ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)** คือ วัสดุจากธรรมชาติที่มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ที่นำมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ ลักษณะโครงสร้างเกิดเป็นรูพรุน (Porosity) และทำให้มีพื้นที่ผิว (Surface area) มากขึ้น ส่งผลให้ ถ่านกัมมันต์ มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับได้ดี จึงมักถูกนำไปใช้ในการกรองสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการ โดยวัตถุดิบในการผลิต ถ่านกัมมันต์ มีหลายชนิด ส่วนใหญ่มักเป็นสารเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้เช่น ไม้ไผ่ ไม้มะขาม ไม้ยางพารา ชี้เลื่อย แกลบ กะลามะพร้าว เมล็ดลำไย ชานอ้อย ชั่งข้าวโพด เป็นต้น (ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ

(1) วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นข้อดีคือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 °C) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้ง เครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสาร กัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น

(2) วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่าง ๆ เช่น ไอน้ำ อิมตัวยิงยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 1,200 °C แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (อัจฉรา แก้วกล้า, 2555)



ภาพที่ 2.1 รูปแสดงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ที่มา: <http://www.atl-activatedcarbon.com/view.asp?nid=576>

(สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2563 ; ออนไลน์)

### 2.2.3 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอและเป็นวัฏภาคคายความร้อนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (วรวิทย์ จันทรสุวรรณ, 2558)

#### การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) เป็นการอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Wals) หรือพันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลวทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้องความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อนโดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ (วรวิทย์ จันทรสุวรรณ, 2558)

#### การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่ แข็งแรงแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้องความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

ที่มา : วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้วยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange Adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิวเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (Specific Adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมี (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558)

#### ชนิดของสารดูดซับ

ในสารดูดซับแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การเลือกสารดูดซับที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความสามารถในการดูดซับนอกจากจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะแล้วยังขึ้นอยู่กับ การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) อีกด้วยช่วงของการกระจายขนาดของรูพรุนนั้นถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- 1) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร
- 2) รูพรุนขนาดกลาง (Micropores) มีขนาด 2-50 นาโนเมตร
- 3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Micropores) มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร



นอกจากนี้ รูพรุนขนาดเล็กยังถูกแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- 1) อัลตราไมโครพอร์ (Ultramicropores) มีขนาดเล็กกว่า 0.5 นาโนเมตร
- 2) ไมโครพอร์ (Micropores) มีขนาด 0.5-1.4 นาโนเมตร
- 3) ซุปเปอร์ไมโครพอร์ (Supermicropores) มีขนาดใหญ่กว่า 1.4-2 นาโนเมตร

การดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รูพรุนขนาดเล็กเนื่องจากการดูดซับภายในรูพรุนขนาดเล็กโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะอยู่ใกล้กับผนังของสารดูดซับมากส่งผลให้มีแรงดึงดูดที่มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การที่สารดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็กมากจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเมื่อเทียบกับรูพรุนขนาดอื่น ๆ การดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนขนาดเล็กเป็นการดูดซับที่เรียกว่า การเติมเต็มในรูพรุน (Pore Filling) ส่วนรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่จะมีผลต่อการดูดซับแก๊สน้อยมาก แต่จะมีความสำคัญมากหากสารถูกดูดซับเป็นของเหลวในการดูดซับแก๊สรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านเพื่อนำแก๊สเข้าไปเกิดการดูดซับกับรูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ในของสารดูดซับ ดังนั้นสารดูดซับที่ดีจึงต้องมีปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดที่เหมาะสมสารดูดซับนั้นมีหลายชนิด แต่ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินา (Alumina) ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้ในงานและอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ซิลิกาเจลและอะลูมินาส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นการดูดซับความชื้น ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา มีลักษณะเป็นผลึกและทนต่อความร้อนได้สูงแต่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ สารดูดซับแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกัน มีการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้สารดูดซับแต่ละชนิดจึงมีความแตกต่างกันตามจุดประสงค์ของงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีสารดูดซับชนิดอื่น ๆ เช่น เรซินพอลิเมอร์ (Polymeresin) ที่ถูกนำไปใช้ในเครื่องกรองน้ำ สารดูดซับประเภทแรดิน (Activated clay) ถูกนำไปใช้ในกระบวนการแยกสารที่เกี่ยวข้องกับน้ำมัน (ภุชงค์ ศรีหรั่ง, 2558)

### ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- 1) อัตราความปั่นป่วน

เกิดจากการกวนสารละลาย หรือการไหลผ่านคอลัมน์จะมีผลต่อการดูดซับของถ่านเนื่องจากถ่านมีขนาดและคุณลักษณะทางกายภาพต่างกันทำให้การดูดซับของถ่านต้องการความปั่นป่วนในระดับที่ต่างกัน เช่น ถ่านกัมมันต์แบบผงต้องการความปั่นป่วนสูงจะเกิดการดูดซับดีขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าสู่โพรงช่องว่างของถ่านกัมมันต์

- 2) ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่าน

ขนาดของถ่านเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราเร็วในการดูดซับของถ่านคือ ถ่านแบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านแบบเกล็ดและพื้นที่ผิวของถ่านสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับในกรณีที่มีพื้นที่ผิวของถ่านส่วนมากเป็นพื้นที่ผิวของช่องว่าง หรือโพรงภายใน ขนาดภายนอกของถ่านจะไม่ค่อยมีผลต่อการกำหนดพื้นที่ผิว แต่ถ่านกัมมันต์แบบผงจะมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

### 3) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวถ่าน

สำคัญมากต่อการดูดซับของถ่านเนื่องจากการดูดซับ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของถ่าน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่านเพียงเล็กน้อยทำให้สารขนาดเล็กนี้ถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของถ่านก่อนจากนั้นสารขนาดใหญ่จึงถูกดูดเข้าสู่รูพรุนต่อมา

### 4) ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

ถ่านมักนิยมนำมาใช้ในการดูดซับสารออกจากสารละลายดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายจึงมีผลต่อการดูดซับของถ่านเพราะค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายจะมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของตัวถูกละลาย

### 5) อุณหภูมิ

ส่งผลต่อการดูดซับอย่างมากหากอยู่ในสภาวะของเหลวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้การแพร่ผ่านของตัวถูกละลายไปยังรูพรุนของถ่านเกิดได้เร็วขึ้นทำให้ อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น (ยุทธพร ดวงจินดา, 2559)

## 2.3 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) คือกลุ่มธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 4 โลหะ มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของ ตารางธาตุ ซึ่งคุณสมบัติเบื้องต้นของโลหะหลักคือจมน้ำแต่โลหะหนักมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างคือ ต้องเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชัน ซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ไม่สลายตัวในกระบวนการทางธรรมชาติ มีความเสถียร จัดเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ธาตุที่จัดเป็นโลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิดได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก โครเมียม ทังสแตน พลวง แคลเดียม พรอท บิสมัท พลวง ไทเทเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิเกิล แมงกานีส โมลิบดีนัม และเหล็ก โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอท ที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชัน (Oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนัก จึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็น สารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ที่เสถียรกว่าโลหะหนักอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) โดยสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดย ผ่านห่วงโซ่อาหาร (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ, 2012) ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะโลหะหนักที่ได้นำมาทำการวิจัยเท่านั้น ได้แก่

(1) แคดเมียม (Cadmium : Cd) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 48 และเป็นธาตุหมู่ 12 ในตารางธาตุ อยู่ในหมู่เดียวกับสังกะสี และปรอท ลักษณะเป็นโลหะอ่อนสีเงิน

ประโยชน์ในแคดเมียม ใช้เป็นสารหล่อลื่น ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบโลหะเพื่อการป้องกันสนิม และเพิ่มความมันวาว ใช้ในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ ใช้เป็นส่วนประกอบของสี ใช้ในกระบวนการผลิตพลาสติก ใช้ในกระบวนการผลิตลวดเชื่อม

พิษในแคดเมียม ในธรรมชาติ แคดเมียมมักพบรวมกับสังกะสีเสมอ ซึ่งเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ที่คล้ายกับสังกะสีที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจึงสามารถเข้าแทนที่อะตอมของสังกะสีในเอนไซม์ได้ ทำให้เกิดพิษต่อร่างกาย ได้แก่ เอนไซม์หลายชนิดไม่ทำงาน ระบบย่อย และเผาผลาญสารอาหาร และพลังงานบกพร่อง ชัดขวางการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ร่างกายซูบผอม อ่อนเพลีย หนาวสั่นมีไข้ และความดันเลือดสูง หากร่างกายมีแคดเมียมมากกว่า 15 ppm จะเกิดภาวะโปรตีนในปัสสาวะสูง ไตทำงานผิดปกติ เกิดภาวะไตวาย เกิดโรคอิตาลี ทำให้มีอาการปวดตามข้อตามกระดูก สายตาพร่ามัว ท้องร่วง อาเจียน ตับวาย และมีโอกาสเสียชีวิตตามมา

(2) **โครเมียม** (Chromium : Cr) เป็นธาตุในตารางธาตุซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Cr มีหมายเลขอะตอมเป็น 24 ชื่อโครเมียมมีรากศัพท์ดั้งเดิมมาจากภาษากรีก คำว่า Chrome หมายถึงสี ประโยชน์ในโครเมียม ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมเคมี ใช้เป็นส่วนผสมของสีฟัน สีทาบ้าน ใช้เป็นสารสำคัญในการชุบเคลือบโลหะ ช่วยให้โลหะมันวาว และป้องกันการเกิดสนิม

พิษในโครเมียม โครเมียมเป็นธาตุที่ร่างกายไม่ต้องการ เมื่อสะสมในร่างกายจะทำให้เกิดพิษ ได้แก่ ผิวหนังเกิดการอักเสบ เยื่อของอวัยวะภายในต่าง ๆ เกิดการระคายเคือง และถูกทำลาย ไต ตับ และปอดทำงานผิดปกติ และถูกทำลาย ระบบหายใจขัดข้อง และล้มเหลวได้ง่าย เสี่ยงต่อการเสียชีวิตกะทันหัน

(3) **ตะกั่ว** (Lead : Pb) เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 82 และสัญลักษณ์คือ Pb (ภาษาละติน: Plumbum) ตะกั่วเป็นโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระสุนปืน โลหะผสม ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะมีคุณสมบัติคล้ายกับแคลเซียม คือ มีการสะสมอยู่ในกระดูก และในเส้นผม

ประโยชน์ในตะกั่ว ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และเป็นส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิง ใช้ผลิตแบตเตอรี่

พิษในตะกั่ว พิษเฉียบพลัน คือ ร่างกายอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ อาเจียน กล้ามเนื้อกระดูกปวดหัว นอนหลับยาก พิษเรื้อรัง คือ ทำให้เป็นโรคโลหิตจาง ร่างกายซูบผอม ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ยับยั้งกระบวนการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง กระดูกผุกร่อน ทำลายระบบเซลล์ประสาท ทำให้สมองบวม และยับยั้งการทำงานของสารเคมีในสมองจนเสี่ยงต่อภาวะความจำเสื่อม และมีอาการทางประสาท ไตถูกทำลาย จนเกิดภาวะไตวาย ระบบสืบพันธุ์ทำงานผิดปกติ ตัวอสุจิอ่อนแอ และรังไข่ฝ่อง่าย เกิดภาวะเป็นหมัน เสี่ยงต่อการมีบุตรยาก ประจำเดือนมาไม่ปกติ

(4) **แมงกานีส** (Manganese: Mn) เป็นธาตุในตารางธาตุซึ่งมีหมายเลขอะตอมเป็น 25 ร่างกายจะขาดไม่ได้จะพบมากที่สุดไนโตรเจนกระดูก ตับ ตับอ่อน หัวใจและต่อมพิทูอิทารี มีคุณสมบัติเป็นต่าง แมงกานีส ส่วนใหญ่จะสูญเสียไประหว่างกระบวนการปรุงอาหาร และส่วนเกินจะออกผ่านทางน้ำดีแล้วจะออกทางอุจจาระ

ประโยชน์ในแมงกานีส ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หรือระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ใช้ทำโลหะผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโลหะ ใช้ผลิตแท่งเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ผลิตถ่านไฟฉาย และแบตเตอรี่ เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ และกระดูก ร่างกายต้องการประมาณวันละ 3-4 มิลลิกรัม

พิษในแมงกานีส หากร่างกายได้รับแมงกานีสสูงเกินความต้องการของร่าง จะทำให้เกิดพิษได้แก่ ผิวหนัง และเยื่อในระบบทางเดินอาหารอักเสบ ร่างกายอ่อนเพลีย และมีอาการปวดศีรษะ ระบบประสาทถูกทำลาย เสี่ยงต่อการเป็นอัมพาต

แมงกานีสที่พบในแหล่งน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน หากมีปริมาณสูงจะทำให้ น้ำมีสภาพขุ่นเป็นสีน้ำตาลแดง ซึ่งมักเกิดร่วมกับธาตุเหล็ก

(5) **สังกะสี (Zinc: Zn)** คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ 12 ชื่อในภาษาอังกฤษมาจากภาษาเยอรมันว่า Zink เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มีน้ำหนักเบา เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ นอกจากนั้น สังกะสียังเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในร่างกายมนุษย์ และสัตว์ เนื่องจากจัดเป็นแร่ที่ร่างกายต้องการชนิดหนึ่ง

ประโยชน์ในสังกะสี เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด ทำหน้าที่ช่วยส่งเสริมพัฒนาการในเด็ก ช่วยส่งเสริมความจำ และการเรียนรู้ ช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบสืบพันธุ์ ช่วยให้เกิดการเจริญพันธุ์ตามวัยที่เหมาะสม ช่วยกระตุ้นการทำงานของฮอร์โมนเพศ

พิษในสังกะสี เมื่อสังกะสีเข้าสู่ร่างกายมากขึ้นก็จะเกิดการสะสมที่บริเวณตับ และไต จนทำให้เกิดผลกระทบตามมา ได้แก่ ทำลายอวัยวะภายใน ตับและไตทำงานล้มเหลว เกิดโรคโลหิตจาง ไครโมโซมผิดปกติ เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง ร่างกายขาดธาตุทองแดง เนื่องจาก ถูกยับยั้งการดูดซึม หากได้รับมากกว่า 2 กรัม จะทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน แสดงอาการท้องเสีย อาเจียน และเป็นไข้

(6) **เหล็ก (Iron: Fe)** เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ธาตุ Fe และหมายเลขอะตอม 26 เหล็กเป็นธาตุโลหะทรานซิชันหมู่ 8 และคาบ 4 สัญลักษณ์ Fe ย่อมาจาก Ferrum ในภาษาละติน ประโยชน์ในเหล็ก เป็นส่วนประกอบของเม็ดเลือดแดง ซึ่งจะช่วยการจับออกซิเจนได้มากขึ้น ใช้ในกระบวนการชีวเคมี เช่น กระบวนการย่อยอาหารในระบบการย่อยอาหาร

พิษในเหล็ก เมื่อได้รับธาตุเหล็ก และสะสมในร่างกายสูงจะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพการย่อยอาหารลดลง หลอดเลือดขยายตัว ความดันเลือดลดลง เลือดแข็งตัวได้ช้า การทำงานของตับลดลง ตับเสื่อมสภาพ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เมื่อได้รับธาตุเหล็กน้อยหรือร่างกายขาดธาตุเหล็ก จะขัดขวางการสังเคราะห์เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดแดงในร่างกายน้อยลง เลือดขาดออกซิเจนได้ง่าย และป่วยเป็นโรคโลหิตจาง

(7) **ทองแดง (Copper : Cu)** คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี

ประโยชน์ในทองแดง ใช้ผลิตภาชนะ เครื่องเรือน และโลหะในอุตสาหกรรม ใช้เป็นส่วนผสมของการผลิตโลหะ ใช้ผลิตสายไฟ และวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ผลิตสีย้อมเคมี เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ ทำหน้าที่ช่วยส่งผ่านออกซิเจนเข้าสู่เซลล์ และช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง

พิษในทองแดง หากร่างกายคนเราได้รับทองแดงสะสมมากกว่า 100 มิลลิกรัม ได้แก่ ร่างกายอ่อนเพลีย เกิดการเบื่ออาหาร ร่างกายชูบพอม เกิดอาเจียน เม็ดเลือดแดงแตกตัว ทำลายตับ ยับยั้ง

การทำงานของตับ หากร่างกายมีทองแดงสะสมในปริมาณ 25-30 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัวกิโลกรัม จะทำให้ตับแข็ง และเกิดอาการคลุ้มคลั่งได้ง่าย

หากในน้ำมีปริมาณทองแดงมากกว่า 0.1 ppm จะทำให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำ (คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดีมหาวิทยาลัยมหิดล, มปป และ ปรินทร์ เต็มญารศิลป์, 2551)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องการดูดซับโลหะด้วยถ่านกัมมันต์

ปิยะนันท์ สุวรรณแปง (2562) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายโลหะหนักผสมและโลหะหนักในน้ำตัวอย่างโดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านไม้ไผ่และถ่านทางการค้า ประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับสารละลายโลหะหนักผสมและโลหะหนักในน้ำตัวอย่าง พบว่าการศึกษากายภาพของตัวดูดซับจากถ่านไม้ไผ่ และถ่านไม้ไผ่ ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ถ่านไม้ไผ่มีลักษณะเป็นรูพรุนทั่วทั้งพื้นผิว ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พื้นผิวและในรูพรุนของถ่านเติมด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเมื่อหาปริมาณโลหะหนักในน้ำตัวอย่างในน้ำตัวอย่างมีปริมาณโลหะหนักที่เกินค่ามาตรฐาน 2 ชนิด คือ เหล็ก และ แมงกานีสส่วนโครเมียมทองแดงและสังกะสี มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลแคดเมียมและตะกั่ว มีอยู่ในน้ำตัวอย่างเพียงเล็กน้อยและการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักผสมที่เตรียมได้จากสารละลายมาตรฐานด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ ICP-OES ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านไม้ไผ่และถ่านทางการค้าไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ทุกชนิด แต่ถ่านไม้ไผ่และถ่านทางการค้าที่ปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถดูดซับโลหะหนักได้ 2 ชนิด คือ เหล็ก และทองแดง เมื่อเพิ่มน้ำหนักของตัวดูดซับมากขึ้น พบว่า น้ำหนักไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การดูดซับโลหะหนักในน้ำตัวอย่างด้วยถ่านไม้ไผ่สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีแต่เมื่อปรับสภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ถ่านไม้ไผ่จะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ 2 ชนิด คือ เหล็ก และ ทองแดง

ชนากานต์ ปัญญาวงศ์ (2558) ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคลเซียมและเหล็ก ด้วยถ่านจากเมล็ดลำไยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จากการใช้ถ่านที่ปรับสภาพ ในอัตราส่วนของ ถ่าน:โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็น 2 ต่อ 1 โดยเป็นเวลา 24 ชั่วโมงมาใช้ในการดูดซับพบว่าเวลามีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ใน 2 ชั่วโมงถ่าน 1 g สามารถดูดซับสารละลายแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 200 ppm และสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 500 ppm ได้ร้อยละ 85 และร้อยละ 100 ผลการทดลองพบว่าปริมาณที่ดูดซับได้มีค่าเป็น 4.97 และ 12.46 mg ต่อถ่าน 1 g สำหรับแคลเซียมและเหล็กตามลำดับ

สุริษา เชียงตา (2557) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สภาพพื้นผิวอัตราส่วน 3 ต่อ 1 หน่วยน้ำหนักของถ่านแมคคาเดเมียต่อน้ำหนักของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมได้ดีที่สุด ถ่านที่เตรียมไว้จำนวน 1 g สามารถดูดซับแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น

1000 ppm ปริมาณ 50 mL ได้ร้อยละ 78.6 ในเวลา 2 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพของการดูดซับสูงกว่าถ่านกะลามะพร้าว และแมงกานีสออกไซด์ที่ใช้วัสดุกรองน้ำประมาณ 10 เท่า

รัตติกาล ลำขาว (2556) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวโดยวิธีทางเคมีของถ่านเม็ดลำไยโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันด้วยเตาเผาชีวมวล เนื่องจากถ่านที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนถ่านเม็ดลำไยต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 ต่อ 1 (w/w) ใช้เวลา 6 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมไอออนได้ดีที่สุด ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้มข้น 1,000 ppm พบว่าในเวลา 6 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการดูดซับร้อยละ 74 ส่วนน้ำตัวอย่าง มีความกระด้าง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 2 ชั่วโมง สามารถดูดซับได้ร้อยละ 83 และได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองระบบกรองน้ำโดยใช้ถ่านเม็ดลำไยการปรับสภาพพื้นผิว เป็นตัวดูดซับพบว่าอัตราการไหล 0.5 และ 2.5 มิลลิกรัมต่อนาที ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อใช้ถ่านที่เตรียมได้ 50 g สามารถดูดซับแคลเซียมในน้ำตัวอย่างและปริมาตร 600 mL

ณัฐภูมิ ก้อนจา (2556) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวโดยวิธีทางเคมีของลำไยเลือกใช้อัตราส่วนของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม ในการดูดซับเหล็กได้สูงสุด ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาและการดูดซับจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับเหล็กพบว่าสารละลายเหล็กมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 248.33 nm. พบว่าอัตราส่วนของถ่านเม็ดลำไยต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่เหมาะสมคือ 1 ต่อ 1 (w/w) มีร้อยละการดูดซับเหล็กเข้มข้น 500 ppm สูงสุดร้อยละ 59.97 และการดูดซับเหล็กเข้มข้น 1000 ppm สูงสุดที่ร้อยละ 59.79 ที่เวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง เริ่มเข้าสู่สมดุล ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การศึกษาพบว่า เป็นไปตามแบบจำลองของ Pseudo-second order สารละลายเหล็กทั้ง 2 ความเข้มข้นของการศึกษาไอโซเทอมพบว่า สอดคล้องกับการดูดซับของ Langmuir

รัชฎาพร วัชรวิชานันท์ และ กมณชนก วงศ์สุขสิน (2555) การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและการอุปโภคในเขตตำบลหนองบัวศาลาและตำบลหนองระเวียง จังหวัดนครราชสีมา ทำการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริกและทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กแมงกานีส ทองแดง และสังกะสีในน้ำบาดาลในฤดูร้อนและฤดูฝนโดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านกัมมันต์ผลการวิเคราะห์พบว่าน้ำบาดาลในฤดูร้อนของทั้ง 2 ตำบล มีปริมาณเหล็กเกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้สำหรับอุปโภค และเมื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ทำให้มีปริมาณเหล็กลดลงและมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาล นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีแล้วมีปริมาณ เหล็กแมงกานีส ทองแดง และสังกะสีเฉลี่ยไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและหม้อไอน้ำ

ศิริวรรณ ศรีสรณ์ (2558) การดูดซับแบบกะของไอออนโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว(II) สังกะสี(II) แคดเมียม(II) และนิกเกิล(II)ในสารละลายเดี่ยวโดยใช้ถ่านขาวกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับพบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวสามารถดูดซับไอออนตะกั่ว(II) สังกะสี(II) แคดเมียม(II) และนิกเกิล(II)ได้โดยใช้ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร มีค่าความสามารถดูดซับไอออนตะกั่ว

(II) แคลเซียม(II) สังกะสี(II) และนิกเกิล(II) ออกจากสารละลายที่ pH 5 เท่ากับ 10.81, 9.10, 4.89 และ 1.92 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ และตัวดูดซับขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร สามารถดูดซับไอออนโลหะได้สูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดช่วงอนุภาค 1000 ถึง 2000 ไมโครเมตรเมื่อศึกษาผลของค่า pH สารละลายระหว่าง pH 2 ถึง 5 พบว่าค่าการดูดซับไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก pH 2 จนมีค่าสูงสุดที่ pH 5 สำหรับการดูดซับไอออนโลหะผสมแบบแข่งขัน พบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร สามารถดูดซับไอออนผลมออกจากสารละลายที่ pH 5 มีค่าเป็น 4.63, 2.26, 1.73 และ 1.54 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับตะกั่ว(II) แคลเซียม(II) นิกเกิล(II) และสังกะสี(II) ตามลำดับแบบจำลองการดูดซับไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิดเป็นแบบแลงเมียร์และมีค่าความสามารถดูดซับสูงสุด (qm) ของไอออนโลหะต่างๆ เป็น 17.12, 15.82, 4.48 และ 3.60 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับตะกั่ว(II) แคลเซียม(II) สังกะสี(II) และนิกเกิล(II) ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านขาวกะลามะพร้าวนี้ไปกำจัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียจริงพบว่าสามารถกำจัดไอออนตะกั่วออกจากสารละลายที่ pH 5 ได้ประมาณร้อยละ 90 หรือ 0.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น ถ่านขาวกะลามะพร้าวจึงสามารถใช้เป็นตัวกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้จริง

Mopoung, S., et al. (2018) ศึกษาหาอุณหภูมิของไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดในการทำถ่านกัมมันต์จากใบสับปะรดปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อกำจัดความกระด้างของน้ำ โดยการศึกษาผลของ 0.0-5.0 (w/w)  $\text{KMnO}_4$  และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 200-500 °C โดยการใช้ SEM-EDS, XRD, FT-IR และ BET ใช้ไพโรไลซิสของถ่านใบสับปะรดปรับสภาพเพื่อกำจัด  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  ในน้ำ พบว่า  $\text{MnO}_2$  ที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์จากใบสับปะรดปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์จากใบสับปะรดปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะลดลงในขณะที่ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{KMnO}_4$  ความสามารถในการดูดซับ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 4.17-23.04 และ 1.04-8.56 mg/g ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับการปรับให้เข้ากับแบบจำลองของไอโซเทอม ของ Freundlich

Zhanga, G., et al. (2017) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวและคุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วย BET และ SEM แสดงให้เห็นว่าหลังจากปรับสภาพทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาพอัลคาไลน์ พื้นผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ความจุของรูพรุนขยาย แต่เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลงเล็กน้อย การจำแนกลักษณะด้วย XPS และ FT-IR พบว่าหลังจากปรับสภาพทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาพอัลคาไลน์ กลุ่มฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนของกรดจะลดลงและสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างใหม่ และแมงกานีส เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ และการทำงานรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดออกซิเจนในกลุ่มที่มีกรด และสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง และแมงกานีสมีผลต่อการกระตุ้นมีเทนและการเปลี่ยนแก๊สมีเทน ภายใต้สภาพอัลคาไลน์ เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มการทำงานของต่างและกรดคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเปลี่ยนแก๊สมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด การเปลี่ยนรูปแบบการปฏิรูปของ  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  และการ

ทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มการทำงานที่เป็นกรดและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นกรด

Rathnayake, D., et al. (2017) ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (GAC) โดยการปรับพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (GAC) โดยปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ที่ 0.1 และ 1% (w/w)  $\text{KMnO}_4$  ต่อ GAC ผลการทดลองการดูดซับแบบแบทช์ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 2 อัตรา คือ 5 g/L และ 0.5 g/L พบว่าการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ไม่ได้ปรับปรุงการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุธรรมชาติ (NOM) หรือเปลี่ยนองค์ประกอบสารอินทรีย์วัตถุธรรมชาติ ในน้ำที่ผ่านการบำบัด นอกจากนี้ยังไม่มีหลักฐานว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์แบบเม็ดจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ก่อนการปรับสภาพ ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ในการปรับสภาพถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุธรรมชาติ

Pang, M., et al. (2012) ศึกษาความสามารถของถ่านกัมมันต์ปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ในการดูดซับ Cr (VI) จากสารละลายในน้ำ ถ่านกัมมันต์ปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ศึกษาลักษณะโดย SEM (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน), FT-IR (สเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรด) และ  $\text{N}_2$  การทดสอบการดูดซับ/การสลายตัว การดูดซับของ Cr (VI) จากสารละลายในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ถูกตรวจสอบในระบบแบทช์ ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น pH เวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้น ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กำหนดโดย ICP-AES การดูดซับ Cr (VI) บนถ่านกัมมันต์เป็นไปตามสมการการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich isothermal อัตราการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order ถ่านกัมมันต์ปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สามารถเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับ Cr (VI) จากสารละลายที่เป็นน้ำ

Poinern, G.E.J. and Senanayake, G. (2011) ได้ศึกษาวิธีการดูดซับ  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกแมคคาเดเมีย จากการศึกษาการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย ในการกระตุ้นผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ด จากการเผาคาร์บอนเซชันถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจน จากนั้นทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทางกายภาพภายใต้สภาวะที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อเพิ่มรูพรุนของถ่านกัมมันต์ วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยธรรมชาติแล้วขนาดรูพรุนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมียสามารถตรวจสอบโดยใช้กล้องส่องผ่านอิเล็กตรอน (SEM) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ Au พบว่าเปลือกแมคคาเดเมียที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงมีความสามารถในการดูดซับ  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  ได้เป็นอย่างดี

## 2.5 เปลือกไข่

เปลือกไข่มีหน้าที่รองรับน้ำหนักของแม่ไก่ขณะกกฟักไข่เป็นทางให้อากาศผ่านเข้าออกป้องกันการกระทบกระเทือนและไม่ให้เชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าไปทำลายเชื้อลูกไก่ แต่ต้องโปร่งบางพอให้ลูกไก่เจาะออกไปได้ โดยไข่ทั้งฟองของสัตว์ปีกต่างๆ รวมทั้งเป็ด ไก่ ม้า และไก่ ประกอบและโครงสร้างเหมือนกัน แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ แต่สัดส่วนและปริมาณต่างกันตาม



ขนาดและชนิดของสัตว์ปีก โดยไข่ไก่ฟองหนึ่งน้ำหนักเฉลี่ย 58 กรัม แบ่งเป็นไข่ขาว ไข่แดง และเปลือก เท่ากับ 32.9, 18.7 และ 6.4 กรัมต่อฟองตามลำดับ ไข่ขาวและไข่แดงนำไปใช้ประโยชน์ คิดเป็นร้อยละ 89 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง และร้อยละ 11 เป็นเปลือกไข่ ที่ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) แคลเซียมฟอสเฟต ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) และ สารอินทรีย์ (เสาวภา ไวยสุศรี, 2559)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่

แร่ธาตุ	% โดยน้ำหนัก		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
$\text{CaCO}_3$	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.0839	-

ที่มา : (เสาวภา ไวยสุศรี, 2558 , หน้า 8)

### 2.5.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกไข่

ส่วนเคลือบผิวไข่ (Cuticle) เป็นชั้นที่อยู่บนผิวนอกของเปลือกไข่ หนาประมาณ 0.5–12.8 ไมโครเมตร เมื่อขยายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะปรากฏรอยแยกจำนวนมากบนพื้นผิว เพราะเคลือบผิวไข่มีหน้าที่อุดรูพรุนที่ผิวด้านนอกป้องกันการสูญเสียน้ำและการบุกรุกของจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 85-87 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.5-4.4 ไขมันร้อยละ 2.5-3.5 และเถ้าร้อยละ 3.5 ทั้งหมดประกอบกันเป็นอินทรีย์สารทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบเม็ดสี (Pigment) ที่เกิดจากวัตถุสีของเม็ดเลือดแดง (Porphyrin) กระจายอยู่จำนวนมาก ซึ่งเม็ดสีเหล่านี้จะปะปนกับเกลือแคลเซียมและเยื่อเปลือกไข่ด้วย แต่ปริมาณการกระจายจะลดลงจากชั้นเคลือบผิวไข่ลงมาทำให้เปลือกไข่ชั้นนอกมีเม็ดสีมากกว่าเปลือกไข่ชั้นในและเยื่อเปลือกไข่

เปลือกไข่ชั้นนอก (Spongy Layer) เป็นชั้นที่แคลเซียมคาร์บอเนตเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในรูปของผลึก Calcite และจัดเรียงตัวตามแนวตั้งอยู่บนเมตริกซ์อินทรีย์ (Organic matrix) ซึ่งเป็นสารพวก Protein Acid Mucopolysaccharide complex ที่ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 70 พอลิแซคคาไรด์ประมาณร้อยละ 11 ที่แบ่งเป็น Chondroitin Sulphate A และ B ประมาณร้อยละ 35 และกรดยูโรนิก ในรูปกรดไฮยาลูโรนิก ประมาณร้อยละ 20 โดยองค์ประกอบเหล่านี้ ทำให้เมตริกซ์อินทรีย์ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล ( $\text{COOH}$ ), หมู่เอมีน ( $\text{NH}_2$ ) และหมู่ซัลโฟเนต ( $\text{SO}_3^-$ ) ที่สามารถจับไอออนของโลหะหนักได้ (Chelating Ions) เช่น เมตริกซ์อินทรีย์ของไข่ไก่จับไอออนเหล็กด้วยหมู่คาร์บอกซิลที่พบมากใน Mucopolysaccharide ของเยื่อเปลือกไข่โดยปกติเมตริกซ์อินทรีย์จะประกอบกันเป็นเส้นใยละเอียด (Finefibrils) หนา 0.01 ไมโครเมตร ยาว 10 ไมโครเมตร ขนานไปกับ

ผิวเปลือก พบกระจายอยู่ทั่วทั้งเปลือก แต่จะพบมากที่ด้านใน(ใกล้กับส่วน Mammillary core หรือ ส่วนเยื่อเปลือกไข่) ประมาณ 2/3 ของเมตริกซ์ทั้งหมด จะน้อยและลดหลั่นกันออกมาจนถึงชั้นนอก ซึ่งมีเส้นใยเมตริกซ์น้อยที่สุด เปลือกไข่ชั้นนอกมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ เพราะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากตั้งแต่ 7,000-17,000 รู ที่เชื่อมโยงจากผิวนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข่ เพื่อเป็นทางผ่านอากาศ โดยที่แต่ละบริเวณของเปลือกไข่จะมีจำนวนรูต่อตารางเซนติเมตรไม่เท่ากัน คือ ด้านป้าน ด้านกลาง และด้านแหลม มีจำนวนรูเท่ากับ 125.6, 106.1-113.4 และ 73.7 รูต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และขนาดรูขนาดใหญ่ เท่ากับ 0.022-0.029 มิลลิเมตรรูขนาดเล็กเท่ากับ 0.0038-0.0054 มิลลิเมตร

เปลือกไข่ชั้นใน (Mammillary Knob Layer) เป็นปุ่มครึ่งทรงกลมของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal Plates) สูง 1/3 ของความหนาเปลือกไข่ ภายในมี Mammillary Core ซึ่งเป็นมวลสารอินทรีย์ขนาดเล็กและเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างผลึกที่เรียกว่า Seeding sites ประกอบด้วย Protein acid Mucopolysaccharide complex ที่มี Neutral sugar และ Neutral Mucopolysaccharide ถูกล้อมรอบด้วย Sialomucin ซึ่งเป็นสารที่มีกรดอ่อน และ Mammillary core ยังจับแน่นกับชั้นเยื่อเปลือกไข่ ด้วยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนกับเส้นใยของเปลือกไข่ชั้นนอก

เยื่อเปลือกไข่ (Shell Membrane) เป็นชั้นบางสองชั้นแนบติดกันโดยตลอด ยกเว้นด้านป้านของไข่ที่ถูกแยกกันด้วยช่องอากาศ (Air sac) หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร ประกอบด้วยโปรตีนคาร์โบไฮเดรต และไขมันร้อยละ 95, 2 และ 3 ตามลำดับ (ไม่คิดปริมาณเถ้า) หรือคิดปริมาณเถ้า ซึ่งประกอบด้วย ฟอสฟอรัส แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ทองแดง โบรอน และอลูมิเนียม อีกร้อยละประมาณ 2 โดยเยื่อเปลือกไข่แต่ละชั้นประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนเคราติน, อีลาสติน และคอลลาเจน เชื่อมต่อกัน แล้วถูกห่อหุ้มด้วยชั้น Mucopolysaccharide หนาประมาณ 0.5 ไมโครเมตร แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชั้น คือ เยื่อเปลือกไข่ชั้นนอก (Outer Shell Membranes) อยู่ติดกับส่วน True Shell จึงมีเส้นใย บางส่วนยื่นเข้าไปในส่วนฐานของเปลือกไข่ชั้นใน แล้วรวมตัวเป็น Mammillary core เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 3 ไมโครเมตร เฉลี่ย 1.3 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 2.7 ไมโครเมตร เส้นใยยาวมากกว่า 23 ไมโครเมตร เพราะปลายเส้นใยที่เรียวแหลมสามารถซ้อนเกย (Overlap) รวมกับเส้นใยใกล้เคียงภายใต้ชั้นห่อหุ้มเดียวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 1.5 ไมโครเมตร เฉลี่ย 0.9 ไมโครเมตร เป็นชั้นที่แยกไข่ขาวออกจากส่วนของเปลือกเรียกว่า "Limiting Membrane" ทั้ง 2 ชั้น มีรูพรุนที่ผิวจำนวนมาก เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศโดยเยื่อชั้นในมีรูพรุนมากกว่าเยื่อชั้นนอก (เสาวภา ไวยสุศรี, 2558)

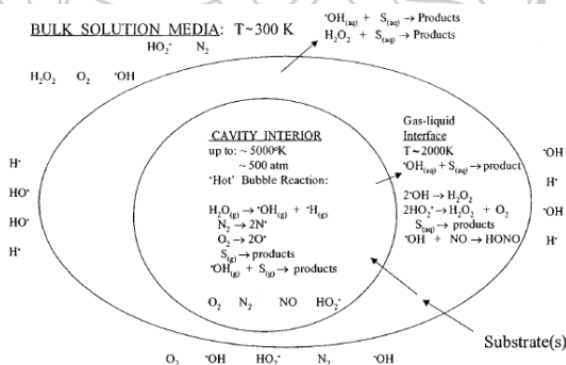
## 2.6 กระบวนการและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์สารอินทรีย์

### 2.6.1 วิธีการโซโนเคมี (Sonochemistry)

โซโนเคมีเป็นวิธีการสังเคราะห์ผลึกที่อาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงหรือคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic wave) ในกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกพันธะเคมีและการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดการฟอร์มผลึกทั้งแบบสัณฐานและอสัณฐานโดยคำว่า “โซโน” เป็นภาษาลาตินมีความหมายว่า “เสียง” โซโนเคมีเป็นปรากฏการณ์ของกลไกการเปลี่ยนสภาพของฟองอากาศภายในของเหลวอันเนื่องมาจากพลังงานเสียงหรือที่เรียกว่า อะคูสติค คาวิเทชัน (Acoustic cavitation) ประกอบด้วย การเกิด (Creation) การเติบโต (Growth) และการแตกของฟองแก๊ส (Collapse of bubbles) ในช่วงเวลาสั้นตอนแรกของการเกิดฟองอากาศนั้นต้องอาศัยพลังงานของเสียงที่มีความเข้มสูงกว่า 10 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเพียงพอที่จะสลายพันธะเคมีของสารละลายให้แตกออกจากกันเป็นอนุพันธ์ของไอออนบวกและลบ (อนุพันธ์เหล่านี้เองที่เป็นตัวชักนำหรือกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มากมาย) รวมทั้งไอ (Diffused vapor) ของสารละลาย ซึ่งไอดังกล่าวนี้นี้เป็นตัวการของการฟอร์มนิวเคลียสของฟองแก๊สในของเหลวพลังงานความเข้มเสียงในตัวกลาง สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c}$$

เมื่อ  $I$  เป็น ความเข้มของคลื่นเสียง  
 $P_A$  เป็น แอมพลิจูดของความดันเสียง  
 $\rho$  เป็น ความหนาแน่นของของตัวกลาง  
 $c$  เป็น ความเร็วเสียงในตัวกลาง

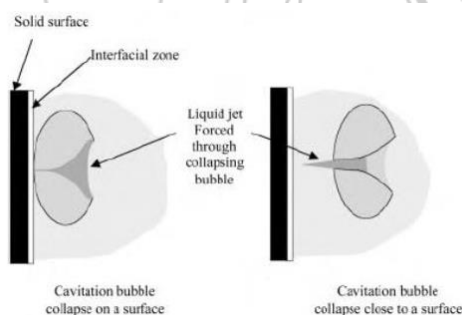


ภาพที่ 2.2 ไดอะแกรมกระบวนการอะคูสติคคาวิเทชัน (Acoustic cavitation) ในสารละลาย  
 ที่มา: (ฉัตร ผลนาค, 2559, 16)

ขั้นต่อมาจะเกิดการแพร่ของไอของสารละลายเข้าไปในฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนทำให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และในท้ายที่สุดฟองแก๊สเหล่านั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10-300 ไมครอน ที่ไม่สามารถจะทนแรงดันภายในได้อีก ก็จะเกิดการระเบิดจากภายในฟองแก๊ส (Implosive collapse)

โดยจะปลดปล่อยความร้อนสูงถึง 5,000เคลวิน และความดัน 200-500 ความดันบรรยากาศ ที่บริเวณเฉพาะตำแหน่งของแต่ละฟองแก๊ส (local implosion) อย่างรวดเร็ว ( $<10^{-9}$  s) เวลาที่สั้นมาก ส่งผลให้เกิดอัตราการเย็นตัวสูงมาก ( $>10^{11}$  K/s)

ผลของกระบวนการโซโนเคมีก่อให้เกิดเจ็ทสตรีม (Jetstream) จากการแตกตัวของฟองแก๊ส ส่งผลให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) และคลื่นกระแทก (Shock wave) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคด้วยความเร็วสูงและรุนแรง เกิดความร้อนสูงในตำแหน่งที่ชนจนเกิดการหลอม (Local melting) ของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ทำให้เกิดการฟอร์มเป็นผลึกของสารขึ้น ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว ช่วยประหยัดพลังงาน เวลา และค่าใช้จ่าย (ฉัตร ผลนาค, 2559)



ภาพที่ 2.3 เจ็ทสตรีม (Jet stream) ที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของฟองแก๊สในของเหลว  
ที่มา : (ฉัตร ผลนาค, 2559, หน้า 17)

## 2.6.2 วิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้ (Combustion Synthesis)

การสังเคราะห์ผงละเอียดหลากหลายประเภทในทางอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่เนื่องจากการสังเคราะห์สารจากวิธีดังกล่าว มีกระบวนการบดผสม (Intermediate milling) เพื่อใช้ในการผสมสารตั้งต้น จำพวกสารประกอบออกไซด์ หรือคาร์บอนตเข้าด้วยกัน และทำการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิสูง เป็นระยะเวลานาน ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่างๆ อาทิเช่น อนุภาคมีการจับตัวกัน (Agglomerate) ความสามารถในการเผาซินเตอร์ต่ำ (Poor sinterability) ปัญหาการปนเปื้อน (จากกระบวนการบดผสม) หรือความบริสุทธิ์ของผงที่สังเคราะห์ได้รวมทั้ง ปัญหาความเป็นเนื้อเดียวกันของสัดส่วนองค์ประกอบเป็นต้น ดังนั้น จึงมีการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีหลายวิธี เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ อาทิเช่น วิธีโซล-เจล (Sol-gel process) วิธีซิเตรทเจล (Citrate-gel method) การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และอื่นๆ วิธีทางเคมีดังกล่าวเริ่มกระบวนการสังเคราะห์ จากการเตรียมสารละลายของสารตั้งต้นที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งพบว่าประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงละเอียดที่มีความสามารถในการเผาซินเตอร์สูง (High sinterability) ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (High specific surface area) มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการ ธาตุองค์ประกอบมีการกระจายตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันนอกจากนั้นยังสามารถเตรียมผลึก

ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ซึ่งเป็นผลดี) อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีทางเคมียังมีข้อจำกัด ในเรื่องของความซับซ้อน ความยุ่งยากของกระบวนการเตรียมโดยมีค่าใช้จ่ายสูงจากสาเหตุทั้งสารตั้งต้นที่ต้องมีความบริสุทธิ์สูง และความซับซ้อนของวัสดุอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังต้องมีการควบคุมสภาวะให้มีความแน่นอน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น

ไม่นานมานี้ “วิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้” (Combustion synthesis) ถูกพัฒนาขึ้นและใช้ในการสังเคราะห์และเตรียมเซรามิกส์ขั้นสูง ตัวเร่ง วัสดุประกอบ อัลลอย สารประกอบเชิงโลหะ และวัสดุนาโนมาแล้วกว่า 500 ชนิด ซึ่งวิธีนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อของระบบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องได้เองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating high-temperature synthesis; SHS) โดยไม่อาศัยแหล่งพลังงานภายนอก ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้นี้ อาศัยพื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redoxreaction) หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction reaction) ของสารตั้งต้นที่เป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนสูง (High exothermic reaction) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่รวดเร็ว เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาสั้นมาก (ในหน่วยของวินาทีหรือนาฬิกา) สามารถเตรียมผงละเอียดของสารผลิตภัณฑ์ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดย่อยลดขนาด หรือกระบวนการเผาแคลไซน์ ดังเช่นในกระบวนการเตรียมแบบดั้งเดิม ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย โดยสามารถสังเคราะห์ผงละเอียด ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันของสัดส่วนองค์ประกอบ อนุภาคไม่จับตัวกัน สามารถเตรียมอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้โดยใช้เวลาอันรวดเร็ว ซึ่งเตรียมจากวิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อมีการรายงานถึงสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสงและสมบัติเชิงกล ของวัสดุนาโน (Nanomaterials) ที่มีขนาด 1-100 นาโนเมตร ซึ่งมีการแสดงสมบัติพิเศษแตกต่างจากสมบัติ เมื่อมีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ความสนใจและมีความตื่นตัวกับเทคโนโลยีการผลิตผงละเอียดในระดับนาโนเมตรมากขึ้นทั้งนี้จากสมบัติที่โดดเด่น จึงเป็นข้อดีของผงละเอียดที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมในการผลิตเซนเซอร์ ตัวเร่ง วัสดุสำหรับเคลือบผิว หรือในการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หลักการพื้นฐานของวิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้ คือการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้น ที่อาจเป็นสารประกอบหรือของผสมระหว่างตัว ออกซิไดส์กับสารเชื้อเพลิง จากการที่สารตั้งต้นมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีการคายความร้อน พลังงานที่ระบบคายออกมาจะถูกนำไปใช้ในการดำเนินไปของปฏิกิริยา และเนื่องจากในปฏิกิริยาเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะแก๊สในปริมาณมาก ทั้งนี้จึงเป็นการป้องกันการจับตัวกัน ของอนุภาคไว้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็ก อุณหภูมิของระบบมีการเพิ่มสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ณ อุณหภูมิการเผาไหม้(Combustion temperature;  $T_c$ ) เป็นจุดที่อุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งอาจมีอุณหภูมิสูงถึง  $700^{\circ}\text{C}$  ถึง  $6000^{\circ}\text{C}$  ทำให้สามารถกำจัด สารประกอบอินทรีย์หรือสารปนเปื้อนอื่นที่มีจุดเดือดต่ำออกไปได้ (ในสถานะแก๊ส) ดังนั้น ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แบบเผาไหม้จึงมีความบริสุทธิ์สูงและอนุภาคมีขนาดเล็ก (นพศิริ ไชโย และ นราธิป วิทยากร, 2560)

จุดเด่นและข้อดีของวิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้ มีดังนี้

- 1) ความสามารถในการทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่า  $6000^{\circ}\text{C}$
- 2) ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อนสั้นมาก ในหน่วยวินาทีหรือนาฬิกา
- 3) สามารถสังเคราะห์สารที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ความง่ายและความสะดวก เนื่องจากการใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

- 4) ประหยัด และมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ วิธีการสังเคราะห์แบบดั้งเดิม
- 5) สามารถสังเคราะห์วัสดุภาคกึ่งเสถียรได้ เนื่องจากมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
- 6) สามารถสังเคราะห์สารอนินทรีย์ได้ในการเกิดปฏิกิริยาเพียงขั้นตอนเดียว

### 2.6.3 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) นั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล, 2558)

$$E = h \nu = hc / \lambda$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$ , จูล-วินาที

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที<sup>-1</sup>

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร

$c$  คือ ความเร็วของคลื่นแสง =  $2.997 \times 10^8$ , เมตร/วินาที

### 2.6.4 ตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส (photocatalysis) ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (transition Metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

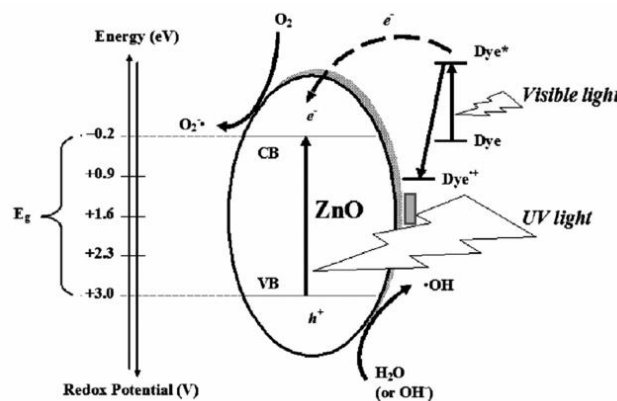
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (valence band) และคอนดักชันแบนด์ (conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และ คอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (band gap) เมื่ออิเล็กตรอน (electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (hν) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-Hole Pairs, e<sup>-</sup>/ h<sup>+</sup>) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e<sup>-</sup>/ h<sup>+</sup> รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e<sup>-</sup>/ h<sup>+</sup> ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลแยกจากกันได้นาน ความแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

แยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนส์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนส์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด  $e^-/h^+$  ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (จิรวรรณ พิจารย์, 2555)

หลักของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสโดยทั่วไปกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสประกอบด้วย 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

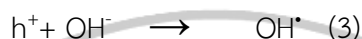
1) การสร้างพาหะตัวนำ (Charge-Carrier Generation) เมื่อสารคะตะลิสต์ในน้ำได้รับแสงหรือโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แก๊ป จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ( $e^-h^+$ ) ดังสมการ



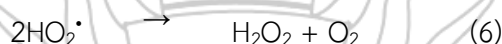
ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงการเกิดตัวออกซิไดซ์แบบต่างๆ ระหว่างกระบวนการ Photocatalysis ที่มา: (ศุภมาส ตำนวิทยากุล, 2556, หน้า 42)

2) การตรึงพาหะตัวนำ (Charge-Carrier Trapping) คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดในขั้นตอนการสร้างพาหะตัวนำจะมีช่วงชีวิต (Lifetime) ที่แตกต่างกัน โมเลกุลที่ปนเปื้อนภายในระบบ เช่น สีย้อม น้ำ ออกซิเจน หรือตำหนิในโครงสร้างจะช่วยตรึงอิเล็กตรอนและโฮลดังกล่าว โดยทำหน้าที่จับอิเล็กตรอนและโฮล (Electron and hole scavengers) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลเมื่อถูกตรึงด้วยโมเลกุลดังกล่าวแล้ว จะไม่เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การรวมตัวกันระหว่างคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole pair recombination) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ยับยั้งกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส พาหะตัวนำชนิดโฮลมีประจุเป็นบวก เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษปนเปื้อนในน้ำรวมทั้งโมเลกุลสีย้อม อีกทั้งยังสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ โดยเฉพาะโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากและมีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอน เช่น โมเลกุลน้ำหรือไฮ

ดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลและโมเลกุลน้ำจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงเช่น



โมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนมากจะช่วยตรึงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง และป้องกันการรวมตัวกับโฮล เรียกว่าเป็นการเพิ่มความสามารถในการแยกคู่อิเล็กตรอนและโฮลช่วยเพิ่มช่วงชีวิตให้ยาวนานขึ้น โมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนมากที่สำคัญอีกตัวคือ โมเลกุลออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) เป็นตัวที่มีประสิทธิภาพสูงในการรับอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง จากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ ( $\text{O}_2^\bullet$ ) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกซิลเรดิคัล ( $\text{HO}_2^\bullet$ ) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งต่างก็มีความไวและความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกัน ดังแสดงในสมการ



### 3) การรวมตัวกันของพาหะตัวนำ (Charge-Carrier Recombination)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วยกระบวนการถ่ายโอนประจุของพาหะตัวนำกับสารอินทรีย์ขณะที่มีการดูดซับของสารอินทรีย์บนสารกึ่งตัวนำนั้น ซึ่งถือเป็นการลดการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่ทำให้สูญเสียประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งระหว่างการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นจะให้ความร้อนออกมาดังแสดงในสมการ



4) การสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการ Photocatalysis (Photocatalytic degradation) ปฏิกิริยา Photocatalysis ในสมการ (1)-(10) แสดงถึงความสำคัญของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่มีต่อการสลายสารอินทรีย์ นอกจากนี้  $\text{O}_2^\bullet$ ,  $\text{OH}^\bullet$  และ  $\text{HO}_2^\bullet$  ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงเช่นเดียวกับโฮลก็ทำหน้าที่สลายสารอินทรีย์เช่นกัน

กลไกการสลายสารอินทรีย์เกิดจากการที่โมเลกุลสี้อมดูดซับบนสารคะตะลิสต์ จากนั้นโครงสร้างบางส่วนของสี้อมจะเริ่มถูกทำลายโดยเกิดเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) และสารมัธยันตร์จะวนกลับมาดูดซับบนคะตะลิสต์และถูกทำลายไปเป็นลำดับ โดยปฏิกิริยาจะเกิดในลักษณะซ้ำๆ จนท้ายที่สุดโมเลกุลสี้อมจะสลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  และ  $\text{SO}_2$  เป็นต้น (ศุภมาส ด่านวิทยากุล, 2556)



## 2.7 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรเคมีคือ  $\text{Ca(OH)}_2$  ลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือผงสีขาว ได้จากการเจือจางแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ สารละลายอิ่มตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ รู้จักในชื่อน้ำปูนใส แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความเป็นพิษต่ำ จึงใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหลายชนิด เช่น การทำแท่งกวาดตอง การทำไข่เยี่ยวม้าและใช้แทนโซดาทำขนมในการทำปาดัม บนพื้นเมืองอเมริกาเหนือนิยมเคี้ยวใบโคคากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกหอย เช่นเดียวกับการเคี้ยวหมากและพลูที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเสริมฤทธิ์สารกระตุ้นของชาวเอเชีย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง จึงควรใช้อย่างระมัดระวัง

สมบัติทางกายภาพทั่วไปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ชื่อ Calcium Hydroxide

สูตรโมเลกุล  $\text{Ca(OH)}_2$

สถานะ ผงของแข็ง

สี ไม่มีสีหรือสีขาว

น้ำหนักโมเลกุล 74.093g/mol

จุดหลอมเหลว  $580^\circ\text{C}$

ความหนาแน่น  $2.211\text{g/cm}^3$

ความสามารถในการละลายละลายในกลีเซอรอลและกรด

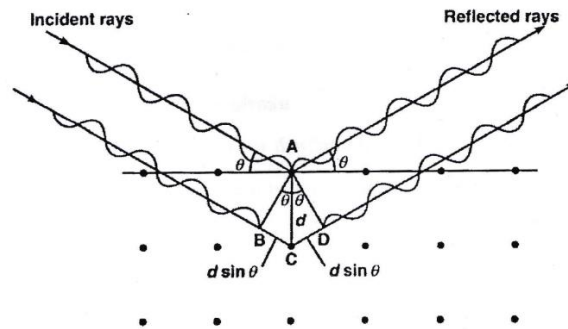
ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

## 2.8 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (No-destructive analysis) โดยจะใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์รวมทั้งความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างของผลึกอย่างคร่าว ๆ และขนาดของเกรน (Grain size) ได้

### 2.8.1 หลักการเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึก โดยทำมุม  $\theta$  บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้าอีกส่วนหนึ่งของรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็ผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอม ดังภาพ



ภาพที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

ที่มา : (จรัส บุญยธรรมมา, 2555)

ลำแสงรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนแบบเดียวกัน ถ้าอะตอมในผลึกอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและห่างเท่า ๆ กัน การเลี้ยวเบนนี้มีลักษณะการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับสถานะ 2 ประการคือรังสีที่ตกกระทบรังสีที่เลี้ยวเบนและเส้นทางตั้งฉากกับผิวหน้าต้องอยู่ระนาบเดียวกัน และระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์จะเกิดอันตรกิริยากับสสารทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืน การกระเจิง หรือการเลี้ยวเบนของรังสี ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ และมีหลายชุดระนาบ ดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่าง ๆ ด้วยมุมที่เหมาะสม จะทำให้เกิดพฤติกรรมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถอธิบายโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการ

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ  $n$  คือ เลขจำนวนเต็มซึ่งเรียกว่า อันดับของการสะท้อน

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

$\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก

ถ้าสามารถวัดมุม  $2\theta$  ซึ่งมุมระหว่างรังสีที่เกิดการแทรกสอดกับรังสีตกกระทบ จึงทำให้สามารถหาค่า  $d$  (Interplanar spacing) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดได้

### 2.8.2 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

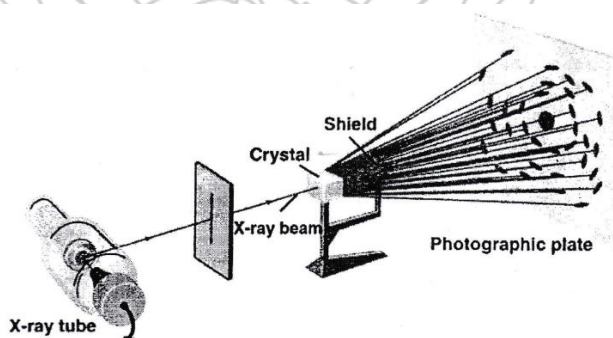
1) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray tube) สำหรับเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือหลอดรังสีเอกซ์หรือหลอดคูลิดจ์ (Coolidge tube) ประกอบด้วยหลอดสุญญากาศซึ่งภายในบรรจุแคโทดซึ่งเป็นเส้นลวดให้ความร้อนแอโนดคือโลหะที่เป็นเป้าแอโนดที่ใช้ในหลอดรังสีเอกซ์ต้องเป็นโลหะที่นำความร้อนได้ดีคือมีสภาพนำความร้อนสูงและมีจุดหลอมเหลวสูงเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่แคโทดจนมี

พลังงานสูงพอจะทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงหลุดออกจากแคโทดและพุ่งเข้าชนแอโนดทำให้อิเล็กตรอนวงในของแอโนดหลุดออกมาเมื่ออิเล็กตรอนชั้นอื่นเข้าไปแทนที่ออร์บิทัลที่ว่างแอโนดจะคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์และความร้อนโดยทั่วไปรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นคิดเป็นประมาณร้อยละ 1 ของพลังงานที่คายออกมาทั้งหมดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านหน้าต่างของหลอดที่ทำจากธาตุเบริลเลียม (Be) โลหะที่นิยมใช้เป็นแอโนดคือทองแดงหรือโมลิบดีนัม (Mo) โดยหลอดที่ใช้ทองแดงจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมกับผลึกขนาดเล็กส่วนโมลิบดีนัมเหมาะสมกับผลึกขนาดใหญ่หรือผลึกที่มีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี

2) อุปกรณ์สำหรับเลือกความยาวคลื่นอาจจะเป็นโมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) หรือแผ่นกรองแสงซึ่งเป็นตัวดูดกลืนความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการเช่นใช้เซอร์โคเนียม (Zr) หนา 0.01 เซนติเมตรในการดูดกลืนรังสี  $K\beta$  ของโมลิบดีนัมทำให้เหลือเพียง  $K\alpha$  เท่านั้นข้อจำกัดคือตัวกรองที่ใช้ดูดกลืนความยาวคลื่นที่ต้องการมีให้เลือกน้อย

3) ที่ใส่ตัวอย่างและฐานวางที่ใส่ตัวอย่างอาจเป็นพลาสติกหรือโลหะก็ได้ส่วนฐานวางอาจเป็นแท่นที่ไม่เคลื่อนที่หรือเป็นแท่นที่สามารถหมุนได้

4) ตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ซึ่งเคลื่อนที่ได้และสามารถวัดรังสีกระเจิงได้ ณ มุมต่างๆทำให้หาค่า  $2\theta$  ได้โดยส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง X-Ray Diffractometer ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังรูป



ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของเครื่อง X-Ray diffractometer

ที่มา : (กนกวรรณ จันทร์พลอย, 2554)

## 2.9 การวิเคราะห์โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นหรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter electron detector, BSE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบการกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์และการกระจายตัวความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามระดับพลังงาน

## (1) หลักการเกิดภาพ

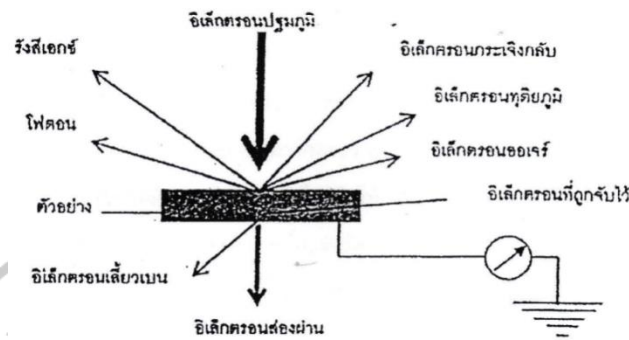
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงช่วยให้เห็นลักษณะผิวหน้าของวัสดุถึงระดับอะตอมซึ่งไม่สามารถเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาเนื่องจากความยาวคลื่นแสงของช่วงที่เรามองเห็น (Visible light) ไม่เหมาะสมกับขนาดที่เล็กกว่า  $1\mu\text{m}$  เทคนิคนี้ต้องใช้ลำอิเล็กตรอนแทนแสงซึ่งจะทำให้ได้กำลังขยายมากกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาเป็นล้านเท่า

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000 ถึง 3,000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบี่ยงล่างโดยผ่านแผ่นแอโนด (Anode plate) ภายใต้อุณหภูมิความดันสุญญากาศ 10<sup>-10</sup>ทอร์และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอนจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดีและอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5-200 นาโนเมตรโดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุมขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) ชนิดต่างๆออกมาดังภาพ 2.8 และภาพ 2.9 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนมีหลายชนิดดังนี้

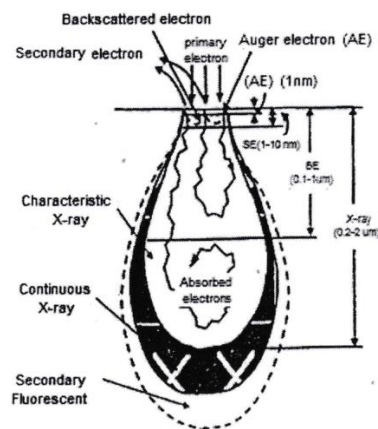
(1.1) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์เกิดที่พื้นผิวระดับไมลิก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวต่ำ

(1.2) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image, BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมาซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตรโดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

(1.3) สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRD) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, M, L,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมาทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์กันในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (กนกวรรณจันทร์พลอย, 2554)



ภาพที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับวัสดุตัวอย่าง  
ที่มา : (กนกวรรณ จันทร์พลอย, 2554)



ภาพที่ 2.8 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับวัสดุตัวอย่างที่ระดับความลึก  
ต่างๆ ที่มา : (กนกวรรณ จันทร์พลอย, 2554)

## 2.10 การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ด้านชีวภาพกายภาพและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็กโดยหลักการของ EDS เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอน จะทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ด้วยการผลัดให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอมดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกรังสีเอกซ์แบบแคแวกเทอร์ริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุจากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบและจะนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อไป (นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545)

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธีดังนี้คือ

1. Point analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำของอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ
2. Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่างซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ

## 2.11 การวิเคราะห์ด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy, IR)

เทคนิค Infrared spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโมเลกุลของสารโดยอาศัยหลักการการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดอยู่ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 12800 ถึง  $10\text{ cm}^{-1}$  จำแนกออกเป็น 3 ช่วง คือ ย่านอินฟราเรดใกล้ Near IR ( $4,000 - 12,800\text{ cm}^{-1}$ ) ย่านอินฟราเรดกลาง Mid IR ( $200 - 4,000\text{ cm}^{-1}$ ) และย่านอินฟราเรดไกล Far IR ( $10 - 200\text{ cm}^{-1}$ ) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดกลางหรือเรียกว่าความถี่ทำให้เกิดแตรนซิชันการสั่นพร้อมกับแตรนซิชันการหมุนเรียกเทคนิคนี้ว่า อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งทรานซิชันการสั่นนี้จะทราบชนิดหมู่ทำหน้าที่ เช่น พันธะคู่ พันธะสาม หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิลหมู่อะมิโน หรือภายในโครงสร้างของสาร (ศิรินิตย์ ธารธาดา, 2561)

เครื่องมือ Infrared spectroscope สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบกระจาย (Dispersive) และแบบฟูเรียรทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) เครื่องทั้งสองประเภทมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

(1) แหล่งกำเนิดแสงทำหน้าที่ให้รังสีอินฟราเรดโดยมีวัสดุจากใยเนิร์นสต์ (Optic nerve) ทำจากออกไซด์ของเซอร์โคเนียม ( $\text{ZrO}_2$ ) ทอเรียม ( $\text{ThO}_2$ ) และซีเรียม ( $\text{CeO}_2$ ) สำหรับเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจายลำแสงจะแยกเป็นสองลำแสงผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่างและเซลล์อ้างอิง

(2) เซลล์ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างบางชนิดต้องบรรจุในเซลล์ตัวอย่างโดยเซลล์ตัวอย่างทำมาจากเกลือของแฮไลด์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมโบรไมด์ลิเทียมฟลูออไรด์หรือซิลเวอร์คลอไรด์ที่มีลักษณะโปร่งใสและไม่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเดียวกับตัวอย่างตัวอย่างที่มีสถานะแก๊สจะถูกบรรจุในเซลล์ตัวอย่างที่มีระบบสุญญากาศดังภาพที่ 1 ซึ่งจะให้รังสีอินฟราเรดผ่านหน้าต่างโซเดียมคลอไรด์สำหรับตัวอย่างของเหลวจะมีเซลล์บรรจุตัวอย่างดังภาพที่ 2 ซึ่งจานหรือหน้าต่างสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างนิยมทำจากโซเดียมคลอไรด์ ส่วนตัวอย่างที่เป็นของแข็งอาจทำได้ 2 กรณี คือ ทำให้ละลายด้วยตัวทำละลายแล้วใช้วิธีแบบตัวอย่างของเหลวแต่หากไม่สามารถละลายได้มีวิธีการเตรียมโดยบดตัวอย่างกับโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นใส่ของผสมในชุดเตรียมจานโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วนำไปวางบนแท่นเครื่องอัดไฮดรอลิกจะได้จานโพแทสเซียมโบรไมด์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโปร่งใส

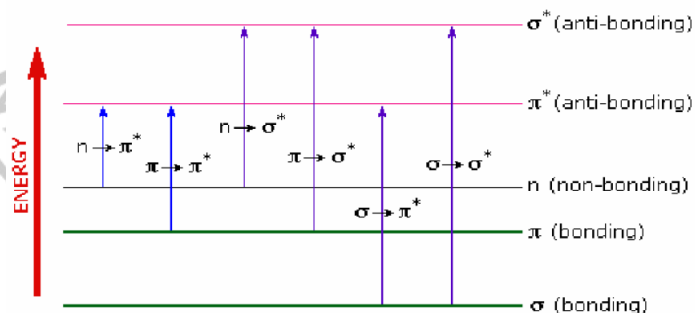
(3) ตัวทำแสงเอกรงค์เป็นส่วนประกอบเฉพาะเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจายเท่านั้นทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่น

(4) เครื่องตรวจหา ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวอย่างเป็นสัญญาณไฟฟ้ามีหลายชนิดโดยชนิดที่นิยมใช้กับเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์คือแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform infrared spectroscopy) เรียกชื่อย่อว่า FT-IR ซึ่งมีการตอบสนองสัญญาณไวกว่าเครื่องตรวจหาชนิดเทอร์โมคัปเปิล

(5) เครื่องบันทึก ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องตรวจหา ส่วนใหญ่การวิเคราะห์ที่หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จะเป็นโหมดการดูดกลืนมากกว่าการสะท้อน หลังจากให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ 1,000- 8,000 องศาเซลเซียสกับแหล่งกำเนิดรังสีแล้ว รังสีอินฟราเรดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง ทำให้ดูดกลืนรังสีตรงกับความถี่การสั่นหลักมูลของพันธะ ซึ่งความเข้มของสัญญาณจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจหาได้เป็นคลื่น หลังจากประมวลผลโดยการแปลงฟูเรียร์จะเปลี่ยนเป็น spectrum ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความถี่

## 2.12 การวิเคราะห์ที่ใช้ UV-Visible spectrophotometer

สารอินทรีย์สามารถจำแนกได้โดยหมู่ทำหน้าที่โครงสร้างเกิดจากเวเลนซ์อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมเข้าร่วมพันธะกันตามกฎออกเทต (octet rule) เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ได้แก่พันธะเดี่ยว (single bond) พันธะคู่ (double bond) และพันธะสาม (triple bond) หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัล (orbital) ของแต่ละอะตอมจะซ้อนเหลื่อม (overlap) กันกรณีออร์บิทัลซ้อนเหลื่อมบริเวณด้านปลายจะเป็นพันธะซิกมา ( $\sigma$ -bond) กรณีออร์บิทัลซ้อนเหลื่อมด้านข้างจะเป็นพันธะไพ ( $\pi$ -bond) ส่วนอิเล็กตรอนไม่ได้เข้าร่วมพันธะเรียกว่าอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวเมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือยูวีช่วงความยาวคลื่น 190-400 นาโนเมตรหรือแสงวิซิเบิลช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรส่งผลต่อเวเลนซ์อิเล็กตรอนในพันธะซิกมาพันธะไพหรืออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวทำให้เกิดอิเล็กทอนิกส์แทรนซิชัน ดังนั้นการวิเคราะห์ที่ใช้ UV-Visible spectrophotometer จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วง UV-Visible อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น



ภาพที่ 2.9 ระดับพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลถูกกระตุ้นเมื่อได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วง UV-Visible

เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่ match กับ electronic transition ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลพลังงานจะถูกดูดกลืนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะมี higher energy orbital เครื่อง spectrophotometer จะ record ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นการวิเคราะห์โดยใช้ UV-Visible spectrophotometer สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณโดยความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะสามารถใช้ในการบ่งชี้ชนิดของสาร ในขณะที่ปริมาณการดูดกลืนแสงจะใช้ในการบอกปริมาณของสารที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งจะอาศัย Beer's law

$$A = \epsilon bc$$

โดย A = ค่าการดูดกลืนแสง

$\epsilon$  = molar absorptivity ( $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ )

b = path length

c = ความเข้มข้นของสารที่นำมาวิเคราะห์ ( $mol \cdot L^{-1}$ )



ภาพที่ 2.10 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ที่มา : (หน่วยบริการนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์, 2564)

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ (2553) ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่เปิดโดยกระบวนการทางความร้อน ตั้งแต่อุณหภูมิ 300 ถึง 900 องศาเซลเซียส นาน 1, 3 และ 5 ชั่วโมง วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปริมาณสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้ประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะผงละเอียดสีขาว รูปร่างอนุภาคเป็นทรงกลมมีความพรุนตัวสูง การกระจายตัวดี ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 29.16 ไมครอน เหมาะกับการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพ เช่น วัสดุไดอิเล็กตริก ค่ะตะลิสต์และตัวเก็บประจุไฟฟ้า



Alavi และ Morsali (2009) ได้ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Ca(OAc)}_2$  และ  $\text{NaOH}$  ด้วยกระบวนการ sonochemical จากนั้นวิเคราะห์ผลตัวอย่างด้วยเทคนิค transmission electron microscopy, scanning electron microscopy and X-ray powder diffraction พบว่าความเข้มข้นของไอออนแคลเซียม ระยะเวลาการสังเคราะห์ และความถี่ของคลื่นเสียง มีผลกระทบอย่างมากต่อขนาด รูปร่างและกระบวนการโตของผลึก

Mohammadi et al. (2012) ได้ศึกษาผลการยับยั้งแบคทีเรียของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  พบว่าสามารถยับยั้งได้ดีมาก เนื่องจากมีสมบัติเป็นด่างรุนแรง จึงสามารถเปลี่ยนโครงสร้างโปรตีน และทำลายสารพันธุกรรม รวมถึงเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้

Kazemi et al. (2015) ได้สังเคราะห์สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ด้วยกระบวนการ sonochemical ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาคอมโพสิตกับ Paraloid ด้วยกระบวนการ sonochemical อีกครั้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) และ thermogravimetric analysis (TGA)

Nagabushana et al. (2017) ได้เตรียม  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ด้วย 2 วิธี ได้แก่ การเผาโดยเตาเผา และการสังเคราะห์ในเตาไมโครเวฟ จากนั้นจึงนำผลึกมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction, Scanning electron microscopy, Energy dispersive studies และ Thermoluminescence พบว่าการสังเคราะห์โดยใช้เตาเผาทำให้ได้อนุภาคของสารที่มีขนาดเล็กกว่า การสังเคราะห์โดยใช้เตาไมโครเวฟ ทำให้มีพื้นที่ผิวของสารมากกว่า และเมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค Thermoluminescence พบว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากจะได้รับความเข้ม Thermoluminescence ที่สูงกว่า และในปีเดียวกัน

Guerrero et al. (2017) ได้สังเคราะห์สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  จากของเสียชีวมวลในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยเทคนิค thermochemical transformation ทำการศึกษาผลตัวอย่างด้วยเทคนิค micro-Raman spectroscopy, scanning electron microscopy และ X-ray diffraction analysis พบว่าได้สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ *Enterococcus faecalis* พบว่าสามารถยับยั้งได้ดีมาก

Hable et al. (2019) ได้สังเคราะห์  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ด้วยวิธีการโซล-เจล โดยใช้กรด  $\text{HCl}$  จากสารละลาย  $\text{CaCl}_2$  จากนั้นทำการก่อเจลด้วยสารละลาย  $\text{NaOH}$  และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผงสารตัวอย่างที่ได้ถูกลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค X-ray diffraction Scanning, Scanning electron microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy, X-Ray fluorescence พบว่าได้อนุภาคสารที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดอยู่ในช่วง 50-198 นาโนเมตร