

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

2.1.1 คุณสมบัติ

ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ มวลโมเลกุลเท่ากับ 44.01 กรัมต่อโมล จุดเดือด -78.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.799 กรัมต่อลิตร สามารถละลายน้ำได้ โดยปกติแล้วเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่กัดกร่อน แต่สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะและไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซที่มีอยู่ในธรรมชาติประมาณร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร ในเขตเมืองมีปริมาณเพิ่มเป็นประมาณร้อยละ 0.06 และลมหายใจออกของมนุษย์มีก๊าซประมาณร้อยละ 5.6 (ไพศาล, 2551)

2.1.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซ CO₂

การศึกษาปริมาณก๊าซ CO₂ โดยหน่วยงาน Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา รายงานว่าปริมาณก๊าซ CO₂ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และแหล่งอื่นที่เป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์กำลังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลการศึกษาของ IPCC ยังระบุว่าในบรรดาก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในบรรยากาศของโลกมากที่สุด ทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ ด้วย นั่นหมายถึงผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของผิวโลกและชั้นบรรยากาศจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นต่อไปอีก ล่าสุดนี้หน่วยงาน IPCC ได้รายงานปริมาณก๊าซ CO₂ ที่เพิ่มขึ้นโดยฝีมือมนุษย์ ทำให้พลังงานรังสีความร้อนสะสมบนผิวโลกและชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อม เช่น จากการเผาไหม้ เป็นต้น (ปานทิพย์, 2554)

2.1.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO₂

การเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO₂ ส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งทำให้ชีวิตมนุษย์สั้นลง โดยมีการทำนายไว้ว่าในอีก 20 ปีข้างหน้า อุณหภูมิของโลกจะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังส่งผลให้พืชและสัตว์ต้องมีการปรับตัวเปลี่ยนแปลง มิเช่นนั้นแล้วอาจจะต้องถึงขั้นสูญพันธุ์ได้ เมื่อโลกร้อนขึ้นจะก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมแบบร้อนชื้นที่เหมาะสมแก่การฟักตัวของเชื้อโรคและศัตรูพืช ส่วนแบคทีเรียในอากาศจะเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติและโอกาสในการแพร่ระบาดของสู่มนุษย์ก็จะมีสูงด้วย (เดวิท, 2551) หากทำการรักษาด้วยยาปฏิชีวนะความรุนแรงของโรคจะทุเลาลง แต่ถ้าปล่อยไว้เป็นเวลานานก็มีโอกาสทำให้เสียชีวิตสูงถึงร้อยละ 60 อีกทั้งภาวะโลกร้อนยังส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศและภูมิอากาศ โดยเฉพาะแถบขั้วโลกซึ่งมีภูเขาน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งก้อนน้ำแข็งจะละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของน้ำทะเลทางขั้วโลกเพิ่มขึ้นและไหลลงสู่มหาสมุทรทำให้เกิดน้ำท่วมได้ทุกทวีป และบริเวณที่มีภูมิประเทศอยู่ในระดับต่ำอาจจะถึงขั้นสูญหายไปจากแผนที่โลกก็เป็นได้ นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังทำให้สัตว์น้ำเสียชีวิตเพราะระบบนิเวศน์เปลี่ยนไป ในส่วนของทวีปยุโรปและยุโรปใต้ที่มีภูมิประเทศและพื้นที่แบบลาดเอียงจะเกิดความแห้งแล้งในหลายพื้นที่ ทำให้ปัญหาอุทกภัยเพิ่มขึ้นเนื่องจากธารน้ำแข็งบริเวณขั้วโลกสูงที่ปกคลุมด้วยหิมะจะละลายจนหมด ส่วนในทวีปเอเชียนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นในฤดูกาลแล้งอาจมีน้ำท่วม ผลผลิตทางการเกษตรจะลดลง ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น

2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของอากาศเกี่ยวข้องกับก๊าซ CO₂ ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด

พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ตั้งชื่อขึ้นตามสถานที่ในการเจรจาที่เมืองเกียวโต เมืองหลวงเก่าของประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2540 และมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 พิธีสารดังกล่าวเป็นข้อตกลงฉบับแรกของโลก ว่าด้วยการต่อสู้เพื่อลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งก๊าซ CO₂ ก็หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ได้กำหนดไว้ในพิธีสารดังกล่าวด้วย หลังจากการให้สัตยาบันของประเทศรัสเซียซึ่งปล่อยก๊าซร้อยละ 17 ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก ทำให้ครบเงื่อนไขที่ว่าพิธีสารมีผลบังคับใช้ต่อเมื่อมีประเทศร่วมให้สัตยาบันไม่น้อยกว่า 55 ประเทศ โดยจะต้องมีประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมารวมแล้วอย่างน้อยร้อยละ 55 ของปริมาณก๊าซที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีประเทศที่ให้สัตยาบันแล้ว 191 ประเทศ ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้ชื่อว่าเป็นประเทศที่สร้างภาวะโลกร้อนเป็นอันดับที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 28 อันดับที่ 2 เป็นสาธารณรัฐ

ประชาชนจีน และอันดับที่ 3 ประเทศอินเดีย โดยวัดจากปริมาณก๊าซ CO₂ ที่คืนกลับมาสู่บรรยากาศ ส่วนประเทศไทยนั้นจัดเป็นประเทศที่สร้างผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนคิดเป็นร้อยละ 0.64 จัดอยู่ในกลุ่มประเทศที่ไม่สร้างผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนแต่สามารถร่วมโครงการลดก๊าซเรือนกระจกได้ตามความสมัครใจ (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) โดยมีสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นหน่วยงานหลักแห่งชาติ (National Focal Point) ของอนุสัญญาและพิธีสารเกียวโต นอกจากนี้ ประเทศไทยได้ออกพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2550 มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2551 ทำให้องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (Thailand Greenhouse Gas Management Organization, TGO) เป็นองค์การที่มีบทบาทสำคัญในเรื่องของการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ทั้งนี้ยังมีหลายองค์การที่กำหนดมาตรฐานปริมาณก๊าซ CO₂ ที่สามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้ เช่นมาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) ได้กำหนดปริมาณก๊าซ CO₂ จะมีได้ไม่เกิน 1,000 ppm เป็นต้น (ไพศาล, 2551)

2.2 ขี้ตะกรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steel Making Slag) (สิริภัทร, 2552)

ขี้ตะกรัน (Slag) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าชนิดเตาไฟฟ้า (Electrical Furnace Process) กระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านับเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กขึ้นกลาง กล่าวคือ การนำเศษเหล็ก (Scrap) มาทำการหลอมปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือหล่อแบบต่อเนื่อง (Continues Casting Machine, CCM) จะได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จได้แก่ เหล็กทรงยาว (Billet) เหล็กทรงแบน (Slab) และเหล็กทรงใหญ่ (Bloom) เหล็กทรงยาวที่ได้จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้นและเหล็กหลอด ซึ่งสำหรับประเทศไทยการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตเพื่อให้ได้เหล็กเส้นและเหล็กหลอดเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป ในขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะมีการเติมโลหะหินปูน (Limestone) เหล็กดิบหรือเศษเหล็ก หินปูน และโดลไมต์ (Dolime) ในกระบวนการหลอมเหล็กเพื่อรวมตัวกับสิ่งเจือปนต่างๆ โดยหินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็กภายใต้การควบคุมและการกำจัดสารมลทินต่างๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน และแมงกานีส สารดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปเกิดเป็นขี้ตะกรัน เหล็กลอยอยู่ด้านบนน้ำเหล็ก จากนั้นจึงถูกคัดแยกออกจากเตาด้วยช่องระบายที่ถูกออกแบบไว้ เมื่อ

อุณหภูมิเย็นลงก็จะได้ขี้ตะกรันเหล็กที่เป็นก้อนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเหล็กมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าจะจมลงสู่ก้นเตา ในขณะที่ขี้ตะกรันเตาหลอมจะถูกดันให้ลอยสู่ด้านบน ขี้ตะกรันจะถูกแยกออกจากน้ำเหล็กโดยการเทออกอย่างช้าๆ ลงในถังเหล็ก (Slag Pot) โดยอาจมีน้ำเหล็กปนมากับขี้ตะกรันเตาหลอมอยู่บ้าง (ศิริพงษ์, 2552) ซึ่งองค์ประกอบทั่วไปของขี้ตะกรันเหล็กแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทั่วไปของขี้ตะกรันเหล็ก

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	40 – 52
SiO ₂	10 – 19
FeO	10 – 40
MnO	5 – 8
MgO	5 – 10
Al ₂ O ₃	1 – 3
P ₂ O ₅	0.5 – 1
S	< 0.1
Metallic Fe	0.5 – 10

ที่มา: (www.tfhr.gov, สืบค้นเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2553)

2.3 กระบวนการชะละลาย (สุกสันส์, 2548)

กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายชนิดของเหลวซึ่งเรียกว่า ตัวชะ (Leachant) ไปละลายสารที่อยู่ในของแข็ง สารที่ละลายได้ในตัวทำละลายนั้นๆ เรียกว่า ผลชะละลาย (Leachate) การชะละลายมีความแตกต่างกับการล้างของแข็งที่ตัวกรองตรงที่ว่า การล้างของแข็งที่ตัวกรองมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกจากของแข็งที่จับกัน โดยใช้น้ำหรือบางครั้งอาจใช้ตัวทำละลายในการล้างตัวทำละลายซึ่งเป็นสารเจือปน (Impurity) ที่ไม่ต้องการ ผลผลิตที่ต้องการคือของแข็งที่จับกัน ในขณะที่การชะละลายผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นส่วนที่ถูกสกัดออกมาจากของแข็ง ในการชะละลายปริมาณของสารที่ละลายออกมาส่วนมากมี

ปริมาณที่มากกว่าการล้างของแข็งที่ตัวกรอง และสมบัติของของแข็งอาจเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างปฏิบัติการชะละลาย โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการชะละลายโลหะซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี

1. กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการชะละลายโลหะโดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์ (Micro-organism) ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดขึ้น แล้วนำกรดที่ได้ไปชะละลายโลหะอีกครั้งหนึ่ง

2. กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการชะละลายโลหะด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก และสารละลายไฮดรอกไซด์ เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ และสามารถละลายโลหะได้เป็นจำนวนมาก

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย ได้แก่

1. ชนิดของกรด กรดที่ใช้ในการละลาย ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งกรดเหล่านี้เป็นกรดที่สามารถชะละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นกรดแก่ที่แตกตัวได้ร้อยละ 100

2. ค่าความเป็นกรด-เบส ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง pH 1-2

3. ชนิดของโลหะ โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกละลายได้แตกต่างกัน ขึ้นกับว่าโลหะนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใด โดยโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิก เมื่ออยู่ในน้ำแล้วสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย

4. ปริมาณโลหะ ค่าการชะละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น

5. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

6. ขนาดอนุภาคของตะกอนโลหะ โลหะจะอยู่ในรูปของตะกอน ถ้าตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับกรดน้อยทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก

7. อุณหภูมิการชะละลาย ความสามารถในการชะละลายขึ้นกับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงความสามารถในการถูกละลายในตัวทำละลายมีค่าสูง และที่อุณหภูมิสูงความหนืดของเหลวต่ำทำให้เกิดสภาพแพร่ที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มอัตราการชะละลาย

2.4 กระบวนการดูดซึม (ชาคริต, 2544)

การดูดซึมหรือการดูดกลืนก๊าซ เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของก๊าซโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพก๊าซไปยังสภาพของเหลวได้นี้ เนื่องจากทั้ง 2 วัฏภาคนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration Difference) ที่บริเวณผิวของเหลวและก๊าซ (Driving Force) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล ประสิทธิภาพของการดูดซึมขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว ระยะเวลาในการสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัส ความปั่นป่วนภายในหอสัมผัส และประสิทธิภาพการแพร่กระจาย การดูดซึมเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ สารมลพิษที่เป็นก๊าซที่ถูกจำกัดโดยการดูดซึมได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ก๊าซคลอรีน ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลต่ำ การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการดูดซึมทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดซึมละลายอยู่ในตัวทำละลายโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นและการดูดซึมทางเคมีเป็นการดูดซึมที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างก๊าซที่ถูกดูดซึมกับตัวทำละลาย

วิธีการเลือกสารดูดซึม (Absorbent) สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. ก๊าซควรละลายได้ดีในตัวทำละลาย
2. ตัวทำละลายควรมีอัตราการระเหยต่ำ เพื่อลดการสูญเสียสารตัวทำละลาย
3. ตัวทำละลายควรเป็นสารที่ไม่กัดกร่อน เพื่อช่วยลดค่าก่อสร้างเครื่องมือ
4. ตัวทำละลายควรมีราคาไม่แพง และหาง่าย
5. ตัวทำละลายควรมีความหนืดต่ำ เพื่อช่วยเพิ่มการดูดกลืนและลดการท่วม

(Flooding)

6. ตัวทำละลายควรเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี และมีจุดเยือกแข็งต่ำ

2.4.1 การถ่ายเทมวลก๊าซสู่ของเหลว

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่าง (Gradient) ของความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละวัฏภาค ซึ่งไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดการปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลของความเข้มข้น โดยจุดนี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซและของเหลวอุดมคติได้จากกฎของราอูลต์ (Raoult's Law) ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ (Welty, 1984)

สำหรับของเหลวอุดมคติ

$$P_A = x_A P'_A \quad (2-1)$$

เมื่อ P_A = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A
 x_A = สัดส่วนโมล A ในวัฏภาคของเหลว
 P'_A = ความดันไอของ A

และสำหรับก๊าซอุดมคติ

$$P_A = y_A P'_A \quad (2-2)$$

เมื่อ P_A = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A
 y_A = สัดส่วนโมล A ในวัฏภาคของก๊าซ
 P'_A = ความดันไอของ A

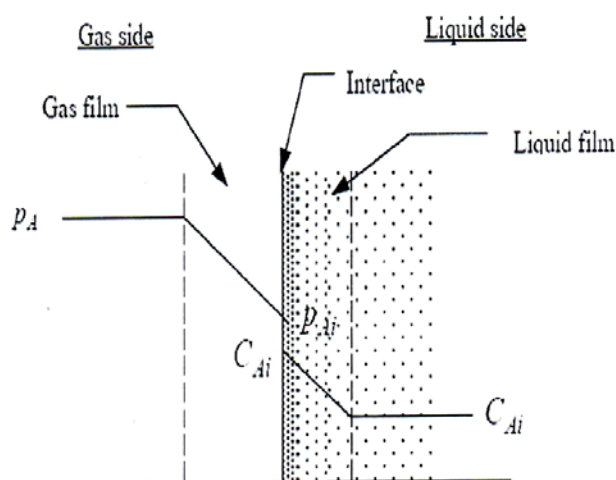
การถ่ายเทมวลของก๊าซไปยังของเหลวสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) (Welty, 1984) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังผิวสัมผัสของก๊าซ
2. การถ่ายเทข้ามผิวสัมผัสไปยังฟิล์มของเหลว
3. การถ่ายเทจากฟิล์มของเหลวเข้าไปยังวัฏภาคของเหลว

ทฤษฎีนี้ได้อ้างอิงสมมติฐานดังนี้ คือ

1. มีฟิล์มสองชั้นอยู่ที่แต่ละข้างของผิวสัมผัส (ฟิล์มด้านก๊าซและฟิล์มของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซและของเหลว
2. ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของฟิล์มก๊าซและของเหลว

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลจากก๊าซสู่ของเหลว แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



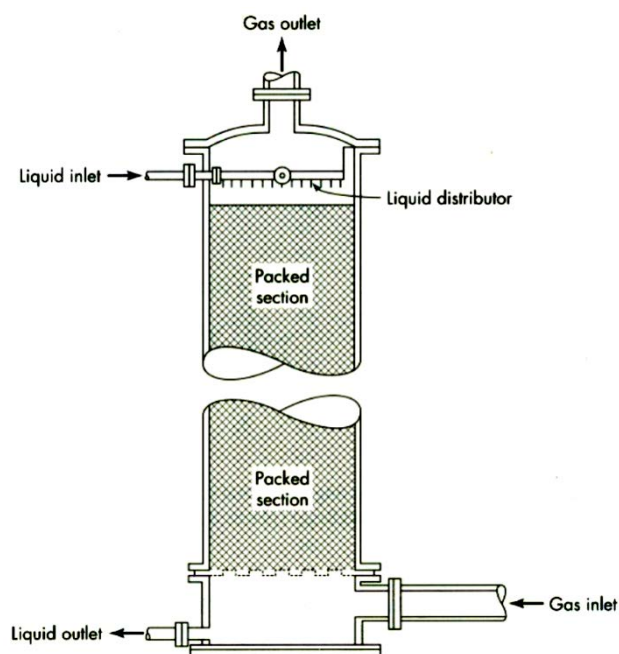
ภาพประกอบ 2-1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลว (Welty, 1984)

อุปกรณ์การดูดซึม

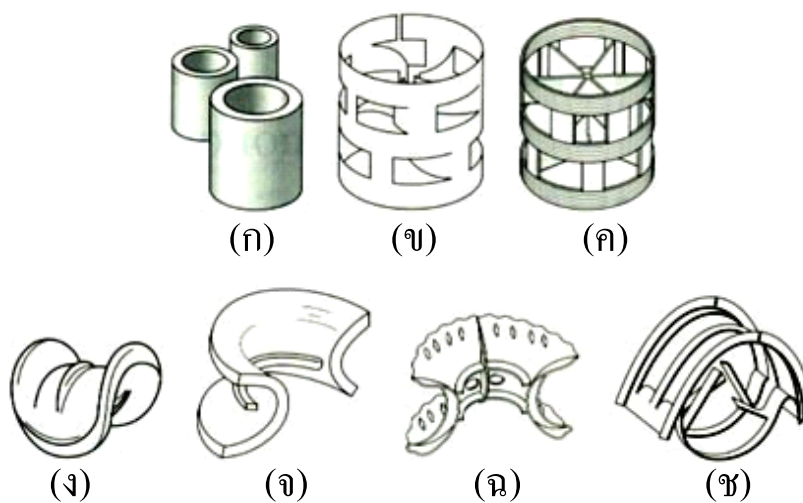
ในการดูดซึมต้องการให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันมาก และความดันลด (Pressure Drop) มีค่าน้อย โดยปกติจะมีวิธีการทำให้ของเหลวแตกย่อยเป็นหยดหรือฟิล์มบางๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวของเหลวมาก สำหรับการถ่ายเทมวลและเพิ่มแรงดัน (Driving Force) ให้ฟิล์มมักใช้เครื่องมือดูดซึมคือ คอลัมน์บรรจุ และคอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ให้ก๊าซสัมผัสกับของเหลวและมีการถ่ายเทมวลอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้คอลัมน์บรรจุ เนื่องจากการออกแบบคอลัมน์ทำได้ง่าย สามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูง วัสดุหาง่าย และราคาไม่สูง

คอลัมน์แบบบรรจุที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ แบบไหลสวนทาง (Counter Current) และแบบไหลผ่าน (Cross-flow) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซโดยใช้คอลัมน์แบบบรรจุชนิดไหลสวนทาง (Counter Current Packed Tower) โดยก๊าซเสียจะไหลเข้าสู่ระบบทางส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุและก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางด้านบน ส่วนของเหลวสะอาดจะไหลเข้ามาทางส่วนบนของคอลัมน์บรรจุในขณะที่ของเหลวสกปรกจะไหลออกทางด้านล่าง ลักษณะของคอลัมน์บรรจุแสดงดังภาพประกอบที่ 2.2 ภายในคอลัมน์จะบรรจุด้วยตัวกลาง (Packed Bed

Absorber) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซเสียและของเหลวที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ โดยตัวกลางที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์นี้มีผลทำให้ของเหลวที่เป็นสารดูดซึมเกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวมากขึ้น ตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์มีรูปร่างต่างๆ เช่น Raschig Ring, Pall Ring, Berl Saddle, Intalox Saddle และ Tellerette เป็นต้น โดยทำจากวัสดุที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งานเช่น เซรามิก พลาสติก (โพลีโพรพิลีน หรือโพลีเอทิลีน) เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น จากภาพประกอบที่ 2.3 ซึ่งแสดงชนิดของตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แบบ Raschig Ring เป็นชนิดที่พบมากที่สุด แบบ Saddles จะทำให้การสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวดีมาก รวมทั้งมีการสูญเสียความดันน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ข้อเสียของวัสดุชนิดนี้ คือ มีราคาแพง แบบ Pall Ring จะทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารดีกว่าแบบ Raschig Ring หรือ Lessing Ring แต่ต้องเคลือบด้วยโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำให้มีราคาแพง วัสดุที่เป็นเซรามิกหรือถ่านจะทนการกัดกร่อนได้ดี วัสดุที่เป็นพลาสติก เช่น ชนิด Tellerette และ Paddles ทำให้การสัมผัสมีประสิทธิภาพและค่าความดันลดต่ำ แต่ราคาก่อนข้างแพงกว่าแบบ Raschig Ring ตัวกลางชนิดนี้ทำจาก Ceramic Pall Rings ให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่า Raschig Ring และ Lessing Ring แต่แพงกว่าและต้องทำด้วยโลหะที่ทนต่อการกัดกร่อน Tellerette Packing และ Pall Ring ที่ทำจากพลาสติกนั้นสามารถใช้ได้แต่อุณหภูมิต้องไม่เกิน 355 - 360 เคลวิน ตัวกลางเหล่านี้อาจบรรจุในคอลัมน์ดูดซึมโดยวิธีสุ่ม (Randomly) หรือเรียงเป็นแถว (Stacked Packing) ซึ่งการใส่ตัวกลางแบบ Randomly นี้จะให้พื้นที่ผิวการสัมผัสสูงกว่าและค่าความดันลดสูงกว่า ส่วนแบบเรียงแถวนั้นจะให้ความดันลดต่ำแต่ค่าติดตั้งสูง



ภาพประกอบที่ 2-2 การไหลแบบสวนทางกันภายในคอลัมน์บรรจุ (McCabe *et al.*, 1993)



ภาพประกอบที่ 2-3 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในคอลัมน์บรรจุ Raschig Ring (ก), Metal Pall Ring (ข), Plastic Pall Ring (ค), Berl Saddle (ง), Ceramic Intalox Saddle (จ), Plastic Supper Intalox Saddle (ฉ) และ Metal Intalox Saddle (ช) (ชาคริต, 2544)

นอกจากชนิดของคอลัมน์และตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ที่เลือกใช้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์ด้านการพื้นฐานสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโดยกระบวนการดูดซึม ดังนี้

1. ความเร็วก๊าซ (Gas Velocity) ความเร็วก๊าซทำให้เกิดการผสมและปั่นป่วนระหว่างวัฏภาคได้ดี อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของก๊าซต้องไม่เร็วเกินไปจนเกิดภาวะท่วม (Flooding)

2. อัตราการไหลของของเหลว (Liquid Flow Rate) โดยปกติแล้วการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการดำเนินการต้องพิจารณาหาสถานะที่เหมาะสม

3. ขนาดวัสดุบรรจุ (Packing Size) วัสดุบรรจุขนาดเล็กให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น แต่เมื่อช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุลดลงทำให้ความดันลดภายในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้น

4. ความสูงของคอลัมน์บรรจุ (Packing Height) คอลัมน์บรรจุที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด และระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้นเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงแต่ความดันลดและค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและระยะเวลาในการสัมผัสส่วนใหญ่พิจารณาจากชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุมากกว่า

2.4.2 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม

2.4.2.1 อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G Ratio)

สิ่งที่ควรพิจารณาเป็นลำดับแรกในการออกแบบ คือ อัตราการไหลและองค์ประกอบของกระแสก๊าซที่จะไหลเข้าสู่ระบบ คุณสมบัติสารเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาอัตราการไหลและองค์ประกอบในแต่ละกระแสน้ำของของไหลที่เข้าและออกจากระบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งของหอไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง การทำสมดุลสารในหอดังกรอบเส้นประสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

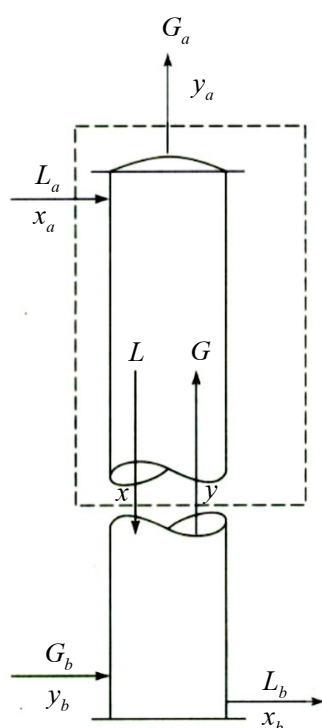
$$\text{ปริมาณสารรวม} \quad L_a + G = L + G_a \quad (2-3)$$

$$\text{สาร A :} \quad L_a x_a + G y = L x + G_a y_a \quad (2-4)$$

โดย G เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของเฟสก๊าซ และ L เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของเฟสของเหลวที่จุดเดียวกันในหอ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเฟสก๊าซ (y) และเฟสของเหลว (x) ที่จุดเดียวกัน

สมการสมดุลมวลรวมที่คิดจากจุดปลายของแต่ละสายสามารถแสดงได้ดังนี้

ปริมาณสารรวม $L_a + G_b = L_b + G_a$ (2-5)



ภาพประกอบที่ 2-4 แผนภาพแสดงสมดุลสารสำหรับหอดูดซึม (McCabe *et al.*, 1993)

สาร A : $L_a x_a + G_b y_b = L_b x_b + G_a y_a$ (2-6)

จาก สมการ (2.3) $L_a x_a + G_y = Lx + G_a y_a$

จัดสมการใหม่ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y ที่จุดใดๆ ในหอได้สมการ เส้นปฏิบัติการดังนี้

$$y = \frac{L}{G}x + \frac{G_a y_a - L_a x_a}{G} \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-7) จะเห็นว่า ยิ่ง L/G เพิ่มขึ้น แรงขับจะเพิ่มขึ้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้หอสูงก็สามารถที่จะแยกสารได้ดี อย่างไรก็ตาม ถ้า L/G มากเกินไป นั่นคือ L มาก เมื่อทำการดูดซึม ของเหลวที่ได้จะมีความเจือจางมากทำให้สิ้นเปลืองในขั้นตอนสตรipping (Stripping) หรือการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ ดังนั้น มักใช้อัตราการไหลของของเหลวในช่วง 1.1 – 1.5 เท่าของอัตราการไหลของของเหลวต่ำสุด

2.4.2.2 การหาปริมาณของเหลวที่ต้องการ (Liquid Requirement)

ในการออกแบบหอดูดซึมจะต้องทราบอัตราการไหลของก๊าซเสียที่ต้องการบำบัด (G_m) ความเข้มข้นก๊าซเสียที่เข้า (Y_1) และความเข้มข้นของสารดูดซึมก่อนเข้าระบบ (X_2) หรือสามารถประมาณค่าให้เท่ากับศูนย์ถ้าไม่มีการนำของเหลวนั้นกลับมาใช้ใหม่ และต้องระบุค่าความเข้มข้นของก๊าซเสียหลังผ่านการบำบัด (Y_2) จากหลักการสมดุลของมวลทำให้สามารถประมาณอัตราการไหลของของเหลวที่ต้องการใช้น้อยที่สุดในการดูดซึมก๊าซเสียได้โดยให้มีความเข้มข้นอยู่ในมาตรฐาน (Y_2) สำหรับการใช้งานจริงนั้นจะไม่ใช้สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมต่อก๊าซที่ต่ำที่สุด $(L_m/G_m)_{min}$ แต่จะเพิ่มเพื่ออัตราการไหลของสารดูดซึมให้มากกว่าค่าต่ำสุดดังกล่าว โดยทั่วไปนั้นอัตราการไหลของสารดูดซึมจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 100 จากค่าความต้องการต่ำสุด เช่น 1.5 เท่าของอัตราส่วนของอัตราการไหลของเหลวต่อก๊าซต่ำสุด (Joseph and Beachler, 1981)

2.4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม (Pack tower Diameter)

หลังจากคำนวณหาอัตราการไหลของสารดูดซึมแล้วจะต้องประมาณขนาดของหอดูดซึมที่เหมาะสมกับสภาวะการไหลของของเหลวและก๊าซ โดยปกติจะออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดแต่ยังสามารถทำงานได้เพื่อลดค่าใช้จ่ายให้ต่ำที่สุด แต่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงจะมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซมีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหอจะสูงขึ้นและเมื่อถึงความเร็วระดับหนึ่งจะสูงจนกระทั่งสารละลายดูดซึมถูกกระแสน้ำขึ้นทางด้านบนของหอดูดซึม ความเร็วนี้เรียกว่า Flooding Velocity ซึ่งจะไม่สามารถใช้งานหอดูดซึมโดยใช้ความเร็วเท่ากับหรือเกินกว่า Flooding Velocity ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วเส้นผ่านศูนย์กลางของหอจะถูกเลือกเพื่อให้ได้ความเร็วของอากาศในหอมีค่าต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนของของเหลวในหอดูดซึม โดยทั่วไปจะใช้ค่าความเร็วที่ร้อยละ 50-75 ของ Flooding Velocity เป็นเกณฑ์ในการออกแบบและ

ค่า Flooding Velocity ขึ้นกับอัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซ ความหนืดของของเหลว คุณสมบัติของตัวกลาง (Richard, 1981)

2.5 ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการดูดซึมก๊าซ CO_2 ด้วยสารที่ได้จากการชะละลายของเหลือทิ้ง หรือ By-product ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เป็นปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนต ซึ่งในสารชะละลายจะมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นต้น ที่รวมกันอยู่ในรูปของสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ปฏิกิริยาระหว่างสารชะละลายจากชีตะกรันและก๊าซ CO_2 สามารถเกิดขึ้นได้ โดยปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถเกิดขึ้นได้แสดงได้ดังสมการที่ (2-8) (Hisyamudin *et al.*, 2009)



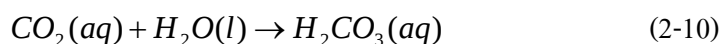
โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาหลายขั้นตอน สามารถเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

การชะละลายชีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2

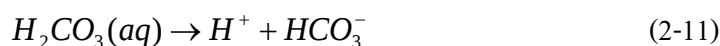
ก๊าซ CO_2 ที่อยู่ในรูปของโมเลกุลที่ไม่มีการแตกตัวเมื่อละลายน้ำเกิดเป็น CO_2 อิสระอยู่ในรูปสารละลาย



ก๊าซ CO_2 ละลายในน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก



จากสารละลายกรดคาร์บอนิกเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนต



ไบคาร์บอเนตเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอเนต



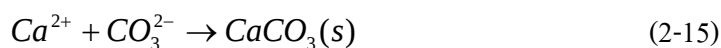
การชะละลายซีตกรัน (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)_2



Ca(OH)_2 แยกตัวเป็นไอออนในสารละลายซีตกรัน



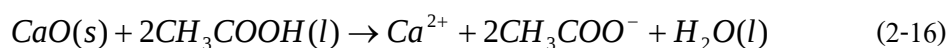
Ca^{2+} ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-14) ทำปฏิกิริยากับ CO_3^{2-} ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-12) เกิดเป็นตะกอนของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3



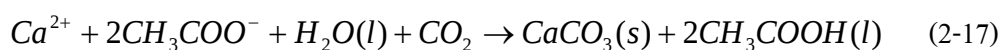
การชะละลายซีตกรันด้วยกรดอะซิติกแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2

จากงานวิจัยของ Kakizawa และคณะ (2001) ได้ศึกษาการชะละลายแคลเซียมไอออนจากซีตกรันหลักที่มีสารประกอบของแคลเซียมซิติเกิดด้วยกรดอะซิติก (CH_3COOH) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

การชะละลายซีตกรัน (CaO) ด้วยกรดอะซิติก (CH_3COOH)



ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-16) ทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2 ดังสมการที่ (2-17) แต่ในกรณีนี้ ปริมาณของ CaCO_3 ที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าที่สภาวะการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากพีเอชของสารละลายเป็นกรด



2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็น

วิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factor) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (Response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งกระบวนการต้องมีปัจจัยหรือ Input (X_1, X_2, X_3, X_4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เกิดพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

2.6.1 พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design RSM) (อิสรพงษ์, 2544)

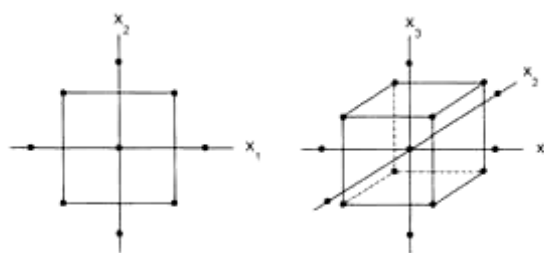
วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา เพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว สำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวผลตอบสนอง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ (2-18)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-18)$$

เมื่อ	y	คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
	f	คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง
	$x_1, x_2, \dots, x_n$	คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย
	n	คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ
	ε	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ϵ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ϵ มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบสนอง วิธีการที่สนใจคือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี mf รัน ซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ nc รันที่จุดศูนย์กลาง ภาพประกอบที่ 2.5 แสดง CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ บ้าง



ภาพประกอบที่ 2.5 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$
(อิสรพงษ์, 2544)

ข้อดีของแผนการทดลอง CCD คือ เหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order Model) กรณีการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) และมีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ (2^k Full Factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน นอกจากนี้ การออกแบบแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial Portion) และจุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการแบบเชิงเส้นตรง สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Portion) จะได้สมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 หรือ Quadratic Model

ข้อเสียของแผนการทดลอง CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factors)

2.6.1.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและชีวเคมีสามารถรับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญอาจส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมทำได้โดยใช้สมการที่ (2-19)

$$X = \left[\frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right] \quad (2-19)$$

โดยที่

X = Coded Variables

x = ตัวแปรอิสระ

$x_{\max}$ = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

$x_{\min}$ = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสถานะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface Plot โดยใช้โปรแกรม Regression Analysis แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ดังแสดงในสมการที่ (2-20)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i < j} \quad (2-20)$$

โดยที่ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2.6.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

วิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group Variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มเป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มแตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

2.6.1.3 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (2E) มีค่าน้อยที่สุด บางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด โดยการพิชผลตอบสนอง
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง

เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยจึงมีลักษณะทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้ (ปารเมศ, 2545)

1) Linear Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i$$

2) 2FI (Two-factor Interaction) Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \sum_{j=1}^P \beta_{ij} X_i X_j$$

3) Quadratic Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \sum_{j=1}^P \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^P \beta_{ii} X_i^2$$

วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ โดยพิจารณาจากค่า P-value

2) การทดสอบ Lack of Fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือ แบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value

3) วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้

3.1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย คำนวณได้จากสมการที่ (2-21)

$$\text{Std. Dev.} = \sqrt{\text{MSE}} \quad ; \text{ (Mean Squared Error, MSE)} \quad (2.21)$$

3.2) R-squared (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้น

จึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ (2-22)

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2.22)$$

SSE คือ ค่าผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Square for Error, SSE) ($SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$)

SST คือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมด (Sum of Square Total, SST) ($SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$)

3.3) Adjusted R-squared ($Adj-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of Freedom มาพิจารณาด้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2-23)

$$Adj-R^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{SST / (n - 1)}, 0 \leq Adj-R^2 \leq 1 \quad (2.23)$$

3.4) Predicted R-squared ($Pred-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย คำนวณได้จากสมการที่ (2-24)

$$Pred-R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2.24)$$

3.5) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ คำนวณได้จากสมการที่ (2.25)

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (2.25)$$

2.6.2 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

เทคนิค RSM มีประโยชน์มากกว่าหากเปรียบเทียบกันระหว่างการหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม โดยข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่า เพราะ RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (Interactive Effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้ โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ จะพบว่า ข้อมูลของตัวแปรอิสระที่ได้กับผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการกำจัด CO_2 โดยการดูดซึมด้วยสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะก้นในคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง การเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดก๊าซ CO_2

Aroonwilas *et al.* (1999) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยการดูดซึมในหอดูดซึม 3 ขนาด ได้แก่ ระดับห้องทดลอง ระดับ Pilot และระดับอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ตัวกลางในการดูดซึมประเภท Sulzer EX, Gempak 4A และ Sulzer BX โดยใช้สารดูดซึมคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โมโนเอทานอลเอมีน และทูอะมิโนทูเมทิลโพรพานอล (2-amino-2-methylpropanol, AMP) ประสิทธิภาพในการกำจัดถูกอธิบายในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ความดันส่วนของก๊าซ CO_2 อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซึม ชนิดของสารดูดซึม และชนิดของตัวกลาง ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของก๊าซไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ความดันส่วนของก๊าซ CO_2 อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซึม ชนิดของสารดูดซึม และ

ชนิดของตัวกลาง จากการทดลองพบว่า ระบบ CO_2 -NaOH จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบ CO_2 -AMP แต่ระบบ CO_2 -NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรต่ำกว่าระบบ CO_2 -MEA เนื่องจาก NaOH มีค่าแรงดึงดูดที่ต่ำกว่า MEA ทำให้ในระบบ CO_2 -NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูง

Bonenfant *et al.* (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO_2 โดยใช้ชีตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF) และจากเตาป้อนน้ำเหล็ก (LF) ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยนำชีตะกรันผสมกับน้ำในอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ชีตะกรันขนาดประมาณ 38-106 ไมโครเมตร ปริมาณชีตะกรัน 20 ± 1 กรัม กับน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของ CO_2 ร้อยละ 15 โดยปริมาตร และ N_2 ร้อยละ 85 โดยปริมาตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า การแยก CO_2 โดยใช้สารละลาย LF มีค่า 24.7 กรัม CO_2 /100 กรัม slag และสามารถทำซ้ำได้ถึง 14 ครั้ง มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารละลาย EAF ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO_2 จากสารประกอบของ CaO และ MgO ที่อยู่ในชีตะกรันแบบ LF มีสูงกว่าชีตะกรันแบบ EAF แต่สามารถสรุปได้ว่าทั้งชีตะกรันแบบ LF และ EAF สามารถใช้แยก CO_2 ได้และจะได้ผลลัพธ์ที่สูงเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย

Chen *et al.* (2003) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้เครื่อง Spay Dryer ในระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารดูดซึมที่ผสมกับ Ca(OH)_2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารดูดซึม ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่ทางเข้า และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่ทางเข้าเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร สารดูดซึมที่ผสมระหว่างร้อยละ 10 ของ NaOH + ร้อยละ 5 ของ (Ca(OH)_2) โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซที่ค่า 2.82 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO_2 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 สูงสุดเท่ากับร้อยละ 48

Eloneva *et al.* (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำชีตะกรันจากโรงถลุงเหล็กมาทำการตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์ โดยนำชีตะกรันมาละลายด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0 0.1 0.5 2 4 6 และ 8 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เก็บตัวอย่างสารละลายหลังจากใส่ชีตะกรันที่เวลาต่างๆ แล้วนำมากรองด้วย Syringe

Membrane Filter (0.45 ไมโครเมตร) และนำไปวิเคราะห์หา Ca Fe Si Mg Mn Al และ V โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการป้อนก๊าซ CO₂ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 25 50 หรือ 100 โดยปริมาตร อัตราการไหล 0.5 1 หรือ 2 ลิตรต่อนาที และใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตร พบว่า ทันทีหลังจากเติมซีสเตอร์ลงในสารละลายกรดอะซิติกอุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสแล้วค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ ค่า pH ลดต่ำลง 1-2 ค่าแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ สำหรับผลจากการวิเคราะห์ด้วย ICP-AES พบว่า แคลเซียมสามารถละลายได้อย่างรวดเร็วภายใน 2-10 นาที ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพในการละลายของแคลเซียมจะละลายได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2-8 โมลาร์ ซึ่งละลายได้ถึงร้อยละ 86-90 สำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการป้อนก๊าซ CO₂ ค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลงทันทีจากค่า pH 11 เป็น pH 6 และหลังจากที่ป้อนก๊าซ CO₂ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ความร้อนแก่สารละลาย 58 องศาเซลเซียส สีของสารละลายเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสีขาวขุ่น แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและพบว่ามีตะกอน 1 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3 ของการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นจึงทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายของกรดอะซิติกกับซีสเตอร์ พบว่ามีค่า pH เพิ่มขึ้น 1-3 จากเดิมมีค่า pH 10 แต่เมื่อป้อนก๊าซ CO₂ พบว่า pH ลดลงอย่างช้าๆ และจะคงที่ที่เวลา 24 และ 62 นาที ขึ้นกับปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมคือ 15 และ 61 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ทำให้ค่า pH คงที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งพบว่าความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ไม่ส่งผลต่อผลได้ของการตกตะกอน แต่อัตราการไหลของก๊าซ CO₂ มีผลต่อเวลาที่ทำให้ pH มีค่าคงที่ ซึ่งผลของการตกตะกอนพบว่า เมื่อใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 46 กรัม_{NaOH}/ลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มจะไม่มีผลต่อการตกตะกอน และผลของอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณการตกตะกอน โดยค่าแคลเซียมจากสารละลายสามารถเกิดเป็นตะกอนได้สูงสุดร้อยละ 86 และตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99

Georgiou *et al.* (2007) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO₂ จากน้ำเสียของกระบวนการย้อมผ้า โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบ Aromatic Amines ในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร และใช้ตัวกลางบรรจุชนิด Glass Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร) ในการทดลองนี้ก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซจำลองจากก๊าซ CO₂ ที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย้อมผ้า ซึ่งทำการผสมระหว่าง CO₂ ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ N₂ ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ที่อัตราการไหล

ก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที่ จากการทดลองพบว่า สารละลายที่เหมาะสมที่ใช้เป็นสารดูดซึม คือ สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ พบว่าสามารถดูดซึมก๊าซ CO_2 ได้ถึง 7 กรัม CO_2 / กรัม NaOH

Hisyamudin *et al.* (2009) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO_2 โดยใช้ขี้ตะกรันที่ได้จาก โรงถลุงเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า ทำการทดลองใน Vibrating Ball Mill ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการหมุนเครื่อง Vibrating ball mill 1200 รอบต่อนาที โดยปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้คือ ความดันเริ่มต้น 1 และ 2 atm ปริมาณน้ำที่ป้อนเข้า 0 100 200 300 400 มิลลิลิตร ปริมาณขี้ตะกรัน 0 100 200 300 และ 400 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 0 (ไม่มีลูกบอล) 2 10 และ 20 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ มีการเติมน้ำเพื่อป้องกันการจับกันเป็นก้อนของขี้ตะกรันตอนทำการบด และปฏิกิริยาที่เกิดในการทดลองนี้ มีความสนใจก๊าซ CO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับ CaO (เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่อยู่ในขี้ตะกรัน) เกิดเป็น CaCO_3 ผลจากการดูดซึมก๊าซ CO_2 ด้วยขี้ตะกรันแบบเปียก พบว่าค่าการดูดซึมก๊าซ CO_2 จะสูงขึ้นที่ความดันเริ่มต้น ปริมาณน้ำ ปริมาณขี้ตะกรัน และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด เพิ่มขึ้น แต่ขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบดจะมีผลต่อการดูดซึมก๊าซ CO_2 ในตอนเริ่มต้นเท่านั้น และเมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 2 atm ปริมาณน้ำ 5 และ 400 กรัม ปริมาณขี้ตะกรัน 200 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 20 มิลลิเมตร จะทำให้ปริมาณการดูดซึมก๊าซ CO_2 สูงสุดเท่ากับ 74.8 กรัม CO_2

Huijgen *et al.* (2006) ศึกษากระบวนการเกิดคาร์บอนเนชันของสารละลาย แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) กับ CO_2 โดยทำการทดลองในหม้ออัดความดัน ใช้ใบพัดกวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 32×10^{-3} เมตร โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ที่ 25-225 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ CO_2 1-40 บาร์ ขนาดอนุภาค 38-700 ไมโครเมตร เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5-60 นาที อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 2-10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม และความเร็วในการกวนผสม 100-2,000 รอบต่อนาที โดยปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนชันจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรก เป็นการชะละลาย Ca^{2+} ออกจากแคลเซียมซิลิเกต ขั้นตอนที่ 2 การเกิดตะกอน CaCO_3 และทั้ง 2 ขั้นตอนนี้เกิดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ต่ำจะเหมาะกับขั้นตอนแรก และอุณหภูมิที่สูงกว่าจะเหมาะกับขั้นตอนที่ 2 จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ CO_2 20 บาร์ ขนาดอนุภาค < 38 ไมโครเมตร อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน สูงสุดถึงร้อยละ 70

Lekakh *et al.* (2008) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้ซีตกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็ก ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 2 ถัง ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยที่ถังปฏิกรณ์ 1 ประกอบด้วยซีตกรันขนาด < 3.2 มิลลิเมตร ปริมาณ 200 กรัม และน้ำ 20 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีขนาด 2 ลิตร ซึ่งประกอบด้วยสารละลายที่ได้จากถังที่ 1 กับฟองของก๊าซ CO₂ ที่อัตรา 1.5 กรัมต่อนาที ซึ่งเป็นการทดลองแบบกะกับแบบต่อเนื่อง โดยการศึกษาจะใช้โปรแกรม METSIM Process Model ร่วมกับการทดลองจริง เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ผลที่ได้พบว่า น้ำที่ใช้ครั้งแรกจะมีประสิทธิภาพการสกัดดีที่สุดได้ถึงที่ 1 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการบอเนชันในถังที่ 2 ดีที่สุดเช่นกัน แต่กระบวนการแบบต่อเนื่องในถังที่ 2 ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมาก จึงมีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่และมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ดังนี้คือ ขนาดอนุภาคของซีตกรัน และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 (กรณีที่ใช้อัตราการป้อนเข้าคงที่) จากการทดลองพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของซีตกรันเล็กลง และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 นานขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าสามารถกำจัดก๊าซ CO₂ ได้มากขึ้น และพบว่าขนาดอนุภาคของซีตกรัน 20 ไมโครเมตร เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้

Lin and Shyu (1999) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายเอมีน 2 ชนิด ได้แก่ Monoethanolamine (MEA) และ N-methyldiethanolamine (MDEA) เป็นสารดูดซึมในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุทำจากแก้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร ใช้ตัวกลางชนิด Ceramic Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร และสูง 70 เซนติเมตร) จากการทดลองพบว่า สารละลายเอมีนทั้งสองชนิดที่ใช้เป็นสารดูดซึมก๊าซ CO₂ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์สารละลายทั้งสองจากปฏิกิริยาพบว่า สารละลาย MDEA สามารถนำมาปรับสภาพสารละลายง่ายกว่าสารละลาย MEA

Yang *et al.* (2008) ศึกษาทบทวนกระบวนการแยกและการดักจับก๊าซ CO₂ ด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทบทวนกระบวนการดักจับก๊าซ CO₂ ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยแบ่งกระบวนการแยกได้คือ กระบวนการแยกก๊าซ CO₂ ออกจากการเผาไหม้โดยใช้ถ่านหิน กระบวนการแยกก๊าซ CO₂ ออกจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน การแยกก๊าซ CO₂ ออกจากการเผาไหม้ออกไซด์ และการใช้สารเคมีช่วย เช่น Fe₂O₃, NiO และ CaO เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นกระบวนการดักจับก๊าซ CO₂ โดยธรรมชาติ เช่น การปลูกต้นไม้เพื่อดักจับก๊าซ CO₂ กระบวนการ

สังเคราะห์ด้วยแสง การละลายก๊าซ CO_2 ในน้ำทะเลเพื่อให้แพลงตอนพืชในน้ำใช้งาน และการเกิดน้ำแร่ที่มีสารประกอบคาร์บอเนต ส่วนสุดท้ายเป็นเทคนิคในการดักจับก๊าซ CO_2 ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้สารละลายในการดูดซึม เช่น การใช้สารประกอบเอมีน แอมโมเนีย อัลคาไลน์ เป็นต้น และการใช้เยื่อแผ่นบางในการดักจับก๊าซ CO_2 โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ได้ทำการสรุปและเสนอแนะเทคนิคต่างๆ ที่เป็นตัวเลือกในการบำบัดก๊าซ CO_2

Yong *et al.* (2002) ทำการศึกษาทบทวนกระบวนการดูดซับก๊าซ CO_2 ด้วยวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิสูง ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลของวัสดุดูดซับ การดูดซับด้วย Carbon-based การดูดซับด้วยวัสดุจำพวกสารประกอบออกไซด์ โดยปกติแล้วนิยมใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซีโอไลต์ (Zeolites) และสารประกอบ Hydrotalcite-like (HTLCs) ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO_2 ที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ และผลของพื้นที่ผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO_2 มีผลน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบชนิดออกไซด์ของโลหะ (CaO และ MgO) มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง

ธีรภัทร์ (2553) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO_2 ในลมร้อนจากปล่องควันของเตาอบยางก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของเตาอบยาง โดยดูดซับด้วยสารดูดซึม 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) ในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุ ได้ทำการศึกษาดัวแปรที่เกี่ยวข้อง 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของสารดูดซึม (C) อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) ผลจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO_2 ในหอดูดซึมแบบบรรจุ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึม (L) 4.5 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) คือ 30 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารดูดซึม (NaOH และ MEA) 0.7 โมลาร์ โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ CO_2 จากสารละลาย NaOH เท่ากับร้อยละ 58.98 และสารละลาย MEA ร้อยละ 73.05 ตามลำดับ

มฤดี (2542) ทำการวิเคราะห์หาสารดูดซึมที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO_2 ในหอดูดซึมแบบถาด โดยศึกษาดัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดสารดูดซึม โดยพิจารณาสารละลาย 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายโมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine, MEA) ไดเอทาโนลา

มีน (Diethanolamine, DEA) ไดโกลโคลามีน (Diglycolamine, DGA) ไดไอโซโพรพานอลามีน (Diisopropanolamine, DIPA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyldiethanolamine, MDEA) ความเข้มข้นของสารละลาย และอัตราส่วนโมลของก๊าซ CO_2 ต่อโมลของสารละลายเอมีน ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกระบวนการกำจัดก๊าซ CO_2 คือ สารละลายเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) เนื่องจากเป็นสารละลายที่ใช้พลังงานในกระบวนการน้อยที่สุด ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 และอัตราส่วนโมลของก๊าซ CO_2 ต่อโมลสารละลายเอมีนเท่ากับ 0.3

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค CCD ของ RSM

Garcia *et al.* (2011) ศึกษาการดักจับก๊าซ CO_2 ด้วยถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO_2 (Y_1) และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 (Y_2) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันส่วนก๊าซ CO_2 (1-3 บาร์) และอุณหภูมิ (25-65 องศาเซลเซียส) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และยังพบว่าความดันส่วนก๊าซ CO_2 เป็นปัจจัยมีผลมากที่สุด เมื่อค่าความดันส่วนก๊าซ CO_2 มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 ลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$Y_1 = 3.1210 - 0.0779T + 0.8067P_{\text{CO}_2} + 0.0006T^2$$

$$\text{และ } Y_2 = 8.0421 - 0.2394T + 2.4067P_{\text{CO}_2} + 0.0020T^2$$

ซึ่งจะได้สภาวะเหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดันส่วนก๊าซ CO_2 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO_2 เป็น 10.50 นาที และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 เป็น 3.96 โมล/กิโลกรัม Adsorbent

Seyeded *et al.* (2007) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์ที่ใช้เป็นสารอาหารให้กับ *Bacillus Clausii* และสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการผลิตเอนไซม์ โดยปัจจัยที่

ศึกษามี 3 ปัจจัยได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส ความเข้มข้นของยีสต์สกัด และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดลองเบื้องต้น โดยใช้แผนการทดลองออกแบบด้วยวิธี CCD พื้นผิวตอบสนองทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$Y = 928.37 + 132.33x_1 - 348.16x_2 - 104.28x_3 - 110.12x_1^2 - 189.29x_3^2$$

จะได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตเอโนไซม์คือ ความเข้มข้นซูโครส คือ 11 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของยีสต์สกัด 5 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต 5.2 กรัมต่อลิตร

Tan *et al.* (2007) ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated Carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH: char ต่อการดูดซับ Methyl Blue แต่ผู้ทำการวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated Carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH: char เท่ากับ 3.9

2.8 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ก๊าซเสียจากปล่องควันที่ได้โรงงานอุตสาหกรรมมีค่าความเข้มข้นก๊าซ CO₂ เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และจากการศึกษางานวิจัยพบว่าสารประกอบ CaO สามารถนำไปกำจัดก๊าซ CO₂ ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตะกั่วซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้มาทดแทนสารเคมีในการกำจัดก๊าซ CO₂ ซึ่งเลือกใช้หูดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุมาทำการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตกรันเพื่อนำสารละลายที่ได้มาใช้เป็นสารดูดซึมก๊าซ CO₂ โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอะซิติก อัตราส่วนเชิงมวลของเหลวต่อของแข็ง และอุณหภูมิ พร้อมทั้งทำการออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการชะละลายและหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองโดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เพื่อนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการชะละลายนี้ไปใช้ผลิตสารดูดซึมสำหรับกระบวนการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่อไป สำหรับการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ร้อยละ

15 โดยปริมาตร ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายในคอลัมน์บรรจุ มีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของสารดูดซึม อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของสารดูดซึม และทำการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM เช่นเดียวกัน แล้วนำสถานะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองการกำจัดก๊าซ CO_2 มาทำการเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการนำวิธีการบำบัดก๊าซ CO_2 โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายที่จะกรันไปใช้ประโยชน์ต่อไป