

การรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน

1.1 คำนิยามเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดเป็นเทคโนโลยีทางในการลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ซึ่งในหลายๆ แห่ง ต่างให้คำนิยามหรือคำจำกัดความแตกต่างกันไป โดยจากการสืบค้นที่ผ่านมาได้มีการให้คำนิยามดังนี้

“เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือ หมวดยุทธศาสตร์หรือชุดของเทคโนโลยีล่าสุดที่สามารถใช้ร่วมกับถ่านหินในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและข้อปฏิบัติตามกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมของพื้นที่นั้นๆ” [1]

“เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือ กระบวนการใช้ถ่านหินขั้นสูงรุ่นใหม่ที่ยืดหยุ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการยอมรับด้านสิ่งแวดล้อมของการสกัด การเตรียมพร้อม และการใช้ถ่านหิน เทคโนโลยีเหล่านี้สามารถลดมลพิษ ลดของเสียจากการใช้ประโยชน์ของถ่านหิน และเพิ่มปริมาณพลังงานของถ่านหินได้” [2]

“เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือ เทคโนโลยีใดๆ ที่รวมเทคโนโลยีที่ใช้ในขั้นตอนก่อนการเผาไหม้ ระยะการเผาไหม้ หรือหลังการเผาไหม้ ของโรงงานแห่งใหม่หรือโรงงานที่มีอยู่ ที่สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของถ่านหินในการผลิตไฟฟ้า ผลิตไอน้ำ หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม” [3]

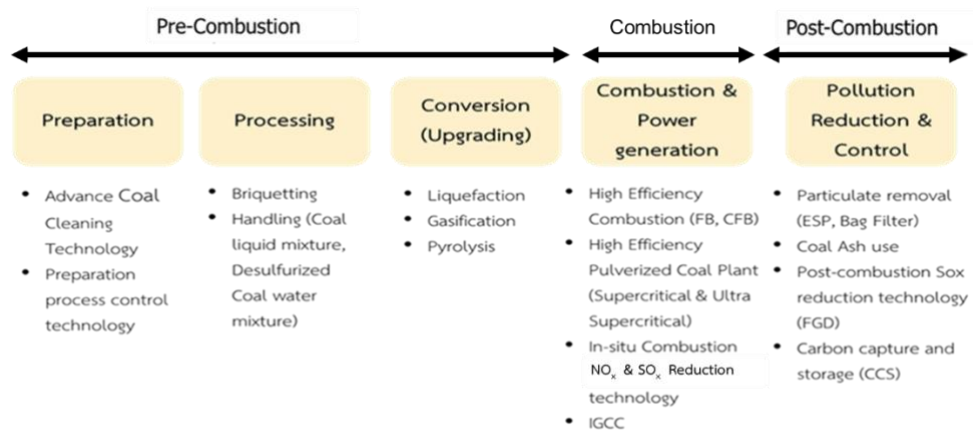
“เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเหมือง การจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ และการใช้ประโยชน์จากถ่านหิน โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเทคโนโลยีเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการลดหรือการกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย” [4]

ดังนั้นทางโครงการฯ ได้ระบุคำจำกัดความที่เหมาะสมกับประเทศไทยดังนี้

“เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด คือ เทคโนโลยีใดๆ ที่ใช้ในขั้นตอนก่อนการเผาไหม้ ระยะการเผาไหม้ หรือหลังการเผาไหม้ ที่สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือออกไซด์ของไนโตรเจนหรือมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ของโรงงานแห่งใหม่หรือโรงงานที่มีอยู่ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของถ่านหินในการผลิตไฟฟ้า ผลิตไอน้ำ หรือ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม”

1.2 ข้อมูลเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

จากการสืบค้นมานั้นพบว่า เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดจะครอบคลุมทุกกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของถ่านหินทั้งก่อนการเผาไหม้ ระยะการเผาไหม้ และหลังการเผาไหม้ ตามรูปที่ 2-1 ดังนั้นจึงได้ดำเนินการรวบรวมเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 1 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตในขอบเขตโรงงาน/โรงไฟฟ้า [5]

1.2.1 กระบวนการก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion)

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ส่วนใหญ่หมายถึงการทำความสะอาดถ่านหินหรือการใช้ประโยชน์ก่อนการเผาไหม้ เพื่อจัดสิ่งสกปรกและปรับปรุงปริมาณความร้อนของถ่านหินซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยจะสามารถแบ่งประเภทเทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่

1. การเตรียมความพร้อมเชื้อเพลิง (Preparation)

เป็นขั้นตอนในการกำจัดแร่ธาตุอาทิ สารประกอบกำมะถันอนินทรีย์และสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดมากับถ่านหิน จุดประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพของถ่านหินและความร้อนของถ่านหินเพิ่มมากขึ้นโดยการลดแร่ธาตุต่างๆ สารประกอบกำมะถัน โดยการทำทำความสะอาดถ่านหินแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

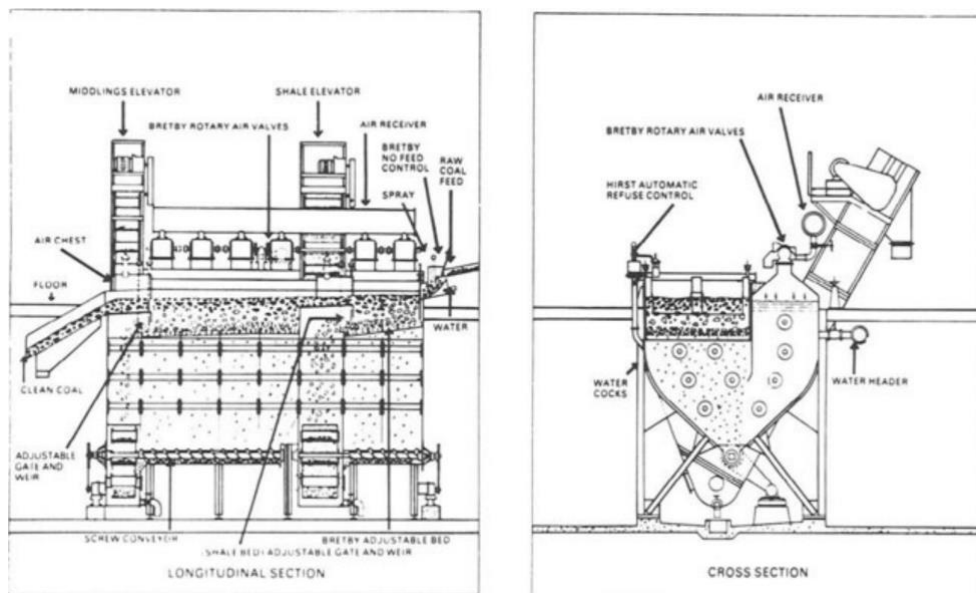
1) การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical cleaning)

กระบวนการทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพส่วนใหญ่จะใช้วิธีบดขนาดถ่านหินให้เล็กลงและทำการล้างถ่านหินก่อนที่จะจัดสิ่งสกปรก สิ่งสกปรกจะถูกแยกออกโดยความหนาแน่นหรือการแปรผันทางกายภาพ โดยกระบวนการแบบแยกทั่วไปนี้มักจะใช้น้ำเป็นหลักซึ่งจะต้องมีการกำจัดน้ำในภายหลัง การกำจัดทางกายภาพอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกแยกออกจากกันโดยวิธีการใช้แรงโน้มถ่วง ซึ่งทำให้อนุภาคขนาดเล็กกว่ายังคงไม่ได้ถูกแยกออกจากกัน โดยวิธีการทั่วไปไม่สามารถใช้ได้กับถ่านหินที่มีขนาดเล็กมาก ประสิทธิภาพการทำความสะอาดถ่านหินทั่วไปนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของแร่และขนาดของ

อนุภาคหินซึ่งจะสามารถกำจัดได้เพียงสารประกอบกำมะถันอนินทรีย์เท่านั้น และถ้าอนุภาคของสารประกอบกำมะถันอนินทรีย์มีขนาดใหญ่มากเท่าใดจะทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดลดลงเท่านั้น การทำความสะอาดทางกายภาพสามารถกำจัดกำมะถันอนินทรีย์ (กำมะถันอนินทรีย์ออกจากถ่านหินได้ 30-50%) (ซึ่งไม่ได้กำจัดถ่านหินแบบอินทรีย์) หรือ 10-30% ของปริมาณกำมะถันทั้งหมด วิธีการทำความสะอาดทางกายภาพขั้นสูง ได้แก่ การลอยตัว การรวมตัวและการตกตะกอน และการทำความสะอาดแห้ง ซึ่งปัจจุบันเทคนิคเหล่านี้สามารถกำจัดกำมะถันอนินทรีย์ได้ 80-90% โดยเทคโนโลยีการทำความสะอาดทางกายภาพในปัจจุบันมีเทคโนโลยีดังนี้ [6]

(1) Jigs

เป็นกระบวนการแยกขนาดของถ่านหินกับแร่ธาตุอื่นออกจากกันโดยใช้การขยายตัวและหดตัวของตะกอนน้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกชั้นของถ่านหินและแร่ธาตุออกจากกันเรียงลำดับตามความหนาแน่นจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ตามรูปที่ 2



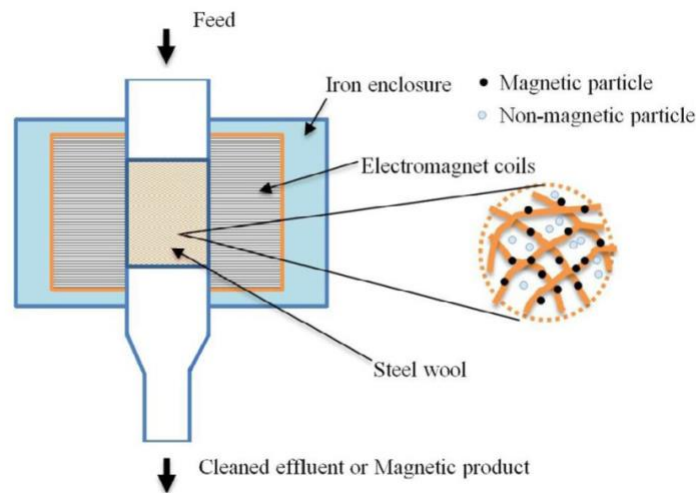
รูปที่ 0 การแยกถ่านหินออกจากแร่ธาตุต่างๆ ด้วยเทคโนโลยี Jigs [7]

โดยการทำงานทั่วไปจะประกอบด้วยท่อตัว U เรียงตัวกันโดยด้านหนึ่งของท่อตัว U จะมีแผ่นแบบเจาะรู และอีกด้านหนึ่งมีวาล์วที่ปิดสนิทซึ่งยอมให้อากาศแรงดันต่ำประมาณ 2-4 PSI ถูกป้อนเข้าและระบายออกที่ 40-60 ครั้งต่อนาที โดยอากาศจะทำให้ น้ำไหลขึ้นและลงเป็นจังหวะผ่านแผ่นที่เจาะรูอีกด้านหนึ่งโดยบนรูดังกล่าวจะมีถ่านหินและแร่ธาตุต่างๆ ปะปนด้วยกัน ถ่านหินและเศษแร่ธาตุต่างๆ จะถูกแบ่งแยกออกจากกันโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางที่ไหลไปจากห้องหนึ่งสู่อีกห้องหนึ่งจนกระทั่งการแยกเสร็จสิ้น โดยแบ่งแยกตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ นั่นคือถ่านหินที่สะอาดจะอยู่ด้านบนและแร่ธาตุต่างๆ

จะอยู่ด้านล่าง เมื่อเสร็จสิ้นถ่านหินที่สะอาดจะไหลออกด้วยน้ำปริมาณมากและเศษแร่ธาตุต่างๆ จะจมตัวอยู่ด้านล่าง และเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำต่อไป โดยมีประสิทธิภาพในการแยกถ่านหินและแร่ธาตุต่างๆ ประมาณ 95-99% [7]

(2) Magnetic Separation

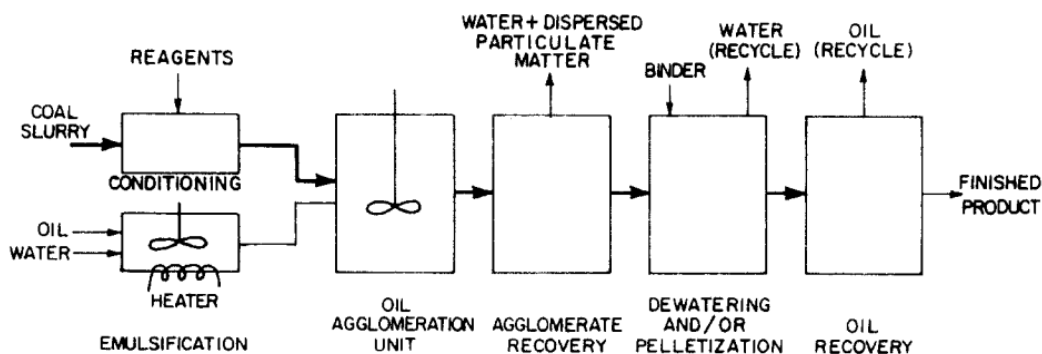
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแยกถ่านหินและกำมะถันอนินทรีย์ออกจากกันด้วยความแตกต่างของความไวคลื่นแม่เหล็ก โดยสารอินทรีย์ในถ่านหินเป็นแม่เหล็กไดอะแมกเนติก ในขณะที่แร่ธาตุอื่นจะเป็นแม่เหล็กพาราแมกเนติก ซึ่งเทคโนโลยีปัจจุบันมีชื่อเรียกว่า High-gradient magnetic separators (HGMS) โดยในกระบวนการจะเพิ่มระดับการปล่อยคลื่นสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นเพื่อดักจับกำมะถันอนินทรีย์ที่เป็นคลื่นแม่เหล็กพาราแมกเนติกออกจากถ่านหิน โดยถ่านหินที่ออกมาจากกระบวนการดังกล่าวจะแทบไม่มีกำมะถันอนินทรีย์ออกมา ซึ่งทำให้ถ่านหินที่ออกมาจากกระบวนการดังกล่าวนำออกมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามรูปที่ 3 โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า 80% ในการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน [8]



รูปที่ 2 กระบวนการ High-Gradient Magnetic Separators (HGMS) [9]

(3) Oil Agglomeration

ถ่านหินที่ทางโรงงานหลายแห่งได้ถูกรับมานอกจากจะได้รับมาในลักษณะก้อนแล้ว จะมีผงถ่านหินปะปนเข้ามา ซึ่งผงถ่านหินดังกล่าวมีขนาดเล็กและไม่สามารถนำเข้าหั่วเผาที่ได้รับการออกแบบไว้ได้ วิธีนี้จะเป็นการลดการสูญเสียผงถ่านหินและนำกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการนี้จะเป็นการรวมถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากๆ เข้ารวมกันโดยใช้หลักการน้ำมันเป็นสื่อ โดยการเติมน้ำมันเล็กน้อยลงถ่านหิน ซึ่งถ่านหินจะถูกเคลือบกับน้ำมันและรวมกัน ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของถ่านหินและสามารถถูกนำไปใช้งานได้ต่อไปตามรูปที่ 4 [18]



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการ Oil Agglomeration [10]

กระบวนการนี้จะเริ่มต้นจากนำน้ำมันมาใส่ในถ่านหินที่ถูกรับมาแล้วนำมาใส่น้ำโดยจะต้องมีอุปกรณ์ในการกวนเพื่อให้แยกสารเกาะติดออกจากแขวนลอยและหลังจากนั้นค่อยเข้าสู่กระบวนการกรองต่อไป โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการนี้ได้แก่ ปริมาณน้ำมัน ความเข้มข้นของการกวน (ระยะเวลากวนและความเร็วในการกวน) และลักษณะของน้ำมัน โดยปริมาณน้ำมันที่ต้องการจะอยู่ที่ประมาณ 5-10% ของน้ำหนักถ่านหินที่รับมา ในขั้นตอนการกวน การกวนขั้นต้นจะทำหน้าที่ในการกระจายตัวของน้ำมันเพื่อเชื่อมสัมผัสระหว่างน้ำมันและถ่านหินซึ่งในการกวนขั้นต้นจะใช้ความเร็วที่สูงและขั้นตอนกวนที่สองจะใช้ความเร็วที่ลดลงและมีการเติมน้ำมันเพิ่มเข้าไป เพื่อให้เกิดการจับตัวมากขึ้นของถ่านหิน ซึ่งจะสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการเผาได้ต่อไป [18]

(4) Otisca T-Process

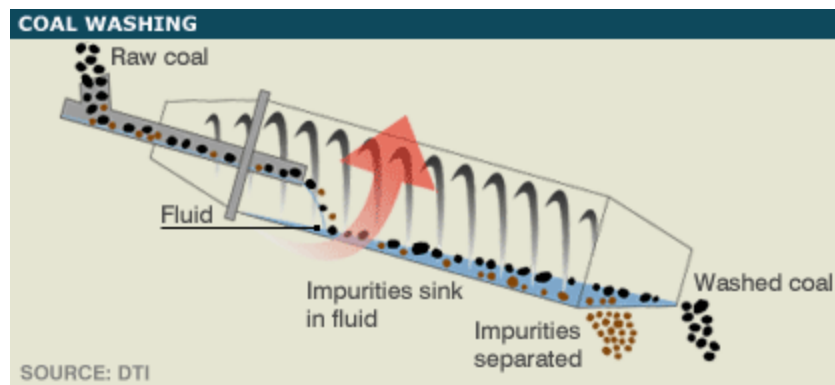
กระบวนการนี้จะเหมือนกับกระบวนการ Oil Agglomeration แต่ใช้กับถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่ามาก โดยถ่านหินที่ละเอียดมากขนาดประมาณ 15 ไมโครเมตร แล้วนำน้ำมันหรือสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ อาทิ ไตรคลอโรไตรฟลูอออีเทน (ฟร็อน 113) ผสมและกวนเข้าด้วยกันจะทำให้ถ่านหินมารวมตัวกันและสามารถนำไปใช้ต่อไปได้ โดยผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นคือ แร่ธาตุที่บดละเอียดมากซึ่งจะไม่รวมกลุ่มเข้ากับถ่านหิน ทำให้ถ่านหินที่จะนำเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ปราศจากแร่ธาตุอื่นๆ [8]

(5) Flotation

เป็นกระบวนการแยกถ่านหินออกจากแร่ธาตุต่างๆ โดยการนำถ่านหินรวมเข้ากับในน้ำ จากนั้นทำการเติมอากาศด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งถ่านหินจะทำการเกาะติดฟองอากาศเหล่านี้และลอยตัวบนพื้นผิวของน้ำ ไหลออกจากทางส่วนบนของกระบวนการดังกล่าว โดยที่แร่ธาตุต่างๆ จะทำการจมตัวลงในน้ำและถูกกำจัดทิ้งออกไป โดยนอกจากการเติมอากาศลงในน้ำแล้วยังต้องมีสารละลายเพื่อทำให้เกิดฟอง ได้แก่ เมทิลไฮโดรเจนซัลไฟด์ (MIBC) หรือน้ำมันสน เพื่อสร้างฟอง

ที่เสถียรและบางครั้งยังเติมสารไม่มีขั้วลงไปเพื่อช่วยในการเกาะตัวของถ่านหิน อาทิ น้ำมันเตาและน้ำมันก๊าด ตามรูปที่ 5 [11]

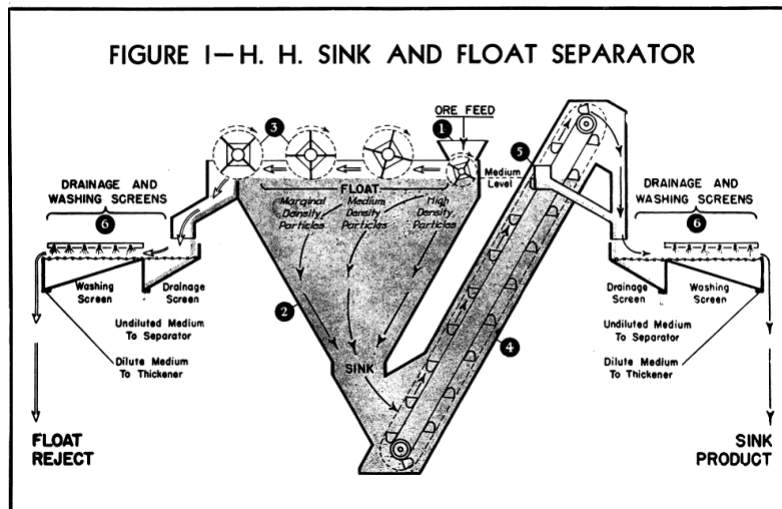
ในอดีตนั้นเครื่องจักรสำหรับการลอยตัวจะเป็นรูปแบบการไหลปกติ จนเมื่อผ่านไปเริ่มมีการปรับปรุงเครื่องจักรของกระบวนการไหล ให้เป็นรูปแบบลอยผ่านปล่อง (Column Flotation) ที่พัฒนาระบบการกวนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกถ่านหินและแร่ธาตุออกจากกันได้ดียิ่งขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแร่ธาตุต่างๆ ที่ประมาณ 85%



รูปที่ 4 การทำความสะอาดถ่านหินรูปแบบลอยผ่านปล่อง (Column Flotation) [12]

(6) Float/Sink Separation

กระบวนการทำความสะอาดถ่านหินจะใช้แรงโน้มถ่วงแยกระหว่างถ่านหินและสสารอื่นๆ ออกจากกัน ถ่านหินที่ถูกนำมาก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้มักจะประกอบด้วยถ่านหิน และกำมะถัน อนินทรีย์ที่ปะปนในชั้นหินดินดาน ซึ่งการแยกถ่านหินและแร่ธาตุอื่นๆ ออกจากกันจะใช้ความหนาแน่นเป็นตัวบ่งชี้สำหรับการแยกออกจากกัน ถ่านหินที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะมีความหนาแน่นประมาณ 1.2-1.6 โดยความหนาแน่นของแร่ธาตุอื่นของชั้นหินดินดานจะอยู่ระหว่าง 2.0-2.6 หิน ดินเหนียวจะมีความหนาแน่นประมาณ 2.6 และความหนาแน่นของไพไรต์จะอยู่ที่ประมาณ 5.0 ซึ่งความแตกต่างของความหนาแน่นต่างๆ เหล่านี้ ทำให้สามารถแยกออกจากกันได้อย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของแร่ธาตุอื่นๆ ที่ไม่ใช่ถ่านหินอาจปนเปื้อนได้ ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ โดยสามารถแสดงได้จากการเจือปนของอนินทรีย์ต่างๆ ของปริมาณซีเถ้าหนักและซีเถ้าลอยตามรูปที่ 6 โดยมีประสิทธิภาพในการแยกถ่านหินและแร่ธาตุที่ประมาณ 90% [8]



รูปที่ 6 กระบวนการ Float/Sink Separation [13]

เนื่องจากความหนาแน่นของถ่านหินต่ำกว่าแร่ธาตุอื่นๆ เป็นอย่างมาก แร่ธาตุทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยใช้ของเหลวที่มีความหนาแน่นปานกลางในอ่างน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ถ่านหินลอยเพราะมีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวกลาง ในขณะที่แร่ธาตุอื่นๆ จะจมตัวลง ซึ่งของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางในการแยกออกจากกันมีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้กันคือ การใช้แร่แมกนีไทต์ละลายน้ำในการปรับความหนาแน่นให้เหมาะสมกับความต้องการของระบบการแยกถ่านหิน นอกจากการใช้แร่แมกนีไทต์ละลายน้ำเป็นตัวกลางแล้ว ยังมีการนิยมใช้ไตรคลอโรฟลูออโรมีเทน (CCl_3F) เป็นตัวกลางด้วย ซึ่งถ่านหินที่ได้รับการแยกออกจากแร่ธาตุอื่นๆ จะเข้าสู่กระบวนการแยกความชื้นบนพื้นผิวของถ่านหินโดยใช้ของเหลวที่ไม่มีขั้ว อาทิ เฮกเซน หรือ เฮปเทน เพื่อทำให้ความชื้นจากกระบวนการดังกล่าวลดลงมากที่สุด [8]

(7) Hydraulic and Pneumatic Methods

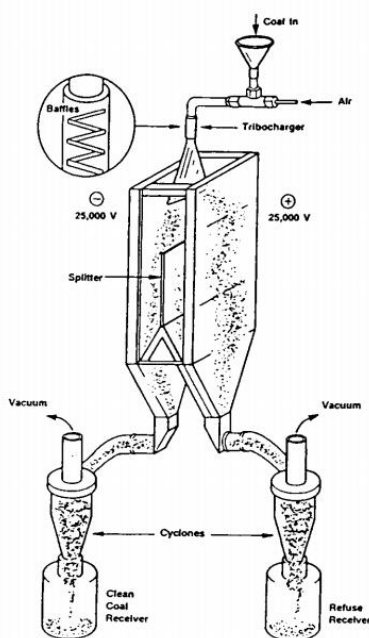
กระบวนการนี้จะเป็นการใช้รูปแบบไฮดรอลิกและระบบลมเพื่อช่วยแยกถ่านหินและแร่ธาตุอื่นๆ ออกจากกัน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวที่นิยมใช้กันนั้นคือ ไซโคลน (Cyclone) หรือ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการนิยมใช้แพร่หลายสุดทางอุตสาหกรรม โดยวิธีการคือจะพ่นถ่านหินเข้าสู่ไซโคลนจากนั้นจะใช้ลมเป่าเพื่อสร้างแรงเหวี่ยงในกรวยไซโคลนส่งผลให้ตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่ธาตุต่างๆ จมลงสู่ด้านล่างสุดของกรวยไซโคลน การแยกถ่านหินให้สะอาดนั้นจะต้องทำในภาวะค่อนข้างแห้ง (ความชื้นประมาณ 4%) ในช่วงขนาด 0.5-19 ไมโครเมตรโดยถ่านหินจะแยกตัวออกจากแร่ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.75-1.8 ตามรูปที่ 7 แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบและขนาดของถ่านหินที่ได้รับมาด้วย โดยมีประสิทธิภาพในการแยกแร่ธาตุที่ประมาณ 70-90% [11]



รูปที่ 5 การแยกถ่านหินให้สะอาดด้วยอุปกรณ์ Hydrocyclone [14]

(8) Electrostatic Separation

กระบวนการนี้เป็นการใช้ไฟฟ้าสถิตแยกอนุภาคระหว่างถ่านหินและแร่ธาตุอื่นๆ ออกจากกัน การแยกตัวออกจากกันทำได้เมื่ออนุภาคที่มีประจุอยู่ภายใต้แรงเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูง และทำให้อนุภาคปล่อยประจุแบบโคโรนา (Corona Discharge) การแยกถ่านหินและแร่ธาตุอื่นๆ อาทิ กำมะถันอนินทรีย์ ตามรูปที่ 8 โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดกำมะถันอนินทรีย์ได้โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 80-90% [11]



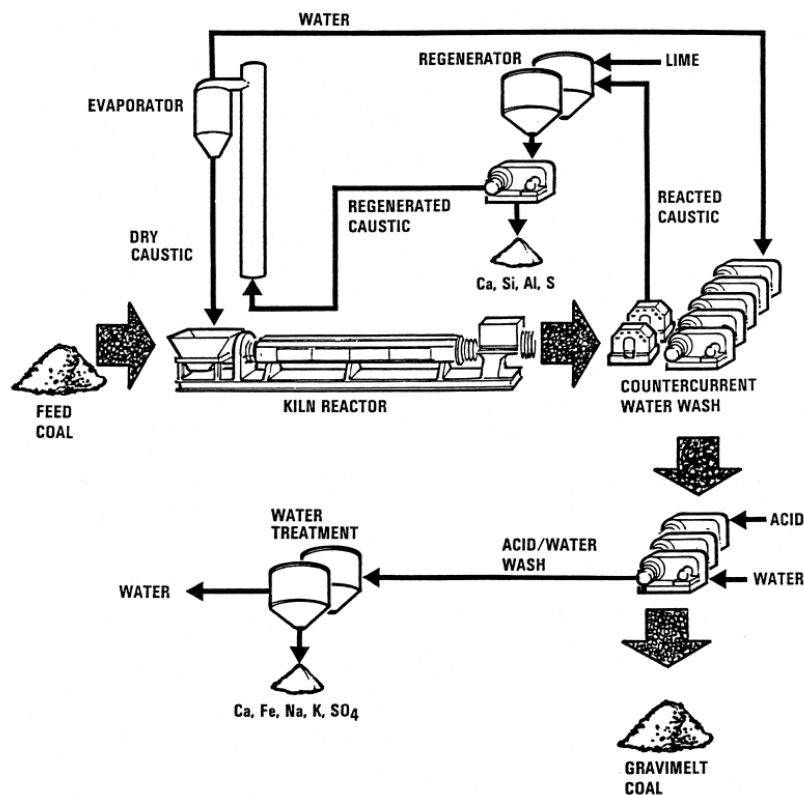
รูปที่ 8 กระบวนการของ Electrostatic Separation ในการแยกถ่านหินสะอาด [15]

2) การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical cleaning)

เป็นการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับผงถ่านหิน ซึ่งสารเคมีดังกล่าวมีคุณสมบัติในการกำจัดพวกสิ่งเจือปน ต่างๆ ที่ไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ ในการทำปฏิกิริยากับผงถ่านหินเพื่อกำจัดกำมะถันและเถ้า เทคโนโลยีกลุ่มนี้ได้แก่

Molten - Caustic Leaching

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการกำจัดแร่ธาตุจำพวก กำมะถัน อินทรีย์ กำมะถันอนินทรีย์ และกลุ่มแร่ธาตุต่างๆ ออกจากถ่านหิน โดยกระบวนการนี้จะเริ่มจากนำถ่านหินที่ใช้เข้าผสมกับส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เตาเผาแบบหมุน โดยที่ถ่านหินและส่วนผสมดังกล่าวจะได้รับความร้อนจนถึงปฏิกิริยาที่ 350 °C ถึง 400 °C โซดาไฟได้หลอมเหลวและทำการดูดซับกำมะถันและแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดกำมะถันเกินกว่า 90% ส่วนผสมที่ออกจากเตาปฏิกรณ์นั้นจะออกมาในรูปของเม็ดและล้างด้วยน้ำ (อัตราน้ำต่อถ่านหิน คือ 4 ต่อ 1) และถูกนำมาแยกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง ส่วนผสมที่ได้จะเป็นชั้นของของเหลวโซดาไฟและถ่านหิน จากนั้นเข้าสู่กระบวนการกรอง 2 รอบ เพื่อให้ถ่านหินเกิดการตกค้างของโซดาไฟเหลือเพียง 1-2% โดยน้ำหนัก โดยตัวกรองทั้งหมดนั้นประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ ที่ปะปนอยู่ในถ่านหิน ซึ่งสามารถถูกล้างย้อนกลับด้วยน้ำและนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง และถ่านหินที่ได้รับจะสามารถใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการดำเนินงานตามรูปที่ 9 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันที่ประมาณ 90% [16]



รูปที่ 6 กระบวนการ Molten - Caustic Leaching [8]

3) การทำความสะอาดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological cleaning)

การกำจัดกำมะถันโดยวิธีทางชีวภาพนั้นจะใช้แบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปกำมะถันที่ปะปนมากับถ่านหินให้อยู่ในสภาพที่ไม่ก่อมลพิษมากที่สุด โดยการกำจัดกำมะถันออกจากถ่านหินจะมุ่งเน้นไปที่แร่ธาตุไพไรติกและสารประกอบซัลเฟตซึ่งจะใช้ *thiobacillus ferrooxidases* เป็นตัวกำจัด การกำจัดกำมะถันนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันที่ปะปนในแร่รูปของแต่ละสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งทั่วไปสารต่างๆ ที่ปะปนมากับถ่านหิน นอกจากแร่ธาตุต่างๆ และสารประกอบซัลเฟอร์แล้วยังมีแร่ธาตุดินต่างๆ หรือเรียกว่า ไทโอฟิน (Thiophene) ซึ่งจะต้องใช้ Dibenzothiophene เป็นตัวละลายเพื่อแยกไทโอฟินออกจากถ่านหินและแร่ธาตุอื่นๆ ก่อนก่อนนำแบคทีเรียมาใช้งาน ซึ่งการกำจัดไทโอฟินออกจากถ่านหินส่งผลต่อปริมาณแกลดลงจากการเผาไหม้ได้ [24] โดยการกำจัดแร่ธาตุหรือสารประกอบกำมะถันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

(1) การกำจัดสารประกอบกำมะถันอินทรีย์

thiobacillus ferrooxidases สามารถใช้กำจัดสารประกอบอินทรีย์อาทิ แร่ธาตุไพไรติกได้เป็นอย่างดี โดยกระบวนการกำจัดสารประกอบอินทรีย์จะใช้เวลาค่อนข้างยาวนานอาจมากถึง 7-21 วันเพื่อให้แบคทีเรียใช้เวลาย่อยสลาย ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่นิยมใช้มากที่สุดในการกำจัดสารประกอบ

กัมมะถันอินทรีย์ออกจากถ่านหิน โดยแบคทีเรียดังกล่าวอยู่ในกลุ่ม Autotrophs หรือแบคทีเรียที่สามารถสร้างอาหารเองได้ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อยได้แก่ Mesophilic และ Thermophilic ซึ่งจากการทดลองในห้องแล็บพบว่า Mesophilic จะสามารถกำจัดสารประกอบกัมมะถันได้ถึง 90% แต่ใช้เวลาค่อนข้างมากในการย่อยสลาย ซึ่งโดยคาดการณ์ว่ากลุ่ม Thermophilic จะสามารถใช้งานได้ดีกว่าในแง่ของระยะเวลาในการกำจัดสารประกอบถ่านหินสามารถกำจัดกัมมะถันอินทรีย์ได้ด้วย โดยมีข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิที่ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 50-80 °C [17]

(2) การกำจัดสารประกอบกัมมะถันอินทรีย์

กัมมะถันอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเป็นพวก Thiols, Sulfides, Disulfides, Thiophenes และสารประกอบอื่นๆ โดยวิธีการกำจัดกัมมะถันสามารถใช้แบคทีเรียหรือฟังไจหลายประเภทในการกำจัดสารเหล่านี้ อาทิ *Filamentous fungi* เป็นกลุ่มเชื้อรา โดยเชื้อราดังกล่าวจะสามารถผลิตซัลเฟตซึ่งกระตุ้นการออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลซัลโฟเนต ซึ่งผลจากห้องแล็บพบว่าสามารถกำจัดสารประกอบกัมมะถันอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดกัมมะถันประมาณ 60-70% [17]

การกำจัดกัมมะถันออกจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้ด้วยวิธีทางชีวภาพนั้นเป็นกระบวนการที่เป็นไปได้ในทางเทคนิค มีการแนะนำให้สามารถใช้แบคทีเรียหรือเชื้อราหลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดซัลเฟตของแบคทีเรียยังมีประสิทธิภาพต่ำเกินไปในแง่ของระยะเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เหมาะสมจริงต่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์ รวมทั้งเครื่องจักรอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งานจริงยังไม่สามารถถูกนำมาใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์เช่นเดียวกัน [18]

2. กระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงถ่านหิน (Processing)

กระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งในการเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิงของถ่านหินจากในรูปแบบก้อนเป็นรูปแบบอื่นที่มีความร้อนเพิ่มมากขึ้น ลดความชื้น และลดปริมาณความสกปรกและปริมาณสารกัมมะถัน โดยมีเทคโนโลยีดังนี้

1) การอัดก้อนถ่านหิน (Coal Briquetting)

การอัดก้อนถ่านหินเป็นกระบวนการที่ผลิตถ่านหินเป็นชิ้นๆ ให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตที่สม่ำเสมอจากถ่านหินคุณภาพเกรดต่ำให้มีคุณภาพสูงขึ้นโดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มค่าความร้อน โดยกระบวนการอัดก้อนถ่านหินนั้นมักจะเป็นการรวมตัวของถ่านหินขนาดเล็ก ผงถ่านหิน ด้วยการผสมกับสารที่ช่วยประสานเข้าด้วยกันก่อนนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการ โดยกระบวนการอัดก้อนถ่านหินจะประกอบด้วย

- การทำให้อนุภาคแห้งบางส่วน การเพิ่มค่าความร้อนของถ่านหินที่อัดก้อนให้สูงขึ้นนั้นจะต้องลดค่าความชื้นของถ่านหินให้ลดลงก่อนนำไปขึ้นรูป

- นำอนุภาคที่ถูกนำไปแห้งแล้วเข้าสู่เครื่องบดอัดก้อนถ่านหิน โดยรูปทรงของการอัดก้อนถ่านหินจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องจักรและการนำไปใช้ประโยชน์

- การบีบอัดอนุภาคในเครื่องจักรเพื่อสร้างรูปทรงตามต้องการ กระบวนการนี้จะใช้ลูกกลิ้ง (Rollers) ในการบีบอัดให้ได้รูปทรงตามต้องการ

การบีบอัดถ่านหินให้อยู่ในรูปก้อนนั้นจะต้องใช้แรงบีบอัดค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารที่เพิ่มการยึดเหนี่ยวของถ่านหินจะสามารถลดการบีบอัดแรงดัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- มีการเพิ่มสารยึดเหนี่ยวถ่านหินจะใช้แรงดันปานกลาง ($10-50 \text{ MN/m}^2$)

- ไม่มีการเพิ่มสารยึดเหนี่ยวถ่านหิน จะใช้แรงดันสูง ($100-200 \text{ MN/m}^2$)



รูปที่ 7 รูปแบบการอัดก้อนถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง [19]

2) การบดละเอียดถ่านหิน (Pulverized Coal)

การบดละเอียดถ่านหินเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการเตรียมถ่านหินสำหรับการเผาไหม้ การบดถ่านหินด้วยเครื่องจักรให้เป็นผงละเอียดทำให้สามารถเผาไหม้ได้เหมือนก๊าซ จึงช่วยให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยถูกนำไปเข้าสู่เตาเผาด้วยอากาศหรือส่วนผสมของอากาศ/ก๊าซ ถ่านหินที่บดแล้วสามารถนำไปในหม้อน้ำเพื่อการเผาไหม้ได้โดยตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขนาดของถ่านหินที่ถูกบดละเอียดนั้นจะมีลักษณะเหมือนแป้ง มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครกรัม ตาม **รูปที่ 11** ทั้งนี้การนำถ่านหินบดละเอียดไปใช้จะต้องใช้ร่วมกับหัวเผาที่ใช้สำหรับการเผาถ่านหินละเอียดเท่านั้น [20]

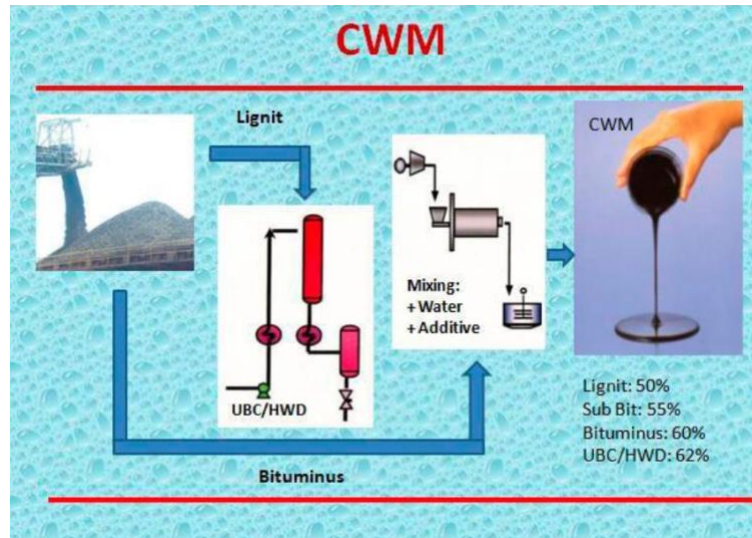


รูปที่ 0-8 ถ่านหินบดละเอียด [21]

3) Coal-Liquid Mixture

Coal-Liquid Mixture เป็นการผสมระหว่างถ่านหินและของเหลวให้เกิดเป็นลักษณะของเหลว เพื่อสามารถขนส่ง จัดเก็บและเผาไหม้ลักษณะคล้ายกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป โดยส่วนผสมจะเป็นถ่านหิน ในรูปถ่านหินบดละเอียดกับของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำมัน ร่วมกับสารเคมีเล็กน้อย เพื่อปรับปรุง ความเสถียรและคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงให้เกิดความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยเทคโนโลยีปัจจุบันที่นิยมใช้เรียกว่า Coal Water Mixture (CWM)

Coal Water Mixture (CWM) เป็นวิธีการขั้นสูงในการเพิ่มมูลค่าของถ่านหิน โดยการรวมตัวกัน ของถ่านหิน น้ำ และส่วนผสมสารเติมแต่ง ให้เกิดความเหนียวเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะคล้ายเดียวกันกับ น้ำมันเตา ซึ่งข้อดีนั่นก็คือ สามารถใช้ร่วมกับหัวเผาน้ำมันเตาที่มีอยู่แล้วได้เลยโดยการดัดแปลงเล็กน้อย ของหัวเผา และนอกเหนือจากนั้น การกักเก็บเชื้อเพลิงมีความปลอดภัยค่อนข้างสูงเนื่องจากการกักเก็บไว้ในน้ำ ทำให้หลีกเลี่ยงการเกิดฝุ่นถ่านหินและการลุกไหม้ขึ้นเองตามธรรมชาติของถ่านหิน โดยทั่วไป ถ่านหินที่ใช้ใน CWM มักจะเป็นถ่านหินบิทูมินัส เนื่องจากเป็นถ่านหินความชื้นต่ำและพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ CWM ที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ดี มีความคงตัว ไหลง่าย และสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ถึงอย่างนั้นถ่านหินที่เกรดต่ำกว่าถ่านหินบิทูมินัสสามารถผ่านกระบวนการ CWM ได้เช่นเดียวกัน กระบวนการทำงานตามรูปที่ 12 [22]



รูปที่ 9 กระบวนการ Coal-liquid mixture [22]

4) Desulfurized Coal Water Mixture

เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยี Coal Water Mixture (CWM) โดยการเพิ่มกระบวนการลดกำมะถันที่ปะปนมากับถ่านหิน ส่งผลให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ลดลง การลดกำมะถันสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การลดกำมะถันด้วยวิธีการเคมี การลดกำมะถันด้วยวิธีการชีวภาพ ก่อนการเผาไหม้ การที่จะทำให้ถ่านหินสัมผัสและละลายน้ำมากที่สุดคือการใช้ความดันค่อนข้างสูง (ประมาณ 1,000 psi) และอุณหภูมิประมาณ 140-200 °C

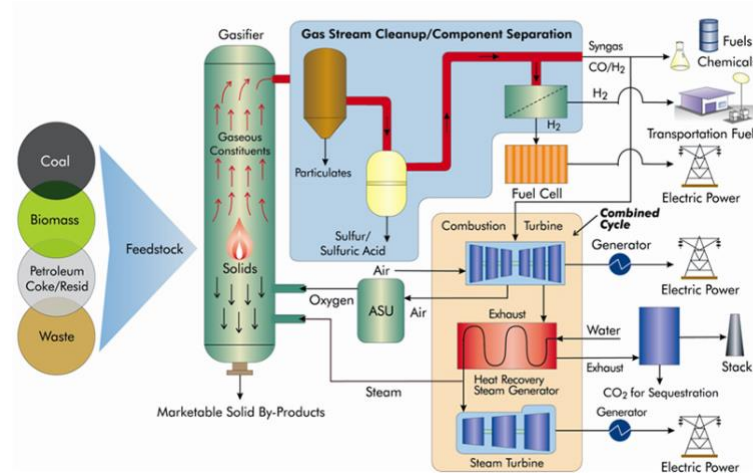
3. การเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิง (Conversion)

เป็นเทคโนโลยีขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นรูปแบบอื่นๆ ที่มี การเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า อาทิ

1) Gasification

การแปรสภาพเป็นก๊าซเป็นกระบวนการทางเทคโนโลยีที่สามารถแปลงเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอนต่างๆ อาทิ ถ่านหิน ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซสังเคราะห์ (หรือ Syngas) การเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซเกิดขึ้นในกระบวนการของเครื่องจักร โดยทั่วไปประกอบด้วย ถังที่มีอุณหภูมิ/ความดันสูง โดยที่อากาศและไอน้ำจะสัมผัสกับถ่านหิน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น Syngas ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สอื่นๆ โดย Syngas สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

Syngas เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไวไฟสูง โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้ Syngas จะเกิดผลปฏิกิริยา ได้แก่ ความร้อนและน้ำ ทำให้ไม่เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้รวมถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

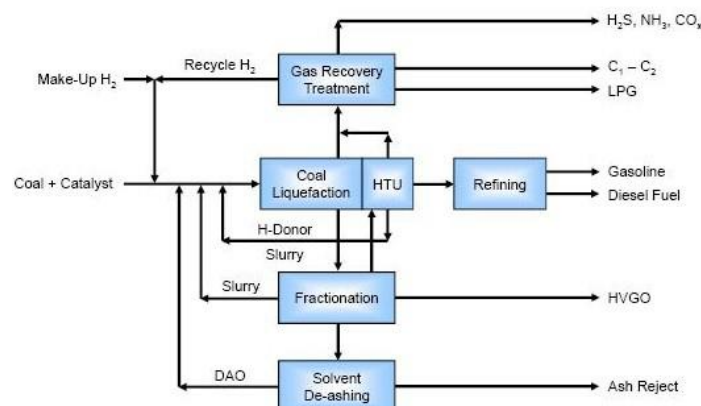


รูปที่ 10 กระบวนการ Gasification [23]

2) Liquefaction

เป็นกระบวนการเปลี่ยนถ่านหินในรูปของแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือปิโตรเคมี โดยจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ การแปรสภาพโดยตรง (Direct) และการแปรสภาพโดยทางอ้อม (Indirect)

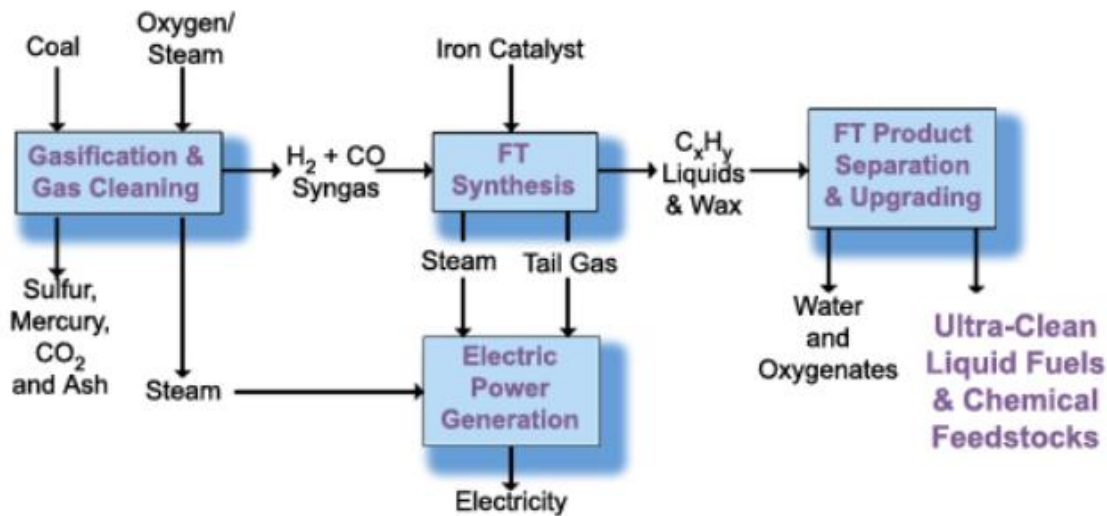
- การแปรสภาพโดยตรง (Direct) เป็นการเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวของถ่านหิน โดยเริ่มจากนำถ่านหินโดยทั่วไปเป็นถ่านหินบิทูมินัสขึ้นไป ไปบดละเอียดและทำปฏิกิริยาตัวเร่งโดยการเติมก๊าซไฮโดรเจนภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง จากนั้นจะได้เชื้อเพลิงเหลวที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป กระบวนการทำงานเป็นตามรูปที่ 14 [24]



รูปที่ 11 กระบวนการแปรสภาพโดยตรงของ Coal Liquefaction [24]

- การแปรสภาพโดยทางอ้อม (Indirect) จะแบ่งออก 2 ขั้นตอนได้แก่

1. เปลี่ยนสภาพถ่านหินให้อยู่ในรูป Syngas ซึ่งจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่น น้ำมันดิน และก๊าซที่เป็นกรดออกจากกัน
2. นำ Syngas ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งในกระบวนการ Fischer-Tropsch ซึ่งจะเปลี่ยน Syngas ให้เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนหลายประเภท เช่น น้ำมันเบนซิน ดีเซล และเมทานอล โดยกระบวนการทำงานเป็นไปตามรูปที่ 15 [24]

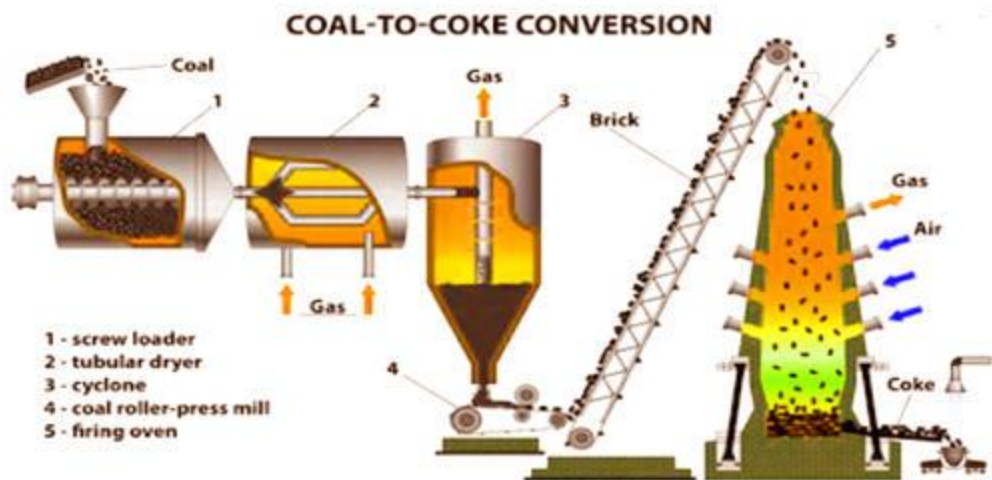


รูปที่ 12 กระบวนการแปรสภาพโดยทางอ้อมของ Coal Liquefaction [24]

3) Pyrolysis

เป็นกระบวนการสลายตัวด้วยเคมีความร้อนของอนุภาคคาร์บอนในเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบต่างๆ อาทิ ชีวมวล พลาสติก ยาง ถ่านหิน เป็นต้น ที่อุณหภูมิมากกว่า 200 °C ภายใต้ไร้ออกซิเจน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพไปพร้อมๆ กัน เมื่อเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบต่างๆ อยู่ภายใต้กระบวนการนี้จะเกิดการสลายตัวของโมเลกุลที่ใหญ่กว่าไปเป็นโมเลกุลที่เล็กกว่า

เมื่อมีการประยุกต์ใช้สำหรับถ่านหินจะอุณหภูมิมากกว่า 400 °C ภายใต้ไร้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้รับจากกระบวนการดังกล่าวจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ค่าความร้อนสูง และค่าความชื้นต่ำ เรียกว่า ถ่านโค้ก (Coke) และมีบางส่วนที่เป็นก๊าซและของเหลวออกมาบางส่วน โดยกระบวนการทำงานของ Coal Pyrolysis เป็นไปตามรูปที่ 16 [25]



รูปที่ 13 กระบวนการทำงานของ Coal Pyrolysis [26]

1.2.2 กระบวนการระเหยเผาไหม้ (Combustion)

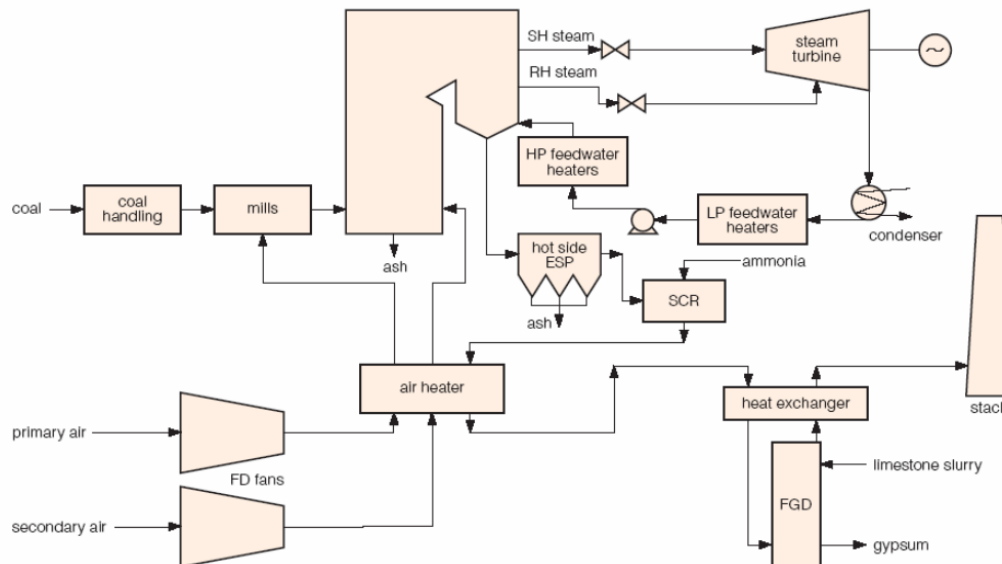
กระบวนการระเหยเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงถ่านหินเป็นรูปแบบความร้อนอื่นๆ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว จะมีเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดเกี่ยวข้องมากมาย เพื่อช่วยลดมลพิษต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยสามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 กลุ่มเทคโนโลยีใหญ่ๆ ดังนี้

1. กลุ่มเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงและมลพิษต่ำ (High Efficiency Low Emission :HELE)

กลุ่มเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงและมลพิษต่ำ หรือ High Efficiency Low Emission (HELE) เป็นเทคโนโลยีที่เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อการลดการปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยมีเทคโนโลยีในกลุ่มได้ดังนี้

1) Pulverized Coal Combustion

กระบวนการระเหยเผาไหม้แบบเพาเวอร์ไรซ์มีการใช้งานเป็นจำนวนมากในต่างประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยกระบวนการระเหยเผาไหม้จะใช้ถ่านหินที่ถูกบดละเอียดแล้วขนาดไม่น้อยกว่า 200 ไมโครเมตร เป็นเชื้อเพลิงนำเข้าสู่หัวเผาที่ออกแบบมาให้ใช้กับถ่านหินบดละเอียดก่อน ความร้อนที่ออกจากหัวเผาจะถ่านเทความร้อนไปยังอุปกรณ์หม้อน้ำและนำไอน้ำที่ใช้ไปใช้ประโยชน์ทั้งในการผลิตไฟฟ้าผ่าน Steam Turbine หรือการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป [15] ซึ่งจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบดละเอียดแล้วจะส่งผลประสิทธิภาพหม้อน้ำที่ประมาณ 90% และปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหินทั่วไปซึ่งกระบวนการทำงานเป็นไปตามรูปที่ 17 โดยสามารถลดมลพิษทั้งหมดได้ประมาณ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีเผาไหม้ตะกรับแบบเดิม [27]



รูปที่ 14 กระบวนการทำงานของ Pulverized Coal Power Plant [27]

โดยหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินโรงงานหรือโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ที่กำจัดมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งระบบ Electrostatic precipitators (ESP) หรือ Bag Filter ในการกำจัดมลพิษจำพวกฝุ่น และ Flue gas desulfurization (FGD) สำหรับกำจัดจำพวกซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อไป

2) Pulverized Supercritical และ Ultra Supercritical Coal Combustion

กระบวนการระยะเผาไหม้ของทั้ง Supercritical และ Ultra Supercritical Coal Combustion นั้นจะเป็นรูปแบบกระบวนการเดียวกันกับกระบวนการเผาไหม้แบบเพาเวอร์ไรซ์ แต่ต่างกันที่รูปแบบไอน้ำที่จะนำไปใช้นั้น จะใช้หม้อน้ำ Supercritical และ Ultra Supercritical ที่สามารถผลิตแรงดันไอน้ำและอุณหภูมิเหนือกว่าจุดยิ่งยวด (Supercritical) ซึ่งโดยทั่วไปหม้อน้ำจะใช้แรงดันไอน้ำและอุณหภูมิที่จุด Subcritical ส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 20 สามารถลดมลพิษที่เกิดขึ้นได้ประมาณ 26.67% ของมลพิษทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับมลพิษแบบเดิม โดยสามารถเปรียบเทียบลักษณะของไอน้ำ อุณหภูมิและประสิทธิภาพตามตารางที่ 1-1 และค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละเทคโนโลยี ตามตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบแรงดันไอน้ำ อุณหภูมิไอน้ำ และประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า [28]

Pulverized coal power plant	Main steam pressure, MPa	Main steam temperature, EC	Reheat steam temperature, EC	Efficiency, %, net, HHV basis (bituminous coal)
Subcritical	<22.1	Up to 565	Up to 565	33-39
Supercritical	22.1-25	540-580	540-580	38-42
Ultrasupercritical	>25	>580	>580	>42

ตารางที่ 1-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละเทคโนโลยี [28]

	Average efficiency	CO ₂ emissions, g/kWh	Power generation cost, US¢/kW	Total plant capital cost, US\$/kW
Subcritical	36	766-789	4.0-4.5	1095-1150
Supercritical	45	722	3.5-3.7	950-1350
Ultrasupercritical	>45	<722	4.2-4.7	1160-1190
IGCC	42-44	710-750	3.9-5.0	1100-1600
NGCC	50	344-430	3.4-6.8	400-700

3) Fluidized Bed

Fluidized Bed Combustion (FBC) เป็นเทคโนโลยีเตาเผาแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปมักจะนำไปใช้สำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินเนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถดักจับซัลเฟอร์ได้ดี สามารถลดปริมาณเถ้าได้ ซึ่งนำไปใช้ได้ทั้งในระดับหม้อน้ำของโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันได้มากกว่า 90%

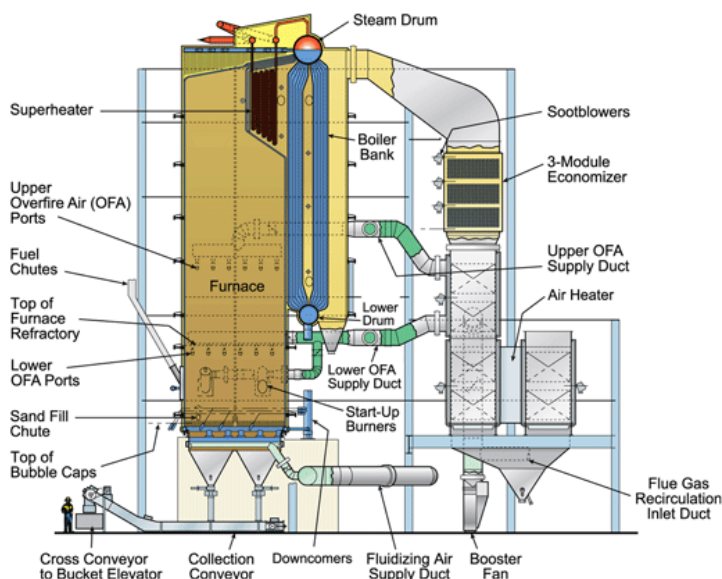
คุณสมบัติที่สำคัญของเตาเผาที่แตกต่างจากหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินทั่วไปคือการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่แหล่งกำเนิดโดยใช้สารดูดซับได้แก่หินปูน (CaCO₃) และอนุกรมการทำงานภายในเตาค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 840 °C, 1,550 °F) โดยถ่านหินและสารดูดซับจะนำมาผสมกันและพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ด้านในมีทรายอยู่ในขณะที่อากาศจะถูกเป่าขึ้นด้านบนผ่านตัวจ่ายอากาศที่ด้านล่างของหม้อน้ำ โดยทรายจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางนำความร้อนให้แก่ระบบ จากนั้นสารดูดซับและเถ้าถ่านหินจะก่อตัวเป็นโซนาหนาแน่นที่ด้านล่างของหม้อน้ำ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นอย่าง

เพียงพอ มวลอนุภาคของแข็งจะขยายตัวและมีคุณสมบัติคล้ายของไหล และเมื่อเพิ่มความเร็วอนุภาคของแข็งบางส่วนจะถูกกักเก็บและเคลื่อนผ่านด้านบนของหม้อน้ำ โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ 1) Atmospheric Pressure Fluidized Bed Combustion (FBC) 2) Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)

(1) Atmospheric Pressure Fluidized Bed Combustion (AFBC)

Atmospheric Pressure Fluidized Bed Combustion (FBC) จะเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินโดยที่ความดันปกติในห้องเผาไหม้โดยต้องการอากาศส่วนเกินประมาณ 20% เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดี โดยจะแบ่งเทคโนโลยีออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

- **Bubbling Fluidized Bed Combustion (BFBC)** สำหรับเทคโนโลยีนี้ อากาศจะถูกนำเข้าสู่หม้อน้ำทางด้านล่างของหม้อน้ำในขณะที่ถ่านหินและสารดูดซับจะถูกนำเข้าสู่ทางด้านล่างของหม้อน้ำ (Underbed feed system) หรือตรงกลางของหม้อน้ำเหนือฐานหม้อน้ำ (Overbed feed system) โดยถ่านหินในห้องเผาไหม้ที่ความร้อนประมาณ 800-900 °C จะถูกเผาไหม้ในสัดส่วนที่สูง และมีของแข็งบางส่วนถูกนำออกจากหม้อน้ำ ซึ่งของแข็งเหล่านั้นประกอบด้วยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการเผาไหม้ สารดูดซับที่ไม่ทำปฏิกิริยา สารประกอบแคลเซียม-ซัลเฟต และเถ้าถ่านหิน โดยของแข็งเหล่านี้จะถูกนำออกในตัวดักจับฝุ่นที่อยู่ด้านล่างของหม้อน้ำและถูกนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ซึ่งทำให้คาร์บอนและสารดูดซับมีเวลานานขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนเกิดการเผาไหม้จนหมดและสารดูดซับสามารถดูดซับและดักจับกำมะถันได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการทำงานเป็นไปตาม **รูปที่ 18** โดยสามารถลดมลพิษของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ประมาณ 70% เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีเผาไหม้ตะกรับแบบเดิม [29]



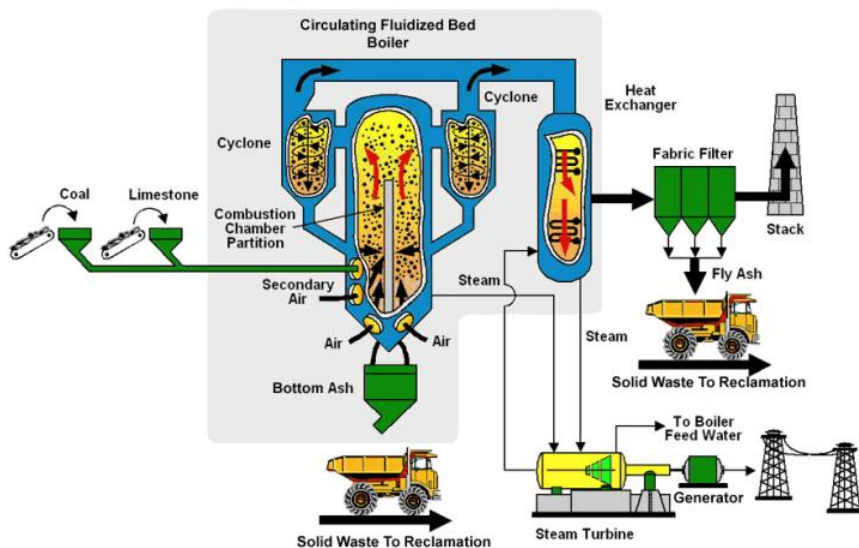
รูปที่ 15 กระบวนการทำงานของ Bubbling Fluidized Bed Combustion [30]

การกระจายตัวของถ่านหินและสารดูดซับที่สม่ำเสมอเป็นสิ่งสำคัญในการทำให้เกิดการเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดี โดยมี 2 รูปแบบที่แตกต่างกันในการนำเข้าถ่านหินและสารดูดซับเข้าห้องเผาไหม้ ได้แก่

Underbed Feed System ระบบนี้นำถ่านหินและสารดูดซับผ่านท่อที่อยู่ด้านล่างของของฐาน โดยถ่านหินที่จะใช้กับรูปแบบนี้จะต้องใช้ถ่านหินขนาดไม่เกิน 0.64 เซนติเมตร และความชื้นไม่เกิน 6% โดยถ่านหินและสารดูดซับจะถูกนำโดยอากาศที่ผลิตโดยเครื่องอัดอากาศ (Blower) และถูกส่งผ่านท่อที่อยู่ทางใต้ของฐาน ซึ่งระบบนี้มีคอนข้างซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่สูงจากการใช้เครื่องอัดอากาศจำนวนมากในการขนส่งถ่านหินและสารดูดซับ

Overbed Feed System ระบบนี้นำถ่านหินและสารดูดซับเข้าห้องเผาไหม้เหนือฐานเผาไหม้ ขนาดหินประมาณ 3.2 เซนติเมตร ระบบนี้มีจุดบ่อน้อยกว่า Underbed Feed System แต่สามารถกระจายตัวการกระจายถ่านหินและสารดูดซับได้ดีกว่า [29]

- **Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)** เทคโนโลยีนี้คล้ายคลึงกับ Bubbling Fluidized Bed Combustion แต่ที่แตกต่างกันโดยทั่วไปคือขนาดอนุภาคสารดูดซับที่เล็กกว่า ความเร็วของก๊าซในหม้อน้ำที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างทางกายภาพที่สำคัญและขนาดฐานเผาไหม้ของ CFBC จะขยายตัวเกือบเท่าปริมาตรของเตาเผาประมาณ 90% โดยกระบวนการนี้จะใช้ความเร็วของอากาศที่สูงขึ้น ทำให้อนุภาคของแข็งส่วนใหญ่ถูกกักเก็บและไหลรวมกับอากาศไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลักและเข้าสู่ไซโคลน ซึ่งอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่จะถูกสกัดและกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง ซึ่งเทคโนโลยีนี้จะทำให้ของแข็งและสารดูดซับใช้เวลาอยู่ห้องเผาไหม้ค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับ Bubbling Fluidized Bed Combustion และมีการใช้ความร้อนที่ต่ำกว่าส่งผลให้เหมาะสมต่อถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ แ่สูง รวมถึงสามารถใช้ร่วมกันกับระหว่างถ่านหินกับเชื้อเพลิงอื่นได้โดยกระบวนการทำงานเป็นไปตาม**รูปที่ 19** โดยสามารถลดมลพิษของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ประมาณ 90% เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีเผาไหม้ตะกรับแบบเดิม [29]



รูปที่ 16 กระบวนการทำงานของ Circulating Fluidized Bed Combustion [31]

2) Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)

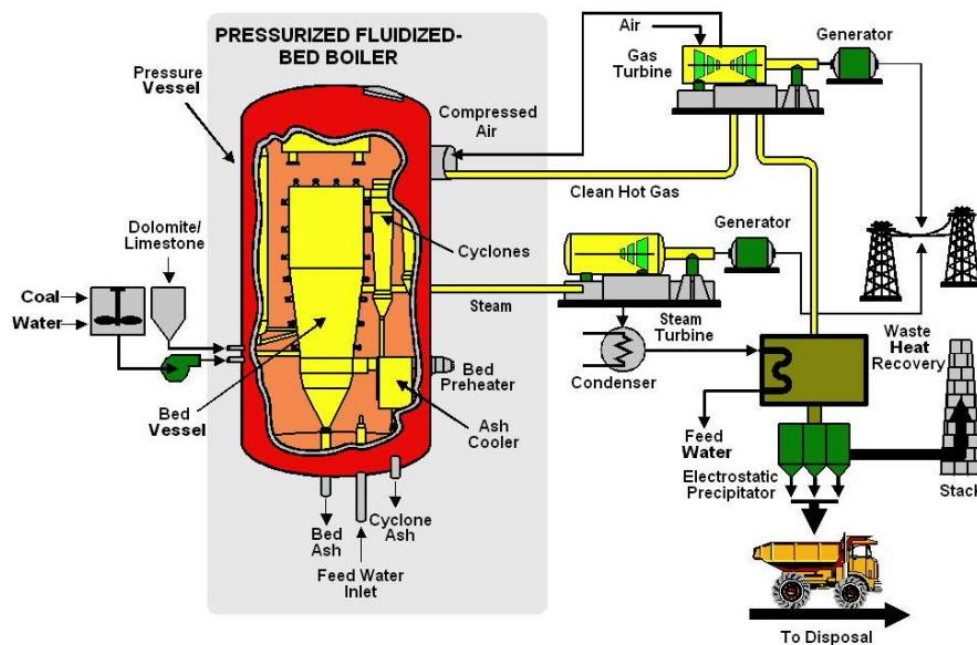
เทคโนโลยีนี้จะแตกต่างจาก AFBC โดยเทคโนโลยีย่อยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Bubbling Fluidized Bed Combustion และ Circulating Fluidized Bed Combustion เช่นเดียวกัน ที่ด้านในของห้องเผาไหม้มีความดันสูงประมาณ (5-20 bar) ความดันภายในห้องเผาไหม้จะส่งผลต่อการทำงานดังนี้

- ขนาดของ หม้อน้ำ PFBC จะมีขนาดเล็กกว่า AFBC เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่เท่ากัน
- อุณหภูมิและความดันที่สูงที่ออกจากหม้อน้ำสามารถนำไปใช้งานโดยการผลิตไฟฟ้าผ่าน Gas Turbine ได้
- ด้วยอุณหภูมิและความดันที่สูงที่ออกจากหม้อน้ำ สามารถนำไปใช้ระบบ Combine Heat and Power (CHP) ของโรงไฟฟ้าได้

อากาศที่ไหลผ่านห้องเผาไหม้จะผ่านเช่นเดียวกับกับ AFBC แต่ที่ความดันที่สูงกว่า อุณหภูมิในห้องเผาไหม้บริเวณฐานการเผาไหม้ประมาณ 820-920 °C สำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพในการกำจัด SO₂ ที่ดี และการใช้สารดูดซับจะเป็นการใช้สารโดโลไมต์ CaMg (CO₃)₂ แทนหินปูนที่ใช้ใน AFBC

กระบวนการจะเริ่มจากถ่านหินและสารดูดซับจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยถ่านหินมีขนาดไม่เกิน 0.32 เซนติเมตร จะถูกนำเข้าไปโดยผ่านฮอปเปอร์ที่มีแรงดันจากนั้นจึงฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ ถ่านหินจะถูกทำให้แห้งโดยมีความชื้นประมาณ 2% บริเวณระหว่างตัวจ่ายอากาศกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในฐานเผาไหม้

รูปแบบการทำงานของ PFBC จะคล้ายกับ AFBC โดยก๊าซและอนุภาคของแข็งจำนวนมากถูกนำไปที่ด้านล่างของเตาเผาจะถูกนำความสะอาดในอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิและความดันสูง อาทิ ไชโคลน เครื่องดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต หรือ ตัวกรองเซรามิก จากนั้นจะถูกนำกลับมาเข้าห้องเผาไหม้อีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้และดักจับกำมะถันได้สมบูรณ์ที่สุด ซึ่ง PFBC นั้นสามารถนำไปใช้ร่วมกับ Gas turbine ได้ ดังนั้นการจะนำไปใช้จะต้องทำการทำความสะอาดก๊าซก่อนนำไปขยายตัวผ่าน Gas Turbine จากนั้นค่อยเข้าสู่ Heat Recovery เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำให้เกิดไอน้ำแล้วนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการผลิตไฟฟ้าผ่านกังหันไอน้ำ กระบวนการทำงานเป็นไปตามรูปที่ 20 [29]



รูปที่ 17 กระบวนการทำงานของ Pressure Fluidized Bed Combustion [32]

4) Integrated Coal Gasification Combined Cycle (IGCC)

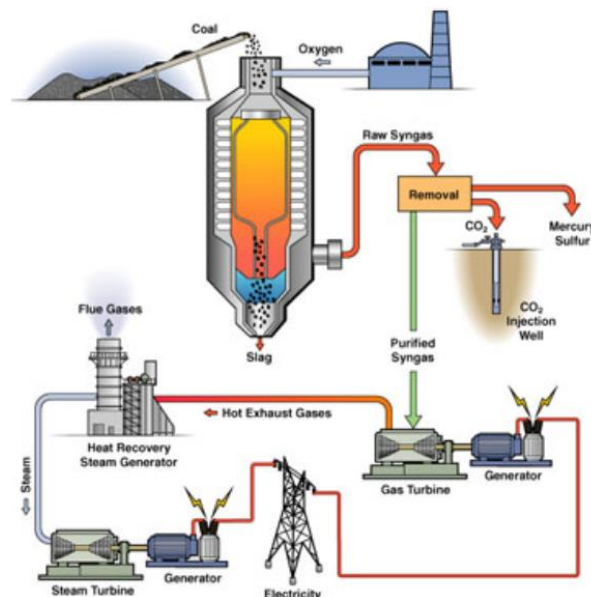
เทคโนโลยี IGCC เป็นเทคโนโลยีที่รวมสองเทคโนโลยี คือ วัฏจักรรวม (Combined Cycle) และ ก๊าซซิฟิเคชันเข้าด้วยกัน โดยถ่านหินจะถูกทำให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (CO และ H_2 เป็นหลัก) โดยการทำปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันในภาวะที่มีอากาศจำกัด โดยสามารถเติมไอน้ำเสริมด้วยได้ เนื่องจากสารประกอบกำมะถันในถ่านหินจะถูกเปลี่ยนรูปเป็น H_2S ส่วนใหญ่และ SO_2 นอกจากนั้นก๊าซเชื้อเพลิงที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ยังพบสารอนุภาคต่างๆ หลุดติดมา จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบกำมะถันและสารอนุภาคเหล่านี้ออกจากก๊าซเชื้อเพลิงก่อนที่จะนำไปเผาไหม้และขับเคลื่อนกังหันก๊าซเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยใช้ระบบวัฏจักรรวม (Combined Cycle)

ข้อดีที่สำคัญของโรงไฟฟ้า IGCC เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าทั่วไปที่เผาถ่านหินและติดตั้งระบบการกำจัดกำมะถันในก๊าซไอเสีย (Flue Gas Desulfurization) คือ ประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินจะสูงถึงร้อยละ 45-47 ไม่มีปัญหามลพิษด้านอากาศ และลดการเกิดก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) โดยเฉพาะปริมาณก๊าซ CO_2 ต่อหน่วยไฟฟ้า

กระบวนการทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงก่อนที่จะนำไปเผาไหม้และขับเคลื่อนกังหันก๊าซมีความสำคัญยิ่งและไม่สามารถละเลยได้ เนื่องจากการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมและสามารถช่วยทำให้ปัญหาการสึกกร่อนของเครื่องจักรมีน้อยลง และประการสำคัญเป็นการป้องกันปัญหามลภาวะที่จะส่งผลกระทบต่อชุมชนในบริเวณใกล้เคียงโรงไฟฟ้าได้ โดยกระบวนการทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกตามอุณหภูมิของกระบวนการที่ใช้ได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. Hot Gas Cleanup – การทำความสะอาดก๊าซที่อุณหภูมิสูง
2. Cold Gas Cleanup – การทำความสะอาดก๊าซที่อุณหภูมิต่ำ

โดยหลักการเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว กระบวนการทำความสะอาดก๊าซควรจะทำให้ที่อุณหภูมิของก๊าซที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ คือ ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากก๊าซที่ได้นี้จะถูกส่งต่อไปใช้กับกังหันก๊าซ นอกเหนือจากนั้นการทำความสะอาดก๊าซที่อุณหภูมิสูงยังเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อน แต่อย่างไรก็ตามระบบ Hot Gas Cleanup สำหรับกำจัด H_2S และ SO_2 ออกจากก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูง มีข้อเสียในด้าน ปัญหาการแตกกระเทาะ (Attrition) ของเม็ดสารดูดซับที่ใช้ และปัญหาการกำจัดฝุ่นละอองโดยใช้ตัวกรองเซรามิก (Ceramic Filters) ปัญหาการอุดตันของถ้ำและ Mechanical Failure ของระบบการกรองก๊าซร้อนที่พบเจอได้บ่อยครั้ง [4]



รูปที่ 18 กระบวนการทำงานของ Integrated Coal Gasification Combined Cycle [33]

2. กลุ่มเทคโนโลยีลดมลพิษช่วงระยะการเผาไหม้

กลุ่มเทคโนโลยีลดมลพิษช่วงกระบวนการระยะการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่มุ่งเน้นในการลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินโดยเริ่มตั้งแต่ในระยะการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะสามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นและยังช่วยระบบบำบัดมลพิษหลังจากการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยเทคโนโลยีในกลุ่มมีดังนี้

1) In-situ Combustion NO_x & SO_x

เทคโนโลยีนี้เป็นการกำจัดกลุ่มก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และกลุ่มก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ตั้งแต่ช่วงระยะการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินให้เกิดการดักจับก๊าซต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีหลายวิธีการและเทคโนโลยีดังนี้

(1) การเพิ่มประสิทธิภาพหัวเผา (Burner Optimization)

การเพิ่มประสิทธิภาพหัวเผานอกจากจะลดการใช้พลังงานที่นำเข้าสู่ห้องเผาไหม้แล้ว การเพิ่มประสิทธิภาพหัวเผายังสามารถลดค่า NO_x ได้ โดยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพหัวเผานั้นทำได้โดยการเปลี่ยนสภาพการทำงาน 2 เงื่อนไขได้แก่ 1. การควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกินที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ 2. การควบคุมของเชื้อเพลิงและอากาศเข้าห้องเผาไหม้ โดยการเพิ่มประสิทธิภาพหัวเผาสามารถลดปริมาณ NO_x ไม่น้อยกว่า 39% [33]

(2) Low NO_x Burner

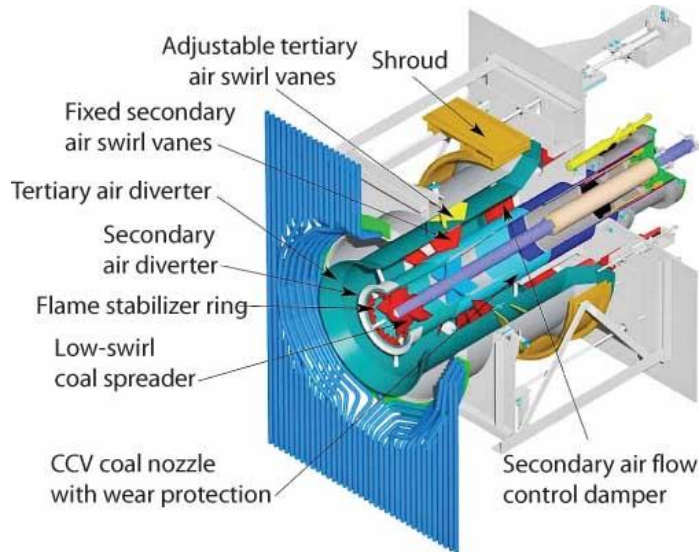
Low NO_x Burner ออกแบบมาเพื่อควบคุมเพื่อควบคุมการผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่หัวเผาแต่ละหัวเผาให้สร้างเปลวไฟที่ใหญ่และแตกแขนงมากขึ้น จุดมุ่งหมายคือการลดการ NO_x จากการเผาไหม้ โดยที่อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดจะถูกลดต่ำลงส่งผลให้ NO_x ลดลงตามมา และโครงสร้างเปลวไฟที่ได้รับการปรับปรุงจากการให้หัวเผานี้ยังช่วยลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในส่วนที่ร้อนที่สุดของเปลวไฟซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการเผาไหม้ทั้งหมด โดยเทคโนโลยีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลด NO_x ได้ประมาณ 74%

โดยที่หลักการทำงานของ Low NO_x Burner จะมีด้วยกัน 3 ขั้นตอนคือ

1. Combustion – จะเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงบริเวณโซนที่ไร้อากาศส่งผลให้เกิด NO_x ขึ้นบริเวณนี้
2. Reduction – บรรายากาศที่ลดลง ทำให้เกิดสารประกอบ Hydrocarbon ขึ้นและเกิดการทำปฏิกิริยากับ NO_x

3. Burnout- การเผาไหม้กับอากาศด้านในหัวเผาเสร็จสมบูรณ์ด้วยระบบ Air Staging ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเกิด NO_x เพิ่มขึ้นแต่ก็เกิดในปริมาณที่ไม่มากนัก

Air staging หรือ Two-Stage Combustion คือการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบ 2 ระยะ โดยแบ่งเป็นระยะแรก Primary Air จะเป็นการผสมระหว่างเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำในโซนที่ไม่มีออกซิเจน และระยะที่สอง Secondary air จะเติมอากาศเข้าไปในช่วงระยะเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [44]



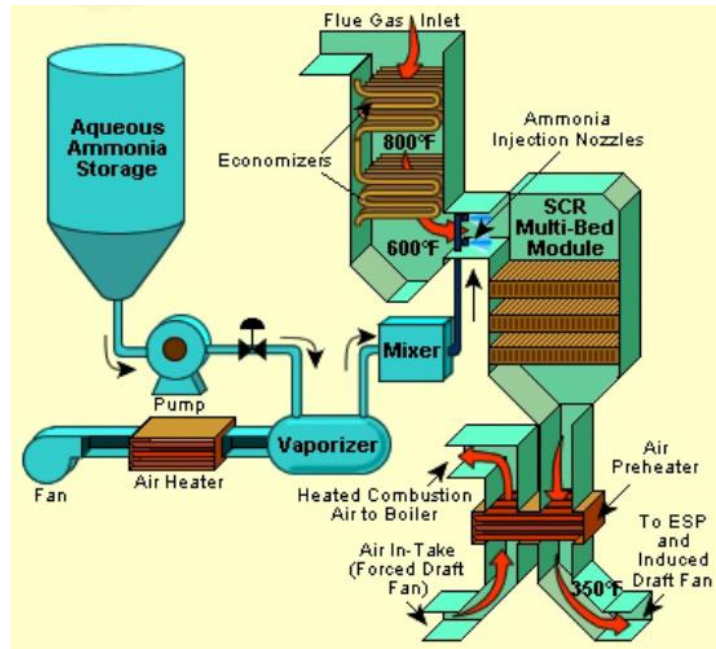
รูปที่ 19 กระบวนการทำงานของ Low NO_x Burner [35]

2) Selective Catalytic Reduction (SCR)

เทคโนโลยี SCR เป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นในการกำจัด NO_x ด้วยวิธีการทางเคมี โดย SCR จะใช้ตัวเร่งทำปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ อาทิเช่น ไททาเนียมออกไซด์ วานาเดียม โมลิบดีนัม และทังสเตน เป็นต้น ซึ่งมีจุดเด่นในการกระตุ้นการเพิ่มอัตราการรีดักชัน ส่วนประกอบหลักของ SCR ได้แก่ ระบบจัดเก็บและส่งแอมโมเนีย ท่อส่งแอมโมเนีย และเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารรีดิวซ์ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น แอมโมเนีย หรือ ยูเรีย จะถูกฉีดเข้าไปในก๊าซไอเสียหลังการเผาไหม้ โดยสารรีดิวซ์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเฉพาะเจาะจงกับ NO_x ในก๊าซไอเสีย ภายในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด เพื่อเปลี่ยนสภาพ NO_x ให้อยู่ในรูปโมเลกุลไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ (H_2O)

กระบวนการของ SCR จะเริ่มต้นจาก ตัวทำปฏิกิริยา (แอมโมเนียหรือยูเรีย) จะถูกฉีดเข้าไปด้านล่างของก๊าซไอเสียของอุปกรณ์เผาไหม้และ Economizer ผ่านท่อส่งแอมโมเนีย โดยทั่วไปตัวทำปฏิกิริยาจะถูกเจือจางด้วยอากาศหรือน้ำเพื่อช่วยในการฉีด ตัวทำปฏิกิริยาที่ถูกเจือจางแล้วจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นก๊าซไอเสียกับตัวทำปฏิกิริยาจะสัมผัสกันและกระตุ้นให้ NO_x ในอากาศเสียเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) หลังจากนั้น จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกำจัด

ก๊าซไอเสียอื่นๆ ต่อไป โดยกระบวนการดังกล่าวจะใช้อุณหภูมิประมาณ 300-400 °C มีประสิทธิภาพในการกำจัด NO_x ที่ประมาณ 80-90% [36]

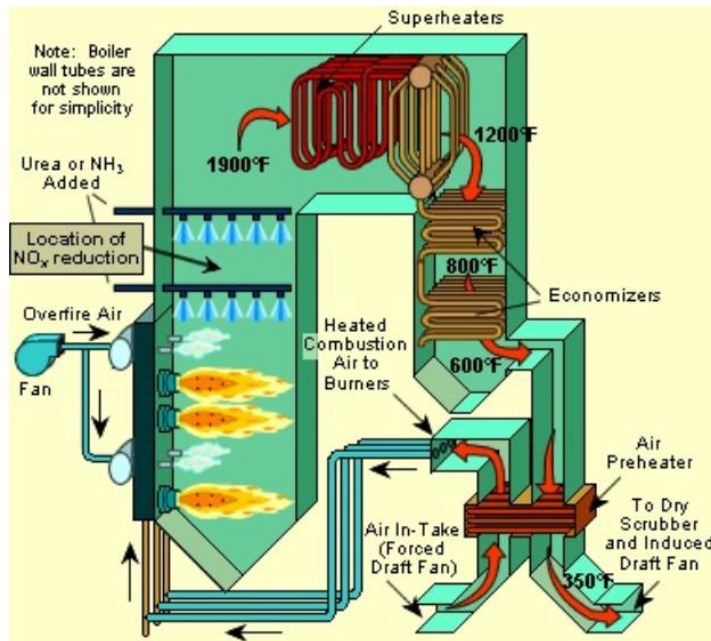


รูปที่ 20 กระบวนการทำงานของ Selective Catalytic Reduction (SCR) [33]

3) Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)

พื้นฐานของเทคโนโลยีนี้ คือ ใช้ปฏิกิริยาเคมีแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวทำปฏิกิริยา อาทิ ยูเรียหรือแอมโมเนีย เพื่อเปลี่ยน NO_x ให้เป็นไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) โดยการฉีดพ่นตัวทำปฏิกิริยาไปยังก๊าซเผาไหม้หลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 870-1,320 °C

กระบวนการ SNCR จะเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นห้องปฏิกิริยา โดยจะทำการติดตั้งหัวฉีดสำหรับฉีดตัวทำปฏิกิริยาอยู่หลังการเผาไหม้บริเวณด้านบนของเตาเผาใกล้กับช่องที่ปล่อยอากาศออกสู่บรรยากาศ การฉีดตัวทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการผสมกับก๊าซไอเสีย ความร้อนของก๊าซไอเสียจะเป็นตัวให้พลังงานสำหรับปฏิกิริยารีดักชัน NO_x จนเกิดเป็น N_2 และ H_2O ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศต่อไป [32] โดยประสิทธิภาพอยู่ที่ระหว่าง 30-50% ของการกำจัด NO_x [37]



รูปที่ 21 กระบวนการทำงานของ Selective Non-Catalytic Reduction [33]

4) Dry Sorbent Injection System (DSI)

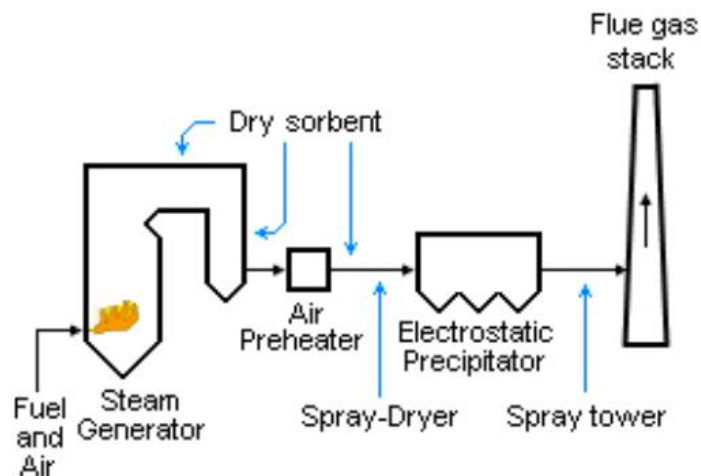
เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการลด SO_2 ในระดับปานกลางในหม้อน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้สารดูดซับเป็นสารประกอบที่มีโซเดียมเป็นส่วนประกอบหลัก โดยสารที่มีการใช้มากที่สุดคือ Trona (Trisodium Hydrogendicarbonate dihydrate) เนื่องจากทำปฏิกิริยากับ SO_2 ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โดยประสิทธิภาพการดูดซับ SO_2 โดยรวมอยู่ระหว่าง 80-90% [26] โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทการใช้งานได้แก่

1) Furnace sorbent injection เป็นเทคโนโลยีเริ่มแรกของ DSI โดยจะทำการฉีดสารดูดซับด้านบนของเตาเผาเพื่อทำปฏิกิริยากับ SO_2 ในก๊าซไอเสีย โดยกระบวนการทำงานจะต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 750-1,250 °C

2) Economizer Sorbent Injection เป็นเทคโนโลยีที่จะทำการฉีดสารดูดซับไปในก๊าซไอเสียบริเวณใกล้ Economizer โดยกระบวนการจะใช้อุณหภูมิประมาณ 300-650 °C

3) Duct Sorbent Injection เป็นเทคโนโลยีพ่นสารดูดซับไปยังก๊าซไอเสียบริเวณท่อที่ออกจาก Air Preheater ที่อุณหภูมิประมาณ 150 °C

4) Hybrid Sorbent Injection จะเป็นการพ่นฉีดสารดูดซับทั้งในส่วนบริเวณเตาเผาและท่อที่ออกจาก Air Preheater ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถดูดซับ SO_2 ได้ดีที่สุดประมาณ 90% [38]



รูปที่ 22 กระบวนการทำงานของ Dry Sorbent Injection System [38]

1.2.3 กระบวนการหลังการเผาไหม้ (Post Combustion)

กระบวนการหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง มักจะเป็นเทคโนโลยีถนอมหินสะอาดในรูปแบบกำจัดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ทั้งในรูปแบบกำจัดฝุ่น และก๊าซไอเสียอื่นๆ อาทิเช่น ก๊าซของค์ประกอบซัลเฟอร์ ก๊าซของค์ประกอบไนโตรเจน ก๊าซของค์ประกอบคาร์บอน โดยมีเทคโนโลยีในการจัดตั้งต่อไปนี้

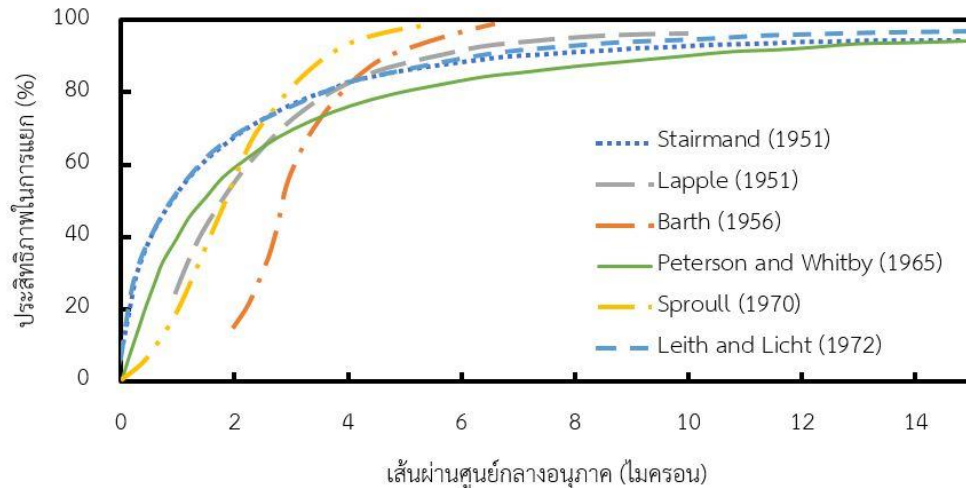
1) Cyclones

ไซโคลนเป็นเครื่องมือคัดแยกอนุภาคของแข็ง (ละอองฝุ่น) ออกจากของไหล (ของเหลว หรือ ก๊าซ) โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ตำแหน่งทางเข้าของไซโคลน อนุภาคของแข็งที่ผสมกับของไหล จะถูกป้อนเข้ามา โดยอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังของไซโคลนที่เป็นรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดไหลแบบหมุนวน และ ก่อตัวเป็นกระแสมหมุนวน (Vortex) ขณะที่อนุภาคของแข็งถูกเหวี่ยงอยู่ในกระแสมหมุนวนจะเกิดแรงในแนวสัมผัส (Tangential force) ที่จะผลักให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนตัวออกจากศูนย์กลางกระแสมออกสู่ผนังไซโคลน ด้านล่างของไซโคลนที่ลักษณะเป็นทรงกรวย ที่ปลายทางออกมีลักษณะบีบเข้า ทำให้กระแสมมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลสวนทางย้อนกลับขึ้นด้านบน ด้วยความต่างของความหนาแน่นของของไหลและอนุภาคของแข็ง จึงทำให้อนุภาคของแข็งถูกผลักลงสู่ทางออกทางด้านล่าง และของไหลที่ปราศจากอนุภาคของแข็งจึงไหลออกที่ทางออกด้านบนของไซโคลน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้ที่ประมาณ 75-99% [39]



รูปที่ 23 กระบวนการทำงานของ Cyclones [40]

การออกแบบไซโคลนในปัจจุบัน มักคำนึงถึงการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การใช้งานที่เน้นประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคสูง (High Efficiency Cyclone) ไซโคลนประเภทนี้มักจะมีขนาดเล็กที่เน้นในการแยกอนุภาคของแข็งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็ต้องใช้พลังงานสูงในการดำเนินการ ด้วยข้อจำกัดในด้านอัตราการไหลของของไหลที่อุปกรณ์สามารถรับได้ เช่น ไซโคลน Stairmand ไซโคลน Peterson และ Whitby ไซโคลน Leith and Licht และไซโคลน Lapple จึงทำให้มีไซโคลนอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งจะเน้นที่ปริมาณในการคัดแยกหรืออัตราการไหลที่สูง (high flowrate cyclone) ตัวไซโคลนมักมีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้สามารถรับรองอัตราการไหลที่สูงขึ้นแต่ก็แลกมากับประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต่ำลง เช่น ไซโคลน Sproull และไซโคลน Barth ไซโคลนแต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้นมีโครงสร้างหลักดังรูปที่ 26 ไซโคลนแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันที่สัดส่วนท่อทรงกระบอก ท่อทรงกรวย ความยาวของตัวไซโคลน ช่องป้อนเข้าของไหล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นต้น

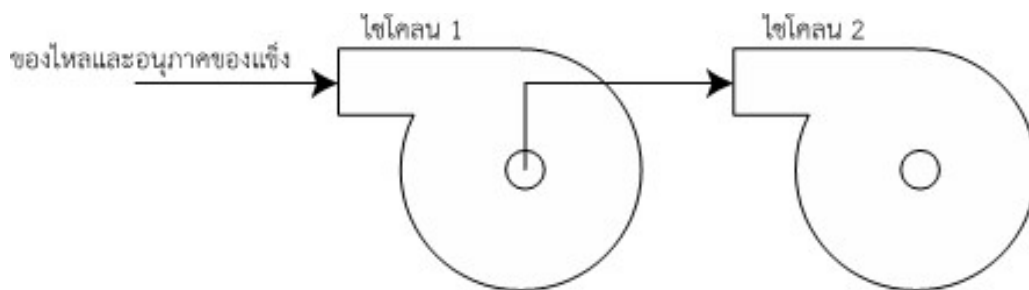


รูปที่ 24 ประสิทธิภาพการแยกไซโคลนประเภทต่างๆ [39]

จากรูปที่ 27 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่ไซโคลน Stairmand สามารถแยกอนุภาคได้ คือ ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 ไมครอน โดยมีประสิทธิภาพในการแยก 60-70% เท่านั้น วิศวกรจึงพยายามออกแบบไซโคลนให้สามารถคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกให้สูงขึ้น คือการต่อไซโคลนมากกว่า 1 ตัวเข้าด้วยกัน ในรูปแบบอนุกรมและแบบขนาน ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแล้วยังช่วยให้สามารถคัดแยกได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย

1.การต่อไซโคลนแบบอนุกรม

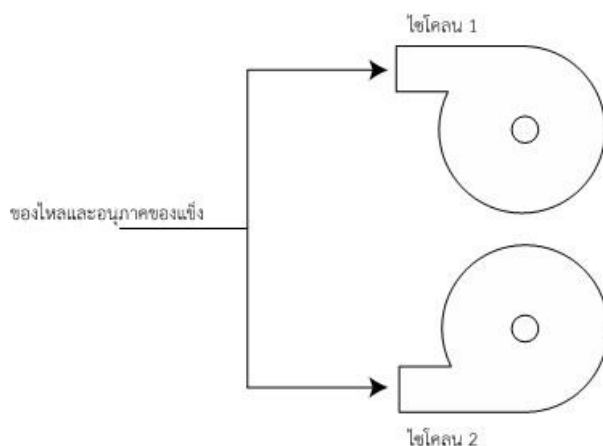
การต่อไซโคลนแบบอนุกรมจะทำการป้อนเข้าของไหลและอนุภาคของแข็งที่ไซโคลนตัวที่หนึ่ง หลังจากเกิดการคัดแยกอนุภาค ของแข็งที่ไม่สามารถคัดแยกได้ด้วยไซโคลนตัวแรก จะถูกส่งต่อเข้าสู่ไซโคลนตัวที่สอง ดังแสดงใน รูปที่ 28 เพื่อทำการคัดแยกอีกครั้งจนได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต้องการเมื่อทำการเปรียบเทียบการคัดแยกด้วยอุปกรณ์ไซโคลนตัวเดียวและอุปกรณ์ไซโคลนสองตัวแบบต่ออนุกรม พบว่า ความดันลดในระบบที่ใช้อุปกรณ์ตัวเดียวมีค่าสูงกว่าไซโคลนตัวแรกแบบต่ออนุกรม โดยไซโคลนตัวแรกจะเสมือนเป็นการคัดกรองอนุภาคแบบหยาบที่เน้นการดักจับอนุภาคของแข็งปริมาณมาก และไซโคลนตัวที่สอง ทำหน้าที่ในการขัดแยกอนุภาคแบบละเอียดอีกครั้ง จึงสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการคัดแยกโดยรวมนั้นสูงกว่าการใช้อุปกรณ์ไซโคลนเพียงตัวเดียว



รูปที่ 25 การต่อไซโคลนในรูปแบบอนุกรม [39]

2.การต่อไซโคลนแบบขนาน

การต่อไซโคลนแบบขนาน ของไหลและอนุภาคของแข็งจะถูกแบ่งออกไปป้อนเข้าสู่ไซโคลนทั้งสองตัวพร้อมกันในรูปแบบการต่อแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 29 การต่อแบบขนานนั้นให้ประสิทธิภาพในการแยกได้ดีเมื่อเทียบกับการใช้แบบตัวเดียวโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเร็วในการป้อนเข้าของของไหลสูง ดังนั้นการต่อแบบขนานจึงเหมาะกับการเพิ่มขีดจำกัดความสามารถในการรองรับอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการต่อไซโคลนแบบขนาน คือ การรักษากระแสภายในไซโคลนทั้งสองตัว และการแบ่งอัตราการไหลป้อนเข้าให้เท่ากัน



รูปที่ 26 การต่อไซโคลนในรูปแบบขนาน [39]

นอกจากรูปแบบการต่อไซโคลนแบบอนุกรมและแบบขนานแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนอีกมากมาย ตัวอย่างที่พบได้มากในการใช้งานไซโคลนในกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณของแข็งในระบบ การแตกหักของอนุภาคของแข็ง และระบบลำเลียงของแข็ง เป็นต้น

2) Wet Scrubbers

เครื่องจับฝุ่นแบบเปียก (Wet Collectors) หรือสครับเบอร์ (Scrubbers) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ของเหลวดักจับฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กอย่างมีประสิทธิภาพและจับกักมลพิษจากกระแสก๊าซได้ในขณะเดียวกันโดยฉีดของเหลวเป็นละอองฝอยสู่กระแสก๊าซ หรือให้กระแสก๊าซไหลผ่านฟิล์มของเหลวด้วยความเร็วสูง หรือไหลผ่านชั้นวัสดุที่มีของเหลวเคลือบที่ผิว เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ใกล้ละอองหรือหยดน้ำจะสัมผัสกับละอองน้ำด้วย โดยประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้ที่ประมาณ 90-99% กลไกหลักในกระบวนการทำงานของ Wet Scrubber ประกอบด้วย 3 หลักการ คือ

1) การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Impact by inertia) การที่อนุภาคฝุ่นในกระแสก๊าซไอเสียชนและเกาะติดกับหยดของเหลวเนื่องจากมีแรงเฉื่อย ถ้าอนุภาคฝุ่นมีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นยิ่งมากและความเร็วสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับหยดของเหลวยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อยจะมีค่ามากขึ้น

2) การแพร่ (Diffusion) อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในก๊าซไอเสียจะเคลื่อนไหวแบบ บราวเนียน (Brownian motion) เพราะถูกชนถี่มากโดยโมเลกุลของมลสารที่อยู่รอบๆ การเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน (Brownian motion) ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากเปรียบเสมือนได้กับการแพร่ของโมเลกุลของมลสารที่ผสมอยู่ในก๊าซไอเสีย เมื่อมลสารนั้นแพร่ไปพบกับผิวที่กีดขวาง เช่น ฟิล์มหรือหยดของเหลวก็จะเกาะติดที่ผิวนั้น การแพร่มีบทบาทสำคัญมากในการจับอนุภาคละเอียดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ไมโครเมตรหรือเล็กกว่าและในการดักกลืนมลสาร

3) การสกัดกั้น (Interception) กลไกของการสกัดกั้นจะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของเครื่อง wet scrubber เป็นกลไกการทำงานที่อนุภาคมาสัมผัสและเกาะติดกับสิ่งกีดขวางโดยทั่วไปการกระทบเนื่องจากความเฉื่อยเป็นกลไกการจับอนุภาคที่สำคัญที่สุดของ สครับเบอร์ เมื่อกระแสก๊าซมีความเร็วมากกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที หยดน้ำที่จับอนุภาคไว้เหล่านี้จะถูกแยกออกจากกระแสก๊าซโดยแรงโน้มถ่วง หรือให้กระแทกแผ่นกั้น (Baffles) หรือโดยแรงเหวี่ยง

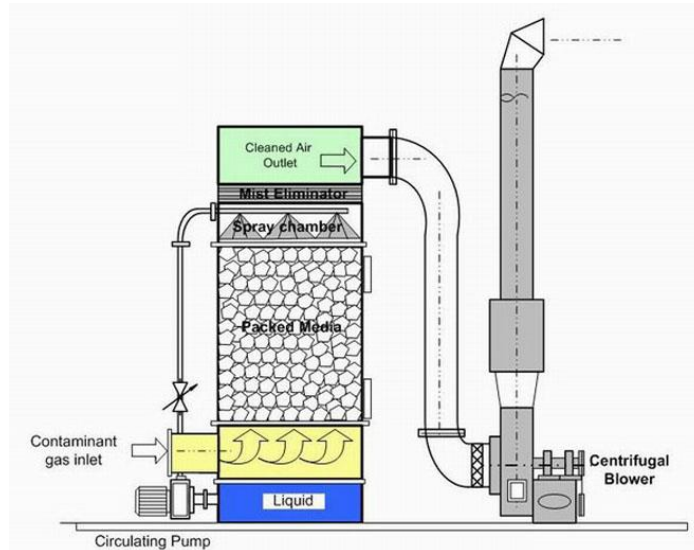
ในการดักจับฝุ่นด้วยสครับเบอร์มี 3 ขั้นตอนได้แก่

1) อนุภาคสัมผัสและดักจับด้วยหยดของเหลวหรือฟิล์มของเหลว อนุภาคจะสัมผัสและถูกดักจับในเครื่อง Scrubber

2) กระบวนการแยกของเหลวออก จะใช้เครื่องดักละอองน้ำ (Mist eliminator) ที่ติดบนเครื่อง Scrubber เพื่อแยกหยดน้ำออกจากก๊าซ

3) บำบัดของเหลวที่จับฝุ่นก่อนการระบายทิ้ง จะใช้อุปกรณ์ต่างๆ อาทิ เครื่องตกตะกอน (Clarifier) เครื่องกรอง (Vacuum Filter) และบ่อพัก (Fettling Pond) เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ออกจาก Scrubber

ระบบ Scrubber ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ปั๊ม พัดลม อุปกรณ์บ่อนสารเคมี ระบบท่อ และอุปกรณ์ตรวจวัด (Instrument) สำหรับ Scrubber ที่ใช้ดักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 1 ไมครอน) มักติดตั้งอุปกรณ์สำหรับหล่อเย็นก๊าซก่อนเข้า Scrubber และอุปกรณ์หล่อเย็นของเหลวเพื่อให้ไอน้ำควบแน่น สำหรับเครื่องดักละอองน้ำมีหลายชนิด ได้แก่ ไซโคลน Chevron Mesh pads และ Woven pads [41]

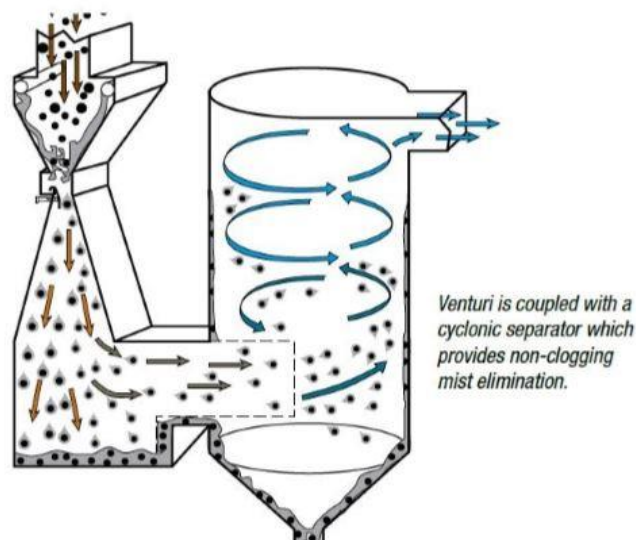


รูปที่ 27 กระบวนการทำงานของ Wet Scrubber [42]

ประเภทของ Wet Scrubber แบ่งออกเป็นหลายประเภทได้แก่

1) Venturi Scrubber

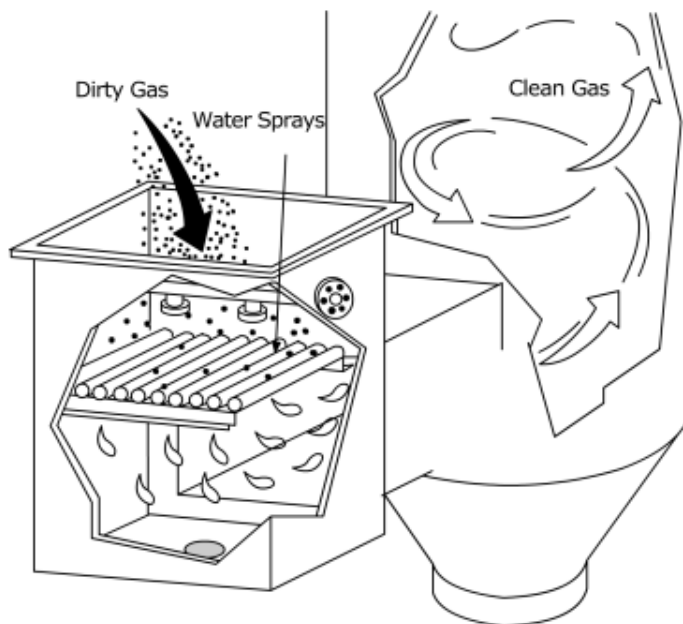
เป็นเครื่องจักรอนุภาคฝุ่นระบบเปียกที่ใช้กันมากที่สุดในชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการติดตั้งและมีประสิทธิภาพสูงมากในการจับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และสามารถดูดซึมก๊าซได้ ซึ่งมีหลักการตามรูปที่ 31 [41]



รูปที่ 28 กระบวนการทำงานของ Venturi Scrubber [43]

2) Rod Deck Scrubbers

เป็นเทคโนโลยีที่คล้ายกับ Venturi Scrubber เนื่องจากใช้ก๊าซที่มีความเร็วสูงกระแทกกับของเหลวให้เป็นละออง เพื่อชนฝุ่นและจับฝุ่นด้วยกลไกการกระทบ (Impaction) แต่ใน Rod Deck Scrubbers กระแสก๊าซจะถูกเร่งให้มีความสูงขณะไหลผ่านแท่ง Rod ตามรูปที่ 32 [41]

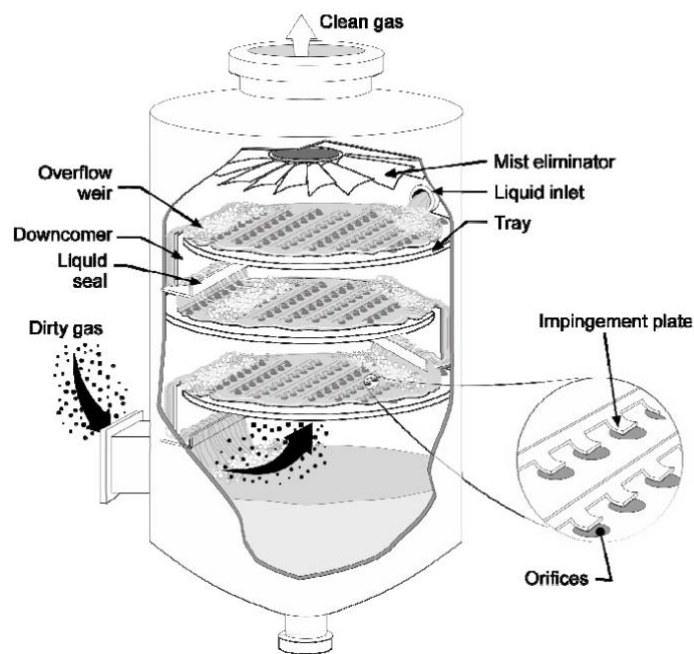


รูปที่ 29 กระบวนการทำงานของ Rod Deck Scrubber [44]

3) Impingement Tray Scrubber

เป็นเทคโนโลยี Scrubber รูปแบบหนึ่งที่มี Scrubber แบบถาดอยู่ด้านใน โดยด้านในจะประกอบด้วย หอตั้งที่มีถาดวางในแนวราบอยู่ด้านใน โดยก๊าซไอเสียจะไหลเข้าสู่ทางส่วนล่างของระบบและไหลผ่านช่องหรือรูของแต่ละถาดก่อนไหลผ่านไปยังส่วนบนของเครื่อง และทำการปล่อยหรือพ่นของเหลวจากทางด้านบนของระบบให้ไหลผ่านแต่ละถาดและออกสู่ทางด้านล่าง ก๊าซที่ไหลผ่านรูจะสัมผัสกับของเหลวที่เป็นละอองฝอย ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลหรือจับอนุภาคฝุ่น โดยมีหยดน้ำเป็นตัวดักจับ

Impingement Tray Scrubber เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานปานกลางและมีประสิทธิภาพการจับอนุภาคอยู่ในระดับปานกลางเช่นเดียวกัน เหมาะสำหรับการดักจับฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน **รูปที่ 33** จะแสดง Impingement tray scrubber ซึ่งใช้แผ่นกั้นวางเหนือถาด เพื่อให้ก๊าซกระแทกของเหลวเป็นละอองฝอยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่น [41]



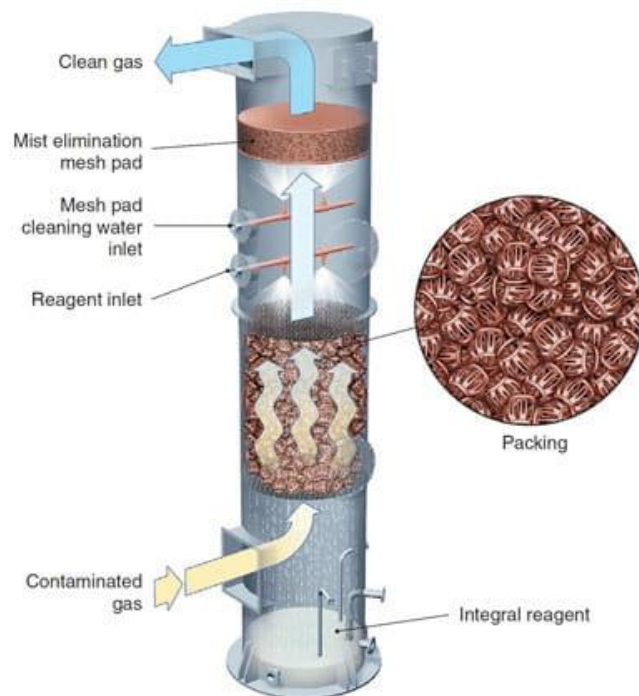
รูปที่ 30 กระบวนการทำงานของ Impingement Tray Scrubber [44]

4) Packed-Bed Scrubber

เป็นเทคโนโลยีที่มักใช้กำจัดก๊าซและไอ แต่สามารถดักจับฝุ่นได้ด้วย ลักษณะเป็นหอที่ใช้บรรจุวัสดุ (Packing Materials) ซึ่งทำด้วยพลาสติกหรือเซรามิคมีรูปร่างต่างๆ กัน โดยทั่วไปของเหลวจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดเหนือชั้นวัสดุแล้วไหลผ่านลงสู่ด้านล่างของหอ ส่วนกระแสก๊าซที่มีอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุในขณะที่ก๊าซไหลผ่านช่องว่างระหว่างชั้นวัสดุได้มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลอนุภาคจะชนกับวัสดุที่มีแผ่นฟิล์มของเหลวเคลือบอยู่และไหลไปพร้อมกับของเหลวสู่ด้านล่างของเครื่อง โดยการไหลภายในเครื่องแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ [35]

- 1) แบบไหลสวนทางกัน (Countercurrent flow)
- 2) แบบไหลตามกัน (Cocurrent flow)
- 3) แบบที่กระแสก๊าซไหลในแนวตั้งฉากกับของเหลว (Cross flow)

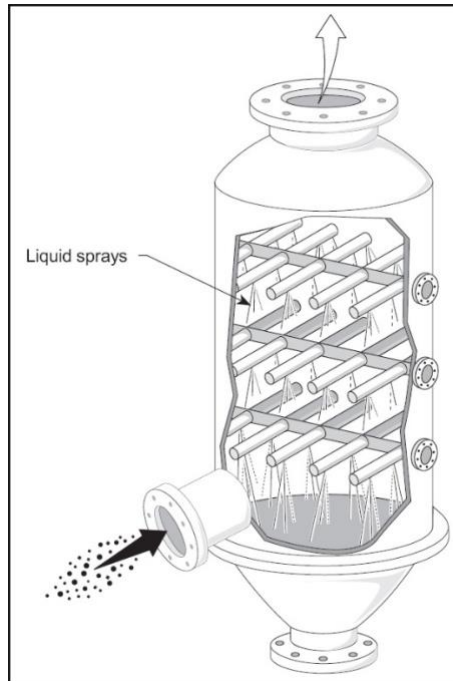
น้ำอาจถูกฉีดจากทางด้านบน ด้านหน้า หรือด้านหลังของชั้นวัสดุก็ได้ โดยสเปรย์จะช่วยล้างอนุภาคที่ฝุ่นที่ติดกับผิวของชั้นวัสดุ ซึ่งหอที่บรรจุวัสดุนี้มักเกิดปัญหา เช่น วัสดุเกิดการอุดตันได้ฐานที่ลึกทำให้ค่าความดันสูญเสียและประสิทธิภาพมีค่าสูงแต่อุดตันได้ง่าย ฐานที่บางจะทำให้ก๊าซไหลไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดการไหลล้น ในหอแบบไหลสวนทางกันได้ถ้าฉีดของเหลวมากเกินไปหรือก๊าซไหลน้อยเกินไป [41]



รูปที่ 31 กระบวนการทำงานของ Packed-Bed Scrubber [45]

5) Spray Tower Scrubber

เป็นเทคโนโลยีดักจับฝุ่นแบบเปียกที่มีระบบการทำงานง่าย ใช้พลังงานต่ำ มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยที่ก๊าซไอเสียจะไหลสวนทิศทางกับของเหลว ที่ส่วนบนของหอมีแผ่นดักละอองน้ำเพื่อกำจัดหยดน้ำที่เหลือและที่ถูกก๊าซพัดลอยขึ้น สามารถใช้กับก๊าซที่มีปริมาณฝุ่นมากโดยอุดตันเหมาะสำหรับการดักจับฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนและยังดักจับก๊าซมลพิษอื่นได้

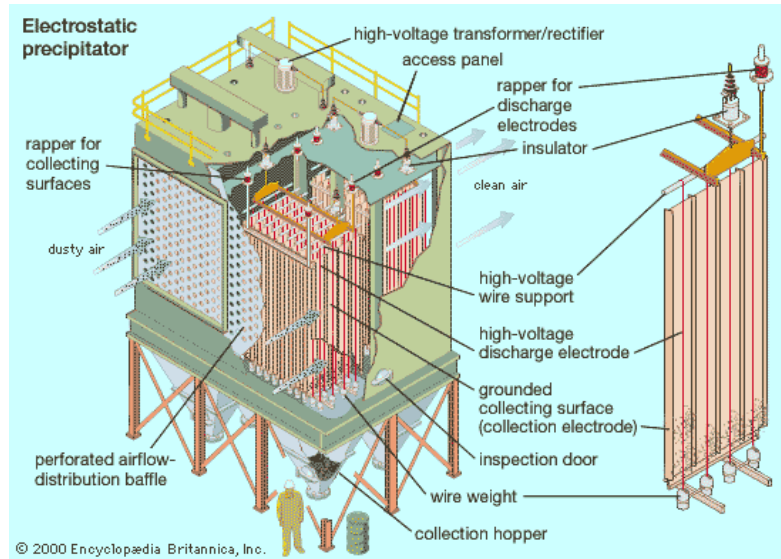


รูปที่ 32 กระบวนการทำงานของ Spray tower scrubber [46]

3) Electrostatic Precipitators (ESP)

เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์ หรือ ESP อาศัยแรงทางไฟฟ้าในการแยกฝุ่นออกจากอากาศ การทำงานประกอบด้วยแผ่นที่ให้ประจุกับอนุภาคฝุ่นหรือแผ่น Corona ทำหน้าที่ในการชาร์ตประจุลบให้กับฝุ่นและแผ่นเก็บฝุ่น หรือ Collecting Plate ซึ่งมีประจุบวกทำหน้าที่จับและเก็บฝุ่น โดยฝุ่นที่ได้รับประจุลบจากแผ่น Corona จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่น Collecting Plate ที่มีขั้วบวกตามแรงทางประจุไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นมากกว่า 99% และสามารถกำจัดขนาดฝุ่นได้ตั้งแต่ 0.1-100 ไมครอน ประเภทของ ESP มี 3 รูปแบบได้แก่

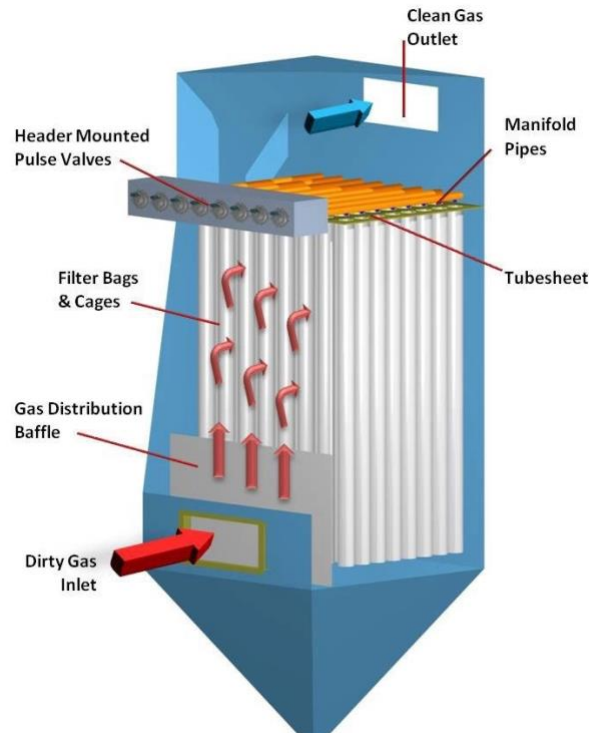
- 1) Cold Side ESP เป็นเทคโนโลยีในการติดตั้ง ESP หลัง Air Preheater โดยการทำงานดำเนินการที่อุณหภูมิ 130-180 °C
- 2) Hot Side ESP เป็นเทคโนโลยีในการติดตั้ง ESP หลัง Air Preheater โดยการทำงานดำเนินการที่อุณหภูมิ 300-450 °C
- 3) Wet ESP โดนจะมีแผ่นฟิล์มเหลวเคลือบอยู่บน Collector Plate เพื่อช่วยในการดักจับอนุภาคหลังจากการถูกทำให้แตกตัวโดยสนามไฟฟ้า



รูปที่ 33 กระบวนการทำงานของ Electrostatic Precipitators [47]

4) Fabric Filter

ใช้หลักการกรองแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซ เครื่องกรอง คือ โครงสร้างที่เป็นรูปท่อน ประกอบด้วยสารที่เป็นเม็ดเล็กหรือเส้นใย ซึ่งจะกักกันอนุภาคไว้และให้ก๊าซไหลผ่านช่องว่างของเครื่องกรอง โดยปกติเครื่องกรองทำด้วยผ้าทอหรือผ้าสักหลาด เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถบำบัดฝุ่นละออง ช่วงขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมครอนขึ้นไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของอนุภาค 0.2-0.5 ไมครอนที่ดักจับยาก โดยประสิทธิภาพการจับฝุ่นนั้นมากกว่าถึง 99% แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการทำงานของเทคโนโลยีจะต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 120-180 °C [58] รูปที่ 37 แสดงระบบดักจับฝุ่นแบบ Pulse Jet Bag Filter



รูปที่ 34 กระบวนการทำงานของ Pulse Jet Bag Filter [49]

5) Flue Gas Desulfurization (FGD)

ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า FGD นั้น เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันปนอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันได้ที่ประมาณ 80-90% โดยปัจจุบันเทคโนโลยีแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1) Wet Scrubbers for SO_2 control

เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีเดียวกับ Wet Scrubber ที่ใช้ดักจับฝุ่น โดยเปลี่ยนของเหลวทั่วไปที่เป็นน้ำกลายเป็นน้ำผสมหินปูนแทน เพื่อดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำหินปูนเป็นตัวดูดซับและจะได้ยิปซัมเป็นผลผลิตเป็นผลพลอยได้ของการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกเป็น 3 ระบบย่อยได้แก่

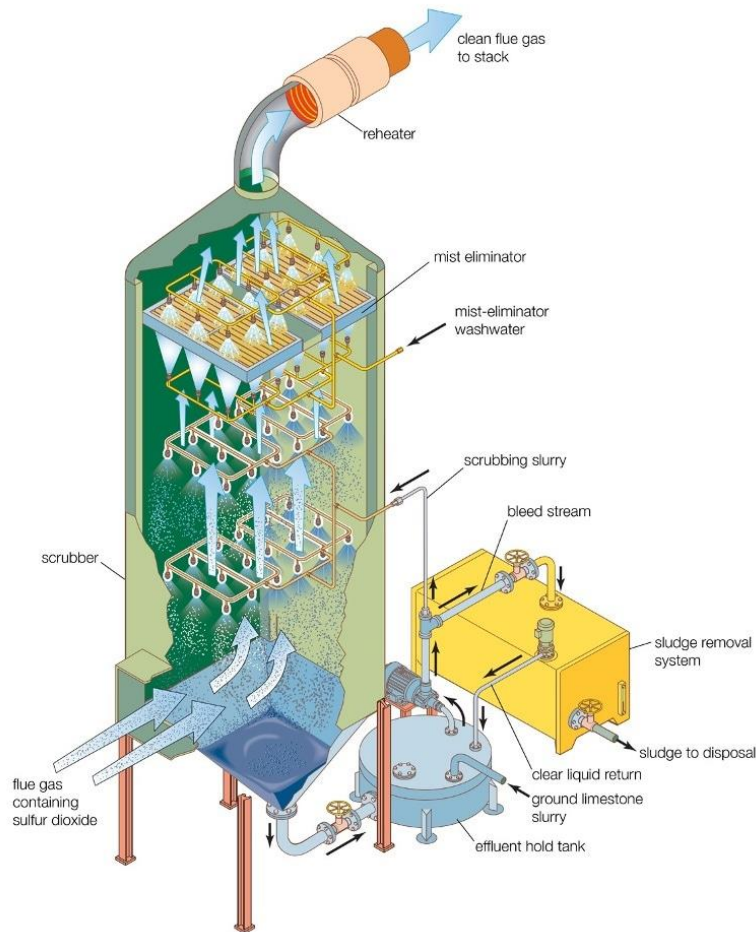
(1) ระบบเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation System) หินปูนจะถูกขนส่งมายังบริเวณ FGD และลำเลียงเข้าไปเก็บไว้ในสถานที่เก็บหินปูนซึ่งหินปูนจะถูกบดบดเข้าสู่มบดหินปูนผ่านสายพาน

จากนั้นหินปูนจะถูกบดผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมภายในโม่บดหินปูนจนกลายเป็นของเหลว และไหลลงสู่ถังพักน้ำหินปูนเหลวจะถูกปั๊มจากถังพักไปยังถังแยกขนาดโดยหินปูนเหลวที่ถูกบดได้ขนาดแล้วจะผ่านชุดแยกขนาดไปเก็บไว้ในถังบ่อน้ำหินปูน ส่วนหินปูนที่ยังไม่ได้ขนาดจะไหลกลับไปยังโม่บดเพื่อบดให้ละเอียดอีกครั้งจากนั้นก็ส่งไปเก็บไว้ในถังบ่อน้ำหินปูนก็จะมีปั๊มติดตั้ง เพื่อปั๊มน้ำหินปูนไปใช้ในระบบอื่นๆ ต่อไป และระบบดังกล่าวยังถูกออกแบบให้มีการไหลวนของน้ำหินปูนด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันน้ำหินปูนอุดตันภายในท่อนอกจากนี้ยังมีชุดใบพายกวาดติดตั้งอยู่ที่ถังบ่อน้ำหินปูนเพื่อกวาดไม่ให้น้ำหินปูนตกตะกอนด้วย

(2) ระบบดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะมีลักษณะคล้ายหอคอยขนาดใหญ่โดยภายในจะฉาบด้วยสารทนกรด เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ส่วนด้านบนจะมีชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่ด้านเข้า และด้านออก ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีลักษณะเป็นท่อคล้ายกับหม้อน้ำของรถยนต์ ดังนั้น ก๊าซไอเสียที่เข้ามามีอุณหภูมิสูงเมื่อผ่านเข้ามา ก็จะถ่ายเทความร้อนให้น้ำภายในท่อร้อนขึ้น และก๊าซไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำลง ส่วนน้ำในท่อที่ร้อนขึ้นก็จะไหลเวียนไปยังชุดถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งอยู่ด้านทางออกของถัง Absorber เพื่อถ่ายเทความร้อนให้ก๊าซไอเสียที่ออกจากถัง Absorber สู่อ่างลอย ส่วนด้านล่างของถังจะมีลักษณะเป็นอ่างและมีน้ำผสมน้ำหินปูนบรรจุอยู่ และมีอุปกรณ์ที่สำคัญติดตั้ง อยู่ คือ Recirculating Pump มีหน้าที่ปั๊มน้ำผสมน้ำหินปูน จากส่วนล่างของถังขึ้นไปก็จะมีชุดหัวฉีดที่ติดตั้ง อยู่บริเวณส่วนกลางของถัง จะมีปั๊มซึ่งมีหน้าที่ปั๊มน้ำผสมยิบซั่มจากอ่างของถังไปยังระบบแยกน้ำออกจากยิบซั่ม ในส่วนของ Oxidation Air Blower เป็นอุปกรณ์อัดอากาศเข้าไปในถังเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเติมออกซิเจนในขบวนการผลิตยิบซั่ม ในส่วนของด้านบนของถังจะมีอุปกรณ์ลักษณะคล้ายใบพาย เพื่อใช้กวาดให้สารละลายเข้ากันในถัง ส่วนกลางของถังก็จะมีหัวฉีด ทำหน้าที่ฉีดน้ำผสมน้ำหินปูนจากชุด Recirculating Pump เพื่อทำให้เกิดการพ่นกระจายของน้ำผสมหินปูนภายในถัง ถัดจากชุดหัวฉีดลงมาก็จะมีชุดตะแกรงเพื่อให้ละอองน้ำผสมน้ำหินปูนที่ฉีดจากหัวฉีดผสมกับก๊าซไอเสียได้ดียิ่งขึ้น และระหว่างชุดหัวฉีดทางด้านออกของถังกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีตะแกรงดักละอองน้ำติดตั้งอยู่ เพื่อดักไม่ให้ละอองน้ำปะปนออกไปกับก๊าซไอเสียที่ถูกแยกออกจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกไป แล้วการทำงานของระบบดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะเริ่มต้นที่เมื่อก๊าซไอเสียจากหม้อน้ำผ่านเครื่องจับฝุ่นแล้ว ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิประมาณ 160 °C ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาในถังอุณหภูมิของก๊าซไอเสียจะลดลงเหลือ 140 °C ก๊าซไอเสียดังกล่าวก็จะปะทะและคลุกเคล้ากับน้ำผสมน้ำหินปูนที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีดในถัง ซึ่งน้ำส่วนหนึ่งจะระเหยกกลายเป็นไอน้ำไปกับก๊าซไอเสีย และอุณหภูมิของก๊าซไอเสียในถัง Absorber ก็จะเย็นลงถึงอุณหภูมิอิ่มตัวที่ประมาณ 60 °C แต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่พ่นกระจายออกจากหัวฉีดได้ถูกออกแบบไว้ให้มีปริมาณสูงกว่าอัตราการระเหยกมาก จึงทำให้น้ำผสมน้ำหินปูนบางส่วนตกกลับลง

มายังอ่างด้านล่างของถัง Absorber และน้ำผสมกับน้ำหินปูนเหล่านี้ จะละลายเอาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกจากก๊าซไอเสีย โดยมีการเติมอากาศเข้ามาภายในถัง จากตั้งนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเติมออกซิเจนขึ้น ในกระบวนการจนได้เป็น ยิบซัมออกมาจากปฏิกิริยาดังกล่าว ก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากถังจะมีซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ปะปนอยู่น้อยมาก ก่อนที่ก๊าซไอเสียดังกล่าวจะออกจากถังก๊าซไอเสียจะผ่านตะแกรง เพื่อดักเอาละอองน้ำออกและผ่านไปยังชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นประมาณ 80 °C แล้วไหลออกจากถังสู่ปล่องควันจะมีพัดลมขนาดใหญ่เป็นตัวช่วยดูดก๊าซไอเสียไปยังปล่องควันและ ปล่องออกสู่บรรยากาศภายนอกต่อไป ส่วนยิบซัมที่เกิดขึ้นเป็นผลึกซึ่งปนกับสารละลายในอ่างถังและจะ ถูกปั๊มส่งไปยัง ระบบแยกน้ำออกจากยิบซัมต่อไป จากระบบดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจาก ก๊าซไอเสียนั้น สามารถดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ปริมาณสูงมาก คือปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก่อนเข้าถัง Absorber จะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ประมาณ 17 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ภายหลัง ผ่านถัง Absorber จะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ประมาณ 0.8-0.9 ตันต่อชั่วโมง

(3) ระบบแยกน้ำออกจากยิบซัม (Gypsum Dewatering System) เนื่องจากยิบซัมเหลว มีส่วนผสมของน้ำต้องมีการแยกน้ำจะถูกส่งไปยังเครื่องแยกน้ำที่มีลักษณะเป็นสายพานที่มีรูพรุน และ มีส่วนของสายพานติดอยู่ติดกับ ระบบปั๊มสุญญากาศ เพื่อดูดน้ำให้แยกออกจากยิบซัม น้ำดังกล่าวก็จะไป เก็บรวมกันที่ถังน้ำ เพื่อเตรียมน้ำกลับมาใช้ในระบบอื่นๆ อีกครั้ง ส่วนผลึกยิบซัมจะถูกส่งไปกับสายพาน และไหลลงสู่สายพานส่งต่อไปเพื่อนำไปทิ้งหรือใช้งานอื่นๆ ต่อไป [50]

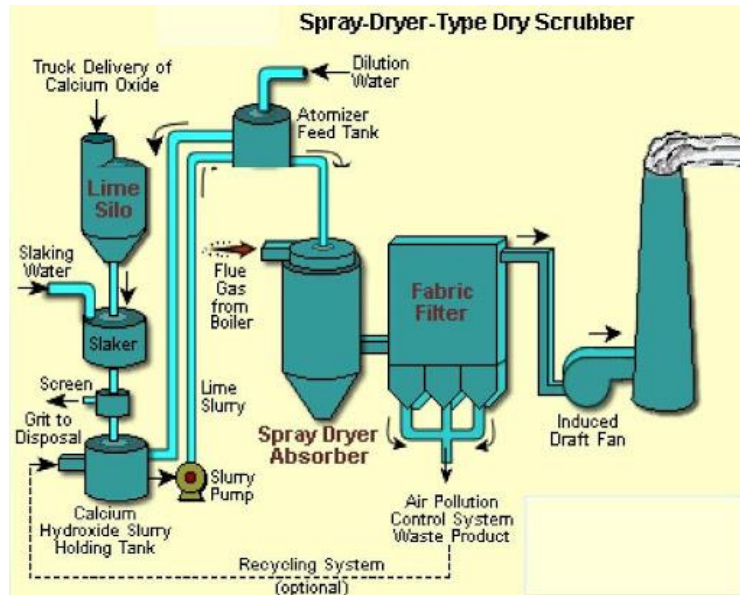


รูปที่ 35 กระบวนการทำงานของ Wet Scrubber for SO_2 [50]

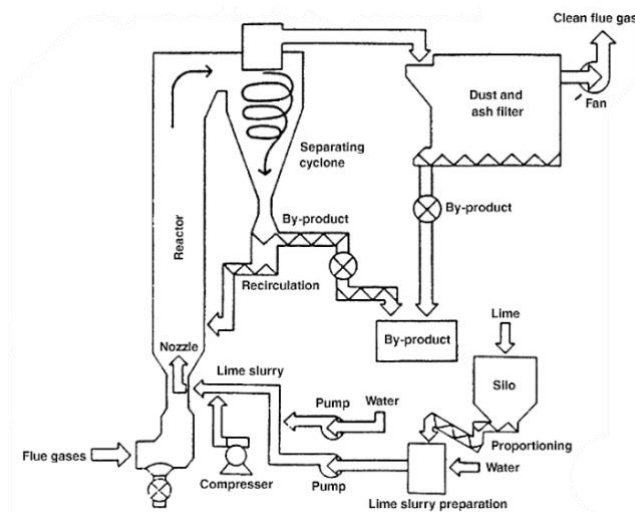
2) Spray Dry Scrubber for SO_2 Control

เทคโนโลยีนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ Spray dry และ Spray Semi-dry โดยเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพกำจัด SO_x ได้ถึง 80-90% ใกล้เคียงกับ Wet Scrubber ที่มีการนิยมการใช้เป็นอย่างมาก โดยกระบวนการนี้ใช้ตัวดูดซับเป็นน้ำที่มีปูนขาวผสมอยู่ และทำการฉีดเข้าไปในถังปฏิกรณ์ในรูปของของเหลว (Semi Dry) หรือ รูปของผงความชื้น (Dry)

กระบวนการทำงานเมื่อตัวดูดซับได้ทำการฉีดพ่นเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แล้วได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียจนแห้ง จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่างปูนขาวและ SO_x (ส่วนใหญ่เป็น SO_2) ในก๊าซไอเสียจนเกิดเป็นของแข็งและถูกรวบรวมยังด้านล่างของถังปฏิกรณ์ และทำการหมุนเวียนเข้าสู่ถังเก็บตัวดูดซับเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป [51]



รูปที่ 36 กระบวนการทำงานของ Spray Dry Scrubber [52]



รูปที่ 37 กระบวนการทำงานของ Semi-Dry Scrubber

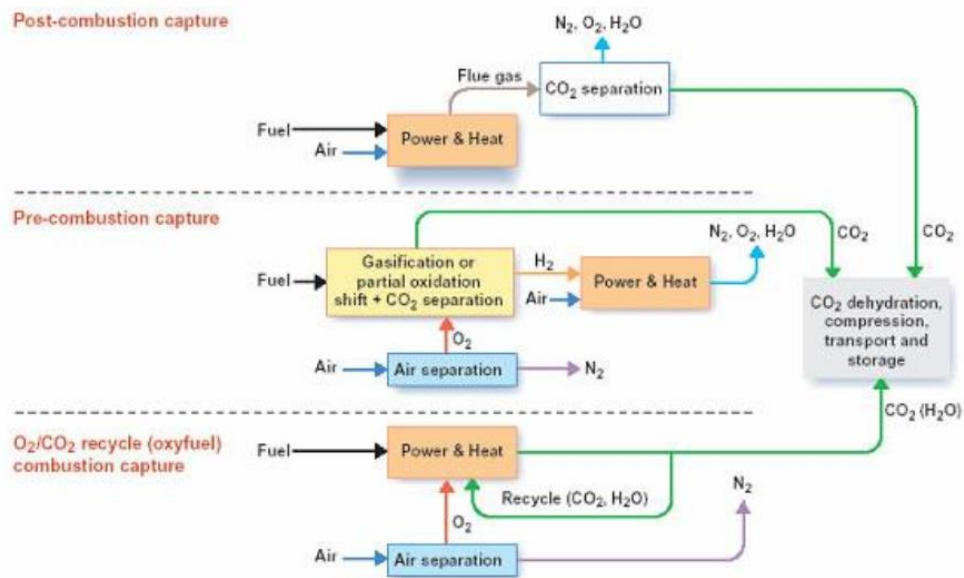
6) Carbon Capture and Storage (CCS)

การกักเก็บ CO₂ เป็นเทคโนโลยีเพื่อการดักจับ CO₂ จากแหล่งที่มีการปล่อย CO₂ ที่สูงเกิน 100,000 ตันต่อปี แล้วขนถ่ายไปกักเก็บอย่างถาวรในแหล่งกักเก็บ ซึ่งการดักจับและการกักเก็บ CO₂ มีหลายวิธีในการกักเก็บเพื่อช่วยลดปริมาณการปล่อย CO₂ สู่ชั้นบรรยากาศ ระบบ CCS แบ่งส่วนประกอบหลักได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนดักจับ (Capture) ขั้นตอนขนส่ง (Transport) และขั้นตอนกักเก็บ (Storage) ขั้นตอนดักจับเป็นขั้นตอนในการแยก CO₂ จากก๊าซไอเสีย โดยขั้นตอนดักจับจะเป็นกระบวนการหลัง

ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ขั้นตอนขนส่งเป็นขั้นตอนในการพา CO_2 ที่ถูกดักจับแล้วนำไปสถานที่กักเก็บที่เหมาะสม และขั้นตอนการกักเก็บ สถานที่ในการกักเก็บจะขึ้นอยู่กับวิธีการคัดเลือกในการกักเก็บที่เป็นไปได้ทั้งทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์โดยที่ก๊าซ CO_2 จะถูกบีบอัดให้สูงเพื่อสะดวกต่อการขนย้ายและการกักเก็บต่อไป [54]

1. Carbon Capture

เทคนิคการดักจับ CO_2 โดยทั่วไปต้องทำการแยกก๊าซ CO_2 ออกจากก๊าซไอเสียและทำการบีบอัดก๊าซเพื่อสะดวกในการขนส่ง โดยเทคโนโลยีที่ใช้ได้แก่ เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ได้แก่ การดูดซับทางเคมี (Amine) การดูดซับทางกายภาพ การกลั่นด้วยความเย็น ระบบเมมเบรน เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ อาทิ Gasification IGCC ที่สามารถช่วยในการดักจับ CO_2 ได้ และเทคโนโลยีระยะการเผาไหม้ ได้แก่ Oxy-Fuel Combustion ที่สามารถเผาไหม้ได้เกือบ 100% ส่งผลให้สามารถดักจับ CO_2 ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการดักจับ CO_2 เป็นไปตามรูปที่ 41 [54]



รูปที่ 38 ภาพรวมกระบวนการ CO₂ Capture [55]

1) เทคโนโลยีดักจับ CO₂ ก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion Capture)

การดักจับก่อนการเผาไหม้จะแยก CO₂ ออกจากกระบวนการแปรรูปเป็นก๊าซและการรีฟอร์มมิ่งเชื้อเพลิงหรือ Syngas ที่ประกอบด้วย H₂ CO และ CO₂ โดยจะทำการแยก CO₂ ออกจาก Syngas ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเข้าสู่กระบวนการแยก CO₂ ไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพหรือทางเคมี โดยเทคโนโลยี Pre-Combustion capture มักจะพบในเทคโนโลยีที่สามารถผลิต Syngas ได้ ได้แก่ Integrated gasification combined cycle (IGCC) และ Gasification โดยข้อดีของการดักจับ CO₂

ก่อนการเผาไหม้ ได้แก่ อากาศยังไม่ได้ถูกเจือจางด้วยอากาศเผาไหม้ และอากาศมักจะสามารเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีการแยก CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น pressure-swing absorption หรือ ใช้สารละลายทางกายภาพ อาทิ เมทานอลหรือโพลีเอทิลีนไกลคอล [54]

2) เทคโนโลยีดักจับ CO_2 ระยะการเผาไหม้ (Combustion Capture)

(1) Oxy-Fuel Combustion

โดยปกติ การเผาไหม้ (Combustion) เกิดขึ้นได้ระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิง (Fuel) และก๊าซออกซิเจน (Oxygen) ที่อยู่ในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Combustion Air) ซึ่งปริมาณออกซิเจนในอากาศจะมีเพียง 21% โดยปริมาตรเท่านั้น โดยสัดส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen) ซึ่งมีประมาณ 78% โดยปริมาตร ดังนั้น การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ (Sensible Heat Loss) โดยส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นกับก๊าซไนโตรเจน

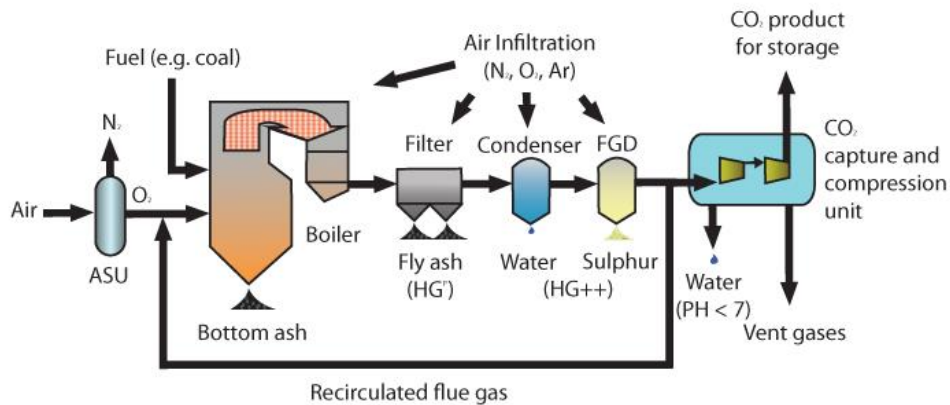
การเผาไหม้แบบ Oxy-Fuel Combustion เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการลดความสูญเสียดังกล่าว โดยใช้หัวเผาแบบ Oxy-Fuel ซึ่งเป็นหัวเผาที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ (Combustion) ได้อย่างเต็มที่ โดยสามารถลดปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบบทั่วไป (ลักษณะคล้ายกับหัวเผาชนิดอื่นๆ แต่สามารถให้เปลวไฟอุณหภูมิสูงได้) มีทั้งแบบที่ใช้ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตาเนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถให้อุณหภูมิสูงกว่าหัวเผาอื่นๆ ได้หัวเผานี้จึงมักนำไปใช้ในงานเตาหลอมแก้ว หลอมโลหะ เตาให้ความร้อนซ้ำกับโลหะ (Metal Reheating) และเตาให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับขั้น (Ladle Reheating) [56]



รูปที่ 39 Oxy-Fuel Burner [56]

Oxy-Fuel Combustion สามารถแยก CO_2 ออกจากอากาศไอเสียที่เหลือน้อยด้วยกระบวนการแยก CO_2 จากอากาศเสียด้วยทางเคมีหรือกายภาพ โดยการดักจับนั้นก๊าซไอเสียส่วนหนึ่งจะไหลกลับเข้าสู่

ห้องเผาไหม้เพื่อรักษาอุณหภูมิ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกควบแน่นให้กลายเป็นคอนเดนเสทก่อนทำการบีบอัด และส่งไปยังระบบขนส่งและกักเก็บต่อไป



รูปที่ 40 กระบวนการทำงานของ Oxy-Fuel Combustion [57]

3) เทคโนโลยีดักจับ CO₂ หลังการเผาไหม้ (Post-Combustion capture)

กระบวนการดักจับ CO₂ หลังการเผาไหม้นั้น CO₂ จะปะปนกับก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ ดังนั้นกระบวนการดักจับ CO₂ หลังการเผาไหม้จะมุ่งเน้นไปที่การแยก CO₂ จากก๊าซไอเสีย ซึ่งเทคโนโลยีในการแยก CO₂ มีดังต่อไปนี้

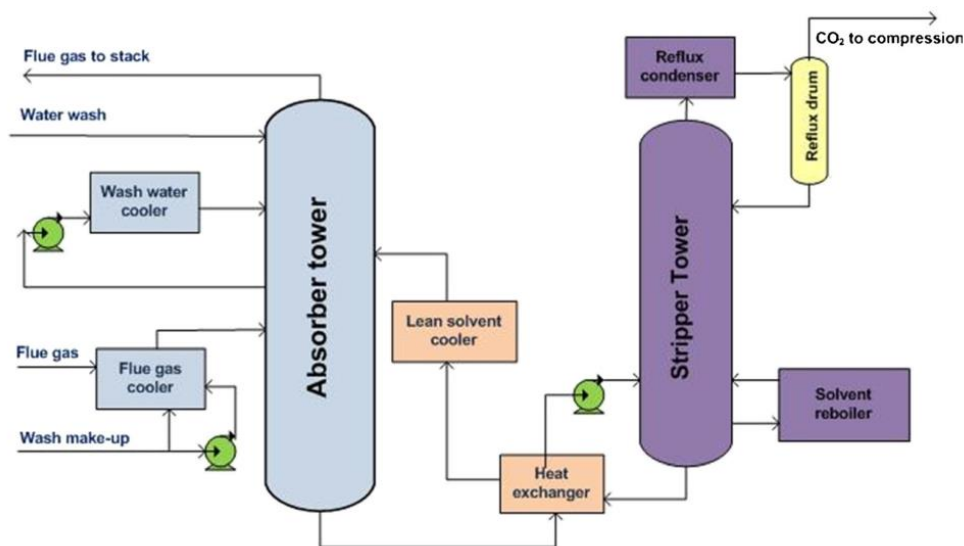
(1) กระบวนการดักจับ CO₂ แบบดูดซึม (Absorption)

Amine Solvent Technology

เทคโนโลยีตัวทำละลายทางเคมีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันสำหรับการดักจับคาร์บอนได้แก่ ตัวดูดซึมสารเคมีที่มีเอมีน (Amine) เป็นพื้นฐาน สำหรับหลักการพื้นฐานของ Amine Solvent Technology CO₂ ในสถานะก๊าซจะละลายในสารละลายของน้ำและสารประกอบของเอมีน โดยเอมีน จะทำปฏิกิริยากับ CO₂ ในสารละลายเพื่อสร้างโปรตรอนเอมีน (AH⁺), ไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) และ คาร์บาเมต (ACO₂⁻) เมื่อปฏิกิริยาเหล่านี้ดำเนินต่อไป CO₂ จะถูกขับออกจากสถานะก๊าซเข้าสู่สถานะ ของสารละลายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากศักยภาพทางเคมีของสถานะสารละลายของเหลวที่อุณหภูมิดังกล่าว เมื่อสารละลายถึงจุดที่ CO₂ ไม่สามารถละลายต่อให้ สารละลายจะถูกดึงออกจากการสัมผัสกับก๊าซและ ให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีย้อนกลับและปล่อย CO₂ ที่มีความบริสุทธิ์สูง

จากนั้นตัวทำละลายเอมีนจะนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อสัมผัสกับก๊าซไอเสียใหม่เพื่อทำการดูดซึม CO₂ อีกครั้ง ข้อควรระวังก๊าซไอเสียที่จะนำเข้าสู่ระบบนี้จะต้องทำการเย็นลงก่อนและถูกบำบัดก๊าซไอเสียอื่นๆ

อาทิ กำมะถัน ไนโตรเจนออกไซด์ และอนุภาคอื่นๆ เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับเอมีน หรือลดการเกิดปฏิกิริยากับ CO_2 ได้ [54]



รูปที่ 41 กระบวนการทำงานของ Amine Solvent Technology [58]

การผสมแอลกอฮอล์และแอมโมเนียอย่างง่ายจะสามารถสร้าง Alkanolamines ที่เป็นสารละลายในกลุ่มเอมีนได้ ซึ่งสารละลายดังกล่าวเป็นสารละลายที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในการดักจับ CO_2 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับสารละลายเอมีนว่าเป็นชนิดใด โดย Alkanolamine สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่

1. Primary Amine จะประกอบด้วย Monoethanol amine (MEA) และ Diglycol amine (DGA)
2. Secondary Amine จะประกอบด้วย Diethanol amine (DEA) และ Diisopropyl amine (DIPA)
3. Tertiary amine จะประกอบด้วย Triethanol amine (TEA) และ Methyl diethanol amine (MDEA)

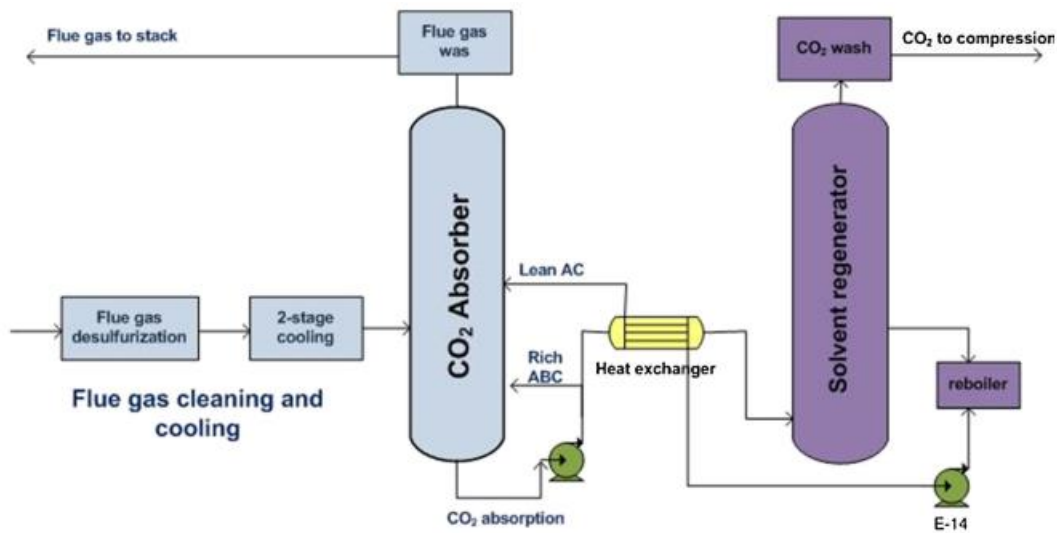
MEA เป็นสารละลายเอมีนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากราคาไม่แพง มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากใช้ในการดักจับ CO_2 ในก๊าซไอเสียแล้วยังใช้ระบบก๊าซธรรมชาติที่มีการปะปน CO_2 เข้ามาในระบบอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม MEA นั้นมีเอนทัลปีของสารละลายที่สูงเมื่อผสมกับ CO_2 ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานค่อนข้างสูงในการย้อนกลับ Amine เข้าสู่ระบบอีกครั้ง [54]

Aqueous Ammonia-Based Absorption Process

เป็นเทคโนโลยีที่วิธีการดำเนินการคล้ายคลึงกับ Amine Solvent Technology แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยากับ CO_2 มีข้อดีที่ความร้อนของปฏิกิริยาดำเนินการต่ำกว่าปฏิกิริยาของเอมีน (ปฏิกิริยาของแอมโมเนีย)

คาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 และน้ำเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอนเนต) ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีกว่าและค่าใช้จ่ายต่ำกว่า เทคโนโลยีปฏิกิริยาเอมีน นอกจากนี้ Aqueous Ammonia-Based Absorption Process สามารถดักจับ นอกเหนือจาก CO_2 ยังดักจับ SO_2 และ NO_2 ในกระบวนการเดียวกันด้วย ซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย และความซับซ้อนของระบบในการควบคุมมลพิษ นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังสามารถสร้าง By-Product ที่เกิดขึ้นได้แก่ แอมโมเนียมไนเตรตและแอมโมเนียมซัลเฟตเพื่อสร้างปุ๋ย

ตามรูปที่ 43 กระบวนการนี้จะประกอบด้วย Scrubber และ Solvent Regenerator ก่อนการ ดูดซับ CO_2 ก๊าซไอเสียจะถูกทำให้เย็นลงโดยใช้น้ำเย็นหรือชุดทำความเย็นแบบสัมผัสโดยตรง จากนั้น ก๊าซไอเสียจะเข้าสู่ Scrubber ที่สภาวะใกล้จุดเยือกแข็ง ($0-10^\circ\text{C}$) ซึ่งก๊าซไอเสียที่ระบายความร้อนแล้ว จะไหลขึ้นสู่ด้านบนโดยทวนกระแสไปยังสารละลายดูดซึม (แอมโมเนียมคาร์บอนเนตและแอมโมเนียม ไบคาร์บอนเนต) โดยการที่ทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิที่ต่ำจะสามารถทำให้ดูดซึม CO_2 สูงและลดแอมโมเนีย ที่หลุดออกจากระบบได้ ในส่วนของ Solvent regenerator จะดำเนินการที่อุณหภูมิมากกว่า 120°C และความดันที่มากกว่า 2 MPa ซึ่งทำให้ความต้องการพลังงานลดลงสำหรับการบีบอัดและขนส่ง CO_2 [58]



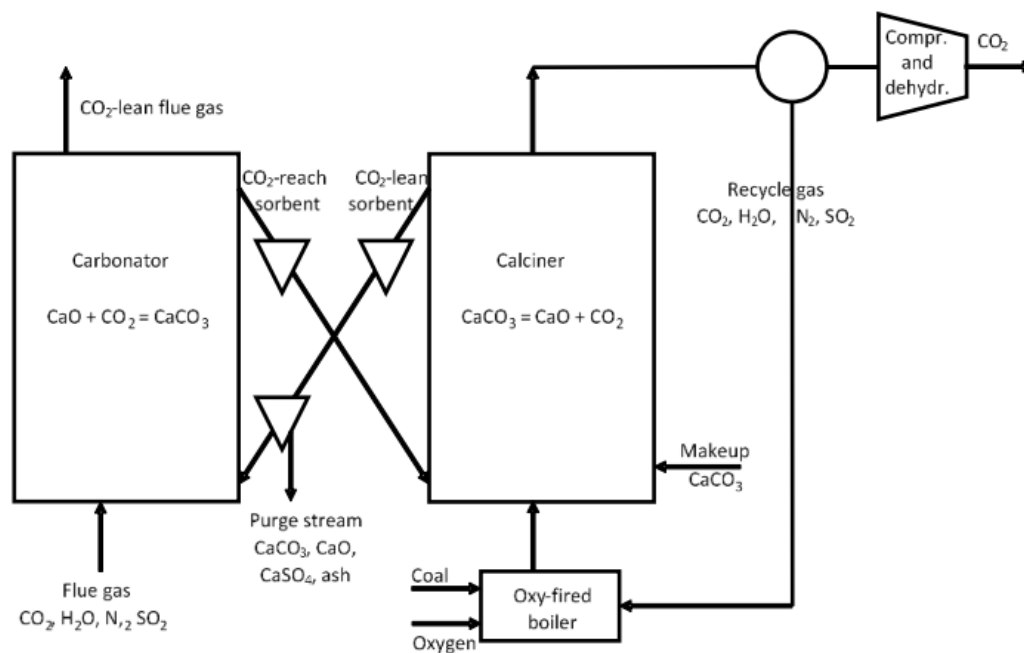
รูปที่ 42 กระบวนการทำงานของ Aqueous Ammonia-Based Absorption Process [58]

Carbonation/calcinations cycles

เทคโนโลยี Carbonation/calcinations cycles เป็นวิธีการดักจับ CO_2 ที่มีราคาไม่แพงสำหรับ โรงไฟฟ้าทั่วไป ในกระบวนการนี้แคลเซียมเป็นตัวดูดซึมที่มีบทบาทสำคัญ ซึ่งใช้ในกระบวนการ Carbonation/calcinations cycles โดยประสิทธิภาพของกระบวนการนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ

คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ใช้ ประสิทธิภาพของกระบวนการนั้นจะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารดูดซับ โดยประสิทธิภาพของระบบนั้นจะสังเกตได้จากรอบ Cycle ที่ที่จำนวนรอบมากจะแสดงได้ถึงประสิทธิภาพที่สูง

กระบวนการนี้จะเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและ CO_2 ในการดักจับ CO_2 จากก๊าซไอเสีย เมื่อทำการปฏิกิริยากันขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิสูงจากก๊าซไอเสีย ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่อุณหภูมิระหว่าง $600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นแคลเซียมคาร์บอเนตในขั้นตอน Carbonizer จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ทำการแยกที่เรียกว่า Calciner ซึ่งปฏิกิริยาจะทำการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $900\text{ }^\circ\text{C}$ ในสภาวะนี้จะทำให้เกิดการปล่อย CO_2 ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถเข้าสู่ขั้นตอนการขนส่งต่อไป [59]



รูปที่ 43 กระบวนการทำงานของ Carbonation/Calcinations Cycles [59]

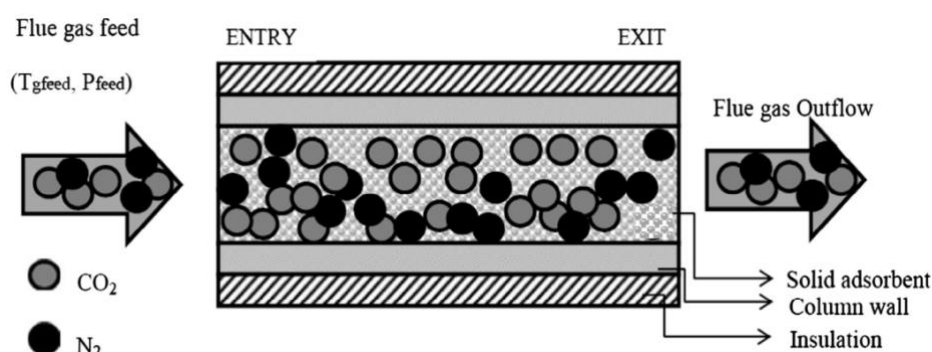
Amino Acid Salt Solutions

เทคโนโลยีที่ใช้หลักการเดียวกันกับการดูดซับ CO_2 ด้วยเอมีนหรือด้วยแอมโมเนีย โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นสารประกอบในกลุ่มกรดกลีอะมิโน (Amino Acid) โดยมีข้อดีมากกว่าใช้ตัวดูดซับประเภทเอมีน เนื่องจาก Amino Acid มีสารประกอบระเหยง่ายค่อนข้างต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับ CO_2 มีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดกลีอะมิโนจำพวก Glycine, Sarcosine and Proline ที่เป็นสารประกอบกรดกลีอะมิโนในกลุ่มโพแทสเซียมที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ CO_2 ได้อย่างรวดเร็วในถังดักจับ [60]

(2) กระบวนการดักจับ CO_2 แบบดูดซับ (Adsorption)

เป็นเทคโนโลยีที่กระบวนการที่ CO_2 จะถูกนำเข้าหรือดูดซับจากก๊าซไอเสียเข้าสู่ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยวิธีการปฏิกิริยาทางเคมี และทำการปล่อยก๊าซไอเสียออกสู่ชั้นบรรยากาศต่อไป การ Dilute ตัวดูดซับเป็นขั้นตอนหนึ่งของเทคโนโลยีที่ทำการฟื้นฟู (Regenerated) ตัวดูดซับให้กลับมาใช้งานดักจับ CO_2 ใหม่ได้อีกครั้ง การดูดซับ CO_2 มักจะใช้สารประกอบเอมีนซึ่งมีข้อดีคือหาง่าย ราคาถูก และดูแลรักษาง่าย แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ ใช้พลังงานที่สูงในการฟื้นฟูตัวดูดซับให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ อีกครั้ง ต้องมีการควบคุมการกัดกร่อนและตัวดูดซับมีการอ่อนไหวต่อก๊าซอื่นๆที่ไม่ใช่ CO_2 เช่นเดียวกัน

กระบวนการการแยกสารโดยการดูดซับตามรูปที่ 47 จะทำงานบนหลักการของความแตกต่างในคุณสมบัติการดูดซับและการคายของส่วนประกอบของส่วนผสม การดูดซับคือการยึดเกาะของไอออน อะตอม หรือ โมเลกุลจากของเหลว ก๊าซ หรือของแข็งที่ละลายสู่พื้นผิว ไอออน อะตอม หรือโมเลกุล ที่เกาะติดกัน จะก่อตัวเป็นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุที่ยึดติดและเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในขณะที่ วัสดุที่ยึดติดอยู่นั้นเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการ Adsorption จะมีความแตกต่างจาก Absorption เพราะในกระบวนการ Adsorption ของไหล (Absorbate) จะละลายโดยของแข็งหรือของเหลว (Absorbent) การดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุทั้งหมด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ 2 กระบวนการคือ การคาย (Desorption) คือปฏิกิริยาย้อนกลับของการดูดซับ และการดูดซับ (Absorption) โดยการดูดซับมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนย่อยคือ คือ การเคลื่อนย้ายเชิงมหภาค (Macrotransport) เป็นการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับผ่านน้ำเข้าสู่พื้นของสารดูดซับ การเคลื่อนย้ายเชิงจุลภาค (Microtransport) เป็นการแพร่กระจายของสารถูกดูดซับเข้าหาช่องว่างภายในของพื้นที่ผิวสารดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยคือ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film Diffusion) และ การแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรง (Pore Diffusion) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นการเกาะยึดติดกันระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจอาศัยทั้งแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี



รูปที่ 44 กระบวนการ Adsorption [61]

ในปัจจุบันเทคโนโลยี Adsorption สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทคโนโลยีหลักได้แก่
Pressure/Vacuum Swing Adsorption (PSA/VSA)

เป็นเทคโนโลยีการดูดซับ CO₂ ซึ่งจะทำงานภายใต้ความดันที่แตกต่างจากความดันบรรยากาศ โดยที่ Pressure Swing Adsorption (PSA) จะทำงานภายใต้ความดันที่สูงกว่าบรรยากาศ และ Vacuum Swing Adsorption (VSA) จะทำงานภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

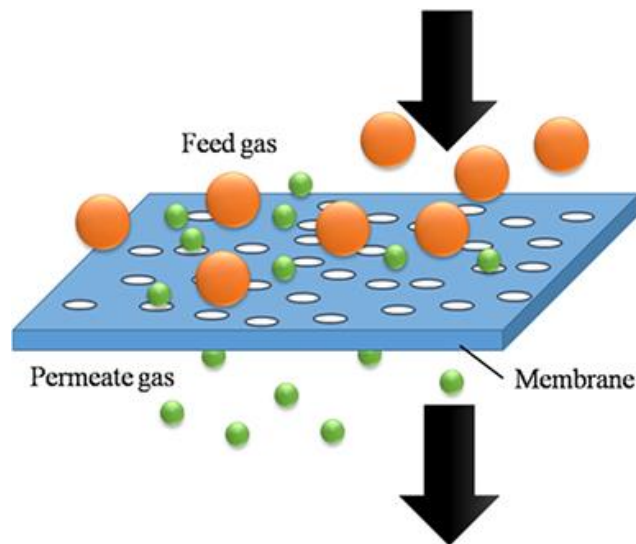
Temperature Swing Adsorption (TSA)

เทคโนโลยีนี้จะทำงานภายใต้อุณหภูมิที่สูง โดยอาศัยความร้อนจากก๊าซไอเสียเข้าไปกระตุ้นตัวดูดซับเพื่อทำการดูดซับ CO₂ จากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิของตัวดูดซับลงก่อนทำการดูดซับ CO₂ ใหม่อีกครั้งใน 2 กระบวนการนี้ เทคโนโลยี PSA/VSA มีการใช้งานที่ดีกว่า เนื่องจากง่ายต่อการควบคุมและการใช้งาน ซึ่งจะใช้พลังงานที่ต่ำ และลงทุนที่ไม่สูง เมื่อเทียบกับ TSA [61]

(3) กระบวนการดักจับ CO₂ ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane)

เทคโนโลยีการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน (Membrane) เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจในเทคโนโลยี Low Carbon Emission เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรม นอกเหนือจากระบบอื่น เช่น ระบบดูดซับและระบบซึมซับ (Adsorption & Absorption) โดยการปล่อยก๊าซไอเสียเข้าสู่ระบบและการปล่อยก๊าซที่ผ่านการดักจับแล้วสามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกัน เมมเบรนจะแทรกซึมส่วนประกอบที่ต้องการอย่างเฉพาะเจาะจงและแยกในสิ่งที่ไม่ต้องการได้ ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสมของก๊าซ ในกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอน จะต้องแยก CO₂ ออกจากก๊าซไอเสียออกก่อนการขนส่งและการจัดเก็บในภายหลัง เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดักจับคาร์บอน

เมมเบรนจะทำหน้าที่เป็นตัวกรอง โดยยอมให้โมเลกุลบางตัวซึมผ่าน ในขณะที่กั้นโมเลกุลจำเพาะอื่นๆ ไม่ให้เข้าสู่เมมเบรนตาม **รูปที่ 48** เมมเบรนมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกของเหลวเช่น Micro-filtration, Ultra-filtration, Reverse osmosis, Forward osmosis, Desalination และการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

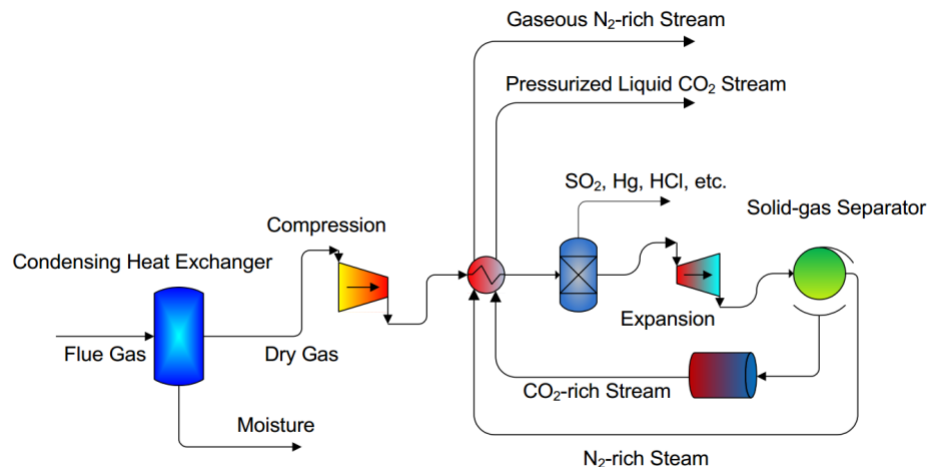


รูปที่ 45 กระบวนการแยกเมมเบรนของก๊าซไอเสีย [62]

การไหลผ่านของก๊าซเสียทั่วบริเวณเมมเบรนภายใต้ความแตกต่างของแรงดันต่อหน่วยผ่านความหนาของเมมเบรนเรียกว่าการซึมผ่าน และอัตราส่วนของการซึมผ่านของก๊าซไอเสียต่างๆ ผ่านเมมเบรนเดียวกันถูกกำหนดเป็นความสามารถในการคัดเลือกกลไกการแยกก๊าซจะแตกต่างกันไปในแต่ละเมมเบรน [62]

(4) Cryogenic Distillation

กระบวนการดักจับ CO_2 โดยใช้วิธี Cryogenic จะทำให้ก๊าซไอเสียแห้งและเย็นลงจากที่มีอยู่ และทำการบีบอัด ทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดที่ CO_2 ก่อตัวเป็นของแข็งเล็กน้อย ขยายก๊าซเพื่อทำให้เย็นลงอีกและตกตะกอน ปริมาณ CO_2 ที่จะเป็นของแข็งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสุดท้าย การเพิ่มแรงดันสุดท้ายและวิธีการอุ่น CO_2 และก๊าซไอเสียที่เหลือจะถูกทำให้เย็นลงจน CO_2 อยู่ในรูปของของเหลว ประสิทธิภาพการดักจับ CO_2 นั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดันและอุณหภูมิเป็นหลักเมื่อสิ้นสุดกระบวนการขยายตัว ในความดันที่ 1 ATM กระบวนการจับ CO_2 จะอยู่ที่ประมาณ 99% ที่อุณหภูมิที่ -211°F (-135°C) และ 90% ที่ -184°F (-120°C) [63]



รูปที่ 46 กระบวนการ Cryogenic carbon capture (CCC) process [63]

2. Carbon Transport

สำหรับ CO_2 ที่ไม่ได้รับการถูกกักเก็บทันทีหลังจากการดักจับ CO_2 แล้วนั้นจะต้องทำการขนส่งไปยังสถานที่ที่กักเก็บ โดยการขนส่ง CO_2 ที่ได้จากการดักจับแล้วนั้นจะมีวิธีการขนส่งด้วย ได้แก่ ทางท่อ (Pipeline) ทางเรือ (Ship) และ ทางรถบรรทุก (Tanker Trucks) โดย CO_2 โดยก่อนทำการขนส่งนั้นจะต้องถูกขจัดสิ่งสกปรกและทำการบีบอัดเข้าสู่สถานะ Supercritical (80-150 bar, ของเหลว) ซึ่งมีวิธีการขนส่งดังนี้

1) ทางท่อ (Pipeline)

การขนส่งทางท่อเป็นการขนส่งที่มีการใช้งานที่สุดในโลก โดยมีปริมาณการขนส่ง CO_2 มากที่สุด โดยคาดว่าจะมีท่อส่งก๊าซหลายล้านกิโลเมตรทั่วโลกที่ขนส่งก๊าซต่างๆ รวมถึง CO_2

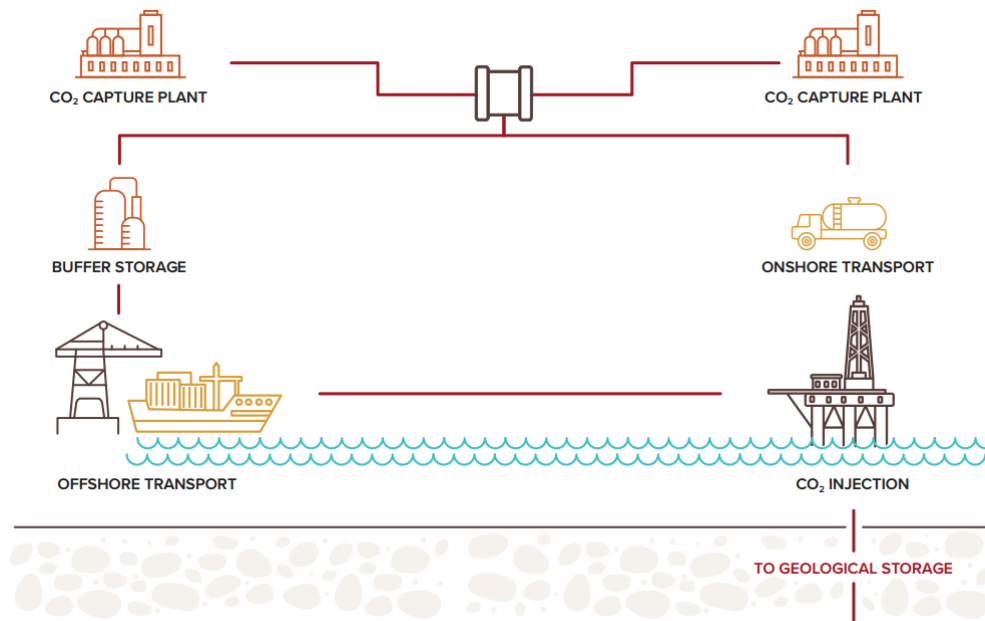
2) ทางเรือ (Ship)

การขนส่งทางเรือเป็นทางเลือกสำหรับการขนส่งข้ามภูมิภาคต่างๆทั่วโลก การขนส่ง CO_2 ได้เกิดขึ้นแล้วในพื้นที่ยุโรป โดยที่เรือขนส่ง CO_2 ที่มีคุณภาพจะขนส่งจากจุดแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ไปยังแหล่งกักเก็บตามจุดต่างๆ

การขนส่ง CO_2 ขนาดใหญ่ซึ่งมีกำลังการผลิตในช่วง 10,000 ถึง 40,000 ลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มการขนส่งเหมือนกับการขนส่งก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ซึ่งมีขนส่งระยะอย่างยาวนาน

3) ทางรถบรรทุกและระบบราง (Tanker Truck)

การขนส่ง CO_2 โดยรถบรรทุกและระบบรางสามารถขนส่งได้เพียงปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 วิธีด้านบน โดยสามารถทำการเคลื่อนย้าย CO_2 ในพื้นที่ใกล้เคียงเนื่องจากค่าใช้จ่ายจะสูงกว่า 2 วิธีแรกเช่นเดียวกัน [64]



รูปที่ 47 กระบวนการขนส่ง CO₂ ด้วยวิธีการ Offshore และ Onshore [64]

3. Carbon Storage

การจัดเก็บ CO₂ นั้นมักจะมีการจัดเก็บทางธรณีวิทยาโดยการฉีดและบรรจุ CO₂ ลงไปสถานที่กักเก็บเช่น แหล่งกักเก็บน้ำมัน เป็นต้น Geosequestration เป็นกระบวนการรวบรวม CO₂ ให้กลายเป็นส่วนหนึ่งของหินและของเหลวในสถานที่กักเก็บ ตัวอย่างเช่น CO₂ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำในสถานที่กักเก็บกลายเป็นไบคาร์บอเนต ปฏิกิริยาประเภทนี้ถือเป็นการกักเก็บถาวรในแง่ของ CO₂ ถูกแปรสภาพเป็นสารที่เป็นส่วนหนึ่งของแหล่งกักเก็บ ในทางตรงกันข้าม การจัดเก็บ CO₂ ในทางธรณีวิทยานั้น CO₂ ก็ยังคงติดอยู่ในสถานที่กักเก็บต่อไป

วิธีการกักเก็บ CO₂ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักตามกลไก ได้แก่ 1) การฉีดและการกักเก็บภายใต้แรงดันหรือขอบเขตของโครงสร้าง ได้แก่ การกักเก็บทางธรณีวิทยา การกักเก็บในมหาสมุทรลึก 2) การใช้ทางด้านสารเคมี 3) การใช้การดูดซึมแบบใช้ออกซิเจนผ่านกระบวนการทางชีวภาพ อาทิ การสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียหรือต้นไม้ เช่น การปลูกป่าและการดูดซับจากมหาสมุทร

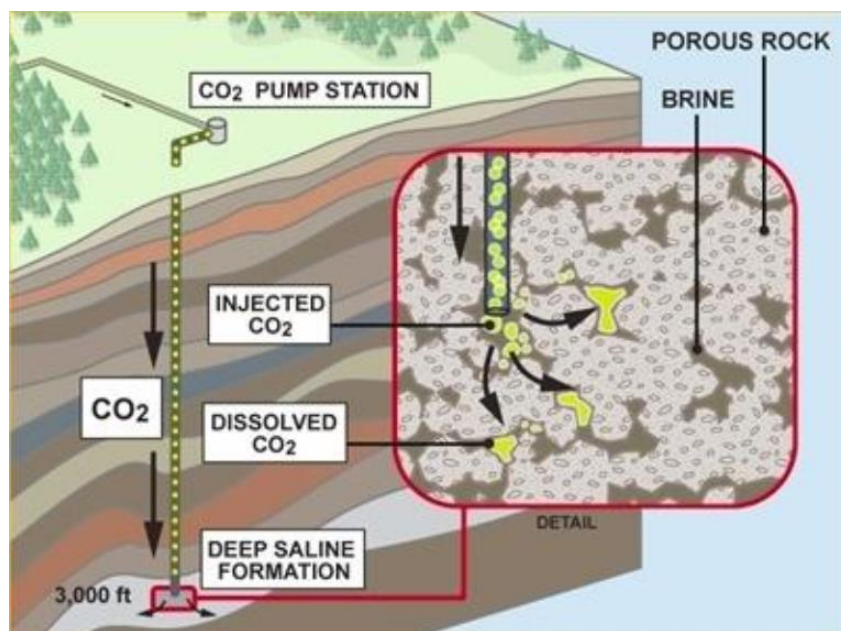
1) วิธีการกักเก็บทางธรณีวิทยา (Geological Sequestration Methods)

วิธีการกักเก็บ CO₂ ทางธรณีวิทยานั้นจะเกี่ยวข้องกับการดักจับ CO₂ และการบีบอัดเพื่อให้สะดวกต่อการขนส่งและการฉีดด้วยแรงดันสูง ในการกักเก็บทางธรณีวิทยา สถานที่กักเก็บที่เหมาะสมมักจะเป็นบ่อน้ำมันหรือแหล่งก๊าซธรรมชาติที่อยู่ระหว่างการผลิตหรือหมดลงแล้ว โดยสถานที่กักเก็บจะ

เป็นส่วนที่รักษาความดันและอุณหภูมิของ CO₂ ให้อยู่ในสภาวะของเหลวต่อไป โดยวิธีการกักทางธรณีวิทยามีเทคโนโลยีดังนี้

(1) Deep Saline Injection

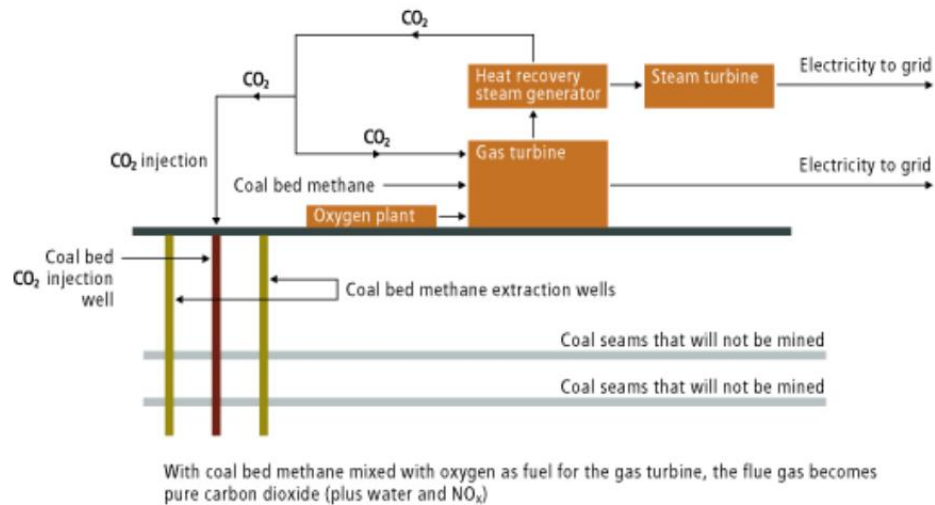
เป็นเทคโนโลยีในการกักเก็บ CO₂ โดยการฉีด CO₂ ลงในแอ่งตะกอนลึกที่มีความลึกไม่ต่ำกว่า 800 เมตร ซึ่งความดันและอุณหภูมิเหมาะสมกับสถานะที่ของ CO₂ ที่ทำการฉีดลงไป โดยสถานะของ CO₂ จะต้องถูกทำการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวหรือ Supercritical ก่อนทำการฉีดลงไป แต่อย่างไรก็ตาม CO₂ ที่ทำการฉีดลงไปมีในแอ่งตะกอนลึกจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.5-0.9 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพื้นผิวด้านบน ดังนั้นควรทำให้มั่นใจในการปิดรอยร้าวที่อาจส่งผลต่อการรั่วไหลของ CO₂ ขึ้นสู่พื้นดิน โดยปัจจุบันเทคโนโลยีนี้เป็นที่นิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากค่าใช้จ่ายต่ำและไม่จำเป็นในการลงทุนด้านการขนส่ง CO₂ โดยคาดว่าความสามารถในการรับความจุในการกักเก็บ CO₂ ได้ประมาณ 300-10,000 GtCO₂ [54]



รูปที่ 48 กระบวนการทำงานของ Deep Saline Injection [33]

(2) Unmineable Coal Seams

เทคโนโลยีนี้เป็นการกักเก็บเข้าไปในชั้นของถ่านหินของเหมืองถ่านหินที่ยังไม่ได้รับการขุดเจาะหรือไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่ง CO₂ ที่ได้รับการฉีดเข้าไปในชั้นของถ่านหินจะถูกดูดซับเข้าตามรูพรุนของถ่านหิน ทำให้ CO₂ ที่ได้รับการฉีดเข้านั้นกลายเป็น ก๊าซมีเทนในชั้นถ่านหิน (Coal Bed Methane (CMB) [33]



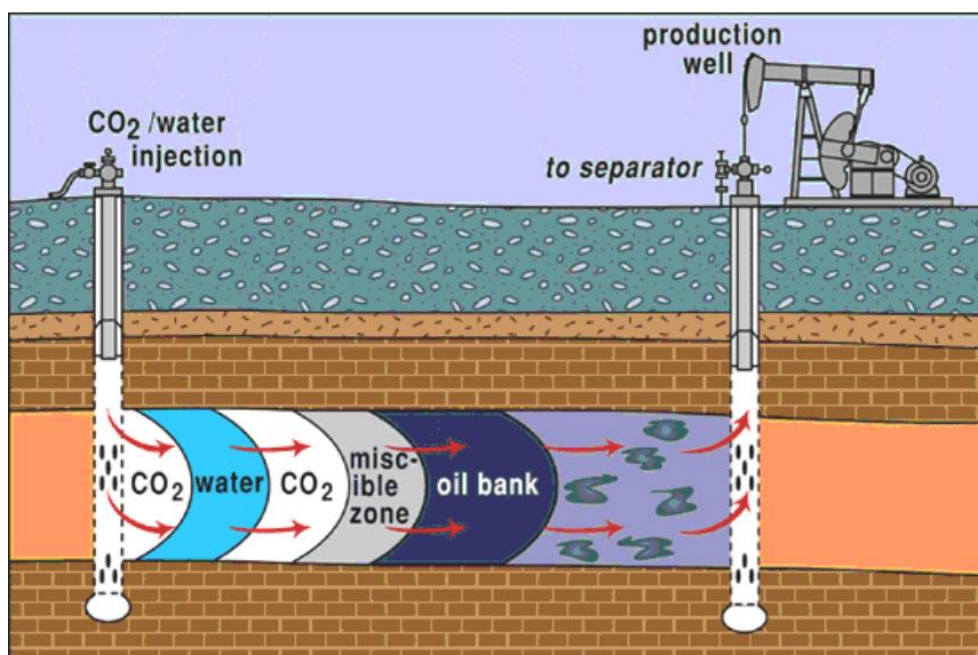
รูปที่ 49 กระบวนการทำงานของ Unmineable Coal Seams [33]

(3) Depleted Oil and Gas Reservoirs

เป็นเทคโนโลยีที่มีมาตั้งแต่เริ่มต้น โดยการฉีด CO_2 เข้าไปแทนที่ในแหล่งน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติที่หมดแล้ว ซึ่งการฉีดก๊าซต่างๆ นั้นนอกจาก CO_2 แล้วยังมีก๊าซอื่นๆ อาทิ H_2S หรือก๊าซ By Product อื่นๆ ที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ [33]

(4) Enhanced Oil Recovery (EOR) and Gas Recovery (EGR)

เป็นเทคโนโลยีในการฉีดกักเก็บ CO_2 โดยตรงเข้าสู่แหล่งน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ เพื่อช่วยในการผลิตน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติขึ้นจากหลุม โดยการเพิ่มแรงดันในแหล่งน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติด้วยการฉีด CO_2 ลงไป ส่งผลทำให้สามารถผลิตน้ำมันหรือ ก๊าซธรรมชาติที่สูงขึ้น [33]



รูปที่ 50 กระบวนการทำงานของ Enhanced Oil Recovery (EOR) [33]

2) วิธีการกักเก็บอื่น

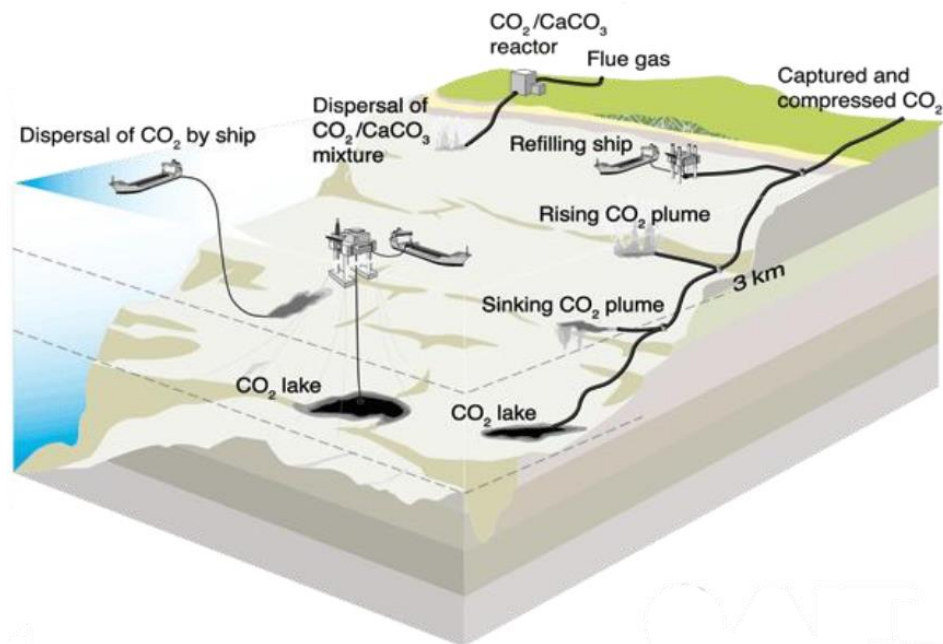
การกักเก็บนอกนอกจากการกักเก็บในชั้นดินแล้วยังมีวิธีการกักเก็บอื่นๆ ดังนี้

(1) Ocean Fertilization

วิธีการกักเก็บนี้เป็นวิธีการทางธรรมชาติ โดยอาศัยสิ่งมีชีวิตบริเวณชั้นผิวของมหาสมุทรในการกักเก็บ CO₂ โดยสิ่งมีชีวิตบริเวณพื้นผิวของน้ำทะเลจะสามารถสังเคราะห์แสงและดึง CO₂ ในอากาศมาใช้ในกระบวนการดังกล่าวได้ [54]

(2) Deep Ocean Injection

กระบวนการนี้จะใช้มหาสมุทรเป็นตัวกลางในการกักเก็บ CO₂ โดยการฉีด CO₂ ลงไปที่ระดับความลึก 500-2,000 เมตร ใต้มหาสมุทร จากนั้น CO₂ ที่ฉีดเข้าไปจะกระจายไปในน้ำทะเลและทำปฏิกิริยากับคาร์บอเนตส่งผลให้ตกลงสู่ก้นมหาสมุทร อีกรูปแบบหนึ่งคือการฉีด CO₂ ในรูปของเหลวที่มีความลึกมากกว่า 3,000 เมตร โดยที่ความแตกต่างระหว่างน้ำทะเลและ CO₂ ในรูปของเหลวจะทำให้ CO₂ ตกกลงสู่ก้นมหาสมุทร [33]



รูปที่ 51 กระบวนการทำงานของ Deep Ocean Injection [33]

จากผลการรวบรวมข้อมูลเทคโนโลยีกำจัดมลพิษของแต่ละอุปกรณ์/เทคโนโลยีข้างต้นนั้น ที่ปรึกษาได้ทำการสรุปประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษของแต่ละอุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดได้ตามตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-2 สรุปประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษของแต่ละอุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

กระบวนการ ใช้งานถ่าน หิน	ประเภทเทคโนโลยี	การกำจัด มลพิษก่อนการ เผาไหม้	การกำจัดมลพิษหลังการเผาไหม้			
		Sulfur	TSP	SO _x	NO _x	CO
Pre- combustion	Jig	95-99% [7]	-	-	-	-
	Magnetic-separation	80% [8]	-	-	-	-
	Flotation	85% [9]	-	-	-	-
	Float/Sink Separation	90% [8]	-	-	-	-
	Cyclone	70-90% [11]	-	-	-	-
	Electrostatic Separation	80-90% [12]	-	-	-	-
	Molten - Caustic Leaching	90% [16]	-	-	-	-
	Biological กำจัดกำมะถัน อินทรีย์	90% [17]	-	-	-	-
	Biological กำจัดกำมะถันอินทรีย์	60-70% [18]	-	-	-	-

กระบวนการ ใช้งานถ่าน หิน	ประเภทเทคโนโลยี	การกำจัด มลพิษก่อนการ เผาไหม้	การกำจัดมลพิษหลังการเผาไหม้			
		Sulfur	TSP	SO _x	NO _x	CO
	Desulfurized Coal Water Mixture	45% [70]	-	-	-	-
Combustion	Pulverized Combustion	-	8% [28]	8% [28]	8% [28]	8% [28]
	Supercritical	-	26.67% [28]	26.67% [28]	26.67% [28]	26.67% [28]
	Ultra Supercritical	-	34% [28]	34% [28]	34% [28]	34% [28]
	Bubbling Fluidized Bed	-	-	70-90%[69]	-	-
	Circulating Fluidized Bed	-	-	98.5%[65]	-	-
	Burner Optimization	-	-	-	74%[34]	-
	Low NOx Burner	-	-	-	80-90%[36]	-
	Selective Catalytic Reduction	-	-	-	30-50%[37]	-
	Selective non-Catalytic Reduction	-	-	80-90%[26]	-	-
Post-Combustion	Cyclones	-	70-90% [68]	-	-	-
	Series Cyclones	-	80-95% [68]	-	-	-
	Parallel Cyclone	-	80-95% [68]	-	-	-
	Venturi Wet Scrubber	-	70-99%[66]	-	-	-
	Impingement tray scrubber	-	97% [66]	-	-	-
	Rod deck Wet Scrubber	-	70-99%[66]	-	-	-
	Packed bed Wet Scrubber	-	50-95% [67]	-	-	-
	Spray tower Wet Scrubber	-	90%[66]	-	-	-
	Electrostatic Precipitators (ESP)	-	99.9%[65]	-	-	-
	Fabric Filter	-	99.9%[65]	-	-	-
	Wet Scrubbers for SO ₂ control	-	-	99%[65]	-	-
	Spray Dry Scrubber for SO ₂ Control	-	-	95%[65]	-	-

จากข้อมูลทางที่ปรึกษาได้รวบรวมมาพบว่า หลายประเทศได้มีการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดในโรงไฟฟ้าที่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้น ตารางที่ 1-4 ได้สรุปประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดตามประเทศต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 1-3 ประสิทธิภาพของแต่ละประเภทโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดแต่ละประเภท [71]

Country	Technology	Net capacity MWe	Efficiency %
OECD MEMBER Countries			
Belgium	Black supercritical	750	45%
	Black supercritical	1,100	45%
Czech Republic	Brown PCC	600	43%
	Brown Fluidized bed	300	42%
	Brown IGCC	400	45%
	Brown Fluidized bed w/biomass	300	42%
Germany	Black PCC	800	46%
	Brown PCC	1,050	45%
Japan	Black coal	800	41%
Korea	Black PCC	767	41%
	Black PCC	961	42%
Mexico	Black PCC	1,312	40%
Netherlands	Black USC PCC	780	46%
Slovak Republic	Brown supercritical FBC	300	40%
United States	Black PCC	600	39%
	Black IGCC	550	39%
NON-OECD MEMBER Countries			
Brazil	Brown PCC	446	30%
China	Black ultra-supercritical PCC	932	46%

Country	Technology	Net capacity MWe	Efficiency %
	Black supercritical	1,119	46%
	Black supercritical	559	46%
Russia	Black ultra-supercritical PCC	627	47%
	Black supercritical PCC	314	42%
South Africa	Black supercritical PCC	794	39%
Industry Contribution			
ESAA (Energy Supply Association of Australia)	Black supercritical Air-Cooled	690	39%
	Black supercritical Water-Cooled	698	41%
	Black ultra-supercritical Air-Cooled	555	41%
	Black ultra-supercritical Water-Cooled	561	43%
	Brown supercritical Air-Cooled	686	31%
	Brown supercritical Water-Cooled	694	33%
	Brown ultra-supercritical Air-Cooled	552	33%
	Brown ultra-supercritical Water-Cooled	558	35%
EPRI (Electric Power Research Institute)	Black supercritical PCC	750	41%
Eurelectric	Black coal	760	45%
	Brown coal	760	43%

* PCC = Pulverized Coal Combustion

FBC = Fluidized Bed Combustion

Black Coal = ถ่านหินบด

Blown Coal = ถ่านหินลิกไนต์

1.3 มาตรฐานจากทั่วโลก

1. มาตรฐานการนำเข้าถ่านหิน

การนำไปใช้ประโยชน์ของถ่านหินนั้นทั้งในการใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ในภาคอุตสาหกรรม หรือการนำไปเป็นผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ นั้นมักจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบของฝุ่น และซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยทั้งนี้การควบคุมผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นนั้นสามารถดำเนินการได้ทั้งก่อนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ขณะเผาไหม้เชื้อเพลิง และหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นได้

ปัจจุบันมีบางประเทศเริ่มที่จะลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงตั้งแต่ก่อนการเผาไหม้โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่ามลสารที่อยู่ในเชื้อเพลิงถ่านหินตั้งแต่นำเข้ามาใช้ในการประเทศ อาทิ ประเทศจีน สหรัฐอเมริกา หรือเกาหลีใต้ ที่มีการกำหนดเพดานมลสารที่อาจจะส่งผลกระทบต่อผลกระทบการเผาไหม้เชื้อเพลิง อาทิ ค่าเปอร์เซ็นต์กำมะถันในถ่านหินหรือค่าเปอร์เซ็นต์ของกำมะถันในเชื้อเพลิงถ่านหิน ซึ่งสามารถสรุปได้ใน **ตารางที่ 1-5** ดังนี้

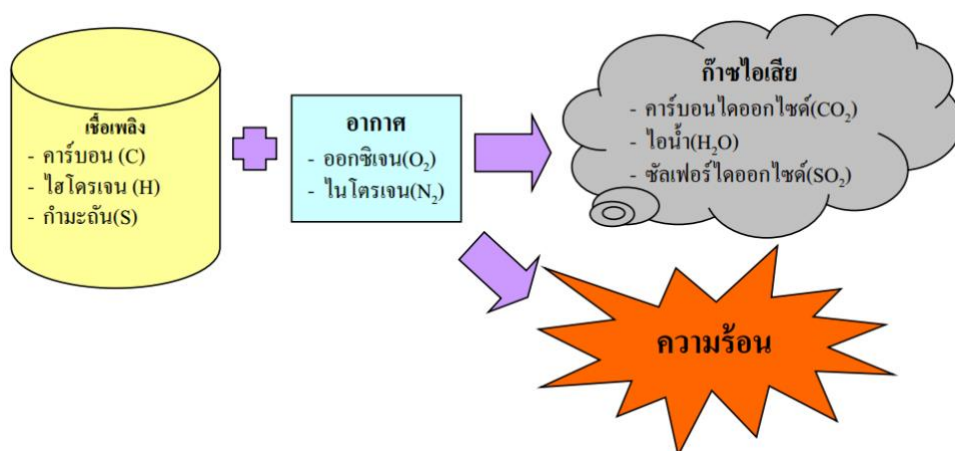
ตารางที่ 1-4 ผลการรวบรวมคุณลักษณะของถ่านหินที่มีการใช้งานในประเทศต่างๆ

ประเทศ	ประเภทถ่านหิน	ตัวชี้วัด	ปริมาณที่ระบุ	หมายเหตุ
จีน [73]	ลิกไนต์	ปริมาณเถ้า	<30%	As-Received basis
		กำมะถัน	<1.5%	
	อื่นๆ	ปริมาณเถ้า	<40%	
		กำมะถัน	<3%	
		ปรอท	<0.6 micrograms/g	
		สารหนู	<80 micrograms/g	
		ฟอสฟอรัส	<0.15%	
		คลอรีน	<0.3%	
		ฟลูออไรน์	<200 micrograms/g	
สหรัฐอเมริกา [74]	ทุกประเภท	กำมะถัน	<1%	As-Received basis
เกาหลีใต้ [75]	ทุกประเภท	กำมะถัน	<0.4%	As-Received basis
มาเลเซีย [76]	ทุกประเภท	กำมะถัน	<1%	As-Received basis

จากที่ได้ทำการรวบรวมข้างต้นพบว่า เริ่มมีหลายประเทศที่นำมามาตรฐานและข้อกำหนดที่ควบคุมค่ามลสารที่อยู่ในเชื้อเพลิงถ่านหินที่จะถูกนำมาใช้งานของประเทศต่างๆ โดยกฎหมายหรือข้อบังคับต่างๆ จะควบคุมและบังคับผู้จัดจำหน่าย ผู้ขาย และผู้ใช้งานให้จำกัดมลสารที่อยู่ในเชื้อเพลิงถ่านหินตามตัวชี้วัดต่างๆ ที่ได้ทำการระบุไว้ โดยจะมีข้อสังเกตได้ว่า ประเทศสหรัฐอเมริกาและเกาหลีใต้จะมุ่งเน้นไปที่ปริมาณสารกำมะถันที่ปะปนในเชื้อเพลิงถ่านหิน แต่สำหรับประเทศจีนจะทำการระบุตัวชี้วัดหลายชนิดไว้ ในการจำกัดปริมาณค่าที่ได้ทำการรวบรวมไว้

2. มาตรฐานด้านประสิทธิภาพหม้อน้ำ

ประสิทธิภาพหม้อน้ำและอุปกรณ์เผาไหม้ที่ดีจะส่งผลต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้งานลดลง โดยหลักการเผาไหม้นั้นจะเป็นไปตาม**รูปที่ 55**



รูปที่ 52 หลักการเผาไหม้เบื้องต้น

การเผาไหม้ คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ทำให้ได้ความร้อนออกมาองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ คือ เชื้อเพลิง ออกซิเจน ความร้อน และปฏิกิริยาทางเคมี โดยองค์ประกอบทั้งหมดนี้ต้องเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันจึง จะทำให้เกิดการเผาไหม้ โดยทั่วไปแล้วออกซิเจนได้มาจากอากาศที่อยู่ในบริเวณของการเผาไหม้

จากรูปที่ 55 นั้นจะเห็นว่าปริมาณมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้อื่นๆ นั้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยมลพิษ โดยยิ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอุปกรณ์นั้นสูงจะส่งผลต่อการป้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำลงซึ่งส่งผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นต่ำลงมาเช่นเดียวกัน ในทำนองเดียวกันหากประสิทธิภาพการเผาไหม้ของอุปกรณ์นั้นต่ำจะส่งผลให้ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงและปริมาณการเกิดก๊าซไอเสียสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

ดังนั้นการปรับปรุงหรือควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ที่สุด จะลดการปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงตามมา โดยในปัจจุบันมีหลายหน่วยงานที่ได้แนะนำพารามิเตอร์ต่างๆ

สำหรับการควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้ อาทิ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงมีกฎหมายในควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ของหน่วยงานที่ใช้สำหรับควบคุมในความปลอดภัย และประสิทธิภาพของเครื่องจักร โดยสามารถสรุปค่าแนะนำและค่าตามกฎหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ตาม **ตารางที่ 1-6** ดังนี้

ตารางที่ 1-5 ค่าปริมาณก๊าซไอเสียที่ยอมรับได้ตามแนวทางปฏิบัติที่ดีและค่าควบคุมน้ำในหม้อน้ำตามกฎหมาย

ตัวบ่งชี้	หน่วย	ค่ามาตรฐานจากการศึกษา
อากาศส่วนเกิน	%	15-60 (1)
ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)ในก๊าซไอเสีย	%	12-13 (1)
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสีย (O ₂)	%	7-10 (1)
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ppm	200 (1) และ 690 (3)
อุณหภูมิพื้นผิวหม้อน้ำ	°C	60 (2)
ค่า TDS ของน้ำในหม้อน้ำ	ppm	3,500 (2)
ค่ากรด-ด่างของน้ำป้อน	-	5.8 – 9.5 (2)
ค่าความกระด้างของน้ำป้อน	ppm	<10 ppm as CaCO ₃ (2)

(1) ปริมาณค่าแนะนำจากคู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) พ.ศ. 2561

(2) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549

(3) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549

(4) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549

จากข้อมูลตาม**ตารางที่ 1-6** นั้นแสดงให้เห็นว่า ปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นหม้อน้ำที่มีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินควรมีการควบคุมให้อยู่ระหว่างที่ 15-60% ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียควรอยู่ระหว่าง 12-13% ค่าปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสียควรอยู่ระหว่าง 7-10% และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียควรมีค่าไม่เกิน 200 ppm ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ พพ. ได้มีการระบุเป็น**ค่าแนะนำ**แก่โรงงาน

อุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าที่มีการใช้ถ่านหินในอุปกรณ์หม้อน้ำ เพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานและลดการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในการเผาไหม้ได้

ในส่วนของ*ค่าที่ต้องปฏิบัติตามกฎหมาย* อาทิ การควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของหม้อน้ำ ค่า TDS ของน้ำในหม้อน้ำและน้ำป้อน ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำป้อน และค่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียที่มีค่าสูงกว่าปริมาณที่แนะนำจากทาง พพ. นั้น จะต้องปฏิบัติตามควบคุมค่าเหล่านี้ ไม่ให้มีค่าเกินกว่าตามที่กฎหมายได้ระบุไว้ ซึ่งค่าเหล่านี้จะส่งผลต่อความปลอดภัยของการหม้อน้ำของโรงงาน และมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมของโรงงานเอง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า *คำแนะนำ* เป็นค่าที่หน่วยงานแนะนำมาเพื่อให้ทางสถานประกอบการใช้เป็นตัวเลขอ้างอิงในการควบคุมค่าต่างๆ โดยค่าอ้างอิงเหล่านี้ที่หน่วยงานแนะนำ จะช่วยลดการใช้พลังงานและลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากทางสถานประกอบการได้ แต่ในส่วนของ *ค่าที่ต้องปฏิบัติตามกฎหมาย* นั้น สถานประกอบการจะต้องปฏิบัติและควบคุมไม่ให้ค่าต่างๆ เหล่านี้เกินปริมาณที่จำกัดไว้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของสถานประกอบการ รวมถึงการควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของโรงงาน

3. มาตรฐานอุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

อุปกรณ์ด้านเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) จะแบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่ ระยะก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion) ระยะเผาไหม้ (Combustion) และระยะหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion) ซึ่งพบว่า อุปกรณ์ด้านเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดทั้งในประเทศและต่างประเทศนั้น ยังไม่มีมาตรฐานในการกำกับชัดเจนของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานเพื่อให้เป็นมาตรฐานทางด้านถ่านหินสะอาด โดยการกำกับนั้นจะดูที่ผลลัพธ์ของมลพิษที่ระบายออกจากการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น

ปัจจุบันหลายประเทศเริ่มมีการกำกับการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดให้เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นกฎหมายหรือการกำกับการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงของประเทศนั้นๆ โดยจะมีการกำกับประสิทธิภาพรวม (Overall Efficiency) ของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ทั้งระยะก่อนการเผาไหม้ ระยะเผาไหม้ และระยะหลังการเผาไหม้ที่ใช้ในการกำกับมลพิษที่สำคัญ อาทิ มลพิษฝุ่นละออง (TSP) มลพิษก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

โดยปัจจุบันมีการกำกับประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Desulfurization) ที่มีการเริ่มใช้ในหลายประเทศ อาทิทั้งใน เครือประเทศสหภาพยุโรป ประเทศตุรกี ซึ่งแสดงดัง*ตารางที่ 1-7*

ตารางที่ 1-6 การรวบรวมประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Desulfurization)

[76]

ประเทศ	รายละเอียด	Overall Efficiency of Desulfurization (%)
เครือประเทศสหภาพยุโรป	ใช้งานก่อนปี 2003 ขนาด 50-100 MW	80
	หลังปี 2003 ขนาด 50-100 MW	92
	โรงงานใหม่หรือติดตั้งใหม่ ขนาด 50-100 MW	93
	ใช้งานก่อนปี 2003 ขนาด 100-300 MW	90
	หลังปี 2003 ขนาด 100-300 MW	92
	โรงงานใหม่หรือติดตั้งใหม่ ขนาด 100-300 MW	96
	ใช้งานก่อนปี 2003 ขนาด >300 MW	93
	หลังปี 2003 ขนาด >300 MW	93
	โรงงานใหม่หรือติดตั้งใหม่ ขนาด >300 MW	97
ประเทศตุรกี	ใช้งานก่อนปี 2006 ขนาด 50-100 MW	60
	ใช้งานก่อนปี 2006 ขนาด 100-300 MW	75
	ใช้งานก่อนปี 2006 ขนาด 300-500 MW	90
	ใช้งานก่อนปี 2006 ขนาด >500 MW	92
	โรงงานใหม่หรือติดตั้งใหม่ ขนาด 100-300 MW	92
	โรงงานใหม่หรือติดตั้งใหม่ ขนาด >300 MW	95

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ค่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดซัลเฟอร์ (Overall Efficiency of Desulfurization) ของประเทศที่ได้รวบรวมมาจะมีประสิทธิภาพโดยรวมขั้นต่ำอยู่ 60% จนถึง 97% ของระบบทั้งหมดในโรงงาน แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำของการกำจัดซัลเฟอร์มักจะอยู่ในประเภทของโรงไฟฟ้าขนาดกลางขึ้นไปที่มีขนาดมากกว่า 50 MW ขึ้นไป

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีภาระมูลค่า แนวทางปฏิบัติที่ดี หรือกฎหมายที่ใช้ในการควบคุมปริมาณค่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดมลพิษ ทั้งในซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผุ่นละออง รวมถึงออกไซด์ของไนโตรเจน ในการควบคุมหรือแนะนำแก่โรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรม

4. มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม

มาตรฐานทางด้านสิ่งแวดล้อม คือ ข้อบังคับ หรือ กฎหมายที่มีการบังคับใช้ในประเทศไทย ซึ่งพบว่าการแยกประเภททั้งโรงงานอุตสาหกรรม และโรงไฟฟ้าที่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง รวมถึงการแยกขนาดของโรงไฟฟ้า โดยกฎหมายที่มีการบังคับใช้มีตามตารางที่ 1-8

ตารางที่ 1-7 ค่าจำกัดปริมาณมลพิษของสารเจือปนตามกฎหมายของประเทศไทย

ประเภทมลพิษ	หน่วย	ประเภทโรงงาน	ค่าปริมาณของสารเจือปน
ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate: TSP)	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	320
		โรงไฟฟ้าเก่าทุกขนาด (2)	320
		โรงไฟฟ้าใหม่ <300 MW (2)	120
		โรงไฟฟ้าใหม่ 300-500 MW (2)	120
		โรงไฟฟ้าใหม่ >500 MW (2)	120
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 1-3 (2)	180
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 4-13 (2)	180
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	พินส่วนในล้านส่วน (ppm)	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	700
		โรงไฟฟ้าเก่าทุกขนาด (2)	700
		โรงไฟฟ้าใหม่ <300 MW (2)	640
		โรงไฟฟ้าใหม่ 300-500 MW (2)	450
		โรงไฟฟ้าใหม่ >500 MW (2)	320
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 1-3 (2)	1,300
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 4-13 (2)	320
ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x)	พินส่วนในล้านส่วน (ppm)	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	400
		โรงไฟฟ้าเก่าทุกขนาด (2)	400
		โรงไฟฟ้าใหม่ <300 MW (2)	350
		โรงไฟฟ้าใหม่ 300-500 MW (2)	350
		โรงไฟฟ้าใหม่ >500 MW (2)	350
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 1-3 (2)	500
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยผลิต 4-13 (2)	500

ประเภทมลพิษ	หน่วย	ประเภทโรงงาน	ค่าปริมาณของสารเจือปน
พลวง	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	16
สารหนู	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	16
ทองแดง	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	24
ตะกั่ว	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	24
ปรอท	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	2.4
คลอรีน	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	24
ไฮโดรเจนคลอไรด์	mg/m ³	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	160
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	พินส่วนในล้านส่วน (ppm)	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	80
คาร์บอนมอนอกไซด์	พินส่วนในล้านส่วน (ppm)	โรงงานอุตสาหกรรม (1)	690

(1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2559 และประกาศกระทรวงทรัพยากรพลังงานและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

(2) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2547

* - โรงไฟฟ้าเก่า หมายถึง โรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานหรือใบอนุญาตขยายโรงงานลำดับที่ 88 ก่อนวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2539

- โรงไฟฟ้าใหม่ หมายถึง โรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานหรือใบอนุญาตขยายโรงงานลำดับที่ 88 ตั้งแต่วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2539

โดยจะเห็นได้ว่าค่ามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหินของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเก่าทุกขนาดจะมีค่าจำกัดมลพิษที่ระบายออกจากปลายปล่องที่มีค่าเท่ากัน และโรงไฟฟ้าใหม่ทุกขนาดจะมีจำกัดมลพิษที่ระบายออกจากปลายปล่องให้น้อยกว่าเดิม แต่อย่างไรก็ตามการจำกัดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะนั้นมีค่ามากกว่าโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าประเภทอื่นๆ

1.4 กฎหมายและระเบียบที่เกี่ยวข้อง

การรวบรวมที่ผ่านมาของทางที่ปรึกษาพบว่า มีหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการดูแล กำกับ หรือส่งเสริมโรงงานที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้สามารถสรุปหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้ ตามตารางที่ 1-9

ตารางที่ 1-8 สรุปการกำกับดูแลโรงงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

หน่วยงาน	ด้านกำกับดูแล	หมายเหตุ
กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม	- กำกับดูแลความปลอดภัยด้านหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน	- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549 - ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549
	- กำกับดูแลด้านมลพิษทางอากาศ มลพิษน้ำทิ้งและของเสียอุตสาหกรรม	- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 - ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2547 - ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง พ.ศ. 2560 - ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การขนส่งวัตถุอันตรายที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมรับผิดชอบ พ.ศ. 2558 - ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง บัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย พ.ศ. 2556
กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน	- กำกับดูแลด้านความปลอดภัยการใช้หม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน แก่พนักงานที่ดูแลหม้อน้ำ	- กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหารจัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร บันจัน และหม้อน้ำ พ.ศ.2564

หน่วยงาน	ด้านกำกับดูแล	หมายเหตุ
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน	- กำกับดูแล ด้านการอนุรักษ์พลังงานของโรงงานอาคารควบคุม	- พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2550)
กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	- กำกับดูแลด้านมลพิษที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของโรงงานอุตสาหกรรม	- ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ. 2559 - ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เล่มที่ 123 ตอนที่ 50ง เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ลงวันที่ 18 พ.ค. 2549

จากตารางที่ 1-9 จะพบว่ามีหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรม ให้เป็นไปตามภารกิจของหน่วยงานนั้นๆ อาทิ กรมโรงงานอุตสาหกรรม มีภารกิจในการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมจากการดำเนินงานของโรงงาน หรือ กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน ที่กำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมในด้านความปลอดภัยแก่ลูกจ้างหรือพนักงานที่เกี่ยวข้องในการดำเนินต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม

ทั้งนี้ ที่ปรึกษาได้ดำเนินการสรุปข้อกฎหมาย ระเบียบ หรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้องต่างๆ กับการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินของโรงงานอุตสาหกรรมหรือผู้ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เป็นตามตารางที่ 2-10

ตารางที่ 1-9 สรุปข้อกฎหมายต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานด้านถ่านหินของโรงงานอุตสาหกรรม

การดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง	ค่า/ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง	หมายเหตุ
การนำเข้าถ่านหิน	-	ยังไม่มีระเบียบค่า/ข้อกำหนดในการนำเข้าถ่านหิน
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	- อุณหภูมิพื้นผิวหม้อน้ำไม่เกิน 60 °C	- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน พ.ศ. 2549

	- ค่า pH น้ำป้อนหม้อน้ำที่ 5.8-9.5 - ค่า Total Hardness ที่ไม่เกิน 10 ppm as CaCO₃ - ค่า pH น้ำในหม้อน้ำที่ 8.5-11.8 - ค่า Total Dissolved Solid ไม่เกิน 3,500 ppm	- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549
อุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด	-	ยังไม่มี การระบุค่า/ข้อจำกัดของอุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด
ด้านสิ่งแวดล้อม	โรงงานอุตสาหกรรม ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate: TSP) ไม่เกิน 320 mg/m ³ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) ไม่เกิน 700 ppm ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x) ไม่เกิน 400 ppm	- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2559 และประกาศกระทรวงทรัพยากรพลังงานและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากตารางที่ 1-10 ที่ปรึกษาได้ดำเนินการยกตัวอย่างกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานด้านต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ ทางด้านสิ่งแวดล้อม มีค่า/ข้อจำกัดทางด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องมากมาย อาทิ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานผลิต สังกะสี หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ. 2547 ที่กำหนดค่าการปล่อยมลพิษที่ออกสู่อากาศภายนอกของโรงไฟฟ้า เป็นต้น

จากตารางข้างต้นจะพบว่า การดำเนินงานทางด้านประสิทธิภาพหม้อน้ำและการดำเนินงานทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้นมีหลายหน่วยงานและกฎหมายหลายฉบับในการบังคับ ดูแลและกำกับในด้านที่เกี่ยวข้องไปแล้ว แต่ในส่วนของการทางด้านอุปกรณ์เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดและการนำเข้าถ่านหินนั้น ยังไม่มีหน่วยงานใดๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือเข้ามาดำเนินการจัดการในด้านดังกล่าว ซึ่งหากไม่มีการจัดการในด้านดังกล่าวอาจส่งผลในการดำเนินงานด้านเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดของประเทศได้ต่อไปในอนาคต