



ทฤษฎีและผลงานวิจัยในอดีต

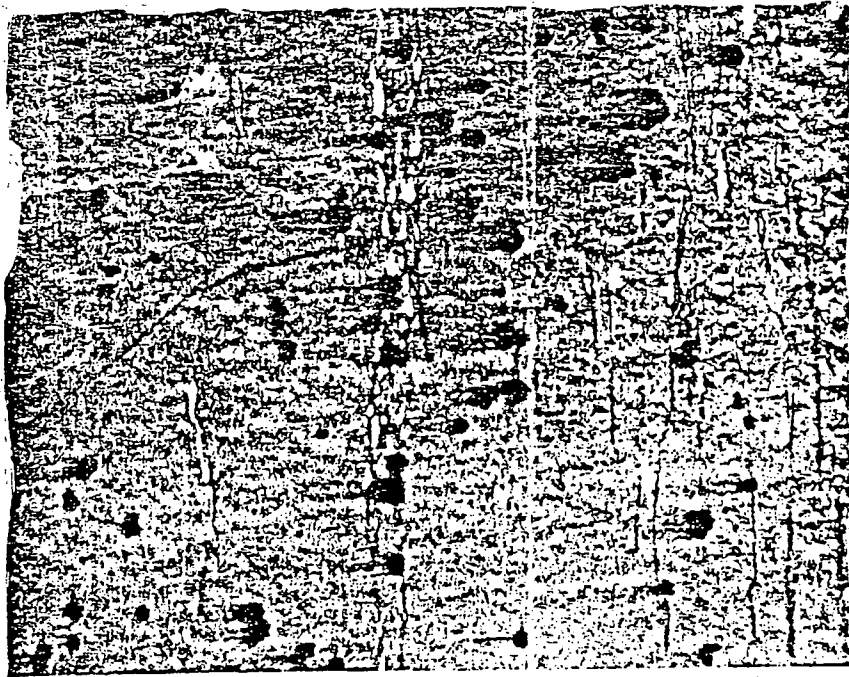
กำมะถันเป็นสิ่งใหม่ต้องการที่ประกอบอยู่ในถ่านหินพบว่า โดยปกติจะมีประกอบอยู่ในช่วงร้อยละหนึ่งถึงสิบ ซึ่งนับว่ามากพอสมควรในการที่จะก่อให้เกิดปัญหาในด้านกำมะถัน เพราะเมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้แล้วกำมะถันที่ประกอบอยู่จะรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่สามารถรวมกับไอน้ำในอากาศกลายเป็นกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) กับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนอุปกรณ์การเผาไหม้ จากสาเหตุนี้จะพบว่าการที่มีกำมะถันประกอบอยู่ในถ่านหินปริมาณสูงแล้วจะก่อให้เกิดปัญหาในด้านสภาวะแวดล้อมเป็นพิษและปัญหาในการกัดกร่อนอย่างมาก จึงจำเป็นต้องศึกษาหาวิธีสกัดกำมะถันเพื่อให้ปริมาณกำมะถันในถ่านหินลดน้อยลง

2.1 ชนิดและรูปร่างลักษณะของกำมะถัน

กำมะถันที่มีอยู่ในถ่านหินสามารถแบ่งออกได้ตามรูปลักษณะและสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้สามชนิดใหญ่ ๆ คือ อยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ (metallic sulfide) รูปของโลหะซัลเฟต (metallic sulfate) และรูปของกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur) ซึ่งแต่ละรูปมีปรากฏอยู่ในถ่านหินในปริมาณมากน้อยไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดการทับถมของอินทรีย์สารทั้งพืชและสัตว์ ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นถ่านหิน เป็นต้น

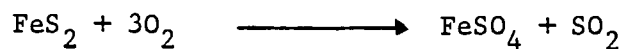
2.1.1 กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur) พบว่ามีอยู่ในถ่านหินในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์โดยจะพบอยู่ในลักษณะที่เป็นแร่คือ แร่ไพไรต์ (pyrite) และแร่มาร์คาไซต์ (marcasite) แร่ทั้งสองชนิดนี้มีสูตรเคมีเหมือนกันคือ FeS_2 แต่มีความแตกต่างกันในด้านลักษณะของโครงสร้างผลึกที่ยากจะพิจารณาตัดสินว่าเป็นแร่ไพไรต์หรือแร่มาร์คาไซต์ ดังนั้นโดยปกติแล้ว เรียงรวมโลหะซัลไฟด์ที่พบในถ่านหินว่าเป็นแร่ไพไรต์ทั้งสิ้น

แร่ไพไรต์พบว่ามีอยู่กระจัดกระจายทั่วไปในถ่านหินอาครวมกันเป็นกลุ่ม เป็นแถบในลักษณะรูปร่างกลมหรือรูปเข็มดังรูปที่ 2.1 การขจัดกำมะถันไพไรต์ให้น้อยลงสามารถทำได้โดยวิธีทางกายภาพ (physical cleaning) คือนำถ่านหินมาบดให้ละเอียดเพื่อให้กำมะถันไพไรต์ที่ประกอบอยู่แยกตัวออกมา และอีกวิธีหนึ่งคือวิธีทางเคมี (chemical cleaning) ที่จำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีของกำมะถันไพไรต์ในการขจัด

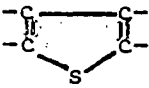


รูปที่ 2.1 ลักษณะกำมะถันไพไรต์ (Elwood, 1940)

2.1.2 กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur) พบว่ามีอยู่ในถ่านหินในลักษณะของ โลหะซัลเฟต เช่นพวกสารประกอบของ แกลือแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) สารประกอบซัลเฟต ของเหล็ก ทองแดง แมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งเกลือของโลหะเหล่านี้เป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยา ออกซิเดชันของกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินดังปฏิกิริยา



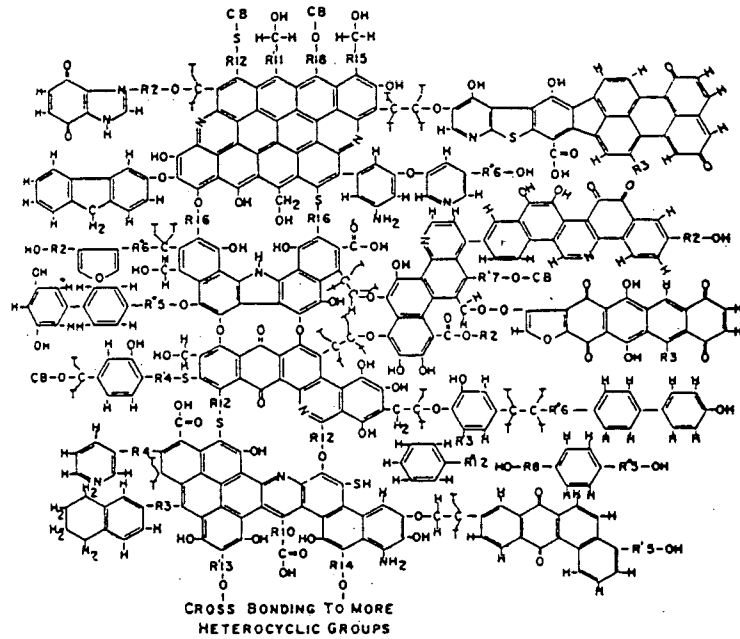
ปกติแล้วพบว่ากำมะถันซัลเฟตมีอยู่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำมะถันไฟโรต์และกำมะถันอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในถ่านหินซึ่งไม่ค่อยมีปัญหาในด้านการขจัดเหมือนกำมะถันรูปอื่น

2.1.3 กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur) พบว่ามีอยู่กระจัดกระจายทั่วไปในถ่านหิน ประกอบอยู่ในลักษณะที่เป็นโครงสร้างพันธะเคมีต่าง ๆ กันหลายรูปแบบ และได้มีผู้พยายามทดลองศึกษาหาลักษณะโครงสร้างที่แท้จริงของกำมะถันอินทรีย์ โดยทำการทดลองศึกษาถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ แล้วสามารถสรุปออกมาได้ว่ากำมะถันอินทรีย์สามารถประกอบอยู่ในลักษณะของสารประกอบพวก mercaptan มีสูตรทางเคมีเป็น R-SH ลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์มีสูตรทางเคมีเป็น R-S-R' และลักษณะของสารประกอบพวก heterocyclic ring structure มีสูตรทางเคมีเป็น  ซึ่งสารประกอบทั้งสามสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังประกอบอยู่ในรูปของสารประกอบไดซัลไฟด์มีสูตรทางเคมีเป็น R-S-S-R' ดังแสดงโครงสร้าง รูปที่ 2.3 ในการขจัดกำมะถันอินทรีย์นั้นไม่สามารถใช้วิธีการทางกายภาพได้ต้องใช้วิธีการทางเคมีวิธีเดียวเท่านั้นในการขจัด

2.2 วิธีการขจัดกำมะถันในถ่านหินเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ในการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถที่จะนำมาใช้ได้โดยให้เกิดปัญหาที่ติดตามมาน้อยที่สุด ซึ่งจำเป็นจะต้องนำถ่านหินมาผ่านวิธีการขจัดกำมะถันเพื่อให้ปริมาณกำมะถันในถ่านหินลดน้อย โดยแบ่งแยกการใช้วิธีการเหล่านี้ตามความเหมาะสมคือ

2.2.1 วิธีการทางกายภาพวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายไม่ลึกลับซับซ้อนคือ เป็นวิธีที่ขจัดเฉพาะกำมะถันไฟโรต์เท่านั้น ในการขจัดกำมะถันจะนำถ่านหินมาบดให้ละเอียดแล้วนำไปแยกเอากำมะถันไฟโรต์และแร่ธาตุอื่น ๆ ที่ประกอบอยู่ในถ่านหินให้แยกตัวออกจากถ่านหินโดยอาศัยหลักของความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะคือ ปกติแล้วถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.3 ส่วนกำมะถันไฟโรต์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 วิธีนี้มีข้อดีคือค่าใช้จ่าย



R^oN = Alicyclic rings of N carbons.

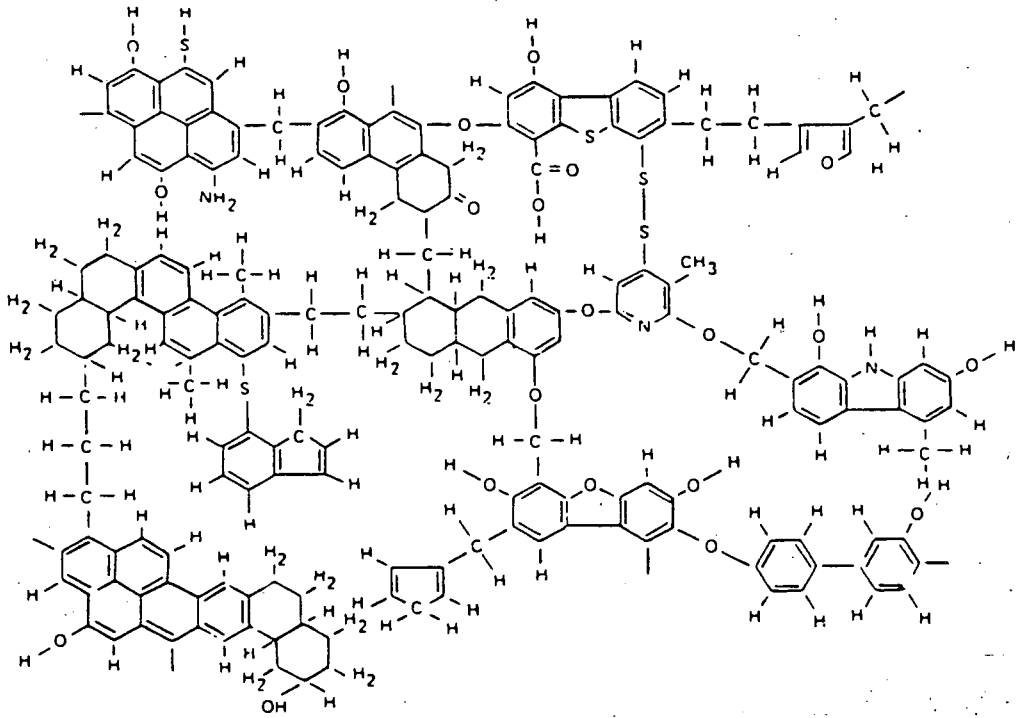
RN = Alkyl side chain of N carbons.

R'N = Unsaturated alkyl side chain of N carbons.

CB = Cross bonding by O or S to new heterocyclic groups with side chains.

T = Tetrahedral 3 dimensional C-C bonds, C-O bonds and C-S bonds.

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ของสารประกอบพวก mercaptan
ซัลไฟด์ และ heterocyclic ring structure (Eliot, 1978)



รูปที่ 2.3 : ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ของสารประกอบพวก ไทลไฟด์ (Eliot, 1978)

ในการลงทุนต่ำ แต่มีข้อเสียคือขจัดได้เฉพาะกำมะถันไพไรต์เท่านั้น และขจัดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะถ่านหิน ลักษณะของกำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหินด้วย

2.2.2 วิธีการทางเคมีใช้ปฏิกิริยาทางเคมีช่วยในการขจัดกำมะถันวิธีนี้ อาศัยปฏิกิริยาของกำมะถันไพไรต์ กำมะถันอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในถ่านหิน ทำปฏิกิริยาเคมีเช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ออกซิเดชัน เป็นต้น

2.2.3 วิธีการขจัดกำมะถันในรูปของสารประกอบเคมีในระหว่างการเผาไหม้ วิธีนี้ใช้วิธีเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในช่วงที่เกิดการเผาไหม้แล้วให้สารเคมีที่เติมลงไปรวมตัวกับกำมะถันที่ละลายตัวจากการเผาไหม้เป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่สามารถแยกออกจากการเผาไหม้ได้

2.2.4 วิธีการขจัดกำมะถันในรูปของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ วิธีนี้ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แล้วได้ก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ซึ่งจะมีกระบวนการดูดซึมก๊าซที่เกิดขึ้นเพื่อไม่ให้มีโอกาสไปก่อให้เกิดปัญหาต่อไป ตัวอย่างสารที่ใช้ดูดซึมก๊าซพวกนี้ เช่นพวกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.2.5 วิธีการเปลี่ยนแปลงถ่านหินให้เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดก่อนที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงเช่น ในกระบวนการทำให้เป็นก๊าซ (gasification) และกระบวนการที่ทำให้เป็นของเหลว (liquefaction) เป็นต้น

จากวิธีการทั้งห้าที่กล่าวมานี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการขจัดกำมะถันให้ปริมาณกำมะถันในถ่านหินลดน้อยลง เพื่อลดปัญหาทั้งในด้านสถานะแวดล้อมและปัญหาการกัดกร่อน ซึ่งจะใช้วิธีการใดก็จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสม ลักษณะถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เงินทุน ลักษณะของเชื้อเพลิงที่ใช้ว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุด

2.3 วิธีการทางเคมีในการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

2.3.1 การขจัดกำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

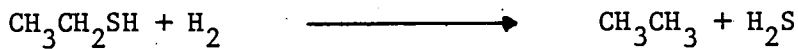


กำมะถันอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ สามารถที่จะทำปฏิกิริยาไฮโดรซิเนชัน

ดีคอมโพสิชัน ออกซิเดชันหรือทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ก. ปฏิกิริยาไฮโดรซิเนชัน (3) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ แล้วให้ผลออกมาเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังปฏิกิริยา

ethanethiol



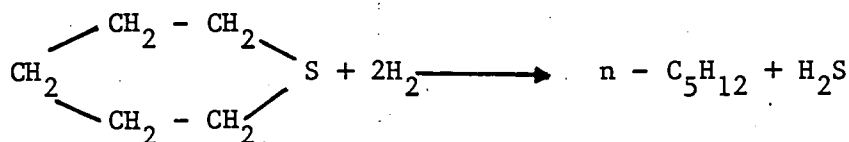
2-propanethiol



3-thiapentane



thiacyclohexane



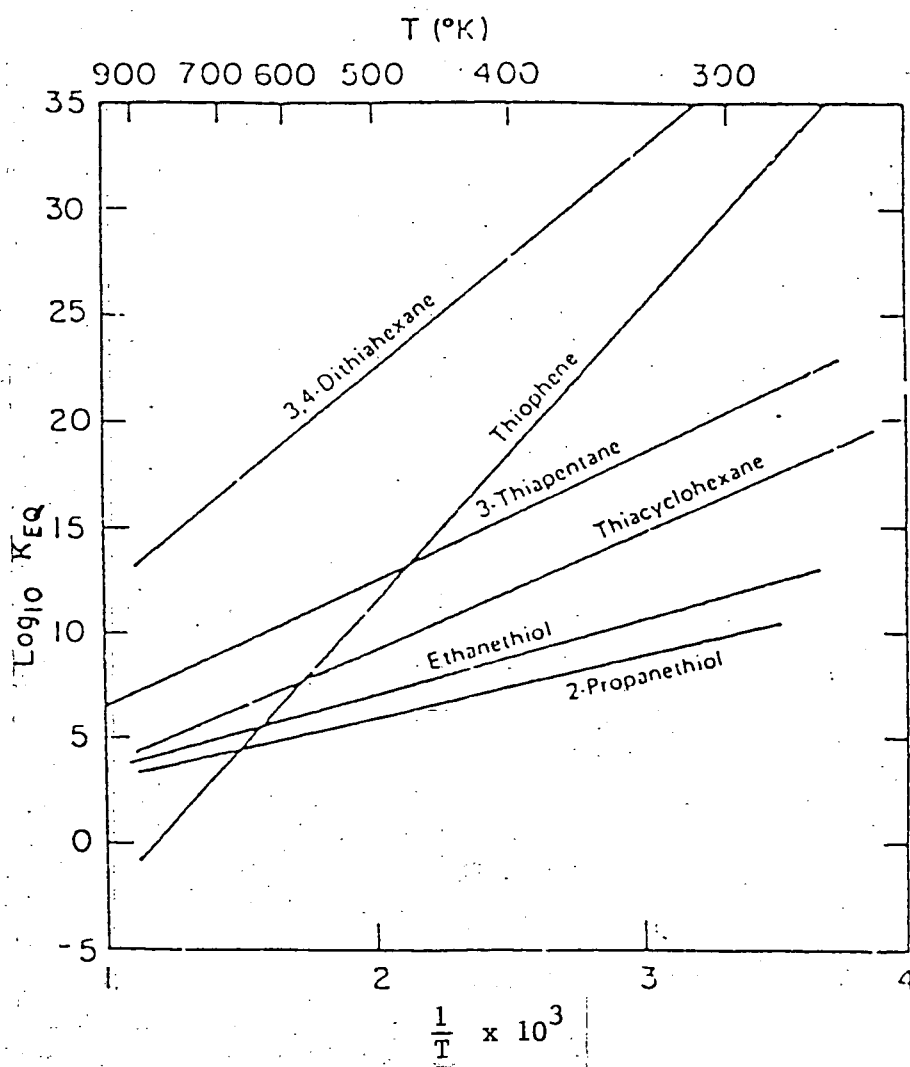
3, 4 dithiahexane



thiophene



จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลเคมี (equilibrium constant) กับอุณหภูมิดังรูปที่ 2.4 จากกราฟพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรซิเนชัน

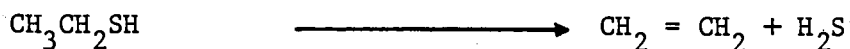


รูปที่ 2.4 : ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลเคมีกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรซิเนชั่น (Eliot, 1978)

ของกำมะถันอินทรีย์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ข. ปฏิกิริยาดีคอมโพลีชัน (3) เป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของกำมะถันอินทรีย์โดยอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิสูง แล้วจะให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังปฏิกิริยา

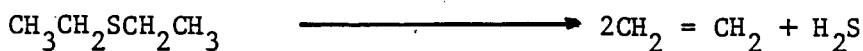
ethanethiol



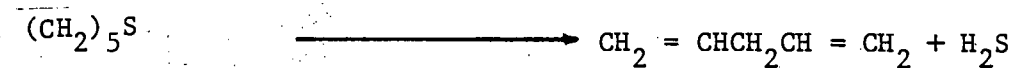
2-Propanethiol



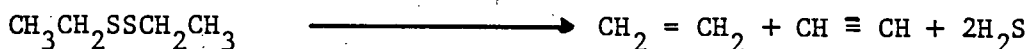
3-thiapentane



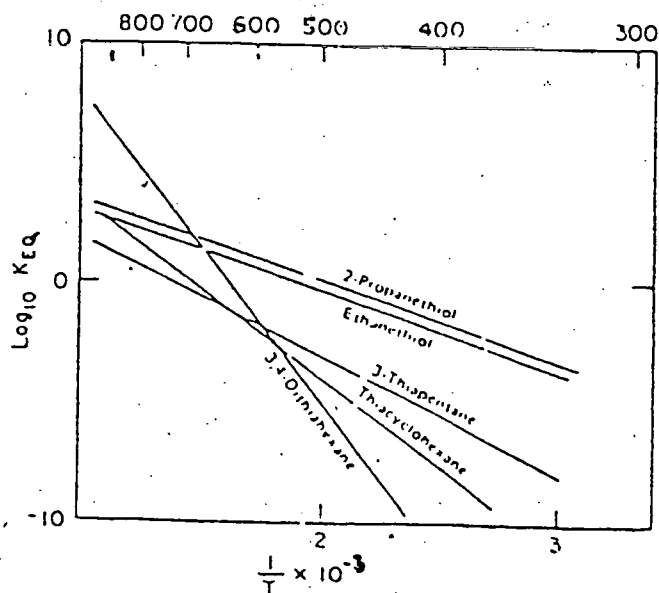
thiacyclohexane



3, 4-dithiahexane



ค่าคงที่สมดุลเคมีของปฏิกิริยาดีคอมโพลีชัน แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.5



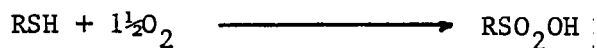
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมดุลเคมีกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาดีคอมโพลีชัน (Eliot, 1978)

จากกราฟจะพบว่าปฏิกิริยา ดีคอมโพสิชัน นั้นเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้
 นี้ยังมีผลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา ดีคอมโพสิชัน คือ

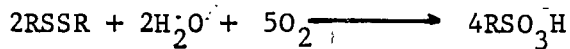
- อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อปฏิกิริยาดีคอมโพสิชัน ของกำมะถันอินทรีย์ใน
 การสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- ปริมาณ $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ ของกำมะถันอินทรีย์ สลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ
 ต่ำกว่า 500 °ซ
- กำมะถันอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นสารประกอบพวก heterocyclic ring structure
 เสถียรมากกว่ากำมะถันอินทรีย์ที่อยู่ในพันธะ C-S ซึ่งจะสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำลงนัก

ค. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (3) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้สารที่เป็นตัวออกซิไดซ์เช่น
 ออกซิเจน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกำมะถันอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ แล้วให้ผลิตภัณฑ์
 ออกมาเป็นสารประกอบพวกกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) ดังปฏิกิริยา

สารประกอบพวก mercaptan

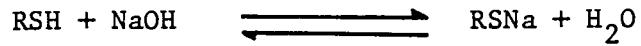


สารประกอบพวกซัลไฟด์



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันอินทรีย์ในรูปของสารประกอบพวก thiols และ
 ไดซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่สภาวะปกติ พบว่าสารประกอบพวกที่มีพันธะ C-S
 ธรรมดาที่พวกที่เป็น ring structure สามารถที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วให้กรดซัลโฟนิก
 ทั้งคู่

ง. ปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยานี้ถูกนำมาใช้
 เป็นเวลานานแล้วคือใช้ในการขจัดสารประกอบพวก mercaptan ออกจาก gasoline ใน
 จุดล้างกรรมปิโตรเลียมดังปฏิกิริยา

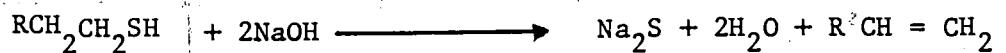


การละลายของสารประกอบ mercaptan ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1

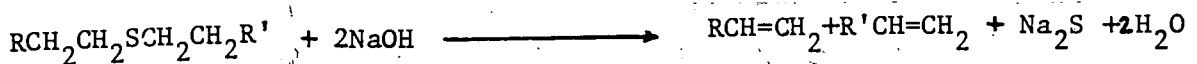
ตารางที่ 2.1 การละลายของ mercaptan ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Mercaptan	Solubility (กรัม/ลิตร)
Methyl to butyl	very soluble
Amyl	328.0
Hexyl	94.0
Heptyl	24.6
Octyl	8.0
Nonyl	2.3

กรณีสารประกอบ mercaptan ในถ่านหินปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



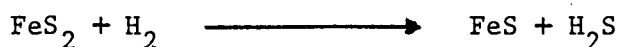
กรณีสารประกอบซัลไฟด์ในถ่านหิน ดังปฏิกิริยา



2.3.2 กำมะถันไพไรต์

กำมะถันไพไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ออกซิเดชัน ปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เช่นเดียวกับกำมะถันอินทรีย์ ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกัน (3)

ก. ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแล้วให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นพวกสารประกอบเหล็กซัลไฟด์กับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

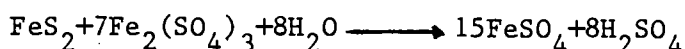
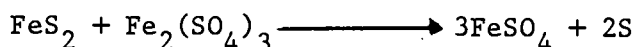


ที่อุณหภูมิสูงกว่า 230 °C ปฏิกิริยาสามารถดำเนินต่อไปได้

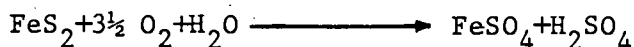
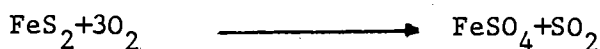


ข. ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้สารเคมีที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์เช่นสารประกอบพวกสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และออกซิเจนเป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินแล้วให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นธาตุกำมะถันอิสระหรือสารละลายที่มีอนุมูลซัลเฟตไอออนกับเกลือเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เกิดขึ้นดังปฏิกิริยา

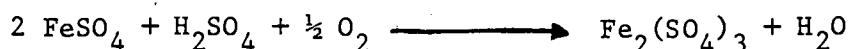
กรณีใช้สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตทำปฏิกิริยา



กรณีใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยา

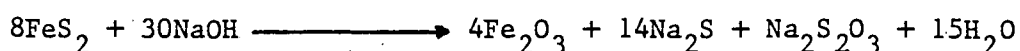


นอกจากนี้ในการใช้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินจะเกิดปฏิกิริยาที่สลับอีกปฏิกิริยาหนึ่ง คือปฏิกิริยาที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้สารละลายของเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในการนำสารละลายกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยา regeneration



ค. ปฏิกริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกริยานี้:

เป็นปฏิกริยาที่กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินทำปฏิกริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วแยกกำมะถันออกมาในรูปของผลิตภัณฑ์เกลือดังปฏิกริยา



2.4 กระบวนการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยปฏิกริยาเคมี

จากลุ่มปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกริยาเคมีของกำมะถันอินทรีย์กำมะถันไพไรต์ โดยเกิดปฏิกริยาหลักสามปฏิกริยา คือ ไฮโดรจีเนชัน ออกซิเดชัน และปฏิกริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีผู้คิดค้นหากระบวนการขจัดกำมะถันจากถ่านหิน โดยอาศัยหลักเกณฑ์ของแต่ละปฏิกริยาดังกล่าวแล้วข้างต้นใน 2.3

2.4.1 กระบวนการขจัดกำมะถันโดยใช้ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน

กระบวนการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยอาศัยปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันพบว่าประสบความสำเร็จอย่างมากในการลดจำนวนกำมะถันในถ่านหินให้น้อยลง หลักเกณฑ์ของกระบวนการนี้คือการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกริยา

ก. H-Coal Process (4) กระบวนการนี้เป็นการแปรรูปเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งของถ่านหินให้อยู่ในรูปของก๊าซและของเหลวที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด หลักการของกระบวนการนี้คือจะใช้ถ่านหินขนาด ต่ำกว่า 351 μm ผสมกับตัวทำละลายประเภทน้ำมันแล้วให้ทำปฏิกริยากับก๊าซไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ ชนิด ebullated - bed ที่มีตัวเร่งปฏิกริยาอยู่ด้วย ถ่านหินจะถูกเร่งปฏิกริยาโดยตัวเร่งและเกิดปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันขึ้น สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 850 °C ความดัน 21.14 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นก๊าซและของเหลวพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รายละเอียดของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2.6 จากกระบวนการนี้สามารถที่จะลดกำมะถันที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้เหลือเพียงร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 เท่านั้น

ข. Synthoil Process (4) กระบวนการนี้ก็จะเป็นการแปรรูปถ่านหินที่เป็นเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด หลักการของกระบวนการนี้ คล้ายคลึงกับกระบวนการ H-Coal คือใช้ถ่านหินผสมกับตัวทำละลายประเภท

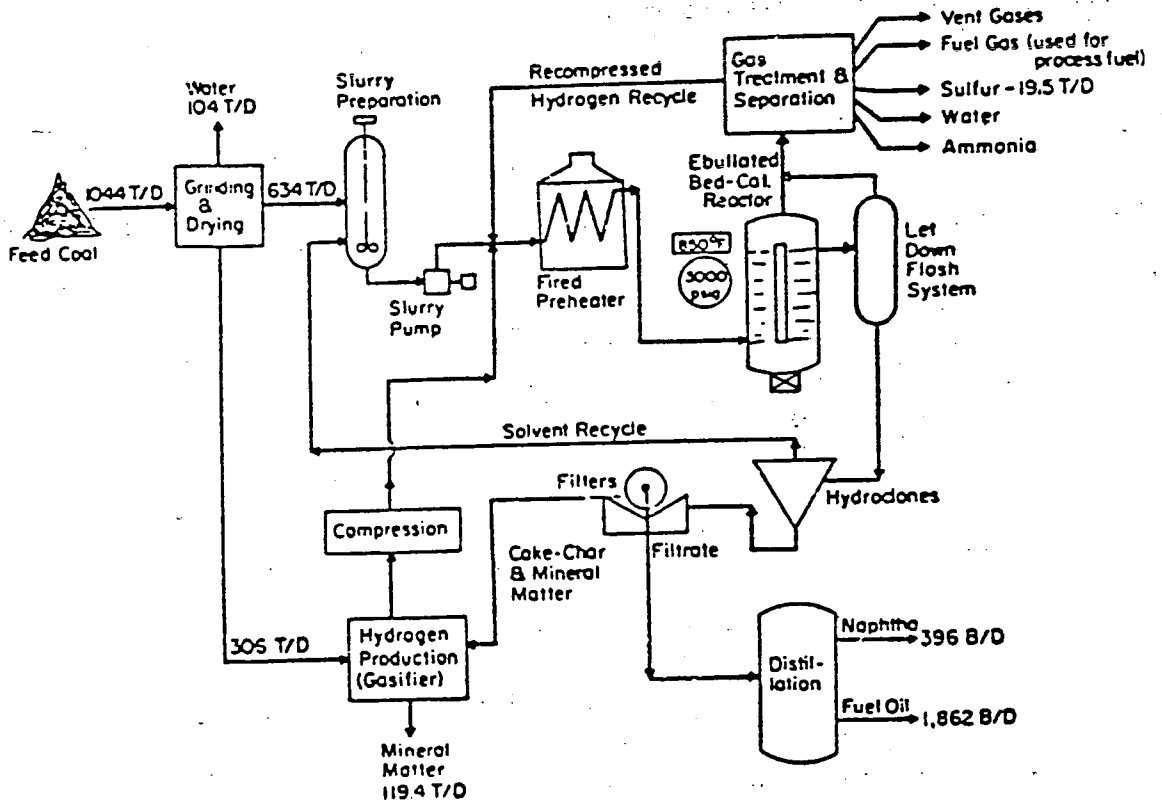
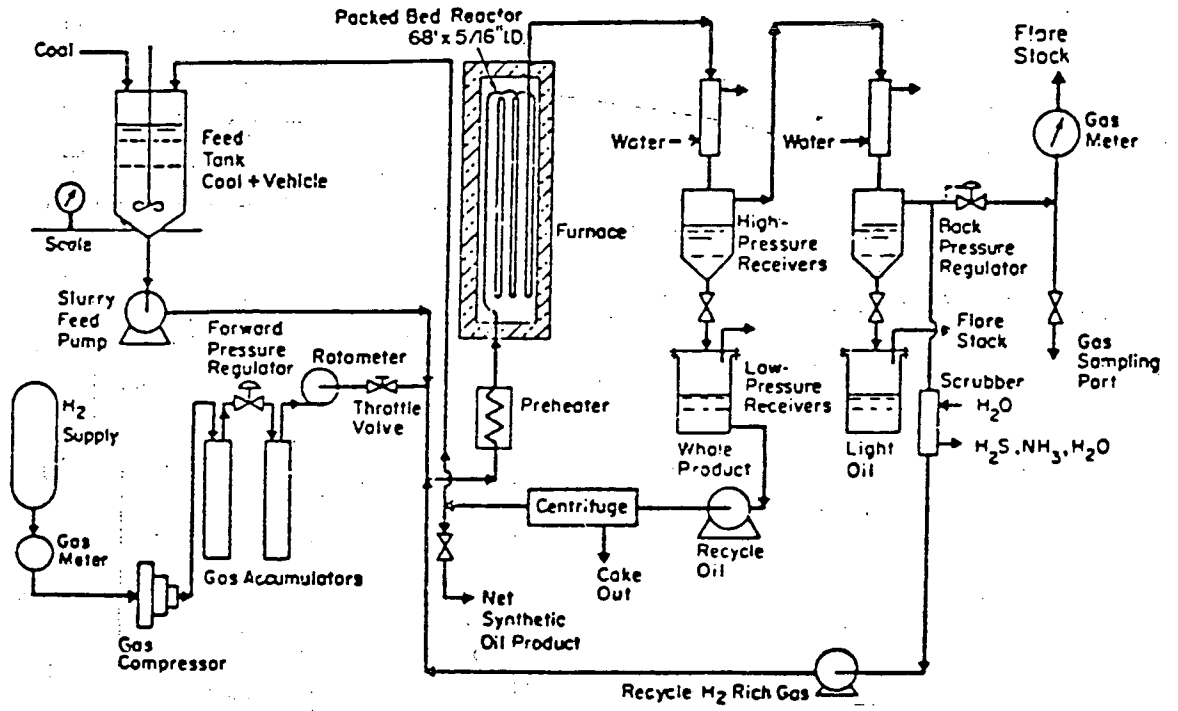


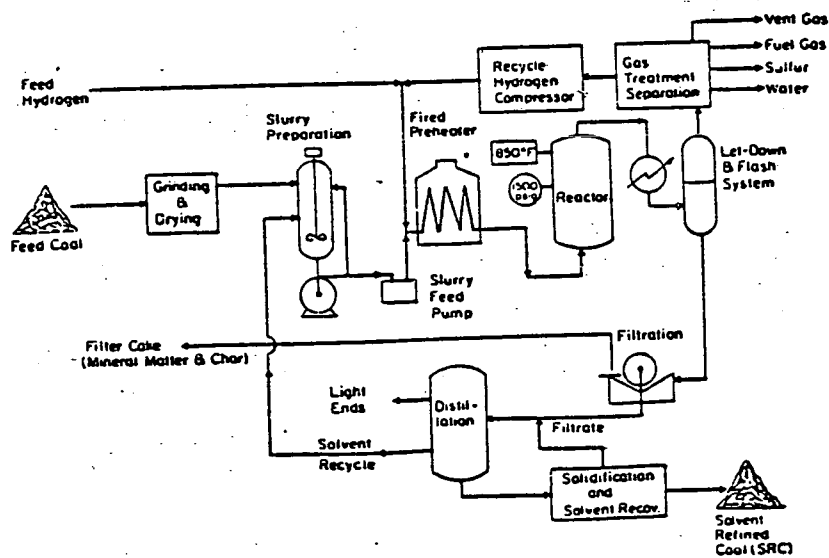
Figure 2.6 H-Coal Process (Mendizabal, 1976)



รูปที่ 2.7 Synthoil Process (Mendizabal, 1976)

น้ำมันและให้ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิด fixed-bed แทนที่จะเป็น ebullated - bed แบบกระบวนการ H-Coal Process ซึ่งในเครื่องปฏิกรณ์ชนิด fixed-bed มีตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุอยู่ด้วย สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือที่อุณหภูมิ 840 °ซ ความดัน 140 ถึง 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลิตรวมที่ได้เป็นก๊าซและของเหลวรายละเอียดของกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระบวนการ synthiol นี้สามารถลดกำมะถันที่ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้เหลือเพียงร้อยละ 0.3 เมื่อถ่านหินเริ่มต้นมีกำมะถันประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 5

ค. Solvent Refined Coal (SRC) (4) เป็นกระบวนการที่ผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (SRC) ที่มีกำมะถันในปริมาณต่ำและปราศจากเถ้า มีค่าความร้อนประมาณ 8888 แคลอรี/กรัม หลักการของกระบวนการนี้ใช้ถ่านหินที่มีขนาดต่ำกว่า 74 ไมครอนผสมกับตัวทำละลายที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 550° - 850°ซ โดยทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทนต่อความดันสูง ๆ สภาวะที่เกิดปฏิกิริยาคือที่อุณหภูมิ 825° - 850°ซ ความดัน 70-140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลิตรวมที่ได้เป็นพวกก๊าซและเชื้อเพลิงแข็ง (SRC) รายละเอียดของกระบวนการในรูปที่ 2.8 ผลที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถที่ยึดกำมะถันไพไรต์ได้หมดและลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 70



รูปที่ 2.8 -- Solvent Refined Coal (Mendizabal, 1976)

2.4.2 กระบวนการขจัดกำมะถันโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

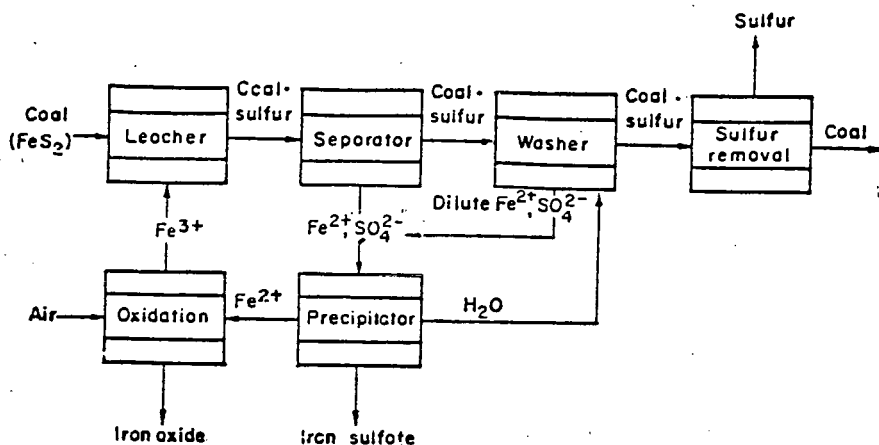
กระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันทุกกระบวนการจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินให้ดีขึ้นคือลดปริมาณกำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหินให้น้อยลงก่อนที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ก. Dillon Process (5) กระบวนการนี้จะใช้ถ่านหินผสมกับน้ำและ อากาศ ที่ความดัน 43.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 175 °ซ โดยจะทำปฏิกิริยากันในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถวนเป็นเวลา 10 นาที ผลที่ได้พบว่าเมื่อถ่านหินเริ่มแรกมีปริมาณกำมะถันทั้งหมดร้อยละ 2.55 โดยแยกเป็นกำมะถันอินทรีย์ร้อยละ 0.94 หลังจากที่ผ่านมากระบวนการนี้แล้วสามารถที่จะทำให้อำนาจกำมะถันทั้งหมดลดลงเหลือเพียงร้อยละ 0.48 โดยที่ปริมาณกำมะถันไพไรต์ทั้งหมดและครึ่งหนึ่งของกำมะถันอินทรีย์ถูกขจัดออกไปจากถ่านหิน

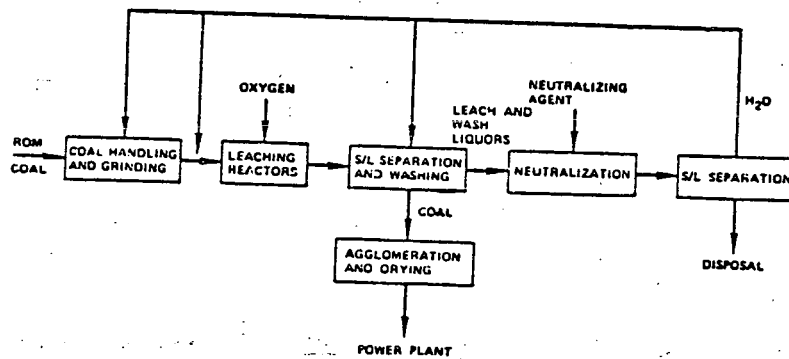
ข. Mukai Process กระบวนการนี้ใช้สารละลายเป็นตัวออกซิไดซ์ คือสารละลาย 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับกำมะถันในถ่านหินชนิดบิทูมินัสในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถวน จะพบว่าหลังจากถ่านหินผ่านกระบวนการนี้แล้วปริมาณกำมะถันไพไรต์จะถูกขจัดออกไปหมดถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิห้องก็ตาม

ค. Meyer Process (4) กระบวนการนี้ Meyer ใช้ถ่านหินบดละเอียดผสมกับสารละลายเฟอริกซัลเฟตหรือเฟอริกคลอไรด์โดยให้ทำปฏิกิริยากันในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถวน กำมะถันไพไรต์ถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายแล้วให้กำมะถันอิสระและสารละลายของอนุมูลซัลเฟตอิสระ ซึ่งสามารถแยกออกจากถ่านหินโดยวิธีการกรองแล้วนำสารละลายไป regenerate เพื่อนำกลับไปใช้งานใหม่ได้ส่วนถ่านหินที่กรองได้นำไปล้างให้หมดกรด แล้วใช้ตัวทำละลายเช่น ทูลีน (Toluene) ล้างเอากำมะถันอิสระที่เกาะติดอยู่ที่ถ่านหินออกก่อนที่จะนำไปใช้งาน

ปกติปฏิกิริยาของกระบวนการนี้เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 100 °ซ ความดันปกติ รายละเอียดของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2.9 จากกระบวนการนี้ Meyer กล่าวว่าสามารถขจัดกำมะถันไพไรต์ออกได้หมดโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถวนหลาย ๆ ตัว ในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.9 Meyer Process (Mendizabal, 1976)



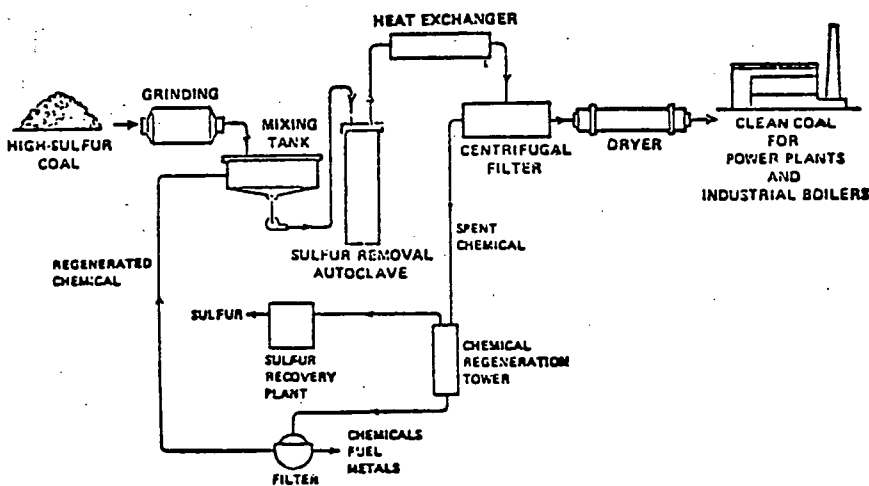
รูปที่ 2.10 Ledgemont Process (Mendizabal, 1976)



ง. Ledgeмонт Process (4) กระบวนการนี้ใช้ตัวออกซิไดซ์คือ ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับถ่านหินที่ผสมน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดกวนที่ทนความดันได้พอประมาณ สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ ใช้ความดันออกซิเจน 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, 130°ซ เวลา 2 ชม. หลังจากที่ทำปฏิกิริยาแล้ว แยกถ่านหินออกจากน้ำล้างโดยการกรองและนำน้ำล้างไปทำให้เป็นกลางด้วย CaO เพื่อจะได้มีน้ำล้างกลับไปทำปฏิกิริยาใหม่หลังจากที่แยกเอาสารประกอบพวกเหล็กและซัลเฟอร์ออกไปแล้ว รายละเอียดของกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.10 จากกระบวนการของ Ledgeмонт นี้สามารถที่จะสกัดกำมะถันไฟรตออกจากถ่านหินได้หมด

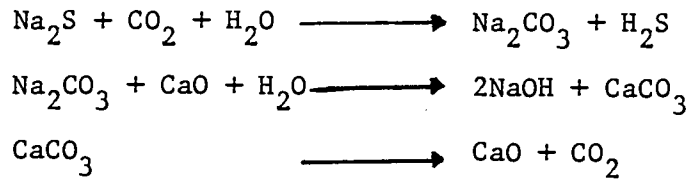
2.4.3 กระบวนการสกัดกำมะถันจากถ่านหินโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Battelle Process (4) กระบวนการนี้ใช้ถ่านหินขนาด 74 μm ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5-10% ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดกวนที่อุณหภูมิ 225° - 356°ซ ที่สภาวะนี้จะเป็นสภาวะที่สกัดกำมะถันและแยกออกจากถ่านหิน โดยกำมะถันจะเปลี่ยนไปเป็นสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ สามารถแยกออกจากถ่านหินโดยการกรองและนำสารละลายนี้ไป regenerate ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ CaO เพื่อให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถนำกลับไปทำปฏิกิริยาใหม่ได้ รายละเอียดของกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Battelle Process (Mendizabal, 1976)

ปฏิกิริยา regeneration สำหรับละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นดังนี้



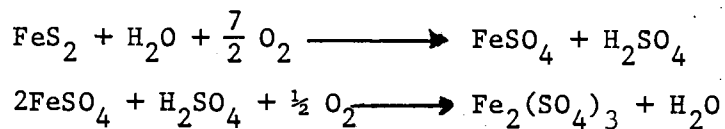
จากกระบวนการของ Battelle ได้มีผู้สนใจและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการขจัดกำมะถันสูงขึ้นและกล่าวว่าสามารถ ขจัดกำมะถัน ไฟโรต์ในถ่านหินได้หมด และขจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 40

การศึกษาข้อมูลของปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีที่ใช้ขจัดกำมะถันอินทรีย์กับกำมะถันไฟโรต์ โดยใช้ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ออกซิเดชัน และปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการ Meyer คือใช้ถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตน่าสนใจเป็นพิเศษ เพราะปฏิกิริยาเกิดได้ที่อุณหภูมิไม่สูงนักคือประมาณ 100°ซ ความดันบรรยากาศและมีขั้นตอนในการขจัดกำมะถันไม่ยุ่งยากเหมือนกับกระบวนการขจัดกำมะถันของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน หรือปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นอกจากนี้กระบวนการ Meyer ยังมีข้อดีในการนำสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาแล้วมากลับมาใช้ใหม่ได้อีกเป็นวิธี regeneration สารละลายในเครื่องปฏิกรณ์ตัวเดียวกันกับที่ทำปฏิกิริยาหรือแยกตัวกันก็ได้

2.5 ผลงานทดลองและงานวิจัยต่างประเทศ

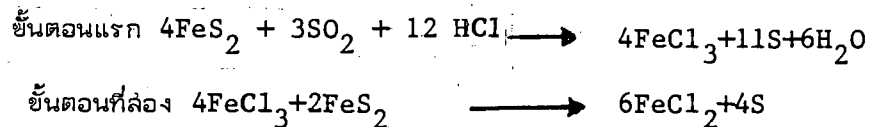
Meyer (6) ได้ศึกษากระบวนการในการขจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ทำปฏิกิริยาแทนสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่ง Meyer ใช้ถ่านหินบดละเอียดทำปฏิกิริยากับสารละลายในสภาวะที่เหมาะสมภายหลังการเกิดปฏิกิริยาแล้วได้สารละลายเกลือเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และกำมะถันอิสระเกิดขึ้น สารละลายแยกจากถ่านหินโดยการกรองแล้วนำไป regenerate เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนถ่านหินที่แยกได้นำไปล้างแล้วทำให้แห้งจากนั้นจะแยกเอากำมะถันอิสระที่ติดอยู่กับถ่านหินออกโดยการสกัดด้วยสารละลายทูลอีน ในกระบวนการนี้ Meyer สามารถลดกำมะถันไฟโรต์ลงได้อย่างน้อยไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 โดยใช้สภาวะในการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50-110°ซ เวลา $\frac{1}{2}$ - 2 ชม. ขนาดของถ่านหินอยู่ในช่วงต่ำกว่า 74 μm ถึง 1.27 ซม. และความดันปกติ

Dillon และ Warshaw (5) ได้ทำการทดลองขจัดกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินโดยทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศที่ความดันและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ Dillon และ Warshaw ใช้กับถ่านหินทั่ว ๆ ไปเกือบทุกชนิด เช่น พวกแอนทราไซต์ บิทูมินัส ชิบ บิทูมินัส ลิกไนท์ และ พีท โดยที่กำมะถันไพไรต์ที่ประกอบอยู่ในถ่านหินจะอยู่ในพันธะระหว่างกำมะถันและเหล็กในลักษณะที่มีสูตรเป็น FeS_x โดยที่ x มีค่าตั้งแต่ 0.5 - 4 ถ่านหินที่ประกอบด้วยกำมะถันไพไรต์ ถูกบดให้ละเอียดและทำให้เป็นสารละลายแขวนลอยโดยผสมกับน้ำจากนั้นก็ให้นำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะแบบ autoclave และให้ทำปฏิกิริยากับอากาศตั้งปฏิกิริยา



ผลการทดลองคือในปฏิกิริยานี้มีสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเกิดขึ้นซึ่งจะเป็นตัวออกซิไดซ์เช่นเดียวกับอากาศที่ใช้ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันเกิดเร็วขึ้น สารละลายแยกออกจากถ่านหินโดยการกรอง ถ่านหินที่ได้มีกำมะถันประกอบอยู่ในปริมาณต่ำ และพบว่าเมื่อเริ่มแรกมีกำมะถันทั้งหมดร้อยละ 2.55 เป็นกำมะถันอินทรีย์ร้อยละ 0.97 ภายหลังจากทำปฏิกิริยาแล้วจะเหลือกำมะถันทั้งหมดร้อยละ 0.48 โดยสภาวะที่ทดลองคือ ถ่านหิน 200 กรัม น้ำ 460 กรัม ขนาดของถ่านหินมีขนาด $147 \mu m$ อุณหภูมิ $175^{\circ}C$ ความดันอากาศ 42.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและอัตราการกวน 600 รอบ/นาที

Meyer (7) ได้ศึกษาการขจัดกำมะถันโดยใช้สารละลาย กรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) ทำปฏิกิริยากับกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินตั้งปฏิกิริยาที่เกิด 2 ขั้นตอนคือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีตัวออกซิไดซ์สองชนิดคือ กรดซัลฟูรัสและสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันมีผลดีขึ้นและกำมะถันที่ขจัดได้จะขจัดออกมาในรูปของกำมะถันอิสระที่สามารถแยกออกจากถ่านหินโดยนำถ่านหินที่กรองแยกเอาสารละลายที่ประกอบด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และสารละลายกรดซัลฟูรัสออกจากถ่านหินแล้วนำถ่านหินไปสกัดด้วยตัวทำละลายเช่น พวก เบนซีน เพื่อแยกกำมะถันออกจากถ่านหิน ส่วนสารละลายนำไปประเหยเอาน้ำออกเพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงแล้วทำให้เย็นเพื่อให้เฟอร์ริกคลอไรด์ตกตะกอนแล้วกรองแยกออกจากสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

โดยปกติ Meyer ใช้สารละลายกรดซัลฟูรัสในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ สารละลายกรดเกลือให้ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน ที่สภาวะในการทดลองคือ อุณหภูมิ 110°-140°ซ เวลา $\frac{1}{2}$ - 2 ชม. หรือสูงกว่าขนาดถ่านหินต่ำกว่า 74 μm ถึง 1.27 ซม. ความดันปกติ ผลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การขจัดกำมะถันโดยใช้สารละลายกรดซัลฟูรัส

อุณหภูมิ (°ซ)	HCl (M)	H ₂ SO ₃ (M)	เวลา (ชม.)	ร้อยละการลดกำมะถัน	
				กำมะถันรวม	กำมะถันไพไรต์
140	3.6	1.9	20	15	30
100	3.6	0.9	20	23	46
100	3.6	0.9	2	26	52
100	0	0.9	20	2	4
100	0	0.9	2	22	44

Dessau (8) ศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหินจัดโดยใช้วิธีการของ Meyer แทนที่จะใช้สารละลายเฟอริกซัลเฟตหรือเฟอริกคลอไรด์ในการทำปฏิกิริยาดัง Meyer Dessau ใช้สารละลายของโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์เช่น พวกโลหะแมกนีเซียม วานาเดียมหรือซีเรียมแทนซึ่งจะแสดงสมบัติเมื่อละลายในน้ำหรือในสารละลายละลายกรด โดยทั่วไปโลหะเหล่านี้จะประกอบอยู่ในรูปของสารประกอบเช่น ในรูปของสารประกอบแมงกานีส ไดออกไซด์ แอมโมเนียมเมตาวานาเตท ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต

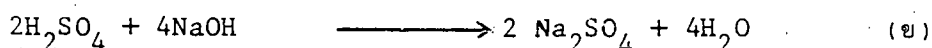
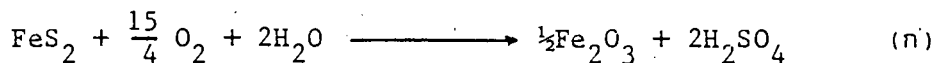
ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินขนาด 147 μm -1.651 mm. ผลลัพท์น้ำทำให้เป็นสารละลายแขวนลอย และปรับสภาพสารละลายให้เป็นกรดมี pH อยู่ในช่วง 1-5 โดยเติมกรดซัลฟูริกหรือกรดเกลือลงไป แล้วใส่โลหะที่เป็นตัวออกซิไดซ์ลงไปทำ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 4-16 ชม. ภายหลังจากปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์แล้ว พบว่าสารละลายที่ได้ประกอบด้วยสารละลายของเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เกลือเฟอร์ริกซัลเฟต $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ที่เกิดจากกำมะถันไพไรต์ และกำมะถันไพไรต์, ในถ่านหินถูกขจัดออกหมด

Agarwal และคณะ (9) ได้พัฒนา กระบวนการที่จะเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก ปฏิกิริยาจากกำมะถันอิสระให้เป็นสารละลายของอนุมูล ซัลเฟตไอออน โดยใช้สารละลายที่มีฤทธิ์ เป็นกลางของถ่านหินที่บดละเอียดทำปฏิกิริยากับก๊าซ ออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวน

ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินขนาดต่ำกว่า 147 μm ผลลัพท์น้ำทำให้เป็นสารละลายแขวนลอย แล้วให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดัน 21.14 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 130 °C เวลา 6.5 ชม. พบว่ากำมะถันไพไรต์ถูก ออกซิไดซ์ไปเป็นสารละลายของอนุมูลซัลเฟตหมด

Tai และคณะ (10) ศึกษาการขจัด กำมะถันไพไรต์โดย

ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างดังปฏิกิริยา



พบว่าการใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างช่วยให้สารละลายทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์มีฤทธิ์เป็นกลางและยังช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยา (ก) เร็วขึ้นด้วย งานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินขนาด 74 μm ปริมาณถ่านหิน 50 กรัมต่อ 500 มล. สารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายต่างโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 3.27 บรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิ 150 °C เวลา 2 ชม. ผลที่ได้จะสามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70

Van Nice และคณะ (11) ศึกษากระบวนการขจัดกำมะถัน โดยอาศัยกระบวนการ Meyer มา ปรับปรุงให้มีอัตราการผลิต 8 เมตริกตันต่อวัน ซึ่งในกระบวนการขจัดจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนแรกใช้วิธีทางกายภาพอาศัย สมบัติความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะระหว่างกำมะถัน ไพไรต์กับถ่านหิน แยกเอากำมะถันไพไรต์ออกจากถ่านหิน ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการของ Meyer นำถ่านหินที่แยกเอากำมะถันไพไรต์ออก ไปบางส่วนทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต และก๊าซออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ตัวเดียวกัน ซึ่งทั้งหมดได้ศึกษาหาอัตราการขจัดกำมะถันไพไรต์ และอัตราของ regeneration สารละลายออกมาในรูปของสมการข้างล่างเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีกำลังการผลิตสูง

$$\text{อัตราการขจัดกำมะถันไพไรต์} \quad r_1 = \frac{-dW_p}{dt} = K_1 W_p^2 y^2$$

$$\text{เมื่อ } K_1 = A_1 \exp(-E_1/RT)$$

$$W_p = \text{ร้อยละโดยน้ำหนักของกำมะถันไพไรต์ในถ่านหิน}$$

$$y = \text{อัตราส่วนของความเข้มข้น } \text{Fe}^{2+} \text{ ต่อความเข้มข้น}$$

เหล็กทั้งหมดของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์

$$A_1 \text{ และ } E_1 = \text{ค่าคงที่} \quad T = \text{อุณหภูมิ}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ}$$

อัตรา regeneration ของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

$$r_R = \frac{-dFe^{2+}}{dt} = K_R P_{O_2} (Fe^{2+})^2$$

เมื่อ $K_R = A_R \exp(-E_R/RT)$

P_{O_2} = ความดันออกซิเจน

Fe^{2+} = ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในสารละลาย

A_R และ E_R = ค่าคงที่ T = อุณหภูมิ

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

King และ Perlmutter (12) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับแร่ไพไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวน จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ($40^\circ - 100^\circ C$) เพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ($0.1-1.0 M$) และเพิ่มปริมาณของแร่ไพไรต์ที่ใช้ ($2-20$ กรัม/ลิตร) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาค ($43-104 \mu m$) โดยที่อัตราการกวนไม่มีผลในการเพิ่มหรือลดลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงปฏิกิริยาของแร่ไพไรต์ที่มีในถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเร็วเมื่อถ่านหินที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดเล็กกว่า $43 \mu m$

King และ Lewis (13) ได้ศึกษาการใช้ก๊าซออกซิเจนและสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแร่ไพไรต์พร้อมกันโดยทำปฏิกิริยากันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนขนาด 2 ลิตรที่ออกแบบไม่ให้มีการรั่วไหลของก๊าซที่ใช้ทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มความดันออกซิเจน เพิ่มอุณหภูมิ ($80-100^\circ C$) และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ($0-0.5 M$) โดยที่อัตราการกวนตั้งแต่ 680 รอบ/นาที ขึ้นไปจะไม่มีผลในการเพิ่มหรือลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาสรุปว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือ ที่ความดันออกซิเจน 8.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ $100^\circ C$ ความเข้มข้นสารละลาย $0.5 M$ ปริมาณแร่ไพไรต์ที่ใช้ 20 กรัมต่อลิตรและเวลา 4 ชม.

2.6 ผลงานวิจัยภายในประเทศ

มานพ อติวณิชพงษ์ และ พิชรินทร์ วีรานิตินนท์ (14) ทำการทดลองศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถันไฟไรต์ในถ่านหินเหมืองบางปุด้า โดยศึกษาปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวน พบว่าในการเกิดปฏิกิริยาขนาดของถ่านหินในช่วง 90-250 μm จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือ สามารถสกัดกำมะถันออกจากถ่านหินได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอื่น ๆ (<90 μm , 250-500 μm , 500-1000 μm) นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงเวลาของการทำปฏิกิริยาระยะเวลาดังแต่ 2 ถึง 6 ชั่วโมง จะให้ผลในการสกัดกำมะถันในถ่านหินใกล้เคียงกัน สรุปว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ ขนาดของถ่านหิน 90-250 μm เวลา 2 ชม. อุณหภูมิ 100°C สามารถลดปริมาณกำมะถันได้ร้อยละ 37.54