



2.1 ดินน้ำมัน

ในประเทศไทยทรัพยากรธรรมชาติที่ยังไม่ได้พัฒนานำมาใช้ให้เกิดประโยชน์คือ ดินน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการทับถมตัวของพืช และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก มีสีแตกต่างกันหลายสี ตั้งแต่สีเทา น้ำตาล จนกระทั่งดำ มีโครงสร้างซึ่งสามารถแกะออกเป็นแผ่น ๆ ได้ (laminar) มีวิธีการเกิดต่างจาก ถ่านหินในแง่อายุทางธรณีวิทยา สถานที่ ลักษณะการเกิดความร้อนและความดัน ดินน้ำมันประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ มีเนื้อส่วนใหญ่เป็นหิน และอีกส่วนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งแพร่กระจายอยู่เป็นชั้น ๆ ภายในดินน้ำมัน เราเรียกว่า "คีโรเจน" (kerogen) ส่วนใหญ่เราจะพบแหล่งดินน้ำมันบริเวณใกล้กับผิวดิน แต่ดินน้ำมันบางแหล่งอาจจะอยู่ลึก ลงไปได้ผิวดินถึงร้อยเมตร

2.1.1 การกำเนิดของดินน้ำมัน และคำจำกัดความ

ดินน้ำมันเกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ เช่น พวก ซากพืช ต้นไม้ และซากสัตว์ ทับถมรวมกันในแอ่งน้ำทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย หรือน้ำเค็ม โดยมีกระแสลม และกระแสน้ำช่วยพัดพามา ในสภาวะที่เหมาะสมทางธรณีเคมี ทับถมกันนาน นานเข้าจนกลายเป็นดินน้ำมัน เมื่อนำมาเผาจะลุกติดไฟได้ มีควันเกิดขึ้น และมีกลิ่นเหม็น น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถแยกเอาน้ำมันหิน (shale oil) และก๊าซ ไฮโดรคาร์บอนเบาแยกตัวออกมาจากดินน้ำมัน แล้วเหลือกากหิน (spent shale) ปริมาณ และคุณภาพของน้ำมันที่ได้จากการกลั่นจากดินน้ำมันจะมีปริมาณมากหรือน้อย คุณภาพดีหรือเลวขึ้นกับ ชนิดของดินน้ำมันที่นำมากลั่น การกลั่นดินน้ำมันตามลำดับส่วนในรีทอร์ทจะได้ (3)

- ก๊าซโซลีน ที่อุณหภูมิประมาณ 62-225 องศาเซลเซียส
- น้ำมันดีเซล ที่อุณหภูมิประมาณ 225-305 องศาเซลเซียส
- น้ำมันเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 305-375 องศาเซลเซียส

สารอินทรีย์จะค่อย ๆ ละลี่ยอย่างช้า ๆ นานเข้าจนกลายเป็นฟอสซิล โดยกระบวนการ biostatinomy และ toponomy สภาวะแวดล้อมของการทับถมกันอาจมี

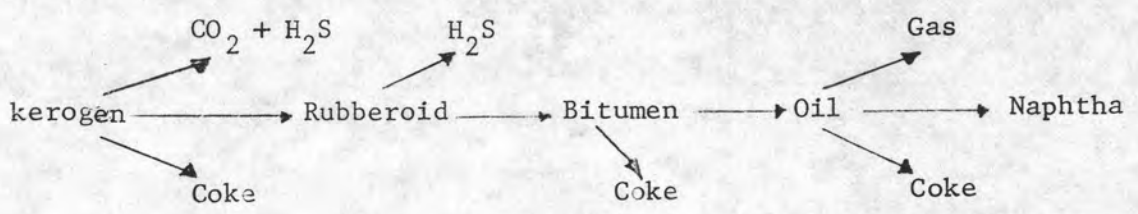
อิทธิพลที่สำคัญต่อองค์ประกอบ รูปร่าง และสีของหินน้ำมัน หินน้ำมันมักเกิดในแอ่งทะเลสาบขนาดใหญ่, ที่ราบชายฝั่งทวีป, เป็นผาสูง (shelves), ทะเลสาบขนาดเล็ก, ชุง (logs), ทะเลสาบบนเกาะหินปะการัง (lagoons), ซึ่งเชื่อมต่อกับแหล่งที่เกิดถ่านหินบรรยากาศระหว่าง การทับถมของหินน้ำมันคล้าย ๆ กับบรรยากาศของการเกิดถ่านหิน

หินน้ำมันเมื่อถูกนำไปแยกออกโดยวิธีทางเคมี (4) จะประกอบด้วยคาร์บอน ระหว่าง 6.4-8% ไฮโดรเจนระหว่าง 7.21-8.0% ไนโตรเจนระหว่าง 0.1-3% กำมะถันระหว่าง 0.1-8.8% และออกซิเจนระหว่าง 0.75-24.7% เมื่อออกซิไดซ์คีโรเจนด้วยสารออกซิไดซ์หลายอย่างพบว่า ส่วนประกอบทางเคมีของคีโรเจนคล้ายกับถ่านหินในแง่ที่ว่า มีโครงสร้างของสารในกลุ่มเบนซีนอยด์ปรากฏอยู่เด่นชัดแต่ไม่ชัดเท่าที่ปรากฏในถ่านหิน คีโรเจนที่มีอยู่ในหินน้ำมันบางแหล่งมีกำเนิดจากพืชน้ำจืด (Aquatic plants) มากกว่าพืชที่ปลูกบนดิน (land vegetation) คีโรเจนในหินน้ำมันประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 2 ส่วนคือ ส่วนหนึ่งถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ซึ่งสันนิษฐานว่ามาจากส่วนที่ถูกกีดกัน (humic material) และอีกส่วนหนึ่งออกซิไดซ์ได้ยาก สันนิษฐานว่าน่าจะมาจากพืช แอลจี (Algae) นอกจากนี้ยังไม่พบว่าซากสัตว์จะมีส่วนสำคัญในการเป็นต้นกำเนิดของคีโรเจน สารอินทรีย์ในหินน้ำมันประกอบด้วยสารซิลิกา สารประกอบของดินเหนียว (clay minerals) และแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งในบางตัวอย่างของหินน้ำมันสูงถึง 56% นอกจากนั้นเป็นส่วนประกอบอื่น ๆ คือ เหล็กออกไซด์ แมกนีเซียม และเฟอร์รูล์คาร์บอเนต แมกนีเซียม แคลเซียม ยิบซั่ม และทิตาเนียมออกไซด์

สูตรเอมไพริคัลของคีโรเจนคือ $C_{18}H_{22}O$, $C_{39}H_{60}O_3N$ หรือ $C_{215}H_{330}O_{12}N_5 S$ ได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับหินน้ำมัน และคีโรเจนที่กระทำอย่างกว้างขวางที่สุดคือ การสลายตัวของคีโรเจนเมื่อได้รับความร้อน การกระจายปริมาณของธาตุองค์ประกอบ และอัตราการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ที่ได้

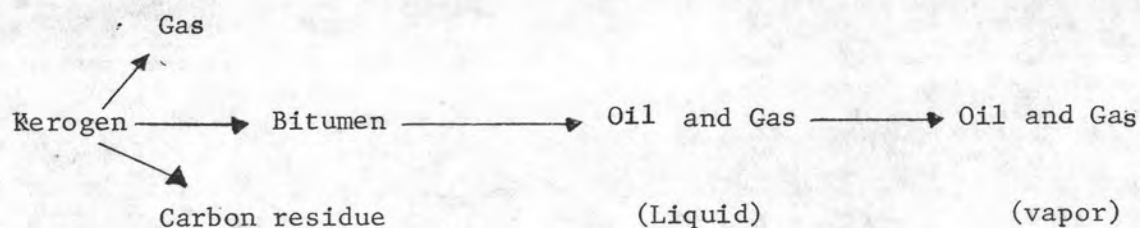
เมื่อหินน้ำมันได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวเปลี่ยนแปลงตามขั้นตอน

ดังนี้ (5)



ส่วนประกอบทางเคมี Rubberoid และ Bitumen ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน ได้มีผู้ศึกษาการสลายตัวของหินน้ำมันจากแหล่งโคโลราโด พบว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ที่ศิโรเจนสลายตัวสมบูรณ์ประมาณ 470 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ต้องใช้ทำให้ศิโรเจนสลายตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้ประมาณ 11 กิโลแคลอรี/กรัมโมล และต้องใช้ความร้อนอีก 9.4 กิโลแคลอรี/กรัมโมล เพื่อให้ไฮโดรคาร์บอนนั้นระเหยออกจากหินน้ำมัน

ได้มีผู้เสนอการเปลี่ยนแปลงกลไกการสลายตัวของศิโรเจนใหม่ โดยมีขั้นตอน ดังนี้

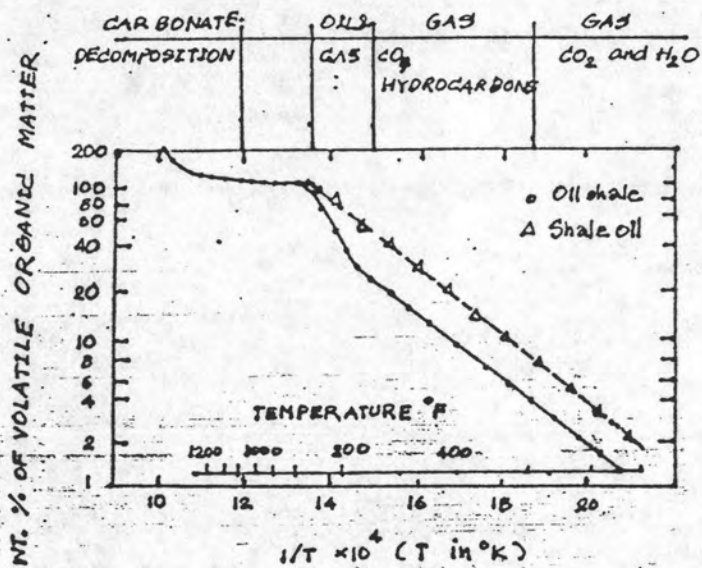


ที่อุณหภูมิ 482 องศาเซลเซียส การสลายตัวของศิโรเจนในขั้นตอนแรก เกิดอย่างค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับการสลายตัวของปิฏูเมนในขั้นที่สอง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราในการสลายตัวขั้นตอนที่สองจะเกิดรวดเร็วยิ่งขึ้น นั่นคือการระเหยของน้ำมันจะกลายเป็นขั้นตอนที่ช้า

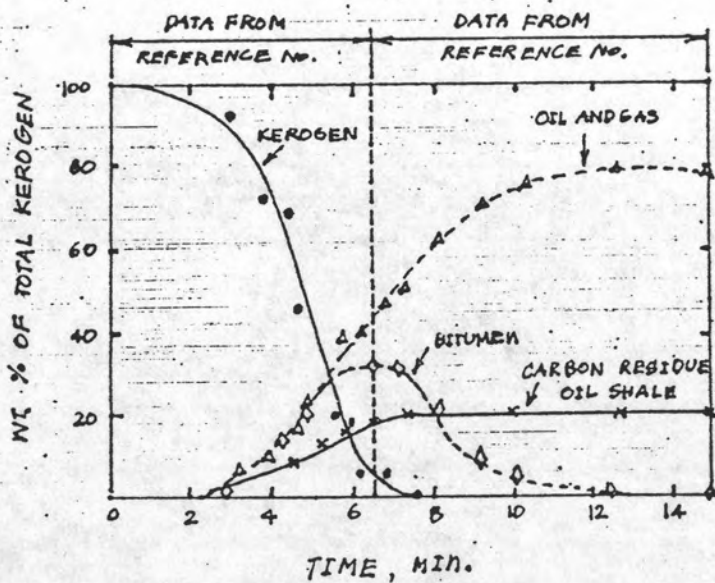
อัตราการสลายตัวของศิโรเจนพิจารณาในรูปของน้ำหนักสูญเสียไปเทียบกับ อุณหภูมิแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และอัตราการสลายตัวของศิโรเจนคิดเป็นร้อยละของศิโรเจนทั้งหมดที่เทียบกับอุณหภูมิแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

2.1.2 แหล่งหินน้ำมันภายในประเทศไทย

แหล่งหินน้ำมันที่สำรวจพบในประเทศไทยมีอยู่หลายแหล่งด้วยกันคือ ที่จังหวัด กระบี่ ลำปาง (ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4) ลำพูน แพร่ ตาก สุราษฎร์ธานี เป็นต้น แหล่งหินน้ำมันที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (เส้นรุ้งเหนือ $16^{\circ} 40'$ เส้นแวงตะวันออก $98^{\circ} 35'$) เป็นหินน้ำมันที่เกิดจากการสะสมตัวในน้ำสืด หรือน้ำกร่อย ส่วนหินน้ำมันที่อำเภอเมือง



รูปที่ 2.1 อัตราการสลายตัวของหินน้ำมันโคโลราโด แสดงในรูปของน้ำหนักสูญเสียไปเทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 อัตราการสลายตัวของคีโรเจนคิดเป็นร้อยละของคีโรเจนทั้งหมดเทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งหินน้ำมันที่เหมืองแม่ตึบ อำเภอองาว จังหวัดลำปาง



รูปที่ 2.4 แสดงแหล่งหินน้ำมันที่เหมืองแม่ตึบ อำเภอองาว จังหวัดลำปาง

จังหวัดกระบี่ เป็นหินน้ำมันที่เกิดจากการสะสมตัวในน้ำเค็มแบบที่ลุ่มชายฝั่งทะเล ต่อไปนี้
เป็นรายละเอียดของแหล่งหินน้ำมันที่สำคัญในประเทศไทย

ก. แหล่งหินน้ำมันแม่ล่อต

ในปี 2478 นักธรณีวิทยาชาวสวิสสองนายชื่อ เอ็ช. เออซี และ
เอ. โฮม ได้ทำการสำรวจแหล่งหินน้ำมันที่ราบแม่ล่อตแล้ว ในตอนปลายปีนักธรณีวิทยาชาว
ญี่ปุ่นชื่อ วาย โนโต ได้มาทำการสำรวจซ้ำอีก ทั้งนี้เป็นรายงานของกรมเชื้อเพลิงสมัยนั้น
ต่อมาปี 2490 กองธรณีวิทยาได้ไปสำรวจรายละเอียดเพิ่มเติม

ลุ่มแม่ล่อต เป็นลุ่มระหว่างเขามัน้ำเมยไหลผ่านลุ่มชันไปทางเหนือ
ออกแม่น้ำลำลวริน แม่น้ำเมยถือเป็นเขตแดนระหว่างพม่ากับไทย ที่ลุ่มในเขตพม่ามีเนื้อที่เพียง
หนึ่งในสามของลุ่มน้ำเมยนี้ ขอบที่ลุ่มทั้งสองด้านจดภูมิประเทศเป็นเนินเตี้ย ๆ ซึ่งข้างหลัง
ออกไปเป็นเทือกเขาสูง

ภูเขาใหญ่ประกอบด้วยหินเมโซโซอิก และปาเลโอโซอิก ด้าน
ตะวันออกและใต้เป็นหินทรายกับหินปูนกาลีคคาลาซึ่งอยู่ในหินยุคโคราช ในหินปูนพบแอมโมไนต์
ปะการัง และหอยโบราณ ฝัดออกไปทางตะวันออก และตะวันตกเฉียงใต้เป็นหินปูนยุคคราชบุรี
มีหินควอทไซต์ และหินปูนชุดโคราชโผล่อยู่ในแอ่งย่อมแห่งหนึ่งอยู่ห่างจากตัวอำเภอไปทาง
ตะวันออกเฉียงใต้ 6 กิโลเมตร

ชั้นหินซึ่งเกิดจากน้ำสัดนี้มีความหนาขนาด 500 เมตร ส่วนใหญ่เป็น
หินยุคเทอร์เชียรีตอนปลาย แต่หินยุคควอเตอริสก็มีเหมือนกัน ชั้นหินโค้งเล็กน้อยที่ปลายด้าน
ทิศเหนือของแอ่ง ส่วนในของด้านทิศตะวันออก และทิศใต้ ชั้นหินซึ่งตกลงไปยังทิศตะวันตก
และในแหล่งที่โผล่เหนือผิวดินตามริมฝั่งแม่น้ำเมยเทไปยังทิศตะวันออก ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่า
ที่ราบลุ่มแม่ล่อตวางทับอยู่บนแกนของแอ่งสะสมรูปกะทะหงายของชั้นหิน (Syncline) ดังนั้น
บริเวณนี้จึงปลอดภัยจากการก่อกองทางธรรมชาติ เป็นแหล่งสะสมหินน้ำมัน ซึ่งแหล่งนี้เอง
ที่ได้สำรวจพบแหล่งน้ำมันดิบ (อำเภอปาง สังหวัดลำปาง) แหล่งถ่านหิน และแหล่งหินน้ำมัน

ลำดับชั้นดินในแอ่งแม่ล่อต ตามรายงานของ นายสมาน บุราราค์

อริบตีกรมทรัพยากรธรณี (3)

ตอนบน ๆ ของชั้นดินควอเตอร์นารี	ความยาวเป็นเมตร
1. ดินทรายจากลำธารเทอร์เชียรี	?
2. ดินปูนมาร์ลปนทราย ดินทรายปนปูน	20+
3. ดินน้ำมันเป็นชั้นเนื้อแน่นสีช็อคโกแลต . มีซากปลาโบราณ บางที่มีราตุปูนปนอยู่ด้วย	10+
4. ดินทรายชนิดมิโมกา และชนิดปนปูนมีเศษลิกไนท์ด้วย	?,
5. ดินปูนสีขาว เป็นชั้นดี โบทูมินัล . มีซากใบไม้สับกับ หินดินดานปนทรายมีปูนปน และโบทูมินัลด้วย	100+
6. ดินปูนสีเทาอ่อนโบทูมินัล ทางตะวันตกค่อย ๆ เปลี่ยน เป็นดินทราย และดินกรวด	300+/430+
ข. แหล่งดินน้ำมันสี	

แหล่งดินน้ำมันสี เป็นชั้นดินที่อยู่ในแอ่งละล่อมเดียวกันกับแอ่งละล่อมที่พบ
ที่แหล่งละล่อมดินน้ำมันแม่ล่อต ประกอบด้วยชั้นดินน้ำมัน และถ่านลิกไนท์ฝังตัวอยู่ในพื้นดิน คลุม
พื้นที่ห่างออกไปจากอำเภอสีถึงเขตแอ่งป่าบ้านคา 14 กิโลเมตร คิดเป็นเนื้อที่ประมาณ 750 ไร่

แหล่งดินน้ำมันสี เป็นหินยุคพาลีโอซีน จํากัดอยู่ในแอ่งละล่อมมีความยาว
25 กว้าง 1 กิโลเมตร ประกอบด้วยหินดินดาน หินทราย หินควอไซต์ และหินกรวดมน

2.1.3 คุณสมบัติและคุณภาพของดินน้ำมันในประเทศไทย

กรมทรัพยากรธรณีได้ส่งตัวอย่างดินน้ำมันจากแหล่งแม่ล่อตไปทำการวิเคราะห์
อย่างละเอียดโดยผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ส่วนดินน้ำมันจากแหล่งสีนั้น โรงกลั่นน้ำมันฝาง และกรมวิทยาศาสตร์
กระทรวงอุตสาหกรรมได้นำไปทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของหินน้ำมันแม่ล่อด (3)

ลักษณะของหิน

ความถ่วงจำเพาะที่ 27.8 องศาเซลเซียส	1.61
ค่าความร้อน (Heating Value) Kcal/Kg*	36.85
เถ้า (Ash)	56.4%
สารคาร์บอนอินทรีย์ (Organic Carbon)	30.8%

การวิเคราะห์โดยวิธี Modified Fisher Assay

น้ำมัน	26.1%
น้ำ	3.8%
กากหินน้ำมัน	66.3
ก๊าซและสิ่งสูญเสียอื่น ๆ	3.8
เปรียบเทียบคาร์บอนในน้ำมันกับคาร์บอนอินทรีย์ในหินน้ำมัน (Conversion of organic material to oil)	73.9%

การที่ปริมาณวิเคราะห์ของหินน้ำมัน

ซิลิกา (SiO_2)	60.8%
อลูมินา (Al_2O_3)	19.9%
เหล็ก (Fe_2O_3)	4.8%
แคลเซียม (CaO)	3.3%
แมกนีเซียม (MgO)	3.8%
ออกไซด์อื่น ๆ	7.4%

ที่มา : *ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องมือบอมบ์แคลอริมิเตอร์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของหินน้ำมันแหล่งละสมบ้านป่าคา อำเภอสี (3)

ปริมาณวิเคราะห์โดยใช้รอร์ท	ตัวอย่าง ก	ตัวอย่าง ข	ตัวอย่าง ค
ปริมาณน้ำมัน (ลิตร/ตัน)	60	71	52
ปริมาณน้ำมัน (%)	6.1	17.1	5.4
น้ำและขี้ผึ้ง (%)	4.88	7.25	8.9
กากหินน้ำมัน (%)	81.0	63.75	79.0
ก๊าซและสิ่งสูญเสียอื่น ๆ	0.02	11.3	6.7
ความถ่วงจำเพาะที่ 15.5 °ซ	0.88	0.87	0.87
คุณสมบัติของหิน			
ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	2,240	5,440	1,984
เถ้า (%)	65.9	41.1	71.6
ความชื้น (%)	3.0	4.9	2.0
กำมะถัน (%)	1.1	1.2	0.7

2.1.4 แหล่งสำรองของหินน้ำมันของโลก

จากตารางที่ 2.3 แสดงแหล่งสำรองของหินน้ำมันของโลก ในประเทศไทย พบมากที่แหล่งแม่ลือด ซึ่งแสดงแผนที่ทางภูมิศาสตร์ไว้ในรูปที่ 2.5 แหล่งหินน้ำมันสำรองของไทย คาดว่ามีประมาณ 18,668 ล้านเมตริกตัน และ 2,500 ล้านเมตริกตันถูกสำรวจแล้วเรียบร้อย พบว่ามีปริมาณน้ำมันอยู่ 5% โดยน้ำหนัก หรือประมาณ 12 แกลลอนต่อตัน ดังนั้นปริมาณน้ำมันทั้งหมดของหินน้ำมันสำรองในประเทศไทยมีอยู่ประมาณ 5,996 ล้านบาเรล (3)

ส่วนแหล่งอื่นในประเทศไทยคือ แหล่งสี ลำปาง มีหินน้ำมันอยู่ประมาณ 15 ล้านตัน คิดเป็นปริมาณน้ำมัน 12 ถึง 41 แกลลอนต่อตัน (6) คิดเป็นปริมาณน้ำมันทั้งหมด 9.66 ล้านบาเรล

ตารางที่ 2.3 แสดงแหล่งสำรองของหินน้ำมันโลก (6)

ประเทศ	แหล่ง	ปริมาณน้ำมัน (แกลลอน/ตัน)	คุณค่าความร้อน (บี.ที.ยู./lb)	เก๊าะ (%)	ลุ่มดุลย์น้ำมัน (10 ⁶ ตัน)
ไทย	แม่สอด	25-70	6,630	56	18,000
จีน	ฟูซาน	15	1,460	83	24,500
บราซิล	พาไรโบ	15-18	3,520	-	-
อังกฤษ	ล็ก๊อตแลนด์	16-40	2,540	78	90
สเปน	Cuidad Real	15	5,380	63	400
สวีเดน	นอร์ค	15	3,870	72	600
รัสเซีย	อีลดาเบีย	40	5,780	53	2,900

2.1.3 ประโยชน์ของหินน้ำมัน

หินน้ำมันมีประโยชน์ในการนำมาใช้อยู่ 3 ข้อคือ

1. หินน้ำมันคุณภาพต่ำนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเผาไหม้โดยตรง
2. หินน้ำมันคุณภาพปานกลางถึงสูงนำมาใช้ในโรงถลุง โดยวิธีต่าง ๆ เช่น TOSCO-2 (6) และ Petrosix เป็นต้น น้ำมันที่ได้รับจากกระบวนการนี้ตั้งแสดงในตารางที่ 2.4 เสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่า
3. กากหินน้ำมันที่เหลือจากการเผาไหม้ยังสามารถนำไปผสมกับส่วนผสมซีเมนต์เพื่อทำปูนซีเมนต์และนำไปใช้ในการก่อสร้างได้อีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังไม่มีกรรมนำหินน้ำมันมาใช้ประโยชน์ในการอุตสาหกรรม. ผลการวิจัยครั้งนี้อาจมีส่วนช่วยในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากหินน้ำมันได้บ้าง

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบราคาของพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ (5)

แหล่งพลังงาน	ราคา (\$/บาเรล)
น้ำมันดีเซลจากถ่านหิน	40-60
เอธานอลจากน้ำตาล (Sugar Cane)	25-45
เบธานอนจากก๊าซธรรมชาติ	25-45
ก๊าซไฮโดรเจนจากเมธานอน	40-60
น้ำมันหิน	22-35

2.2 ฟลูอิดิซด์เบด (Fluidized bed) (8, 9)

ฟลูอิดิซด์ หมายถึง การที่อนุภาคของของแข็ง (Particles) มีพฤติกรรมคล้ายกับของไหล (Fluid) ส่วนเบด (Bed) หมายถึง บริเวณหรืออาณาเขตที่มีอนุภาคของของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคเหล่านั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลก็ตามโดยจะมีระดับตั้งแต่แผ่นกระจายของไหล (Distributor plate) จนถึงระดับถังลุด

บรรจุอนุภาคของของแข็งลงเบด ดังรูปที่ 2.6 ปล่อยให้ของไหลเข้าทางด้านล่างของเบดอย่างช้า ๆ ด้วยความเร็วต่ำ ๆ อนุภาคของของแข็งจะไม่ยับตัว จะมีระดับเรียบ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า "เบดอยู่กับที่" (Fixed bed) จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง อนุภาคของของแข็งจะเริ่มยับตัวและสัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกเพียงเล็กน้อย อนุภาคของของแข็งจะแยกออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า "จุดเริ่มฟลูอิดิซด์" (Incipiently fluidized bed or bed at minimum fluidization or onset of fluidization) หลังจากความเร็วจุดนี้ความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัว อนุภาคของของแข็งยังอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเบดลักษณะนี้เรียกว่า "ฟลูอิดิซด์แบบหนาแน่น" (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของของแข็งมากขึ้น อนุภาคของของแข็งอยู่ห่างกัน ลักษณะเบดแบบนี้เรียกว่า "ฟลูอิดิซด์แบบเจือจาง" (Diluted-

phase fluidized bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกอนุภาคของของแข็งก็จะหลุดลอยออกไปจากเบด ลักษณะนี้เขาใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ถ้าใช้อากาศเราเรียกว่า "การขนส่งด้วยอากาศ" (Pneumatics transport action) ถ้าใช้ของเหลวเราเรียกว่า "การขนส่งด้วยของเหลว" (Hydraulics transport action)

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดพฤติกรรมฟลูอิดไรซ์ที่ดีคือ (8)

1. อนุภาคของของแข็งขนาดเล็ก และขนาดของเบดที่พอเหมาะกับความยาวของอนุภาคของของแข็ง กล่าวคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดไม่มากหรือน้อยเกินไป
2. ขนาดของอนุภาคของของแข็งต้องไม่แตกต่างกันมากเกินไป
3. รูปร่างทางกายภาพของอนุภาคของของแข็งควรใกล้เคียงกันกับทรงกลม
4. ตัวกระจายของไหล (Distributor) ต้องสามารถกระจายของไหลได้อย่างสม่ำเสมอไม่อุดตันง่าย หรือหลอมเหลวติดกันเมื่อโดนความร้อนสูง ๆ
5. ความเร็วของของไหลภายในเบดตัวพอเหมาะกับความยาวของเบดที่ใช้ในการทดลอง คือ ถ้าความเร็วสูงมากเกินไปก็จะพัดพาให้อนุภาคของของแข็งหลุดออกจากเบดไปไม่ได้

อย่างไรก็ตามถ้าอนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก และมีแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคของของแข็งสูงก็อาจทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ได้ยาก เช่น อนุภาคของของแข็งที่เป็นฝุ่น เป็นผงละเอียด เป็นต้น อีกประการหนึ่งถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นต่ำเกินไป แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของของแข็งจะลดน้อยลง ดังนั้นโอกาสที่ของไหลจะผ่านทะลุขึ้นมาเป็นช่อง (Channeling) นั้นง่ายและรุนแรงมาก

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเทคนิคฟลูอิดไรซ์ขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น การอบแห้ง ปฏิกริยาเคมี และการเผาไหม้ เหตุที่นำเอาเทคนิคนี้มาใช้กันอย่างมากก็เนื่องมาจากข้อดีหลายประการของฟลูอิดไรซ์ เช่น คือ

1. สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้
2. มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน และมวลสาร
3. มีการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอระหว่างของไหล (อากาศ) และอนุภาคของของแข็ง (หินน้ำมัน) ภายในเบด

012793

4. สามารถควบคุมอุณหภูมิของเบตได้อย่างเที่ยงตรงและสม่ำเสมอทั้ง เบต

ด้วยเหตุนี้ ถ้าเรานำเอาเทคนิคนี้มาประยุกต์กับการเผาไหม้จะทำให้เกิดผลดีในแง่ต่าง ๆ คือ

1. การเผาไหม้จะเกิดอย่างทั่วถึงมากขึ้น เมื่อเทียบกับเบตอยู่กับที่ เนื่องจาก การสัมผัสอย่างทั่วถึงระหว่างอากาศ หรือออกซิเจนกับสารเชื้อเพลิง

2. อุณหภูมิในเตาเผาจะไม่แตกต่างกัน สามารถกำหนดหรือควบคุมอุณหภูมิให้ ไม่เกิดการหลอมเหลวของเก้าในเตาเผาได้ ซึ่งเป็นปัญหามากในการเผาไหม้แบบอื่น

3. ระบบการนำเก้าที่เกิดจากการเผาไหม้ออกจากเตาเผาทำได้หลายวิธี และ ทำแบบต่อเนื่องได้

4. สามารถทำการเผาแบบต่อเนื่องได้อย่างสม่ำเสมอ

5. ควบคุมการเผาไหม้ได้แบบอัตโนมัติ

6. ขนาดของเตาเผาจะเล็กกว่าแบบอื่นที่มีประสิทธิภาพเท่ากัน

2.2.1 การแบ่งประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ฟลูอิดเซชันสองสถานะ (Two phases fluidization)

หมายถึงภายในภาชนะบรรจุหรือหอตกลงจะประกอบด้วยสารสองสถานะคือ ของไหลและของเหลว ของไหลอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ถ้าเป็นก๊าซจะเรียกว่า "ก๊าซฟลูอิดเซชัน" (Gas fluidization) และถ้าเป็นของเหลวจะเรียกว่า "ฟลูอิดเซชันของเหลว" (Liquid fluidization)

2. ฟลูอิดเซชันสามสถานะ (Three phases fluidization)

หมายถึงภายในภาชนะบรรจุหรือหอตกลงจะประกอบด้วยสารสามสถานะด้วยกันคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ กลไกของกระบวนการเกิดฟลูอิดเซชันสามสถานะนี้ซับซ้อนมาก บางครั้งอาจพัฒนาไปสู่ฟลูอิดเซชันสองสถานะ

2.2.2 ก๊าซฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันสองสถานะที่ประกอบด้วยสารที่เป็นของแข็ง และก๊าซ หรือที่เรียกว่า ก๊าซฟลูอิดเซชัน กลไกของกระบวนการค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าฟลูอิดเซชันของเหลว คือในขณะที่เบตเริ่มขยับตัวเป็นฟลูอิดเซชันแรก ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบตที่เกิดขึ้นในฟลูอิดเซชันของเหลว แต่เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นอนุภาคจะแยกตัวออกจากกันห่างบ้าง ใกล้กันบ้างในลักษณะคล้ายฟองอากาศ หรือฟองก๊าซ และส่วนที่มีอนุภาคของของแข็งแทนลอยตัวอยู่นานแน่นเรียกว่า เบตหนาแน่น (Dense bed) หรือวัฏภาคของอิมัลชัน (Emulsion phase)

เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จำนวนฟองก๊าซจะมากขึ้น และจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นจนกระทั่งลอยถึงผิวหน้าก็จะแตกกระจายออก และอนุภาคที่ถูกพาขึ้นมาด้วยนั้นจะตกกลับลงไปยังเบตใหม่ บริเวณที่มีฟองก๊าซ และบริเวณเหนือผิวหน้าของเบตที่มีฟองก๊าซแตกกระจาย เราเรียกว่า เบตที่มีของแข็งน้อย (Lean bed) ปรากฏการณ์ของฟลูอิดเซชันนี้จะเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.2.3 พฤติกรรมต่าง ๆ ของฟลูอิดเซชัน

2.2.3.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน

บรรจุอนุภาคของของแข็งลงในเบต ปล่องของไหลไหลผ่านทางด้านล่างของเบต จากนั้นจึงค่อย ๆ ปรับความเร็วของของไหลสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะเริ่มปรากฏการณ์ของฟลูอิดเซชัน พฤติกรรมที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนคือ

ก. ลักษณะของอนุภาคที่ใช้เป็นเบตจะลุ่ม ๆ เล่ม ๆ เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบต

ข. ผิวหน้าของอนุภาคในเบตจะราบเรียบ และอยู่ในแนวระดับ

ค. อนุภาคของของแข็งจะเริ่มลอยอยู่ในกระแสของของไหล

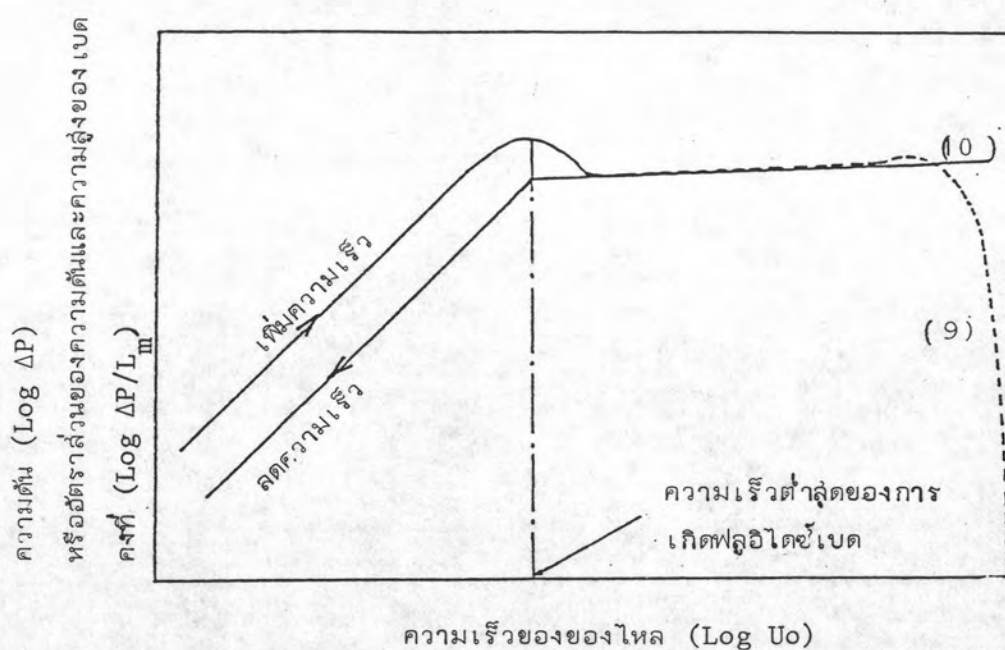
และมีระยะห่างกันระหว่างอนุภาคน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างอนุภาคจะลดลงอาจมีการเคลื่อนไหวบ้างเล็กน้อย และอยู่ในวงจำกัด

ง. ถ้าเป็นก๊าซฟลูอิดเซชันจะไม่มีฟองของก๊าซเกิดขึ้น โดยที่ก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคในเบตอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีการรวมตัวของก๊าซเกิดขึ้นจนมองเห็นได้

การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันทำได้ 2 วิธีคือ

1. โดยวิธีการทดลอง

บรรจุอนุภาคของของแข็งลงในเบต ป้อนของไหลไหลผ่านทางด้านล่างของเบต เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลที่ละน้อย ความดันที่ลดลงในเบต (Pressure drop) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มความเร็วของของไหล เมื่อวาดกราฟระหว่างความดันตกกับความเร็วของของไหล ดังรูปที่ 2.7 ก็จะสามารถหาความเร็วต่ำสุดของของไหลได้ (10) (11)



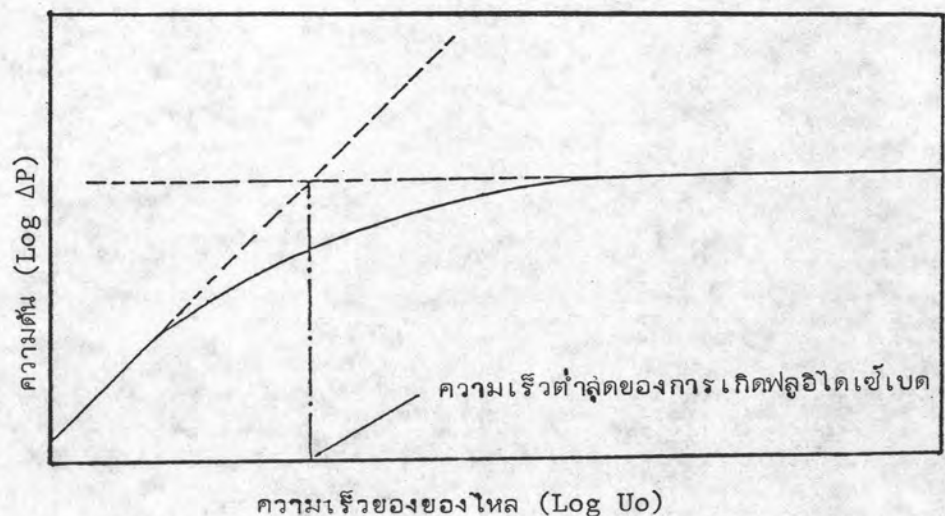
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (หรืออัตราส่วนของความดันตกต่อความสูงของเบตคงที่) กับความเร็วของของไหล



จากรูปที่ 2.7 ได้จากการทดลองเมื่ออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟจะมีความแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มและลดความเร็วของของไหล โดยเส้นกราฟที่แสดงถึงการเพิ่มความเร็วของของไหลจะมีส่วนโค้งขึ้น บริเวณดังกล่าวนี้แสดงว่าต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษที่จะใช้กระจายหรือแยกอนุภาคให้ออกจากกัน และสัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ เมื่อเรียงตัวเรียบร้อยแล้ว ความดันตกจะค่อย ๆ ลดลง และคงที่ตลอดไป

สำหรับเส้นกราฟที่แสดงถึงการลดความเร็วเป็นช่วงแรกจะคงที่ ส่วนช่วงหลังจะค่อย ๆ ลดลงโดยเส้นกราฟจะขนานกันกับเส้นกราฟเพิ่มความเร็ว แต่จะมีค่าความดันตกน้อยกว่าจากการทดลองพบว่า ความดันตกในการเพิ่มความเร็วจะมากกว่าความดันตกในการลดความเร็วประมาณร้อยละ 5-10 (10) ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าขณะที่เบดเปลี่ยนจากฟลูอิดไคซ์เบดเข้าสู่เบดนิ่งอนุภาคของแข็งจะเรียงตัวเองแล้ว และไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการสัดช่องว่างในเบดให้เป็นระเบียบอีก และเมื่อใดก็ตามถ้าเราทดลองซ้ำในเบดเดิมอีก เส้นกราฟที่แสดงการเพิ่มความเร็วใหม่นี้จะเดินตามเส้นลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมากหรือมีขนาดกระจาย (Size distribution) ลักษณะของกราฟที่ได้จะดูราบเรียบกว่า และจากกราฟสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (10) (11)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก (หรืออัตราส่วนของความดันตกและความสูงของเบดคงที่) กับความเร็วของของไหล เมื่ออนุภาคมีขนาดแตกต่างกันมากหรือมีขนาดกระจาย

การใช้อนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมาก ๆ เช่น อนุภาคขนาดเล็กมากปนกับอนุภาคขนาดใหญ่มาก รวมกันอยู่เพียงสองขนาด เมื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันจะเกิดเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กในช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่ยังไม่ยับเยินเคลื่อนไหว เรามักพบปรากฏการณ์เช่นนี้เมื่อความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทั้งสองในอัตราส่วน 6:1 หรือมากกว่า (10)

ข้อที่ควรระมัดระวังในการหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันเบตจากรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 โดยวิธีการทดลองนั้น ควรจะหาเวลาที่ไล่เบตลงไปครั้งแรก เพราะเมื่อทำการทดลองซ้ำครั้งที่ 2 เบตบางส่วนที่หายไปในการแรกที่ทดลอง หรือเกิดการจับตัวหรือเกิดการหดตัว หรือเกิดปฏิกิริยากันก็จะเป็นเหตุให้ได้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันแตกต่างกับครั้งแรกของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก หรืออนุภาคที่มีหลาย ๆ ขนาดรวมกัน

2. โดยวิธีคำนวณ

ขณะเริ่มเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันนั้น อนุภาคของของแข็งจะเริ่มลอยตัว เป็นอิสระอยู่ในกระแสการไหลของของไหลหรือก๊าซ การที่อนุภาคลอยอยู่ได้นั้นเนื่องมาจากอนุภาคของของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่มีทิศทางตรงกันข้าม คือแรงที่เกิดจากมวลของอนุภาคของแข็ง และแรงพยุงเนื่องจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานของของไหลกับอนุภาคกับแรงต้านของของไหล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\text{แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักอนุภาค} \quad (2.1)$$

หรือ (ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบต) (พื้นที่ภาคตัดขวางของหอคอลง) = (ปริมาตรของเบต) (เศษส่วนของปริมาณอนุภาคในเบต) (ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง) (2.2)

$$\text{หรือ } \Delta P \cdot A_t = W = (A_t \cdot L_{mf}) (1 - \Sigma_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g / g_c \quad (2.3)$$

จัดสมการใหม่เพื่อให้ได้สภาวะต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \Sigma_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g / g_c \quad (2.4)$$

จากสมการ ERGUN (12) แสดงความสัมพันธ์ของความแตกต่างของความดันในขณะเบตนิ่ง ดังนี้

$$\frac{\Delta P_c}{L} = \frac{150 (1-\Sigma_{mf})^2}{\Sigma_{mf}^3} \cdot \frac{\mu U_o}{(\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75 (1-\Sigma_{mf})}{\Sigma_{mf}^3} \cdot \frac{\rho_g U_o^2}{\phi_s d_p} \quad (2.5)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้
 ขณะที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชัน ทั้งนี้เพราะปริมาณช่องว่างขณะที่เริ่มเกิดนั้นจะมีค่า
 มากกว่าปริมาณช่องว่างในขณะเบตนิ่งเล็กน้อย ดังนั้นจากสมการที่ (2.5) เขียนใหม่ได้ดังนี้ (10)

$$\frac{1.75}{\phi_s \Sigma_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g^2}{\mu} \right) + 150 \frac{(1-\Sigma_{mf})}{\phi_s \Sigma_{mf}^3} \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.6)$$

ในเบตที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้สามารถไ้
 ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุด
 ที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} \cdot g \left(\frac{\Sigma_{mf}^3}{1-\Sigma_{mf}} \right) \text{ เมื่อ } Re_p < 20 \quad (2.7)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ต้องใช้ความเร็วของ
 ของไหลสูงมากจึงจะทำให้เกิดอนุภาคของของแข็งลอยตัว เป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุด
 ของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันเบตคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \cdot g \cdot \Sigma_{mf}^3 \text{ เมื่อ } Re_p > 1000 \quad (2.8)$$

วิธีการหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้
 เกิดฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf}) นั้น บางครั้งการหาค่าแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ_s) และค่าสัดส่วนของ
 ช่องว่างต่ำสุดของเบต (Σ_{mf}) อาจทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีผู้ที่พยายามหลีกเลี่ยงการใช้ค่าทั้งสอง
 นี้โดยตรง โดยจะทำสมการข้างต้นให้อยู่ในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
 เช่น สมการของ C.Y. Wen และ Y.H. YU เป็นต้น (13) ได้เล่นผลคูณของช่องว่าง
 ต่ำสุด และแฟคเตอร์รูปร่างมีค่าคงที่ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากข้อมูลต่าง ๆ ทำให้สรุปได้ว่า

$$\frac{1}{\phi_s \Sigma_{mf}^3} \sim 14 \quad , \quad \frac{1 - \Sigma_{mf}}{\phi_s \Sigma_{mf}^3} \sim 11$$

ดังนั้นเมื่อนำค่าดังกล่าวมาแทนลงในสมการ (2.6), (2.7) และ (2.8) จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[\frac{(33.7)^2 + 0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33.7 \quad (2.9)$$

สำหรับเขตที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ สามารถเขียนสมการได้ใหม่คือ

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 1000 \quad (2.10)$$

สำหรับเขตที่มีขนาดของอนุภาคเล็กสามารถเขียนสมการได้คือ

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 20 \quad (2.11)$$

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการใหม่นี้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นขนาดของอนุภาค ความหนืดของก๊าซ และใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 0.001 ถึง 4000 ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิโดเซชัน (U_{mf}) ที่คำนวณได้มีค่าเพียงเบนประมาณร้อยละ 34(10)

นอกจากนี้ Miller และ Logwink (14) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิโดเซชัน (U_{mf}) โดยได้ทำการทดลองกับอนุภาคหลายชนิดและรวบรวมตัวแปรเป็นกลุ่มแบบไม่มีหน่วยแล้วตัดแปลงมาเพื่อคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิโดเซชันได้ดังนี้

$$U_{mf} = \frac{0.00125 d_p^2 (\rho_s - \rho_g)^{0.9} \cdot \rho_g^{0.1} \cdot g}{\mu} \quad (2.12)$$

Johnson (15) ได้ทำการทดลองในระบบของก๊าซและของแข็ง โดยพยายามศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเบต เช่น ความหนาแน่น และความหนืด เป็นต้น โดยศึกษาขณะเบตอยู่ในสภาวะฟลูอิดเซชัน และได้เสนอสมการสำหรับคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน

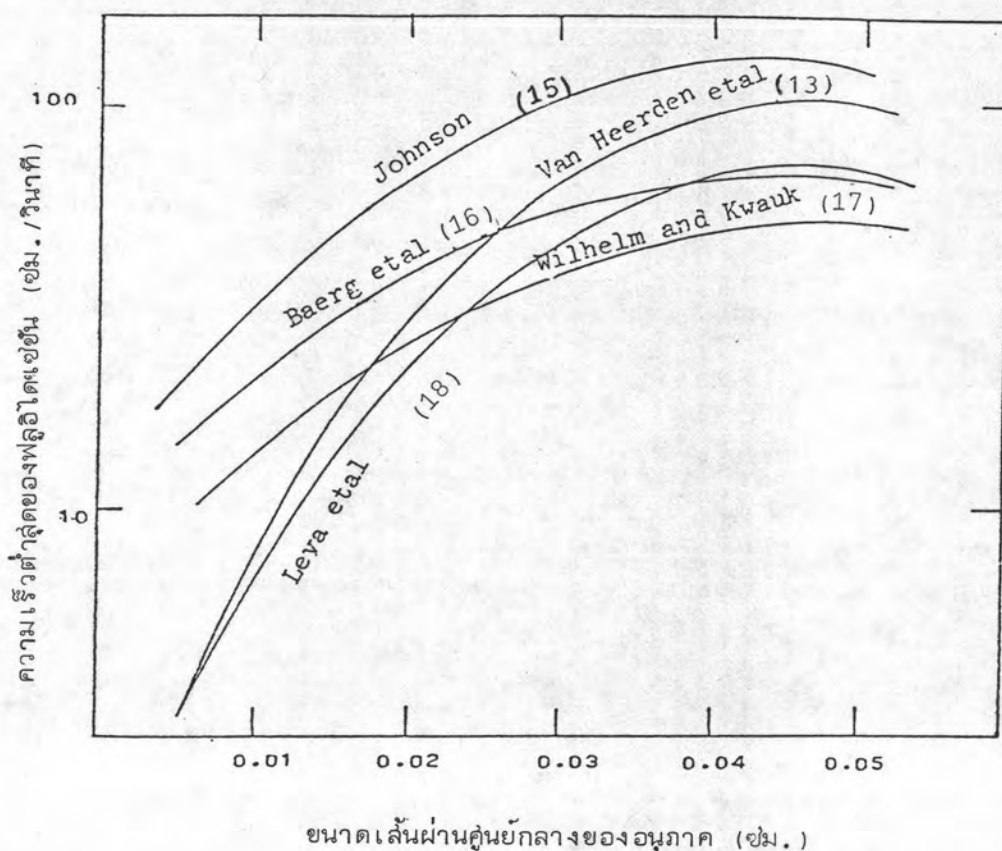
$$U_{mf} = \frac{d_p^2 \phi_s^2 g(\rho_s - \rho_p)}{18\mu} \cdot \frac{\Sigma_{mf}^3}{1+0.5(1-\Sigma_{mf})} \quad Re_p < 2 \quad (2.13)$$

$$U_{mf} = 0.171 d_p \phi_s^2 \left(\frac{\Sigma_{mf}}{1-\Sigma_{mf}} \right)^3 \cdot \left[\frac{g^2 \rho_s \Sigma_{mf}^6}{\mu(1-\Sigma_{mf})(1+0.5)(1-\Sigma_{mf})} \right]^{1/3} \quad Re_p > 2 \quad (2.14)$$

Baerg และผู้ร่วมงาน (15) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกของเบต และได้เขียนเป็นสูตรหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันเบต คือ

$$U_{mf} = 1.8 \times 10^2 (d_p \rho_s)^{1.23} \quad (2.15)$$

จากสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดจะสังเกตได้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันเบต จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ เพราะค่าอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่นของอนุภาค ความหนาแน่นของของไหล และความหนืดของของไหล มักจะมีค่าคงที่ขณะทำการทดลอง ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนอนุภาคให้มีขนาดโตขึ้น หรือเล็กลงจะทำให้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันเบตเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 2.9 ส่วนขนาดของเบตนั้นจะไม่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันเบตแต่อย่างใด



รูปที่ 2.9 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดซ์เซชันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

2.2.3.2 ความเร็วตกอิสระทางอนุภาคของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง

ถ้าหากเพิ่มความเร็วของของไหลจากความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดซ์ชันไปเรื่อย ๆ จะถึงความเร็วค่าหนึ่งที่จะทำให้อนุภาคของของแข็งลอยไปตามของไหลความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วตกอิสระของอนุภาคในของไหลที่อยู่นิ่ง โดยทั่วไปในการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชันจะต้องจำกัดความเร็วของของไหลไม่ให้เกิดความเร็วตกอิสระของอนุภาค ซึ่งอาจจะทำให้ปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันเปลี่ยนแปลงไปในขณะทดลอง หรือเกิดการสูญเสียอนุภาคที่ฟลูอิดซ์ซึ่งอาจเป็นสารตั้งต้น (Reactant) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ก็ได้

ความเร็วตกอิสระของอนุภาคนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการซึ่งได้จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหลผ่านอนุภาคคือ (19)

$$U_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \tag{2.16}$$

โดยที่ C_d คือสัมประสิทธิ์ของการเสียดทาน (Drag coefficient)

จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานของอนุภาคทรงกลมโดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่านพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้จะแปรผันตามขนาดของอนุภาค และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$C_d = \frac{24}{R_{ep}} \quad \text{เมื่อ} \quad R_{ep} < 0.4 \quad (2.17)$$

$$C_d = \frac{10}{R_{ep}} \sqrt{2} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < R_{ep} < 500 \quad (2.18)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < R_{ep} < 200,000 \quad (2.19)$$

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสูญเสียวัสดุที่เป็นเบตในขณะทดลองก็ต้องระมัดระวังการใช้ความเร็วของของไหลที่ผ่านเข้าไปในเบตโดยพยายามควบคุมไม่ให้เกินความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งดังที่กล่าวมา

Pinchbeak และ Popper (20) ได้เสนออัตราส่วนของความเร็วตกอิสระ และความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_t/U_{mf}) ดังนี้คือ

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (R_{ep}) ไม่เกิน 0.4

$$U_t/U_{mf} = 91.6 \quad (2.20)$$

สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (R_{ep}) เกินกว่า 1,000

$$U_t/U_{mf} = 8.72 \quad (2.21)$$

Angelino (21) ได้ทำการทดลองและชี้ให้เห็นว่าการใช้ฟลูอิดเซชันเบตให้เกิดผลดีนั้นจะต้องใช้อัตราส่วน $U_t/U_{mf} = 1.5$ อย่างไรก็ตามในการทดลองทั่วไปจะใช้ความเร็วของก๊าซประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันเบต



2.2.3.3 ลักษณะการไหลของก๊าซในฟลูอิดัลเบด

ได้มีผู้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของก๊าซในฟลูอิดัลเบด ด้วยวิธีการต่าง ๆ หลายวิธี วิธีที่นิยมกันมากคือ การใช้เทคนิคตัวนำ (Tracer) ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง สารตัวนำอาจเป็นก๊าซหรือของแข็งก็ได้ ผลการทดลองของนักวิจัยหลายท่านมีดังนี้

Gilliland และ Mason (22) ได้ทำการทดลองวิจัยได้ใช้เบดขนาดต่าง ๆ ด้วยความเร็วของก๊าซต่าง ๆ กัน พบว่าการไหลของก๊าซในเบดนั้น เป็นการไหลอยู่ในระหว่าง Plug flow กับการไหลย้อนกลับ (Backmix flow)

Danckwerts และผู้ร่วมงาน (23) ได้ทำการทดลองใช้อนุภาคของของแข็งร่วมกับอนุภาคของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและพบลักษณะการไหลของก๊าซคล้ายกับการไหลย้อนกลับ

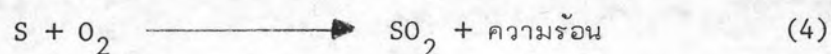
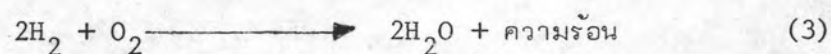
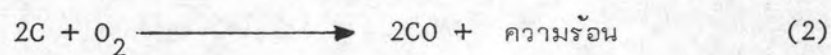
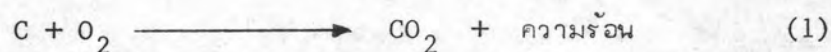
2.2.3.4 การผสมผลานของของแข็งในฟลูอิดัลเบด

เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าไปในเบดให้สูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดัลเบดแล้ว จะทำให้ก๊าซส่วนหนึ่งรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซลอยแทรกขึ้นมายังผิวหน้าของเบด และจะแตกตัวไปในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยตัวขึ้นก็จะมีอนุภาคของแข็งลอยตามขึ้นมาด้วย และเมื่อฟองก๊าซแตกออกอนุภาคของแข็งก็จะตกกลับลงมายังเบดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งอนุภาคดังกล่าวบางส่วนมีโอกาสที่ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นใหม่จะพาสลับขึ้นไปอีก และอนุภาคบางส่วนก็ตกลงด้านล่างของเบด ด้วยเหตุนี้อนุภาคของแข็งจะมีโอกาสกระจายไปทั่วทั้งเบดอย่างสม่ำเสมอ และมีพฤติกรรมต่าง ๆ คล้ายกับของไหล

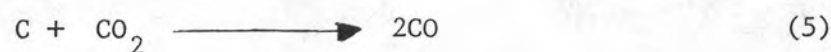
Kondukov และผู้ร่วมงาน (24) ได้ศึกษาการเดินทางของอนุภาคของแข็งภายในเบดพบว่า การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจะเป็นไปอย่างรวดเร็วขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นด้านบน และวนเวียนอยู่ส่วนบนของเบดชั่วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจะตกลงสู่ด้านล่างของเบดในความเร็วที่ช้ากว่าตอนเคลื่อนที่ขึ้น ถ้าแผ่นกระจายก๊าซไม่ตึจะเกิดการหมุนเวียนของอนุภาคอยู่เหนือแผ่นกระจายก๊าซเป็นเวลานานกว่าปกติ แล้วจึงหลุดจากการหมุนเวียนและเคลื่อนที่สู่ส่วนบนของเบด

2.3 การเผาไหม้หินน้ำมันในฟลูอิดไคเบด

เนื่องจากในหินน้ำมันมีส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน โดยเฉพาะร้อยละของคาร์บอน สูงมาก เมื่อนำไปเผาไหม้ในฟลูอิดไคเบดจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอน และออกซิเจนใน ระยะเวลาปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะได้สมการดังนี้คือ



ในที่อุณหภูมิสูง ๆ และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เป็น จำนวนมาก ๆ อาจเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้คือ



ส่วนมากมักเกิดปฏิกิริยาตั้งสมการที่ (1) มากกว่าสมการที่ (5) เนื่องจากว่าการเผาไหม้จะสมบูรณ์นั้นจะต้องมีส่วนที่พอดีระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจน หรือมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าปริมาณเชื้อเพลิง สิ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาตั้งสมการที่ (1) มากกว่าสมการที่ (5) แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรจะมีปริมาณออกซิเจนมากเกินไป เพราะจะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับก๊าซโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนมากเกินพอที่เหมาะสมในการทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ควรจะมีค่าประมาณร้อยละ 30 (23) นอกจากนี้ยังต้องมีการผสมหรือสัมผัสกันระหว่างอากาศ และเชื้อเพลิงอีกด้วย

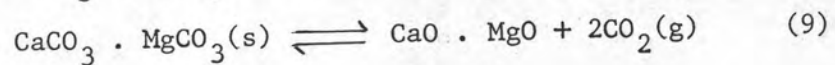
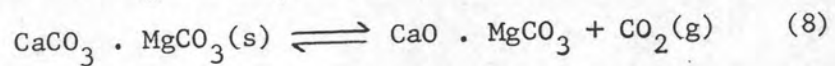
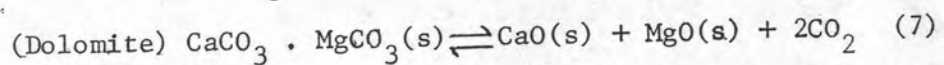
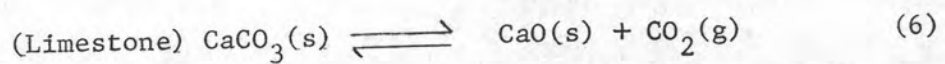
โดยสรุปกระบวนการเผาไหม้ที่ดีควรประกอบด้วย

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน หรืออากาศ
2. การผสม หรือสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน หรืออากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง และกรรมวิธี
3. การลุกไหม้ของของผสม

ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ในการเผาไหม้หินน้ำมัน และเป็นปัญหาใหญ่ของการใช้ก็คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพราะในหินน้ำมันจะมีกำมะถันอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อกำมะถันถูกเผาไหม้จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนเกิดสารประกอบซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกไปพร้อมกับก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้เมื่อพบกับน้ำจะกลายเป็นกรดทำให้เกิดมลพิษของอากาศกับสภาพแวดล้อมได้ กับอาจทำให้เกิดการกัดกร่อน และการผุกร่อนของเครื่องมือ

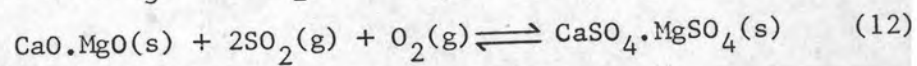
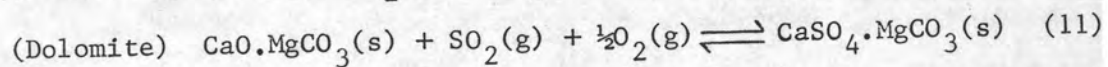
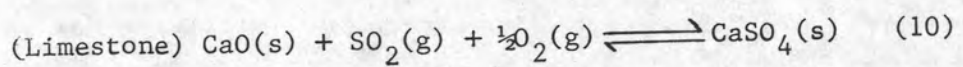
เนื่องจากในหินน้ำมันประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อยู่เป็นจำนวนมากถึงร้อยละ 56 ดังนั้นอาจเกิดปฏิกิริยาการกำจัดกำมะถันที่เกิดจากการเผาไหม้หินน้ำมันในฟลูอิโดเบดดังปฏิกิริยาต่อไปนี้คือ

ก. Calcination หินปูนหรือโดโลไมท์จะได้รับความร้อนแล้วสลายตัวจากสารประกอบคาร์บอเนตเป็นสารประกอบออกไซด์



สารประกอบออกไซด์นี้จะเป็นรูปพรุน ว่องไวต่อการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ข. Sulphation สารประกอบออกไซด์ของ Limestone และ Dolomite จะทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน เกิดเป็นสารประกอบซัลเฟต มีสีน้ำตาลภายในเป็นรูปพรุน และที่ผิววนอกที่อนุภาค



จากการคำนวณของ Reid (25) พบว่าแคลเซียมออกไซด์จะทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 960 องศาเซลเซียส เมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยานานพอ และแมกนีเซียมออกไซด์จะทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 องศาเซลเซียส

ในการเผาไหม้หินน้ำมันในรทอรัท ใช้หินน้ำมันจากโคโลราโด 5 ขนาด คือ $-1.33 + 0.94$ ซม., $-0.94 + 0.64$ ซม., $-0.67 + 0.48$ ซม., $-0.48 + 0.34$ ซม., $-0.34 + 0.17$ ซม. ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7.0 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.4 ซม. ยาว 91.4 ซม. มีเครื่องทำความร้อนซึ่งมีความจุความร้อน 950 วัตต์ 2 เครื่อง ผลที่ได้สรุปได้ดังนี้คือ

2.3.1 จลนศาสตร์การเผาไหม้ของน้ำมันในหินน้ำมัน (29) (Liquid Oil Combustion Kinetics)

อัตราเร็วปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันในรูปพหุนามของหินน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 260 องศาเซลเซียส ขึ้นกับปริมาณของออกซิเจน อุณหภูมิ และลักษณะความพรุนของหินน้ำมัน

Tadema และ Weijdema (1970) (26) หาอัตราความเร็วของออกซิเดชันของผลระหว่างน้ำมัน ทราบ ที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 30 และ 100 บรรยากาศผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงอัตราเร็วออกซิเดชันในเทอมของปริมาณออกซิเจนที่ใช้ต่อน้ำมันในหน่วยเวลาหนึ่ง ดังสมการนี้

$$\frac{-dM_{O_2}}{dt} = k_0 \exp \frac{(-E)}{RT} M_{oil} P_{O_2}^n$$

เมื่อ	M_{O_2}	=	ปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตรเบด (กก./ม ³)
	M_{oil}	=	จำนวนน้ำมันที่มีอยู่ต่อหน่วยปริมาตรเบด (กก./ม ³)
	k_0	=	สัมประสิทธิ์เอกซ์โปเนนเชียลมีค่าอยู่ระหว่าง 498 ถึง 84,800 (วินาที . บรรยากาศ)
	P_{O_2}	=	ความดันย่อยของออกซิเจน (บรรยากาศ)
	E	=	พลังงานกระตุ้น (71.8 ถึง 85.4 กิโลจูล/โมล)
	n	=	อันดับของปฏิกิริยาคิดกับออกซิเจน (มีค่า 0.3-0.79)

จากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง สามารถสรุปได้ว่า n มีค่าเท่ากับ 1 สัมประสิทธิ์เอกซ์โปเนนเชียลและพลังงานกระตุ้นมีค่า 500 (บรรยากาศมาตรฐาน) และ 84 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าจากการคำนวณสอดคล้องกับการทดลอง

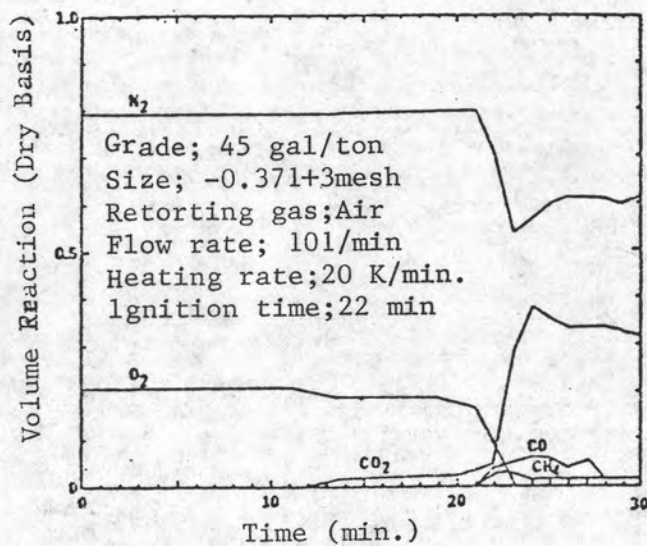
2.3.2 จลนศาสตร์ของการเผาไหม้ในวัฏภาคก๊าซของหินน้ำมัน (29)
(Combustion Kinetics of Combustible Gas and Vapor Species)

Biswas และ Essenhigh (27) ตั้งข้อสมมติฐานว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเมื่อคิดกับเชื้อเพลิง และออกซิเจน เนื่องจากขณะนั้นยังไม่รู้น้ำหนักโมเลกุลของส่วนที่ระเหยได้สิ่งใดแน่ชัดของส่วนผสมของความเข้มข้นแทนค่าส่วนโมล สามารถเขียนสมการที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\frac{dX_{vol}}{dt} = -k_o X_{vol} X_{o_2} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

เมื่อ X = ค่าส่วนของความเข้มข้นซึ่งเขียนไว้ข้างข้างด้วยสารระเหยได้ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 70 ถึง 84 กิโลจูล/โมล สมประสิทธิ์เอกซ์โปเนนเชียลมีค่าประมาณ 10^6 ถึง 10^5 (วินาที)⁻¹ จากการศึกษาของ Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) (28) พบว่าสมประสิทธิ์เอกซ์โปเนนเชียลมีค่า 10^5 (วินาที)⁻¹ และพลังงานกระตุ้นที่ใช้มีค่า 84 กิโลจูล/โมล ซึ่งจะให้ค่าที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง

ขณะที่หินน้ำมันเกิดการเผาไหม้ ค่าส่วนย่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนจะเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าองค์ประกอบของก๊าซเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.10



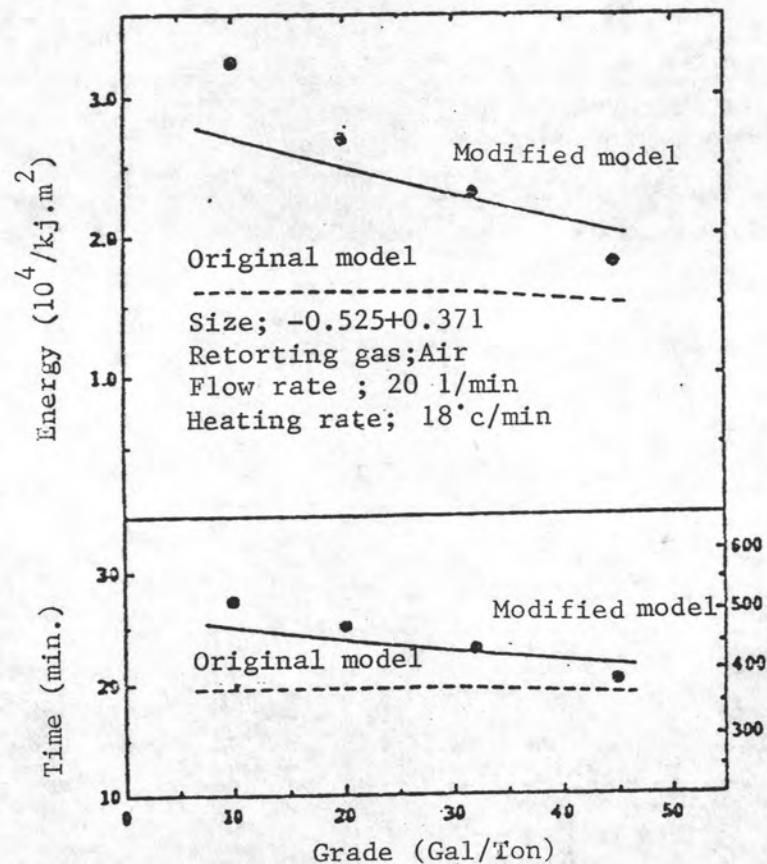
รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เทียบกับเวลา

2.2.3 ผลของเกรดของหินน้ำมันต่อการเผาไหม้ (29)

(The effect of grade)

เวลาของการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้เป็นฟังก์ชันกับเกรดของหินน้ำมัน

ดังแสดงในรูปที่ 2.11 อธิบายได้ว่าเมื่อเกรดของหินน้ำมันยิ่งสูงขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon) ในหินน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้ลดน้อยลง



รูปที่ 2.11 แสดงเวลาของการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้เป็นฟังก์ชันกับเกรดของหินน้ำมัน

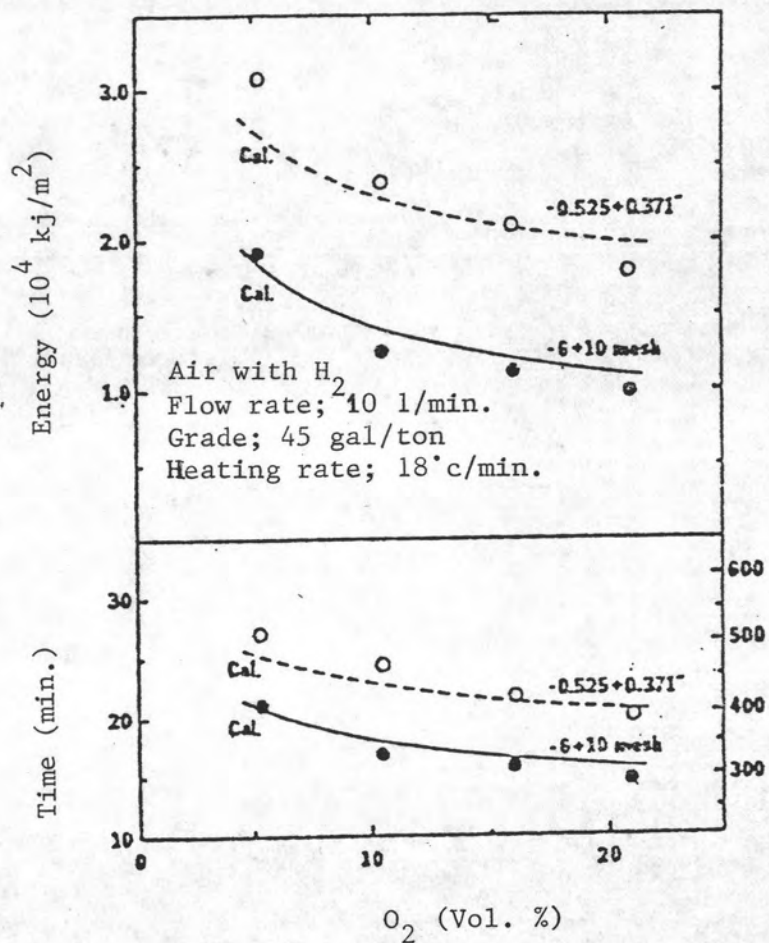
2.3.4 ผลของความดันย่อยของออกซิเจน (29)

(The Effect of Oxygen Partial Pressure)

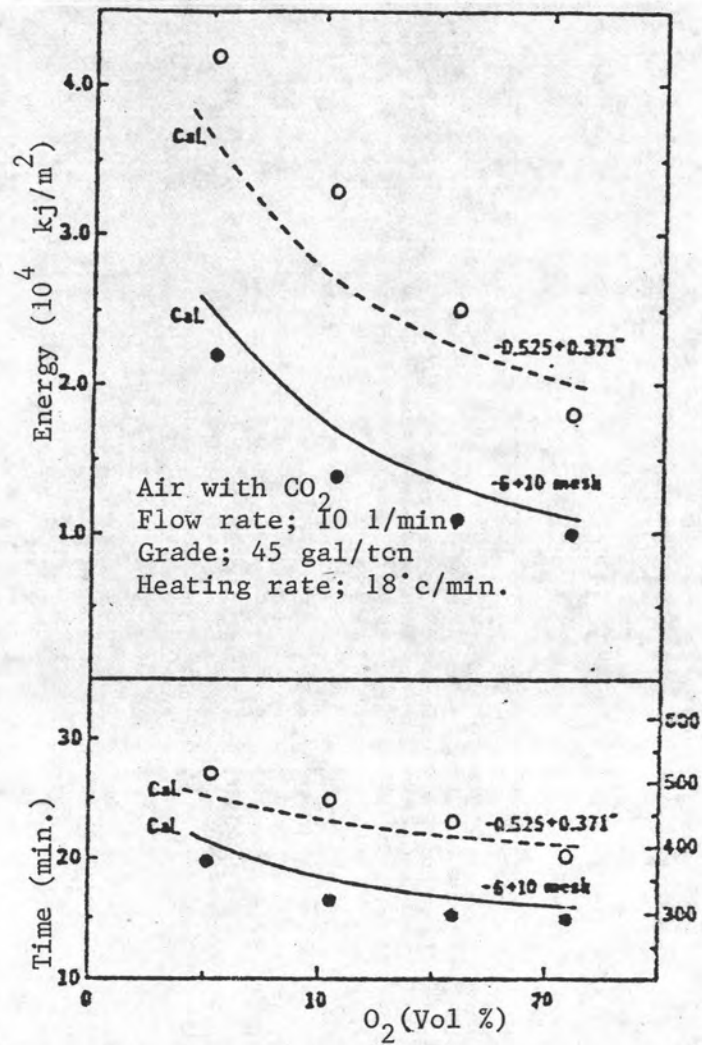
ความเข้มข้นของออกซิเจนมีผลต่อเวลาของการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ถึง 2.13 โดยรูปที่ 2.12 แสดงผลของออกซิเจนที่เสียดจางด้วยก๊าซไนโตรเจน ส่วนรูปที่ 2.13 แสดงผลของออกซิเจนที่ถูกเสียดจางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟสองกราฟแล้วจะพบว่า พลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ในบรรยากาศ

ของออกซิเจนที่เสียจางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกใช้มากกว่าพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้
 ในบรรยากาศของออกซิเจนที่เสียจางด้วยก๊าซไนโตรเจน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่า
 ค่าความจุความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนมีผลต่อเวลาของการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้
 (อากาศถูกเสียจางด้วยก๊าซไนโตรเจน)

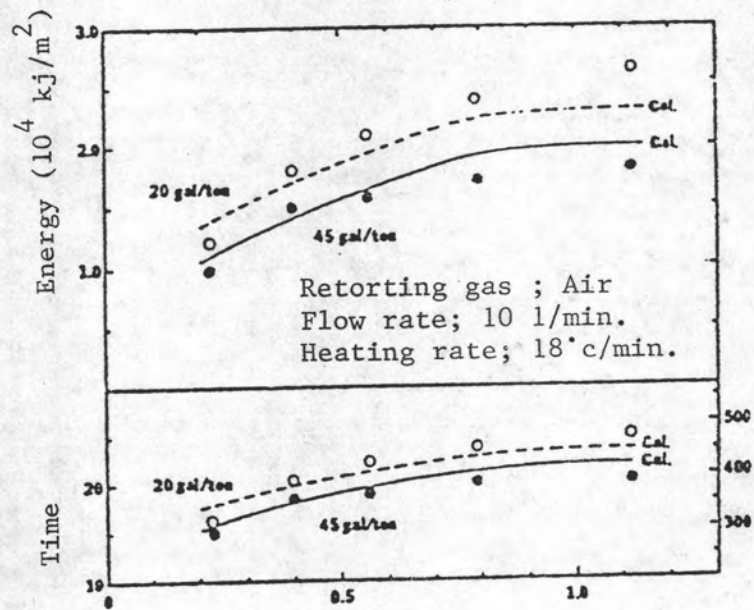


รูปที่ 2.13 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนมีผลต่อเวลาของการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้ (อากาศถูกเสีจางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์)

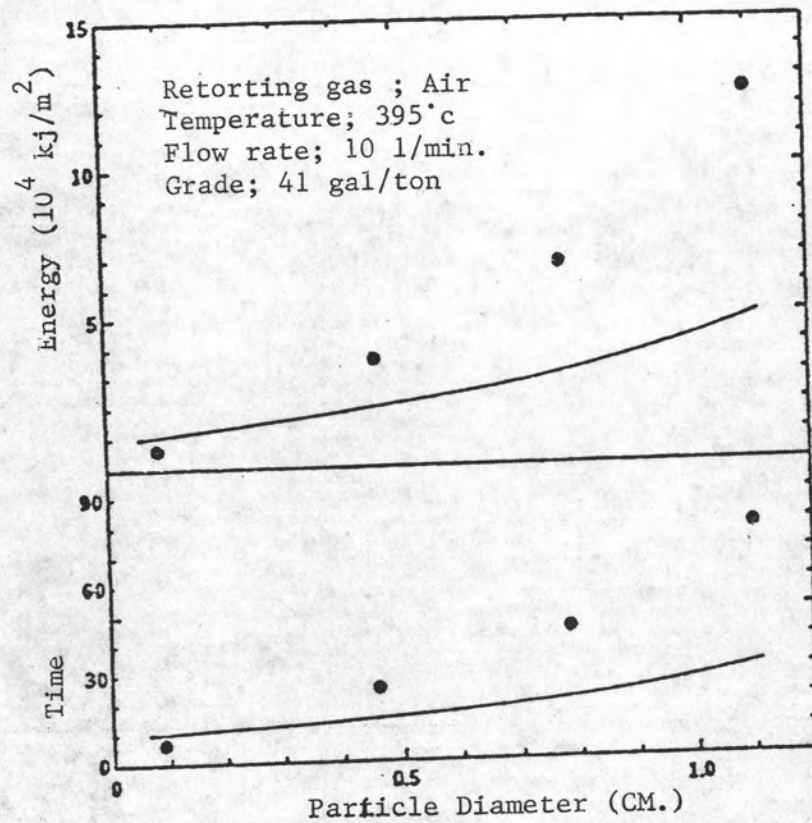
2.2.5 ผลของขนาดอนุภาคหินน้ำมัน (29)

(The Effect of Particle Size)

เวลาและพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นฟังก์ชันกับขนาดอนุภาคของหินน้ำมัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 รูปที่ 2.15 แสดงในกรณีของการเผาไหม้ทำที่อุณหภูมิคงที่ซึ่งได้จากการทดลองของ Parekh (1981) (29) ในกรณีที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้นค่าที่ได้จากการคำนวณจะสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ในกรณีที่อุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่ผลการคำนวณจะไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการทดลองเท่าใดนัก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เวลาในการเผาไหม้นาน ๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.14 แสดงผลของขนาดอนุภาคของหินน้ำมันต่อเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้

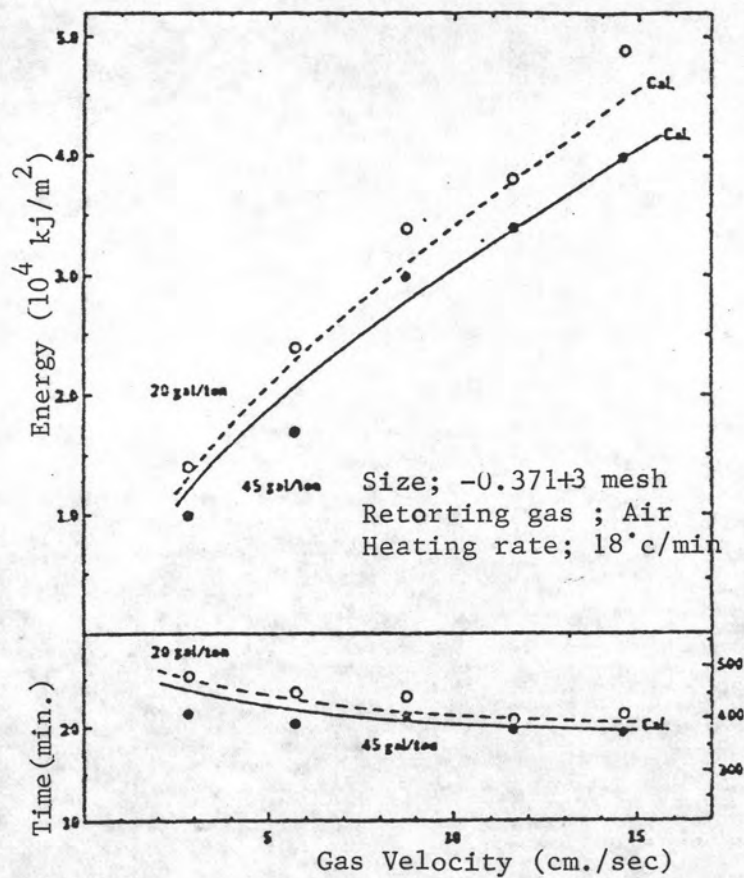


รูปที่ 2.15 แสดงผลของขนาดอนุภาคของหินน้ำมันต่อเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้
อุณหภูมิคงที่

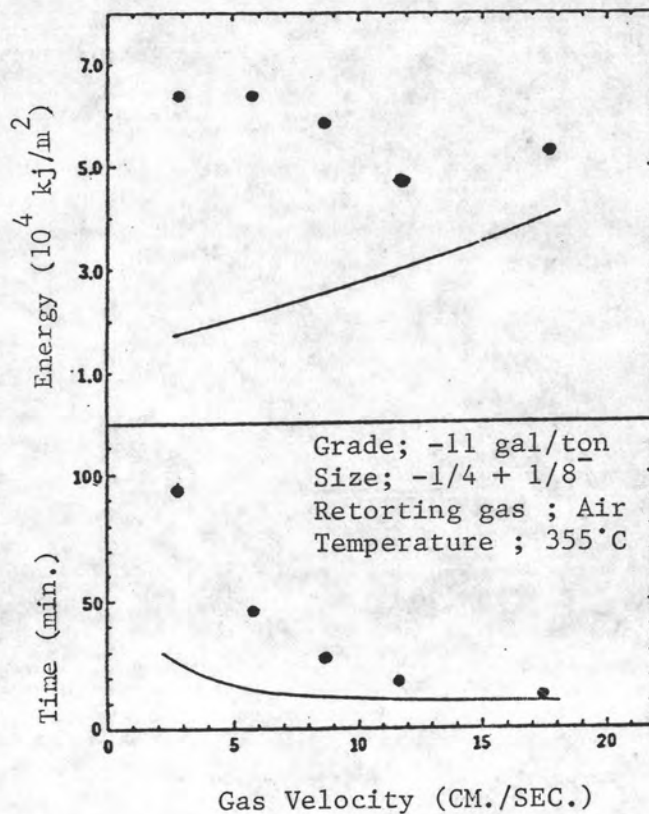
2.3.6 ผลของอัตราเร็วของก๊าซ (29)

(The Effect of Flow Rate)

อัตราเร็วของก๊าซมีผลต่อระยะเวลาการเผาไหม้และพลังงานที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 ขณะที่อัตราความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จะลดลง แต่พลังงานที่ใช้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก๊าซ และของแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้ลดน้อยลง แต่ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการผลิตอากาศร้อน



รูปที่ 2.16 แสดงผลของอัตราเร็วของก๊าซต่อระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้



รูปที่ 2.17 แสดงผลของอัตราเร็วของก๊าซต่อระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ (อุณหภูมิคงที่ , 355 องศาเซลเซียส)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Mei, J.S. และคณะ (30) ได้ร่วมกันทำงานวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้หินน้ำมันอีลราเอลในฟลูอิดซ์เบดโดยใช้ฟลูอิดซ์เบด 2 ขนาดคือ

1. ฟลูอิดซ์เบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความสูงเบด 12 นิ้ว ขนาดของหินน้ำมันที่ใช้ 14 mesh. (58.33×10^{-3} มม.) ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์เท่ากับ 2.5-6.0 ฟุตต่อวินาที อุณหภูมิภายในเบด 1180-1490°ฟ (638-810°ซ) อากาศถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 70-675°ฟ (21°-357°ซ) ใช้อากาศมากเกินพอคิดเป็นร้อยละ 12-50 อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 18.5-52 ปอนด์ต่อชั่วโมง (140.15-393.34 กรัม/นาที) พบว่าการเผาไหม้โดยปราศจากการเวียนกลับของอนุภาคขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพของการเผาไหม้เป็นร้อยละ 98

2. ฟลูอิดไฮดรอลิกเบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว ความสูงเบด 36 นิ้ว ขนาดของหินน้ำมันที่ใช้ 1/4 นิ้ว ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก 2.8-4.5 ฟุตต่อวินาที อุณหภูมิภายในเบด 1250-1400 °ฟ (668-760 °ซ) อากาศถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 70 °ฟ (21 °ซ) ใช้อากาศมากเกินพอคิดเป็นร้อยละ 28-72 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเป็น 180-300 ปอนด์ต่อชั่วโมง (1363.84-2272.73 กรัม/นาท) พบว่าการเผาไหม้มีการเวียนกลับของอนุภาคขนาดเล็กซึ่งถูกกักโดยไซโคลนตัวที่ 1 มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เป็นร้อยละ 96%

2.4.2 ฝ่ายวางแผนและพัฒนาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการเผาไหม้หินน้ำมันในเครื่องสันดาปฟลูอิดไฮดรอลิกความดันบรรยากาศ (31)

1. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการนำเอาหินน้ำมันแม่ลวดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องสันดาปฟลูอิดไฮดรอลิกความดันบรรยากาศในระดับห้องปฏิบัติการ และระบบการทดลองเบื้องต้น

2. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษา

หินน้ำมันที่ใช้มาจากแห่งแม่ลวด นำมาบดและร่อนโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน ASTM E-1170 เบอร์ 4, 6, 10 และ 20 ขนาดหินน้ำมันที่ใช้ในการทดลองคือ ขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเหลือค้างบนตะแกรงเบอร์ 6, ขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 6 และเหลือค้างบนตะแกรงเบอร์ 10, ขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และเหลือค้างบนตะแกรงเบอร์ 20 ตามลำดับ

3. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

ดำเนินการทดลองในเครื่องสันดาปฟลูอิดไฮดรอลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ซึ่งท่อหม้อน้ำอยู่ที่ทั้งในเบดและฟร็อบอร์ต ใช้เครื่องป้อนแบบสกรูใช้แผ่นกระจายอากาศแบบรูปพรุน ความสูงของเบดจตุรคอบคุมโดยท่อไหลสั้น อุณหภูมิภายในเบดอยู่ระหว่าง 750-900 องศาเซลเซียส

3. ผลการทดลอง

ในการศึกษาขั้นต้นใช้กับหินน้ำมัน 2 ขนาดคือ ขนาดเฉลี่ย 2.29 และ 1.15 มิลลิเมตร มีค่าความร้อน 2091 และ 1902 แคลอรี/กรัม ตามลำดับ โดยปรับอัตราการป้อนหินน้ำมันแต่ละขนาดให้คงที่คือ 9.49 กิโลกรัม/ชั่วโมง และ 7.69 กิโลกรัม/ชั่วโมงตามลำดับ อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 65-85 ลบ.ม. มาตรฐาน/ชม. โดยหินน้ำมันขนาด 2.29 มิลลิเมตร อัตราการไหลของอากาศ 30-65 ลบ.ม. มาตรฐาน/ชม. สำหรับหินน้ำมันขนาด 1.15 มิลลิเมตร ส่วนความสูงของเบตกำหนดให้คงที่เท่ากับ 30 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า สามารถใช้หินน้ำมันจากแหล่งแม่สอดมาเผาไหม้ในระบบฟลูอิดซ์เบตอย่างต่อเนื่องได้

เนื่องจากงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการควบคุมความสูงของเบตโดยท่อไหลสั้น แต่ในงานวิจัยการเผาไหม้หินน้ำมันอย่างต่อเนื่องในฟลูอิดซ์เบตนี้ทำการทดลองควบคุมความสูงเบตแตกต่างกันคือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันภายในเบตเพื่อให้สามารถทำการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดซ์ได้อย่างต่อเนื่อง และหินน้ำมันที่ใช้ก็มาจากแหล่งที่แตกต่างกันคือ จากแหล่งแม่ตึบ อำเภอางาว จังหวัดลำปาง