

รายงานวิจัย
เรื่อง
ระบบการใช้ภาพถ่ายโทรทัศน์
โดย
การเค่าโทมัส โหเทาทาเคาแบบฟลูอิดอิชึเบค

วิท
วท 15
004090

รายงานวิจัย

เรื่อง

ระบบการใช้ถ่านลิกไนต์

โดย

การ เภาใหม่ใน เตา เภาแบบฟลูอิดซ์ เบด



สถาบันวิทยบริการ

พิจิตรนครแม่สอดวิทยาลัย

รศ.ดร.พล สาเกตอง

ผศ.ดร.เลอสรวง เมฆสุด

นายวรเดช เจริศพรายวงศ์



บทคัดย่อ

การเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ในฟลูอิดไคเบตเป็นวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งที่เป็นที่นิยมกันวิธีหนึ่ง เนื่องจากอัตราการทำเหมืองลิกไนต์และพลังงานเป็นไปอย่างลุ่มๆ ล่อมๆ และประสิทธิภาพของการเผาไหม้มีค่าสูง สุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แบบต่อเนื่องในฟลูอิดไคเบตที่จะให้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยในการนำถ่านลิกไนต์ที่มีอยู่ปริมาณมากในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

ขั้นตอนของการวิจัยเริ่มด้วยการปรับปรุงเครื่องมือวิจัย ศึกษาระบบการทำงานของส่วนต่าง ๆ พร้อมทั้งแก้ไขดัดแปลงบางส่วนของเครื่องมือเพื่อความเหมาะสม จากนั้นก็ศึกษาการทำงานของเครื่องมือวิจัยในขณะที่เผาไหม้ถ่านลิกไนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. ในคอลัมน์ฟลูอิดไคขนาด 200 มม. แบบต่อเนื่อง และเก็บข้อมูลการวิจัยโดยมีตัวแปรที่พิจารณาคืออุณหภูมิของการเผาไหม้และอัตราการไหลของอากาศ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้และประสิทธิภาพสูงสุดที่จะได้รับ

ในการทดลองจะใช้ช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้จาก 800 องศาเซลเซียส ถึง 950 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศ 76.08 ซม./วินาที ถึง 98.20 ซม./วินาที หรือ 1.55-2.00 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไคเซชัน

ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ในฟลูอิดไคเบตแบบต่อเนื่อง คือที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศ 98.20 ซม./วินาที อัตราการป้อนถ่านลิกไนต์ 0.675 กรัม/ชม.² นาที ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงสุดร้อยละ 89.57



ABSTRACT

Combustion of lignite in fluidized bed is one of highlight methods for burning solid fuel in order to take advantage of homogeneity of mass and heat transfer beside its high efficiency. Main point of this work concentrated in studying optimal operating conditions with regard to conversion efficiency, guiding to further research on utilization of lignite powder in Thailand to get more benefit.

In this study, the design and development of a fluidized bed combustor were performed after some problems were encountered and solved. Then some tested runs on continuous combustion of lignite size 1.5 mm. and combustor diameter of 200 mm. at various operating conditions were operated. The studied parameters were combustion temperatures and air flow rates in order to get optimal operating condition of high efficiency.

The combustion temperatures were varied from 800°C to 950°C and air flow rates were varied from 76.08 cm./sec to 98.20 cm./sec or from 1.55 - 2.00 times of minimum fluidization velocity.

The results show that the best operating conditions in continuous combustion are at the combustion temperature of 900°C with an air velocity of 98.20 cm./sec and lignite feed rate of $0.675 \text{ gm/cm.}^2 \text{ min.}$ that can obtain highest combustion efficiency of 89.57 percent.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับ เงินสนับสนุนโครงการโดย เงินทุนวิจัยของมหาวิทยาลัย โดยศูนย์วิจัย
และอบรมพลังงาน งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของหัวหน้าภาควิชาเคมี เทคนิค
และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน กลุ่มผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต วัฒนกุล
ผู้อำนวยการคณะวิทยาศาสตร์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๙
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๑๑
กิตติกรรมประกาศ	๑๓
รายการตารางประกอบ	๑๕
รายการรูปประกอบ	๑๖
สัญลักษณ์ที่ใช้	๑๗
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารปริทรรศน์	3
2.1 ถ่านหิน	3
2.1.1 ประเภทของถ่านหิน	3
2.1.2 การกำเนิดของถ่านหิน	3
2.1.3 องค์ประกอบของถ่านหิน	4
2.1.4 ถ่านหินในประเทศไทย	4
2.2 ฟลูอิดโอเชียน	7
2.2.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิดโอเชียน	7
2.2.2 เขต	9
2.2.3 การค้นพบหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิด ฟลูอิดโอเชียน	9
2.2.4 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดโอเชียน โดยการทดลอง	10
2.2.5 แนวความคิดและการพัฒนาการใช้เทคนิคฟลูอิดโอเชียน	12
2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดโอเชียน	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	15
3.1 เครื่องมือที่ใช้กระบวนการเผาไหม้	15
3.1.1 มอเตอร์	15
3.1.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ	15
3.1.3 ฟลูอิดไอซ์เบดคอส้มนี้	19
3.1.4 ไซโคลน	19
3.1.5 ระบบป้อนวัสดุดิบ	20
3.1.6 เครื่องวัดและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	20
3.2 เครื่องวัดอากาศ	20
3.3 บอมม์แคลอริมิเตอร์	20
3.4 เครื่องมือออกแลท	20
4. วิธีการทดลอง	23
4.1 การปรับปรุงเครื่องมือวิจัย	23
4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางกายภาพของเบด	24
4.3 การเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไอซ์เบดแบบต่อเนื่อง	27
4.4 สภาวะในการเผาไหม้	28
5. ผลการทดลอง	30
5.1 ผลของการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางกายภาพของถ่านลิกไนท์	30
5.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน	31
5.3 ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไอซ์เบด	31
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง	43
6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ทางกายภาพของถ่านลิกไนท์	43
6.2 ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์	44
6.2.1 อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์	44
6.2.2 เถ้าที่ออกจากคอส้มนี้	44
6.2.3 เถ้าที่ออกจากไซโคลน	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	6.2.4 อัตราการไหลของอากาศ	47
	6.2.5 อุณหภูมิของการเผาไหม้	49
	6.2.6 อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ	50
	6.2.7 อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	53
	6.2.8 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้	54
	7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ	55
	เอกสารอ้างอิง	57
	ภาคผนวก	61

สงวนลิขสิทธิ์ของ
 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่ ๓๙
 เลขทะเบียน ๐๐๔๐๙๐
 วัน,เดือน,ปี 30 ก.ย 30

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงผลผลิตถ่านหินภายในประเทศ	5
2-2	แสดงองค์ประกอบของถ่านลิกไนท์จากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศ . . .	6
4-1	แสดงสภาวะที่กำหนดขึ้นในการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิโดซ์เบด . .	29
5-1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์	30
5-2	ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	34
5-3	ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส	35
5-4	ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	36
5-5	ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	37

สถาบันวิจัยและพัฒนา
พลังงานทดแทนฟอสซิล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2-1	ขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดโตเซชันของอนุภาคของแข็ง	8
2-2	แสดงความสัมพันธ์ของความดันลดและความเร็วของของไหล	11
3-1	แสดงการติดตั้งและส่วนประกอบของระบบการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไอซ์เบด .	16
3-2	แสดงส่วนประกอบของเตาเผาแบบฟลูอิดไอซ์เบด	17
3-3	แสดงลักษณะของแผ่นกระจายลม	18
3-4	บอมบ์แคลอริมิเตอร์	21
3-5	เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซ	22
5-1	แสดงการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดโตเซชัน	33
5-2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านลิกไนท์และความเร็วของอากาศ . .	38
5-3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของน้ำที่ออกจากไซโคลนและความ เร็วของอากาศ	39
5-4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ และ ความเร็วของอากาศ	40
5-5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้และ ความเร็วของอากาศ	41
5-6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้และ อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ	42
6-1	แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ . .	48
6-2	แสดงความสำคัญของจุดหมุดต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ผิวของถ่าน	51
6-3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ	52



สัญลักษณ์ที่ใช้

- C_{pm} = ความจุความร้อนเฉลี่ย; แคลอรี/กรัม-โมล. องศาเซลเซียส
- d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่า, ซม.
- e_1 = ความถูกต้องของปริมาณความร้อนของการรวมตัวของกรดไนตริก, แคลอรี
- e_2 = ความถูกต้องสำหรับการรวมตัวของกรดซัลฟูริก, แคลอรี
- e_3 = ความถูกต้องของปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ของขดลวด, แคลอรี
- ϵ = สัดส่วนช่องว่าง, ไม่มีหน่วย
- ϵ_m = สัดส่วนช่องว่างของเบตที่อยู่กับที่, ไม่มีหน่วย
- ϵ_{mf} = สัดส่วนช่องว่างของเบตในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน, ไม่มีหน่วย
- g = อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (980 ซม./วินาที²)
- g_c = 980 กรัม-ซม./กรัม-น้ำหนัก. วินาที² (gravitational factor)
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล, กรัม/ซม.³
- ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง, กรัม/ซม.³
- ρ_g = ความหนาแน่นของก๊าซ, กรัม/ซม.³
- ΔH = เอนทาลปี, กิโลแคลอรี
- H_g = ปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ของตัวอย่าง, แคลอรี/กรัม
- L_m = ความสูงของเบตที่อยู่กับที่, ซม.
- L_{mf} = ความสูงของเบตในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน, ซม.
- m = น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม
- n = จำนวน กรัม-โมล
- P_1 = ความดันของอากาศที่จุดหมุนอ้างอิง, นิ้วของปรอท

- P_2 = ความดันของอากาศที่ลภาวะมาตรฐาน, นิวตัน/ปรอท
 ϕ_s = ความเป็นทรงกลมเทียบเท่าของอนุภาค, ไม่มีหน่วย
 ΔT = ความแตกต่างของจุดหลอม, องศาเซลเซียส
 t = ความแตกต่างของจุดหลอมระหว่างจุดหลอมเริ่มต้นและจุดหลอมสุดท้าย, องศาเซลเซียส
 T_1 = จุดหลอมของอากาศที่จุดหลอมอ้างอิง, องศาเซลเซียส
 T_2 = จุดหลอมของอากาศที่ลภาวะมาตรฐาน, องศาเซลเซียส
 U_o = ความเร็วของของไหลที่ผ่านเบด, ซม./วินาที
 U_{mf} = ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน, ซม./วินาที
 μ = ความหนืดของก๊าซ, กรัม/ซม.วินาที
 V_1 = ปริมาตรของอากาศที่จุดหลอมอ้างอิง, ลิตร
 V_2 = ปริมาตรของอากาศที่ลภาวะมาตรฐาน, ลิตร
 w = ปริมาณความร้อนเทียบเท่าของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์, แคลอรี/องศาเซลเซียส



บทที่ 1

บทนำ

หลังจากเกิดวิกฤติการณ์ทางด้านพลังงานขึ้นมาทั่วโลกทำให้ประเทศต่าง ๆ หันมาให้ความสนใจในการเสาะแสวงหา การปรับปรุงและการพัฒนา รวมทั้งแนวทางการใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุด ทั้งนี้เพื่อใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างประหยัดและให้คุ้มค่าที่สุด

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังตื่นตัวและให้ความสนใจกับปัญหาทางด้านพลังงานมากขึ้น หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐบาลและเอกชนได้ให้ความสนใจ ร่วมมือกันสำรวจและแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ รวมทั้งทำการศึกษาพัฒนาและวิจัยรูปแบบแนวทางการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ประเทศไทยมีแหล่งพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ อยู่ปริมาณมากพอสมควร ทั้งที่ได้ทำการสำรวจแล้วและกำลังดำเนินการสำรวจอยู่ เช่น แหล่งน้ำมันดิบบนบกและในทะเล ก๊าซธรรมชาติ จากอ่าวไทยและที่อ่าวบงกช ซึ่งมีคุณภาพดีและมีปริมาณมากพอที่จะทำในเชิงพาณิชย์ได้ นอกจากนี้ยังมีถ่านหินสำรองจำนวนมาก ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีค่าและอยู่กระจัดกระจายตามภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศ ซึ่งมีอยู่หลายแห่งที่หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งของภาครัฐบาล รัฐวิสาหกิจและเอกชนได้ลงทุนดำเนินการเปิดเหมืองและนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน เช่น แหล่งแม่ต๋ำ อ.งาว จ.ลำปาง จากลำเหตุการขาดแคลนพลังงานของโลกทำให้ถ่านหินมีความสำคัญต่อประเทศมากขึ้น เพราะเป็นแหล่งพลังงานภายในประเทศที่สามารถหาได้ง่าย มีปริมาณมากพอสมควรและสามารถนำมาทดแทนพลังงานอื่น ๆ โดยเฉพาะน้ำมันปิโตรเลียมได้ จึงทำให้มีการตื่นตัวในการสำรวจหาแหล่งถ่านหินรวมทั้งมีการศึกษาและวิจัยถึงแนวทางการใช้ถ่านหินให้เกิดประโยชน์คุ้มค่ามากที่สุด ทั้งในระดับครัวเรือน อุตสาหกรรมขนาดเล็ก และในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ วิธีการนำถ่านหินมาใช้ในปัจจุบันพอสรุปได้ 3 วิธีคือ

1. การนำถ่านหินมาอัดเป็นก้อน (briquette) แล้วจึงนำไปเผาไหม้
2. การนำถ่านหินมาบดเป็นผงละเอียด (pulverization) แล้วจึงนำไปเผาไหม้
3. การนำถ่านหินมาบดเป็นก้อนเม็ดเล็ก ๆ แล้วนำไปเผาไหม้ โดยใช้เทคนิค

ฟลูอิดิเซชัน (fluidization)

การนำถ่านหินซึ่งเป็นถ่านหินชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมากที่สุดในประเทศมาเผาไหม้ในเตาเผาแบบธรรมดา จะให้ประสิทธิภาพต่ำและเกิดปัญหาต่าง ๆ ติดตามมา เช่น การที่เครื่องจักรหรือของเครื่องมือ ธาตุกำมะถันที่ปนอยู่ในถ่านหินทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม ถ้าถ่านหินที่อยู่ภายในเตาเผาอาจหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงและเกิดเป็นสะเก็ด (slag) ซึ่งเป็นปัญหาในการกำจัดออกจากเตาเผา การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดเบดนั้นก็ในรูปแบบหนึ่งในการนำเอาพลังงานมาใช้ ซึ่งการใช้เทคนิคดังกล่าวสามารถช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เทคนิคทางฟลูอิดเซชันที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้นั้นได้มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยมาแล้วพบว่าให้ผลดี สามารถนำมาใช้กับวัสดุติดต่าง ๆ รวมทั้งถ่านหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องมือฟลูอิดเบดสำหรับการเผาไหม้ถ่านหิน
2. ศึกษาถึงผลของความเร็วของอากาศและผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเผาไหม้ เพื่อหาความร้อนที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์โดยตรง
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ถ่านหินที่สามารถเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนจากภายนอกและเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทำการศึกษาถึงการผลิตไอน้ำโดยใช้ถ่านหินเผาไหม้แบบ 2 ชั้น

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ถ่านหิน

2.1.1 ประเภทของถ่านหิน (1,2)

ถ่านหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่าเพราะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญและสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้เป็นอย่างดี สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานอื่น ๆ โดยเฉพาะน้ำมันปิโตรเลียมได้ ถ่านหินมีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีรูปผลึกที่แน่นอน โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลถึงดำสนิท ถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามคุณภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงสภาพของถ่านหิน โดยอิทธิพลของความร้อนและความกดดัน ได้แก่ ลิกไนท์ (lignite) ซับบิทูมินัส (subbituminous) บิทูมินัส (bituminous) และแอนทราไซต์ (anthracite)

ลิกไนท์เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำสุด มีคุณค่าทางความร้อนต่ำกว่า 8,300 บีทียูต่อปอนด์

ซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีกว่าถ่านลิกไนท์ มีคุณค่าทางความร้อน 8,300-11,500 บีทียูต่อปอนด์

บิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีคุณค่าทางความร้อนไม่ต่ำกว่า 10,500 บีทียูต่อปอนด์

แอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีปริมาณคาร์บอนคงที่ไม่น้อยกว่า 86 % และสารระเหยต่ำกว่า 14 %

2.1.2 การกำเนิดของถ่านหิน (1,2)

ถ่านหินเกิดจากการทับถมของซากพืชที่ล้มตายสะสมกันมาเป็นเวลานานนับล้านปี ภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความร้อน การสะสมของอินทรีย์สารดังกล่าวจะต้องอยู่

ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุดมีไปด้วยพืชชั้นสูงนานาชนิด ซึ่งอยู่ใกล้แหล่งน้ำแต่มีการหมุนเวียนของกระแส น้ำน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงสภาพของอินทรีย์สารต้องอยู่ในสภาพของปฏิกิริยาออกซิเจน ไม่มีอิทธิพลของบักเตรีที่จะทำให้เกิดการเน่าเปื่อย การสลายตัวของอินทรีย์สารจะไม่สมบูรณ์และโครงสร้างต่าง ๆ เช่น ลิกนินก็ยังคงอยู่สะสมเป็นเวลานานเกิดเป็นชั้นของพืช การเปลี่ยนแปลงภายในทั้งทางฟิสิกส์และเคมีระหว่างการสะสมตัวของอินทรีย์ จะทำให้พืชมีคุณภาพดีขึ้นกลายเป็นถ่านลิกไนท์ โดยปกติแล้วถ่านหินที่อยู่ลึกกลงไปในใต้ดินจะมีคุณภาพดีกว่าถ่านหินที่อยู่ใกล้พื้น เพราะถ่านหินที่อยู่ในระดับลึกกว่าจะได้รับอิทธิพลของความร้อนและความกดดันที่สูงกว่า

2.1.3 องค์ประกอบของถ่านลิกไนท์

ถ่านลิกไนท์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดทั้งสารอินทรีย์ (Organic compound) และสารอนินทรีย์ (Inorganic compound) สารประกอบอินทรีย์ได้แก่ซากพืชบางชนิดที่ล้มตายสะสมกันอยู่ ส่วนสารประกอบอนินทรีย์ได้แก่พวกแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ควอตซ์ (Quartz) ซิลิเกต (Silicate) และดินเหนียว (Clay) โดยทั่วไปแล้วจะกล่าวได้ว่า ถ่านหินประกอบด้วย ความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile matter) คาร์บอนคงที่ (fixed carbon) และเถ้า (ash)

2.1.4 ถ่านลิกไนท์ในประเทศไทย (1,2)

ในปี พ.ศ. 2460 ได้มีการสำรวจหาแหล่งถ่านหินเป็นครั้งแรกเพื่อนำมาใช้ในกิจการรถไฟ แหล่งถ่านหินที่ได้สำรวจพบเป็นแห่งแรกคือที่ บางปูล่า ต.คลองขนาน อ.เมือง จ. กระบี่ แหล่งถ่านหินที่พบในประเทศไทยประมาณ 80 % พบกระจัดกระจายอยู่ทางภาคเหนือ ส่วนใหญ่อยู่ในยุคของเทอร์เชียรี (Tertiary) ซึ่งมีอายุราว 10 - 100 ล้านปี

แหล่งถ่านหินต่าง ๆ ในประเทศไทยมีน้อยมากที่ได้รับการสำรวจอย่างละเอียด แต่จากข้อมูลที่รวบรวมได้ พอสรุปได้ว่ามีปริมาณสำรองไม่น้อยกว่า 1500 ล้านตัน (1) คุณภาพของถ่านหินส่วนใหญ่อยู่ในชั้นซับบิทูมินัสและลิกไนท์ การดำเนินการสำรวจหาแหล่งถ่านหินในปัจจุบันนอกจากภาคเอกชนแล้วยังมีหน่วยงานที่รับผิดชอบ 3 แห่ง ได้แก่ กรมทรัพยากรธรณี สำนักงานพลังงานแห่งชาติและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ถ่านลิกไนท์ที่ผลิตได้ภายในประเทศทั้งหมดไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า จุดสำคัญกรมโยธาธิการและมียุทธศาสตร์นำเข้าไปในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2-1 แสดงผลผลิตด้านหินภายในประเทศ (หน่วยเป็นเมตริกตัน) (1,2)

ผู้ประกอบการ	แหล่งผลิต	2522	2523	2524	2525	2526
1. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	อ.เมือง จ.กระบี่	384,000	985,000	338,000	415,000	140,000
	อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง	941,458	935,408	1,204,465	1,299,875	39,993
2. สำนักงานพลังงานแห่งชาติ	อ.สี จ.ลำพูน	94,000	75,000	81,800	36,000	12,000
3. บริษัท แพร่ลิกไนท์ จำกัด	อ.งาว จ.ลำปาง	10,900	11,900	37,585	102,266	34,219
4. บริษัท เวอรัคฟีลด์ จำกัด	อ.สี จ.ลำพูน	6,110	18,390	62,100	56,000	33,044
5. บริษัท ไทยลิกไนท์ จำกัด	อ.แม่ระมาด จ.ตาก	-	67.5	2,592	83,501	55,831
6. บริษัท สยามแกรไฟต์ จำกัด	กิ่ง อ.นาด้วง	-	-	-	5,920	8,100
7. นาย ประสิทธิ์ ธรรมปรिता	อ.สี จ.ลำพูน	-	-	-	-	1,500
รวม		1,356,468	1,425,765	1,726,542	1,998,562	683,647

หมายเหตุ ปริมาณผลผลิตของปี พ.ศ. 2526 เป็นปริมาณรวมทั้งตั้งแต่เดือน มกราคม - เมษายน 2526

ตารางที่ 2-2 แสดงองค์ประกอบของถ่านลิกไนท์จากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศ (1,2)

แหล่งถ่านหิน	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	คาร์บอนคงที่ (%)	เถ้า (%)	กำมะถันทั้งหมด (%)	คุณค่าทางความร้อน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)
1. แม่ตื่น อ.แม่ระมาด ตาก	7.75	39.49	51.70	1.06	0.71	8262.95
2. แม่ตึบ อ.งาว ลำปาง	22.87	29.42	43.45	4.26	0.70	4974.70
3. โบหลวง อ.ฮอด เชียงใหม่	18.59	35.43	41.30	4.66	1.41	4903.58
4. แม่ฮี อ.ป่าบอน แม่ฮ่องสอน	9.20	38.62	42.27	9.91	1.69	7093.86
5. ลี้ อ.ลี้ ลำพูน	32.09	26.75	36.85	4.31	1.78	6302.62
6. หนองหญ้าปล้อง อ.หนองหญ้าปล้อง เพชรบุรี	14.55	31.05	48.79	5.60	1.27	5946.80
7. ลินตัน อ.ทองผาภูมิ กาญจนบุรี	30.39	26.78	35.28	7.53	2.11	4190.61

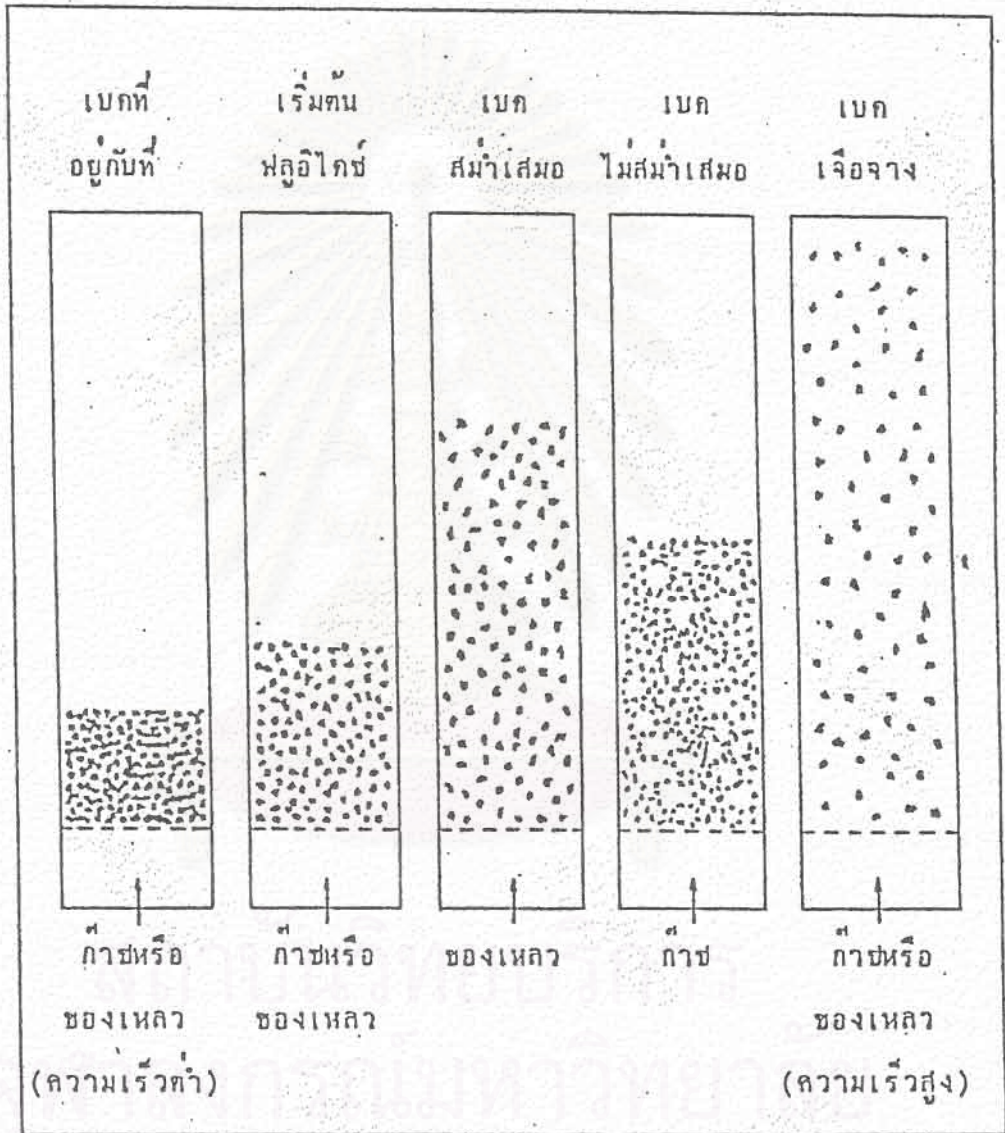
2.2 ฟลูอิดเซชัน

2.2.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน (3, 4, 5, 6, 19)

ฟลูอิดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มของอนุภาคประพืดตัวทางกายภาพคล้ายกับของไหล เมื่อมีก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านกลุ่มของอนุภาคนั้น ในขณะที่ของไหลไหลผ่านอนุภาคด้วยความเร็วต่ำ ของไหลจะแทรกตัวไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคที่อยู่กับที่ (fixed bed) แต่เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น อนุภาคจะเริ่มขยับตัวและสัดเรียงตัวเองใหม่จนกระทั่งถึงความเร็วที่จุดจุดหนึ่ง ความเร็ว ณ จุดนี้ อนุภาคจะเริ่มลอยตัวเป็นอิสระจากกันแต่ก็ยังคงเป็นกลุ่มก้อนอยู่ (Dense phase fluidized bed) แรงที่กระทำบนอนุภาคจะอยู่ในสมดุล กล่าวคือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคและแรงพยุงของของไหล ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามมีค่าเท่ากัน ความดันลคที่เพิ่มขึ้นที่หน้าตัดใด ๆ ของกลุ่มอนุภาคมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความสูงของกลุ่มอนุภาค ลักษณะของอนุภาคขณะนี้เป็นลักษณะเริ่มต้นของปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน (Incipiently fluidized bed or a bed at minimum fluidization) ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization velocity)

ถ้าหากความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น อนุภาคก็จะลอยตัวแยกอยู่ห่างกันมากขึ้น กลุ่มของอนุภาคลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดซ์เบดเจือจาง (Diluted phase fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกจนถึงจุดหนึ่ง ของไหลก็จะพาอนุภาคดังกล่าวหลุดลอยออกไปจากระบบได้และกลายเป็นการขนส่งอนุภาค ซึ่งถ้าของไหลเป็นอากาศจะเรียกว่าการขนส่งอนุภาคด้วยอากาศ (Pneumatic transport) ถ้าของไหลเป็นของเหลวจะเรียกว่าการขนส่งอนุภาคด้วยของเหลว (Hydraulic transport)

ในระบบก๊าซ-ของแข็ง จะมีลักษณะแตกต่างไปจากระบบของเหลว-ของแข็ง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซให้สูงขึ้นมาากกว่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน กลุ่มอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่อย่างรุนแรง และขยายตัวเกิดเป็นช่องว่างซึ่งอาจเรียกว่า ฟองก๊าซ แทรกตัวขึ้นมาอยู่ทั่วไปในกลุ่มของอนุภาคและจะหลุดลอยออกไปที่ผิวหน้าของกลุ่มอนุภาคนั้น ในบางครั้งอาจจะเกิดแนวหรือช่องทางเดินของก๊าซ (channelling) แทรกผ่านกลุ่มอนุภาคด้วย ซึ่งมักจะพบบ่อยถ้าความเร็วของก๊าซและความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูง ลักษณะขั้นต้นของการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันของอนุภาคของของแข็งอาจแสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิโดเซชันของอนุภาคของแข็ง

2.2.2 เบด (Bed)

เบด หมายถึง ภาชนะในคอลัมน์ที่มีปริมาณกลุ่มอนุภาคจำนวนหนึ่งบรรจุอยู่ ไม่ว่ากลุ่มอนุภาคนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในคอลัมน์ ซึ่งจะมีระดับตั้งแต่ตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงที่สุดที่ผิวหน้าของกลุ่มอนุภาค

2.2.3 การคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (19)

ขณะที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันนั้น อนุภาคจะลอยตัวเป็นอิสระ การที่อนุภาคลอยตัวอยู่ในกระแสของของไหลได้นั้นเพราะแรงที่กระทำอยู่บนอนุภาคอยู่ในสภาพสมดุลกัน กล่าวคือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคกับแรงพยุงของของไหลซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามมีค่าเท่ากัน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน)} = \text{น้ำหนักของอนุภาค} \quad (2-1)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} (\text{ความดันลดในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด}) (\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของเบด}) &= (\text{ปริมาตรของเบด}) \\ & (\text{สัดส่วนของอนุภาคในเบด}) \\ & \times (\text{ความถ่วงจำเพาะ} \\ & \text{ของอนุภาค}) \quad (2-2) \end{aligned}$$

เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta P \cdot A_t = W = \left(\frac{A_t L_{mf}}{t_{mf}} \right) (1 - \epsilon_{mf}) \left(\rho_s - \rho_g \right) \frac{g}{g_c} \quad (2-3)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = \dots (1 - \epsilon_{mf}) \left(\rho_s - \rho_g \right) \frac{g}{g_c} \quad (2-4)$$

จากสมการของ Ergun (12) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความดันลดในขณะเบดที่อยู่กับที่ไว้ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_m} g_c = \frac{150 (1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_o^2}{(\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75 (1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{\rho U_o^2}{\phi_s d_p} \quad (2-5)$$

ขณะที่เริ่มเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันนั้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคจะมีค่ามากกว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคในเบดที่อยู่กับที่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถนำสมการ (2-4) และ (2-5) มารวมกันได้เป็นสมการใหม่ดังนี้

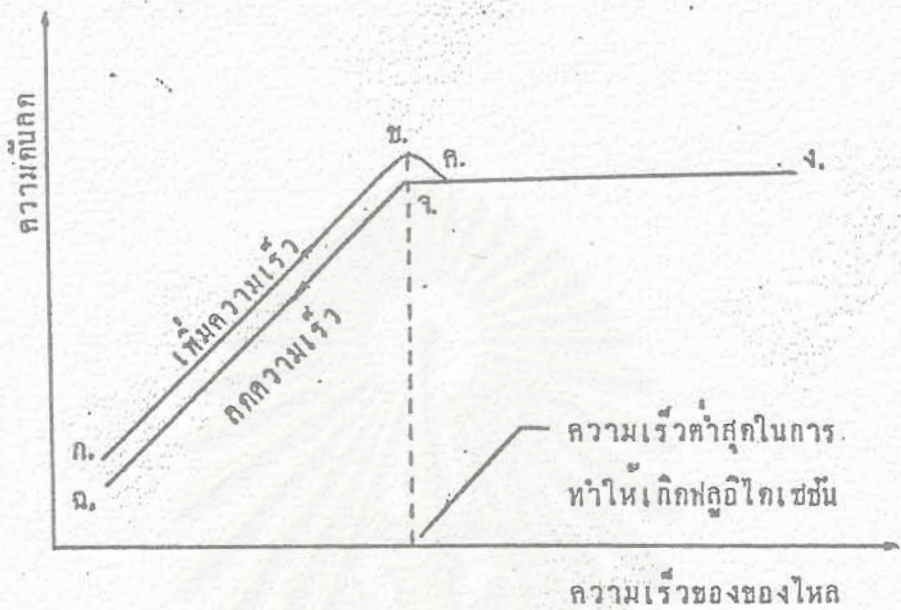
$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p v_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p v_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2} \quad (2-6)$$

สำหรับอนุภาคถ่านหินที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 มม. สามารถคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ โดยการตัดเทอมแรก (viscous loss) ของสมการ (2-5) ซึ่งมีค่าน้อย สำหรับในกรณีที่ค่าเรโนลด์มีค่าสูง เทอมที่สอง (kinetic energy loss) จะมีค่าเด่นกว่าเทอมแรกมาก นำสมการที่ได้ไปรวมกับสมการ (2-4) แล้วจัดเทอมใหม่ ได้เป็นสมการใหม่ดังนี้

$$v_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf}^3 \quad (2-7)$$

2.2.4 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันโดยการทดลอง (3, 4, 19)

วิธีนี้อาศัยหลักที่ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลที่ละน้อย ความดันลด (Pressure drop) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มความเร็วของของไหล จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง ความดันลดจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่ด้วยความเร็วของของไหล ดังนั้นในช่วงที่ความดันลดเริ่มคงที่ก็คือช่วงที่เปลี่ยนจากเบดที่อยู่กับที่เป็นฟลูอิดเซชันเบด ถ้าวาดกราฟระหว่างความดันลดและความเร็วของของไหล ก็จะสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้



รูปที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ของความถี่กลับและความเร็วของของไหล

ในขณะที่เรากำลังค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลนั้น ของไหลจะค่อย ๆ แทรกตัวผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาค ความถี่กลับที่เกิดขึ้นก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหล จากรูปที่ 2-2 จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟ กขค. ก็แสดงการเพิ่มความเร็วของของไหลจะมีค่าที่โค้งและต่ำลงมาตามแนวเส้น ขค. บริเวณดังกล่าวนี้จะต้องใช้แรงดันมากเป็นพิเศษที่จะใช้กระจายหรือแยกอนุภาคให้ออกจากกันและสัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ เมื่ออนุภาคสัดเรียงตัวเรียบร้อยแล้ว ความถี่กลับจึงค่อย ๆ ลดลง และจะคงที่ตลอดไปไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล ความถี่กลับที่เกิดขึ้นจะเดินตามแนวเส้น กง.

หลังจากนั้นถ้าค่อย ๆ ลดความเร็วของของไหล ความถี่กลับก็จะเดินตามเส้น กคจ. ซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วของของไหล และถ้าลดความเร็วของของไหลอีกความถี่กลับที่เกิดขึ้นจะเดินตามเส้น จค. ซึ่งขนานกับเส้นกราฟ ขค. เมื่อเพิ่มความเร็ว กข. แต่ความถี่กลับมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะเบตเปลี่ยนจากฟลูอิโดเบต (เส้น กคจ.) มาเป็นเบตที่อยู่ด้านบน (จค.) นั้น อนุภาคก็สัดเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่ก่อนแล้ว จึงไม่ต้องยุ่งเสียพลังงานในการสัดช่องว่างให้เป็นระเบียบอีก และเมื่อได้มีการทดลองซ้ำในเบตเดิมอีก เส้นกราฟที่แสดงการเพิ่มความเร็วใหม่นี้จะเดินตามเส้นลดความเร็วในการทดลองครั้งแรก

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่จุด ค. ความต้านลวดจะเริ่มคงที่ไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วของของไหลเป็นเท่าใดก็ตาม ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากเบคที่อยู่กับที่ ความเร็วของของไหลที่จุด ค. จึงเป็นความเร็วต่ำสุดในการทำให้ เกิดฟลูอิดเซชัน ในการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้ เกิดฟลูอิดเซชัน ควรจะทดลองทั้งช่วงเพิ่มความเร็วและลดความเร็วของของไหล และใช้ ค่าเฉลี่ยของความต้านลวดที่ เกิดขึ้นมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต้านลวดและความเร็วของของไหลเพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้ เกิดฟลูอิดเซชัน

2.2.5 แนวความคิดและการพัฒนาการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชัน

เทคนิคทางด้านฟลูอิดเซชันได้เจริญก้าวหน้าขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในขณะที่เศรษฐกิจตกต่ำและเกิดวิกฤติการณ์ทางด้านพลังงานนั้น ประเทศต่าง ๆ ได้หันมาสนใจศึกษากันว่าการนำพลังงานมาใช้อย่างประหยัดและให้ผลคุ้มค่า ในปี ค.ศ. 1922 Firtz Winkler (19) ได้สร้างเครื่องมือผลิตก๊าซจากถ่านหินขนาดใหญ่ โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดเซชันขึ้นเป็นครั้งแรก การศึกษาค้นคว้า ส่วนใหญ่เพื่อหาข้อดีในการนำความร้อนที่สูง และพลังงานที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์

ในปี ค.ศ. 1960 NCB (National Coal Board) (13) ได้ศึกษาการนำถ่านหินที่ไปภายในครัวเรือนมาทำเป็นถ่านอบ (Carbonization) โดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดเซชัน ทำให้ไม่ เกิดควันในขณะเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาและทดลองพบว่าถ่านหินขนาด 1.6 - 6.4 มม. ความเร็วของอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.6 - 2.4 เมตร/วินาที ที่จุดหมุ่ของการเผาไหม้ 850 - 900 องศาเซลเซียส การเผาไหม้จะสมบูรณ์เมื่อร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ 30 ซึ่งจะมีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่ในถ่านประมาณร้อยละ 10

จากรายงานของ Bao Yi Lin (9) เกี่ยวกับการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่มีคุณภาพต่ำและความชื้นค่อนข้างสูง กล่าวว่า ถ้าจุดหมุ่ในช่วงเหนือเบคมีค่าต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้มีค่าต่ำด้วย ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ก็สามารถทำได้โดยการลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและเพิ่มจุดหมุ่ในบริเวณเหนือเบค ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 การป้อนถ่านลิกไนท์ที่เป็นเชื้อเพลิงคาร์บอนในระดับภายในเบค จะทำให้การเผาไหม้เกิดได้ดี และจุดหมุ่ภายในเบคค่อนข้างคงที่ ปริมาณคาร์บอนในเบคที่จุดต่าง ๆ ค่อนข้างคงที่ถ้าไม่ลุ่มอ ถ้าใช้ระบบลู่รูป้อนเชื้อเพลิงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ที่สุดป้อนจะมีค่าสูงสุดและจะมีค่าลดต่ำลง เมื่อห่างออกไปแต่ปริมาณก๊าซออกซิเจนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Kioxboe (18) ซึ่งได้ศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินคุณภาพต่ำเช่นเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 92-93 ที่ 900 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ถ่านหินขนาดไม่เกิน 2 มม. และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 1-1.4 เมตร/วินาที จากรายงานการทดลองได้อธิบายเพิ่มเติมว่านอกจากการลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและการเพิ่มอุณหภูมิที่บริเวณเหนือเบดจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นแล้ว การเผาไหม้ของถ่านในช่องเหนือเบดจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 3 วินาที ดังนั้นการที่จะทำให้การเผาไหม้ของถ่านในบริเวณเหนือเบดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ก็ต้องเพิ่มความสูงของคอลัมน์ให้มากพอด้วย การเผาไหม้ถ่านหินนั้นจะทำได้ยากถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า 650 - 700 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ จะช่วยให้การรักษาและการควบคุมอุณหภูมิได้ผลดีและผิดพลาดไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส

ในระยะหลังการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงมักจะมีมุ่งในด้านการพัฒนาและปรับปรุงแก้ปัญหาต่าง ๆ ในปี ค.ศ. 1980 Toshimasa Hirama (24,25) ได้ศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไอซ์เบดแบบ 2 ชั้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้มาก นอกจากนี้การเผาไหม้ของถ่านในชั้นที่ 2 จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงและประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังสามารถเติมสารบางอย่างเพื่อกำจัดกำมะถันในเชื้อเพลิงได้ ทำให้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เกิดขึ้นลดลง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทำด้วยเหล็กไร้สนิม การนำถ่านออกจากคอลัมน์ทำได้โดยการปรับระดับความสูงของท่อระบายถ่าน อุณหภูมิของการเผาไหม้อยู่ในช่วง 800 - 950 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ร้อยละ 98-99 ซึ่งสูงกว่าการเผาไหม้ในฟลูอิดไอซ์เบดแบบธรรมดาประมาณร้อยละ 4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 0.05 ซึ่งปกติแล้วจะมีค่าร้อยละ 0.2 ในการเผาไหม้ในฟลูอิดไอซ์เบดแบบธรรมดา

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเผาไหม้ซึ่งอธิบายออกมาอยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ (7, 8, 10, 22, 26) การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดและท่อฟ้าที่บรรจุอยู่ภายใน (10) Jodra (15, 16) ได้ศึกษาถึงลักษณะการจัดวางท่อในเบดในลักษณะต่าง ๆ เพื่อลดการเกิดฟองก๊าซ ทำให้อนุภาคภายในเบดมีการผสมและหมุนเวียนกันทั่วทั้งเบด การ

แก้ปัญหาต่าง ๆ และการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ การลดมลภาวะที่อาจจะเกิดขึ้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย (27) ในระยะหลัง ๆ ได้มีการใช้เทคนิคต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเช่น Rocoe (23) ได้ใช้เทคนิคในการดำรูปเพื่อบอกจุดหมุดของเชื้อเพลิงที่กำส้งเผาไหม้ ซึ่งให้ผลดี และมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามใช้เทคนิคทางฟลูอิดไดเซชันในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงซึ่งมาจากวัสดุเหลือใช้จากทางการเกษตร

2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคทางฟลูอิดไดเซชันกับเทคนิคอื่น ๆ พอสรุปได้ดังนี้

2.2.6.1 ข้อดี

1. จากคุณสมบัติที่เม็ดของแข็งมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย และสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous)
2. เม็ดของแข็งมีการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ทำให้จุดหมุดภายในเบตมีค่าคงที่เท่ากันทุกจุด
3. เนื่องจากมีการผสมของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ทำให้ระบบนี้เหมาะสมในกรณีที่มีการดูดหรือคายความร้อนปริมาณมาก ๆ ได้
4. อัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานสูง
5. ที่ความเร็วของของไหลสูง ๆ การทำงานของฟลูอิดไดเซชันเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบตที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความต้านลุดมีค่าน้อยกว่า

2.2.6.2 ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว อาจทำให้ระยะเวลาที่เม็ดของแข็งสัมผัสและผสมกับของไหลสั้นเกินไป เบตอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด แต่อาจจะแก้ไขได้โดยใช้เบตหลายชั้น
2. เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและภาชนะทำให้เกิดการสึกกร่อน เม็ดของแข็งมีขนาดเล็กลง
3. การทำงานของระบบให้ได้ผลมีข้อจำกัดซึ่งขึ้นกับลักษณะของตัวกระจายของไหล ชนิดและรูปร่างของเบต อัตราความเร็วของของไหลที่ใช้ ขนาดและชนิดของ เม็ดของแข็ง



บทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วยเครื่องมือหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 3-1 และ 3-2 ประกอบด้วยมอเตอร์ (Motor) (1) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice meter) (2) ฟลูอิดิซด์เบดคอลัมน์ (Fluidized bed column) (3) ไซโคลน (Cyclone) (4) ระบบป้อนวัตถุดิบ (Screw feeder) (5) เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple and Temperature controller) (6) (7) รายละเอียดของเครื่องมือที่สำคัญ ๆ มีดังนี้

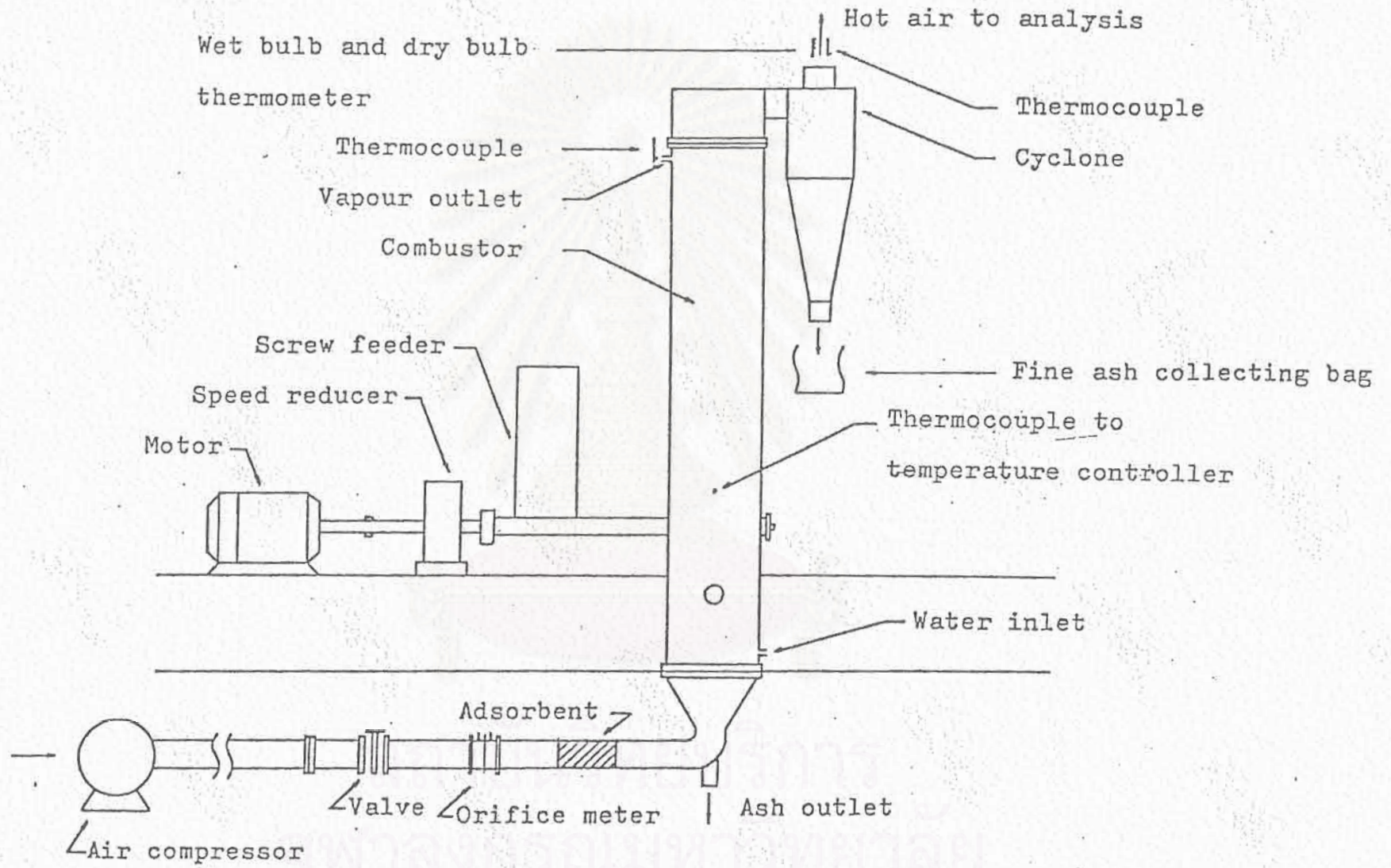
3.1.1 มอเตอร์ (Motor)

มอเตอร์ที่ใช้มีขนาด 2.2 แรงม้า เป็นแบบ 3 เฟส ใช้ขับเคลื่อนระบบส่งรอกให้หมุนเพื่อป้อนถ่านลิกไนท์เข้าสู่คอลัมน์

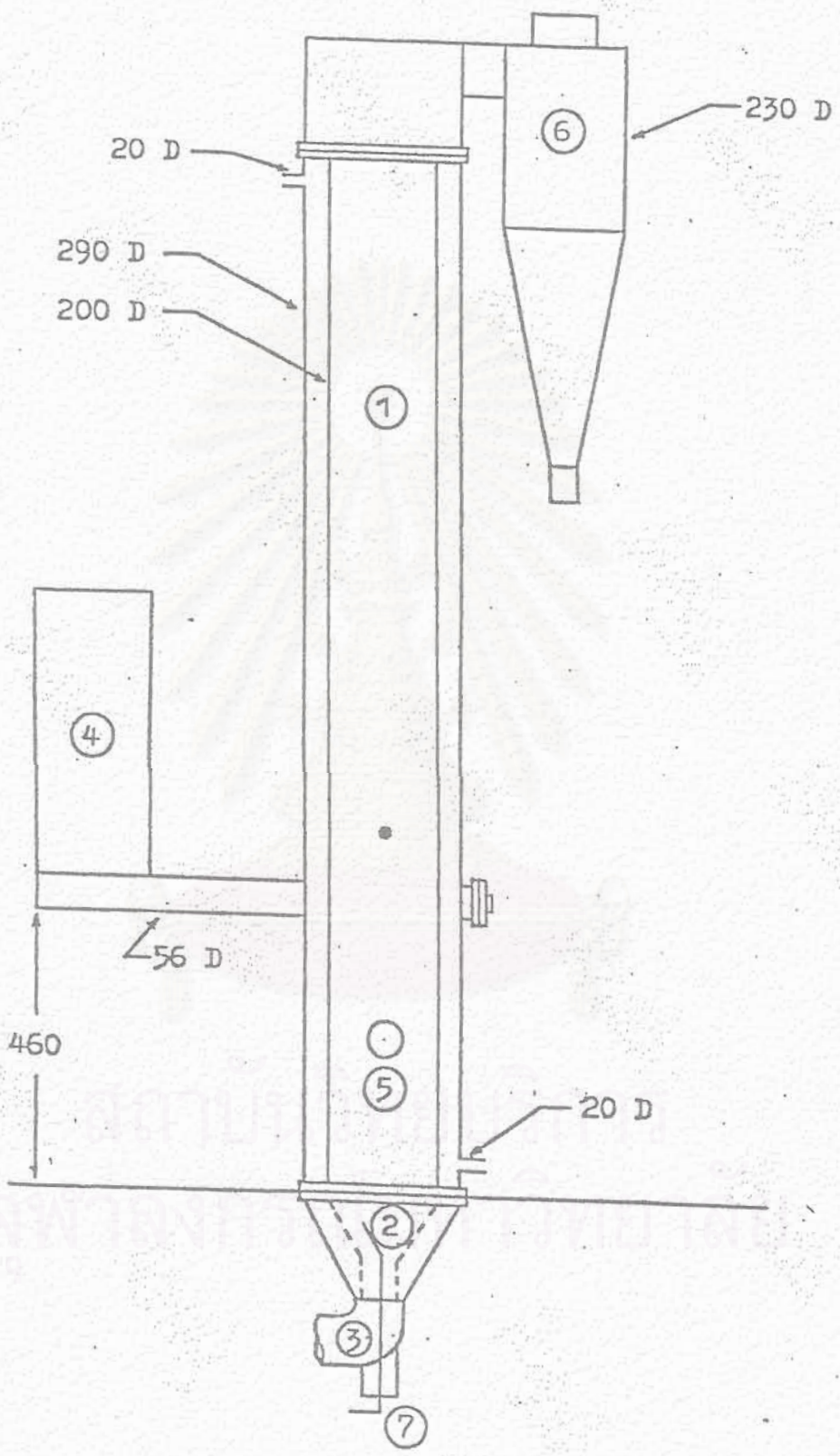
3.1.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice meter)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศมีบอลลิควาล์วควบคุมปริมาณการไหล ได้มีการเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศ (volume flow rate) ซึ่งวัดเป็นความแตกต่างของความดันที่ได้จากการวัดก่อนและหลังที่อากาศไหลผ่านออริฟิซมิเตอร์ หน่วยที่วัดเป็นความสูงที่แตกต่างกันของระดับน้ำ (Δh) กับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Air flow meter) ที่ได้มาตรฐาน ซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา

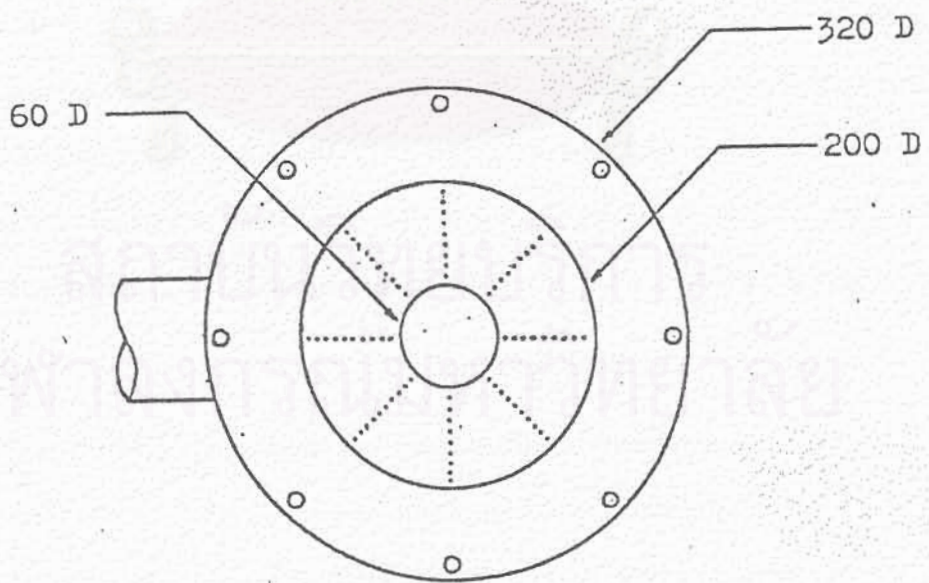
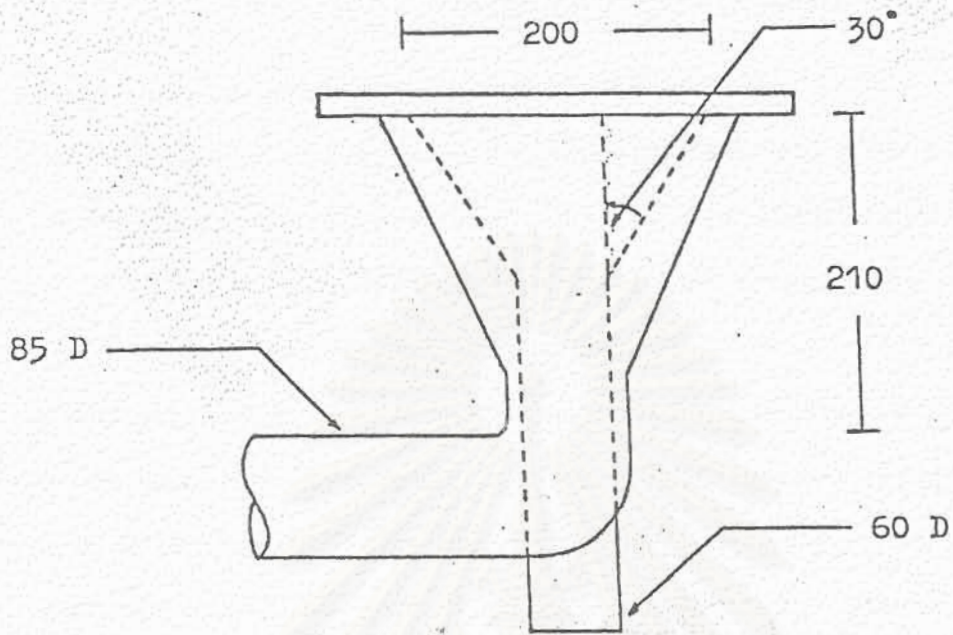
อากาศที่ใช้ได้มาจากเครื่องอัดอากาศขนาดใหญ่เข้ามาทางท่อขนาด 37.5 มิลลิเมตร แล้วจึงขยายออกเป็น 85 มิลลิเมตรต่อเข้ากับท่อทางด้านล่างของคอลัมน์ ภายในท่ออากาศดังกล่าวได้บรรจุสารดูดซับประเภทโมเลกุลาร์ซีฟที่ผลิตโดยบริษัท Union Carbide ไว้ เพื่อดูดซับน้ำที่มากพร้อมกับอากาศก่อนจะเข้าสู่คอลัมน์



รูปที่ 3-1 แสดงการติดตั้งและส่วนประกอบของระบบการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ในฟลูอิดไบล์เบด



รูปที่ 3-2 แสดงส่วนประกอบของเสาเข็มแบบฟลูอิดิตซ์เบด



รูปที่ 3-3 แสดงลักษณะของแม่กระจายลม

3.1.3 ฟลูอิดไรซ์เบดคอลัมน์ (Fluidized bed column)

รูปที่ 3-1 และ 3-2 แสดงถึงลักษณะของฟลูอิดไรซ์เบดคอลัมน์ ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ 2 ชั้น ชั้นในทำหน้าที่เป็นเตาเผาไหม้ ช่องว่างระหว่างคอลัมน์จะเป็นช่องทางให้น้ำไหลผ่านและรับความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยน้ำจะเข้าทางท่อที่อยู่ด้านล่างและออกทางท่อที่อยู่ด้านบน บริเวณท่อทางออกของน้ำที่อยู่ด้านบนติดตั้งเทอร์โมคอบเบิลเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำที่ได้ออก และที่บริเวณกลางคอลัมน์จะมีช่องสอดเทอร์โมคอบเบิลเพื่อวัดอุณหภูมิของการเผาไหม้ คอลัมน์ทั้ง 2 ชั้น ทำด้วยเหล็กเหนียว (1) เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ชั้นในที่เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้มีขนาด 200 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ชั้นนอก 290 มม. ความยาวของคอลัมน์ 1780 มม. ผิวด้านนอกของคอลัมน์หุ้มด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber) รุ่น อาร์พี-8 ทหนา 25 มม. ฉนวน 2 ชั้น ซึ่งทนความร้อนได้ถึงประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ส่วนกลางของคอลัมน์เป็นแผ่นกระจายลม (2) มีลักษณะเป็นรูปกรวย (รูปที่ 3-3) โดยให้อากาศผ่านจากทางด้านล่างขึ้นไป ทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงอยู่ในลักษณะฟลูอิดไลเซชัน ท่อทางที่ให้อากาศผ่านเข้าทางด้านล่างมีขนาด 85 มม. ส่วนล่างของแผ่นกระจายลมทำด้วยแผ่นโลหะไร้สนิม (Stainless steel) (3) เจาะรูพุ่มและมีท่อทางให้เตาไหลออกมาทางด้านล่างโดยไหลลงมาตามท่อขนาด 60 มม. (4) เป็นส่วนที่ป้อนอนุภาคเชื้อเพลิงเข้าสู่คอลัมน์ (Screw feeder) อนุภาคเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์โดยระบบลำที่หมุนโดยมอเตอร์ ส่วน (5) เป็นช่องสอดหัวเผา (Burner) และไปอยู่ลักษณะการเกิดฟลูอิดไลเซชันภายในคอลัมน์ (6) เป็นไซโคลนทำหน้าที่แยกเถ้าและก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากกัน และ (7) เป็นก้านกวาดเถ้าใช้กวาดเถ้าให้มีการเคลื่อนไหว

3.1.4 ไซโคลน (Cyclone)

เป็นอุปกรณ์ทำด้วยเหล็กซึ่งมีหน้าที่แยกเถ้าและก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากกัน โดยทางด้านบนของไซโคลนต้องเข้าที่ท่อขนาด 85 มม. สำหรับเป็นทางระบายก๊าซร้อน บริเวณทางด้านบนของไซโคลนติดตั้งเทอร์โมคอบเบิลเพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ และมีช่องเก็บตัวอย่างก๊าซร้อนดังกล่าวเพื่อไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบของก๊าซร้อน

3.1.5 ระบบป้อนวัตถุดิบ (Screw feeder)

เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยถังใส่วัตถุดิบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 210 x 350 มม. สูง 500 มม. ด้านล่างมีเกลียวสำหรับหมุนเพื่อพาเอาถ่านลิกไนท์เข้าสู่คอสมันน์โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้มู่เล่ย์ที่ครอบขนาดต่าง ๆ ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์

3.1.6 เครื่องวัดและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple and Temperature controller)

ใช้เครื่องวัดและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ RKC SERIES RE-96 ซึ่งสามารถวัดและควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในคอสมันน์ในช่วง 0-1000 องศาเซลเซียส โดยการลัดเทอร์โมคอปเปิลเข้าทางช่องเหนือช่องลัดหัวเผาและแล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมกับตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการไว้

3.2 เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

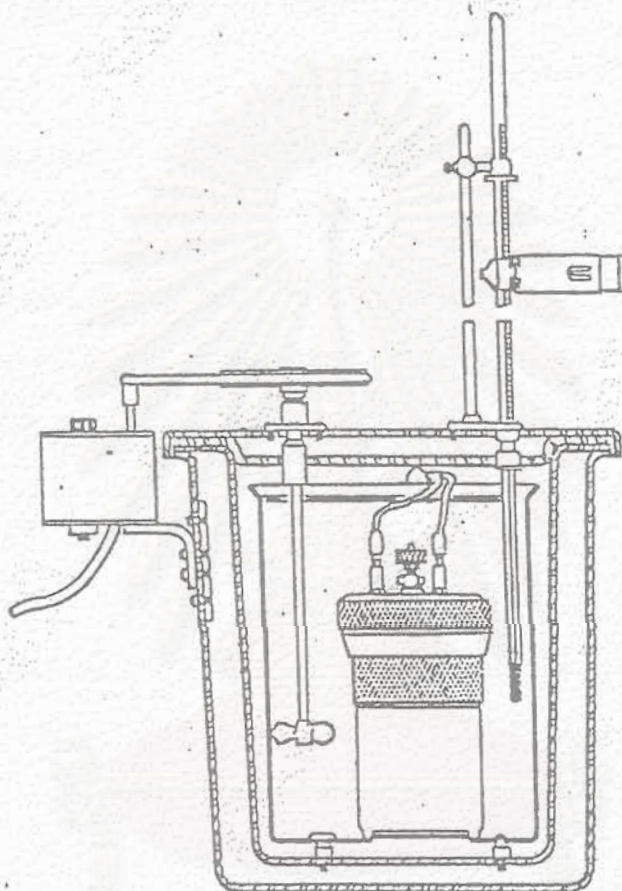
ในการวิจัยใช้เครื่องอัดอากาศ Broom Wade แบบ AC 41 ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 80 ลบ.ฟ./นาที ความดันสูงสุด 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว ทำในประเทศอังกฤษ เป็นเครื่องมือสำหรับอัดอากาศเพื่อใช้ทำให้ถ่านลิกไนท์เกิดฟลูอิดเซชันและช่วยในการเผาไหม้

3.3 บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

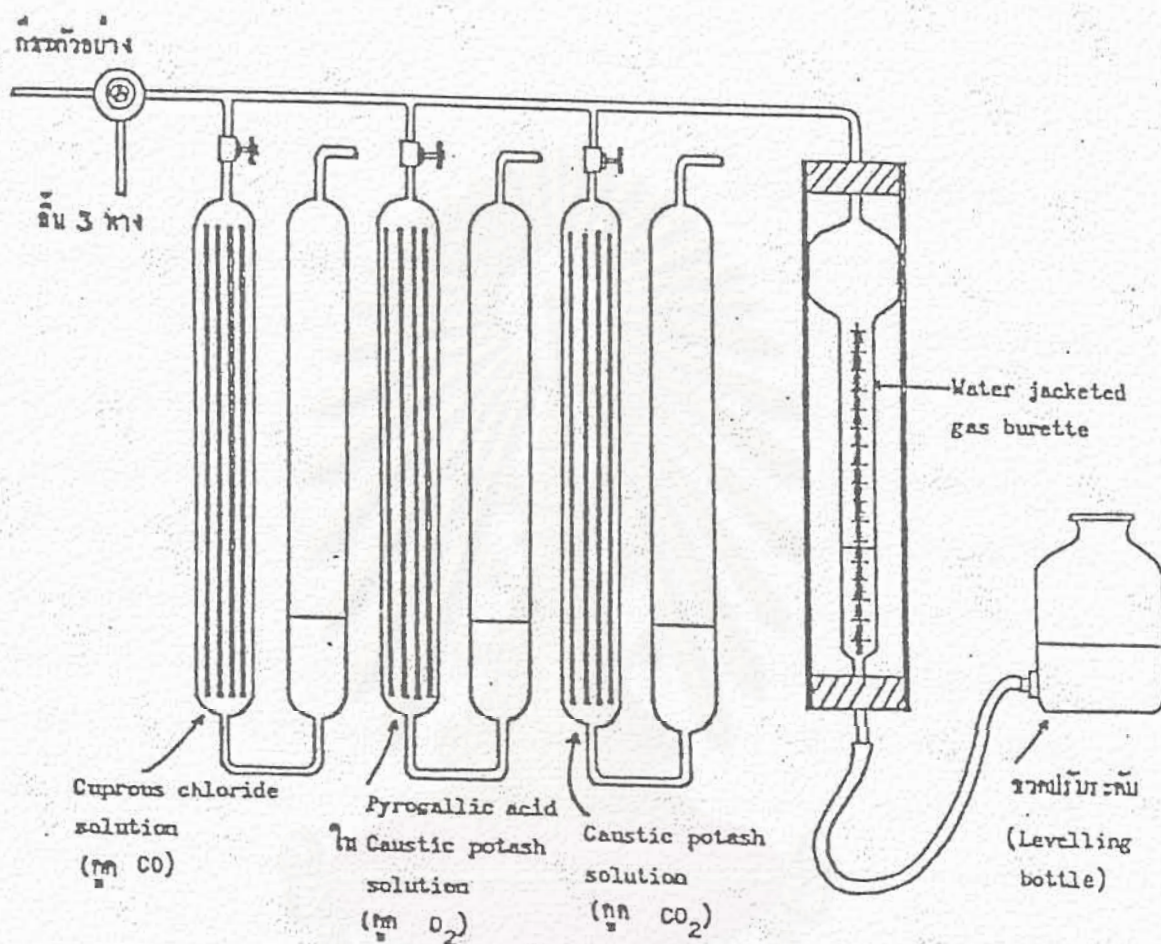
ในการวิจัยใช้ Bomb calorimeter ของบริษัท Parr Instrument Inc. ดังแสดงในรูปที่ 3-4 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าปริมาณความร้อนของสารต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องรวดเร็วและให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้

3.4 เครื่องมือออแลท (Orsat apparatus)

เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ใช้สำหรับวิเคราะห์หาส่วนประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ก๊าซที่จะทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนโดยปริมาตรได้แก่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



รูปที่ 3-4 บอมป์แคลอริมิเตอร์



รูปที่ 3-5 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมของก๊าซ (Orsat apparatus)

วิธีการทดลอง

4.1 การปรับปรุงเครื่องมือวัด

จากการทดลองชุดแรกเพื่อเผาไหม้ถ่านลิกไนท์พบว่าเกิดปัญหาต่าง ๆ ขึ้น จึงได้ทำการแก้ไขและติดตั้งอุปกรณ์บางส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้เครื่องมือวัดทำงานได้ดีขึ้นดังนี้

ก. เนื่องจากในตอนแรกใช้โรตารีเตอร์เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศพบว่าโรตารีเตอร์ที่ใช้มีขนาดเล็ก ยึดความสามารถสูงต่ำของโรตารีเตอร์ที่วัดได้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ปริมาณอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในคอลัมน์ทำให้เกิดฟลูอิโดเซชัน นอกจากนี้ขนาดของท่ออากาศซึ่งต่อจากเครื่องวัดอากาศมีขนาดเล็ก หลังจากต่อท่อเข้าโรตารีเตอร์แล้วจะต้องขยายขนาดของท่อเป็น 80 มิลลิเมตร การลดและเพิ่มขนาดของท่ออากาศทำให้ความดันลดเกิดขึ้นมาก ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงใหม่โดยใช้ท่ออากาศขนาด 80 มิลลิเมตร บาวเป็นเส้นตรงโดยตลอด ใช้บอลวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ และติดตั้งออร์ฟิตขนาดใหญ่เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศแทนโรตารีเตอร์ พร้อมกับทดลองเก็บค่าอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านออร์ฟิตมิเตอร์กับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ได้มาตรฐาน

ข. เนื่องจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง เครื่องมืออาจเกิดการชำรุดเสียหายได้ง่าย ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายระหว่างการใช้งานจึงได้มีการเชื่อมรอยรั่วต่าง ๆ ที่ผนังด้านในและด้านนอกของคอลัมน์

ค. เนื่องจากฉนวนที่หุ้มคอลัมน์มีความสำคัญต่ออุณหภูมิภายในเบตมาก จึงได้เปลี่ยนฉนวนหุ้มคอลัมน์จากใยแก้วเป็นเซอรัรัมิคไฟเบอร์ รุ่น อาร์ที-8 หนา 25 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น ซึ่งทนความร้อนได้ถึงประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส

ง. ติดตั้งปล่องควันโดยต่อท่อจากไซโคลนเพื่อระบายควันและก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ออกไป โดยเฉพาะในช่วงแรก ๆ ของการเผาไหม้จะเกิดควันและกลิ่นซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

จ. ติดตั้งมู่เล่ย์ที่รอบขนาดต่าง ๆ เพื่อปรับอัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ให้ได้ตามความเหมาะสม โดยติดตั้งระบบมาตรฐานแบบ 2 ชั้น เพื่อความเหมาะสมในการใช้มู่เล่ย์ที่รอบขนาดเล็ก

ฉ. ในการทดลองจุดเตาเพื่อเผาไหม้ถ่านลิกไนท์และทดสอบการทำงานของคอกสัมนั้นพบว่า เมื่อหยุดการทดลองจะเกิดสะเก็ดรูปกรวยรอบมู่บริ เวลแผ่นกระจายลม สักขณะดังกล่าวเกิดจากการมีน้ำจำนวนหนึ่งผ่านเข้ามาในคอกสัมนั้นพร้อมกับอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ น้ำจำนวนดังกล่าวทำให้ถ่านลิกไนท์ที่มู่รอบ ๆ ตะแกรงบริ เวลแผ่นกระจายลมเปิบกและรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ถ่านลิกไนท์บริ เวลดังกล่าวไม่เกิดฟลูอิโดเซชันและเกิดเป็นสะเก็ดในที่สุด จึงได้ทำการปรับปรุงใหม่โดยทำระบบดูดฝุ่นน้ำเพื่อลดปริมาณน้ำที่มีมาจากเครื่องอัดอากาศ ซึ่งจะพบมากในช่วงแรกที่เปิดเครื่องอัดอากาศ ขณะที่เริ่มจุดเตาก็จะมีการอุ่นอากาศภายในท่ออากาศให้ร้อนขึ้นด้วย ทำให้ถ่านลิกไนท์ติดไฟได้ดีขึ้น หลังจากนั้นถ่านลิกไนท์ถูกติดไฟแล้วก็จะไม่อุ่นอากาศภายในท่ออากาศ

ช. ติดตั้งก้านกวาดเข้าชั้นภายในคอกสัมนั้น ก้านกวาดเข้าดังกล่าวทำด้วยเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม. วางอยู่ในแนวตั้งฉากจากส่วนล่างสุดของคอกสัมนึงถึงบริเวณเหนือแผ่นกระจายลมเล็กน้อย (รูปที่ 3-2) ใช้กวนเบตเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดสะเก็ดซึ่งอาจจะเกิดขึ้นมากในช่วงแรกของการจุดเตา นอกจากนี้ยังช่วยให้ถ่านลิกไนท์มีการเคลื่อนไหวและไม่อุดรูของตะแกรง

ฅ. ติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ โดยการล่อเทอร์โมคอบเปิดไว้ที่ช่องล่อเหนือช่องล่อหัวเผา (รูปที่ 3-1) การควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยการปิดเปิดการทำงานของมอเตอร์ที่จะไปหมุนลักรูเพื่อป้อนถ่านลิกไนท์เข้าสู่คอกสัมนั้น

ฉ. ติดตั้งท่อพ่นน้ำเข้าสู่คอกสัมนั้น (รูปที่ 3-1) เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขณะเกิดการเผาไหม้ การบังคับอัตราการไหลของน้ำใช้บอลลิวาล์วเป็นตัวควบคุม

4.2 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเบต

ก. การหาขนาดของถ่านลิกไนท์

นำถ่านลิกไนท์มาบดให้มีขนาดเล็กลงแล้วนำไปร่อนเพื่อคัดขนาด 1-2 มม. โดยการใส่ตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 และ 2 มม. ถ่านลิกไนท์ที่สามารถลอดผ่านตะแกรง



ขนาด 2 มม. แต่ไม่ต่ำกว่าขนาดตะแกรงขนาด 1 มม. จะเป็นขนาดของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลอง

ข. สัดล่วนช่องว่าง

บรรจุถ่านลิกไนท์ลงในกระบอกตวงแล้ววัดปริมาตรที่อ่านได้ เติมน้ำจำนวนหนึ่งซึ่งทราบปริมาตรลงไปจนถึงระดับผิวหน้าของถ่านลิกไนท์ นำค่าที่วัดไปคำนวณหาสัดล่วนช่องว่าง (ภาคผนวกที่ 1) เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็วต่ำสุด ในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ค. การหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่า (d_p)

นำถ่านลิกไนท์จำนวนหนึ่งที่ทราบปริมาตรแน่นอนมานับจำนวนอนุภาค นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่าถ่านลิกไนท์ (ภาคผนวกที่ 1) เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ง. ความหนาแน่นของอนุภาค

นำถ่านลิกไนท์จำนวนหนึ่งมาชั่งหาน้ำหนักและวัดปริมาตรโดยไม้ร่วรวมปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาค นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่น (ภาคผนวกที่ 1)

จ. ความชื้น

ชั่งถ่านลิกไนท์ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานประมาณ 4 ชั่วโมง นำออกมาชั่งแล้วอบใหม่จนได้น้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเป็นร้อยละของปริมาณความชื้น (ภาคผนวกที่ 1)

ฉ. สัรระเหย

ชั่งถ่านลิกไนท์ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปอบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำไปชั่งอีกครั้ง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสัรระเหย (ภาคผนวกที่ 1)

ช. เถ้า

นำถ่านลิกไนท์ที่ทราบน้ำหนักใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำไปเผาด้วยตะเกียงเบนเช่นจนหมดควัน แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นานประมาณ 4 ชั่วโมง

นำออกมาข้างแล้วไปเผาไหม้จนได้น้ำหนักคงที่ น้ำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณเผา

ณ. การบ้อนคงตัว

นำค่าที่ได้จากการคำนวณหาปริมาณความชื้น สำหรับเผาและนำมาคำนวณหาปริมาณการบ้อนคงตัว

ญ. คุณค่าทางความร้อน (Heating value)

ทำการทดลองหาคุณค่าทางความร้อนโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งจะหา

- 1) ปริมาณความร้อนเทียบเท่า (energy equivalent) ของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ จากการทดลองหาปริมาณความร้อนของกรดเบนโซอิกที่ทราบค่าแน่นอน
- 2) คุณค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลอง
- 3) คุณค่าทางความร้อนของถ่านที่ออกจากคอกสันน์และจากไซโคลนในแต่ละการทดลอง

ฉ. ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum fluidization velocity)

ก่อนทำการทดลองต้องเทียบค่าอัตราการไหลของอากาศจากออร์ฟิตที่สร้างขึ้นใหม่กับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ได้มาตรฐาน

ในการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน อาศัยการวัดค่าความดันตกที่เกิดขึ้น เนื่องจากอากาศไหลผ่านเบดโดยมีชั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) ให้อากาศไหลผ่านคอกสันน์เปล่าด้วยอัตราเร็วตั้งแต่ $0.06 \text{ m}^3/\text{นาท}$ ถึง $0.36 \text{ m}^3/\text{นาท}$ ตามลำดับ พร้อมกับวัดค่าความดันตกที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นกระจายของไหลกับบริเวณเหนือเบดในแต่ละช่วงด้วยมาโนมิเตอร์ ค่าความดันตกที่วัดได้จะเป็นความดันตกที่เกิดขึ้นจากอากาศไหลผ่านคอกสันน์ (ภาคผนวกที่ 1)

- 2) บรรจุถ่านหินลิกไนท์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. ลงในคอกสันน์สูง 10 ซม. แล้วให้อากาศไหลผ่านคอกสันน์ด้วยอัตราเร็ว $0.06 \text{ m}^3/\text{นาท}$ ถึง $0.36 \text{ m}^3/\text{นาท}$ พร้อมกับวัดค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงด้วยมาโนมิเตอร์

3) นำค่าความดันสถที่วัดได้ในข้อ 2 และ ข้อ 1 ในแต่ละช่วงมาลบกันจะได้ค่าความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านเบด

4) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่ให้บรรจุถ่านลิกไนท์ลงในคอลัมน์ให้มีความสูง 13 และ 16 ซม. ตามลำดับ วัดค่าความดันสถที่เกิดขึ้นแล้วนำมาคำนวณหาค่าความดันสถที่เกิดจากการไหลของอากาศผ่านเบดที่ระดับความสูงต่าง ๆ

4.3 การเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไอส์เบดแบบต่อเนื่อง

ก. การเตรียมการก่อนการเผาไหม้

1) วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature, Tw) และ กระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature, Td) ของอากาศที่ใช้ในการทดลอง

2) บรรจุถ่านลิกไนท์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. ลงในคอลัมน์จนเต็มถึงช่องลอคหัวเผาแล้วจุดไฟเพื่ออุ่นเตาและเผาผิวหน้าของเบดโดยใช้ก๊าซหุงต้ม (L.P.G.) ในขณะที่เดียวกันก็เปิดวาล์วให้อากาศไหลผ่านเบดเพียงเล็กน้อย รอจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส ถึงดับไฟที่หัวเผาและนำหัวเผาออกจากคอลัมน์พร้อมกับปิดช่องลอคหัวเผาด้วยแผ่นไม้ก้ำ

ข. วิธีการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไอส์เบด

1) หลังจากทีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 700 องศาเซลเซียสแล้ว ค่อย ๆ เปิดวาล์วให้อากาศไหลผ่านเบดมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งถึงความเร็วของอากาศที่ต้องการ (1.55 - 2.0 เท่า ของความเร็วที่ต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอส์เบด) ขณะเดียวกันก็เปิดช่องนำแก๊สออกจากคอลัมน์

2) หลังป้อนถ่านลิกไนท์เข้าไปในคอลัมน์โดยเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ และตั้งอุณหภูมิของการเผาไหม้ตามที่ต้องการ เปิดช่องนำแก๊สออกจากคอลัมน์เป็นครั้งคราว ขณะทำการทดลอง อาจจะกวาดเบดด้วยก้านกวาดเต้าโตบ้างเพื่อให้เบดมีการเคลื่อนไหวไม่เกาะรวมตัวกัน จากนั้นก็ค่อย ๆ เปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้าสู่คอลัมน์ทีละน้อย เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว รอจนกระทั่งอุณหภูมิของการเผาไหม้คงที่และการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนืองถึงค่อย ๆ เปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้าสู่คอลัมน์อีกจนถึงค่าที่ต้องการ ถ้าหากเปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้า

ตู้คอนกรีตเร็วเกินไป น้ำจะดูดกลืนความร้อนจากการเผาไหม้ทำให้จุดหลอมลดลงอย่างรวดเร็ว และอาจจะทำให้ไฟดับได้ ขณะที่ป้อนถ่านลิกไนต์เข้าไปทำให้เกิดการเผาไหม้จุดหลอมก็จะสูงขึ้น เมื่อจุดหลอมสูงขึ้นจนถึงค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมจุดหลอมก็จะตัดกระแสไฟทำให้หม้อไอน้ำหยุดทำงาน ถึงแม้จะมีการป้อนถ่านลิกไนต์เข้าตู้คอนกรีตและจุดหลอมของการเผาไหม้ก็จะไม่สูงขึ้นอีก เมื่อปล่องทิ้งไอน้ำสักครู่จุดหลอมของการเผาไหม้จะลดต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมจุดหลอมก็จะบังคับให้หม้อไอน้ำทำงานขึ้นใหม่อีกจนกระทั่งถึงจุดหลอมของการเผาไหม้ที่ตั้งไว้ หม้อไอน้ำก็จะหยุดทำงานอีกเป็นเช่นนี้เรื่อยไป การควบคุมจุดหลอมจึงอาศัยการบังคับการทำงานหรือการปิดเปิดหม้อไอน้ำที่ละไปหมุนระบบลิกไนต์เข้าตู้คอนกรีตโดยผ่านเครื่องควบคุมจุดหลอม ในการทดลองจะต้องรอจนการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่จุดหลอมของการเผาไหม้และอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ

3) เริ่มจับเวลาที่ทำการทดลองเผาไหม้บ้างต่อเฟือง พร้อมกับวัดจุดหลอมของไอน้ำที่ออกจากคอนกรีต จุดหลุมกระเปาะเปือกและจุดหลุมกระเปาะแห้งของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ พร้อมกับวัดอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยเครื่องมือออกแลท

4) เมื่อการเผาไหม้สิ้นสุดลงก็เฝ้าเก็บที่ได้จากการเผาไหม้ที่ออกจากคอนกรีตและไซโคลนไปยังน้ำหนัก พร้อมกับนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนและคุณค่าทางความร้อนและคำนวณหาอัตราการป้อนถ่านลิกไนต์ที่ใช้

4.4 สภาวะในการเผาไหม้

ในแต่ละการทดลองจะมีตัวแปรที่พิจารณา คือ จุดหลอมของการเผาไหม้และอัตราการไหลของอากาศหรือความเร็วของอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงสภาวะที่กำหนดขึ้นในการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไบท

อุณหภูมิของการเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาที)	ความเร็วของอากาศ (ชม./วินาที)
800	1.4333	76.08
	1.5733	83.16
	1.7167	91.16
	1.8500	98.20
850	1.4333	76.08
	1.5733	83.16
	1.7167	91.12
	1.8500	98.20
900	1.4333	76.08
	1.5733	83.16
	1.7167	91.12
	1.8500	98.20
950	1.4333	76.08
	1.5733	83.16
	1.7167	91.12
	1.8500	98.20

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ผลของการหาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์

ถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากแหล่งแม่ต๊อบ อ.งาว ส.ลำปาง มีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ สีดำ หลังจากที่ได้ทำการบดและร่อนแยกขนาดแล้วก็ได้เก็บไว้เป็นอย่างดี เพื่อให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดลองและการคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์ (wet basis)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	1.5
ความชื้น (ร้อยละ)	23.00
ค่าระเหย (ร้อยละ)	32.61
เถ้า (ร้อยละ)	10.38
คาร์บอนคงตัว (ร้อยละ)	34.01
ปริมาณซิลเฟอร์ (ร้อยละ)	0.7263
คุณค่าทางความร้อน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4,614.85
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	1.1985
สัดส่วนช่องว่าง (ϵ)	0.4535
ความเป็นทรงกลมเทียบเท่า (ϕ_s)	0.77
เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่า (มิลลิเมตร)	1.35

เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลองกับถ่านลิกไนท์จากแหล่งต่าง ๆ ตามตารางที่ 2-2 พบว่า มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงปานกลาง ปริมาณสารระเหยมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งอื่นคืออยู่ในช่วงร้อยละ 31-39 บก.วันแห้งลึและแห้งลึดิน ซึ่งมีปริมาณสารระเหยค่อนข้างต่ำกว่าแหล่งอื่น ๆ คือมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 26 แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวและซิลเฟอร่าต่ำกว่าแหล่งอื่นบก.วันแห้งแม่ดิน ซึ่งมีปริมาณซิลเฟอร่าร้อยละ 0.71 ปริมาณแท่งน้ำมันมีค่าสูงมากกว่าแหล่งอื่น ๆ ทั้งหมด ส่วนคุณค่าทางความร้อนมีค่าต่ำกว่าแหล่งอื่นบก.วันแห้งลึดินเพียงแห่งเดียว

5.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

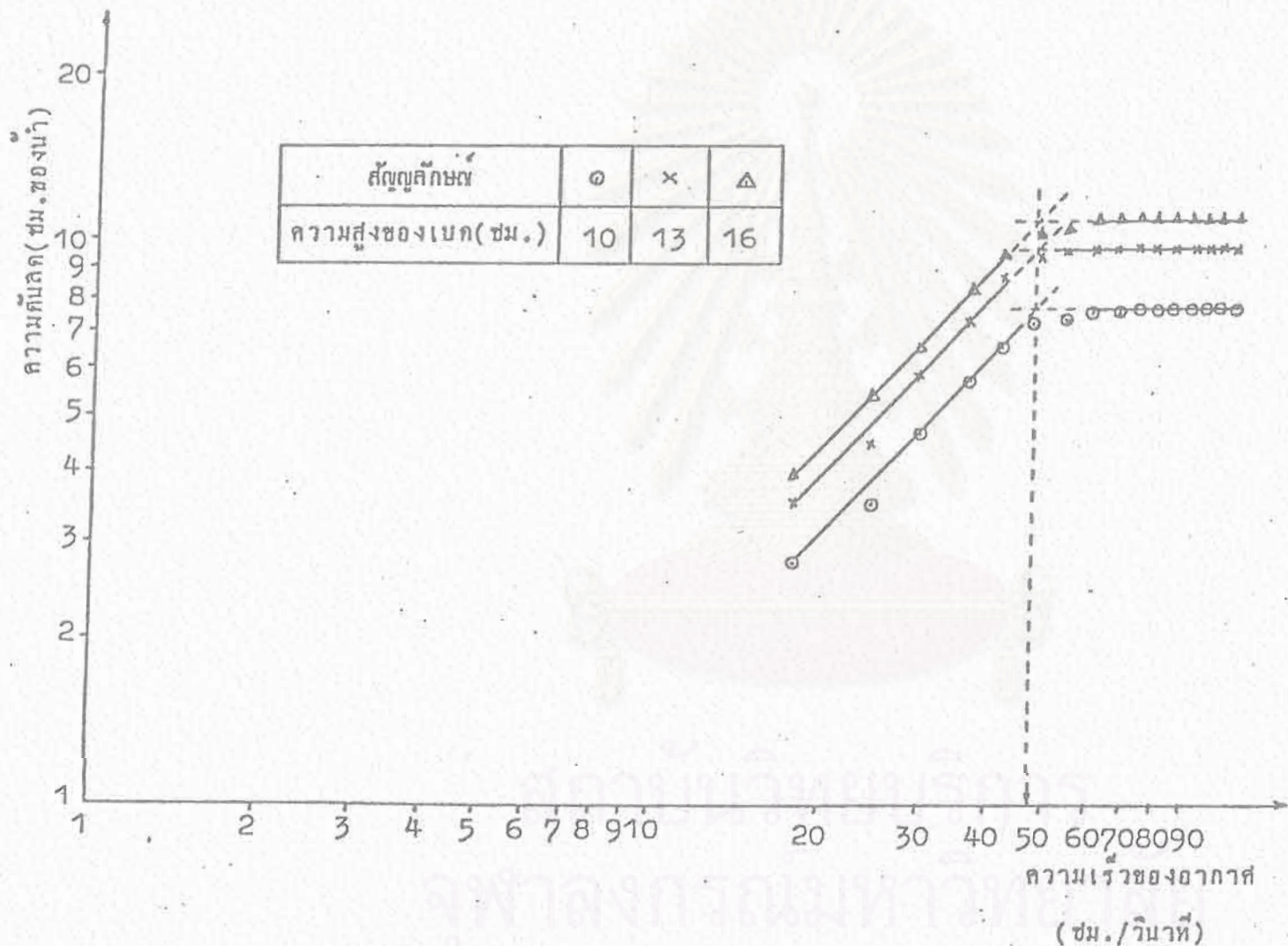
จากการทดลองให้อากาศไหลผ่านเบดที่ความสูงต่าง ๆ ด้วยอัตราเร็วต่าง ๆ กันแล้ววัดความดันสถิตที่ก่อกำเนิดขึ้นได้ผลดังแสดงในภาคผนวกที่ 4 ผลการทดลองนำไปวาดกราฟเพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ดังรูปที่ 5-1 จากกราฟจะเห็นว่าที่ความสูงของเบดต่าง ๆ กัน ค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีค่าเฉลี่ยประมาณ 49 ซม./วินาที และจากคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลองได้มีการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันตามสมการ (2-7) ดังภาคผนวกที่ 1 พบว่ามีค่า 47.29 ซม./วินาที ค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันทั้ง 2 ค่าต่างกันประมาณร้อยละ 3.49 ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันโดยการทดลองเป็นค่าเปรียบเทียบ

5.3 ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดเบด

ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในสภาวะต่าง ๆ ตามตารางที่ 4-1 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-2 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ได้แก่ อัตราส่วนร้อยละของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือออกแก๊ส อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอและอัตราส่วนร้อยละประสิทธิภาพของการเผาไหม้ ที่ความเร็วของอากาศ 76.08, 83.16, 91.12 และ 98.20 ซม./วินาที ตามลำดับ ตารางที่ 5-3 ถึง 5-5 เป็นตารางที่แสดงผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์เช่นเดียวกัน แต่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากค่าต่าง ๆ ที่สำคัญในตารางที่ 5-2 ถึง 5-5 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อน

ถ่านหินที่ อัตราส่วนร้อยละของแก๊สที่ออกจากไซโคลน อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศ
 ที่มากเกินพอ อัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้กับความเร็วยของอากาศ ดัง
 แสดงในกราฟรูปที่ 5-2 ถึง 5-5 ตามลำดับ และกราฟรูปที่ 5-6 แสดงความสัมพันธ์
 ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้ กับอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศ
 ที่มากเกินพอ

ประสิทธิภาพของการเผาไหม้หาได้จากค่าพารามิเตอร์ความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจริง
 โดยการหักค่าทางความร้อนของแก๊สที่ออกจากคองสันนี้ ค่าพารามิเตอร์ความร้อนของแก๊สที่ออกจาก
 ไซโคลนและค่าพารามิเตอร์ความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออก เทียบกับปริมาณความร้อนที่
 ป้อนเข้าสู่ระบบซึ่งอาจจะคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละ ดังแสดงในรูปที่ 1 ภาคผนวกที่ 6



รูปที่ 5-1 แสดงการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ตารางที่ 5-2 ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

การทดลอง ที่	ความเร็วของ อากาศ		อัตราการป้อน ถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาที)	ปริมาณอากาศ ที่มากเกินไป (อัตราส่วน ร้อยละ)	ปริมาณก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ (อัตราส่วนร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ของการเผาไหม้ (อัตราส่วน ร้อยละ)	ประสิทธิภาพความ ร้อนที่นำไปใช้ ประโยชน์ (อัตราส่วนร้อยละ)
	u (ชม./ วินาที)	$\frac{U}{Umf}$			ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	ก๊าซออกซิเจน	ก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์		
1.	76.08	1.55	125.0	71.53	8.0	11.2	0.8	66.64	11.20
2.	83.16	1.70	149.66	74.77	8.4	11.4	0.5	76.86	9.42
3.	91.12	1.85	165.62	86.21	8.6	11.6	0.4	81.75	8.60
4.	98.20	2.00	174.70	81.77	8.6	11.4	0.2	83.77	8.24

ตารางที่ 5-3 ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

การทดลอง ที่	ความเร็วของ อากาศ		อัตราการป้อน ถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาที)	ปริมาณอากาศ ที่มากเกินพอ (อัตราส่วน ร้อยละ)	ปริมาณก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ (อัตราส่วนร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ของการเผาไหม้ (อัตราส่วนร้อยละ)	ประสิทธิภาพ ความร้อนที่นำไป ใช้ประโยชน์ (อัตราส่วนร้อยละ)
	u (ชม. / วินาที)	$\frac{U_c}{U_{mf}}$			ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	ก๊าซออกซิเจน	ก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์		
1.	76.08	1.55	150.50	58.90	9.0	10.0	0.7	74.90	9.36
2.	83.16	1.70	156.63	66.87	8.8	10.4	0.6	79.86	9.06
3.	91.12	1.86	174.49	86.57	8.8	11.6	0.2	83.25	8.30
4.	98.20	2.00	180.80	90.13	9.0	11.8	0.2	84.10	8.24



ตารางที่ 5-4 ผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

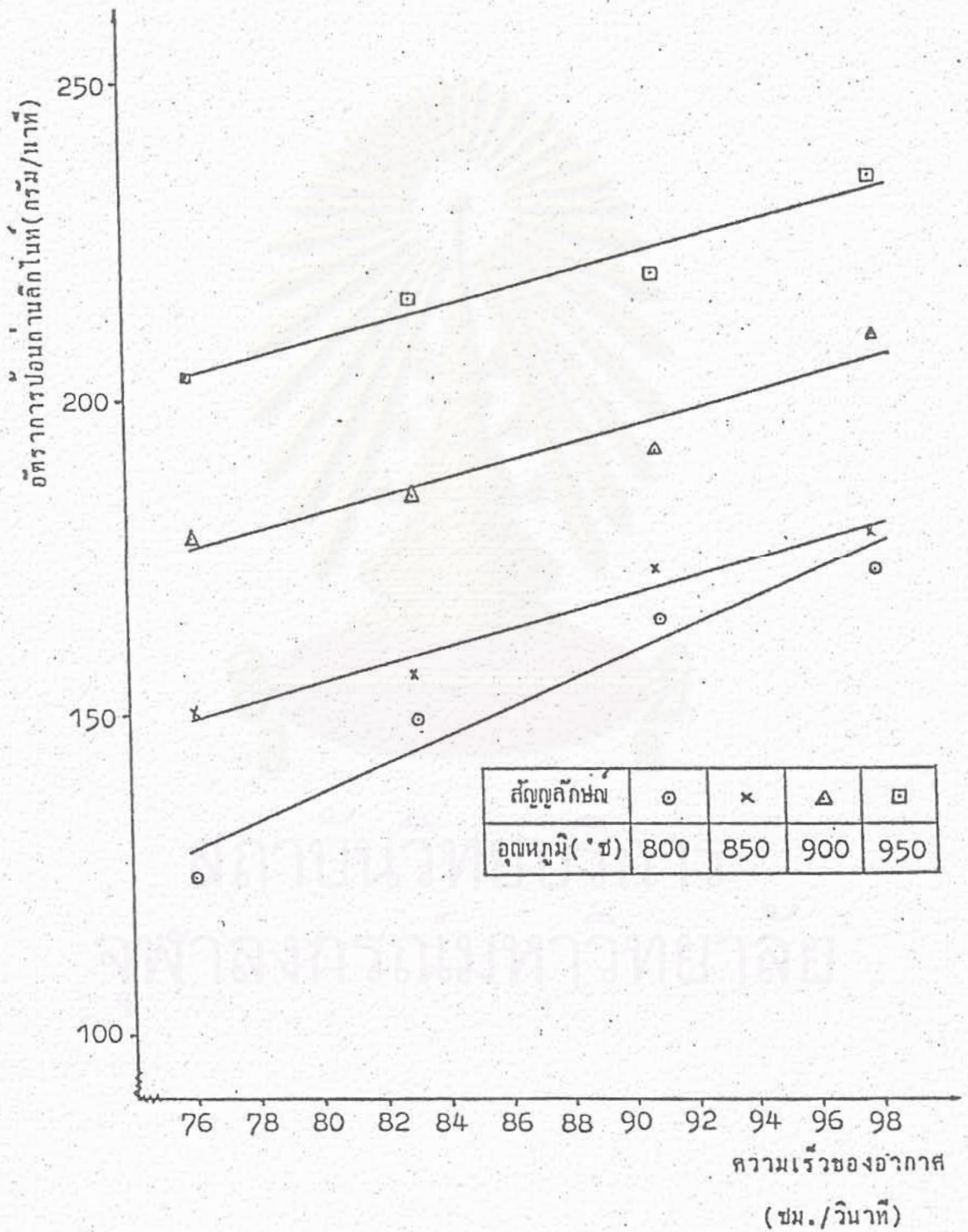
การทดลอง ที่	ความเร็วของ อากาศ		อัตราการป้อน ถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาที)	ปริมาณอากาศ ที่มากเกินพอ (อัตราส่วน ร้อยละ)	ปริมาณก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ (อัตราส่วนร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ของการเผาไหม้ (อัตราส่วนร้อยละ)	ประสิทธิภาพความ ร้อนที่นำไปใช้ ประโยชน์ (อัตราส่วนร้อยละ)
	u (ชม./ วินาที)	$\frac{U}{Umf}$			ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	ก๊าซออกซิเจน	ก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์		
1.	76.88	1.55	179.00	89.18	8.2	12.0	0.8	78.30	8.07
2.	83.16	1.70	185.79	97.35	8.6	12.0	0.6	85.10	7.90
3.	91.12	1.86	193.26	101.38	8.8	12.2	0.2	87.04	7.75
4.	98.20	2.60	212.02	103.58	9.0	12.2	0.2	89.57	7.17

041181

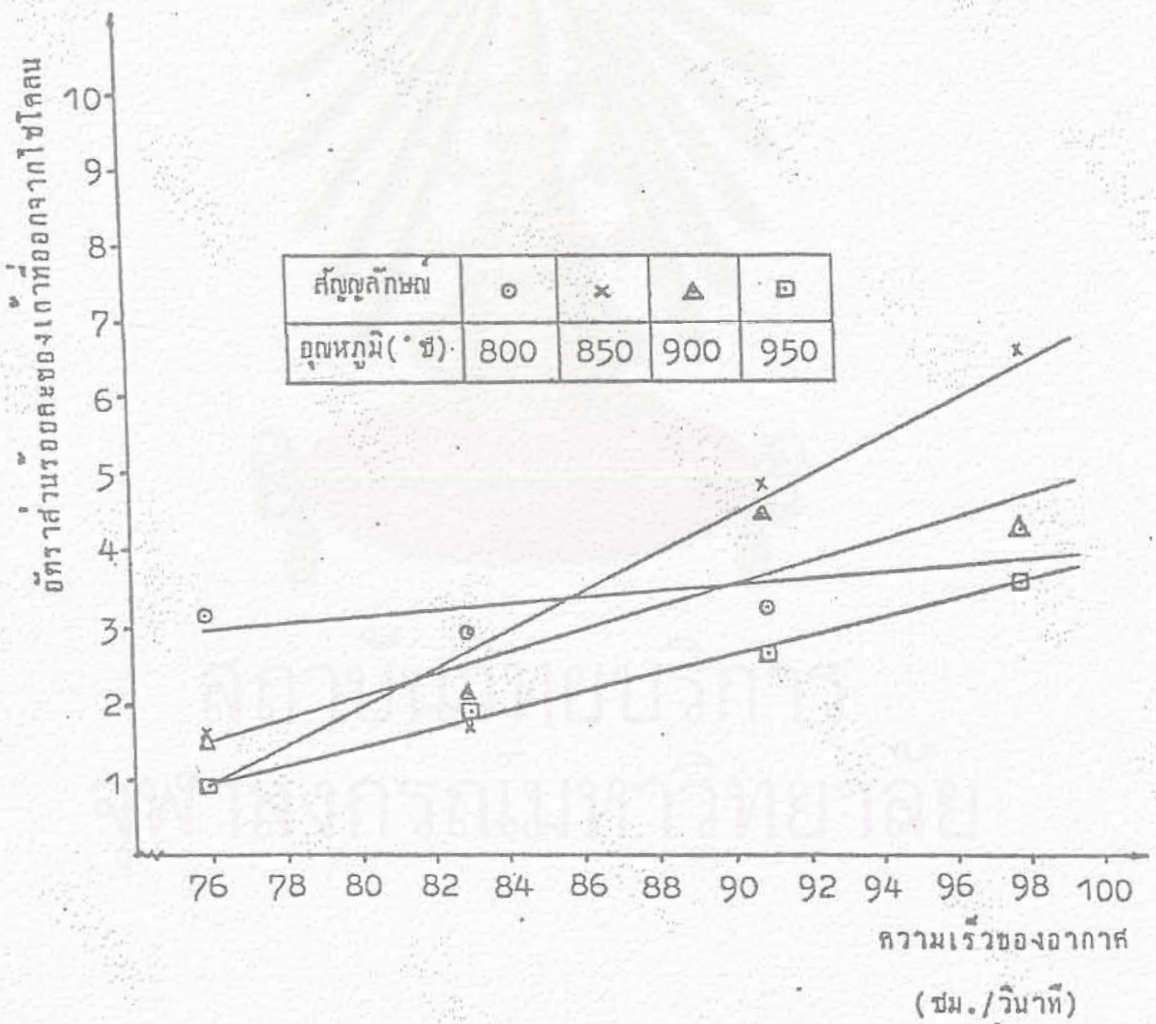
สถาบันวิจัยปฐพีวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-5 ผลการทดลองเผาไหม้ด้านลิแกไนท์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

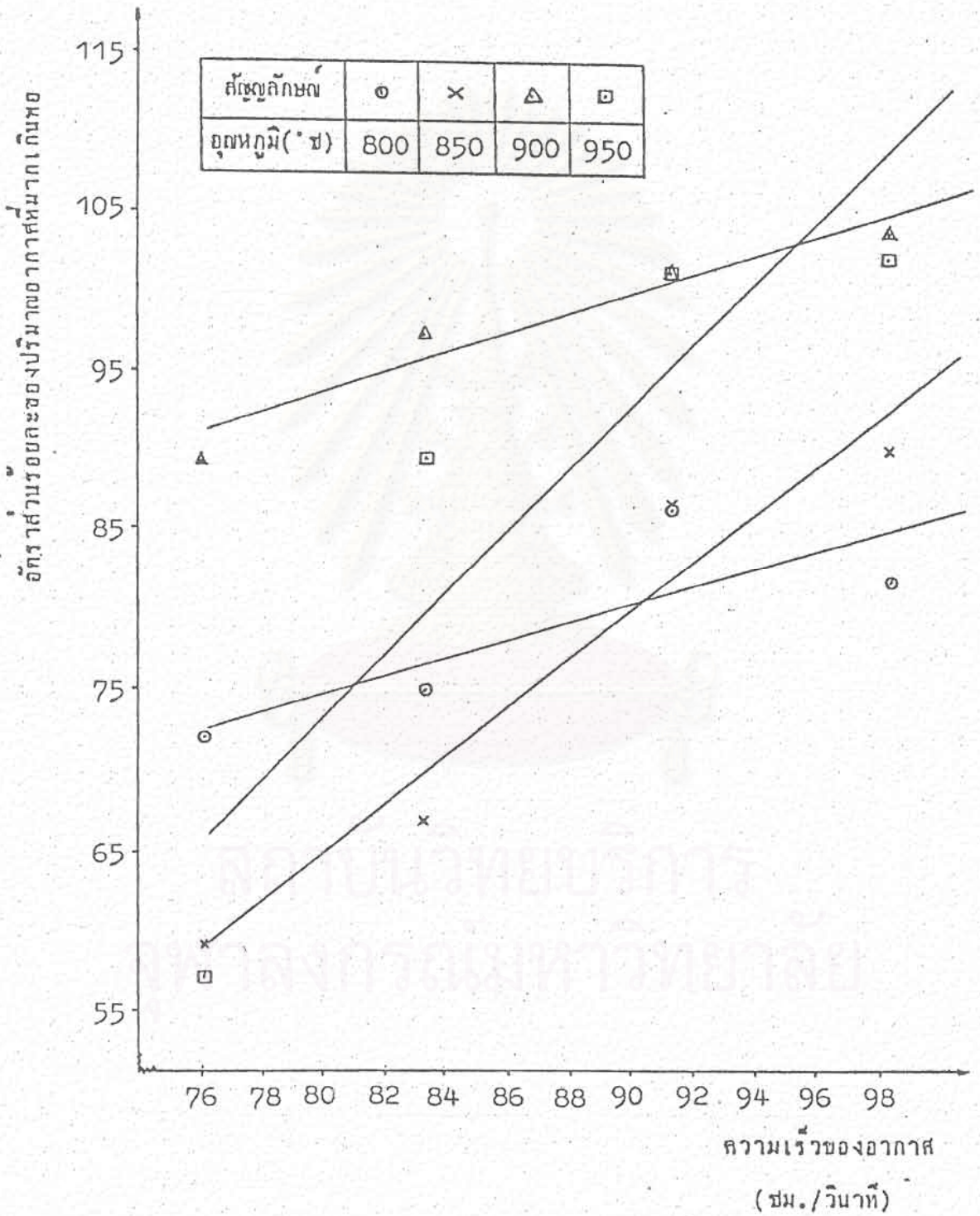
การทดลอง ที่	ความเร็วของ อากาศ		อัตราการป้อน ด้านลิแกไนท์ (กรัม/นาท)	ปริมาณอากาศ ที่มากเกินพอ (อัตราส่วน ร้อยละ)	ปริมาณก๊าซที่ออกจากคอลัมน์ (อัตราส่วนร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ของการเผาไหม้ (อัตราส่วนร้อยละ)	ประสิทธิภาพ ความร้อนที่นำไป ใช้ประโยชน์ (อัตราส่วนร้อยละ)
	u (ชม. / วินาที)	$\frac{U}{U_{mf}}$			ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	ก๊าซออกซิเจน	ก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์		
1.	76.08	1.55	204.00	57.14	8.8	10.2	0.8	79.09	7.38
2.	83.16	1.70	216.74	89.52	8.8	11.8	0.5	85.01	7.00
3.	91.12	1.86	221.65	100.94	8.8	12.2	0.2	87.98	6.95
4.	98.20	2.00	237.70	102.62	9.0	12.2	0.2	89.13	6.61



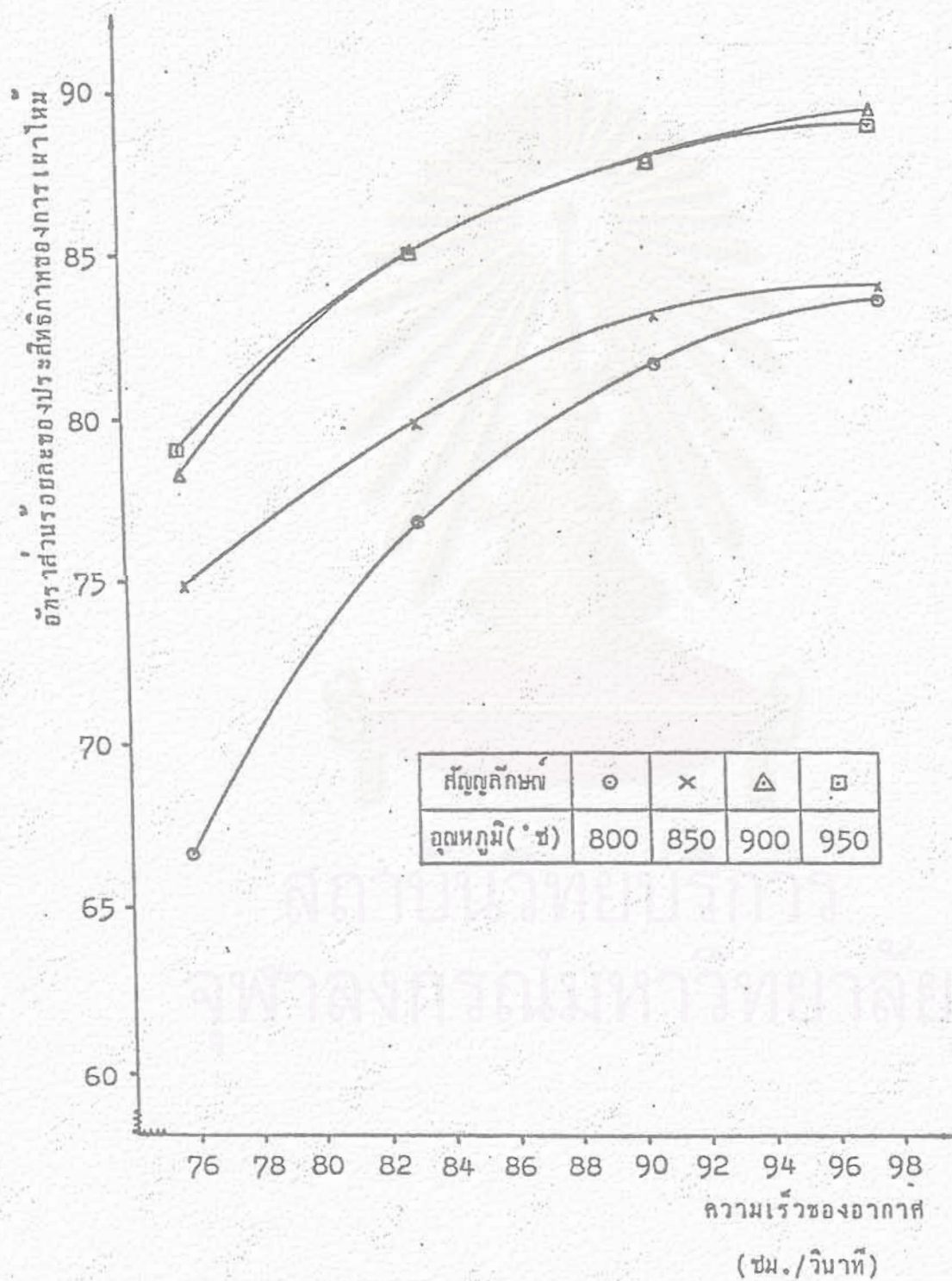
รูปที่ 5-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์และความเร็วของอากาศ



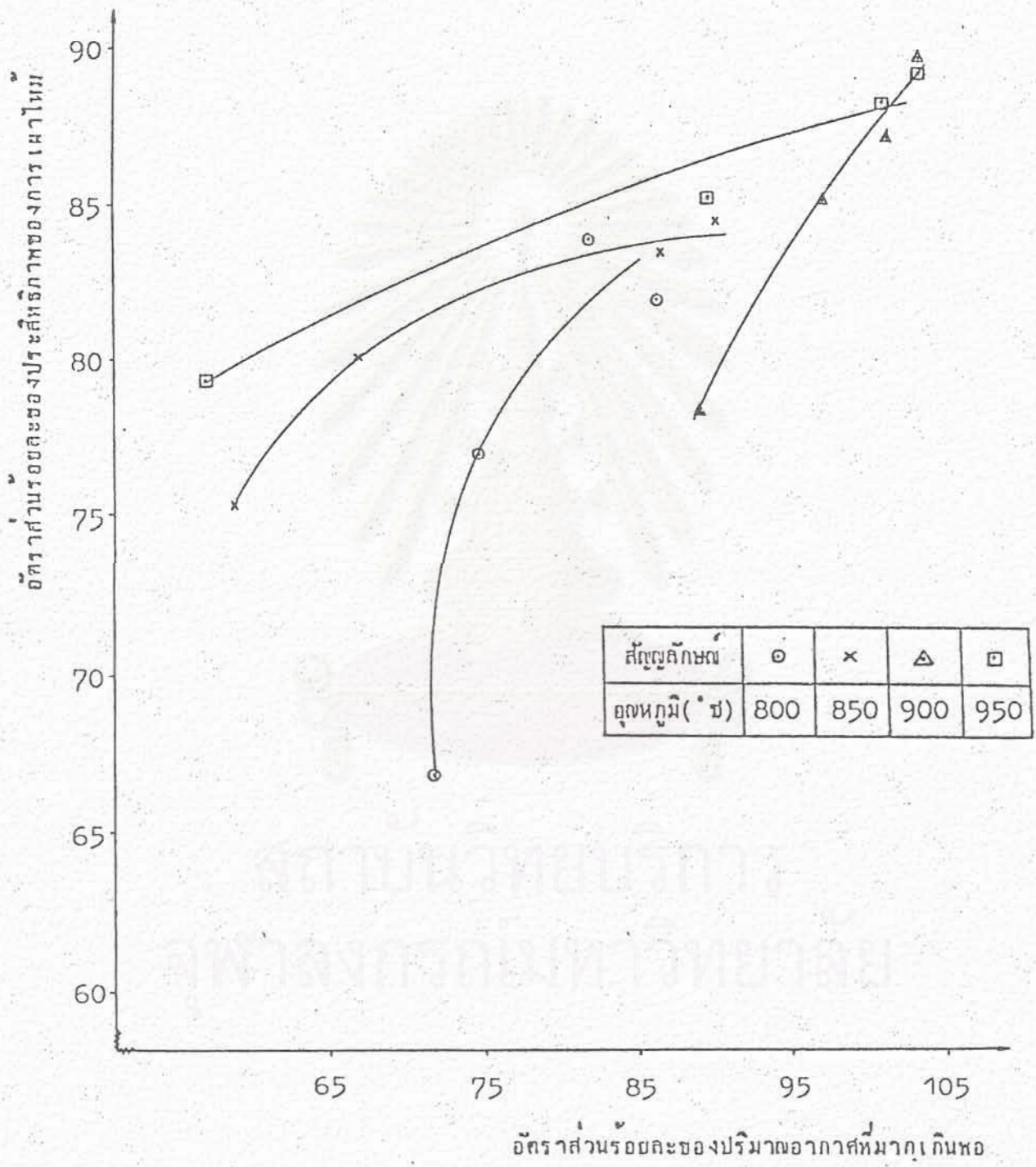
รูปที่ 5-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของแก๊งที่ออกจากไซโคลน และความเร็วของอากาศ



รูปที่ 5-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอและความเร็วของอากาศ



รูปที่ 5-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้และความเร็วของอากาศ



รูปที่ 5-6 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้และอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ

บทที่ 6

วิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านลิกไนท์

ถ่านลิกไนท์จากแหล่งต่าง ๆ มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2-2 ถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณซิลิเฟอรัค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแหล่งอื่น ๆ คุณสมบัติทางความร้อนประมาณ 4,600 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม จากการทดลองพบว่าถ่านลิกไนท์จะติดไฟและเผาไหม้ได้เองอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ไม่ต่ำกว่า 780 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kiorboe (18) และถ่านลิกไนท์จะเผาไหม้ได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้น

ในการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันแล้วนำค่าที่ได้มาวาดกราฟดังแสดงในรูปที่ 5-1 พบว่า เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นความตันลดก็จะเพิ่มขึ้นด้วยจนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่ง ความตันลดจะมีค่าคงที่ที่ความเร็วสูงของเบตระดับหนึ่ง เมื่อความเร็วสูงของเบตเพิ่มขึ้นรูปกราฟที่ได้ก็จะขึ้นไปในทำนองเดียวกัน แต่ค่าความตันลดจะมากกว่าสังเกตเห็นได้ว่า จุดที่ความตันลดเริ่มคงที่ขณะเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นที่ความเร็วสูงของเบตระดับต่าง ๆ นั้น จะเป็นจุดที่แสดงถึงความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วสูงของเบต จากการทดลองพบว่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่า 49 ซม./วินาที

ในการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันตามสมการ (2-7) นั้น พบว่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่า 47.29 ซม./วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาได้จากการทดลอง สมการที่ใช้คำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันมีหลายสมการ ซึ่งแต่ละสมการเหมาะสมกับเบตชนิดหนึ่ง ๆ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความหนาแน่น ขนาดของอนุภาคและความเร็วของอากาศที่ใช้เป็นสำคัญ แต่ละสมการได้มีการคัดทอนทำให้ได้รูปสมการใหม่ ซึ่งเหมาะสมกับเบตเฉพาะอย่างไป ในการคำนวณหาค่า

ความเร็วต่ำสุดของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการทดลองมีล้อยคล้องกับลมการ (2-7) และค่าที่ได้จากการคำนวณต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองประมาณร้อยละ 3.49

6.2 ผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์

6.2.1 อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์

จากตารางที่ 5-2 แสดงผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศให้มากขึ้นจาก 76.08 - 98.20 ชม./วินาที อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ จากตารางที่ 5-3 ถึง ตารางที่ 5-5 ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ค่าหนึ่งเมื่อป้อนอากาศให้เข้าสู่ระบบมากขึ้น อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ก็จะมากขึ้นด้วย จากกราฟรูปที่ 5-2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้น อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ก็จะมากขึ้น และที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์จะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 900, 850 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงว่านอกจากความเร็วหรือปริมาณอากาศมีผลต่ออัตราการป้อนถ่านลิกไนท์แล้ว อุณหภูมิก็มีผลเช่นเดียวกันกล่าวคือ อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผาไหม้และปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีและต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้หรือปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ก็ต้อง เพิ่มขึ้นกัน ในการทดลองใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิบังคับการทำงานของมอเตอร์ที่จะขับเคลื่อนระบบลิกไนท์ที่ป้อนถ่านลิกไนท์ เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้นจนถึงค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิก็จะตัดกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์หยุดทำงาน จึงไม่มีการป้อนถ่านลิกไนท์เข้าสู่คอยล์และอุณหภูมิของการเผาไหม้ก็จะไม่สูงขึ้นอีก เมื่อปล่อยให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้จะลดต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิก็จะบังคับให้มอเตอร์ทำงานขึ้นใหม่อีก จนกระทั่งถึงอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตั้งไว้ มอเตอร์ก็จะหยุดทำงานอีกเป็นเช่นนี้เรื่อยไป ทำให้ อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผาไหม้และปริมาณอากาศที่ใช้

6.2.2 เถ้าที่ออกจากคอยล์

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 5 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละการรับอนุคงตัวของเถ้าที่ออกจากคอยล์ลดลงเมื่อความเร็วของอากาศ



เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์ก็ลดลงด้วยเช่นกัน และจากตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 4 ในภาคผนวกที่ 5 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวและค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์จะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูง ๆ อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัว และค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์จะมีแนวโน้มว่ามีค่าต่ำกว่า ขณะที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ความเร็วของอากาศเท่ากัน จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่าของความร้อนลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส

ค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์พบว่ามีค่าลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ถ่านลิกไนท์ที่อยู่ภายในเบดจะมีการเคลื่อนไหวและผสมกันอย่างรุนแรง ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ผิวหน้าของถ่านลิกไนท์มีโอกาสร่วมสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดี ค่าของความร้อนจึงมีค่าลดลงและจะมีค่าลดลงมากเมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้น เพราะที่อุณหภูมิสูงถ่านลิกไนท์จะถูกคิดไฟได้ดี ในบางครั้งค่าทางความร้อนของเตาอาจจะมีค่าสูงกว่าค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกสัมน์ เช่น จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 5 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศ 76.08 ซม./วินาที ค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์มีค่า 5205.69 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกสัมน์ ทั้งนี้เป็นเพราะอุณหภูมิของการเผาไหม้และความเร็วของอากาศมีค่าต่ำกว่าทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นไม่เพียงพอ เกิดการผสมทางถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกสัมน์กับถ่านลิกไนท์ที่กำลังลุกไหม้อยู่ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะไปไล่ความชื้นและสารระเหยให้ออกไปคล้ายกับการทำถ่านอบ (Carbonization) จึงทำให้ค่าทางความร้อนของเตาที่ออกจากคอกสัมน์มีค่าสูงกว่าค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกสัมน์

6.2.3 เตาที่ออกจากไซโคลน

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 5 ซึ่งเป็นการแสดงรายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของเตาที่ออกจากไซโคลนมีค่าลดลงในขณะที่ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้

คุณค่าทางความร้อนของไถ่ที่ออกจากไซโคลนก็มีค่าลดลงเช่นกัน คุณค่าทางความร้อนของไถ่ที่ออกจากไซโคลนมีค่าต่ำกว่าไถ่ที่ออกจากคอกผสมนมวก ทั้งนี้เพราะไถ่ที่ออกจากไซโคลนมีการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องในบริเวณเหนือเบค ทำให้ขนาดและคุณค่าทางความร้อนลดลง จากตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 4 ในภาคผนวกที่ 5 ที่จุดหมุยของการเผาไหม้ 850 , 900 และ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวและคุณค่าทางความร้อนของไถ่ที่ออกจากไซโคลนจะมีค่าลดลง เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การเพิ่มความเร็วของอากาศให้มากขึ้นจะทำให้จุดหมุยของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกผสมมีค่าใกล้เคียงกับจุดหมุยของเบค เมื่อจุดหมุยของเบคมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ไถ่ที่ลอยอยู่ในบริเวณเหนือเบคเกิดการไหม้ได้ดีขึ้น คุณค่าทางความร้อนจึงลดลงในขณะที่เพิ่มความเร็วของอากาศ การหุ้มฉนวนรอบคอกผสมก็เป็นวิธีหนึ่งที่ย่วยให้จุดหมุยภายในเบคสูงอยู่ตลอดเวลา

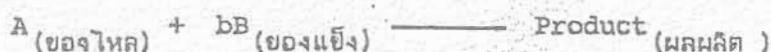
แต่อย่างไรก็ตามคุณค่าทางความร้อนของไถ่ที่ออกจากไซโคลนมีค่าลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะระยะเวลาที่ไถ่เกิดการเผาไหม้ในช่วงเหนือเบคสั้นเกินไป การเพิ่มความสูงของคอกผสมช่วงเหนือเบคจะทำให้ไถ่ที่หลุดลอยออกไปมีระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น ทำให้คุณค่าทางความร้อนลดลงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ จากรายงานของ Kiorboe (18) กล่าวว่าระยะเวลาที่ไถ่เผาไหม้อยู่ในบริเวณเหนือเบคไม่ควรน้อยกว่า 3 วินาที จึงจะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองมีค่า 98.20 ซม./วินาที ดังนั้นความสูงของคอกผสมช่วงเหนือเบคจึงไม่ควรน้อยกว่า 294.6 ซม. จึงจะทำให้ไถ่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

จากรูปที่ 5-3 ไถ่ที่ออกจากไซโคลนเมื่อคำนวณออกมาเป็นอัตราส่วนร้อยละของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกผสม พบว่ามีอยู่ประมาณร้อยละ 1-6 ซึ่งต่ำกว่าอัตราส่วนร้อยละของไถ่ที่มีอยู่ในถ่านลิกไนท์จริง ๆ คือมีอยู่ประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากมีไถ่บางส่วนสะสมอยู่ในคอกผสมและบางส่วนก็หลุดลอยออกจากไซโคลนไปพร้อมกับก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าที่จุดหมุยของการเผาไหม้ค่าหนึ่งเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้น อัตราส่วนร้อยละของไถ่ที่ออกจากไซโคลนก็จะสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าควรจะให้ความเร็วของอากาศสูงพอที่จะทำให้ไถ่หลุดลอยออกไปไม่สะสมอยู่ในคอกผสม แต่ก็ไม่ควรจะให้ความเร็วของอากาศสูงเกินไป เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ลดลง

6.2.4 อัตราการไหลของอากาศ

จากตารางที่ 5-2 ถึง ตารางที่ 5-4 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศหรืออัตราการไหลของอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จากข้อมูลที่ได้นำมาวาดกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5-5 จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้สูงขึ้น ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศเท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน ซึ่งจะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้นได้ การนำความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอากาศมีโอกาสร่วมผลกับคาร์บอนที่ผิวของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

กลไกของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งมีหลายขั้นตอน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของการเผาไหม้และขนาดของอนุภาคที่ไ้ สำหรับการเผาไหม้คาร์บอนในค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่มีสมมุติฐานว่า^(B) ความชื้นและสารระเหยได้ถูกกำจัดไปในขณะที่อนุภาคเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เบด ดังนั้นจึงยังคงเหลืออยู่แต่คาร์บอนเท่านั้นที่จะเกิดการเผาไหม้ ปฏิกิริยาของการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่สารเริ่มต้นอยู่ในสถานะที่ต่างกัน (Heterogeneous reaction) แบบจำลองของปฏิกิริยาลำดับแรกแสดงได้ ดังรูปที่ 6-1 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ง่าย ๆ ดังนี้



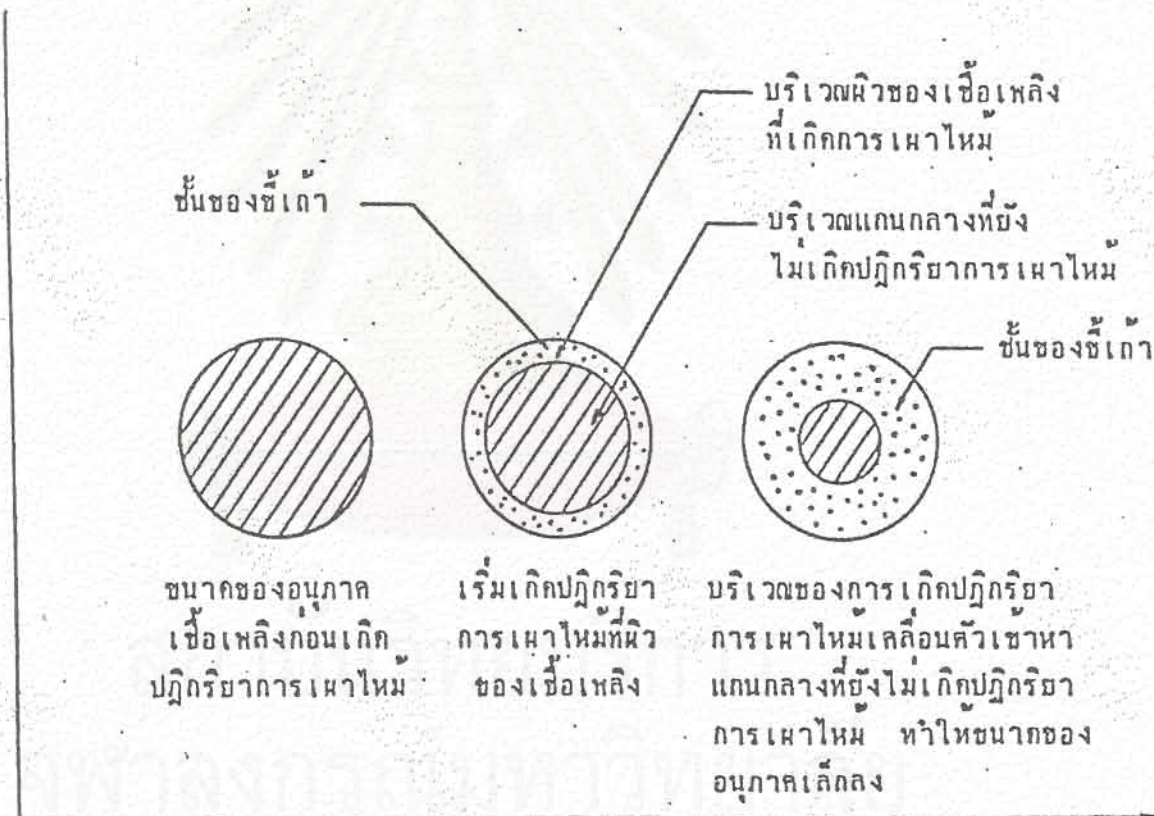
ขบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยามี 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ก๊าซ A จะแพร่กระจายผ่านชั้นของอากาศไปสู่ผิวของเชื้อเพลิง B

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซ A จะซึมผ่านชั้นของฮีตไปสู่แกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 3 ก๊าซ A จะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง B

ขั้นตอนใดจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ไ้ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.05 มม. ขั้นตอนที่ 3 (Kinetic controlled) จะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดของปฏิกิริยา ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 มม. ขั้นตอนที่ 1 และ 2 (Diffusion controlled) จะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดของปฏิกิริยา สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 1.5 มม. ดังนั้นขั้นตอนที่



เวลา

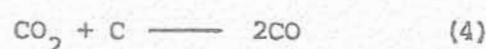
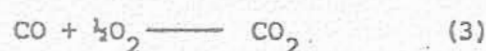
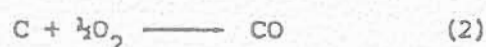
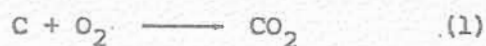
รูปที่ 6-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

ก๊าซหรืออากาศแพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆ รอบผิวอนุภาคและขั้นตอนที่ก๊าซหรืออากาศซึมผ่านชั้นของนี้ เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไปสู่แกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา จึงเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดของปฏิกิริยา ทฤษฎีดังกล่าวใช้สำหรับเบดที่อยู่กับที่ แต่ในกรณีของฟลูอิดไรเซชันเบดอนุภาคมีการเคลื่อนที่ที่ทำให้อิทธิพลของตัวควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค เช่น เกิดการขัดสีระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนังของคอลัมน์ ทำให้เกิดจากการเผาไหม้หลุดลอยไปอย่างรวดเร็วหรือทำให้ขนาดป่องอนุภาคเล็กลงรวดเร็วกว่าในกรณีของเบดที่อยู่กับที่

ในขณะที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ของถ่านลิกไนต์นั้นจะเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณผิวเยื่อเพลิง ก่อนจากนั้นบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาจะค่อย ๆ เคลื่อนตัวเข้าไปหาแกนกลางของอนุภาคเยื่อเพลิง ทำให้อนุภาคเยื่อเพลิงมีขนาดเล็กลง (Shrink) และเกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีบางส่วนหลุดลอยไป การเพิ่มความเร็วยของอากาศให้สูงขึ้นจะทำให้ชั้นฟิล์มของอากาศที่อยู่รอบอนุภาคบางลง ทำให้อัตราการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์มดังกล่าวสูงขึ้น การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นได้ดีเมื่อเพิ่มความเร็วยของอากาศ

6.2.5 คุณสมบัติของการเผาไหม้

จากตารางที่ 5-2 ที่คุณสมบัติของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ซึ่งค่านี้ไม่แตกต่างกันมากนัก และจากตารางที่ 5-3 ถึงตารางที่ 5-5 ที่คุณสมบัติของการเผาไหม้ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ก็มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 เช่นเดียวกัน สอดคล้องกับทฤษฎีที่ Khitrin (17) ได้อธิบายตามสมการดังต่อไปนี้



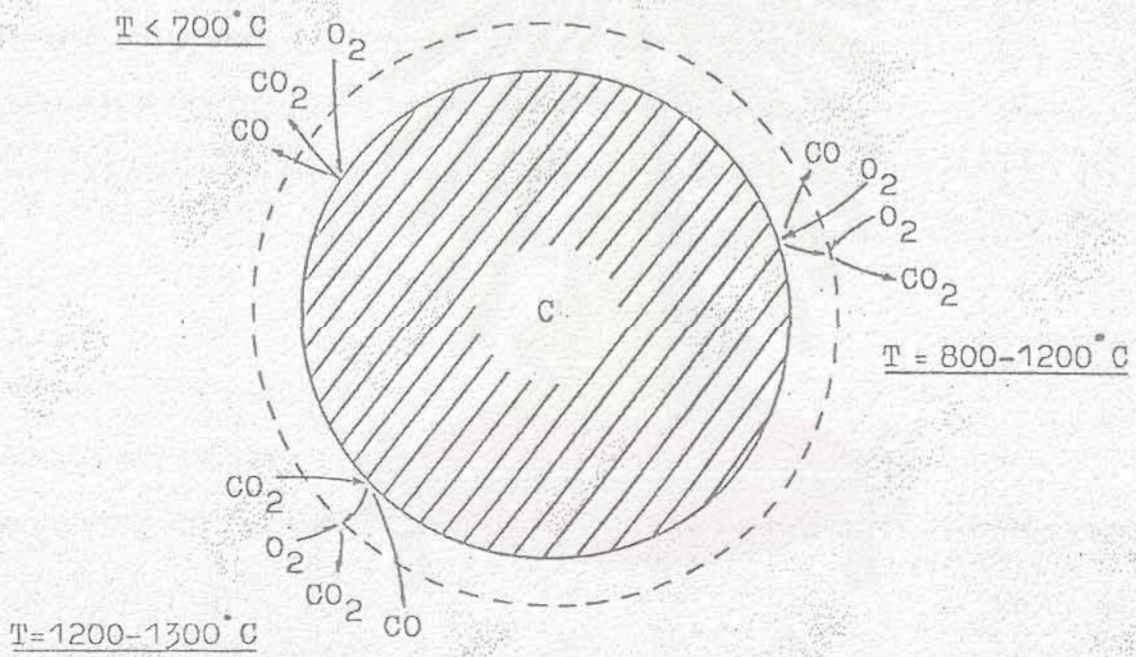
รูปที่ 6-2 แสดงความสำคัญของคุณสมบัติต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ผิวของถ่าน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) จะเด่นมาก ก๊าซที่เกิดขึ้น

จากการเผาไหม้คาร์บอนที่ผิวถ่านจะมีทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 800 - 1200 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์บางส่วนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการ (3) ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก (ประมาณ 1200 - 1300 องศาเซลเซียส) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของถ่านตามสมการที่ (4) จะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้นแต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับลดลง ดังนั้นในการทดลองปฏิกิริยาการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิ 800 - 950 องศาเซลเซียส จึงควรจะคล้ายคลึงกัน กล่าวคืออัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ควรมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำ แต่อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ควรมีค่าสูงกว่า เพราะก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์บางส่วนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ (3)

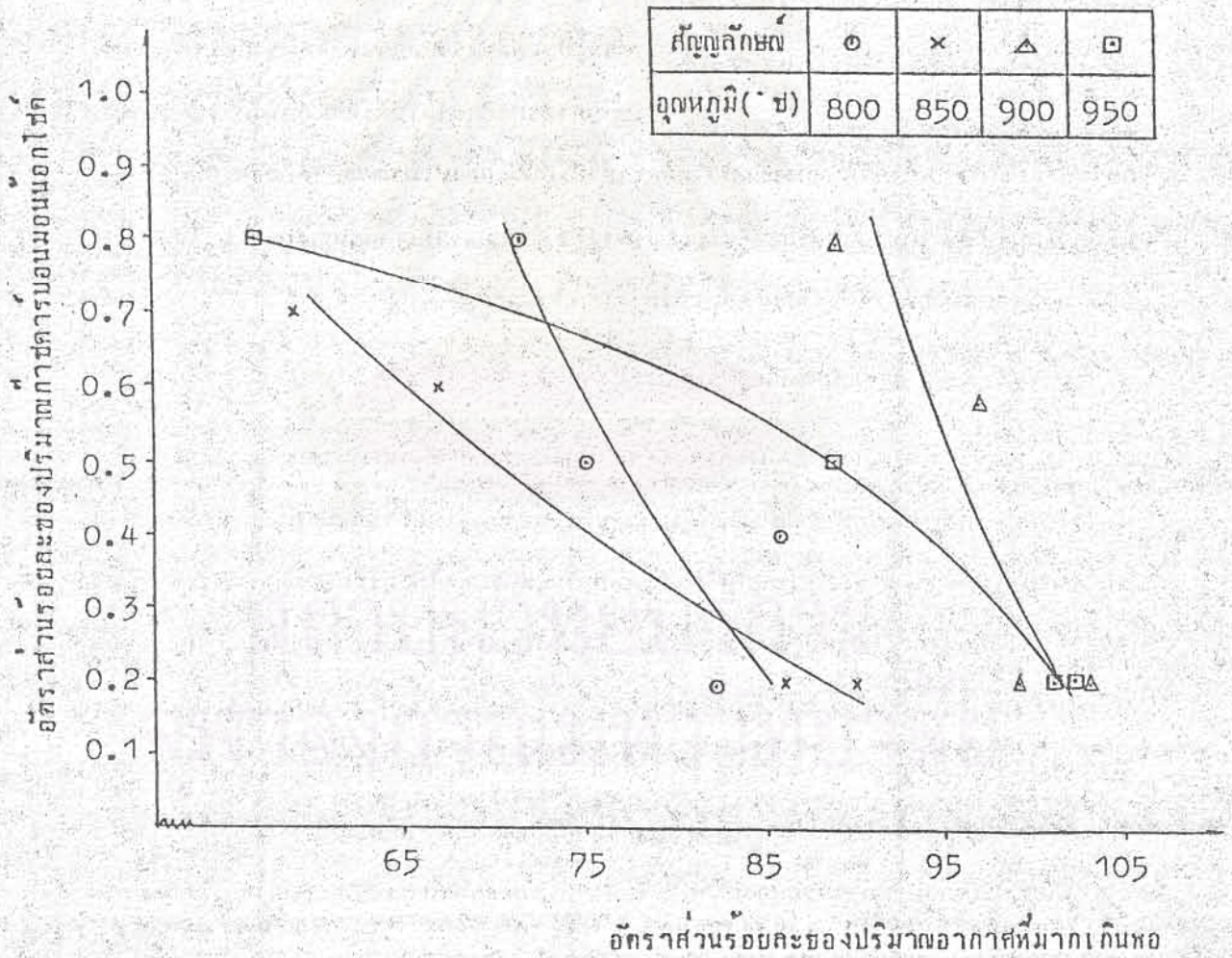
6.2.6. อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ

จากตารางที่ 5-2 ถึงตารางที่ 5-5 พบว่าอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพออยู่ในช่วง 57-103 และจากรูปที่ 6-3 จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้เดียวกัน อัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้บางส่วนทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนที่มากเกินพอได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ (3) ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงต่ำสุด 0.2 ซึ่งตามทฤษฎีเกี่ยวกับเทอร์โมไดนามิกส์จะทำให้ค่าคงที่สมดุล (K_a) มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

จากรูปที่ 5-4 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ค่าหนึ่ง เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอจะมีค่าเท่าใดขึ้นกับอัตราการป้อนถ่านลิกไนต์และปริมาณอากาศ ในการทดลองจึงต้องทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของปริมาณถ่านลิกไนต์ที่ป้อนเข้าสู่คอยล์ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ



รูปที่ 6-2 แสดงความสำคัญของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ผิวของถ่าน



รูปที่ 6-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และอัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอ

จากรูปที่ 5-5 และรูปที่ 5-6 จะเห็นว่าอัตราส่วนร้อยละของประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศหรืออัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดี ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จึงเพิ่มขึ้น และที่จุดหมุยของการเผาไหม้สูง ๆ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะสูงกว่าขณะที่จุดหมุยของการเผาไหม้ต่ำกว่า เมื่ออัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอมีค่าเท่ากัน เพราะที่จุดหมุยสูงการเผาไหม้ย่อมเกิดขึ้นได้ดี แต่อย่างไรก็ตามที่จุดหมุยของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอเพิ่มขึ้น และพบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าขณะที่จุดหมุยของการเผาไหม้ 950 องศาเซลเซียสที่อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าที่สภาวะดังกล่าวอัตราการเผาไหม้ของถ่านลิกไนท์มีค่าสูงมาก มีการหมุนเวียนของอากาศค่อนข้างรุนแรง อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ และปริมาณอากาศเหมาะสมทำให้อัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอไม่สูงหรือต่ำเกินไป จากรายงานของ Kiorboe (18) ก็ยืนยันว่าที่จุดหมุยของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงสุด

6.2.7 จุดหมุยของไอน้ำร้อนบวคยั้ง

จากตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 4 ในภาคผนวกที่ 5 จะเห็นว่าที่จุดหมุยของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส จุดหมุยของไอน้ำจะสูงขึ้นตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นก็จะทำให้จุดหมุยของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นหรือมีค่าใกล้เคียงกับจุดหมุยของเบด จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปสู่ไอน้ำที่อยู่รอบคอกสูงขึ้น และที่จุดหมุยของการเผาไหม้สูง ๆ จุดหมุยของไอน้ำจะมีค่าสูงกว่าขณะที่จุดหมุยของการเผาไหม้ต่ำกว่าเมื่อความเร็วของอากาศเท่ากัน เพราะความแตกต่างของจุดหมุยระหว่างจุดหมุยของก๊าซร้อนและจุดหมุยของไอน้ำที่อยู่รอบคอกมีมากกว่า จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าและไอน้ำก็มีระยะเวลาที่รับความร้อนโดยผ่านผนังคอกสั้น

ในการทดลองไป้อัตรการป้อนน้ำเข้าสู่คอกสั้นสูงสุดเพียง 90 กรัม/นาทึ ซึ่งถ้าให้ปริมาณน้ำไหลเข้าสู่คอกสั้นมากขึ้นจะทำให้จุดหมุยของการเผาไหม้ลดลงอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถเผาไหม้ถ่านลิกไนท์อย่างต่อเนืองได้ ไอน้ำที่เกิดขึ้นก็ปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยไม่มี

ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่อย่างใด ซึ่งถ้าได้มีการคิดถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ก็สามารถนำไอน้ำที่ เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้ ผลจากการทดลองนี้พอสรุปได้ว่าถ้าจะทำไอน้ำ จากคอมเพรสเซอร์ไอซ์เบดแบบไฮดรอสแตติก 2 ชั้นนั้น คุ้มที่ของการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่จำเป็น ต้องเริ่มตั้งแต่ก่อนต้นของเบด อาจใช้บริเวณเหนือเบดก็อาจเพียงพอต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะการถ่ายเทความร้อนที่ดีของฟลูอิดไอซ์เบดนั่นเอง

6.2.8 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้อยู่ในช่วงร้อยละ 66 - 89 และจากตารางที่ 5-2 ถึง ตารางที่ 5-5 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้เกี่ยวกับประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูง ๆ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะสูงกว่าที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่า เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศเบดจะถูกก่อกวนให้มีการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง และมีการหมุนเวียนมากขึ้น ทำให้โอกาสที่ก๊าซออกซิเจนจะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆ ของอากาศที่อยู่รอบอนุภาคเบดขึ้น ถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ก็จะหลุดลอยออกไปเพราะอนุภาคมีการเคลื่อนที่กระทบกันเองและยังเสียดสีกับผนังของคอมเพรสเซอร์อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าไปความเร็วของอากาศมากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างภายในเบด การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคจะลดลง การเผาไหม้เกิดขึ้นไม่ได้ผลดี ทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ลดลง จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงที่สุดร้อยละ 89.57 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kiorboe (18) เช่นกัน

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อ เสนอแนะ

จากการศึกษาเรื่องการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดIZED BED ทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยต่อไป รวมทั้งการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้ในทางอุตสาหกรรมดังนี้คือ

ก. คุณสมบัติของถ่านลิกไนท์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ โดยเฉพาะในเรื่องคุณค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์จากแหล่งต่าง ๆ

ข. เครื่องมือวิจัย จากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องมือทำให้ทราบปัญหาที่เกิดขึ้นและลักษณะของเครื่องมือที่เหมาะสมดังนี้

1) ระบบการนำแก๊สออกจากกอลสันมีโตนอาศัยน้ำพริกของ แก๊สสามารถนำมาใช้ได้ดี แต่ควรจะมีระบบเปิดคลื่นระบายแก๊สที่เหมาะสม เพื่อให้อัตราการนำแก๊สออกจากกอลสันมีโตนสัมพันธ์กับอัตราการป้อนถ่านลิกไนท์

2) การใช้แผ่นกระจายลมลักษณะรูปกรวยช่วยให้แก๊สไหลผ่านตามผิวเชิงของกรวยและออกจากกอลสันมีโตนทางช่องระบายแก๊สโดยสะดวก ลดปัญหาการอุดตันของถ่านลิกไนท์ที่รูของแผ่นกระจายลม

3) ไซโคลอนที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเล็กเกินไปทำให้มีปัญหาในการแยกแก๊สออกจากทาร์ไม่มีประสิทธิภาพเต็มที่ นอกจากนั้นยังเกิดการอุดตันได้ง่ายเป็นปัญหาในการเก็บ แก๊สที่ออกจากกอลสันมีโตน

4) ระยะเวลาที่แก๊สเกิดการเผาไหม้ในช่วงเหนือเบตสันเกินไป ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ควรจะเร่งความเร็วของคอลสันในช่วงเหนือเบตสันให้มากขึ้นไม่น้อยกว่า 294.6 ชม.

5) คอลสันมีขนาดใหญ่ ทำให้การควบคุมลักษณะการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องมีปัญหาบ้าง นอกจากนั้นจะทำให้การทดลองที่อุณหภูมิของการเผาไหม้สูง ๆ ผังของคอลสันมักจะเกิดการแตกร้าว ทำให้เสียเวลาทำการซ่อมแซมบ่อย ๆ

6) ในการทดลองไม้ล้ามารทป้อนน้ำเข้าสู่คอกสัตว์ในปริมาณมากได้ เพราะจะทำให้จุดอุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหรือผิวงของคอกสัตว์มีมากเกินไป ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่ายเทให้แก่อน้ำที่เกิดขึ้นได้มาก โอกาสที่จุดอุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลงจึงมีมากเป็นอุปสรรคในการควบคุมสภาวะของการเผาไหม้

ค. จากการทดลองเผาไหม้ที่่านลิกไนท์ที่สภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นในงานวิจัย ทำให้สามารถสรุปเรื่องสำคัญ ๆ ได้ดังนี้

1) ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองจะต้องสูงพอที่จะทำให้ถ่านลิกไนท์เกิดฟลูอิดไลเซชันได้อย่างดี และจะต้องมีค่าไม่มากนักเกินไปเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ลดลง ในการทดลองนี้ใช้ความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 76.08 - 98.20 ซม./วินาที หรือประมาณ 1.55 - 2.00 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน เมื่อเทียบกับที่สภาวะปกติ

2) จากสภาวะที่กำหนดขึ้นในงานวิจัย เมื่ออัตราส่วนร้อยละของปริมาณอากาศที่มากเกินพอเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะลดลง

3) สำหรับการทดลองนี้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงที่สุดร้อยละ 89.57 ที่จุดอุณหภูมิของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศ 98.20 ซม./วินาที

เอกสารอ้างอิง

1. บงบุตร อุกกนิมาพันธ์, สัมชาย สุ่มฤทธิพานิชย์, วลัย ตะเวทิงค์, จิตวิวัฒน์ มีคู่ช. "ความก้าวหน้าในการสำรวจ และการผลิตภายในประเทศ." ถ่านหิน. คณะกรรมการถ่านหิน กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี, 2527
2. _____, สัมชาย สุ่มฤทธิพานิชย์, วลัย ตะเวทิงค์, จิตวิวัฒน์ มีคู่ช. "ความก้าวหน้าในการสำรวจ และการผลิตภายในประเทศ." การประชุมทางวิชาการ, ครั้งที่ 2, กรมทรัพยากรธรณี, 1-11, 2526
3. วสันต์ แสงจันทร์, "การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในเตาเผาแบบฟลูอิดไอซ์เบด." วิทยานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
4. ศักดิ์วิมล อึ้งสว่าง. "การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไอซ์เบด." วิทยานิพนธ์. ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
5. สมพร เสือตาชุนนะ, วีรย์ ศำกรวิมล, อู๋ชาติ บารมี, สัมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ. "การเผาไหม้ถ่านหินแบบฟลูอิดไอซ์เบด." วารสารเคมีวิศวกรรม เทคโนโลยี-ทางอาหารและเชื้อเพลิง, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม, 87-97, 2524.
6. สัมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไอซ์เบด. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
7. Alfredo, L.G. and Neal R.A. "Modelling of Fluidized Bed Reactors." Chemical Engineering Science, 31, 1163-1178, 1976.
8. Ardesian, M.M. and Davidson J.F. "Combustion of Carbon Particle in A Fluidized Bed." Trans Instn Chem Engrs, 51, 121-131, 1973.
9. Bao Yi Lin, Yang Min Xin, Yang Lidan and Chin Yu Kun, "Burning Lignite in Fluidized Bed Boilers." The First International Fluidized Bed Combustion and Applied Technology Symposium in The People Republic of China, August 22-26, 1983.

10. Boroclulya, V.A., Gangha, V.L., Zheltov, A.I. "Heat Transfer Between Gas-Solid Fluidized Bed and Horizontal Tube Bundles." Letters in Heat and Mass Transfer, 7, 83-95, 1980.
11. Campbell, E.K. and Davidson, J.F. "The Combustion of Coal in Fluidized Bed." Inst of Fuel Sym. Ser. No 1, 1975.
12. Ergun, S. Chemical Engineering Progress, 48, 89, 1952.
13. Highley, J. "The Development of Fluidized Bed Combustion for Industry." The First International Fluidized Bed Combustion and Applied Technology Symposium in The People Republic of China, August 22-26, 1983.
14. Hougen, O.A. Chemical Process Principle. Parti 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York 1954.
15. Jodra, L.G., Aragon, J.M. and Corella, J. "Fluidized Beds with Internal Screen I. Study of a Two-Dimensional Bed." International Chemical Engineering, 19, 4, 654-664, 1979.
16. _____, J.M. and Corella, J. "Fluidized Beds with Internal Screen II. Study in a Cylindrical Reactor." International Chemical Engineering, 19, 664-671, 1979.
17. Khitrin, L.N. "Physics of Combustion and Explosion Translated from Russian". Published by the National Science Foundation, Washington, D.C. by the Israel Programmer for Science Translations, Jurusalem, 135-147, 1962.
18. Kiorboe, L.G. "Design and Operation of an AFBC for Low Grade Fuel." The First International Fluidized Bed Combustion and Applied Technology Symposium in The People Republic of China, August 22-26, 1983.

19. Kunii, D. and Levenspiel O., Fluidization Engineering. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.
20. Levenspiel, O. Chemical Reaction Engineering; John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962.
21. Perry, J.H. Chemical Engineer's Handbook; 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1950.
22. Prafulla Kumar Sinha, Ahi Bhushan Datta, Shib Shankar Nandi and Debdas Bhaduri. "Prediction of Burning Rate of Coal in Fluidized Bed Combustion." Fuel, 59, 527-531, 1980.
23. Roc e, J.C., Witkowski, A.R. and Davidson, D. "The Temperature of Coke Particles in A Fluidized Bed Combustor." Trans IChemE, 58, 69-73, 1982.
24. Toshimasa Hirama, Minoru Tomita and Tomio Adachi. "An Experimental Study for Low NO_x Fluidized Bed Coal Combustor Development." Environmental Science & Technology, 14, 960-965, 1980.
25. _____, Mino Tomita and Tomio Adachi. "Two Stage Fluidized Bed Combustion of Coal." Proc. Int. Conf. Fluid Bed Combust., 2, 623-631, 1980.
26. Wright, S.J. "The Design of Fluidized Combustor Systems Burning Solid Fuel" I. Chem. E., 161-165, 1968.
27. Yoshida Kunio. "Fluidized Bed Combustion Technology in Japan" Proceedings, 2nd World Congress of Chemical Engineering, 2, 29-32, 1981.

תרגומים

ภาคผนวกที่ 1

คุณสมบัติทางกายภาพของ เบน

1. การหาสัดส่วนช่องว่าง (void fraction, ϵ_m) และความเป็นทรงกลมเทียบเท่า (sphericity, ϕ_s) ของถ่านลิกไนท์

$$\text{ปริมาณของถ่านลิกไนท์และช่องว่าง} = 21.0 \quad \text{กิโลลิตร}$$

$$\text{ปริมาณของน้ำที่เติมลงไปช่องว่าง} = 10.0 \quad \text{กิโลลิตร}$$

$$\text{สัดส่วนช่องว่างของเบน } (\epsilon_m) = \frac{10}{21}$$

$$= 0.4762$$

ถ้าการทดลองช้าแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลของการทดลองจะได้ค่าสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย

0.4535 จากหนังสืออ้างอิง Fluidization Engineering หน้า 66 รูปที่ 1

$$\text{เมื่อ } \epsilon_m = 0.4535$$

$$\text{ความเป็นทรงกลมเทียบเท่า } (\phi_s) = 0.77$$

2. การหาเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่าถ่านลิกไนท์ (diameter of sphere having the volume, ϕ_p)

$$\text{ปริมาณของถ่านลิกไนท์และช่องว่าง} = 15.0 \quad \text{กิโลลิตร}$$

$$\text{จำนวนอนุภาคของถ่านลิกไนท์} = 6381 \quad \text{อนุภาค}$$

$$\text{ปริมาตรของถ่านลิกไนท์} = \text{จำนวนอนุภาค} \times \frac{\pi d_p^3}{6}$$

$$= \text{ปริมาตรของถ่านลิกไนท์และช่องว่าง} \\ \times (1 - \epsilon_m)$$

$$6381 \cdot \frac{\pi d_p^3}{6} = 15 (1 - 0.4535)$$

$$d_p = 0.1349 \quad \text{ซม.}$$

$$= 1.349 \quad \text{มม.}$$

3. การหาความหนาแน่นของถ่านลิกไนท์

น้ำหนักของถ่านลิกไนท์	= 13.6545	กรัม
ปริมาตรของถ่านลิกไนท์	= 21.0	มิลลิเมตร
ความหนาแน่นของถ่านลิกไนท์	= $\frac{13.6545}{21(1-0.4535)}$	
	= 1.1898	กรัม

ถ้าทำการทดลองซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองได้ค่าความหนาแน่น 1.1895 กรัม/มิลลิเมตร

4. การหาปริมาณความชื้น (ใช้วิธีการทดลองตาม ASTM D 3173)

น้ำหนักของถ่านลิกไนท์ก่อนอบ	= 0.8050	กรัม
น้ำหนักของถ่านลิกไนท์หลังอบ	= 0.6204	กรัม
น้ำหนักของน้ำในถ่านลิกไนท์	= 0.1846	กรัม
ปริมาณร้อยละความชื้นของถ่านลิกไนท์	= $\frac{0.1846}{0.8050} \times 100$	
	= 22.93	

ถ้าทำการทดลองซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองได้ค่าปริมาณร้อยละความชื้นของถ่านลิกไนท์ 23.00

5. การหาปริมาณสารระเหย (ใช้วิธีการทดลองตาม ASTM D.3175)

น้ำหนักของถ่านลิกไนท์ก่อนอบ	= 0.9185	กรัม
น้ำหนักของถ่านลิกไนท์หลังอบ	= 0.4202	กรัม
น้ำหนักที่หายไป	= 0.4983	กรัม
ปริมาณร้อยละของสารระเหย	= $\frac{0.4983}{0.9185} \times 100 - 23.00$	
	= 31.25	

ถ้าทำการทดลองซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองได้ค่าปริมาณร้อยละของสารระเหย

6. การหาปริมาณเต้า (ใช้วิธีการทดลองตาม ASTM D 3174)

$$\text{น้ำหนักของถ่านลิกไนท์ก่อนอบ} = 0.9974 \quad \text{กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของถ่านลิกไนท์หลังอบ} = 0.1047 \quad \text{กรัม}$$

$$\text{ปริมาณร้อยละของเต้า} = \frac{0.1047}{0.9974} \times 100$$

$$= 10.50$$

ทำการทดลองซ้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองได้ค่าปริมาณร้อยละของเต้า 10.38

7. การหาปริมาณการบ่อนคงตัว

$$\text{ปริมาณร้อยละของการบ่อนคงตัว} = 100 - \text{ปริมาณร้อยละของความชื้น}$$

$$- \text{ปริมาณร้อยละของค่าระเหย}$$

$$- \text{ปริมาณร้อยละของเต้า}$$

$$= 100 - 23.0 - 32.61 - 10.38$$

$$= 34.01$$

8. การคำนวณเวลาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันตามสมการ (2-7)

$$U_{mf}^2 = \frac{\rho_s d_p \rho_s - \rho_g \cdot g \cdot c_{mf}^3}{1.75 \rho_g}$$

$$= \frac{0.77 (0.1349)}{1.75} \left(\frac{1.1985 - 0.0029}{0.0069} \right) (985) (0.4535)^3$$

$$U_{mf} = 47.29 \quad \text{cm./วินาที}$$

9. การคำนวณหาระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์ที่อยู่ภายในคอลัมน์

ที่จุดหยุดของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส

$$\text{ปริมาณเต้าที่อยู่ในคอลัมน์} = 1600.0 \quad \text{กรัม}$$

$$\text{อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์} = 125.0 \quad \text{กรัม/นาที}$$

$$\text{ระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์ที่อยู่ภายในคอลัมน์} = \frac{1600.0}{125.0} = 12.8 \quad \text{นาที}$$

ภาคผนวกที่ 2

คุณค่าทางความร้อน (Heating value)

ตัวอย่างของวิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาปริมาณความร้อนเทียบเท่า (energy equivalent) ของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ จากปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ (heat of combustion) ของกรดเบนโซอิก (benzoic acid)

$$w = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t}$$

โดยที่

w = ปริมาณความร้อนเทียบเท่าของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์
(แคลอรี/องศาเซลเซียส)

H = ปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก
(6,318 แคลอรี/กรัม)

m = น้ำหนักของกรดเบนโซอิก (1.1030 กรัม)

t = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้าย
= 2.8 องศาเซลเซียส

e_1 = ความถูกต้อง (correction) ของปริมาณความร้อนของการรวมตัว (formation) ของกรดไนตริก (nitric acid)
= 0 แคลอรี

e_3 = ความถูกต้องของปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ของขดลวด (ignition wire)
= 2.3 แคลอรี/ซม.

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad w &= \frac{6318 \times 1.1030 + 0 + 2.3 \times 7.8}{2.8} \\ &= 2,495.25 \quad \text{แคลอรี/องศาเซลเซียส} \end{aligned}$$

2. การคำนวณค่าความจุความร้อนของถ่านหิน

$$H_g = \frac{tw - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

$$H_g = \text{ปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ (แคลอรี/กรัม)}$$

$$\text{โดยที่} \quad t = 1.8 \quad \text{องศาเซลเซียส}$$

$$w = 2495.25 \quad \text{แคลอรี/องศาเซลเซียส}$$

$$e_1 = 0$$

$$e_2 = \text{ค่าความถูกต้องสำหรับการรวมตัวของกรดซัลฟูริก (sulphuric acid)}$$

$$= 14 \text{ (ร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์) (น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน)}$$

$$= 14 (0.7263) (0.9500)$$

$$= 9.66 \quad \text{แคลอรี}$$

$$e_3 = 2.3 (9.8)$$

$$= 22.54 \quad \text{แคลอรี}$$

$$m = \text{น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (0.9500 กรัม)}$$

$$H_g = \frac{1.8(2495.25) - 9.66 - 22.54}{0.9500}$$

$$= 4693.95 \quad \text{แคลอรี/กรัม}$$

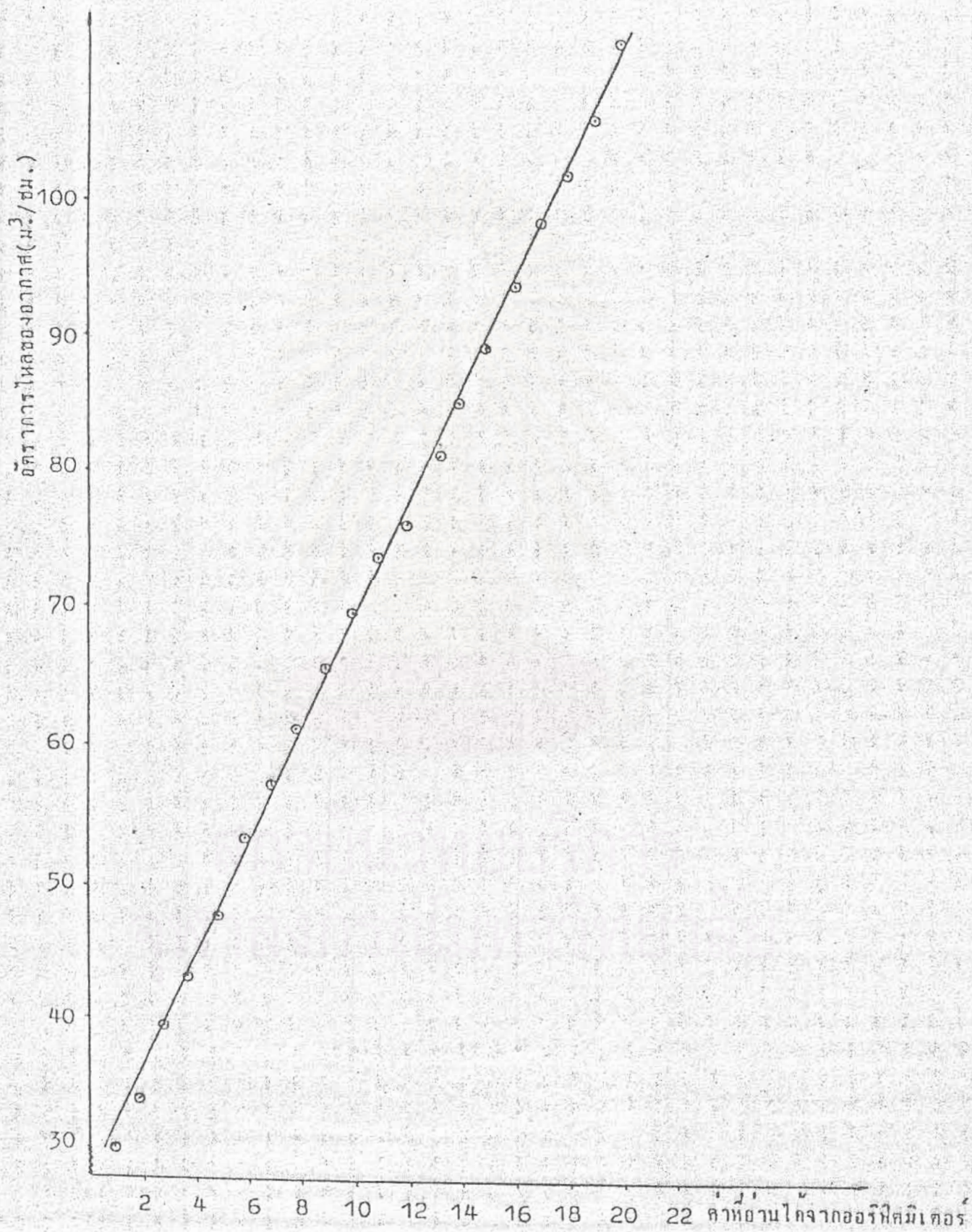
$$= 4,693.95 \quad \text{กิโลแคลอรี/กิโลกรัม}$$

ภาคผนวกที่ 3

การปรับเทียบค่าที่อ่านได้จากออร์ฟิเดเตอร์และอัตราการไหลของอากาศ

ค่าที่อ่านได้จากออร์ฟิเดเตอร์ (ซม. ของน้ำ)	อัตราการไหลของอากาศ (ม ³ /ซม.)	อัตราการไหลของอากาศ (ม ³ /นาที)	ความเร็วของอากาศ (ซม./วินาที)
0	0	0	0
1	30	0.5	26.54
2	34	0.5667	30.08
3	40	0.6667	35.39
4	44	0.7333	38.92
5	49	0.8167	43.35
6	54	0.9000	47.77
7	58	0.9667	51.31
8	62	1.0333	54.85
9	66	1.1000	58.39
10	70	1.1667	61.93
11	74	1.2333	65.46
12	76	1.2667	67.23
13	80	1.3333	70.77
14	86	1.4333	76.08
15	90	1.5000	79.62
16	94	1.5667	83.16
17	99	1.6500	87.58
18	103	1.7167	91.12
19	107	1.7833	94.66
20	112	1.8667	99.68

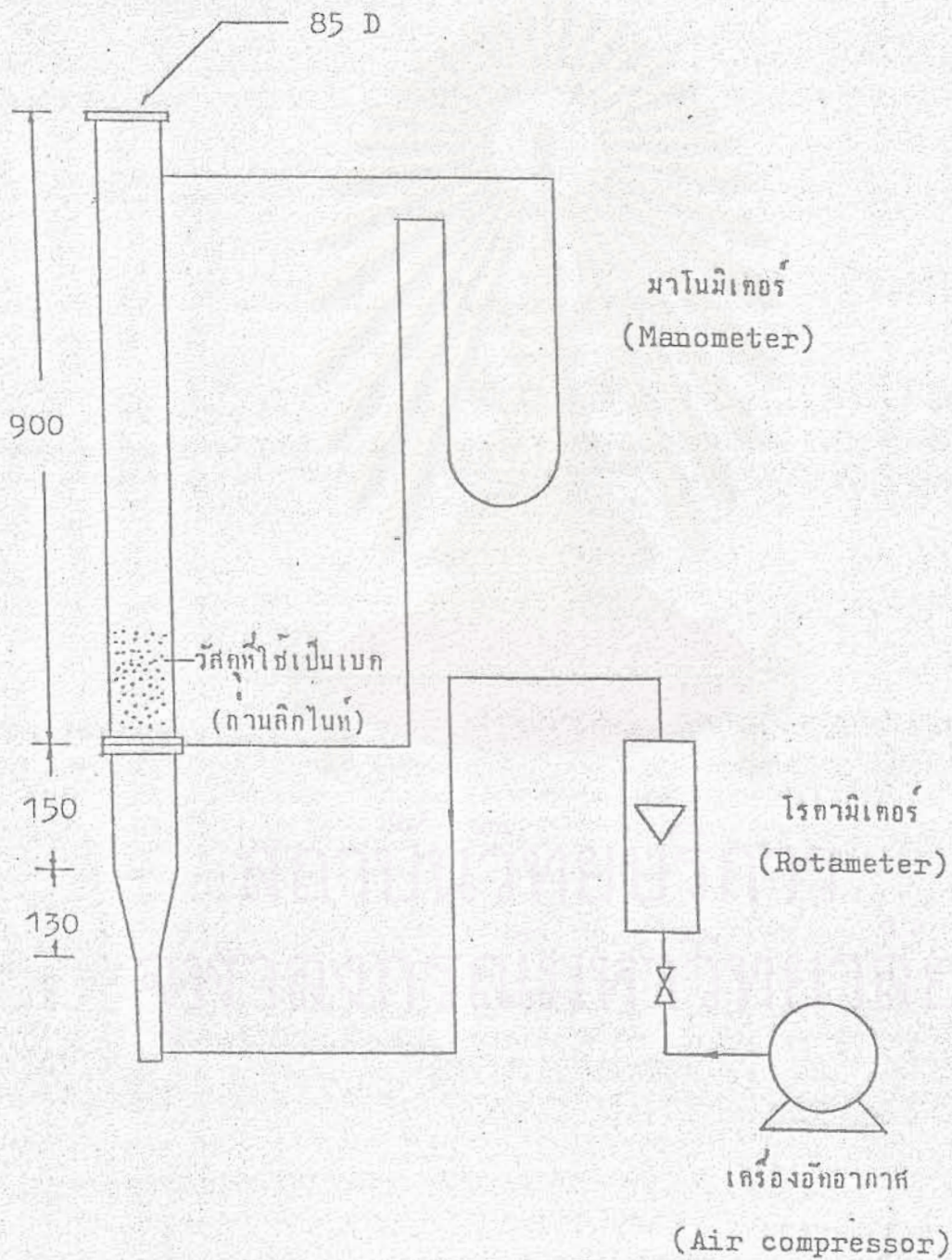
ปรับเปลี่ยนแบบที่จุดทศนิยม 29 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและค่าที่อ่านได้จากออร์ทีมิเตอร์ (ชม. ของน้ำ)

ภาคผนวกที่ 4

ลักษณะของกอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้ ก๊าซฟลูออโรซีน



รูปที่ 2 แสดงถึงลักษณะของกอลัมน์ที่ใช้ทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดในการทำให้ ก๊าซฟลูออโรซีน

แสดงข้อมูลการทดลองการหาความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน โดย
อาศัยการวัดความล้มตที่เกิดขึ้นขณะที่อากาศไหลผ่านเบดที่มีความสูงต่าง ๆ กัน

อัตราการไหลของ อากาศ (ม. ³ /นาที)	ความเร็วของอากาศ (ชม./วินาที)	ความล้มต (ชม.ของน้ำ)		
		L _{mf} =10 ซม.	L _{mf} =13 ซม.	L _{mf} =16 ซม.
0.06	17.62	2.75	3.45	3.80
0.08	23.97	3.45	4.40	5.40
0.10	29.37	4.70	5.85	6.55
0.12	35.24	5.90	7.40	8.45
0.14	41.12	6.75	8.75	9.80
0.16	46.99	7.35	9.45	10.65
0.18	52.87	7.5	9.70	10.90
0.20	58.74	7.75	9.85	11.10
0.22	64.62	7.75	9.90	11.20
0.24	70.49	7.80	10.0	11.25
0.26	76.37	7.75	10.0	11.25
0.28	82.24	7.75	10.0	11.25
0.30	88.11	7.80	10.0	11.25
0.32	93.99	7.80	10.0	11.25
0.34	99.86	7.80	10.0	11.25
0.36	105.74	7.80	10.0	11.25

ทำการทดลองที่จุดเหนือห้องและความดันบรรยากาศ

ภาคผนวกที่ 5

ข้อมูลที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ในฟลูอิดไคเซิล

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และมีอัตราการไหลของอากาศ 1.4333, 1.5733, 1.7167 และ 1.8500 ม.³/นาทิตามลำดับ

อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาทิต)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (นาทิต)	24	16	18	15
อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาทิต)	125.00	149.66	165.02	174.70
ปริมาณการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม)	725.0	486.08	503.46	430.05
อัตราการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม/นาทิต)	30.21	30.38	27.97	28.67
ปริมาณแก๊สที่อยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)	1600.0	1700.0	1888.0	1500.0
ระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์อยู่ภายในคอลัมน์ (นาทิต)	12.8	11.36	11.40	8.59
ความเร็วของอากาศ (ชม./วินาที)	76.08	83.16	91.12	98.20
ความเร็วของอากาศ/ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน	1.55	1.70	1.86	2.00
อัตราการไหลของน้ำ (กรัม/นาทิต)	90.0	90.0	90.00	90.0
อุณหภูมิของน้ำขณะเข้าตู้คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	26.0	25.0	25.0	25.0
อุณหภูมิของไอน้ำขณะออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	322.0	330.0	346.0	362.0
อุณหภูมิของอากาศที่เข้าตู้คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)				
อุณหภูมิกระเปาะเปียก	23.0	23.0	22.0	22.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	27.0	26.0	26.0	26.0
ความชื้นของอากาศที่เข้าตู้คอลัมน์ (โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง)	0.026	0.026	0.022	0.022

ตารางที่ 1 (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาท.)	1.433	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
จุดหมุนของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ ณ จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)	485.0	492.0	538.0	582.0
จุดหมุนของก๊าซร้อนที่ออกจากคอสมัน ณ จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)				
จุดหมุนกระเปาะเปียก	39.0	39.0	39.0	40.0
จุดหมุนกระเปาะแห้ง	43.0	41.0	49.0	60.0
ความชื้นของก๊าซร้อนที่ออกจากคอสมัน (โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง)	0.07	0.072	0.065	0.065
ส่วนประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้				
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	8.0	8.4	8.6	8.6
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซออกซิเจน (O ₂)	11.2	11.4	11.6	11.4
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.8	0.5	0.4	0.2
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	80.0	79.7	79.4	79.8
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของเต้าที่ออกจากคอสมัน	71.50	65.40	63.45	65.67
คุณค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจากคอสมัน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	5205.69	4360.11	4022.36	3870.09
ปริมาณเต้าที่ออกจากไซโคลน (กรัม)	95.0	70.22	98.21	112.46
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของเต้าที่ออกจากไซโคลน	39.93	38.69	32.39	30.08
คุณค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจากไซโคลน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	2765.49	2492.20	2193.49	1747.11

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลของผลการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดหลอม 850 องศาเซลเซียส และมีอัตราการไหลของอากาศ 1.4333, 1.5733, 1.7167 และ 1.8500 (ม³/นาท) ตามลำดับ

อัตราการไหลของอากาศ (ม ³ /นาท)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (นาท)	18	16	18	22
อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาท)	150.50	156.63	174.49	180.80
ปริมาณการนำเข้าออกจากคอลัมน์ (กรัม)	525.0	420.0	520.02	676.06
อัตราการนำเข้าออกจากคอลัมน์ (กรัม/นาท)	29.17	26.25	28.59	30.73
ปริมาณเต้าที่อยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)	1512.75	1600.0	1632.77	1596.12
ระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์อยู่ภายในคอลัมน์ (นาท)	10.05	10.22	9.36	8.83
ความเร็วของอากาศ (ซม./วินาที)	76.08	83.16	91.12	98.20
ความเร็วของอากาศ/ความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน	1.55	1.70	1.86	2.00
อัตราการไหลของน้ำ (กรัม/นาท)	90.0	90.0	90.0	90.0
จุดหลอมของน้ำหะเข้าสู่อุณหภูมิคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	25.0	27.0	27.0	21.0
จุดหลอมของไอน้ำหะออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	330.0	345.0	376.0	418.0
จุดหลอมของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)				
จุดหลอมกระเปาะเปียก	21.0	24.0	22.0	22.0
จุดหลอมกระเปาะแห้ง	26.0	28.0	28.0	28.0
ความดันของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง)	0.022	0.028	0.023	0.023

ตารางที่ 2 (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาที)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
จุดหนีของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ ณ จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)	520.0	525.0	548.0	608.0
จุดหนีของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกสันนิ (องค์ค่าเซลเซียส)				
จุดหนีกระเปาะเปียก	40.0	38.0	38.0	40.0
จุดหนีกระเปาะแห้ง	61.0	40.0	46.0	57.0
ความชื้นของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกสันนิ (โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง)	0.065	0.07	0.064	0.062
ส่วนประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้				
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	9.0	8.8	8.8	9.0
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซออกซิเจน (O ₂)	10.0	10.4	11.6	11.8
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.7	0.6	0.2	0.2
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	80.3	80.2	79.4	79.0
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของแก๊สที่ออกจากคอกสันนิ	68.10	64.57	61.30	57.87
คุณค่าทางความร้อนของแก๊สที่ออกจากคอกสันนิ (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4973.56	4370.80	3867.32	3430.05
ปริมาณแก๊สที่ออกจากไซโคลน (กรัม)	42.0	72.38	150.39	262.60
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของแก๊สที่ออกจากไซโคลน	42.50	38.20	35.04	29.25
คุณค่าทางความร้อนของแก๊สที่ออกจากไซโคลน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	2900.50	2321.65	2177.38	1711.16

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของการทดลองเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และมีอัตราการไหลของอากาศที่ 1.4333, 1.5733, 1.7167 และ 1.8500 (ม³/นาท) ตามลำดับ

อัตราการไหลของอากาศ (ม ³ /นาท)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลการทดลอง				
เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (นาท)	16	18	18	19
อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาท)	179.00	185.97	193.26	212.02
ปริมาณการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม)	450.00	500.04	559.98	580.07
อัตราการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม/นาท)	28.13	27.78	31.14	30.53
ปริมาณแก๊สที่อยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)	1901.59	1627.91	1701.49	1600.01
ระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์อยู่ในคอลัมน์ (นาท)	10.62	8.75	8.80	7.55
ความเร็วของอากาศ (ชม./วินาที)	76.08	83.16	91.12	98.20
ความเร็วของอากาศ/ความเร็วที่สูงสุดในการนำ ให้แก๊สที่โอซิเจน	1.55	1.70	1.86	2.00
อัตราการไหลของน้ำ (กรัม/นาท)	90.0	90.0	90.0	90.0
อุณหภูมิของน้ำขณะเข้าสู่คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	26.0	27.0	25.0	25.0
อุณหภูมิของไอน้ำขณะออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	370.0	397.0	424.0	457.0
อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)				
จุดเยือกแข็ง	24.0	25.0	22.0	22.0
จุดเยือกแข็ง	27.0	28.0	26.0	26.0
ความชื้นของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (โมลของน้ำ/ โมลของอากาศแห้ง)	0.028	0.03	0.02	0.02



ตารางที่ 3 (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาที)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
จุดหนีของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ ฌ.จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)	572.0	585.0	616.0	668.0
จุดหนีของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกสันน์ ฌ. จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)				
จุดหนีมีกระเปาะเปือก	41.0	41.0	39.0	39.0
จุดหนีมีกระเปาะแห้ง	55.0	44.0	48.0	41.0
ความชื้นของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกสันน์ (โวลของน้ำ/โวลของอากาศแห้ง)	0.076	0.082	0.068	0.065
ส่วนประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้				
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	8.2	8.6	8.8	9.0
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซออกซิเจน (O ₂)	12.0	12.0	12.2	12.2
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.8	0.6	0.2	0.2
อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	79.0	78.8	78.8	78.6
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของ เถ้าที่ออกจากคอกสันน์	62.35	53.09	50.37	47.33
คุณค่าทางความร้อนของ เถ้าที่ออกจากคอกสันน์ (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4909.61	3510.07	2931.93	2685.68
ปริมาณเถ้าที่ออกจากไพอีโคลน (กรัม)	43.0	72.09	157.38	172.23
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของ เถ้าที่ออกจากไพอีโคลน	41.90	32.70	33.62	31.47
คุณค่าทางความร้อนของ เถ้าที่ออกจากไพอีโคลน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	2861.63	2212.50	1962.49	1811.60

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลของการทดสอบเผาไหม้ถ่านลิกไนท์ที่จุดหลอม 950 องศาเซลเซียส และมีอัตราการไหลของอากาศ 1.4333, 1.5733, 1.7167 และ 1.8500 (ม.³/นาทีก) ตามลำดับ)

อัตราการไหลของอากาศ (ม. ³ /นาทีก)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง				
เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (นาทีก)	15	16	16	17
อัตราการป้อนถ่านลิกไนท์ (กรัม/นาทีก)	204.00	216.74	221.65	237.70
ปริมาณการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม)	625.00	524.96	530.24	619.99
อัตราการนำแก๊สออกจากคอลัมน์ (กรัม/นาทีก)	8.17	7.84	7.04	7.24
ปริมาณแก๊สที่อยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)	1666.8	1699.89	1559.90	1720.1
ระยะเวลาที่ถ่านลิกไนท์อยู่ภายในคอลัมน์ (นาทีก)	8.17	7.84	7.04	7.24
ความเร็วของอากาศ (ซม./วินาที)	76.08	83.16	91.12	98.20
ความเร็วของอากาศ/ความเร็วต่ำสุดในการทำ ไนโตรเจนไดออกไซด์เซ็นเซอร์	1.55	1.70	1.86	2.00
อัตราการไหลของน้ำ (กรัม/นาทีก)	90.0	90.0	90.0	90.0
จุดหลอมของน้ำขณะเข้าสู่คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	26.0	25.0	25.0	25.0
จุดหลอมของไอน้ำขณะออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)	434.0	442.0	467.0	499.0
จุดหลอมของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (องศาเซลเซียส)				
จุดหลอมกระแสเป่าเปียง	24.0	24.0	22.0	22.0
จุดหลอมกระแสเป่าแห้ง	27.0	26.0	26.0	26.0
ความชื้นของอากาศที่เข้าสู่คอลัมน์ (โมลของน้ำ/ โมลของอากาศแห้ง)	0.028	0.029	0.024	0.024

ตารางที่ 4 (ต่อ)

อัตราการใช้เชื้อเพลิงของอากาศยาน (ม. ³ /นาฬิกา)	1.4333	1.5733	1.7167	1.8500
	รายละเอียดข้อมูลผลการทดลอง			
จุดหมุดของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ ณ จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)	646.0	652.0	684.0	712.0
จุดหมุดของก๊าซร้อนที่ออกจากคอมสันน์ ณ จุดวัด (องค์ค่าเซลเซียส)				
จุดหมุดกระเปาะเปียก	44.0	44.0	44.0	40.0
จุดหมุดกระเปาะแห้ง	61.0	58.0	60.0	44.0
ความชื้นของก๊าซร้อนที่ออกจากคอมสันน์ (โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง)	0.081	0.087	0.08	0.075
ส่วนประกอบของก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้				
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	8.8	8.8	8.8	9.0
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซออกซิเจน (O ₂)	10.2	11.8	12.2	12.2
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.8	0.5	0.2	0.2
อัตราส่วนร้อยละของก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	80.2	78.9	78.8	78.6
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของเต้าที่ออกจากคอมสันน์	57.01	55.74	51.65	47.84
มูลค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจากคอมสันน์ (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	4050.02	3762.75	3163.27	2810.83
ปริมาณเต้าที่ออกจากไซโคลน (กรัม)	30.0	64.82	98.07	145.64
อัตราส่วนร้อยละคาร์บอนคงตัวของเต้าที่ออกจากไซโคลน	40.50	35.72	31.10	28.18
มูลค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจากไซโคลน (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)	2810.01	2184.46	1953.42	1657.02

ภาคผนวกที่ 6

การคำนวณ

วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ และปริมาณความร้อนที่สูญเสีย โดยอาศัยหลักการของสมการดุลมวลสารและพลังงาน (Material and Energy Balance) แสดงการคำนวณหาค่าต่าง ๆ จากข้อมูลที่ได้อาจการทดลองในตารางที่ 1 ภาคผนวกที่ 5

อุณหภูมิของการเผาไหม้ 800 องศาเซลเซียส

ฐานการคำนวณ การเผาไหม้นาน 1 นาที

สมการดุลมวลสาร

ทางเข้า

1. น้ำหนักของถ่านลิกไนท์ที่ใช้ในการเผาไหม้ 125.0 กรัม
2. น้ำหนักน้ำในถ่านลิกไนท์

ถ่านลิกไนท์มีความชื้น 23.00 %

$$\text{น้ำหนักน้ำในถ่านลิกไนท์} = \frac{23.0 \times 125.0}{100} \quad \text{กรัม}$$

$$= 1.5972 \quad \text{กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักถ่านลิกไนท์แห้ง} = 125.0 - 1.5972 \quad \text{กรัม}$$

$$= 123.4028$$

3. น้ำหนักของอากาศและน้ำที่ให้ออกเข้าไปในคอมสันน์

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ} = 1.43333 \times 10^3 \quad \text{ลิตร}$$

$$= 1433.3 \quad \text{ลิตร}$$

ปริมาตรของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

$$V_2 = \frac{V_1 P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$= \left(\frac{1433.3 \times 29}{29.92} \right) \left(\frac{273.1}{273.1 + 27} \right)$$

$$= 1264.24 \quad \text{ลิตร}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนกรัม-โมลของอากาศที่เข้าไปทั้งหมด} &= \frac{1264.24}{22.4} \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 56.4393 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 \text{อากาศที่เข้าคอลัมน์มีความชื้น 0.026 โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง} \\
 \text{มีน้ำอยู่ในอากาศ} &= \frac{0.026 \times 56.4393}{1.026} \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 1.4302 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 \text{น้ำหนักของน้ำในอากาศ} &= 25.74 \quad \text{กรัม} \\
 \text{จำนวนกรัม-โมลของอากาศแห้ง} &= 56.4393 - 1.4302 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 55.0091 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 \text{ในอากาศมีก๊าซไนโตรเจน} &= 55.0091 \times 0.79 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 43.4572 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 1216.80 \quad \text{กรัม} \\
 \text{ในอากาศมีก๊าซออกซิเจน} &= 55.0091 \times 0.21 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 11.5519 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 &= 369.66 \quad \text{กรัม} \\
 \text{น้ำหนักของอากาศที่เข้าไปทั้งหมด} &= 1216.80 + 369.66 \quad \text{กรัม} \\
 &= 1586.46 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

ทางออก

1. น้ำหนักของก๊าซที่ออกจากคอสมิน

เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อย และถ้าสมมติว่าในถ้ำถักไนท์มีปริมาณไนโตรเจนน้อยมาก จึงไม่น่ามาพิจารณา ดังนั้นจำนวนกรัม-โมลของก๊าซไนโตรเจนหลังจากออกจากคอสมินจึงเท่ากับ 43.4572 กรัม-โมล และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในอากาศที่เข้ามีค่า 0.03 % ซึ่งมีความเข้มข้นมากจึงไม่น่ามาคำนวณ

ก๊าซ	ร้อยละโดยปริมาตร	จำนวนกรัม-โมล	น้ำหนัก (กรัม)
ไนโตรเจน	80.0	43.4572	1216.80
คาร์บอนไดออกไซด์	8.0	4.3457	191.21
ออกซิเจน	11.2	6.0840	194.69
คาร์บอนมอนนอกไซด์	0.8	0.4346	12.17
รวม	100.0	54.3215	1614.87

ความชื้นของก๊าซที่ออกจากคอสมิน 0.07 โมลของน้ำ/โมลของอากาศแห้ง

จำนวนกรัม-โมลของน้ำที่ออกจากคอสมิน = 0.07×55.0091 กรัม-โมล

= 3.8506 กรัม-โมล

= 69.31 กรัม

น้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ = 3.8506 - 1.5972

= 1.4302 กรัม-โมล

= 0.8232 กรัม-โมล

2. น้ำหนักไถ้ที่ออกจากคอสมิน

= 30.21 กรัม

มีการรับอนุภาคตัวอยู่ในไถ้ที่ออกจากคอสมิน = $\frac{30.21 \times 71.50}{100}$ กรัม

= 21.60 กรัม

$$\begin{aligned}
 &= 1.80 \quad \text{กรัม-โมล} \\
 3. \text{ น้ำหนักแก้วที่ออกจากไซโคลน} &= \frac{95}{24} \quad \text{กรัม} \\
 &= 3.96 \quad \text{กรัม} \\
 \text{มีการบดผงตัวอยู่ในแก้วที่ออกจากไซโคลน} &= \frac{3.96 \times 39.93}{100} \quad \text{กรัม} \\
 &= 1.5812 \quad \text{กรัม} \\
 &= 0.1318 \quad \text{กรัม-โมล}
 \end{aligned}$$

สมดุลมวลสาร

ทางเข้า		ทางออก	
น้ำหนักถ่านลิกไนท์แห้ง	96.25 กรัม	น้ำหนักก๊าซที่ออกจากคอลัมน์	1614.87 กรัม
น้ำหนักน้ำในถ่านลิกไนท์	28.75 กรัม	น้ำหนักน้ำในก๊าซ	69.31 กรัม
น้ำหนักอากาศ	1586.46 กรัม	น้ำหนักแก้วที่ออกจากคอลัมน์	30.21 กรัม
น้ำหนักน้ำในอากาศ	25.74 กรัม	น้ำหนักแก้วที่ออกจากไซโคลน	3.96 กรัม
		น้ำหนักที่สูญหาย	18.85 กรัม
รวม	1737.20 กรัม	รวม	1737.20 กรัม

ปริมาณร้อยละของอากาศที่มากเกินไป

ฐานการคำนวณ 100 กรัม-โมล ของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้

$$\text{ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในก๊าซจากการเผาไหม้} = 80.0 \quad \text{กรัม-โมล}$$

$$\text{ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในก๊าซจากการเผาไหม้} = 11.2 \quad \text{กรัม-โมล}$$

สมมุติว่าก๊าซไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซใด ๆ ดังนั้นจำนวนกรัมโมลของก๊าซไนโตรเจนที่เข้าสู่คอลัมน์และที่ออกจากคอลัมน์จึงเท่ากัน นั่นคือก๊าซไนโตรเจนที่เข้าสู่คอลัมน์มีปริมาณ 80.0 กรัม-โมล

$$\text{ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เข้าสู่คอลัมน์} = \frac{21.0}{79.0} \times 800$$

$$= 21.2658 \quad \text{กรัม-โมล}$$

ทางเข้า

1. ค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอกสันน์ = $4614.85 \times 12.5 \times 10^{-3}$
= 576.86 กิโลแคลอรี
2. เอนทาลปีของถ่านลิกไนท์ = 0 กิโลแคลอรี
3. เอนทาลปีของน้ำในถ่านลิกไนท์ = 0 กิโลแคลอรี
4. เอนทาลปีของอากาศ

C_{pm} ของอากาศที่ 27 องศาเซลเซียส 6.973 แคลอรี/กรัม-โมล. องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} \text{เอนทาลปีของอากาศ} &= 6.973 \times 55.0091 \times 1 \\ &\times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$= 0.38 \text{ กิโลแคลอรี}$$

5. เอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ

ปริมาณความร้อนของการระเหยที่ 26 องศาเซลเซียส 10491.44 แคลอรี/กรัม-โมล

$$\begin{aligned} \text{เอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ} &= 10491.44 \times 1.4302 \times 10^{-3} \\ &\text{กิโลแคลอรี} \end{aligned}$$

$$= 15.0 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ให้เข้าไปทั้งหมด} &= 576.86 + 0.38 + 15.0 \\ &\text{กิโลแคลอรี} \end{aligned}$$

$$= 592.24 \text{ กิโลแคลอรี}$$

ทางออก

1. ค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจากคอกสันน์ = $5205.69 \times 30.21 \times 10^{-3}$
กิโลแคลอรี
= 157.26 กิโลแคลอรี

$$2. \text{ ค่าทางความร้อนของแท่งที่ออกจากไซโคลน} = 2765.49 \times 3.96 \times 10^{-3} \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 10.95 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$3. \text{ ค่าทางความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์} = 67636 \text{ แคลอรี/กรัม-โมล}$$

$$\text{ค่าทางความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์} = 67636 \times 0.4346 \times 10^{-3}$$

$$= 29.39 \text{ กิโลแคลอรี}$$

4. เอนทาลปีของก๊าซร้อนที่ออกจากคอกสันนิ

$$\Delta H = nC_p \Delta T$$

$$\Delta H_{N_2} = 43.4572 \times 7.1485(485 - 26) \times 10^{-3} \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 142.59 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$\Delta H_{O_2} = 6.0840 \times 7.4987(485 - 26) \times 10^{-3} \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 20.94 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$\Delta H_{CO} = 0.4346 \times 7.1989(485 - 26) \times 10^{-3} \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 1.44 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$\Delta H_{CO_2} = 4.3457 \times 10.7289(485 - 26) \times 10^{-3} \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 21.40 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$\Delta H = 142.59 + 20.94 + 1.44 + 21.40 \text{ กิโลแคลอรี}$$

$$= 186.37 \text{ กิโลแคลอรี}$$

5. เอนทาลปีของไอไอน้ำในก๊าซที่ได

$$\text{ปริมาณความร้อนของการระเหยที่ 26 องศาเซลเซียส} = 10491.44 \text{ แคลอรี/กรัม-โมล}$$

$$C_{pm} \text{ ของน้ำที่จุดเดือดที่ 26 - 485 องศาเซลเซียส} = 8.5195 \text{ แคลอรี/กรัม-โมล.}$$

องศาเซลเซียส

$$\text{เอนทาลปีของไอไอน้ำ} = 3.8506 [10491.44 + 8.5195(485-26)] \times 10^{-3}$$

$$= 55.46 \text{ กิโลแคลอรี}$$

6. ความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่น้ำ

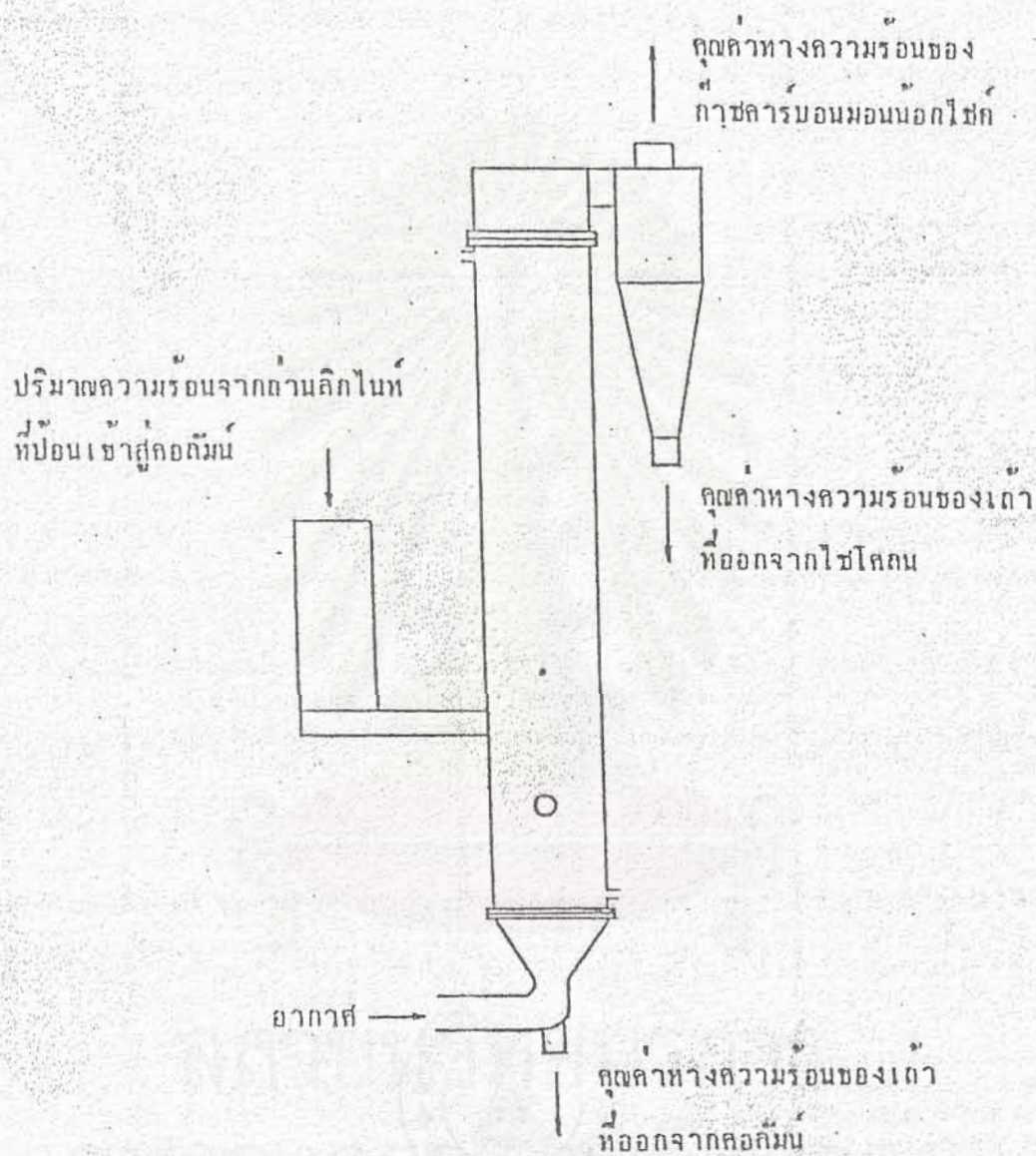
$$\begin{aligned}
 &\text{ปริมาณความร้อนของน้ำ (ของเหลว) ที่ 26 องศาเซลเซียส} = 26.02 \text{ แคลอรี/กรัม} \\
 &\text{ปริมาณความร้อนของไอน้ำที่ 322 องศาเซลเซียส} = 743.73 \text{ แคลอรี/กรัม} \\
 &\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่น้ำ} = (743.73 - 26.02) \times 90 \times 10^{-3} \\
 &= 64.59 \text{ กิโลแคลอรี} \\
 &\text{รวมปริมาณความร้อนทั้งหมด} = 157.26 + 10.95 + 29.39 \\
 &\quad + 186.37 + 55.46 + 64.59 \\
 &= 504.02 \text{ กิโลแคลอรี}
 \end{aligned}$$

สมดุลพลังงาน

ทางเข้า	ทางออก
คุณค่าของความร้อนของถ่านลิกไนท์ 576.86 กิโลแคลอรี	คุณค่าทางความร้อนของเต้าที่ออกจาก คอหม้อ 157.26 กิโลแคลอรี
เอนทาลปีของถ่านลิกไนท์ 0 กิโลแคลอรี	คุณค่าทางความร้อนของเต้าที่ออก จากไซโคลน 10.95 กิโลแคลอรี
เอนทาลปีของน้ำในถ่านลิกไนท์ 0 กิโลแคลอรี	คุณค่าทางความร้อนของก๊าซ คาร์บอนมอนนอกไซด์ 29.39 กิโลแคลอรี
เอนทาลปีของอากาศ 0.38 กิโลแคลอรี	เอนทาลปีของก๊าซร้อนที่ออกจากคอหม้อ 186.37 กิโลแคลอรี
เอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ 15.0 กิโลแคลอรี	เอนทาลปีของไอน้ำในก๊าซที่ได้ 55.46 กิโลแคลอรี
	ความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่น้ำ 64.59 กิโลแคลอรี
	ความร้อนที่สูญหาย 88.22 กิโลแคลอรี
รวม 592.24 กิโลแคลอรี	รวม 592.24 กิโลแคลอรี

$$\begin{aligned} \text{ความร้อนที่สูญหายคิดเป็นร้อยละ} &= \frac{88.22 \times 100}{592.24} \\ &= 14.90 \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เมื่อพิจารณาารวมทั้งระบบ



รูปที่ 1 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้



3 0021 00101312 7

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพของการเผาไหม้} &= \text{ปริมาณความร้อนที่ใส่เข้าไปในระบบ} \\
 &\quad \text{คุณค่าทางความร้อนของ เถ้าที่ออกจาก} \\
 &\quad \text{คอสัมภ์ - คุณค่าทางความร้อนของ} \\
 &\quad \text{เถ้าที่ออกจากไซโคลน - คุณค่าทาง} \\
 &\quad \text{ความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์} \\
 &\quad \text{ต่อปริมาณความร้อนที่ใส่เข้าไปในระบบ} \\
 \text{คิดเป็นร้อยละ} &= \frac{(592.24 - 157.26 - 10.95 - 29.39)}{592.24} \times 100 \\
 &= 66.64
 \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เมื่อพิจารณา เฉพาะไอน้ำร้อนบวดยิ่งที่ได้รับ

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่น้ำ} &= 64.59 \text{ กิโลแคลอรี} \\
 \text{คุณค่าทางความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่ป้อนเข้าสู่คอสัมภ์} &= 576.86 \text{ กิโลแคลอรี} \\
 \text{ประสิทธิภาพของการเผาไหม้หรือความร้อนที่นำไป} \\
 \text{ใช้ประโยชน์} &= \frac{64.59}{576.86} \times 100 \% \\
 \text{คิดเป็นร้อยละ} &= 11.20
 \end{aligned}$$

