บทที่4

อุปกรณ์การทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังจะได้กล่าวต่อไปดังนี้

4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์การทดลอง

ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ที่ใช้การทดลองปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นและกระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วยอุปกรณ์ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 9 ส่วน คือ ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ ระบบกระจายอากาศ ระบบป้อนเชื้อเพลิง ระบบป้อนอากาศ ระบบจุดอุ่นเบด ระบบท่อน้ำรับความร้อนในเบดและเหนือเบด ระบบเครื่องแยกฝุ่น ระบบวัดอุณหภูมิ และระบบวัดอัตราการไหล โดยแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์

ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์สร้างจากแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร โดยมีพื้นที่หน้าตัดภายนอก 0.97 × 0.97 ตารางเมตร ด้านในบุด้วยอิฐทนไฟและอิฐฉนวนทนไฟหนา 0.25 เมตรโดยชั้นนอกเป็นอิฐทนไฟรุ่น KB 25 และชั้นในเป็นอิฐฉนวนทนไฟชนิด HI 23 โดยเหลือพื้นที่หน้าตัดภายในเท่ากับ0.45 × 0.45 ตารางเมตร ความสูงของตัวเตาเผาทั้งหมดเท่ากับ 2.5 เมตร แบ่งออกเป็นสามท่อนเพื่อง่ายต่อการติดตั้งความสูงท่อนแรก 1.0 เมตร ท่อนที่สองสูง 0.5 เมตร ท่อนที่สามสูง 1.0 เมตร สำหรับท่อนที่สามที่ความสูงของเตาเผา 2-2.5 เมตร ก่ออิฐฉนวนชั้นเดียวเพื่อขยายพื้นที่หน้าตัดส่วนนี้เป็นส่วนฟรีบอร์ดเพื่อลดความเร็วของอนุภาคทรายกันไม่ให้ปลิวออกไปกับกระแสอากาศมากพื้นที่หน้าตัดของเตาเผาส่วนฟรีบอร์ดมีค่าเท่ากับ 0.60 × 0.60 ตารางเมตร เพดานบนของเตาเผาบุด้วยฝากันความร้อนชนิดเดียวกับที่ใช้ทำฝาปิดเตาหลอมโลหะมีความหนา 2.5 นิ้ว ส่วนประกอบของฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.2

4.1.2 ระบบกระจายอากาศ

แผ่นกระจายอากาศที่ใช้สำหรับเตาเผาที่ได้ออกแบบทำจากเหล็กแผ่นหนา 10 มิลลิเมตร

ประกอบด้วย Nozzle stand pipe จำนวน 12 หัว และ bubble cap สำหรับช่วยในกรณีป้อนเชื้อเพลิงใต้เบดอีกจำนวน 4 หัว ลักษณะการจัดเรียงตัวของ Nozzle stand pipe และ bubble cap มีการจัดเรียงกล่าวคือ สำหรับ Nozzle stand pipe ประกอบด้วย stand pipe เรียงเป็นแถวๆละ 3 หัว ในแถวหนึ่งๆ pipe แต่ละหัวอยู่ห่างกันระยะ 165 มิลลิเมตร pipe นี้มีจำนวนทั้งสิ้น 4 แถว แต่ละแถวระยะห่างกันเท่ากับ 110 มิลลิเมตร รวมเป็นจำนวน Nozzle stand pipe ทั้งหมด 12 หัว ลักษณะ Nozzle stand pipe เป็นท่อเหล็กปลายปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ¾ นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 นิ้ว แต่ละหัวเจาะรูตามแนวเส้นรอบวงจำนวน 8 × 12 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวของ Nozzle ทั้ง 12 หัวโดยรวมเป็น 36.2 ตารางเซนติเมตร จากอัตราการไหลของอากาศขาเข้า ความสูงของ Nozzle วัดจากพื้นเตาเท่ากับ 170 มิลลิเมตร สำหรับหัว Nozzle stand pipe ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1, 3 ของแถวที่ 1 และ 4 และตำแหน่งที่ 2 ของแถวที่ 2 และ 3 ภายในท่อยังประกอบด้วยท่อทองแดงขนาด ¼ นิ้ว เป็นไส้อยู่ตรงกลาง โดยท่อทองแดงนี้สอดผ่านท่อส่งลมด้านล่างขึ้นมาเพื่อส่งก๊าซ LPG สำหรับผสมกับอากาศเพื่อใช้ในการอุ่นเตาเผา

สำหรับ bubble cap ลักษณะเป็นท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ¾ นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 นิ้ว ปลายเปิด มีหมวกครอบบริเวณปากท่อเพื่อป้องกันไม่ให้ทรายไหลย้อนกลับเข้าไปในท่อ ชุด bubble cap นี้มีจำนวน 4 หัว วางในตำแหน่งแนวกึ่งกลางเส้นทะแยงมุมของ stand pipe คู่แรกและคู่ที่สองของแถวที่ 1, 2 และแถว 3, 4 ชุด buble cap นี้ออกแบบมาเพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการป้อนเชื้อเพลิงเข้าใต้เบดเพราะว่าเชื้อเพลิงบางชนิดมีขนาดเบาและฟุ้งง่ายไม่เหมาะแก่การป้อนเข้าเหนือเบดอีกทั้งในกรณีที่ไม่ได้ใช้ป้อนเชื้อเพลิงยังใช้ช่วยป้อนลมสำหรับใช้ในการฟลูอิดไดซ์ได้ในกรณีที่ลมจากพัดลมเป่าอากาศไม่พอต่อการใช้งานโดยสามารถปรับให้ต่อเข้ากับท่อลมของเครื่องอัดอากาศได้

สำหรับทั้ง Nozzle stand pipe และ bubble cap สามารถถอดและใส่ง่าย เนื่องจากมีลักษณะเป็นท่อมีบ่าเป็นปีกยื่นออกมา มีเส้นผ่านศูนย์กลางของปีก 1.5 นิ้ว เพื่อกำหนดระดับในการติดตั้งและสามารถติดตั้งได้โดยใช้แหวนล็อคเพลารัดที่ใต้บ่าตรงตำแหน่งที่ทำรอยบากไว้

สำหรับท่อส่งอากาศสำหรับส่งอากาศเข้าแผ่นกระจายอากาศ ประกอบด้วยท่อส่งอากาศหลักซึ่งเป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ต่อจากพัดลมเป่าอากาศเข้ามายังท่อส่งอากาศ

เข้าสู่ Nozzle stand pipe ท่อ sparger มีลักษณะเป็นท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 3 ท่อ ต่อมาจากท่อส่งอากาศหลักแต่ละท่อมีโกล์บวาลว์ทำหน้าที่ปรับแต่งอากาศให้เข้าท่อ sparger เป็นจำนวนเท่าๆกัน ลักษณะของระบบกระจายอากาศแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.3

4.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผา ประกอบด้วยกรวยป้อนวัสดุเชื้อเพลิงรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.55 × 0.55 เมตร สูง 0.70 เมตร ทางด้านล่างเป็นสกรูขนถ่ายสำหรับหมุนพาเอาเชื้อเพลิงเข้าสู่ตัวเตา (Screw feeder) โดยอาศัยการขับจากมอเตอร์ การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอาศัยการขับจากมู่เล่ที่สามารถปรับรอบได้ (Pully variable speed) เชื้อเพลิงจะถูกพาเข้าเตาโดยใช้ลมเป็นพาหะโดยติดตั้ง Nozzle หรือหัวพ่นอากาศ ที่ตำแหน่งปลายท่อลำเลียงเชื้อเพลิงเพื่อทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของอากาศที่ใช้ในการขนส่งเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาและช่วยป้องกันการย้อนกลับของอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนรายละเอียดลักษณะของระบบป้อนเชื้อเพลิงแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.4

4.1.4 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศจะใช้พัดลมทำความดันโดยแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ พัดลมเป่า (Force draft fan) และพัดลมดูด (Induced draft fan) ระบบป้อนอากาศโดยการใช้พัดลมเป่าและดูดอากาศเป็นเครื่องมือที่ใช้ป้อนอากาศเข้าทางด้านล่างและดูดอากาศออกทางด้านบนของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด พัดลมเป่าอากาศนี้เป็นพัดลมชนิด TB-100 สามารถผลิตอากาศให้มีอัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 13 ลบ.เมตร/นาทีและสร้างความดันของพัดลมที่มากที่สุดเท่ากับ 700 มิลลิเมตรน้ำ จากการทดสอบสามารถสร้างความดันขณะใช้งานได้ 270 มิลลิเมตรน้ำ มอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมเป็นชนิด 3 เฟส ขนาด 7.5 แรงม้า สามารถต่อไฟฟ้า 3 เฟส เข้ากับขั้วต่อไฟฟ้าของมอเตอร์ได้แบบต่อตรง สำหรับพัดลมเป่าอากาศแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.5 สำหรับพัดลมดูดอากาศด้านบนสามารถดูดอากาศได้ด้วยอัตราการดูดสูงสุดเท่ากับ 10 ลบ.เมตร/นาที สร้างความดันสูงสุด 250 มิลลิเมตรน้ำ มอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมเป็นแบบ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้าและสามารถต่อไฟฟ้า 3 เฟส เข้ากับขั้วต่อไฟฟ้าของมอเตอร์แบบต่อตรงเช่นเดียวกันกับพัดลมเป่า ลักษณะของพัดลมดูดอากาศแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.6

ระบบป้อนอากาศโดยเครื่องอัดอากาศเป็นระบบป้อนอากาศสำรองที่สำหรับช่วยในการฟลูอิดไดเซชั่นและป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาโดยเดินท่อจากเครื่องอัดอากาศต่อเข้าไปในระบบทางด้านล่างผ่านหัวกระจายลมแบบหมวก (Bubble cap) ขนาด 1 นิ้ว ตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.2 จำนวน 4 หัว

4.1.5 ระบบจุดอุ่นเบด

ระบบจุดอุ่นเบดที่ใช้เป็นการจุดอุ่นเหนือเบด โดยการใช้ Pilot burner เป็นตัวจุดก๊าซ LPG ในการอุ่นเบด ก๊าซหุงต้มที่ใช้จะถูกป้อนเข้าไปในระบบ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะป้อนเข้าทางด้านล่างของเตาผสมกับอากาศจากเครื่องอัดอากาศเข้าไปในตัวเตา โดยผ่านทาง Nozzle stand pipe ของแผ่นกระจายลมจำนวน 6 ท่อ ตามรายละเอียดในข้อ 4.1.2 ส่วนที่สองป้อนเข้า Pilot burner เพื่อจุดอุ่นเตาเหนือเบดโดยแบ่งก๊าซบางส่วนป้อนหัวเทียนที่เสียบอยู่ที่ส่วนตัวของ Pilot burner เพื่อทำหน้าที่สปาร์คให้เกิดประกายไฟ เพื่อให้ burner สามารถทำงานได้ ความยาวของเปลวจาก burner ประมาณ 0.7 เมตร เมื่อก๊าซ LPG ผสมอากาศลอยตัวแทรกผ่านอนุภาคเบดที่เป็นทรายขึ้นมาจนกระทั่งมีความหนาแน่นพอจะเกิดการลุกติดไฟจากเปลวของ burner การเผาไหม้ของก๊าซผสมจะเกิดที่ผิวหน้าของเบดอุณหภูมิของอนุภาคเบดจะค่อยๆ ร้อนขึ้นจากผิวหน้าเบดจนกระทั่งร้อนทั่วถึง ระบบจุดอุ่นเตาแบบนี้มีข้อดีคือสามารถอุ่นเตาได้รวดเร็ว การเผาไหม้ของก๊าซสามารถสังเกตุได้จาก sight glass หนา 10 มิลลิเมตร โดยมีท่อลมขนาด ¼ นิ้ว ทำหน้าที่เป่า sight glass เพื่อไม่ให้เขม่าจับ ลักษณะของระบบดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.7

4.1.6 ระบบท่อน้ำรับความร้อนในเบดและเหนือเบด

ระบบท่อน้ำรับความร้อนเป็นระบบที่ช่วยควบคุมอุณหภูมิของเบดในขณะเดินเครื่องและเพื่อศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ระบบท่อน้ำรับความร้อนมี 2 ส่วน คือระบบท่อน้ำรับความร้อนในเบดเป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.01315 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.01905 เมตร ความยาวเฉพาะส่วนพื้นที่รับความร้อน 3.37 เมตร ลักษณะของ tube เป็นรูปตัวยูจำนวน 5 คู่ ความยาวคู่ละ 1.173 เมตร ส่วนของพื้นที่รับความร้อนเป็นส่วนที่ออกแบบให้มีลักษณะยื่นเข้าไปในตัวเตาเผาจริงซึ่งมีความยาวคู่ละ 0.673 เมตร ท่อน้ำเข้า-ออก (Water Supply/WaterReturn) ของระบบท่อน้ำรับความร้อนจะมีลักษณะเป็นกล่องเหล็กรูปสี่เหลี่ยมยาว 0.40 เมตร กว้าง 0.15 เมตร ด้านในแบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นบนเป็นท่อน้ำเข้า tube รูปตัวยู และชั้นล่างเป็นท่อน้ำออกจาก tube รูปตัวยูเช่นเดียวกัน

ระบบท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด เป็นท่อน้ำรับความร้อนจากก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ในเตาเผา ลักษณะเป็นท่อสเตนเลส Sch.80 DN 20 หนา 9 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.0232 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.0272 เมตร ความยาวเฉพาะส่วนพื้นที่รับความร้อนเท่ากับ 60 เมตร ประกอบด้วยท่อสเตนเลสทำเป็น tube รูปตัวยู จำนวนทั้งหมด 20 คู่ มีความยาวคู่ละ 3 เมตร ลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลตัดกัน (Cross flow heat exchanger) ด้านล่างมีช่องสำหรับเทเถ้าที่ปลิวมาจากการเผาไหม้ทิ้ง

4.1.7 ระบบเครื่องแยกฝุ่น

ระบบเครื่องแยกฝุ่นเป็นไซโคลนที่ใช้สำหรับดักฝุ่น เถ้าซึ่งเกิดจากการเผาไหม้หรือทรายละเอียดที่ปลิวมากับกระแสอากาศร้อนซึ่งออกจากก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้โดยออกมาจากเตาหลังจากผ่านท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด โดยไซโคลนดังกล่าวมีขนาด 0.1143 × 0.175 เมตร ความยาวของท่อด้านดูดเข้าเท่ากับ 0.20 เมตร ท่อทางออกเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.1524 เมตร (6 นิ้ว) เพื่อให้รับกับด้านดูดของพัดลมดูดอากาศ ด้านล่างของไซโคลนมีบอลวาล์วสำหรับสามารถเทอนุภาคทรายที่ถูกไซโคลนดักไว้ออกมา ลักษณะของไซโคลนดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.8

4.1.8 ระบบวัดอุณหภูมิ

ในการติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิของเตาเผามีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถทราบโปรไฟล์อุณหภูมิช่วงต่างๆภายในเตาเผาที่ตำแหน่งในเบด กลางเบด และเหนือเบด อุณหภูมิช่วงฟรีบอร์ด อุณหภูมิของก๊าซร้อนและน้ำเข้า-ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้ข้อมูลมากที่สุดสำหรับใช้ในการวิจัยต่อไป อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของเตาเผาบริเวณต่างๆ เป็นเทอร์โมคัปเปิลรุ่น JB 35 โครเมล-อลูเมล (Chromel-Alumel) แบบ CA ชนิด K วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0-1200 ^{o}C โดยต่อเข้ากับเครื่องอ่านอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital thermometer) ตำแหน่งของที่วัดอุณหภูมิแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1.9 ระบบวัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.1.10 จุดวัดอุณหภูมิมีทั้งหมด 12 จุด โดยจำนวน 8 จุดใช้วัดอุณหภูมิของเตาเผา อีกจำนวน 4 จุดใช้วัดอุณหภูมิของระบบท่อน้ำรับความร้อนตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิมีดังนี้

จุดที่ 1 (T1) วัดอุณหภูมิในเบดที่ระยะ 0.20 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 2 (T2) วัดอุณหภูมิในเบดที่ระยะ 0.40 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 3 (T3) วัดอุณหภูมิในเบดที่ระยะ 0.55 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 4 (T4) วัดอุณหภูมิกลางเบดที่ระยะ 0.80 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 5 (T5) วัดอุณหภูมิกลางเบดที่ระยะ 1.0 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 6 (T6) วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 1.10 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 7 (T7) วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 1.40 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 8 (T8) วัดอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเตาเผาที่ระยะ 2.10 เมตร เหนือแผ่นกระจายลม

จุดที่ 9 (T9) วัดอุณหภูมิของก๊าซก่อนเข้าระบบท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด

จุดที่ 10 (T10) วัดอุณหภูมิของก๊าซหลังออกจากระบบท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด

จุดที่ 11 (T11) วัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากระบบท่อน้ำรับความร้อนในเบด

จุดที่ 12 (T12) วัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากระบบท่อน้ำรับความร้อนเหนือเบด

4.1.9 ระบบวัดอัตราการไหล

ในการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้รวมทั้งอัตราการไหลของน้ำที่เข้าท่อน้ำรับความร้อน จะใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ (Orifice meter) ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานประเทศอังกฤษ (British Standard Institute) BS1042 โดยในการวัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าท่อน้ำรับความร้อนในเบดและเหนือเบดความดันลดผ่านออริฟิซจะอ่านผ่านมานอมิเตอร์ (Manometer) เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการไหลมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลาได้โดยตรง โดยออริฟิซที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับท่อขนาด ¾ นิ้ว และในการวัดอัตราการไหลของอากาศจะใช้ Anemometer เป็นตัวเทียบค่าความสูงของมานอมิเตอร์สำหรับอัตราการไหลของอากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศแต่สำหรับพัดลมเป่า ออริฟิซจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันที่มีค่าสูงดังนั้นจึงใช้ Anemometer วัดค่าความเร็วของอากาศโดยตรงโดยเจาะรูขนาด ½ นิ้วสำหรับวัดที่ท่อขนาด 2 นิ้วก่อนเข้าแผ่นกระจายลม และนำไปคำนวณอัตราการไหลของอากาศโดยตรง

4.2 อุปกรณ์การทดลองอื่น ๆ

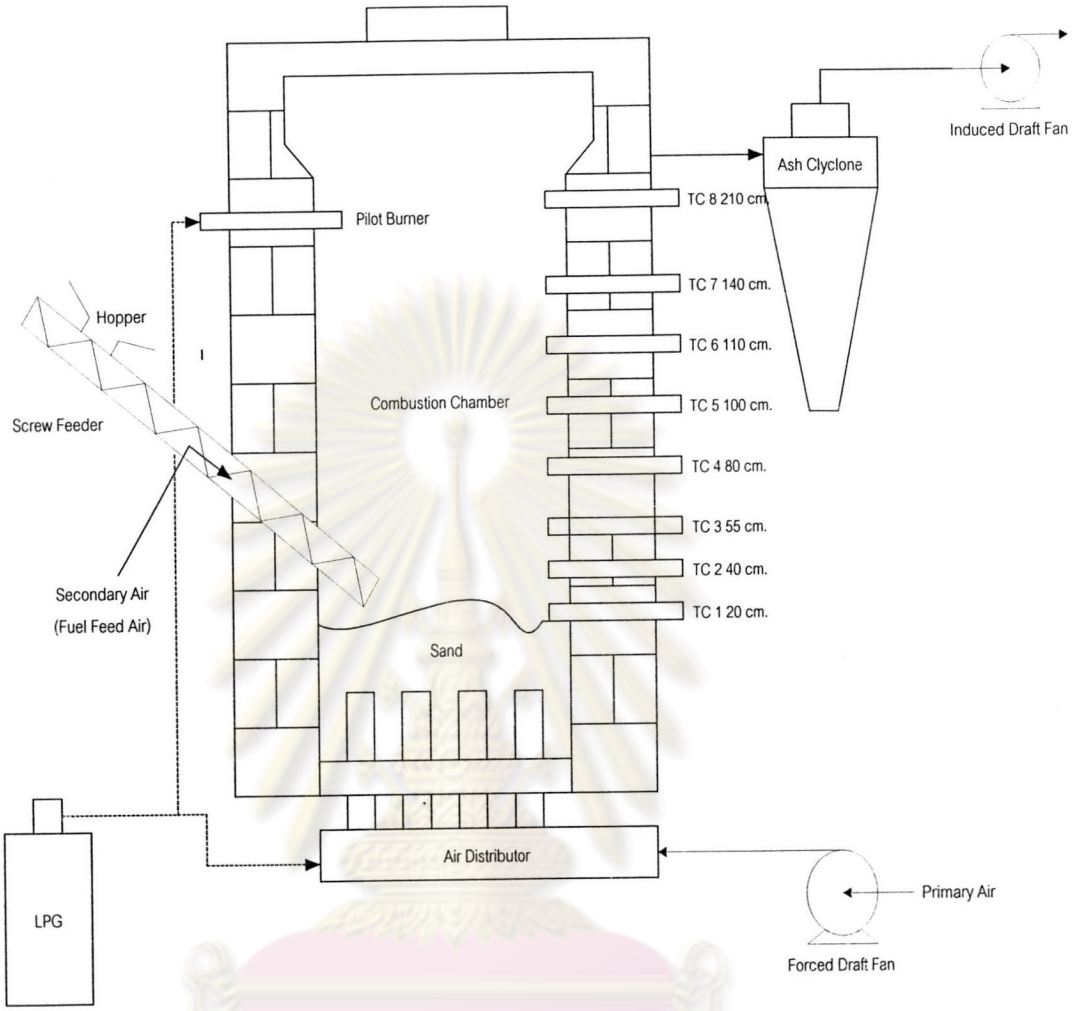
4.2.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ใช้อุปกรณ์วัดความเร็วรอบยี่ห้อ Testo รุ่น 470 สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2.1

4.2.2 อุปกรณ์การตรวจวิเคราะห์ก๊าซเสีย (Fuel Gas Analyser) สำหรับอุปกรณ์การตรวจวิเคราะห์ก๊าซเสียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซเสียยี่ห้อ Testo รุ่น 325-1 ขนาด 216×68×47 มิลลิเมตร สามารถวัดอุณหภูมิก๊าซเสียได้ในช่วง -40-600 °C, O_2 อยู่ในช่วง 0-21%, CO_2 อยู่ในช่วง 0-CO_2max และ CO อยู่ในช่วง 0-2,000 ppm รายละเอียดแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2.2

4.2.3 อุปกรณ์บดกากตะกอน อุปกรณ์การบดกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้อุปกรณ์การบดกากตะกอนยี่ห้อ Retsch รุ่น SM 2000 ขนาด 550×1,850×600 มิลลิเมตร.ใช้มอเตอร์ 3 เฟส สำหรับไฟกระแสสลับและ 1 เฟส สำหรับไฟกระแสตรง กำลังไฟฟ้า 1,500 Watt ความเร็วของมอเตอร์ 750 rpm ที่ 50 Hz, 850 rpm ที่ 60 Hz, 1,430 rpm ที่ 50 Hz และ 1,690 rpm ที่ 60 Hz ใช้ตะแกรงร่อนขนาด 0.25-10.0/20.0 มม.รายละเอียดต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 4.2.3

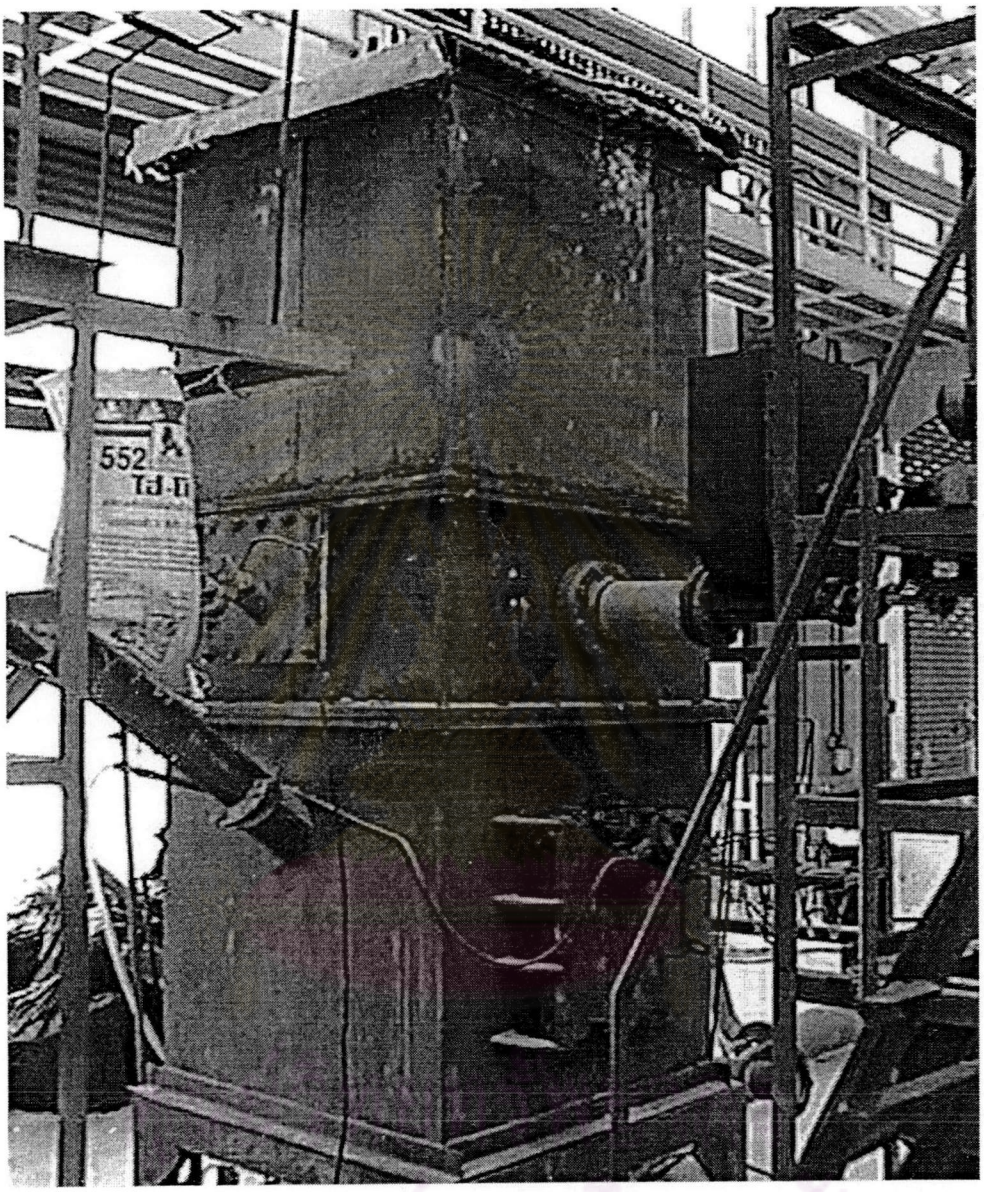
4.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วอากาศ (Anemometer) ในการทดลองครั้งนี้ใช้อุปกรณ์วัดค่าความเร็วของอากาศยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-44 ขนาด 72×180×32 มลิลิเมตร โพรบวัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวของโพรบ 245 มิลลิเมตร (ขณะที่ยังไม่ได้ยืดออก) และมีความยาวสูงสุด 940 มิลลิเมตร ย่านการวัดลมอยู่ในช่วง 0.2-20.0 m/s, 0.7-72.0 km/hr, 40-3,940 ft/min, 0.4-38.8 knots รายละเอียดของอุปกรณ์วัดความเร็วลมแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



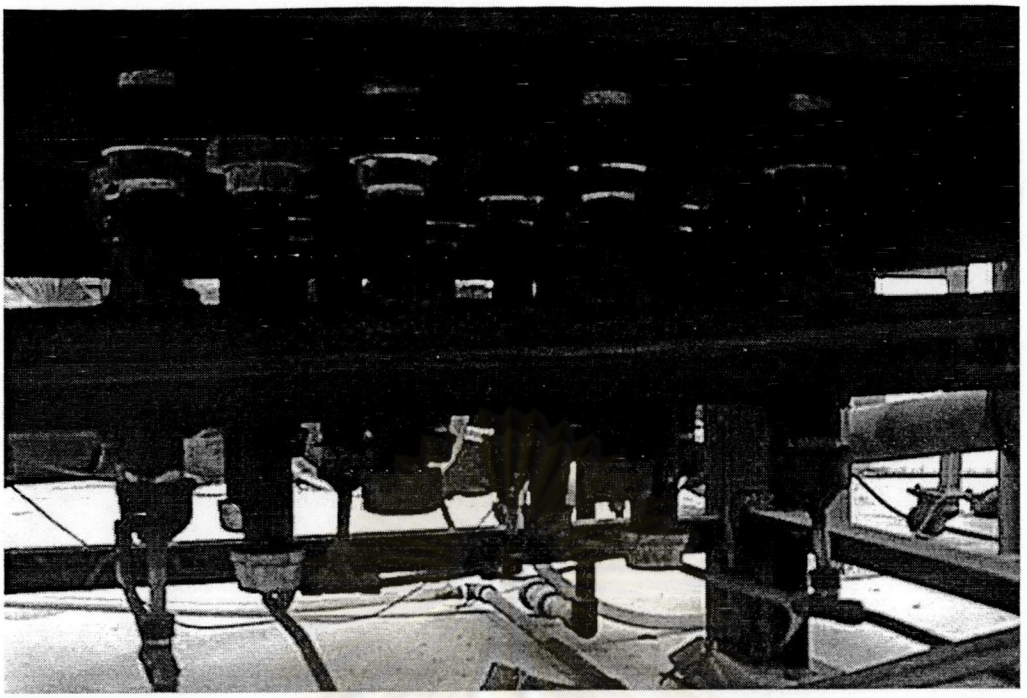
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1.1 เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

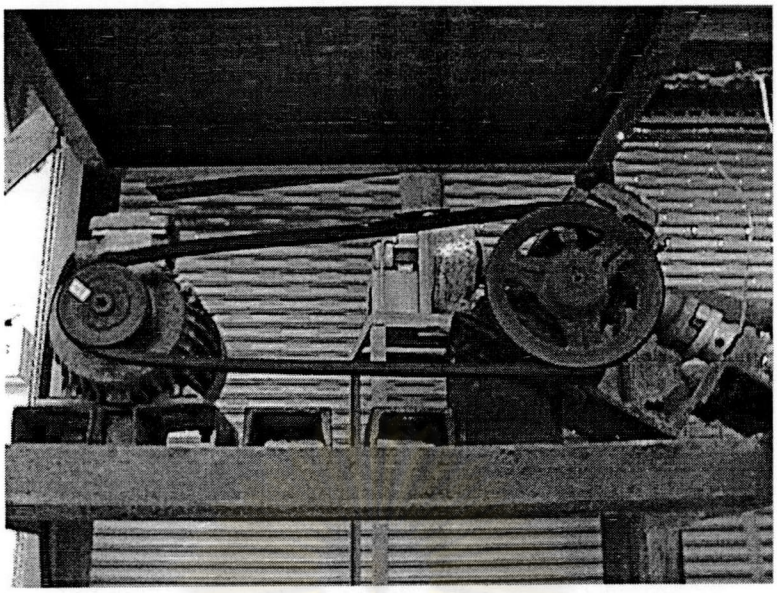


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

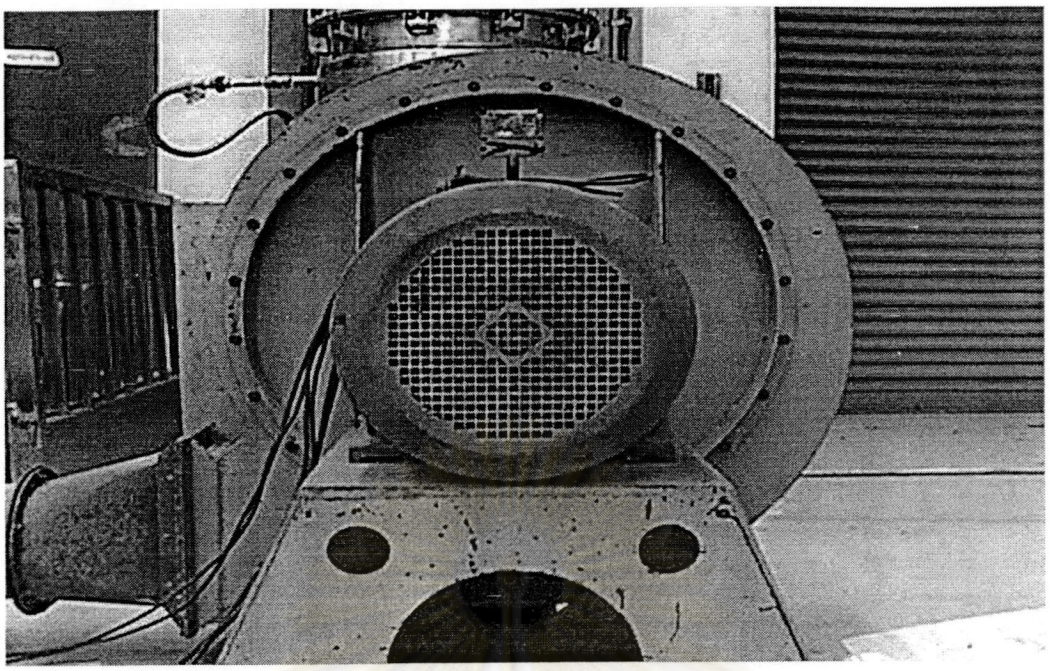
รูปที่ 4.1.2 ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์



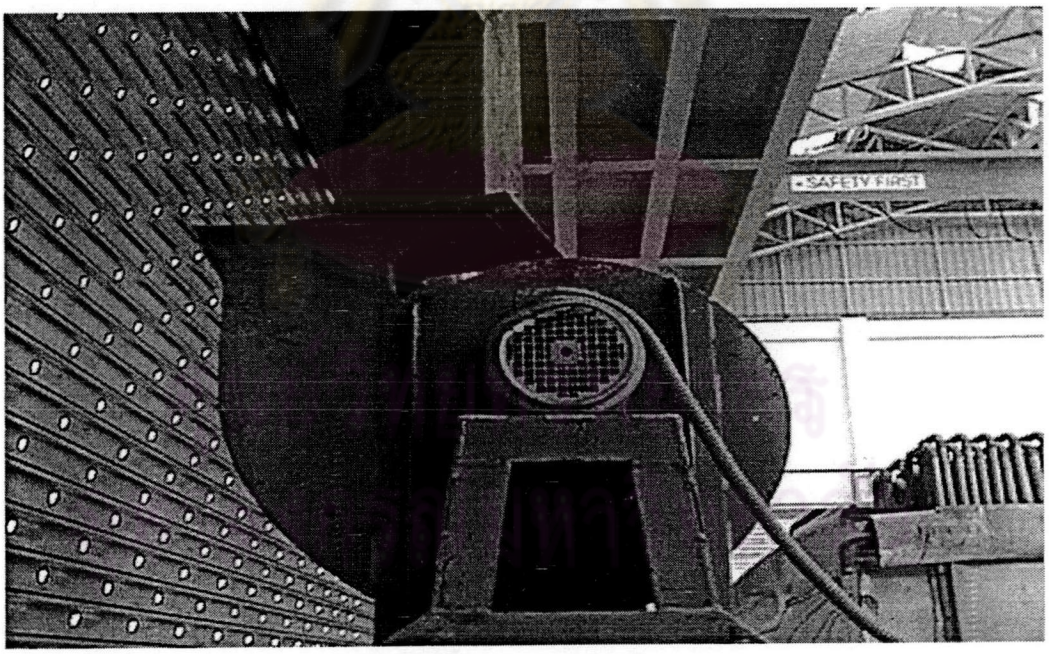
รูปที่ 4.1. 3 ระบบกระจายอากาศ



รูปที่ 4.1.4 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง



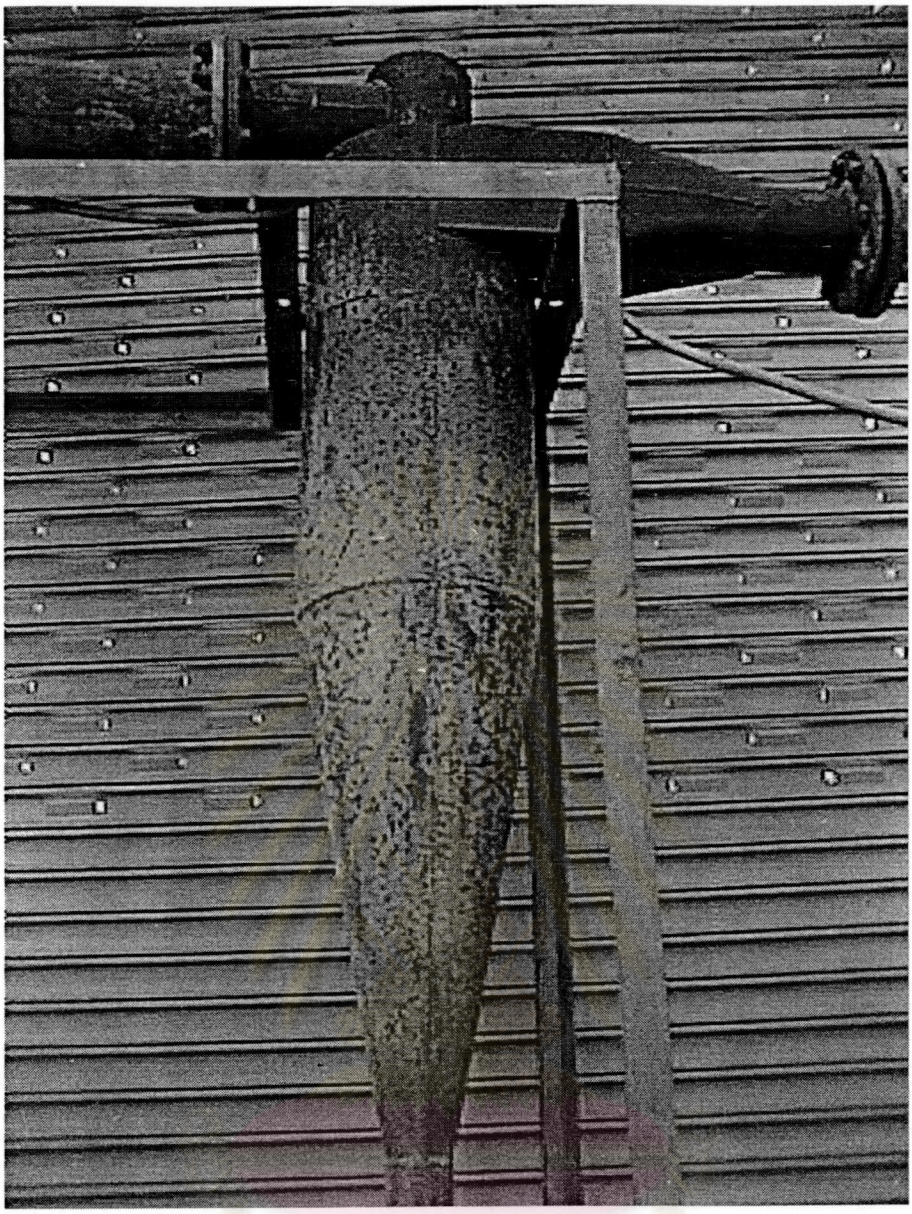
รูปที่ 4.1.5 ระบบเป่าอากาศ



รูปที่ 4.1.6 ระบบดูดอากาศ

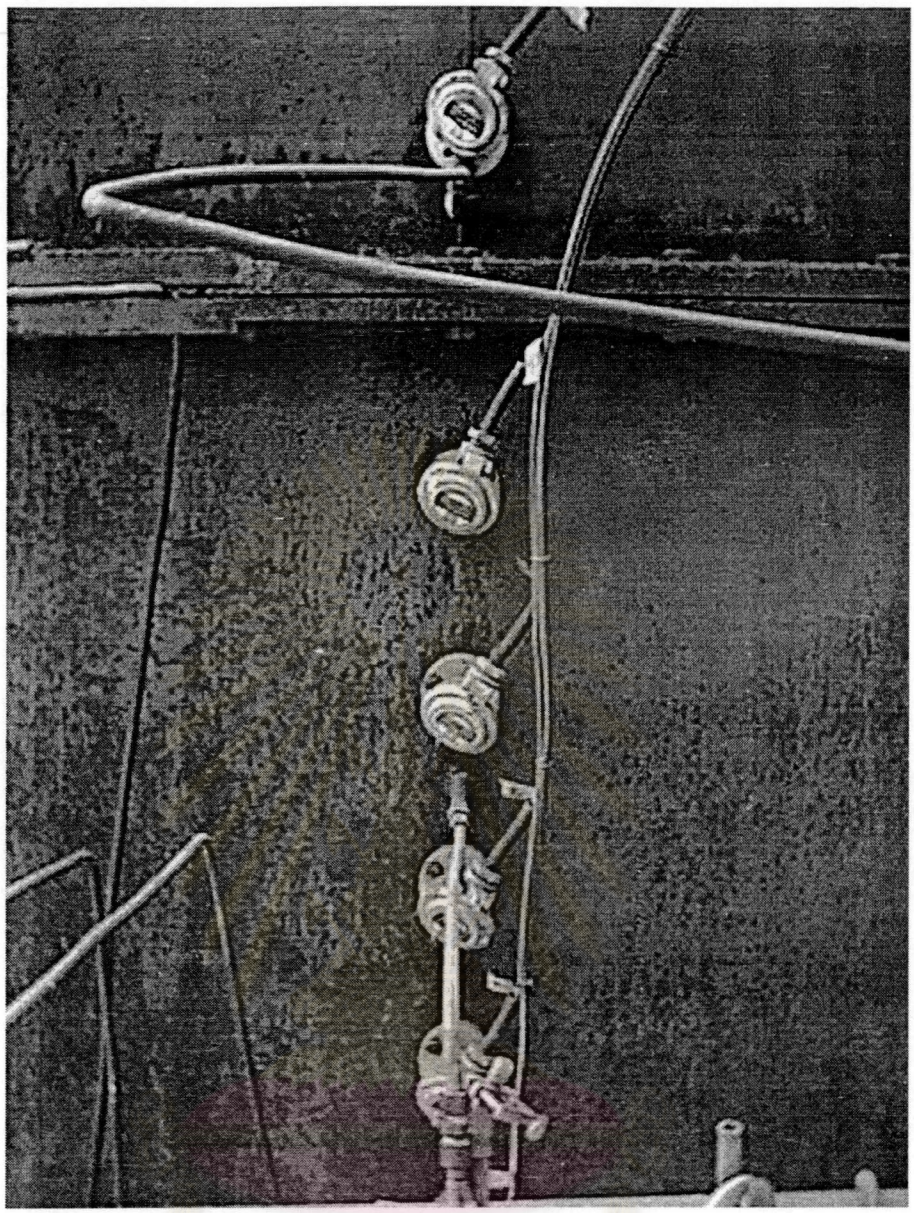
รูปที่ 4.1.7 ระบบจุดเตา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



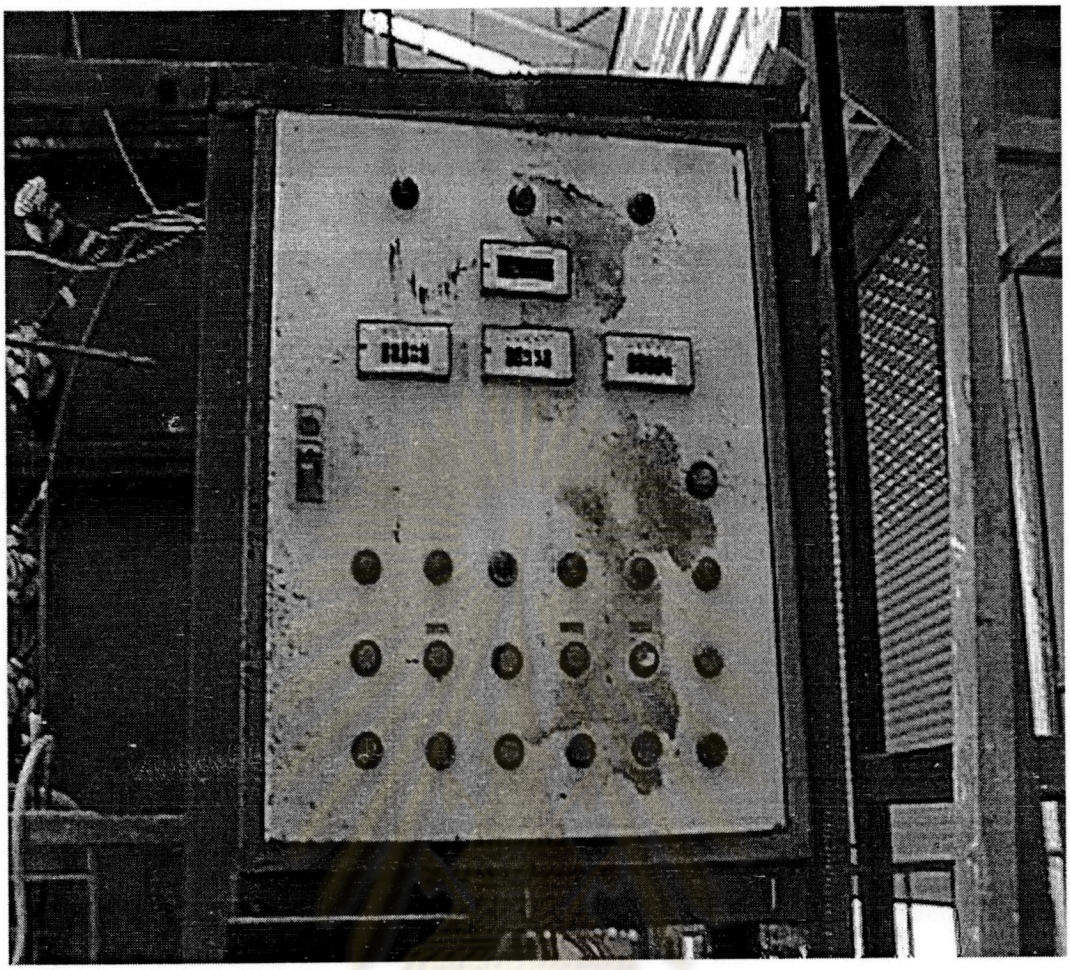
รูปที่ 4.1.8 ระบบระบายเถ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1.9 จุดวัดอุณหภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

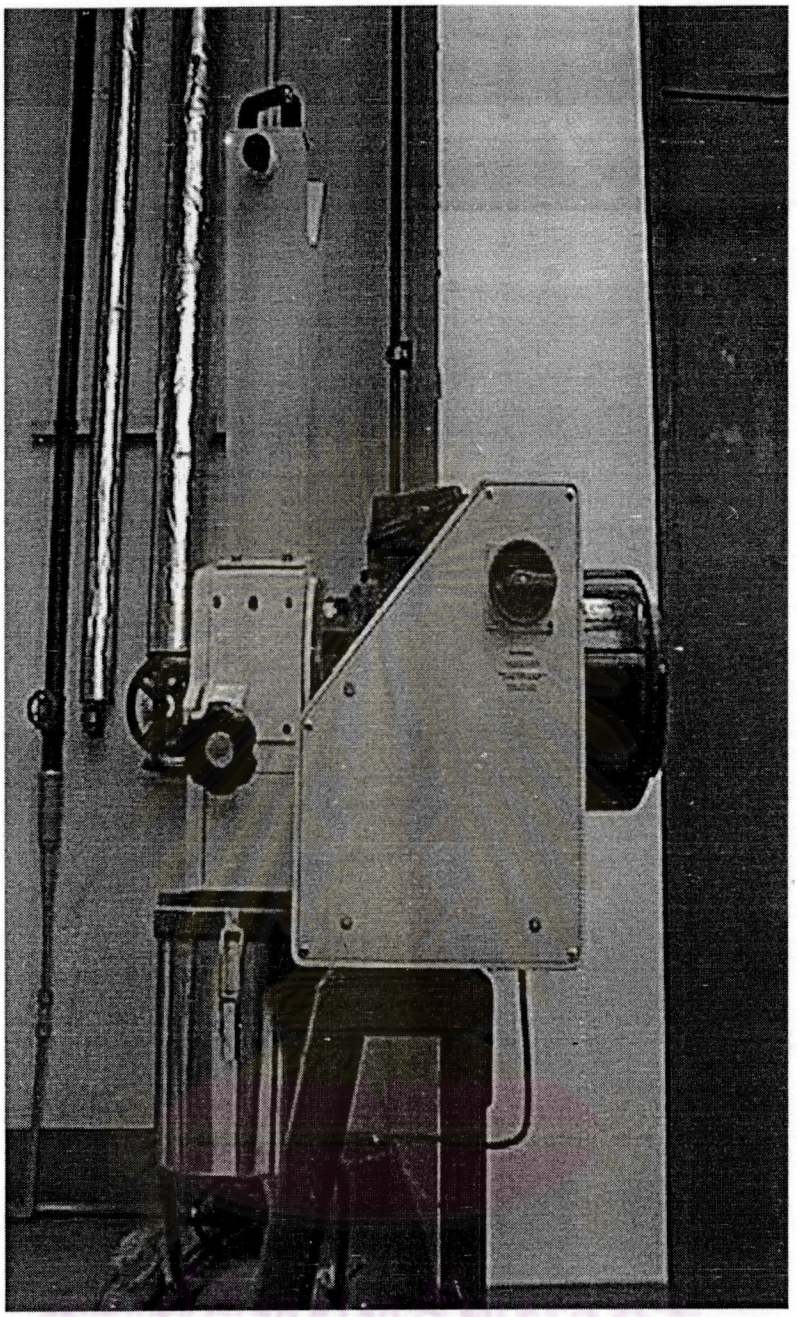


รูปที่ 4.1.10 ระบบวัดอุณหภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์

รูปที่ 4.2.2 อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ก๊าซเสีย



รูปที่ 4.2.3 อุปกรณ์บดกากตะกอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2.4 อุปกรณ์วัดความเร็วอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดลองเผากากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเผากากตะกอนดังกล่าว ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนเหล่านั้นกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยการวิจัยนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาด้วยกัน 3 ชนิดคือ อัตราการป้อนอากาศ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (กากตะกอน) และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆกำหนดให้คงที่ตลอดการทดลอง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทดลองได้ดียิ่งขึ้นจึงได้จัดโปรแกมการทดลองขึ้นดังนี้

1. ทดลองหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบดและคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ

2. ทดลองปรับแต่งค่าความถูกต้องของอุปกรณ์การป้อนเชื้อเพลิง อุปกรณ์การป้อนอากาศ

3. ทดลองปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นและหาค่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นที่อุณหภูมิห้อง วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อทำให้เกิดความคุ้นเคยกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชั่นและหาค่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการทดลองแม้ว่าการทดลองฟลูอิดไดเซชั่นที่อุณหภูมิห้องกับขณะเกิดการเผาไหม้จะแตกต่างกันก็ตาม การหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง และการหาค่าความเร็วของของไหลที่ใช้ในการฟลูอิดไดเซชั่น

4. ทดลองเผากากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษโดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา 3 ชนิดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

5. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟและวิเคราะห์ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ

ซึ่งรายละเอียดของวิธีการทดลองต่างๆมีดังนี้

4.4 การหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบด

ในการทดลองหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบดนั้นได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติของทรายคือ สัดส่วนช่องว่าง ความเป็นทรงกลมเทียบเท่าและความหนาแน่น โดยรายละเอียดมีดังนี้คือ

4.4.1 การหาสัดส่วนช่องว่างและความเป็นทรงกลมเทียบเท่า

ในการหาสัดส่วนช่องว่างของทรายที่ใช้เป็นเบดนั้นทำได้โดยบรรจุทรายลงในกระบอกตวงอย่างไม่เป็นระเบียบ จากนั้นทำการบันทึกค่าปริมาตรของทรายที่บรรจุลงไป หลังจากนั้นเติมสารนอร์มอลเฮกเซน (n-hexane) หรือน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงไปผสมกับทราย สำหรับสาเหตุที่ต้องทำการเติมสารนอร์มอลเฮกเซนหรือน้ำลงไปผสมกับทรายเพราะว่าจะทำให้ลดแรงตึงผิวของทราย หลังจากนั้นทำการบันทึกปริมาตรหลังทำการผสมไว้เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าของสัดส่วนช่องว่างโดยวิธีการคำนวณดังกล่าวจะแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก เมื่อทราบค่าสัดส่วนช่องว่างแล้วนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเป็นทรงกลมเทียบเท่าก็จะสามารถทราบค่าความเป็นทรงกลมเทียบเท่าได้

4.4.2 การหาความหนาแน่น

สำหรับการหาค่าความหนาแน่นของทรายที่ใช้เป็นเบดนั้นทำได้โดยนำทรายจำนวนหนึ่งมาทำการชั่งน้ำหนักและวัดหาปริมาตรของทรายจำนวนนั้นจากนั้นนำค่าที่ได้ดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของทรายที่ใช้เป็นเบดได้ ซึ่งรายละเอียดการคำนวณค่าความหนาแน่นของทรายที่ใช้เป็นเบดนั้นแสดงรายละเอียดให้เห็นในภาคผนวก ก

4.5 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ

4.5.1 การหาคุณสมบัติของกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษแบบประมาณ (Proximate Analysis)

โดยทั่วไปแล้วการหาคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะทำการคุณสมบัติต่างๆ คือ การหาความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Voltile Matter) และหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยจะใช้วิธีการหาคุณสมบัติแบบประมาณตามมาตรฐานของ ASTM D3173-75 ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวมีขั้นตอนและวิธีการดังต่อไปนี้

4.5.1.1 ความชื้น : ASTM D3173

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 104-110 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเกเตอร์ (Dasicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

- นำกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของกากตะกอนจะคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเกเตอร์จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างของกากตะกอนที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W \qquad (4.5.1)$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

4.5.1.2 เถ้า : ASTM D3174

- เผาครูซิเบิลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครูซิเบิลพอร์ซเลนพร้อมฝา

- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองใส่ครูซิเบิลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม

- นำไปเผาบนตะเกียงบุนเซน รอจนควันระเหยออกหมด

- ใส่ครูซิเบิลพอร์ชเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่

- นำครูซิเบิลพอร์ชเลนออกจากเตาเผาแล้ววางทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W \qquad (4.5.2)$$

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของครูซิเบิลพอร์ชเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของครูซิเบิลพอร์ชเลนพร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

4.5.1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง : ASTM D3175

- เผาครูซิเบิลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล

- ชั่งตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองใส่ในครูซิเบิลประมาณ 1 กรัม

- ปิดฝาครูซิเบิลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที

- หย่อนครูซิเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ10 นาที

- หย่อนครูซิเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผาอุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที

- นำครูซิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเดสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = (100(W_5 - W_6) / W) - M \qquad (4.5.3)$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

W_5 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

M = ร้อยละของความชื้น

4.5.1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของตัวอย่างกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 – ร้อยละของความชื้น – ร้อยละของเถ้า – ร้อยละของสารระเหย

4.5.2 การหาคุณสมบัติของกากตะกอนแบบละเอียด (Ultimate Analysis)

สำหรับการหาคุณสมบัติของกากตะกอนแบบละเอียดนั้นได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าวโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์

4.6 การทดลองปรับเทียบค่าอัตราการป้อนกากตะกอนด้วยเครื่องป้อนกากตะกอนแบบสกรูและปรับเทียบค่าความเร็วกับอัตราการไหลของอากาศ

วิธีการทดลองปรับเทียบค่าอัตราการป้อนกากตะกอนเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องป้อนกากตะกอนกับอัตราการป้อนกากตะกอนที่ความเร็วรอบต่างๆกันซึ่งวิธีการดังกล่าวทำได้โดยเดินเครื่องป้อนกากตะกอนจากนั้นปรับรอบของเครื่องป้อนกากตะกอนให้ได้รอบตามที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการป้อนกากตะกอนที่ความเร็วรอบดังกล่าวแล้วทำการบันทึกผล จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องป้อนกากตะกอน นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาเขียนกราฟ สำหรับวิธีการปรับเทียบค่าความเร็วกับอัตราการไหลของอากาศจะเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเร็วของอากาศกับอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของเบด จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของทั้งสองค่า

4.7 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นและการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง

การหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นนั้นมีวิธีการหาค่าดังกล่าวได้ 2 วิธีคือ วิธีการทดลองและวิธีการคำนวณสำหรับรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวมีดังนี้

4.7.1 การทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่น

สำหรับวิธีการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชั่นนั้นเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วต่างๆกันของอากาศที่ไหลผ่านเบดกับค่าความดันตกที่ผ่านเบดโดยใช้ทรายที่มีขนาดอนุภาค 20-50 เมช หรือเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 366.41 ไมครอน ซึ่งทำการทดลองกับเบดที่สูง 0.22 เมตร แล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดไปเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเบดกับความดันตกที่ผ่านเบด

4.7.2 การคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่น

สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดเซชั่นนั้นมีรายละเอียดแสดงให้เห็นไว้ในหัวข้อที่ 3.3.4 ส่วนรายละเอียดการคำนวณได้แสดงให้เห็นไว้ภาคผนวก ข

4.7.3 การคำนวณหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง

สำหรับวิธีการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่งทำได้โดยการคำนวณตามสมการที่ 3.3.19 ซึ่งรายละเอียดการคำนวณแสดงให้เห็นในภาคผนวก ค

4.7.4 การคำนวณหาค่าความเร็วของของไหลที่ใช้ในการฟลูอิดไดเซชั่น

การคำนวณหาค่าความเร็วของของไหลที่ใช้ในการฟลูอิดไดเซชั่นนั้น มีรายละเอียดแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 3.3.8 สำหรับวิธีการคำนวณค่าความเร็วของของไหลที่ใช้ในการฟลูอิดไดเซชั่นแสดงให้เห็นในภาคผนวก ง