

การศึกษาออกแบบเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากใบอ้อย ในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟอง A Study Design of Bio-oil Production from Cane Trash by Bubbling Fluidized Bed Reactor

วศกร ตรีเดช¹ และ รัชพล สันติวารการ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
โทรศัพท์: 08-1974-5248 โทรสาร: 043-202849 E-mail: me-kku@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
โทรศัพท์: 08-1989-1983 โทรสาร: 043-202849 E-mail: ratchaphon@kku.ac.th

Wasakron Treedet¹ Ratchaphon Suntivarakorn²

¹ Department of mechanical engineering, Faculty of engineering, Khon Kaen University

A. Meaung, Khon Kaen, 40002 Thailand Tel: 08-1974-5248 Fax: 0-4320-2849 E-mail: me-kku@hotmail.com

² Department of mechanical engineering, Faculty of engineering, Khon Kaen University

A. Meaung, Khon Kaen, 40002 Thailand Tel: 08-1989-1983 Fax: 0-4320-2849 E-mail: ratchaphon@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากใบอ้อยด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยได้ทำการออกแบบเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 1.56 m ใช้ก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 460 °C ถึง 530 °C ที่มีอัตราการไหลของอากาศที่ 283 cc sec⁻¹ สำหรับเผาไหม้ใบอ้อย มีระบบป้อนใบอ้อยแบบสกรูที่มีอัตราการป้อน 10 kg h⁻¹ และใช้ไซโคลนจำนวนสองชุดเพื่อกรองอนุภาคของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ และมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เข้าท่อทองแดงขนาด ¼ in ยาว 0.7 m จำนวน 16 ท่อ บรรจุในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิ 0 °C เพื่อควบแน่นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้กลายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าเตาปฏิกรณ์ที่ออกแบบนี้สามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้จริง โดยปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จะแปรผันตามอุณหภูมิเผาไหม้และสามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้สูงสุดที่ 46.2 wt% ที่อุณหภูมิ 500 °C

Abstract

This research was to study and design the fluidized bed reactor for bio-oil production from cane trash by pyrolysis process. The designed cylindrical fluidized bed reactor has diameter of 10.16 cm and height of 1.56 m. The experimental was carried out by using the reactor that was set the temperature

between 460 °C – 530 °C. The hot air was used as heat source and its flow rate was of air at 283 cc.sec⁻¹. The screw feeder was used to fed cane trash at the rates of 10 kg.h⁻¹ and two cyclones are used to separate solid particles after combustion. The exchanger was made from 16 copper pipes which have diameter of ¼ inch and length of 70 cm, and it was in cool water with 0 °C. From the experimental, it was found that the designed reactor can produced bio-oil. The amount of bio-oil was increased according to increasing of combustion temperature. Further more, it was revealed that, the maximum yield of bio-oil was 46.2 wt% at 500 °C.

คำสำคัญ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ, ฟลูอิดไดซ์เบด, ไพโรไลซิส

Keyword Bio-oil, Fluidized bed, Pyrolysis

1. บทนำ

ใบอ้อยเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพพลังงาน โดยใบอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตรและเป็นวัสดุที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจังในรูปแบบของพลังงาน ซึ่งจากการประเมินศักยภาพของใบอ้อยในด้านพลังงานพบว่าใน 1 ปี ประเทศไทยมีปริมาณใบอ้อยที่เหลือทิ้งในไร่อ้อยรวมประมาณ 10 ล้านตัน เทียบเท่ากับปริมาณของน้ำมันดิบถึง 3,800 ล้านลิตร ซึ่งหากนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังได้จะก่อให้เกิดแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีปริมาณมหาศาล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีคือ การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นหนึ่งในกระบวนการเคมีความร้อน (Thermochemical process) คือการใช้ความร้อนในการสลายโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ของวัตถุดิบตั้งต้นให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลง (Thermal decomposition) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีในปริมาณที่จำกัด จากนั้นทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบไปด้วย ถ่านชาร์ ก๊าซ และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ [1]

ปัจจุบันได้มีการศึกษาและทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลอื่นหลายชนิดในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด เช่น Zheng ji-lu et al. [2] ได้ทำการทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากก้านฝ้ายโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาความร้อนไปสู่ก้านฝ้าย จากผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้ออกมาจะแปรผันกับอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ โดยปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้ออกมาสูงสุดคือ 55 wt% ที่อุณหภูมิ 510 °C และจากการทดลองของ Shurong Wang et al. [3] ได้ทำการทดลองกับชีวมวลทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบไปด้วย ต้นเฟอร์จีน ไม้แมนจูร์จีน ไม้แดงจีน และฟางข้าว โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาความร้อนซึ่งผลการทดลองพบว่าสัดส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เตาปฏิกรณ์และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ แต่ในการทดลองของ M.F. Parihar et al. [4] ได้ทำการทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกากอ้อยใน เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาความร้อนจากการทดลองพบว่าสัดส่วนน้ำมันที่ได้้นอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เตาปฏิกรณ์และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซไนโตรเจนแล้วยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนอีกด้วย ซึ่งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้สูงสุดอยู่ที่ 24.12 wt% ที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ 450 °C และมีอัตราการไหลที่ 50 cc min⁻¹

จากตัวอย่างการทดลองในหลายรูปแบบจะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดลองเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพในปริมาณสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้นั้นต้องอาศัยเงื่อนไขต่างๆได้แก่ [5]

- อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ 400 - 550 °C
- เวลาในการเผาไหม้ไม่เกิน 2 วินาที
- ชีวมวลมีขนาดไม่เกิน 3 มม
- เชื้อเพลิงมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 10%
- ลดอุณหภูมิก๊าซร้อนอย่างรวดเร็ว

โดยรายละเอียดการออกแบบเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพและผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

2. การออกแบบเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

ในการออกแบบเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจะอาศัยหลักการการออกแบบจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน [2-4] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 การออกแบบสามารถแยกส่วนประกอบหลักได้ออกเป็น 5 ส่วน โดยในแต่ละส่วนจะมีความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นซึ่งกันและกัน นอกจากการออกแบบที่มีความสัมพันธ์ต่อกันแล้วยังมีเงื่อนไขข้อกำหนดเบื้องต้นที่ต้องพิจารณาในการคำนวณออกแบบซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

การออกแบบเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการเผาไหม้(ไบอ้อย)และวัสดุเฉื่อยที่ใช้เป็นเบด(ทราย)ซึ่งทรายจะเป็นตัวพาความร้อนไปสู่ไบอ้อย ในตารางที่ 1 จะแสดงถึงคุณสมบัติทางของวัตถุดิบทั้งสองชนิดซึ่งประกอบไปด้วยค่าความหนาแน่น ค่าความพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และตารางที่ 2 จะแสดงถึงคุณสมบัติเชิงเผาไหม้ของไบอ้อย

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของไบอ้อยและทราย

คุณสมบัติ	ไบอ้อย	ทราย
ความหนาแน่น (kg/m ³)	176.31	1,567
ความพรุน (%)	50.72	41.31
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mm)	1.54	0.332

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติเชิงเผาไหม้ของไบอ้อย

Material	Moisture (wt%)	Ash (wt%)	Volatile Matter (wt%)	Fixed Carbon (wt%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
ไบอ้อย	9.20	6.10	67.80	16.90	16,794	15,479

2.2 การออกแบบระบบเตาปฏิกรณ์

ในระบบเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดนี้จะใช้เตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองเบด (Bubbling fluidized bed reactor) โดยกำหนดให้เตาปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 inch (หรือ 10.16 cm) ส่วนในการหาความสูงของเตาปฏิกรณ์และอัตราการไหลก๊าซที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เช่นแบบฟองเบดสามารถหาได้จากตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้

Minimum fluidization velocity: คือความเร็วของก๊าซต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่และทำให้อนุภาคเบดเริ่มมีพฤติกรรมคล้ายของไหล โดยความเร็วก๊าซต่ำสุดจะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เช่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และสมการที่ 2 [6]

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu_f}{d_m \rho_f} \quad (1)$$

โดยค่าเรย์โนลด์ของสมการที่ (1) สามารถหาได้จากสมการที่ 2 [6]

$$Re_{mf} = \sqrt{33.7^2 + 0.0408 (Ar)} - 33.7 \quad (2)$$

Minimum slugging velocity: คือความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ฟองก๊าซภายในเบดมีขนาดใหญ่เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางเตาปฏิกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 [7]

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07 \sqrt{g D_{reactor}} \quad (3)$$

ความเร็วก๊าซที่วิ่งผ่านเบดในเตาปฏิกรณ์จะต้องมีค่าระหว่างความเร็วของก๊าซต่ำสุดที่ทำให้เบดเกิดการเคลื่อนที่และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ฟองก๊าซภายในเบดมีขนาดใหญ่เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางเตาปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ 4 [6]

$$U_{mf} < U_f < U_{ms} \quad (4)$$

จะใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างความเร็วทั้งสองในการออกแบบหาค่าความเร็วในการเกิดฟลูอิดไดซ์เช่นแบบฟองเบด ซึ่งความเร็วในการเกิดฟลูอิดไดซ์

เซชันแบบฟองเบตนั้นสามารถหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้จากสมการที่ 5 [6]

$$G_B = (U_f - U_{mf}) A_{reactor} \quad (5)$$

การหาความสูงของเตาปฏิกรณ์จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของความสูงซึ่งประกอบไปด้วย

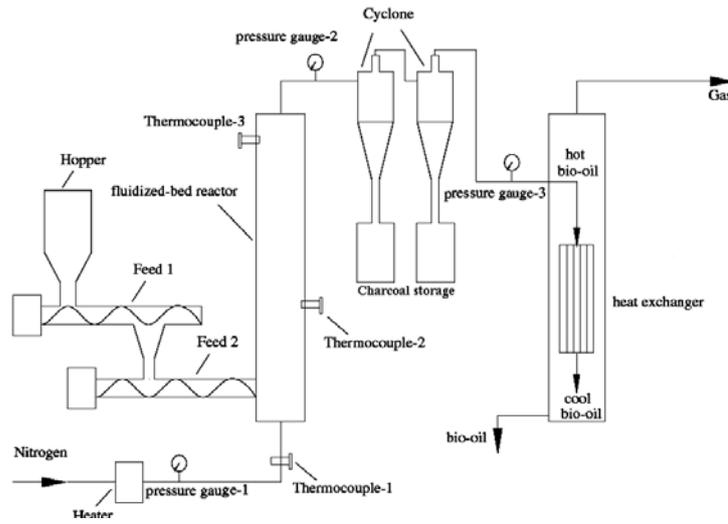
Bed height at minimum fluidization: คือความสูงต่ำที่สุดที่ทำให้เบตขยายตัวสูงขึ้นไปตามห้องเผาไหม้โดยเริ่มวัดความสูงจากแผ่นกระจายลม หาได้จากสมการที่ 6 [8]

$$m = \rho_p H_{mf} A_{reactor} (1 - \epsilon_{mf}) \quad (6)$$

ใช้ในการทดลองและค่าความสูงของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 3 ค่าการคำนวณออกแบบห้องเผาไหม้

ตัวแปร	ค่า
ความเร็วก๊าซที่วิ่งผ่านเบต: U_f (cm/s)	6.43
อัตราการไหล: G_B (cm ³ /s)	283
TDH (m)	0.5
ความสูงรวมของห้องเผาไหม้: H_t (m)	1.56



รูปที่ 1 แผนผังระบบของเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซล [2]

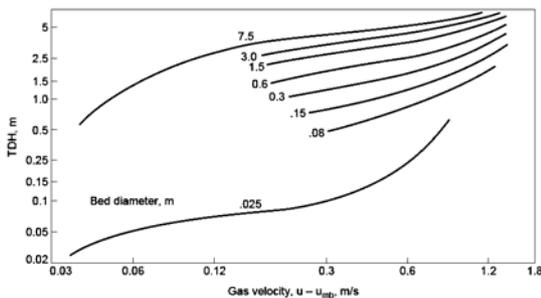
โดยความสูงต่ำที่สุดที่ทำให้เบตเริ่มขยายตัวนั้นเป็นสมการเริ่มต้นที่สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของค่าความสูงของเบตที่ขยายตัวสูงที่สุดขณะเกิดฟลูอิดไลเซชันแบบฟองเบตได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 7 [8]

$$H(1 - \epsilon_b) = H_{mf} \quad (7)$$

ซึ่งความสูงจริงที่ใช้ในการออกแบบเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไลเซชันแบบฟองเบตนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 8 [9]

$$H_t = TDH + H \quad (8)$$

Transport Disengaged Height (TDH): เป็นค่าความสูงที่สุดที่ไม่ทำให้อนุภาคเบตลอยหลุดหนีออกจากเตาปฏิกรณ์ได้ โดยสามารถประมาณค่าความสูงนี้ได้จากรูปที่ 2 [10]



รูปที่ 2 การประมาณค่า TDH

สามารถสรุปค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณโดยตารางที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยความสูง TDH ที่ได้จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2 ค่าอัตราการไหลที่

2.3 การออกแบบแผ่นกระจายลม

เตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไลเซชันแบบฟองเบตนี้จะใช้แผ่นกระจายลมแบบแผ่นเรียบเจาะรู (Perforated plate) ซึ่งแผ่นกระจายลมนี้จะทำหน้าที่กระจายลมให้พุ่งผ่านเบตและทำให้เบตลอยตัวอิสระได้อย่างทั่วถึงกันในเตาปฏิกรณ์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกระจายลมนี้ส่วนมากจะมีขนาดเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคเบต ในตารางที่ 4 แสดงตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณออกแบบแผ่นกระจายลม

การพิจารณาหาจำนวนรูของแผ่นกระจายลมที่ใช้ในห้องเผาไหม้นั้นสามารถหาได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่รวมของรูที่เจาะในแผ่นกระจายลมเทียบกับพื้นที่ของห้องเผาไหม้ โดยหาได้จากสมการที่ 9 [11]

$$S_r = 1.7 \left(\frac{U_f}{U_{mf}} \right)^{0.9} \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 และตารางที่ 4 สามารถคำนวณหาค่าที่ใช้ในการออกแบบแผ่นกระจายลมได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่า
ความเร็วก๊าซต่ำสุดที่ทำให้เบดเริ่มเคลื่อนที่: U_{mf} (cm/s)	2.94
ความเร็วก๊าซที่วิ่งผ่านเบด: U_f (cm/s)	6.43
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย (mm)	0.332
เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (mm)	1
เส้นผ่านศูนย์กลางเตาปฏิกรณ์ (cm)	10.16

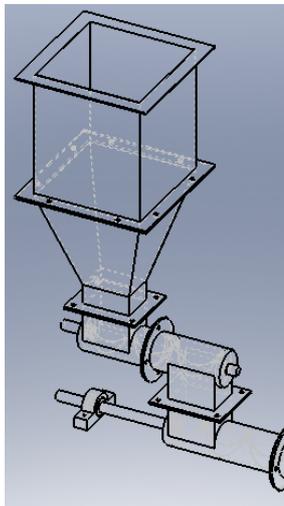
ตารางที่ 5 ค่าจากการคำนวณแผ่นกระจายลม

ตัวแปร	ค่า
สัดส่วนช่องเปิดที่ให้ก๊าซไหลผ่าน: S_p (%)	3.437
จำนวนรูเจาะ	355
ความเร็วก๊าซที่ไหลผ่านรู (m/s)	1.01
ความดันตกคร่อมในเบด (kPa)	6

โดยปกติค่าเปอร์เซ็นต์เจาะรูที่แผ่นกระจายลมจะมีค่าระหว่าง 2 – 10% เพื่อป้องกันการเกิดความดันตกภายในแผ่นกระจายที่สูง [11]

2.4 การออกแบบระบบป้อนไบออย

ในระบบป้อนไบออยนี้จะประกอบไปด้วยถังเก็บ (Hopper) ที่ทำหน้าที่เก็บไบออยไว้รอการป้อนเข้าระบบและสกรูป้อนไบออยที่ทำหน้าที่ป้อนไบออยเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 โดยข้อดีในการใช้สกรูป้อนคือป้องกันการทะลักออกก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ของไบออย



รูปที่ 3 ระบบป้อนไบออย

การคำนวณหาปริมาณการป้อนไบออยจะใช้สมการการคำนวณของ Olivares E. 1996 [12] และสามารถแสดงสมการการคำนวณจากสมการที่ (10)

$$m' = 60\pi \cdot S \cdot n \cdot \phi \cdot \rho_p (Dh - h^2) \quad (10)$$

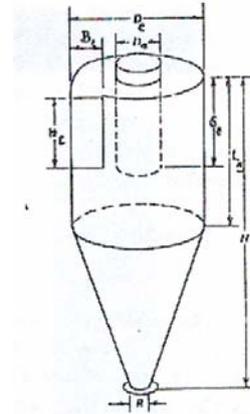
ซึ่งจากการศึกษาของ Olivares E. จะใช้ค่าตัวประกอบโหลด (Load factor: ϕ) เท่ากับ 0.25 และกำหนดให้ระยะพิทช์ของไบอ้อนมีขนาดเป็น 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของไบอ้อน โดยสมการที่ (11) เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพลลา ระยะความสูงของไบอ้อนและเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของไบอ้อน

$$d = D - 2h \quad (11)$$

ในการออกแบบระบบป้อนแบบสกรูประกอบไปด้วยไบอ้อนสองชั้นซึ่งประกอบไปด้วย ไบอ้อนที่หนึ่งเป็นการควบคุมอัตราการป้อนโดยใช้แกนเพลลาขนาด 3/4 inch ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 220VAC 120 watt เป็นกลไกต้นกำลัง โดยให้เพลลามีอัตราการหมุนที่ 10 rpm ซึ่งทำให้มีอัตราการป้อนไบออยที่ 10 kg/h ในส่วนไบอ้อนที่สองเป็นการป้องกันการทะลักของทรายภายในเตาปฏิกรณ์และป้องกันการทะลักของไบออยก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ โดยใช้แกนเพลลาขนาด 3/4 inch ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 220VAC 120 watt เป็นกลไกต้นกำลัง โดยให้เพลลามีอัตราการหมุนที่ 60 rpm

2.5 การออกแบบระบบกรองอนุภาค

ในระบบดักกรองอนุภาคนี้อาจใช้ไซโคลนสองชุดประกอบไปด้วยไซโคลนทั่วไปและไซโคลนประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุภาคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่ผ่านการเผาไหม้แล้ว โดยใช้หลักการออกแบบจาก [13] ซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 4 ดังนี้



รูปที่ 4 แสดงค่าตัวแปรในการออกแบบไซโคลน

ตารางที่ 6 ขนาดของไซโคลนซึ่งประกอบไปด้วยไซโคลนทั่วไปและไซโคลนประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 6 ขนาดของไซโคลน

Unit (cm)	General Purpose cyclone	High efficiency cyclone
D_c	12	12
H_c	6	5.3
B_c	3	2.3
S_c	7.5	6
D_o	6	4.8
L_c	24	16.8
H	48	46.8
B	3	4.8

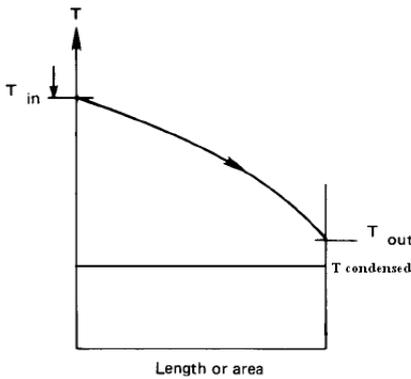
การออกแบบไซโคลนทั้งสองชนิดนี้จะกำหนดให้มีอัตราการไหลของก๊าซที่เท่ากันที่ 283 cc sec^{-1} โดยไม่มีการรั่วซึมและให้มีความดันตกคร่อมไม่เกิน 2.5 kPa ซึ่งจะมีลักษณะการต่ออนุกรมกันโดยให้ก๊าซผ่านไซโคลนทั่วไปก่อนแล้วจึงเข้าไซโคลนประสิทธิภาพสูง [13]

2.6 การออกแบบระบบหล่อเย็นก๊าซ

ในส่วนท้ายของกระบวนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซลจะต้องทำการลดอุณหภูมิก๊าซอย่างรวดเร็วเพื่อให้ก๊าซกลั่นตัวกลายเป็นน้ำมันซึ่งทำได้โดยการให้ก๊าซไหลไปตามท่อทองแดง โดยท่อทองแดงจะจุ่มอยู่ในน้ำแข็งเพื่อให้อุณหภูมิในการหล่อเย็นคงที่ โดยภาวะไหลด้วยความร้อนในการลดอุณหภูมินั้นสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 12 คือ

$$Q_{N_2} = m' [C_p]_{N_2 @ T=550K} \Delta T \quad (12)$$

โดยในรูปที่ 5 จะแสดงกราฟของอุณหภูมิก๊าซขาเข้า อุณหภูมิก๊าซขาออกและอุณหภูมิหล่อเย็น ซึ่งอุณหภูมิขาเข้าจะลดลงจนถึงอุณหภูมิกำหนดในขาออกโดยที่อุณหภูมิหล่อเย็นจะยังคงที่



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก๊าซขาเข้า อุณหภูมิก๊าซขาออกและอุณหภูมิหล่อเย็น

โดยเงื่อนไขของสภาวะในการลดอุณหภูมิจะแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งจะประกอบไปด้วย

ตารางที่ 7 แสดงค่าตัวแปรในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่า
อุณหภูมิก๊าซขาเข้า: T_i (°K)	800
อุณหภูมิก๊าซขาออก: T_o (°K)	300
อุณหภูมิก๊าซโดยเฉลี่ย: T_m (°K)	550
อุณหภูมิหล่อเย็น: T_∞ (°K)	273
อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ: m' (kg/s)	3.289×10^{-4}
ค่าความจุความร้อนของก๊าซ: C_p (kJ/kg°K)	1.605

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ท่อทองแดงนั้น ตารางที่ 8 จะแสดงถึงขนาดท่อทองแดงที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาจำนวนท่อที่ต้องใช้ในการลดอุณหภูมิดังนี้

การคำนวณในการหาจำนวนท่อทองแดงที่ใช้ในการลดอุณหภูมินั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์คือภาวะไหลด้วยความร้อนจากการลดอุณหภูมิก๊าซจะเท่ากับภาวะความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการที่ 13 [14]

ตารางที่ 8 แสดงขนาดท่อทองแดง

ตัวแปร	ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในท่อ (mm)	19.05
ความหนาของท่อ (mm)	1.651
ความยาวของท่อ (mm)	700
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนท่อ (W/m°C)	386

$$m' [C_p]_{N_2 @ T=550K} \Delta T = U_o A_o N \frac{[(T_\infty - T_i) - (T_\infty - T_o)]}{\ln \left(\frac{T_\infty - T_i}{T_\infty - T_o} \right)} \quad (13)$$

จากการคำนวณพบว่าต้องใช้ท่อทองแดงขนาด ¼ in ความยาว 0.7 m จำนวน 16 ท่อ ในการลดอุณหภูมิก๊าซร้อนให้มีอุณหภูมิเหลือ 27 °C เพื่อใช้ในการกลั่นตัวก๊าซกลายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

จากรูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยฮอปเปอร์, สกรูป้อนสองตัว, เตปปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด, ไซโคลนสองตัว, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 220VAC 2kW จำนวน 3 ตัว ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตปปฏิกรณ์ได้สูงสุด 600 °C ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิของอากาศใช้เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ Fuzzy + PID control โดยใช้เทอร์โมคัปเบิลแบบ k ที่มีช่วงอุณหภูมิการวัดระหว่าง -200 °C – 1,370 °C ± 2 °C และในส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้น้ำและน้ำแข็งผสมเกลือเพื่อลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

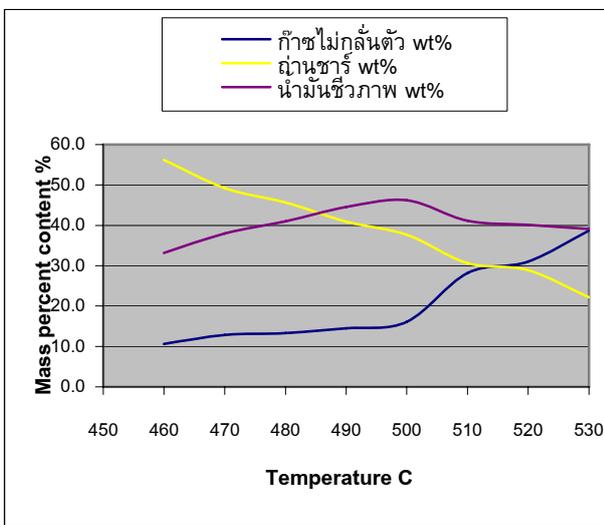
1. เปิดอากาศเข้าในเตปปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเตปปฏิกรณ์ให้ได้ อุณหภูมิที่ต้องการ
2. เปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าและเปิดมอเตอร์ป้อนที่สอง เพื่อป้องกันการทะลักของทรายในเตปปฏิกรณ์
3. ป้อนไบโอดีเซลเข้าฮอปเปอร์จำนวน 1 kg
4. เปิดมอเตอร์ป้อนไบโอดีเซลเข้าสู่เตปปฏิกรณ์
5. เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้า
6. ปิดมอเตอร์ป้อนไบโอดีเซล
7. เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 400 °C ปิดอากาศ
8. เก็บข้อมูลการทดลอง

4. ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 460 °C – 530 °C ซึ่งผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไบโอดีเซลประกอบไปด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ, ผงถ่านชาร์ และก๊าซที่ไม่กลั่นตัว โดยแสดงดังตารางที่ 9 และในรูปที่ 6

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์และสัดส่วนโดยมวลของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากไบโอดีเซล

อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ °C	ก๊าซไม่กลั่นตัว		ถ่านชาร์		น้ำมันชีวภาพ	
	wt%	kg	wt%	kg	wt%	kg
460	10.6	0.106	56.2	0.562	33.2	0.332
470	12.8	0.128	49.2	0.492	38.0	0.380
480	13.3	0.133	45.7	0.457	41.0	0.410
490	14.5	0.145	40.9	0.409	44.6	0.446
500	16.1	0.161	37.7	0.377	46.2	0.462
510	28.2	0.282	30.6	0.306	41.2	0.412
520	31.0	0.310	28.9	0.289	40.1	0.401
530	38.7	0.387	22.2	0.222	39.1	0.391



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์และสัดส่วนโดยมวลของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากไบโอดีเซล

ในการหาน้ำหนักของก๊าซไม่กลั่นตัวสามารถหาได้จากผลต่างของน้ำหนักไบโอดีเซลก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์ - (น้ำหนักน้ำมันชีวภาพ + น้ำหนักถ่านชาร์) โดยน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้เป็นน้ำมันที่ได้จากการเผาไหม้โดยยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่าเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้เตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองสามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซลได้จริง และจากผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไบโอดีเซลจะแปรผันตามอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ โดยปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่ 46.2 wt% ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่อัตราการไหลของอากาศที่ 283 cm³ s⁻¹ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นจะได้ปริมาณก๊าซที่ไม่กลั่นตัวสูงขึ้นตามอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ในขณะที่ปริมาณของผงถ่านชาร์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซลในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟอง โดยผลการทดลองระบุว่าปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซลที่ออกมาได้จากกระบวนการแปรผันกับอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ แต่ลักษณะของผงถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลองยังมีเศษไบโอดีเซลบางส่วนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้อาจมีสาเหตุมาจากไบโอดีเซลที่ถูกบ้อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์นั้นบางส่วนมีขนาดใหญ่เกินไปหรืออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ทดลองมีอัตราการไหลที่มากเกินไป ทำให้ไบโอดีเซลบางส่วนยังไม่ได้ได้รับความร้อน โดยผู้วิจัยคาดว่าถ้าปรับปรุงในจุดนี้ได้จะสามารถทำให้ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพมากขึ้นกว่าผลการทดลองวิจัยนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนทุนการศึกษาและขอขอบพระคุณโครงการทุนวิจัยนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนทุนวิจัย และสุดท้ายขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนในการสร้างเครื่องผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากไบโอดีเซลในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดและเอื้อต่อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Anthony V.B., "Biomass Fast Pyrolysis," Thermal Science, Vol. 8, No.2, pp. 21-49, November 2004.
2. Zheng J.I., Yi W.M, Wang N.N., "Bio-oil production from cotton stalk," Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 1724 – 1730, December 2008.
3. Shurong W.*, Mengxiang F., Chunjiang Y., Zhongyang L. and Kefa C., "Flash Pyrolysis of Biomass Particles in Fluidized Bed for Bio-Oil Production," China Particology Vol. 3, pp. 136 – 140, February 2005.
4. Parihar M.F., Kamil M., Goyal H.B., Gupta A.K. and Bhatnagar A.K., "AN Experimental Study on Pyrolysis of Biomass," Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 85, pp. 458 – 465, September 2007.
5. Tony B., "Fast pyrolysis based biorefineries," ACS, Washington DC, USA, 2005.
6. Prabir B., "Fluidized bed Boiler: Design and Application," Pergamon press Canada Ltd, Toronto, Canada, 1984.
7. Gibilaro L.G., "Fluidization Dynamics," Butterworth Heinemann, Oxford, England, 2001.
8. Grace J.R., "Handbook of Multiphase System," Hemisphere, Washington DC, USA, 1982.
9. Kunii D. and Levenspiel O., "Fluidization Engineering," 2nd edition. Newton: Butterworth – Heinemann, New York, USA, 1991.

10. Perry R.H., Green D.W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook," 7th edition., ISBN: 978-0-07-049841-9, McGraw-Hill, New York, USA, 1997.
11. Vanecek V., Markvant M., and Drbohlav R., "Fluidized bed Drying," Leonard Hill, London, England, 1996.
12. Olivares, E., "Projeto, construção e avaliação preliminary de um reator de leito fluidizado para gasificação de bagaço de cana de açúcar," Dissertation (Mechanical Engineering Master), UNICAMP, Campinas, Brazil, 1996.
13. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, Thailand (2008). *บทที่ 1 ไซโคลน (cyclone)*, 14 ตุลาคม 2551, available online:
<http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/182/cyclone.pdf>
14. Ozisik M. N., "Heat transfer A Basic Approach, ISBN: 0-07-066460-9, McGraw-Hill, New York., USA, 1985.