



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Design of a Downdraft Gasifier Using Computational Fluid Dynamics Method

نامผู้วิจัย นายสุรงค์กร เพชรรักษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวัะโกศิษฐ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Design of a Downdraft Gasifier Using Computational Fluid Dynamics Method

โดย

นายสุรงค์กร เพชรรักษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2551

สุรงค์ เพชรรัช 2551: การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลงโดยวิธีพลศาสตร์
ของไหลงค่านวน ปรินญวศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิระโกศล, Ph.D. 88 หน้า

งานวิจัยนี้แสดงถึงการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลงโดยวิธีพลศาสตร์ของ
ไหลงค่านวน ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการกินเชื้อเพลิง และอัตราการให้ความร้อนของเตา
ชีววมวลได้ ผลจากการจำลองแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสมการการถ่ายเทความร้อน
สามารถทำนายอัตราการกินเชื้อเพลิงที่ค่าอัตราส่วนสมมูลต่างๆ โดยที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ
4 อัตราการกินเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าระหว่าง 159.588 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ถึง 302.832 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง สำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาด 20 มิลลิเมตร ถึง 60 มิลลิเมตร

งานวิจัยนี้ยังได้ทำการสร้างเตาชีววมวลและทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการออกแบบ
เตาชีววมวลที่มีอัตราการกินเชื้อเพลิง 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้อง
กับการออกแบบเป็นอย่างดี

Suronggon Petcharak 2008: Design of a Downdraft Gasifier Using Computational Fluid Dynamics Method. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.
Thesis Advisor: Assistant Professor Wichai Siwakosit, Ph.D. 88 pages.

This study demonstrates a design of a downdraft gasifier using a computational fluid dynamics method, which enables a designer to specify a fuel consumption rate and a heating rate of a gasifier. The results from computer simulations and heat transfer relationships can be used to predict fuel consumption rates at several equivalence ratios. At equivalence ratio of 4, a mass loss rate has been predicted to be between 159.588 kg/hr and 302.832 kg/hr for 20 mm. to 60 mm. fuel sizes, respectively.

This study has also compared the fuel consumption rate from the results with a real downdraft gasifier, built according the design with 300 kg/hrs fuel consumption rate, and found that the computer simulations produce agreeable results.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้
ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ
อาจารย์ ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วง
ไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ
ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอบคุณ คุณรัตนะ เลहनิช ที่ได้ให้คำแนะนำในการออกแบบเตา
ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ พี่นัท และน้องทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศักดิ์สยาม อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการสร้าง
และทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลเพื่อเป็นข้อมูลในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่ได้แนะนำและให้กำลังใจ
ในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้ดีเสมอมา

สุรงค์กร เพชรรักษ์
กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	32
ผลการศึกษาและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	65
ภาคผนวก ข การทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	73
ภาคผนวก ค ขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	78
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของก๊าซ จากเตาผลิตก๊าซจากไม้และถ่าน	13
2	ปริมาณจี้เถ้าและผลของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีปริมาณจี้เถ้าสูง	14
3	ตารางแสดงผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเพียงพอ	35
4	แสดงค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ	55

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลขึ้น	16
2	ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	17
3	ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวาง	18
4	ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด	19
5	การแบ่งประเภทของคอกคอกของเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง	20
6	อุปกรณ์จ่ายลมชนิดเซ็นตริฟูกัล (centrifugal blower)	31
7	ลักษณะอุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)	32
8	ขั้นตอนการออกแบบเตา	33
9	กราฟแสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้ที่ ϕ ต่างๆ	34
10	ลักษณะภายในและภายนอกของเตา	36
11	การไหลของอากาศภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล	37
12	การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	38
13	การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	39
14	การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	39
15	การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	40
16	การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	40
17	การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	41
18	คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	44
19	เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	44
20	คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	45
21	เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	45
22	คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	46
23	เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	46
24	ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 20 mm.	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	47
26	ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	48
27	ค่าเลขเรโนลด์ซ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	49
28	ค่าเลขเรโนลด์ซ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	49
29	ค่าเลขเรโนลด์ซ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	50
30	ค่าเลขนัสเซิลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	51
31	ค่าเลขนัสเซิลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	51
32	ค่าเลขนัสเซิลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	52
33	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	52
34	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	53
35	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	53
36	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.	54
37	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.	54
38	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.	55
39	ค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง	56
40	ค่าอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง	57
41	ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง	57
42	ลักษณะโครงสร้างภายนอกของเตา	58
43	การทดลองเดินเครื่องเตาชีวมวล	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข1 การติดตั้งพัดลมสำหรับป้อนอากาศให้กับเตา	74
ข2 การบรรจุเชื้อเพลิง	75
ข3 การจุดเตา	76
ข4 ก๊าซเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ที่หัวเผา	77
ข5 ลักษณะเปลวไฟจากการติดไฟของก๊าซเชื้อเพลิง	77
ค1 ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอกคอดเดี่ยว	79
ค2 รายละเอียดขนาดภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอกคอดเดี่ยว	80
ค3 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนฐานเตา	81
ค4 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนถังบรรจุเชื้อเพลิงส่วนใน	82
ค5 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนถังบรรจุเชื้อเพลิงส่วนนอก	83
ค6 รายละเอียดลักษณะและขนาดของเตาส่วนกลาง	84
ค7 รายละเอียดลักษณะและขนาดของฝาปิดถังบรรจุเชื้อเพลิง	85
ค8 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนคอกคอดเตา	86
ค9 รายละเอียดลักษณะและขนาดของฝาปิดส่วนฐานเตา	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่ผิว
a	ความเร่ง
B	ฮาร์โหลด
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
F	แรงที่กระทำกับวัตถุ
HV_{gas}	ค่าความร้อนของก๊าซ
HV_{wood}	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
k	ค่าการนำความร้อนของอากาศ
m	มวลของวัตถุ
Nu_{sph}	เลขนัสเซิล
Pr	เลขพรันด์
Re	เลขเรย์โนลด์
T	อุณหภูมิ
u	ความเร็วตามแนวแกน x
v	ความเร็วตามแนวแกน y
w	ความเร็วตามแนวแกน z
$\dot{m}_{air}$	อัตราการไหลมวลอากาศ
$\dot{m}_{air,act}$	อัตราการไหลมวลอากาศจริง
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนของก๊าซ
$\dot{q}$	ฟลักความร้อน
$\vec{V}$	เวกเตอร์ความเร็ว
σ	Stress tensor
μ	ความหนืดพลวัตของก๊าซ
ε	Isotropic dissipation rate term
ρ	ความหนาแน่นอากาศ
ϕ	อัตราส่วนสมมูล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

η	ประสิทธิภาพ
ν	ความหนืดของก๊าซ
α	ค่าการแพร่ของความร้อน
τ_{xz}	ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน x บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน z
τ_{yx}	ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน y บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x
τ_{yz}	ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน y บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน z
τ_{zx}	ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน z บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x
τ_{zy}	ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน z บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน y
ตัวห้อย	
x, y, z	ตามแนวแกน x, y, z
i, j, k	Cartesian indices
s	ที่พื้นผิว
∞	เหนือพื้นผิว

การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Design of a Downdraft Gasifier Using Computational Fluid Dynamics Method

คำนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อสนองตอบความต้องการของมนุษย์นั้น มีแนวโน้มสูงขึ้นถึงระดับวิกฤต เนื่องจากความต้องการที่ไม่สิ้นสุดประกอบกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดอย่างไม่คุ้มค่า เป็นผลให้ทรัพยากรธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็ว ไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ โดยเฉพาะการใช้พลังงานในประเทศไทยนั้นถือเป็นปัญหาที่มีความสำคัญยิ่งและกำลังอยู่ในช่วงวิกฤต เป็นผลมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศที่มีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความวิตกกังวลกันว่าในอนาคตการจัดหาพลังงานจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชากรในประเทศ ซึ่งการใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม หรือหน่วยงานต่างๆ เช่น การใช้พลังงานความร้อนจากถ่านหิน ผลิตกระแสไฟฟ้า การใช้น้ำมันเตาเพื่อลดความชื้นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ก็เป็นอีกตัวการหนึ่งที่มีแนวโน้มในการใช้พลังงานที่สูงขึ้น ทำให้ต้องมีการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้นในขณะเดียวกันวัตถุดิบที่ผลิตได้ในประเทศก็มีปริมาณที่ลดลงเรื่อยๆ จึงเป็นเหตุให้มีการศึกษาค้นคว้าหาพลังงานทางเลือกใหม่มาทดแทน เพื่อลดการนำเข้าวัตถุดิบและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศให้คุ้มค่าที่สุด โดยพลังงานทางเลือกดังกล่าวก็คือเศษวัสดุที่ได้มาจากการเกษตร ได้แก่ จี้เลื่อย ซังอ้อย เศษไม้ ซึ่งจะนำมาใช้ผลิตพลังงานทดแทนถ่านหิน และน้ำมันเชื้อเพลิง โดยจะนำมาผลิตในรูปแบบต่างๆ เช่น เผาให้ความร้อนเพื่อใช้ในการลดความชื้นกับเมล็ดพืชหรือวัตถุดิบ หรือการอาศัยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า Gasification เป็นการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Fuel gas) ที่สามารถให้ความร้อนสำหรับกระบวนการอบแห้งวัตถุดิบ การผลิตกระแสไฟฟ้า และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในกระบวนการต่างๆ นี้ ได้มีการออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซตามชนิดของเชื้อเพลิงและประเภทของเตา โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้ จี้เลื่อย เป็นที่นิยมนำมาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำการออกแบบปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ Gasification ของเชื้อเพลิงในโซนต่างๆ ตามประเภทและขนาดของเตาเพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของเตาได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ชนิดคอคอเดี่ยว(Single throat) โดยเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้คือเศษไม้ (Wood chip) ซึ่งจะทำให้การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาผลิตก๊าซรวมกับการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซดังกล่าวเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง (Downdraft gasifier) ชนิดคอคอดเดี่ยว (Single throat) โดยใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้ (Wood chip) ที่มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงในเขตไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) ที่อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ต่างๆ จากแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม fluent 6.2.16
3. เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ได้จากแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม fluent 6.2.16 กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการทดลองจริง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง (Downdraft gasifier) ชนิดคอคอดเดี่ยว (Single throat) ที่ใช้เศษไม้ (Wood chip) เป็นเชื้อเพลิง โดยใช้หลักการออกแบบของ F.A.O
2. เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการทดสอบกับแบบจำลองที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ
3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลจากการทดสอบและแบบจำลอง

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jayah *et al.* (2003) ได้นำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีววมวลมาใช้ในอุตสาหกรรมอบแห้งใบชา โดยทำการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอคอดเดี่ยว เพื่อทดสอบหาดัชนีที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบเตาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองในเขตไพโรไลซิสและเขตรีดักชัน เพื่อคำนวณหาส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล การคำนวณจะใช้แบบจำลองของเชน (Chan's model) ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองการหาปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ต้องการสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยการประมาณค่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (fuel to air ratio) และแบบจำลองการหาอุณหภูมิในเขตไพโรไลซิส, เขตรีดักชัน และอุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิง การทดลองจะใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ (wood chip) ขนาด 30 ถึง 50 mm. เป็นไม้ยางที่มีค่าความชื้น 15 % ความยาวของเขตรีดักชันเท่ากับ 330 mm. โดยจากการทดลองทำให้ทราบถึงปริมาณของก๊าซออกซิเจนและอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพเตาผลิตก๊าซชีววมวลในกระบวนการอบแห้งใบชาต่อไป

Zainal *et al.* (2001) ได้ทำการสร้างแบบจำลองสมดุล (Equilibrium model) กระบวนการเผาไหม้ของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงในการหาค่าส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิงและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากความชื้นสะสมใน ไม้และอุณหภูมิในเขตรีดักชันต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจากผลการคำนวณโดยแบบจำลองสมดุล แสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงลดลงในขณะที่ความชื้นที่สะสมในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จากการที่ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงลดลงนั้นจะเสมือนว่าอุณหภูมิในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสูงขึ้นโดยอยู่ในช่วงที่จำกัด

Zainal *et al.* (2002) ได้ทำการทดลองการให้อัตราป้อนอากาศเข้าของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงตามค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมดุล (equivalence ratio) ว่ามีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซชีววมวลดังกล่าวและคุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ (wood chip) กำหนดอัตราป้อนอากาศในช่วงอัตราส่วนสมดุลเท่ากับ 0.268 ถึง 0.43 จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราป้อนอากาศให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าอัตรา

ป้อนอากาศสูงสุดของการทดลองคือที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.38 ประสิทธิภาพของเตาในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเท่ากับ 80 % โดยที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาเท่ากับ 2 kg/kW-hr

Fletcher *et al.* (2000) ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาผลิตก๊าซชีวมวลสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาด 1 MW โดยวิเคราะห์แบบจำลองการไหลของอากาศภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลจากหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ด้วยวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method) โดยใช้โปรแกรม CFX 4 ในการคำนวณแบบจำลองการไหลภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลว่ามีผลอย่างไรต่อความเข้มข้นของก๊าซเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของก๊าซเชื้อเพลิงภายในเขตไฟโรไลซิสและเขตรีดักชัน ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ คือ แบบจำลองเรย์โนลด์สเตรส (Reynold stress model) และแบบจำลอง $k - \varepsilon$ ($k - \varepsilon$ model)

Reed *et al.* (1999) ได้ทำการวิเคราะห์ผลของ Superficial velocity หรือฮาร์ทโวลด์ว่ามีผลต่อเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงอย่างไร ซึ่งการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า Superficial velocity หรือฮาร์ทโวลด์ จะเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ, การควบคุมอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง, พลังงานของก๊าซเชื้อเพลิง, อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการกลายเป็นถ่านและขี้เถ้าของเชื้อเพลิง โดยจากการวิเคราะห์พบว่า ถ้า Superficial velocity ต่ำจะเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสช้าลงที่อุณหภูมิในช่วง 600 °C ทำให้เกิดการกลายเป็นถ่านของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำมันดินที่ไม่ติดไฟสูง และทำให้ก๊าซเชื้อเพลิงมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูง ถ้า Superficial velocity สูงจะเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณการเกิดถ่านและขี้เถ้าต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1050 °C อุณหภูมิของก๊าซในเขตไฟโรไลซิสสูงประมาณ 1200 ถึง 1400 °C ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความเร็วของอากาศจะเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง

พลังงานทดแทน

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการประกอบกิจกรรมเกี่ยวกับการดำเนินชีวิตมนุษย์ ความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคม ความมั่นคงของประเทศ การขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรในประเทศ มีผลทำให้ความต้องการพลังงานภายในประเทศมีค่าสูงขึ้นด้วย (อนุตร, 2545)

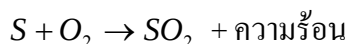
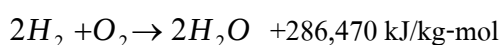
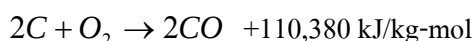
พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่ใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง เราอาจจำแนกตามแหล่งที่ได้เป็น 2 ประเภทคือ พลังงานหมุนเวียนจากแหล่งที่สิ้นเปลือง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ หินน้ำมัน ทหราน้ำมัน หินน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานหมุนเวียนจากแหล่งที่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้โดยไม่สิ้นเปลือง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น

พลังงานจากชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถสร้างขึ้นได้ แต่การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานนั้นต้องอาศัยกระบวนการที่ซับซ้อนในการแปรรูป และมนุษย์จะต้องลงทุนสร้างวัตถุดิบขึ้นมาทำให้ความสำคัญของชีวมวลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานจากชีวมวลในสมัยก่อนการค้นพบน้ำมัน (ปรีชา, 2529) การใช้พลังงานชีวมวลเป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยทางอ้อม ประมาณ 1 ใน 7 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในปัจจุบัน พลังงานชีวมวลนี้ได้มาจากพืชและสัตว์ โดยมีกระบวนการแปรรูปพลังงานต่างๆ ดังนี้ (ประเสริฐ และคณะ, 2540)

1. การเผาไหม้โดยตรง (Combustion)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในที่ซึ่งมีอากาศ เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ การสันดาปเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร หรือ 23% โดยน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เนื่องจากจะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1.1 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้แรงงานคน เป็นระบบที่มีใช้อยู่ดั้งเดิมโดยการใช้คนตักเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เตา ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับความชำนาญ และความเอาใจใส่ของแรงงาน

1.2 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงแบบสโตเกอร์ (Stoker) เป็นระบบที่ใช้เครื่องจักรป้อนเชื้อเพลิงแทนแรงงานคนโดยมีกลไกที่ไม่ซับซ้อนมากนัก มีราคาถูก และสามารถออกแบบให้ใช้ได้กับเชื้อเพลิงแข็งหลายๆชนิด หลายขนาด แต่มีข้อเสียคือระบบสโตเกอร์มีขีดความสามารถในการผลิตไอน้ำต่ำ ระบบสโตเกอร์แบ่งออกได้ตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง คือ ระบบสโตเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (Overfeed Stoker) ซึ่งเป็นแบบตะกรับเลื่อน (Traveling Grate Stoker) และระบบสโตเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed Stoker)

1.3 ระบบพัลเวอร์ไรซ์ (Pulverized) การเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบพัลเวอร์ไรซ์จะเกิดขึ้นในลักษณะเชื้อเพลิงที่ถูกแขวนลอย ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะต้องมีขนาดเล็กสามารถแขวนลอยอยู่ได้ในอากาศ อากาศส่วนแรกที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะถูกอุ่นก่อนเพื่อช่วยในการอบแห้งเชื้อเพลิง อากาศส่วนที่สองจะถูกส่งเข้าสู่เตาโดยตรงเพื่อช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จี๊ไถ่ที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกมากับไอเสีย

1.4 ระบบไซโคลน (Cyclone) ระบบนี้ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของการเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบพัลเวอร์ไรซ์ เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาอาศัยแรงโน้มถ่วงเช่นเดียวกับระบบพัลเวอร์ไรซ์ แต่ไม่จำเป็นต้องบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็ก สามารถลดค่าใช้จ่ายของการบดเชื้อเพลิงลงได้ การเผาไหม้ระบบไซโคลนจะใช้หัวเผาแบบ Horizontal water-cooled ขนาดเล็กทำให้เตาเผา ระบบไซโคลนมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาแบบพัลเวอร์ไรซ์เมื่อคิดต่อหน่วยปริมาตร อากาศที่เข้าสู่เตาจะอยู่ในแนวสัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulence) ในห้องเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างทั่วถึงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อุณหภูมิของการเผาไหม้จะสูงถึง 1650 °C ทำให้ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของถ้ำหลอมเป็นจี๊โลหะเหลว (Liquid Slag) ส่วนที่เหลืออีก 70-50 เปอร์เซ็นต์จะเป็นถ้ำลอยปนมากับก๊าซไอเสีย

1.5 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) ระบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นอากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง เมื่อเพิ่มอัตราความเร็วของอากาศถึงจุดหนึ่งเชื้อเพลิงจะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหลโดยจะมีสารเฉื่อย (Inert Material) เช่นทราย หรือสารทำปฏิกิริยา (Reaction Material) เช่น หินปูนเป็นฐาน เมื่อเริ่มติดเตาฐานจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาอย่างสม่ำเสมอ

2. ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวล โดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศจำนวนจำกัด (Destructive Distillation) อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส จะต่ำกว่ากระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification) ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน ปริมาณความชื้น และส่วนประกอบของชีวมวล โดยทั่วไปผลผลิตหลักที่ได้ คือ ถ่าน (Charcoal) ผลผลิตรองที่ได้ คือ น้ำมันไพโรไลติก (Pyrolytic oil) เมทธานอล กรดน้ำส้ม และผลิตภัณฑ์ ที่เป็นก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอบชีวมวลที่จะใช้ในกระบวนการ หรือใช้เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการ

โดยปกติการเผาถ่านที่กระทำกันอยู่ คือ กระบวนการไพโรไลซิส แต่เนื่องจากลักษณะของเตาที่ใช้เผา และการเก็บผลผลิตเพียงถ่านทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเผาถ่านต่ำ พลังงานที่ได้จากถ่านจะได้เพียงร้อยละ 20 ของพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่เดิมในชีวมวล USAID (United States Agency for International Development) ได้ทดลองตั้งสถานีเผาถ่านในประเทศกานา โดยใช้เทคโนโลยีทางไพโรไลซิส ที่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์รอง อาทิ ก๊าซต่างๆ กลับมาใช้ได้อีก ปรากฏว่าโดยวิธีนี้จะสามารถได้พลังงานทั้งหมดร้อยละ 80 ของพลังงานเดิมที่มีในชีวมวลนั้น

3. การผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification)

เป็นกระบวนการ Partial Oxidation ที่ใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงอยู่ในสภาพของก๊าซที่ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนั้นยังมี ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

การผลิตก๊าซชีววมวลเป็นกระบวนการที่ใช้กันมานานแล้ว ไม่ว่าจะใช้กับถ่านหิน เศษไม้ หรือ ขยะ จึงได้มีการพัฒนาเตาผลิตก๊าซชีววมวล (Gasifier) เพื่อใช้กับวัสดุดังกล่าว เตาผลิตก๊าซชีววมวล ที่ใช้กับไม้ได้ทำการออกแบบให้ใช้ได้ทั้งความดันบรรยากาศ ซึ่งต่างกับเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้กับ ถ่านหินซึ่งใช้ ความดันที่ 400 Psig หรือสูงกว่านี้ ความแตกต่างหนึ่งระหว่างการผลิตก๊าซชีววมวล ของไม้ และถ่านหิน คือ กระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลของไม้นั้นก๊าซที่ได้จะมีปริมาณความชื้นสูง ความชื้นนี้นอกจากจะเกิดขึ้นจากกระบวนการแล้วยังมาจากไม้ที่ใช้ด้วย แต่สามารถกำจัดออกจาก ก๊าซที่เกิดขึ้นได้

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีววมวล

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีววมวลเพื่อใช้ในการสันดาป เริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1812 ในประเทศ อังกฤษ โดยการอบถ่านหินให้แห้งในเตาเผาที่ทอดที่ปิดสนิท จะได้ก๊าซที่มีค่าความร้อนประมาณ 15 MJ/m³ จากการผลิตก๊าซจากถ่านหินในสมัยนั้นเป็นการเอาสารระเหยออกจากถ่านหินเป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่เหลือคือถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงประมาณ 70% ของน้ำหนักถ่านหินก่อนอบ การผลิต ก๊าซจากถ่านหินอย่างแท้จริงได้มีการคิดค้นขึ้นมาในประเทศฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1839 โดยแปรรูป ถ่านหินเป็นก๊าซทั้งหมด ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนต่ำตั้งแต่ 4.5-5.0 MJ/Nm³ เตาผลิตก๊าซที่ได้เรียกว่า Gasifier หรือ Producer gas ซึ่งเป็นเครื่องขนาดใหญ่และใช้กันมานานประมาณ 100 ปี การผลิตเตา ผลิตก๊าซขนาดเล็กที่ใช้กับรถยนต์ มีการเริ่มต้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 จนถึงสงครามโลกครั้งที่ 1 จากนั้นก็จึงมีการคิดค้นสร้างเตาผลิตก๊าซใช้กับงานอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กจนถึงปัจจุบัน (ปรีชา, 2529)

ก๊าซที่ได้จากเตาสังเคราะห์ก๊าซจะมีค่าความร้อนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และ กรรมวิธีการผลิต แสดงได้ดังนี้

Wood gasification (air)	= 3.7-5.6 MJ/Nm ³
Oxygen (O ₂)	= 11-14 MJ/Nm ³
Coal gasification	= 20 MJ/Nm ³
Natural gas	= 3.9 MJ/Nm ³

การใช้ประโยชน์ของก๊าซจากเตาผลิตก๊าซ โดยทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ระบบใหญ่ๆ คือ ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว (Syn-gas system) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับสันดาปภายนอก (Direct heat system) และเป็นเชื้อเพลิงสำหรับสันดาปภายในเครื่องยนต์ (Shaft power system)

1. ปฏิบัติทางเคมีทางความร้อนของการเกิดก๊าซชีวมวล

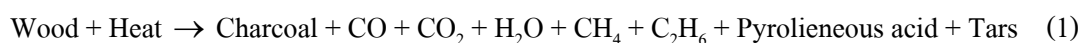
ในกระบวนการเกิดก๊าซชีวมวลภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวล เราสามารถแบ่งเขตการเกิดก๊าซตามปฏิกิริยาทางเคมีและความแตกต่างของอุณหภูมิได้เป็น 4 เขต คือ เขตอบแห้ง เขตไพโรไลซิส เขตรีดักชัน และเขตสันดาป (ปรีชา, 2529) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 เขตอบแห้ง (Drying zone)

ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมาก ทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยตัวออกมาในรูปของไอน้ำเป็นส่วนใหญ่ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 150-400 °C ปฏิบัติการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงยังไม่เด่นชัด (อนุตร, 2545)

1.2 เขตไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

ความร้อนจากโซนรีดักชัน จะแพร่เข้าสู่โซนนี้เพื่อที่จะเผาไหม้สารอินทรีย์หรือเชื้อเพลิงแข็งนั่นเอง ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสส่วนใหญ่เป็นของเหลว เช่น เมทธานอล กรดน้ำส้มและน้ำมันดิน และสารระเหยอื่นๆ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่า 400-600 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปในเขตรีดักชันและเขตสันดาป ปฏิกิริยาที่ได้ในเขตนี้อาจเขียนอยู่ในรูปของสมการทางเคมีดังนี้



ผลผลิตที่เป็นก๊าซเชื้อเพลิงมีปริมาณเล็กน้อยและนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ซึ่งจะต้องสร้างระบบทำความสะอาดสารระเหยที่ได้จากเขตนี้

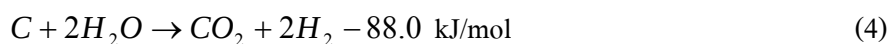
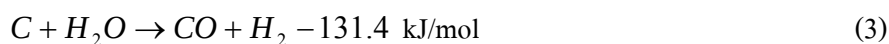
1.3 เขตรีดักชัน (Reduction zone)

ก๊าซร้อนที่ผ่านมาจากกระบวนการในเขตสันดาป จะไหลผ่านมายังเขตรีดักชัน ซึ่งมีปฏิกิริยาหลัก คือ Reduction อุณหภูมิในเขตนี้จะมีค่าระหว่าง 600-950 °C ในเขตนี้จะเป็นเขตของการสังเคราะห์ก๊าซติดไฟทั้งหมดเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน และมีการเปลี่ยนก๊าซบางส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ซึ่งก็คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ ในเขตสันดาป ให้กลายเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังถูกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการ

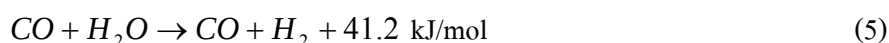
Boudouard reaction:



Water gas reaction:



Water shift reaction:



Methane reaction:



ปฏิกิริยาในสมการ (2)-(4) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C ก๊าซที่ได้จากทั้งสมการทั้งสองเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซชีวมวลนี้ จะขึ้นอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้มากน้อยเพียงใด ในเขตรีดักชันนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วระหว่างก๊าซที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่ที่ก๊าซสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงแข็ง

ดังนั้น ขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งที่ป้อนเข้าไปยังเตาเผา จึงมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวมวล เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ จะยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวมวลต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียของความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น และก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จะมีปริมาณของฝุ่นมากขึ้น จากปฏิริยา (2) ถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชันสูงกว่า 900 °C ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1,100 °C จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในเขตรีดักชัน ในขณะที่ก๊าซร้อนจากเขตสันดาปเคลื่อนที่เข้าสู่เขตรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซลดลง เนื่องจากปฏิริยาในสมการ (2) และ (3) เป็นปฏิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิริยากันเพื่อก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิริยาในสมการ (4) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500-600 °C ปฏิริยานี้จะมีความสำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซชีวมวลมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อนที่ได้ในกระบวนการ แต่ถ้ากระบวนการมีไอน้ำมากเกินไปอาจทำปฏิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังปฏิริยา (5) ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป ในกระบวนการก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนอาจจะทำปฏิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นได้เล็กน้อย ดังปฏิริยา (6)

อย่างไรก็ตามกลไกของปฏิริยาจะเป็นไปในทิศทางใดยังไม่สามารถสรุปได้ เพราะปฏิริยาเกิดขึ้นในเขตที่มีอุณหภูมิสูงมาก

1.4 เขตสันดาป (Combustion zone)

อากาศจะถูกส่งเข้ามาในเขตนี้ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสกัน เกิดปฏิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการ



ปฏิกิริยาในสมการ (7) และ (8) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในเขตรัดกั้น และเขตไพโรไลซิส อุณหภูมิในเขตสันดาป จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500 °C

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานที่เกิดขึ้นในเขตนี้จะเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการสังเคราะห์ก๊าซทั้งระบบ เตาผลิตก๊าซจากไม้และถ่านจะให้ก๊าซที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซ จากเตาผลิตก๊าซจากไม้และถ่าน

Gas	Gasifier	
	Wood Gas (vol. %)	Charcoal Gas (vol. %)
N ₂ (%)	50 - 54	55 - 65
CO (%)	17 - 22	28 - 32
CO ₂ (%)	9 - 15	1 - 3
H ₂ (%)	12 - 20	4 - 10
CH ₄ (%)	2 - 3	0 - 2

ที่มา: FAO (1986)

2. เชื้อเพลิงสำหรับผลิตก๊าซชีวมวล

ไม้ ถ่านไม้และถ่านหิน เป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตก๊าซ เพราะมีปริมาณมาก ราคาถูกและสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์และชีวมวลอื่นๆ ก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตก๊าซได้เช่นเดียวกัน ถ้ามีปริมาณมาก ราคาถูกและสม่ำเสมอ ข้อจำกัดเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตก๊าซชีวมวลมีดังนี้ (ปรีชา, 2529)

- 2.1 ความชื้นควรต่ำกว่า 20%
- 2.2 ปริมาณจีเถ้าควรต่ำกว่า 6%
- 2.3 ปริมาณซิลิกาควรต่ำกว่า 2%
- 2.4 อุณหภูมิการหลอมตัวของจีเถ้าควรสูงกว่า 1150 °C

จากการทดสอบชีวมวลชนิดอื่นๆ นอกจากไม้และถ่านกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลพบว่า ฟางข้าว ต้นฟ้าย แกลบ และชานอ้อย มีปัญหาในการผลิตก๊าซ เนื่องจากเป็นชีวมวลที่มีปริมาณน้ำสูง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำและผลของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีปริมาณน้ำสูง

Fuels	Ash content (% of dry weight)	Degree of slagging
Bean straw	10.2	Severe
Corn stalks	6.4	Moderate
Cotton gin trash	17.6	Severe
Cubed cotton stalks	17.2	Severe
R D F pellets	10.4	Severe
Pelleted rice hulls	14.9	Severe
Safflower straw	6.0	Minor
1/4" pelleted walnut shell mix	5.8	Moderate
Wheat straw and corn stalks	7.4	Severe

ที่มา: FAO (1986)

3. ประเภทของเตาผลิตก๊าซชีวมวล

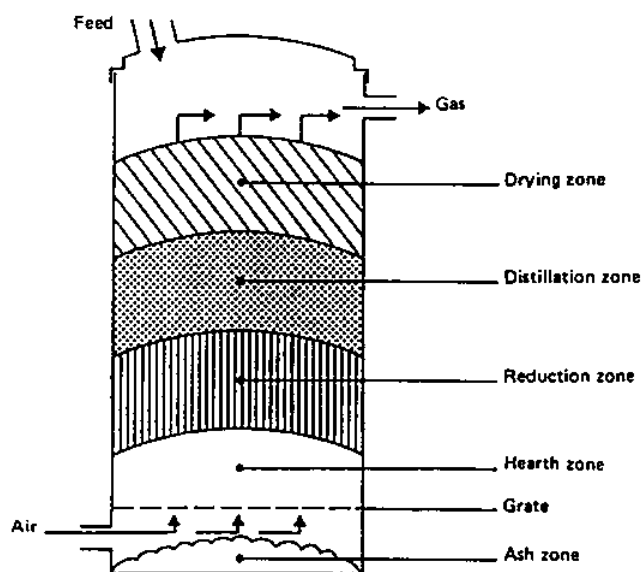
เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบ่งออกเป็น 4 เขตดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลจะออกแบบโดยการจัดเขตต่างๆ เหล่านี้ให้แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการใช้งาน วัสดุที่ใช้ และคุณสมบัติของก๊าซที่ได้ สามารถแบ่งเตาผลิตก๊าซชีวมวลออกเป็น 4 แบบ คือ แบบไหลขึ้น แบบไหลลง แบบไหลตัด และแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FAO, 1986)

การเคลื่อนตัวของเชื้อเพลิง อากาศ ก๊าซ การกระจายตัวของอุณหภูมิ ขนาดจำกัดของวัสดุและความชื้นของวัสดุที่เหมาะสม มีส่วนสำคัญในการผลิตก๊าซชีวมวลให้เหมาะสมกับประเภทของเตา (ปรีชา, 2529)

3.1 เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลขึ้น (Updraft Gasifier)

เตาประเภทนี้เป็นเตาเผาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาทางด้านล่างบริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไป จะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเราเรียกบริเวณส่วนนี้ว่า เขตสันดาป (Combustion zone) หรือ ฮาร์ท โซน (Hearth zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณเขตสันดาปจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากเขตเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิสูงและจะถูกส่งผ่านไปยังเขตรีดักชัน ซึ่งเป็นเขตที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C หลังจากนั้นก๊าซจะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลที่ขึ้น เนื่องจากก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้น ทำให้ก๊าซที่ออกจากเตาเผาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง

เตาเผาประเภทนี้จะไม่ซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมากและก๊าซชีววมวลที่ได้มีอุณหภูมิต่ำ ไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัด คือ ก๊าซที่ผลิตได้จะมีสารเคมีประเภทน้ำมัน และน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในเขตไฟโรไลซิส (distillation zone) และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นก๊าซที่ได้จากเตาเผาประเภทนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้สำหรับหม้อน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางเกษตรซึ่งก๊าซที่ได้จะผสมกับอากาศ และทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลขึ้นมีลักษณะดังภาพที่ 1



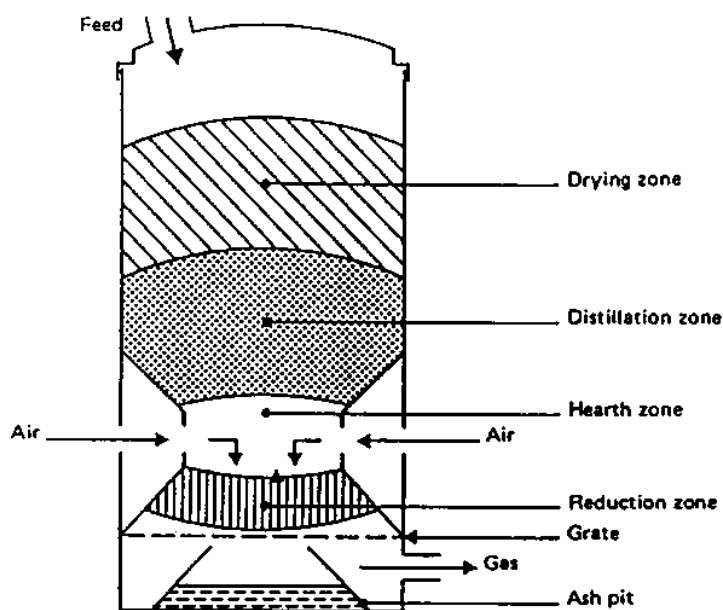
ภาพที่ 1 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น
ที่มา: FAO (1986)

เตาผลิตก๊าซแบบไหลขึ้นนี้ ได้ถูกดัดแปลงมาใช้กับรถยนต์ในสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง โดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีปัญหามากเกี่ยวกับน้ำมันดิน ในปัจจุบันเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบนี้นิยมใช้ในการให้ความร้อนโดยนำก๊าซที่ได้มาสันดาปด้านนอกอีกทีหนึ่ง

3.2 เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง (Downdraft Gasifier)

เตาเผาชีวมวลแบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อที่จะขจัดน้ำมันดิน ที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะ อากาศจะถูกส่งจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาเผา ดังภาพที่ 2 ผ่านกลุ่มของหัวจ่ายอากาศ ซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณจ่ายอากาศ จะเป็นบริเวณของเขตสันดาป ก๊าซที่ได้จากเขตสันดาป จะถูก Reduced ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของเขตสันดาป จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และไอของน้ำมันดินที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ปฏิกิริยาคูลความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซที่ผ่านเขตสันดาปจะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมัน ซึ่งจะมีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของ

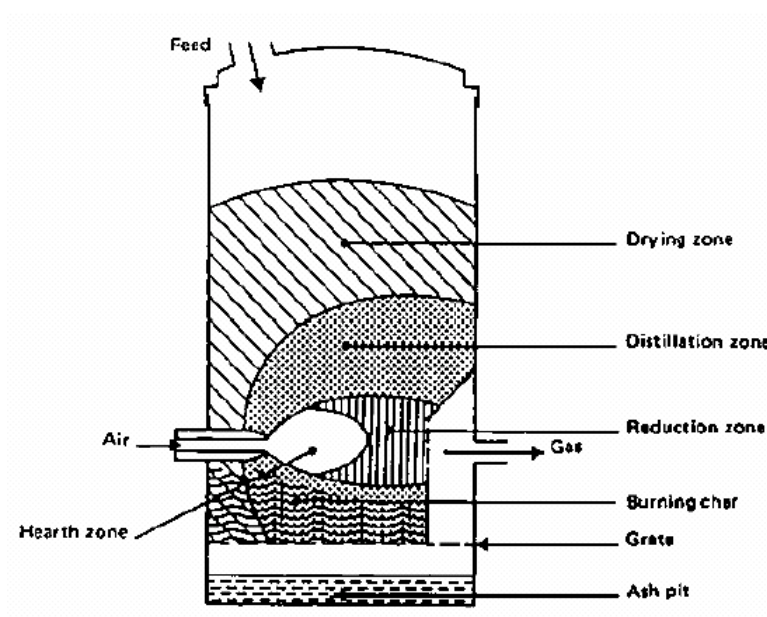
น้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลขึ้น และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาผลิตก๊าซชีววมวลทั้งแบบ ไหลขึ้นและไหลลง จะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และเชื้อเพลิงจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าถ่านติดออกมากับก๊าซชีววมวลน้อยมาก โดยลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงมีลักษณะดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง
ที่มา: FAO (1986)

3.3 เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวาง (Cross-draft Gasifier)

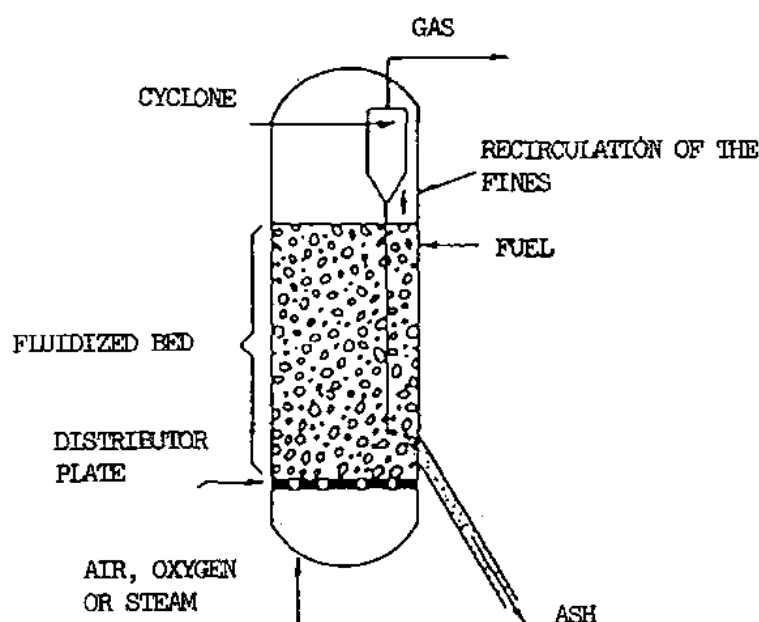
เตาเผาแบบนี้อากาศจะถูกจ่ายผ่านหัวจ่ายอากาศซึ่งอยู่ในแนวราบ ดังภาพที่ 3 เขตสันดาปจะอยู่ถัดจากหัวจ่ายอากาศออกไป และถัดออกไปจะเป็นเขตรีดักชัน แล้วก๊าซชีววมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรง ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง โดยรอบบริเวณเขตสันดาป และเขตรีดักชัน จะเป็นเขตไพโรไลซิส หรือ Distillation น้ำมันและน้ำมันดินที่ได้จากเขตไพโรไลซิส จะผ่านเขตรีดักชันก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอก ทำให้ก๊าซชีววมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีผลตอบแทนเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงแข็งที่ควรนำมาใช้กับเตาเผาแบบนี้ ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง โดยลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวางมีลักษณะดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลตัดขวาง
ที่มา: FAO (1986)

3.4 เตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed gasifier)

เตาผลิตก๊าซชีวมวลจากที่กล่าวมาแล้วทั้งสามแบบข้างต้น การทำงานของกระบวนการในระบบขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาทางด้าน Slag ที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงทำให้เกิดการอุดตันในเตาเผาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด มาใช้ เตาเผาแบบนี้อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อเราเพิ่มความเร็วดังกล่าวที่ไหลผ่านสูงจนกระทั่งทำให้เชื้อเพลิงที่วางอยู่เริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายกับของไหลดังภาพที่ 4 ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้นเบด จะเริ่มร้อนขึ้นจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจึงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ ภายในเตาจะใส่วัสดุเฉื่อย เช่น ทราย หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ หินปูน ซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยในการทำความสะดวกก๊าซที่ได้จากเบด เตาเผาแบบนี้มีข้อดีคือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาสามารถทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของขี้เถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของ Slag ที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีขี้เถ้าสูงได้ แต่ข้อเสียของเตาเผาแบบนี้คือ ก๊าซชีวมวลที่ออกจากเตาเผาจะมีปริมาณขี้เถ้า และฝุ่นถ่านออกมาด้วย เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูง จึงต้องมีการนำ ไซโคลน (Cyclone) หรือ Baghouse มาใช้กับระบบนี้ด้วย



ภาพที่ 4 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด
ที่มา: FAO (1986)

หลักการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง

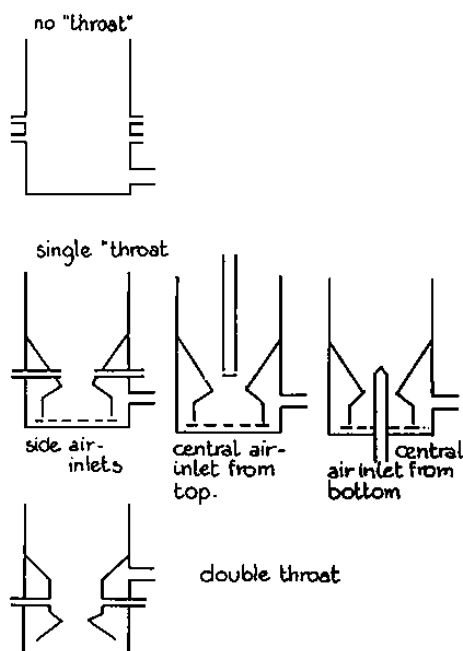
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) เสนอหลักการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงไว้ตาม FAO (1986) เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง เป็นเตาที่สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงไม้ เนื่องจากเตาชนิดนี้เมื่อผลิตก๊าซออกมาได้จะมีน้ำมันดินออกมาน้อย ซึ่งน้ำมันดินนี้จะไหลไปกับก๊าซที่ผลิตออกมาและไปเกาะติดอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ก๊าซไหลผ่าน และเตาชนิดนี้ยังเป็นเตาที่ติดตั้งและเดินเครื่องได้ง่าย จึงนิยมใช้เตาชนิดนี้ทั่วไป การออกแบบเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงจะพิจารณาในเขตสันดาป ซึ่งเป็นเขตที่ก่อให้เกิดความร้อนและเกิดการสังเคราะห์ก๊าซขึ้น และเป็นส่วนที่อากาศจากภายนอกจะไหลเข้าสู่เตาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิง การควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้กระจายตัวได้ดีจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งแนวทางที่จะช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเขตนี้เป็นไปอย่างทั่วถึงจะทำให้ได้ 2 วิธีคือการลดพื้นที่หน้าตัดภายในโซนหรือการทำคอคอดในส่วนหนึ่งของเขตนี้ (throat concept) และการกำหนดหัวจ่ายลมให้มีจำนวนเหมาะสมตามเส้นรอบวง โดยหลักการออกแบบเตาสามารถ สรุปได้ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรขึ้นมามีหนึ่งตัว คือ ฮาร์ทโหลด (Hearth load : B) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\text{m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ ซึ่งก็คืออัตราการไหลของอากาศที่เข้าภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวลต่อพื้นที่หน้าตัดภายในโซนเผาไหม้โดยที่ B จะมีค่าแตกต่างกันระหว่าง แบบไม่มีคอคอด (no throat) แบบคอคอดเดี่ยว (single throat) และแบบสองคอคอด (double throat) ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ดังนี้ 0.03, 0.11 และ 0.4 ตามลำดับ โดยขนาดพื้นที่หน้าตัดของคอคอดในกรณีนี้ที่ทราบอัตราการไหลของอากาศเข้าภายในเตาคำนวณได้จาก

$$B = \frac{\text{Flow rate of air inlet}}{\text{Surface area throat}} \quad (9)$$

2. ค่าความสูงของเขตรีดักชันควรจะมีค่ามากกว่า 20 cm แต่ไม่ควรมีค่าเกิน 32 cm (ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากเตาผลิตก๊าซหลายเครื่อง)

3. การแบ่งประเภทของคอคอดภายในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ แบบไม่มีคอขวด แบบคอคอดเดี่ยว และแบบสองคอคอด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การแบ่งประเภทของคอคอดของเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง
ที่มา: FAO (1986)

การใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวล

การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลนั้น การไหลของอากาศผ่านเชื้อเพลิงภายในเตามีความสำคัญกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเขตต่างๆ กับคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ ดังนั้นการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลจึงต้องมีการวิเคราะห์การไหลของอากาศให้มีความเหมาะสมกับขนาดและประเภทของเตารวมไปถึงปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซให้มีคุณภาพ หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นหลักการหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซและแก้ไขปัญหาดังกล่าว

1. หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือ กระบวนการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ระบบสมการการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล และอื่นๆ โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล และอื่นๆ ซึ่งทั้งหมดสามารถจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว (วราภรณ์, 2548)

การแก้ระบบสมการการเคลื่อนที่ของของไหลจะใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ที่มีพื้นฐานมาจากกฎการอนุรักษ์ของฟิสิกส์ (Conservation Laws of Physics)

- กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation)
- กฎการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation)
- กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation)

จากกฎพื้นฐานดังกล่าวจะนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองการไหลเพื่อสร้างระบบสมการการเคลื่อนที่ของการไหลในระบบที่ได้มีการออกแบบไว้

2. สมการพื้นฐานของการไหล

สมการพื้นฐานของการไหลประกอบไปด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ของกฎการอนุรักษ์ 2 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการอนุรักษ์

โมเมนตัม (Momentum Equation) ซึ่งปัญหาการไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทการไหลตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากเราใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณการไหลทางวิศวกรรมโดยทั่วไป ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าของไหลที่นำมาพิจารณา (เกรียงไกร, 2545)

- ของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้
- คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- การไหลเกิดขึ้นใน 2 มิติ
- การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว

2.1 สมการพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบ

จากหลักการอนุรักษ์มวลจะได้ว่า ผลรวมของการไหลออกของมวลผ่านปริมาตรทั้งหมดมีค่าเท่ากับอัตราการลดลงของมวลภายในปริมาตรเทียบกับเวลา

จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของมวล คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right] = 0 \quad (10)$$

เขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์ได้เป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (11)$$

สมการ (11) คือ สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation) โดยมี

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (12)$$

จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม (Control Volume) เทียบกับเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำบนปริมาตรควบคุม

และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$F = m\vec{a} \quad (13)$$

จากสมการ (13) ผลรวมของแรงที่กระทำต่อวัตถุ เท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่งของวัตถุนั้น เมื่อพิจารณาวัตถุที่มีแรงมากระทำตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตันในระนาบสามมิติ จะได้

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] (dx dy dz) + \rho f_x (dx dy dz) \quad (14)$$

$$F_y = \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] (dx dy dz) + \rho f_y (dx dy dz) \quad (15)$$

$$F_z = \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right] (dx dy dz) + \rho f_z (dx dy dz) \quad (16)$$

ความเร่งในระนาบ 3 มิติ จะได้

$$a_x = \frac{Du}{Dt}, \quad a_y = \frac{Dv}{Dt}, \quad a_z = \frac{Dw}{Dt}$$

จากสมการ (13) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (17)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (18)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right] + \rho f_z \quad (19)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (17) ถึง (19) และสมการอนุรักษ์มวล (11) ทำให้ได้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมคือ

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho u \vec{V}] \quad (20)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho v \vec{V}] \quad (21)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho w \vec{V}] \quad (22)$$

แทนค่าสมการ (17) ในสมการ (20) จะได้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho u \vec{V}] = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (23)$$

แทนค่าสมการ (18) ในสมการ (21) จะได้

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho v \vec{V}] = \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (24)$$

แทนค่าสมการ (19) ในสมการ (22) จะได้

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho w \vec{V}] = \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right] + \rho f_z \quad (25)$$

สมการ (23), (24) และ (25) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัม หรือเรียกอีกอย่างว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ในรูปอนุรักษ์ (Conservation form) โดยที่ตั้งสมมติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid)

จากหลักการข้างต้นสามารถกำหนดสมการพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบในระนาบ 2 มิติได้ดังนี้

Continuity equation

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (26)$$

X-Momentum equation

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (27)$$

Y-Momentum equation

$$\frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (28)$$

2.2 สมการพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วนนี้ มีสมการที่เกี่ยวข้องเช่นเดียวกับการไหลในกรณีของการไหลแบบราบเรียบ นั่นคือ สมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม ซึ่งจากลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการกำหนดตัวแปรและพิสูจน์สมการ จึงขอสรุปสมการพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วนดังนี้

Continuity equation

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (29)$$

Momentum equation

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (30)$$

Turbulent kinetic energy equation

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \rho \varepsilon \quad (31)$$

Dissipation rate equation

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (32)$$

Boussinesq approximation

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (33)$$

เมื่อ

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \mu_t \left[2 \left(\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right], \mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = 0.09, \sigma_K = 1.0, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

3. แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)

แบบจำลองความปั่นป่วน เป็นแบบจำลองที่ช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่อง และสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ในการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะใช้ในการหาค่า Reynolds stress ซึ่งในการคำนวณนั้นไม่จำเป็นต้องหาค่า Fluctuation แต่จะสนใจเพียงค่าเฉลี่ยของการไหลเท่านั้น โดยแบบจำลองการไหลที่ได้นั้นต้องสามารถคำนวณพฤติกรรมของการไหลในลักษณะต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ รวมทั้งช่วยประหยัดหน่วยความจำ

โดยทั่วไปแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้กันคือ Standard k-ε model ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\bar{\mu}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_z} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \varepsilon \quad (34)$$

$$\bar{\mu}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_z} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{z1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{z2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (35)$$

จากสมการ (34) และ (35) เมื่อนำความหนาแน่น (ρ) คูณทั้งสองข้างของสมการ และจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$\rho \bar{\mu}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\mu}{\sigma_z} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \rho \varepsilon \quad (36)$$

$$\rho \bar{\mu}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\rho}{\sigma_z} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{z1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{z2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } P &= \text{Production of kinetic energy} \\ &= \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \mu_t \left[2 \left(\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองการไหล โดยทั่วไปจะนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีหลักการคำนวณเป็นไปตามหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ควรจะศึกษาและเข้าใจการใช้งานของโปรแกรมสำเร็จรูปนั้นๆ อย่างละเอียด เพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นๆ กับปัญหาที่ต้องการศึกษาและออกแบบได้จริง ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของโปรแกรมสำเร็จรูปให้เหมาะสมกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่นั้น มีความสำคัญต่อความถูกต้องและความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา หาก โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ FLUENT, STAR-CD, CFX, PHOENICS, FLOW-3D, CFD2000, COSMOS/Flow, ANSYS/FLOTRAN และ CAMETA (วารสารรัตน์, 2548)

การใช้หลักการถ่ายเทความร้อนในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวล

ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (Convection Heat Transfer) ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของเชื้อเพลิงไปยังก๊าซภายในเตา โดยทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก๊าซ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ ทำให้สามารถออกแบบเตาให้มีขนาดที่เหมาะสมกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง

หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ใช้คำนวณในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวล จะใช้การคำนวณแบบการไหลภายนอกวัตถุแบบบังคับ (External force convection) ที่เป็นการไหลผ่านวัตถุทรงกลมและการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulence flow)

ในการหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (38) เพื่อที่จะนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้ไปหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ (Cengel, 2006)

$$h = \frac{Nu_{sph} k}{D} \quad (38)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับวัตถุทรงกลมจะสามารถหาได้จากสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรงกลม

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad 20,000 \leq Re \leq 80,000 \quad (39)$$

โดยที่เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลผ่านวัตถุทรงกลมจะมีค่าเลขเรย์โนลด์ในช่วง 3.5 ถึง 80,000

เมื่อทำการหาค่าเลขเรย์โนลด์ตามสมการ (39) แล้วทำการหาค่าตัวเลขพรันด์ (Prandtl number) จากสมการ (40)

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad 0.7 \leq \text{Pr} \leq 380 \quad (40)$$

เมื่อได้ค่าตัวเลขพรันด์แล้ว จะทำการหาค่าเลขนัสเซิล (Nusselt number) สำหรับวัตถุทรงกลมจากสมการ (41)

$$Nu_{sph} = 2 + [0.4 \text{Re}^{1/2} + 0.06 \text{Re}^{2/3}] \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s} \right) \quad (41)$$

เมื่อได้ค่าเลขนัสเซิลแล้วก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการ (38) และทำการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของก๊าซจากสมการ (42)

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (42)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Fluent 6.2.16
3. อุปกรณ์จ่ายลมชนิดเซ็นติฟูกัล (centrifugal blower)
4. อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองเตาผลิตก๊าซ ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะของเครื่องดังนี้

ระบบ	Microsoft Window XP Professional Version 2002 Service Pack 2
CPU	Intel Celeron(R) 1.80 GHz
RAM	512 MB

2. โปรแกรม Fluent 6.2.16

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณผลของแบบจำลองเตาผลิตก๊าซ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับลิขสิทธิ์ถูกต้องตามกฎหมาย

3. อุปกรณ์จ่ายลมชนิดเซนติฟูกัล (centrifugal blower)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายลมให้กับเตาผลิตก๊าซโดยใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ เป็นเครื่องเป่าลมชนิดเซนติฟูกัล มีขนาด 7.5 kW ใช้ไฟ 3 เฟส ที่มีลักษณะใช้สายพานขับเคลื่อนจากมอเตอร์ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 อุปกรณ์จ่ายลมชนิดเซนติฟูกัล (centrifugal blower)

4. อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)

เป็นอุปกรณ์ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับ โดยการเปลี่ยนความถี่ เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลง ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามสมการ $N = 120f/P$ โดยที่ N = ความเร็วรอบต่อนาที, f = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อวินาที และ P = จำนวนขั้วของมอเตอร์ ในการควบคุมนี้ถ้าต้องการแรงบิดคงที่ จะต้องรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายเข้ามอเตอร์คงที่ด้วย

โดยมีคุณลักษณะเฉพาะดังนี้

บริษัทผู้ผลิต

SQUARE D

รุ่น

ATV18D23N4

Input	380/460 V – 50/60 Hz
	42.9/38.6 A
Output	380/460 V
	29.3 A
Output frequency	0.5-320 Hz

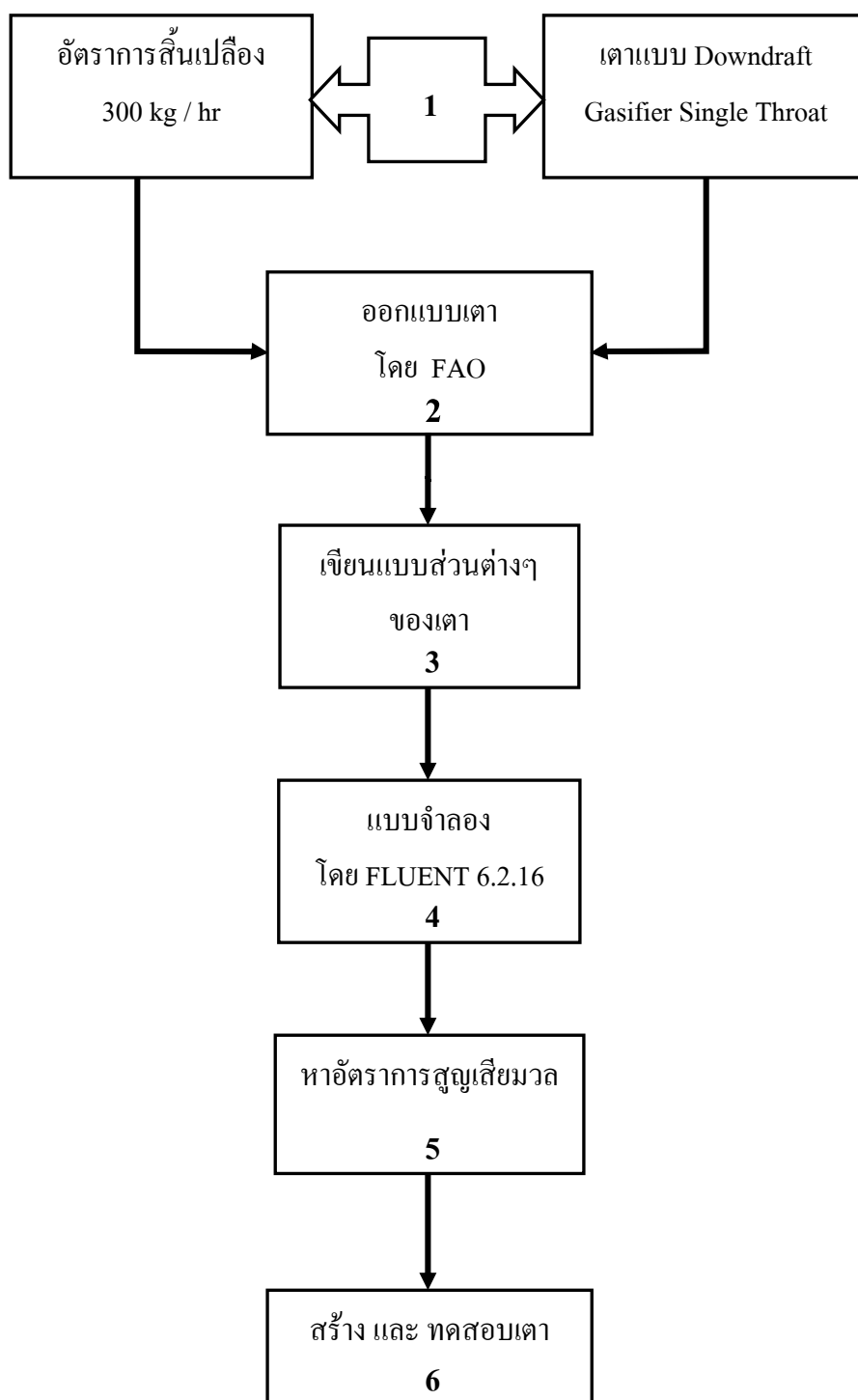


ภาพที่ 7 ลักษณะอุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)

วิธีการ

การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอคอดเดี่ยวมีขั้นตอนการออกแบบดัง

ภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการออกแบบเตา

จากขั้นตอนการออกแบบเตาจากภาพที่ 8 จะขอกกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบเตา

ข้อกำหนดเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบเตาในงานวิจัยมีดังนี้

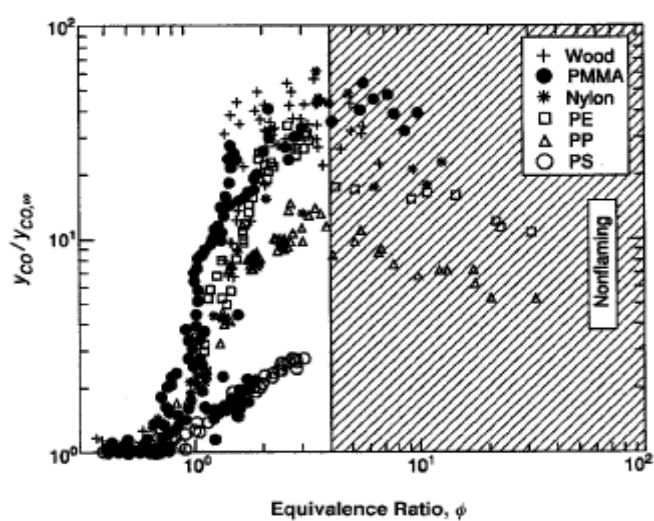
1.1 กำหนดให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตามีค่าเท่ากับ 300 kg/hr

1.2 เป็นเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ชนิดคอคอดเดี่ยว (Single throat) ใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ (wood chip)

1.3 กำหนดประสิทธิภาพเตาเท่ากับ 75%

2. ออกแบบเตาโดยอ้างอิงหลักการออกแบบตาม FAO

จากหลักการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลจะอาศัยหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะอับอากาศ คือการเผาไหม้โดยใช้อากาศน้อยที่สุด การเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะอับอากาศจะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณสูงสุดเป็นช่วงที่อากาศในสภาวะที่เผาไหม้พอดีมีค่าเป็น 2-4 เท่าของอากาศที่ใช้จริง เมื่อใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง (Quintiere, 2006) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กราฟแสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้ที่ ϕ ต่างๆ

ที่มา: Quintiere (2006)

โดยที่ y_{CO} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจริง
 $y_{CO,\infty}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่สภาวะเผาไหม้สมบูรณ์
 ϕ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง

จากภาพที่ 4 ถ้าใช้ ϕ ในช่วง 2-4 จะทำให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของไม้ ออกมาประมาณ 20-60 เท่าของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นช่วงที่ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ดังนั้นขนาดของเตาจึงได้ทำการออกแบบที่ ϕ เท่ากับ 4 เพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาชีวมวล คือ เศษไม้ที่มีผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเพียงพอ (รัตนะ, 2550) ดังนี้

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเพียงพอ

Substance	Formula	Actual Yields (g products/g mass lost)			
		CO ₂	CO	Soot	Other hydrocarbon
Wood (red oak)	CH _{1.7} O _{0.72}	1.27	0.004	0.015	0.001

ที่มา : รัตนะ (2550)

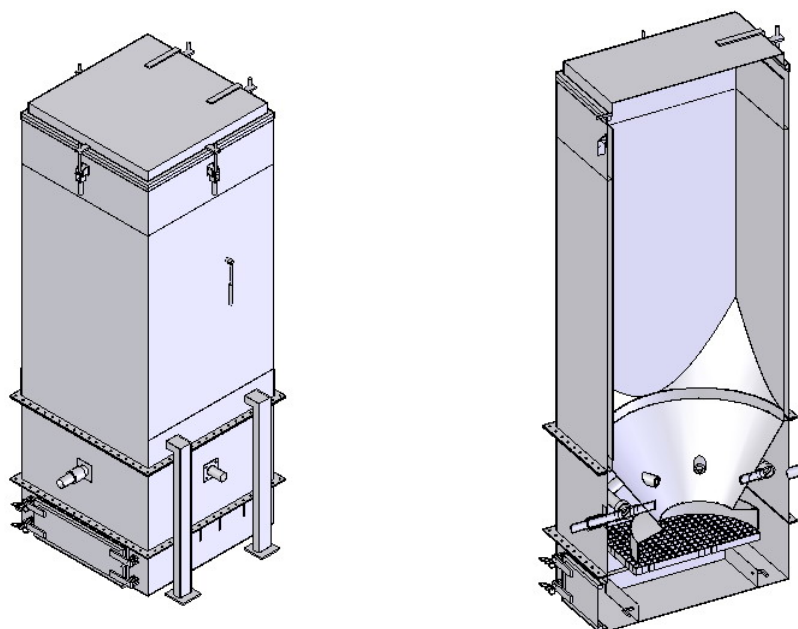
จากสมการเคมีของไม้โอ๊คแดง (รัตนะ, 2550) ซึ่งใช้เป็นหลักในการคำนวณคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ ได้ เมื่อพิจารณาเชื้อเพลิง CH_{1.7}O_{0.72} 1 mole จะมีมวล 0.02522 kg เพราะฉะนั้นปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มวลเชื้อเพลิง CH_{1.7}O_{0.72} 1 mole พอดี (stoichiometric combustion) จะมีค่าเท่ากับ 0.06152 kg ทำให้ได้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (F/A)_{stoi} เท่ากับ 0.41 และงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลดังกล่าวในการหาอัตราของมวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์ ตามอัตราการสลับเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ในขั้นต้น

เมื่อได้อัตรามวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์แล้ว จะหาปริมาณอากาศที่ใช้จริงได้ที่ $\phi = 4$ และหาอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเตา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (throat diameter)

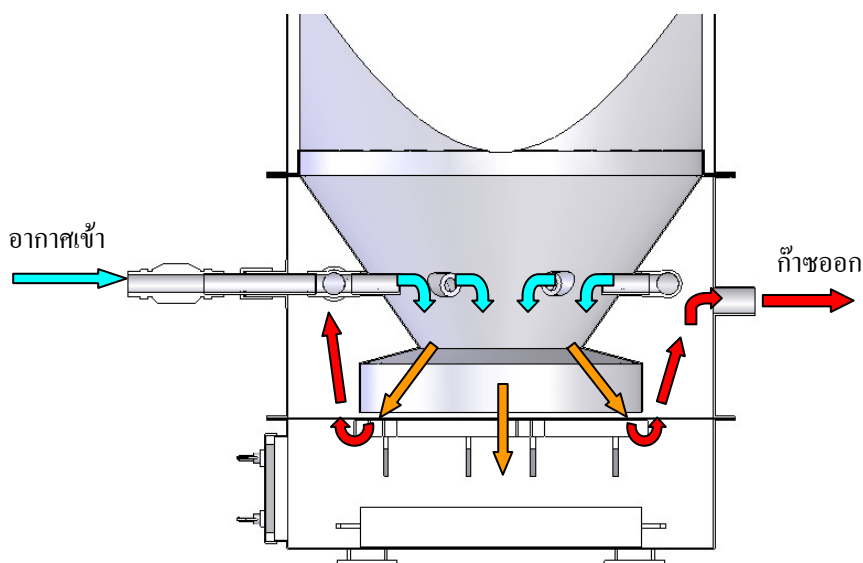
ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (throat diameter) ของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง (downdraft gasifier) จะคำนวณจากอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเตา โดยจากหลักการของฮาร์ทโหลด (hearth load concept, B) คือ ปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิง (producer gas) สูงสุดที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดคอคอด สำหรับเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงคอคอดเดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ $0.11 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ (F.A.O, 1986) ซึ่งสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (throat) ได้จากสมการที่ (9)

3. เขียนแบบส่วนต่างๆ ของเตา

เมื่อได้ทำการออกแบบขนาดและส่วนต่างๆ ของเตาแล้ว จึงได้ทำการเขียนแบบเตาเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองในการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และนำไปสร้างเตาจริงสำหรับใช้ในการทดสอบ โดยแบบของเตามีลักษณะดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะภายในและภายนอกของเตา



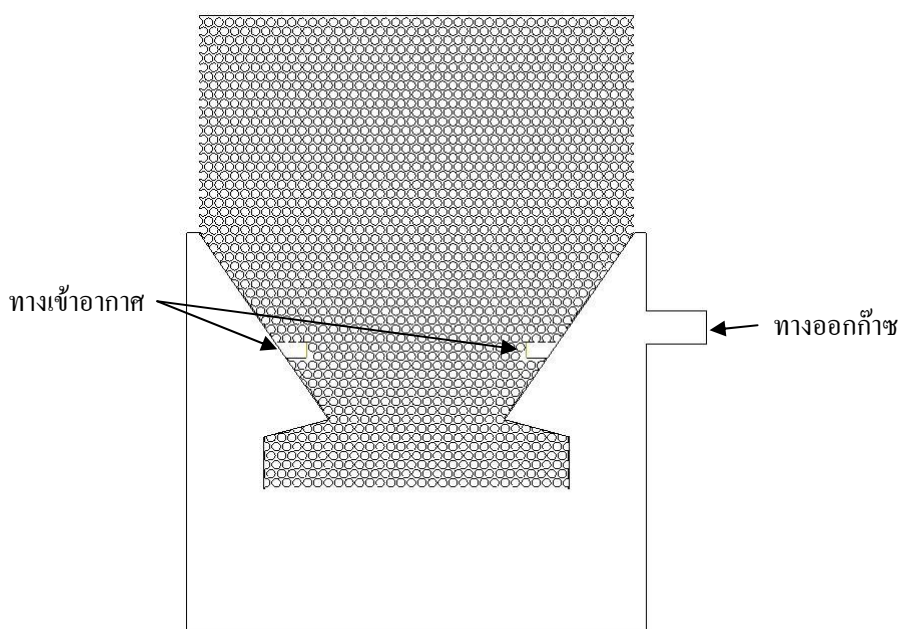
ภาพที่ 11 การไหลของอากาศภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวล

ภาพที่ 10 แสดงลักษณะภายในและภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีวมวลซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ ฐานเตา (base) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดโดยส่วนนี้จะมีถาดเก็บขี้เถ้าของเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ ด้านบนของฐานเตานี้จะเป็นที่ติดตั้งตะแกรงรองเชื้อเพลิง ส่วนที่สอง คือ ส่วนติดตั้งคอคอด (throat) เป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศโดยจะติดตั้งหัวจ่ายอากาศ (nozzle) จำนวน 6 หัว เพื่อกระจายอากาศให้ผสมกับเชื้อเพลิงอย่างทั่วถึง ซึ่งจะเชื่อมต่อกับท่อรวมอากาศที่มีลักษณะเป็นวงแหวน ท่อรวมอากาศนี้จะเชื่อมต่อกับท่ออากาศเข้าที่ติดตั้งวาล์วควบคุมปริมาณการไหลของอากาศจากภายนอกเตา ท่อทางออกของก๊าซเชื้อเพลิงจะอยู่บนส่วนที่สองนี้ซึ่งอยู่ทางด้านหลังของเตา และส่วนที่สองนี้จะเชื่อมต่อถึงกันกับส่วนฐานเตา ส่วนที่สาม คือ ส่วนถังบรรจุเชื้อเพลิง (fuel container) เป็นส่วนบนของเตาซึ่งเป็นส่วนที่ใช้บรรจุเชื้อเพลิงโดยจะมีฝาเปิด-ปิดสำหรับบรรจุเชื้อเพลิง และส่วนนี้จะติดตั้งกล่องสำหรับเก็บของเหลวที่เกิดจากการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ ทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาจะมีลักษณะการไหลดังภาพที่ 11

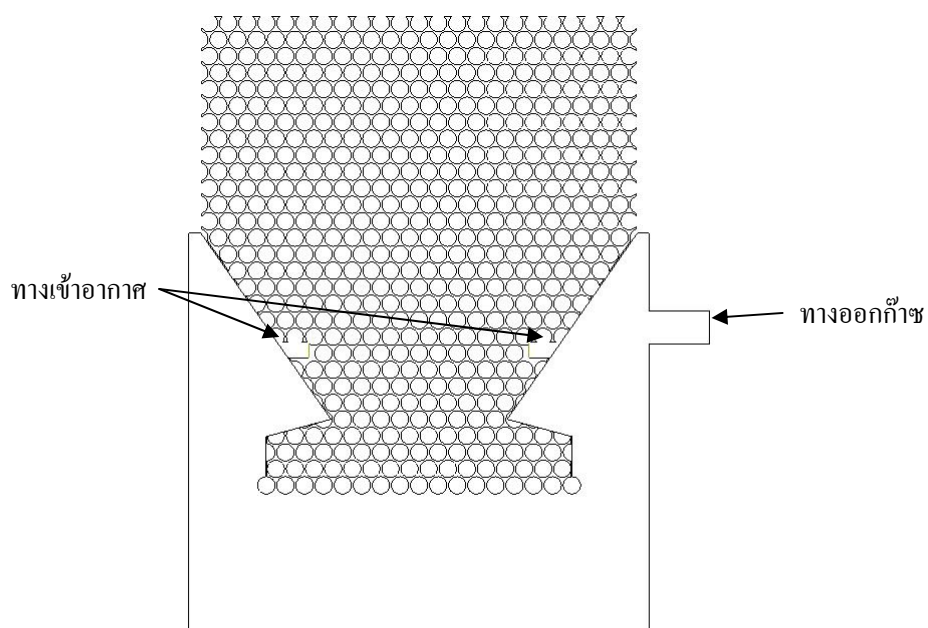
4. การสร้างแบบจำลองของเตาผลิตก๊าซชีววมวล

ได้ทำการสร้างแบบจำลองของเตาในลักษณะ 2 มิติโดยโปรแกรม Fluent 6.2.16 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งจะให้แบบจำลองมีลักษณะเป็นไปตามแบบที่สร้างจริงและอ้างอิงขนาดเทียบเท่าตามแบบ ดังภาพที่ 10

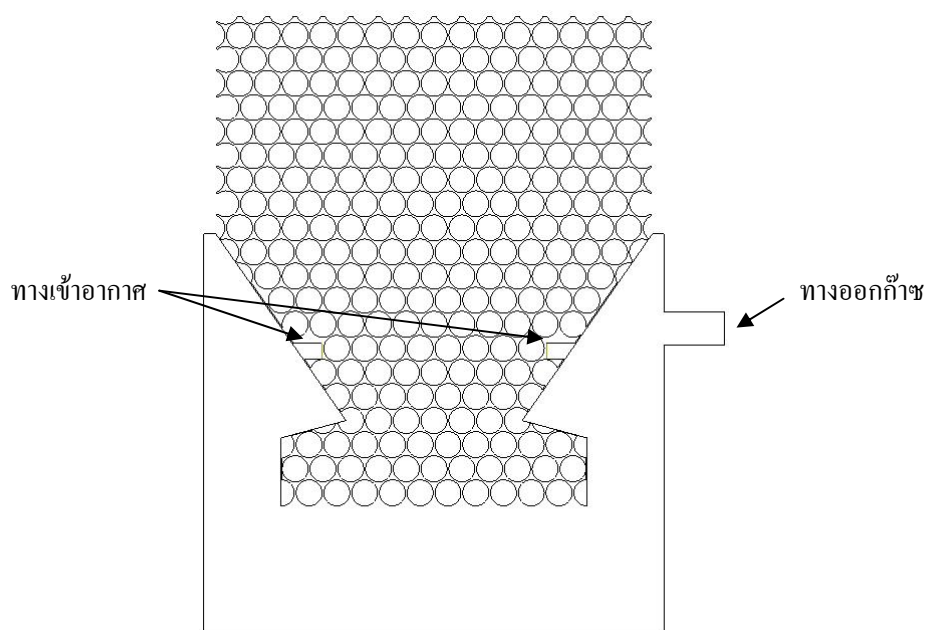
แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะใช้ในการคำนวณหาความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านเชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตา ดังนั้นจึงได้ทำการกำหนดเชื้อเพลิงในแบบจำลองให้มีลักษณะการวางเชื้อเพลิงเรียงกันเป็นชั้น โดยได้กำหนดให้เชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm., 40 mm. และ 60 mm. ดังภาพที่ 12, 13 และ 14 จำนวนชั้นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วสูงสุดของอากาศจะกำหนดให้ชั้นแรกอยู่ที่ระดับเดียวกับหัวจ่ายอากาศเข้าและเรียงลำดับลงไปจนถึงตะแกรงรองเชื้อเพลิง ซึ่งจำนวนชั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ 15, 16 และ 17 โดยกำหนดให้เชื้อเพลิงมีจำนวนสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของไม้แห้งในสถานะ (bulk density) สำหรับเชื้อเพลิงเศษไม้ (wood chip) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $360 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Jayah et al., 2003)



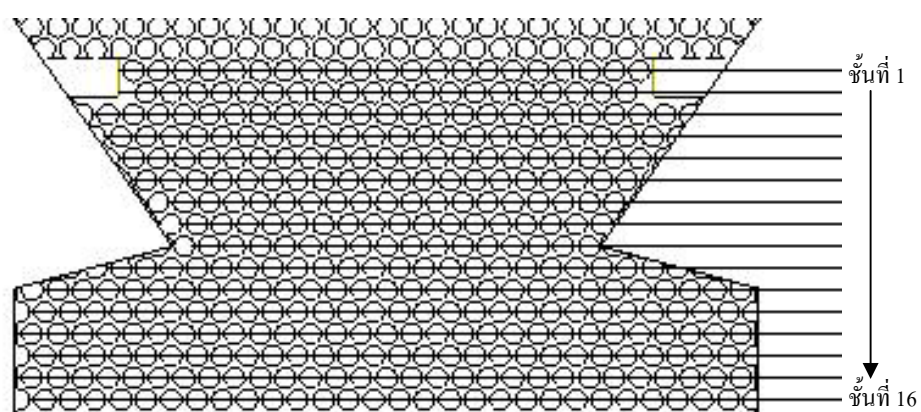
ภาพที่ 12 การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



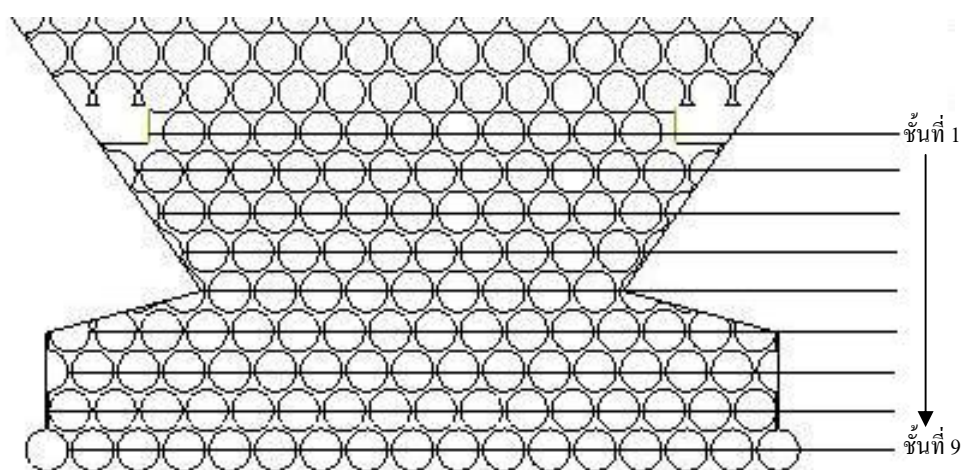
ภาพที่ 13 การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



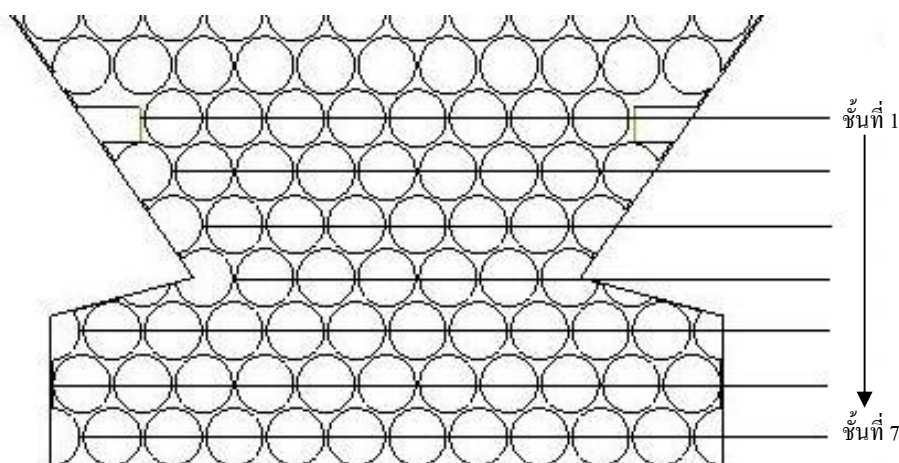
ภาพที่ 14 การวางเชื้อเพลิงของแบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.



ภาพที่ 15 การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



ภาพที่ 16 การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



ภาพที่ 17 การกำหนดจำนวนชั้นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

5. การหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากแบบจำลอง

การหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเชื้อ จะใช้หลักของการถ่ายเทความร้อนแบบการพา ร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส มาหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิง ซึ่งจะใช้ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิง ในแต่ละชั้นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง โดยทำการหาค่าความเร็วเริ่มต้นของอากาศเข้าในแบบจำลองตามค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, ϕ) 2, 3 และ 4 โดยรายละเอียดการหาค่าความเร็วเริ่มต้นของอากาศเข้าในแบบจำลองตามค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.

เมื่อได้ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงในแต่ละชั้นแล้ว จะใช้หลักของการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในการคำนวณหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิง ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

5.1 ทำการหาค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) จากค่าความเร็วสูงสุดอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงในแต่ละชั้น โดยสมการ (39)

5.2 ทำการหาค่าตัวเลขพรันด์ (Prandtl number, Pr) จากสมการ (40)

5.3 ทำการหาค่าเลขนัสเซิล (Nusselt number, Nu_{sph}) สำหรับวัตถุทรงกลมจากสมการ (41) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient)

5.4 ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการ (38)

5.5 ทำการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของก๊าซจากสมการ (42)

5.6 เมื่อได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของก๊าซแล้ว จะใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้ร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสจากการทดลองหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิง

6. การสร้างและทดสอบเตา

เมื่อทำการคำนวณหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงแล้ว จึงได้ทำการสร้างเตาตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ และทำการทดสอบเดินเครื่องเตาเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยก่อนทำการทดลองเดินเครื่องเตา ได้ทำการติดตั้งพัดลมชนิดเซ็นติฟูกัล (centrifugal blower) เพื่อป้อนอากาศให้กับเตาโดยติดตั้งพัดลมที่ทางออกของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งระบบป้อนอากาศของเตาผลิตก๊าซชีวมวลของงานวิจัยนี้เป็นแบบดูด และการควบคุมความเร็วของพัดลมจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการจ่ายกระแสไฟให้กับพัดลมด้วยการปรับความถี่จากอินเวอร์เตอร์

การทดลองจะทำการบรรจุเชื้อเพลิงเศษไม้ (Wood chip) เต็มถังบรรจุเชื้อเพลิง จากนั้นทำการเดินเครื่องโดยปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ไปที่ 50 Hz. และทำการจุดเตา ซึ่งการทดลองเดินเครื่องเตาในแต่ละครั้งใช้เวลาเฉลี่ยหนึ่งชั่วโมง แล้วทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

1. ผลการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลโดยใช้หลักการของ FAO

ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลโดยใช้หลักการของ FAO ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้นจะอ้างอิงข้อมูลจากการออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง สำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย (รัตนะ, 2550) ซึ่งผลการคำนวณของค่าที่ใช้ในการออกแบบเตามีดังนี้

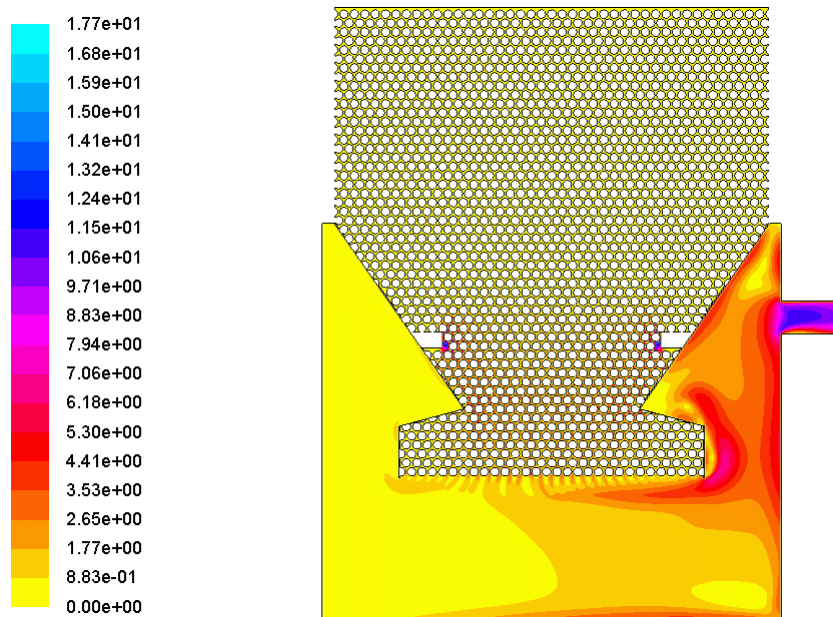
จากอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ $(F/A)_{stoi}$ ของเชื้อเพลิง 0.02522 kg เท่ากับ 0.41 ดังนั้นจากข้อกำหนดในการออกแบบเบื้องต้นคือต้องการอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 300 kg/hr หรือเท่ากับ 0.08333 kg/s ทำให้ได้อัตรามวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 0.203 kg/s

ปริมาณอากาศที่ใช้จริงที่ $\phi = 4$ จะมีค่าเท่ากับ 0.0507 kg/s และอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเตามีค่าเท่ากับ 0.0442 m³/s ทำให้หาพื้นที่ผิวคอคอด (Surface throat area) ซึ่งหาได้จากสมการ (9) มีค่าเท่ากับ 1446.586 cm² และเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (throat diameter) เท่ากับ 42.90 cm. เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดที่คำนวณได้ จึงใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการสร้างเตากับ 40 cm. เนื่องจากเป็นค่าที่ง่ายต่อการสร้างและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ ท่อทางเข้าของอากาศ (nozzle) กำหนดให้มีจำนวนเท่ากับ 6 ท่อ ความสูงจากตะแกรงรองเชื้อเพลิงถึงระนาบของท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 32 cm.

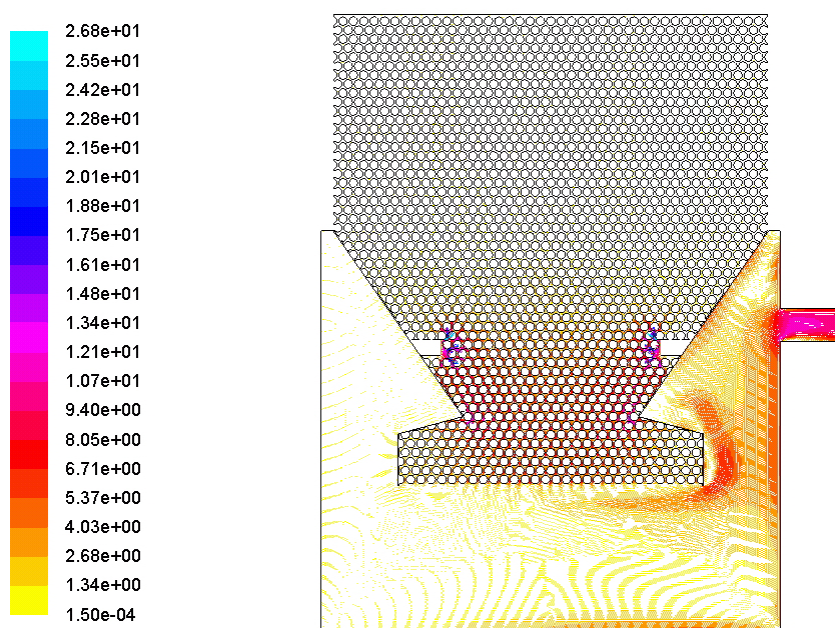
ในส่วนรายละเอียดของการคำนวณขนาดของเตาสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก

2. ผลการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากแบบจำลอง

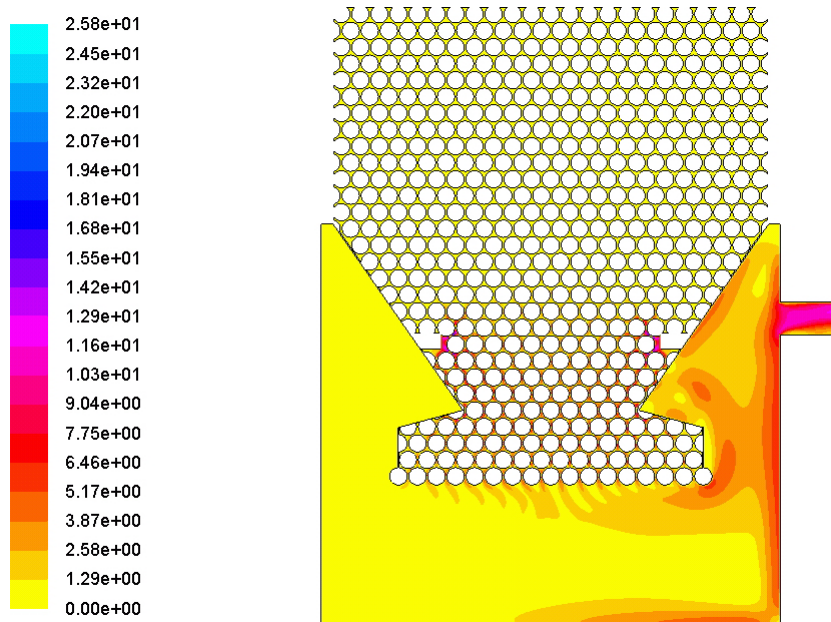
การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากแบบจำลองจะเริ่มต้นจากการหาความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงของแบบจำลองตามขนาดของเชื้อเพลิงที่กำหนดและค่าความเร็วของอากาศที่ทางเข้าที่ $\phi = 2, 3$ และ 4 ผลของความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง แสดงดังภาพที่ 18 ถึงภาพที่ 23 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอากาศภายในเตา



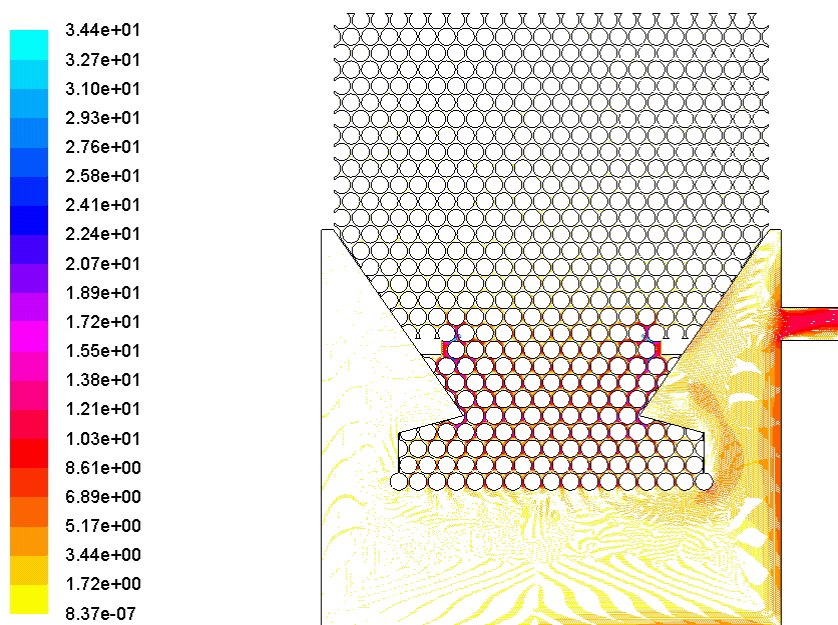
ภาพที่ 18 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



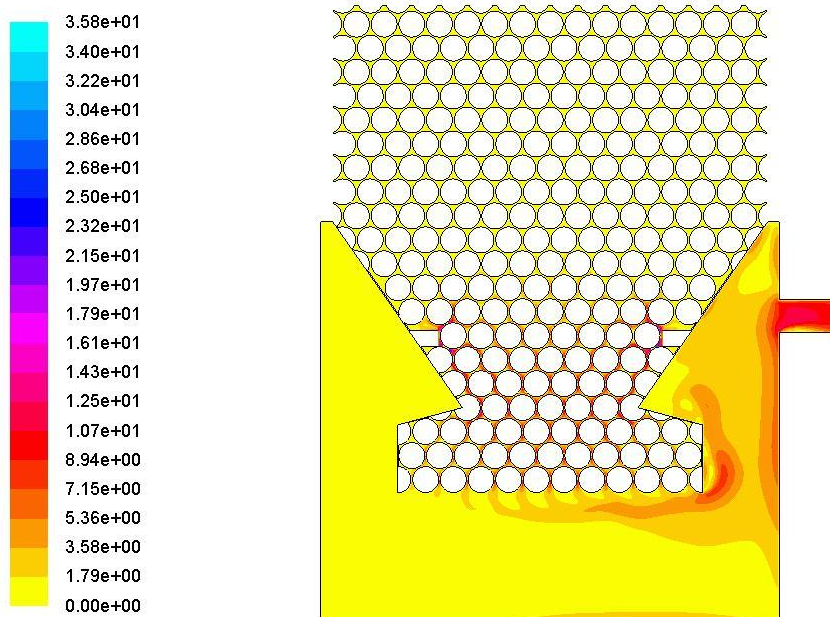
ภาพที่ 19 เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



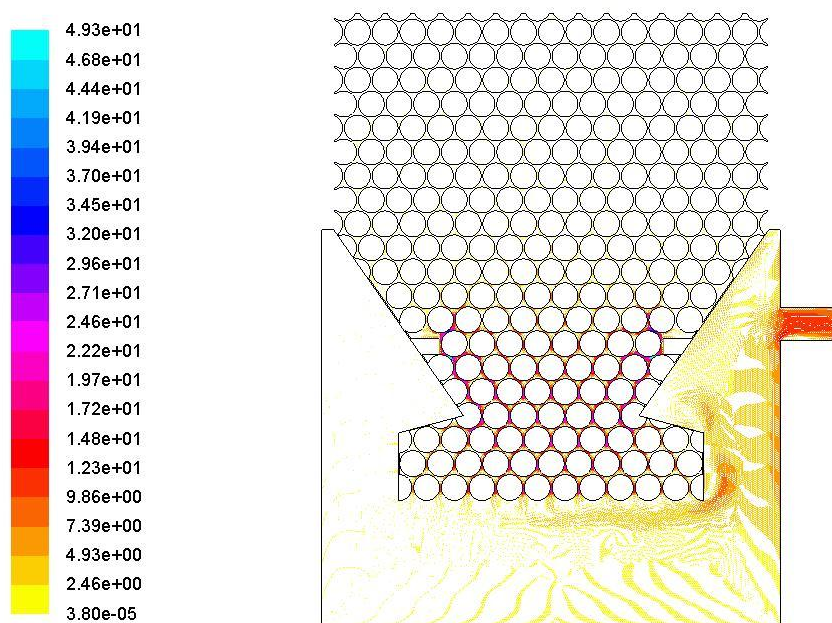
ภาพที่ 20 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



ภาพที่ 21 เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.

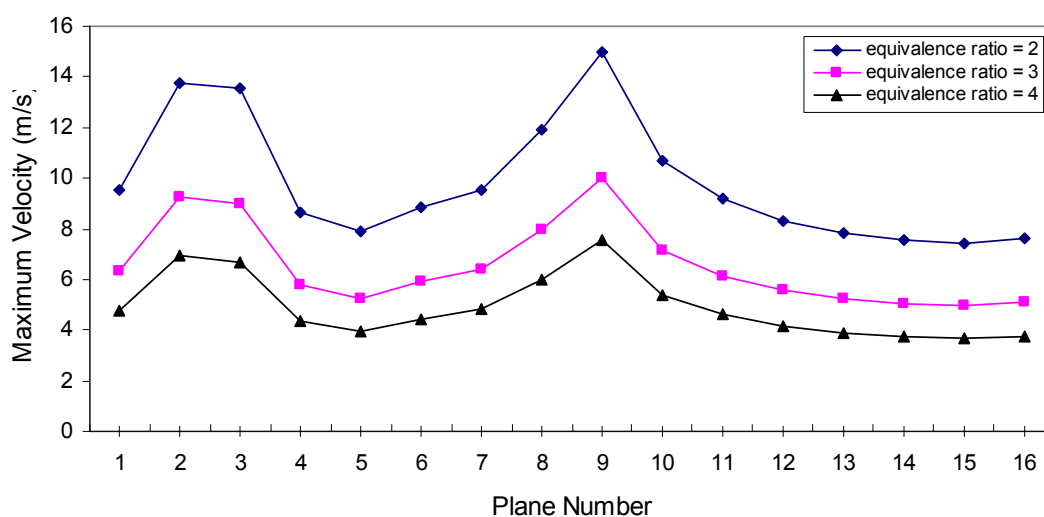


ภาพที่ 22 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

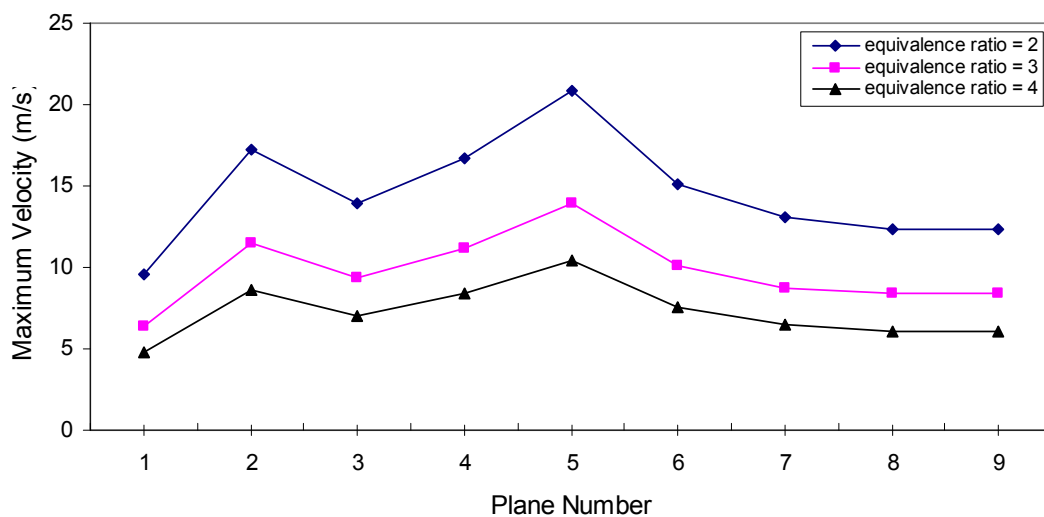


ภาพที่ 23 เวกเตอร์ความเร็วของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

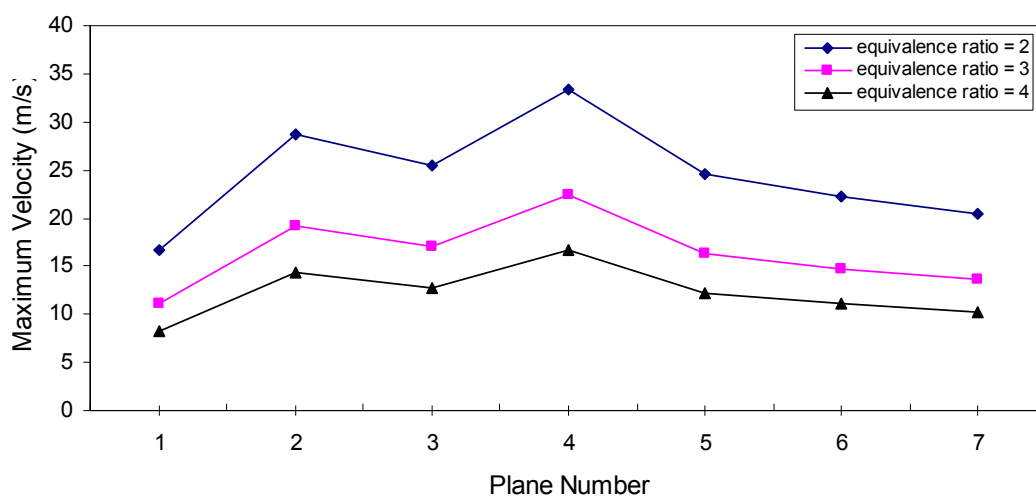
ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงที่ค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, ϕ) ต่างๆ แยกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง แสดงดังภาพที่ 24 , 25 และ 26



ภาพที่ 24 ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



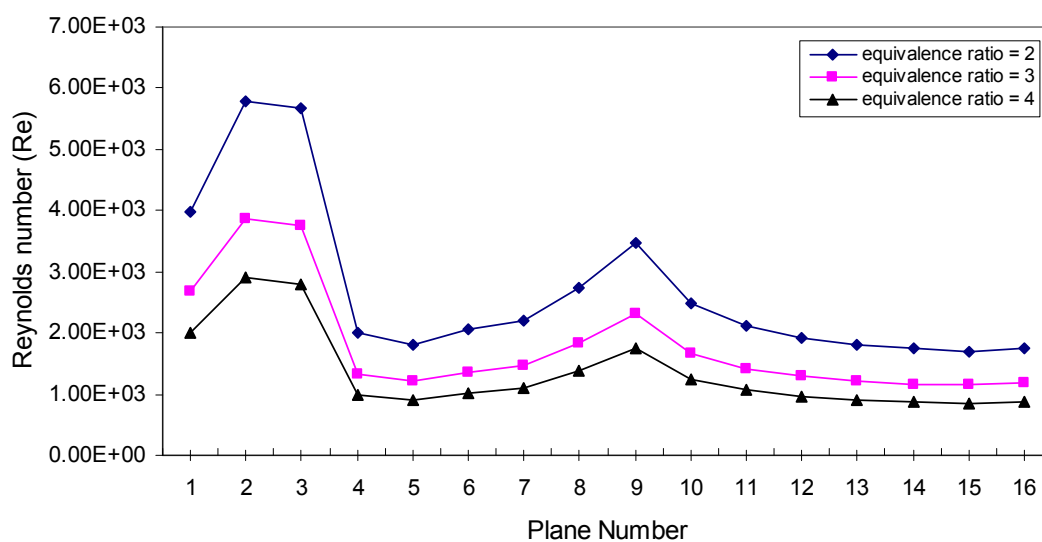
ภาพที่ 25 ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



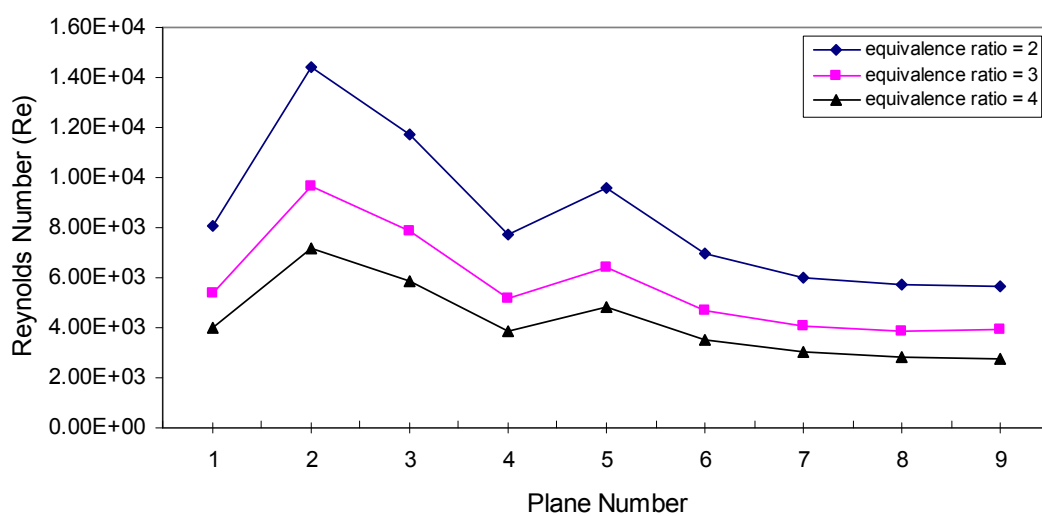
ภาพที่ 26 ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

จากภาพที่ 24, 25 และ 26 แสดงให้เห็นว่าที่ $\phi = 2$ จะให้ค่าความเร็วของอากาศสูงสุด และต่ำสุดคือที่ $\phi = 4$ ซึ่งค่าความเร็วสูงสุดของอากาศของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. จะมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วสูงสุดของอากาศของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 และ 20 mm. เนื่องจากช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. มีขนาดใหญ่กว่าของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 และ 20 mm. ซึ่งทำให้อากาศไหลผ่านได้ดีกว่า

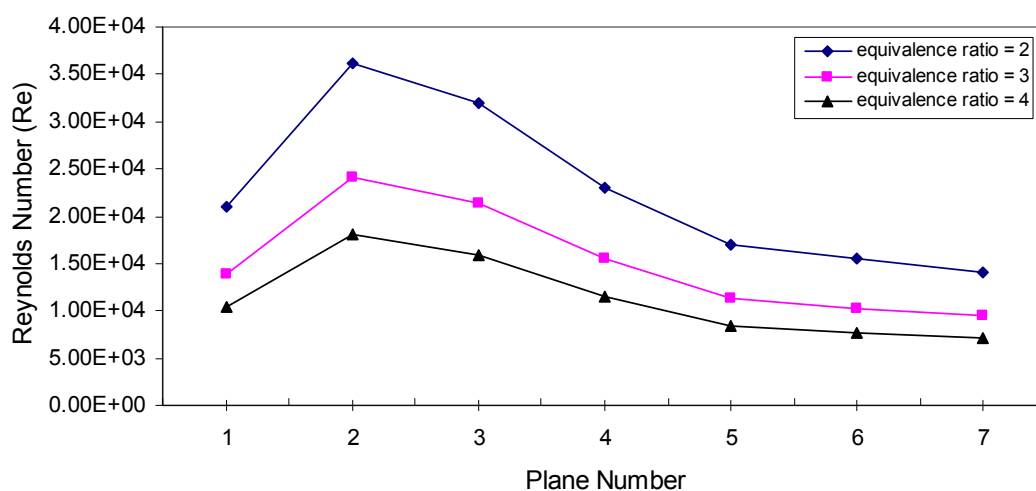
ผลการคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง และค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 27, 28 และ 29



ภาพที่ 27 ค่าเลขเรโนลด์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



ภาพที่ 28 ค่าเลขเรโนลด์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.

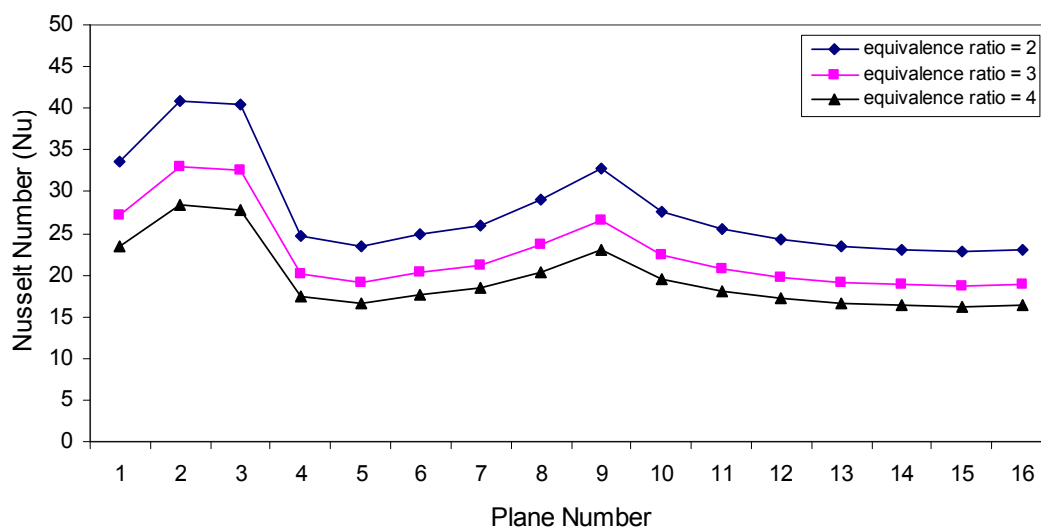


ภาพที่ 29 ค่าเลขเรโนลด์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

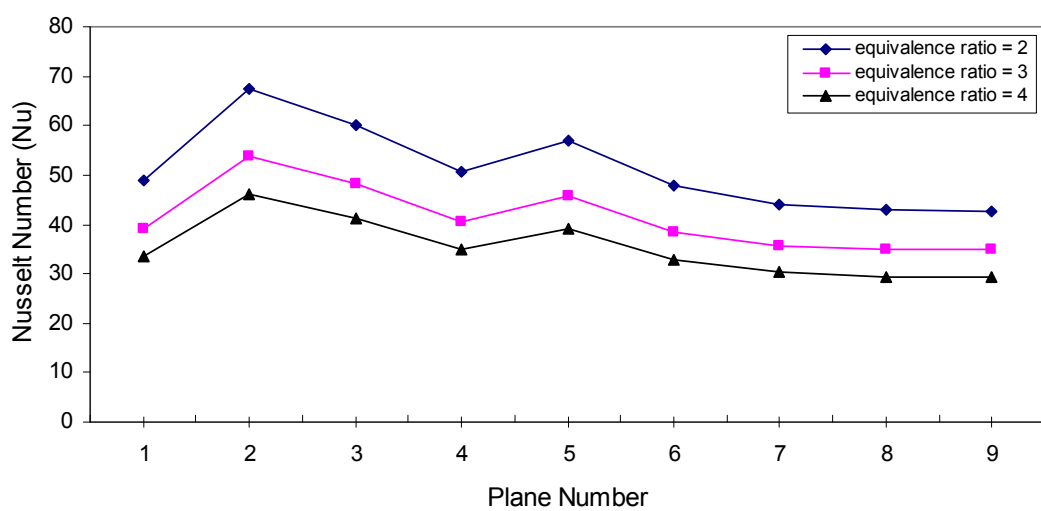
จากภาพที่ 27, 28 และ 29 แสดงให้เห็นว่า ค่าเลขเรโนลด์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. มีค่าสูงสุด เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอีกสองขนาด

ค่าตัวเลขพริ้นด์สำหรับเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm., 40 mm. และ 60 mm. จะมีค่าเท่ากัน สามารถหาได้จากสมการ (40) โดยค่าตัวเลขพริ้นด์มีค่าเท่ากับ 0.70115

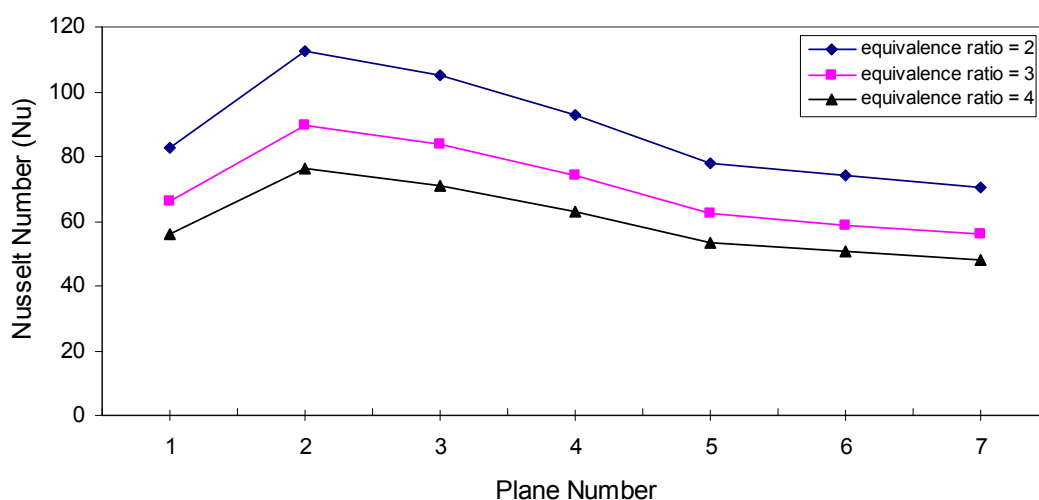
ผลการคำนวณค่าเลขนัสเซลตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง และค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 30, 31 และ 32



ภาพที่ 30 ค่าเลขนัสเซลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



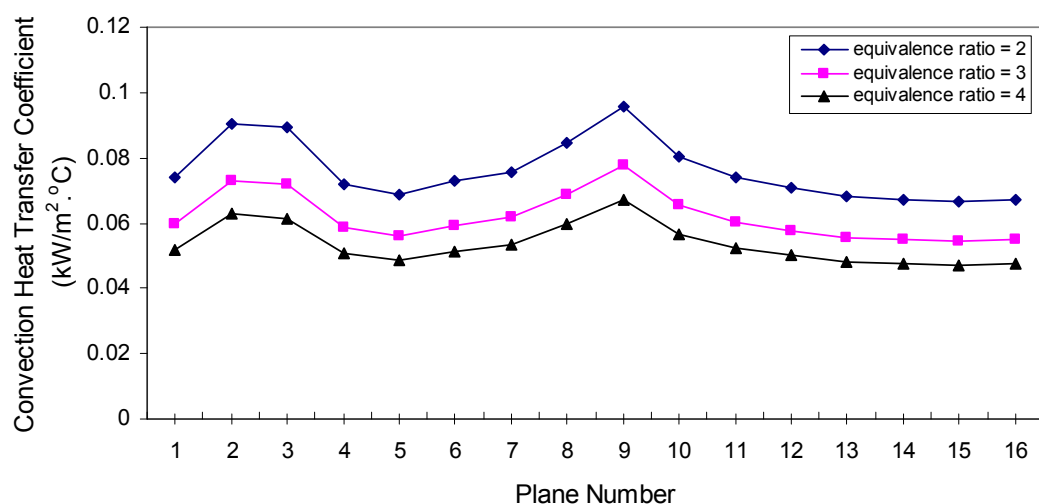
ภาพที่ 31 ค่าเลขนัสเซลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



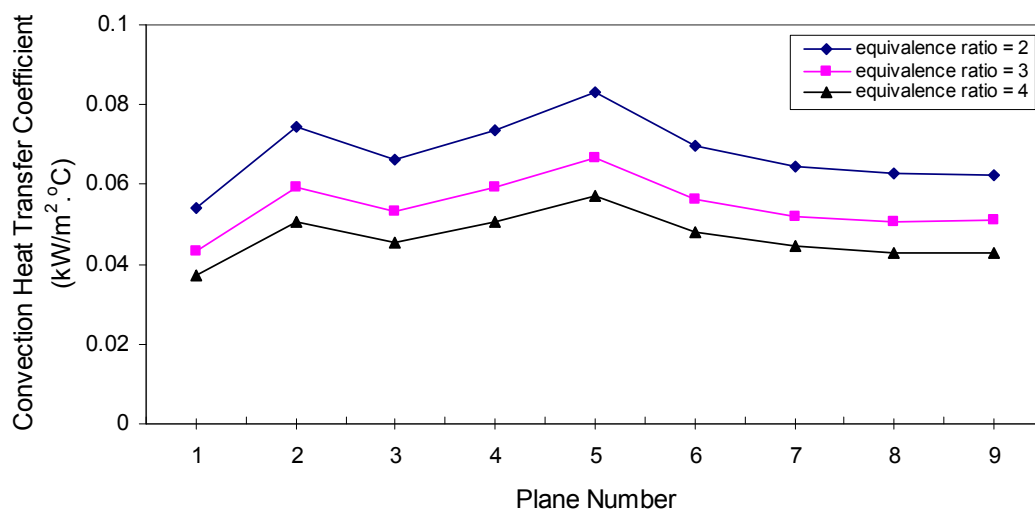
ภาพที่ 32 ค่าเลขนัสเซลของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

จากภาพที่ 30, 31 และ 32 แสดงให้เห็นว่าค่าเลขนัสเซลจะขึ้นอยู่กับค่าเลขเรโนลด์ จึงทำให้เชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. มีค่าเลขนัสเซลสูงสุด

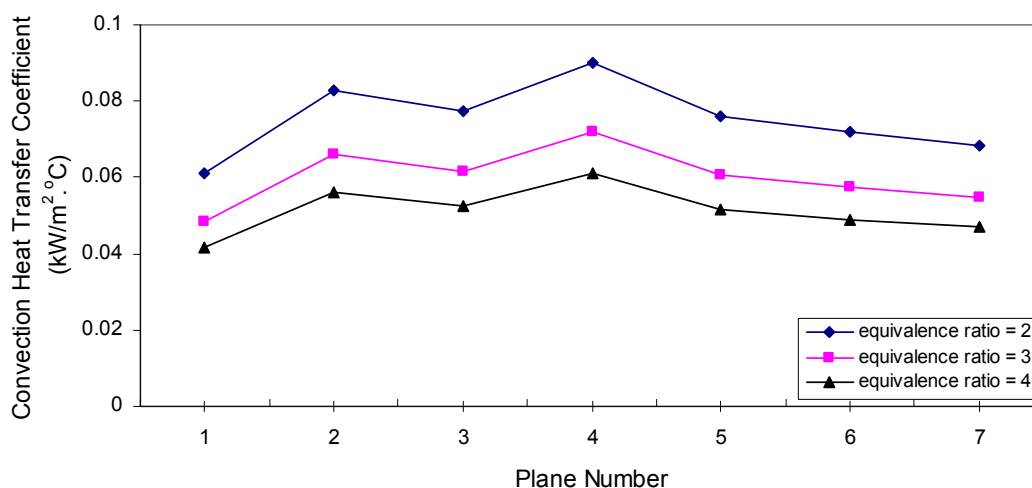
ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงและค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนผสมต่างๆแสดงดังภาพที่ 33, 34 และ 35



ภาพที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



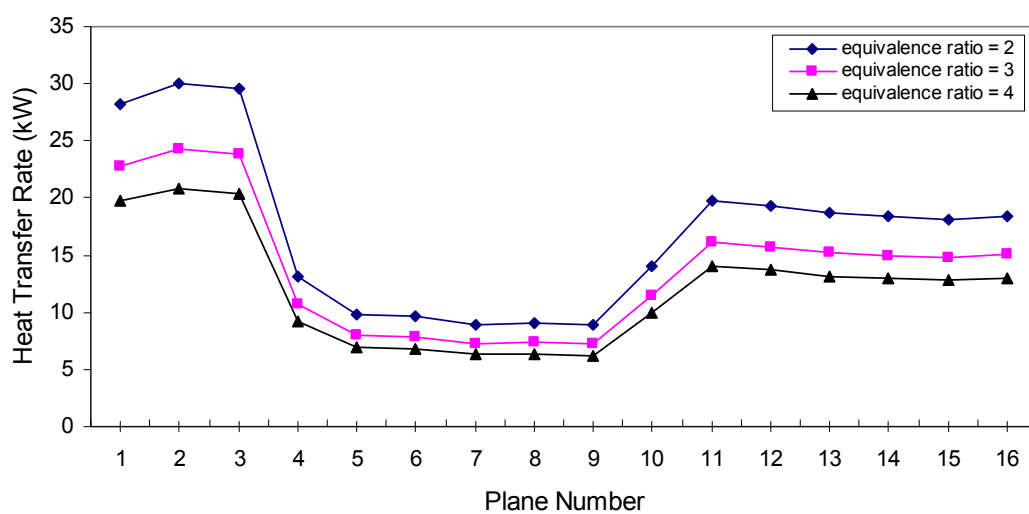
ภาพที่ 34 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



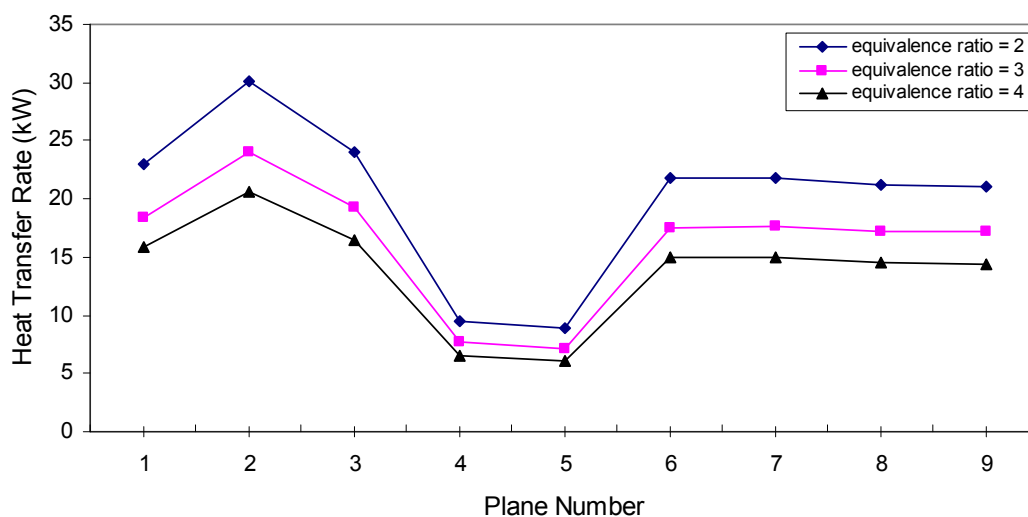
ภาพที่ 35 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

จากภาพที่ 33, 34 และ 35 แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอากาศของเชื้อเพลิงทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน และเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงที่สุด

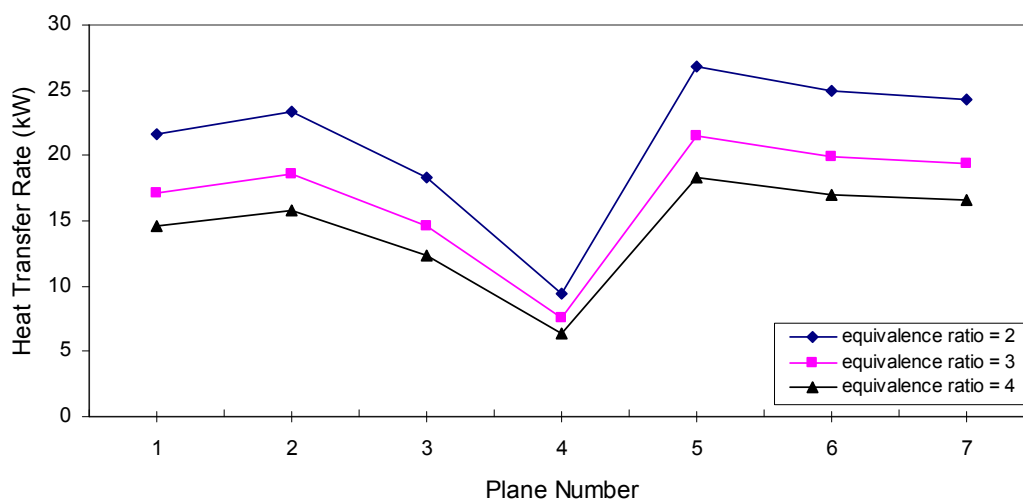
ผลการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงและค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 36, 37 และ 38



ภาพที่ 36 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm.



ภาพที่ 37 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm.



ภาพที่ 38 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.

จากภาพที่ 36, 37 และ 38 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. มีค่าสูงที่สุด

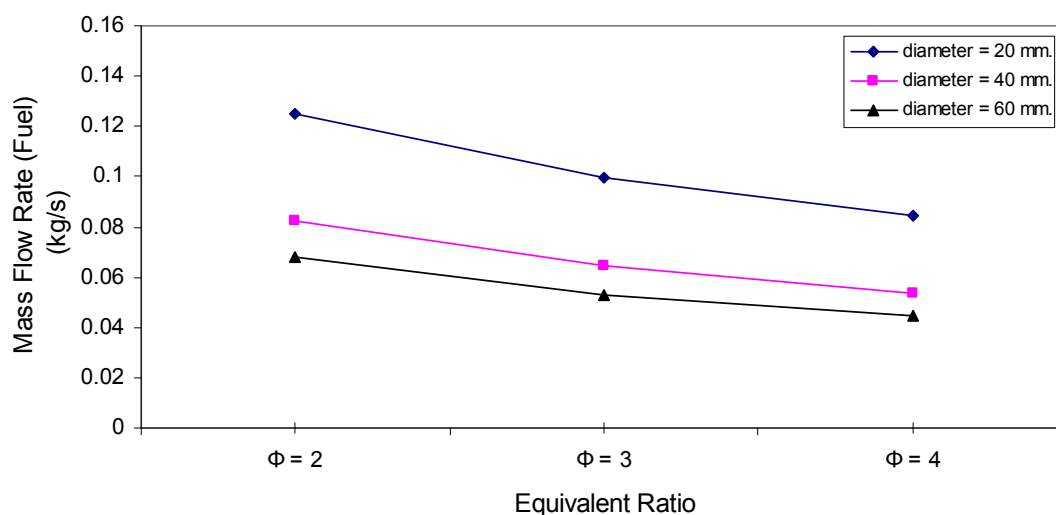
ค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ

ลำดับที่	อัตราความร้อนที่ให้อุไม้ (q'' , Kw/m ² .°C)	อัตราการสูญเสียมวลของไม้ (m'' , g/m ² .s)
1	15	5
2	20	7
3	25	9

ที่มา: อรรถพร และ ณัฐศักดิ์ (2551)

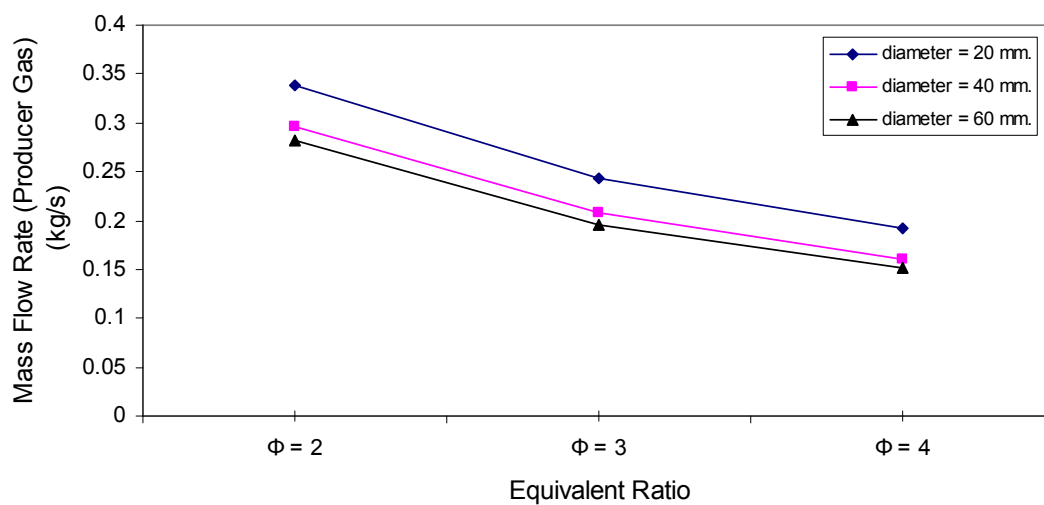
ผลของค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ได้จากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง และค่าอัตราป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมมูลต่างๆ ได้แสดงในรูปแบบของค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง โดยรวมดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

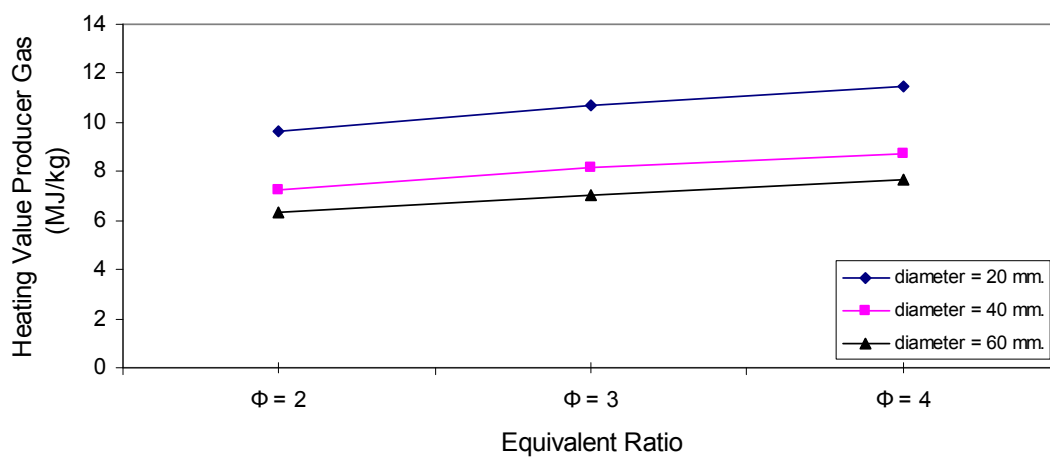
จากภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กลง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะลดลง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าและเชื้อเพลิงทุกขนาดจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้นเมื่อมีการป้อนอากาศมากขึ้น ที่ค่า $\phi = 4$ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.04433-0.08412 kg/s หรือ 159.588-302.832 kg/hr ซึ่งค่าที่ได้ นั้นสอดคล้องกับค่ากำหนดเริ่มต้นจากการออกแบบคือ 0.08333 kg/s หรือ 300 kg/hr และค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.07 kg/s หรือ 252 kg/hr

จากค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงทำให้สามารถหาอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง (producer gas) ได้ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ค่าอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง

ค่าความร้อน (Heating value) ของก๊าซเชื้อเพลิงที่จากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่า แสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 41 แสดงให้เห็นว่าที่ $\phi = 4$ จะให้ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงสูงที่สุด ดังนั้น ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมควรทำการออกแบบที่ $\phi = 4$ จะทำให้เตาผลิตก๊าซชีววมมีประสิทธิภาพสูงสุดได้

ในส่วนของการละเอียดตัวอย่างการคำนวณการหาการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงของเตาผลิตก๊าซจากแบบจำลองสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.

3. ผลการสร้างและทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีวมวล

เตาผลิตก๊าซชีวมวลที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะโครงสร้างภายนอก ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ลักษณะโครงสร้างภายนอกของเตา

ผลการทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีวมวลโดยเฉลี่ยหนึ่งชั่วโมง ทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยการวัดระดับของเชื้อเพลิงที่ตกลงในถังบรรจุเชื้อเพลิงของเตาได้ 0.7 m^3 ดังนั้นเตาผลิตก๊าซชีวมวลนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 252 kg/hr โดยที่ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากข้อกำหนดเริ่มต้นในการออกแบบคือ 300 kg/hr

การทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลแสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 การทดลองเดินเครื่องเตาชีววมวล

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอคอดเดี่ยว ซึ่งอ้างอิงหลักการออกแบบตาม F.A.O (1986) กำหนดให้เตามีประสิทธิภาพ 75 % อัตราการกินเชื้อเพลิง 300 kg/hr ค่าฮาร์ทโหลด (B) มีค่าเท่ากับ $0.11 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ และค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (ϕ) มีค่าเท่ากับ 4 สามารถออกแบบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (throat) ได้เท่ากับ 40 cm. ซึ่งเมื่อทำการทดลองเดินเครื่องเตาแล้วทำให้ได้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 241 kg/hr ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อกำหนดเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบตาม F.A.O (1986) นั้นมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง

ผลจากแบบจำลองและผลจากการทดสอบเดินเครื่องเตา แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กลง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะลดลง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่า และเชื้อเพลิงทุกขนาดจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้นเมื่อมีการป้อนอากาศมากขึ้น ที่ค่า $\phi = 4$ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.04433-0.08412 kg/s หรือ 159.588-302.832 kg/hr ซึ่งค่าที่ได้นี้นั้นสอดคล้องกับค่ากำหนดเริ่มต้นจากการออกแบบ คือ 0.08333 kg/s หรือ 300 kg/hr และค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.07 kg/s หรือ 252 kg/hr

จากผลการคำนวณโดยแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าการใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนร่วมกับการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบจำลองสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชั้นไม้ในเตาชีววมวลได้ และสามารถทำนายอัตราการกินเชื้อเพลิงที่ $\phi = 2, 3$ และ 4 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่กำหนดเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบได้ ผลจากแบบจำลองยังสามารถแสดงค่าความร้อน (Heating value) ของก๊าซเชื้อเพลิงได้ ซึ่งค่าความร้อนที่ได้นี้จะค่าที่ใช้บอกประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซชีววมวลได้อีกทางหนึ่งด้วย

ค่าอัตราการสูญเสียมวลเชื้อเพลิงที่ $\phi = 2, 3$ และ 4 ยังแสดงให้เห็นว่าขนาดของเชื้อเพลิงเป็นดัชนีที่ใช้เป็นตัวกำหนดความสูงของเขตไพโรไลซิส และปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการใช้เพื่อผลิตก๊าซจากเชื้อเพลิงชีววมวลได้

ข้อเสนอแนะ

1. ในขณะที่ทำการทดลองเดินเครื่องเตา พบว่า ที่ฝาปิดส่วนฐานเตามีรอยร้าวทำให้มีอากาศเข้ามาผสมกับก๊าซเชื้อเพลิงเป็นผลให้ความเข้มข้นของก๊าซลดลง โดยสังเกตได้จากสีของเปลวไฟ ดังนั้นในการออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซชีวมวลควรที่จะไม่ให้เกิดรอยร้าวในส่วนต่างๆ ของเตา เพื่อไม่ให้มีอากาศส่วนเกินเข้ามาผสมกับก๊าซเชื้อเพลิงที่จะส่งผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีความเข้มข้นลดลงซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซชีวมวลนั้นๆ ด้วย

2. ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการวัดค่าความเข้มข้นและส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งค่าความเข้มข้นและส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิงที่วัดได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ว่า สมบูรณ์หรือไม่ จึงควรที่จะมีการวัดค่าความเข้มข้นและส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เกรียงไกร ปัญญารัตนะ. 2545. การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนผ่านสิ่งกีดขวางรูปสี่เหลี่ยมสองมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร. 2540. เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- ปรีชา เกียรติกระจาย. 2529. เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานจากไม้. โครงการเผยแพร่ความรู้ทางวนผลิตภัณฑ์ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รัตน์ เลहनิก. 2550. การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรากรณ์ จันทสาโร. 2548. วิธีปริมาตรจำกัดสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อนุตร จำลองกุล. 2545. พลังงานหมุนเวียน. บริษัทไอ.เอส.พรินติ้ง เฮาส์, กรุงเทพฯ.
- อรรถพร สกุลสม และ ณัฐศักดิ์ บุญมี. 2551. การศึกษาเชิงทดลองการเกิดไฟโรไลซิสของไม้ใน Cone Calorimeter. วิศวกรรมสาร มก 21(65).
- Cengel, Y.A. 2006. **Heat and Mass Transfer**. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- FAO Corporate document repository. 1986. **Wood gas as engine fuel, FAO Forestry paper-72**. Available Source: <http://www.fao.org/docrep/T0512E/T0512e00.HTM>, August 29, 1999.
- Flatcher, D.F., B.S. Haynes, F.C. Christo and S.D. Joseph. 2000. A CFD base combustion model of entrained flow biomass gasifier. **Applied Mathematical Modeling**. 24: 165-182.

Jayah, T.H., A. Lu., R.J. Fuller and D.F. Stewart. 2003. Computer simulation of downdraft wood gasifier for tea drying. **Biomass and Bioenergy**. 25: 459-469.

Özisik, M.N. 1985. **Heat transfer a basic approach**. McGraw-Hill, Inc., Singapore.

Quintiere, J.G. 2006. **Fundamentals of fire phenomena**. John Willey & Sons, Ltd., England.

Reed, T.B., R. Walt, S. Eillis, A. Das and S. Deutch, S. 1999. **Superficial Velocity-The Key to Downdraft Gasification**. Biomass Conference of the Americas. Available Source: http://www.biomassenergyfoundation.org/LEARN/papers/superficial_vel_final.doc, August 29, 1999.

Zainal, Z.A., R. Ali, C.H. Lean and K.N. Seetharamu. 2001. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. **Energy Conversion and Management**. 42: 1499-1515.

Zainal, Z.A., R. Ali, G.A. Quadir and K.N. Seetharamu. 2002. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass and Bioenergy**. 23: 283-289.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าขนาดเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง

ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลจะอ้างอิงข้อมูลจากการออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย (รัตนะ, 2550) ที่มีข้อกำหนดดังนี้

- อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่า 0.41
- สาร์ทโหลด (B) มีค่า $0.11 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$
- ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 35°C มีค่า 1.1481578 kg/m^3 (Özisik, 1985)

จากสมการเคมีของไม้ไผ่แดง (รัตนะ, 2550) ปริมาณอากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อพิจารณาเชื้อเพลิง $\text{CH}_{1.7}\text{O}_{0.72}$ 1 mole จะมีมวล 0.02522 kg เพราะฉะนั้นปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มวลเชื้อเพลิง $\text{CH}_{1.7}\text{O}_{0.72}$ 1 mole พอดี จะมีค่าเท่ากับ 0.06152 kg

ดังนั้น จากข้อกำหนดในการออกแบบเบื้องต้น คือ ต้องการอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 300 kg/hr หรือเท่ากับ 0.08333 kg/s ทำให้ได้อัตรามวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง คือ

$$\dot{m}_{air} = \frac{0.08333 \times 0.06152}{0.02522} = 0.203 \text{ kg/s}$$

กำหนดให้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (ϕ) มีค่าเท่ากับ 4 จะทำให้ได้อัตรามวลอากาศที่ต้องใช้จริงในการเผาไหม้มีค่า

$$\dot{m}_{air,act} = \frac{0.203}{4} = 0.05075 \text{ kg/s}$$

เมื่อได้ค่ามวลอากาศที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการเผาไหม้จริงแล้ว จะทำให้ทราบค่าอัตราการไหลของมวลอากาศมีค่า

$$\text{อัตราการไหลมวลอากาศ} = \frac{\dot{m}_{air,act}}{\rho_{air}} = \frac{0.05075}{1.1481578} = 0.04420 \text{ m}^3/\text{s}$$

อัตราการไหลของมวลอากาศมีค่าเท่ากับ $0.04420 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือเท่ากับ $159.1245 \text{ m}^3/\text{hr}$ เมื่อได้ค่าอัตราการไหลของอากาศแล้ว ก็จะนำไปหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซได้จากสมการ

$$B = 0.11 = \frac{\text{Flow rate of air inlet}}{\text{Surface area throat}}$$

แทนค่าอัตราการไหลของมวลอากาศ จะได้

$$\text{Surface area throat} = \frac{159.1245}{0.11} = 1446.586 \text{ cm}^2$$

พื้นที่ผิวคอคอดมีค่าเท่ากับ 1446.586 cm^2 สามารถหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดได้ดังนี้

$$\text{throat diameter} = \sqrt{\frac{1446.586 \times 4}{\pi}} = 42.90 \text{ cm}$$

2. การการคำนวณค่าความเร็วเริ่มต้นของอากาศเข้าในแบบจำลอง

ค่าความเร็วเริ่มต้นของอากาศเข้าในแบบจำลอง จะทำการกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นตามค่าอัตราการไหลมวลอากาศของพัดลมที่ใช้ในการทดลองที่ค่าอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ที่ 2, 3 และ 4 โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- อัตราการไหลมวลอากาศของพัดลมมีค่า $0.3667 \text{ m}^3/\text{s}$
- ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 35°C มีค่า 1.1481578 kg/m^3

จากค่าอัตราการไหลมวลอากาศของพัดลม ทำให้ทราบค่าอัตรามวลอากาศที่ต้องใช้คือ

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{0.3667}{1.1481578} = 0.4210 \text{ kg/s}$$

จากค่าอัตรามวลอากาศที่ต้องใช้เท่ากับ 0.4210 kg/s ทำให้ทราบค่าอัตรามวลอากาศที่ $\phi = 4$ คือ

$$\dot{m}_{air @ \phi=4} = \frac{0.4210}{4} = 0.10525 \text{ kg/s}$$

เมื่อได้ค่าอัตราการไหลของมวลอากาศที่ $\phi = 4$ แล้วจากนั้นทำการหาค่าอัตราการไหลของมวลอากาศที่ $\phi = 4$ คือ

$$\text{อัตราการไหลของมวลอากาศที่ } \phi = 4 = \frac{\dot{m}_{air @ \phi=4}}{\rho_{air}} = \frac{0.10525}{1.1481578} = 0.091674 \text{ m}^3/\text{s}$$

เมื่อทราบค่าอัตราการไหลที่ $\phi = 4$ แล้วจะทำการหาค่าความเร็วของอากาศเข้าในแบบจำลองโดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวจ่ายอากาศเข้าเท่ากับ 0.0635 m. และเนื่องจากในการออกแบบได้กำหนดให้จำนวนหัวจ่ายมีจำนวน 6 หัวจ่าย ดังนั้นในการหาค่าความเร็วของอากาศเข้าเพื่อใช้เป็นข้อกำหนดเริ่มต้นของแบบจำลองจะหาค่าอัตราการไหลของมวลอากาศต่อหนึ่งหัวจ่ายคือ

$$\frac{0.091674}{6} = 0.015279 \text{ m}^3/\text{s}$$

ดังนั้น จะสามารถหาค่าความเร็วเริ่มต้นอากาศเข้าในแบบจำลองที่ $\phi = 4$ ได้ดังนี้

$$V_{@ \phi=4} = \frac{\text{Flow rate of air inlet nozzle}}{\text{Nozzle area}} = \frac{0.015279}{0.003166} = 4.82459 \text{ m/s}$$

ค่าความเร็วเริ่มต้นอากาศเข้าในแบบจำลองที่ $\phi = 2$ และ 3 สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน โดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลเป็น 2 และ 3

3. การคำนวณค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิง

เมื่อทราบค่าความเร็วสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองตามค่าอัตราส่วนสมมูลที่ $\phi = 2, 3$ และ 4 แล้ว จะทำการหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงตามค่าอัตราส่วนสมมูลที่ $\phi = 2, 3$ และ 4 เช่นเดียวกัน และการคำนวณจะทำการคำนวณแยกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิง ดังนั้นจะแสดงการหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงเฉพาะเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 mm.

ที่ $\phi = 4$ เนื่องจากการหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงที่ $\phi = 2$ และ 3 กับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 และ 60 mm. นั้น สามารถหาค่าได้ในลักษณะเดียวกัน โดยมีการคำนวณดังนี้

ข้อกำหนดที่ใช้ในการคำนวณ

- เตาผลิตก๊าซชีววมวลมีประสิทธิภาพ (η) 75 %
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิงมีค่า 20 mm.
- พื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงรวมในชั้นที่ 1 (A) มีค่า 0.65609 m^2
- ค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านเชื้อเพลิงชั้นที่ 1 ($V_{\max}$) มีค่า 4.78144 m/s
- ค่าการนำความร้อนของอากาศ (k) มีค่า $0.04418 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
- ค่าความหนืดจลน์ของก๊าซ (ν) มีค่า $4.77 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- ค่าตัวเลขพรีนซ์ (Pr) มีค่า 0.70115
- ค่าความหนืดพลวัตของก๊าซที่พื้นผิวเชื้อเพลิง (μ_s) มีค่า $4.48 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- ค่าความหนืดพลวัตของก๊าซเหนือพื้นผิวเชื้อเพลิง (μ_∞) มีค่า $2.93 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- ค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวเชื้อเพลิง (T_s) มีค่า $880 \text{ }^\circ\text{C}$
- ค่าอุณหภูมิเหนือพื้นผิวเชื้อเพลิง (T_∞) มีค่า $300 \text{ }^\circ\text{C}$

จะแสดงการหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงเฉพาะเชื้อเพลิงชั้นที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากการคำนวณในชั้นต่อไปมีลักษณะการคำนวณเช่นเดียวกัน

เมื่อทราบค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านเชื้อเพลิงชั้นที่ 1 แล้ว จะทำการหาค่าเลขเรย์โนลด์ตามสมการ

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{VD}{\nu} \\ &= \frac{4.78144 \times 0.02}{4.77 \times 10^{-5}} \\ &= 2.01 \times 10^3 \end{aligned}$$

เมื่อทราบค่าเลขเรย์โนลด์แล้ว จากนั้นทำการหาค่าเลขนัสเซลตามสมการ

$$\begin{aligned}
 Nu_{sph} &= 2 + [0.4 Re^{1/2} + 0.06 Re^{2/3}] Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s} \right) \\
 &= 2 + \left[(0.4 \times (2.01 \times 10^3)^{1/2}) + (0.06 \times (2.01 \times 10^3)^{2/3}) \right] \\
 &\quad \times 0.70115^{0.4} \times \left(\frac{2.93 \times 10^{-5}}{4.48 \times 10^{-5}} \right) \\
 &= 23.43562
 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าเลขนัสเซลที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามสมการ

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{Nu_{sph} k}{D} \\
 &= \frac{23.43562 \times 0.04418}{0.02} \\
 &= 51.7692 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากนั้นหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของก๊าซจากสมการ

$$\begin{aligned}
 \dot{Q} &= hA_s (T_s - T_{\infty}) \\
 &= 51.7692 \times 0.65609 \times (880 - 300) \\
 &= 19699.906 \text{ W} = 19.69991 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

ในการหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิง จะใช้หลักของการถ่ายเทความร้อนแบบการพา ร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของไม้ที่ค่าการให้ความร้อนต่างๆ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส โดยจะอาศัยความสัมพันธ์ของค่าฟลักความร้อน (heat flux) และค่าการสูญเสียมวลของไม้ (mass

loss) กำหนดหาการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการกำหนดจะได้ค่าฟลักความร้อน

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{19.69991}{0.65609} = 30.02619 \text{ kW/m}^2$$

เมื่อได้ค่าฟลักความร้อนแล้วจากนั้น จะนำค่าฟลักความร้อนที่ได้ไปหาค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงร่วมกับค่าการสูญเสียมวลของไม้ ตามตารางที่ 4 โดยวิธีการประมาณค่า (Iterative method) ดังนี้

ทำการประมาณค่าในช่วงฟลักความร้อนที่ให้อยู่ไม่มีค่าเท่ากับ 15 และ 20 kW/m².°C และในช่วงค่าการสูญเสียมวลของไม้ไม่มีค่าเท่ากับ 5 และ 7 g/m².s โดยจะได้

$$\begin{aligned} \text{ค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงในชั้นที่ 1} &= 5 - (15 - 30.02619) \times \frac{2}{5} \\ &= 11.01047 \text{ g/m}^2.\text{s} \\ &= 7.22387 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

เมื่อทำการคำนวณค่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงครบตามจำนวนชั้นที่กำหนดแล้ว จะได้ค่าการสูญเสียมวลรวมในเขตไฟโรไลซิสที่ $\phi = 4$ ของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. มีค่าเท่ากับ 0.08412 kg/s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อกำหนดในการออกแบบเบื้องต้นคือ 0.08333 kg/s

4. การหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะแสดงการหาค่าเฉพาะที่ $\phi = 4$ ของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. เชื้อเพลิงสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gas} &= \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} \\ &= 0.08412 + 0.10716 \\ &= 0.19129 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

จะได้อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่ $\phi = 4$ ของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. มีค่าเท่ากับ 0.19129 kg/s

5. การคำนวณหาความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

กำหนดให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 19.6 kJ/kg (Jayah et al., 2003) จะแสดงการหาความร้อนของเชื้อเพลิงเฉพาะที่ $\phi = 4$ ของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. สามารถหาความร้อนของเชื้อเพลิงได้จาก

$$\begin{aligned}
 HV_{gas} &= \frac{\dot{m}_{fuel} \times HV_{wood}}{\dot{m}_{gas} \times \eta} \\
 &= \frac{0.08412 \times 19.6}{0.19129 \times 0.75} \\
 &= 11.49295 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ $\phi = 4$ ของเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. มีค่าเท่ากับ 11.49295 kJ/kg

ภาคผนวก ข

การทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง

การทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง

การทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวล มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการติดตั้งพัดลมสำหรับป้อนอากาศที่ท่อทางออกก๊าซเชื้อเพลิง และอินเวอร์เตอร์สำหรับปรับความเร็วให้กับพัดลม ซึ่งแสดงดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 การติดตั้งพัดลมสำหรับป้อนอากาศให้กับเตา

2. ทำการบรรจุเชื้อเพลิงลงไปไนเตาให้เต็มปริมาตรถังบรรจุ โดยการเปิดฝาปิดส่วนบนของเตาแล้วกวาดเชื้อเพลิงลงไปไนถังบรรจุเชื้อเพลิง แสดงดังภาพผนวกที่ ข2



ภาพผนวกที่ ข2 การบรรจุเชื้อเพลิง

3. เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงจนเต็มแล้ว จึงทำการเปิดพัดลมป้อนอากาศโดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะปรับความถี่เท่ากับ 50 Hz. แล้วทำการจุดเตา แสดงดังภาพผนวกที่ ข3



ภาพผนวกที่ ข3 การจุดเตา

4. เมื่อเชื้อเพลิงในเตาดัดไฟ จะทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงออกมาที่ท่อทางออกของก๊าซไปยังพัดลมและออกมาตามหัวเผา จากนั้นทำการจุดประกายไฟที่หัวเผาซึ่งเป็นการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ออกมา แสดงดังภาพผนวกที่ ข4 โดยเปลวไฟจากการติดไฟของก๊าซเชื้อเพลิงมีลักษณะดังภาพผนวกที่ ข5



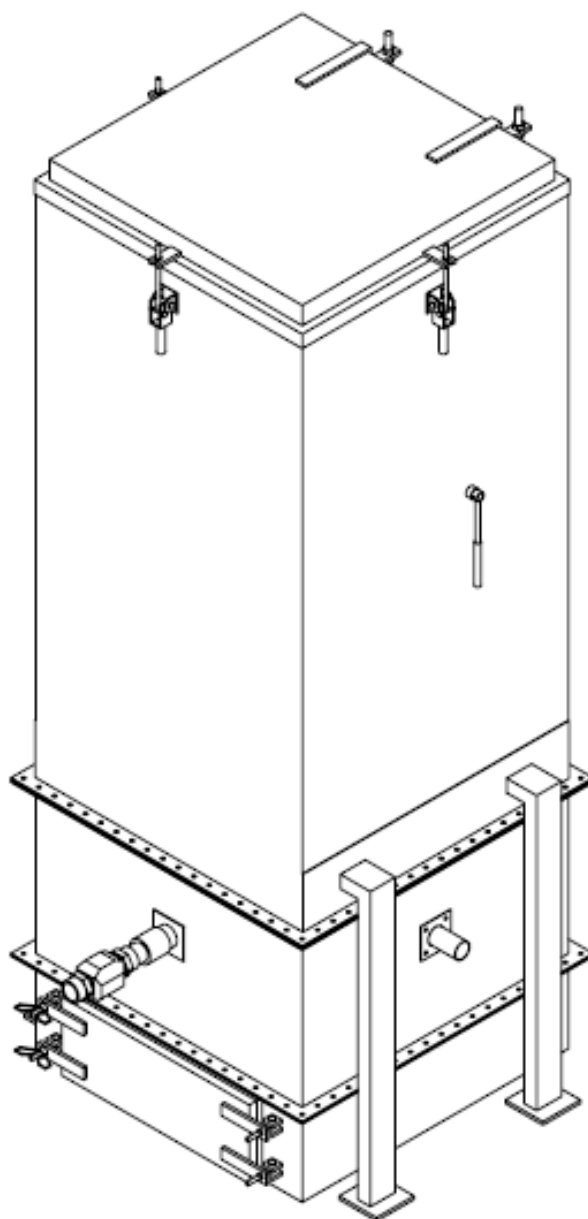
ภาพผนวกที่ ข4 ก๊าซเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ที่หัวเผา



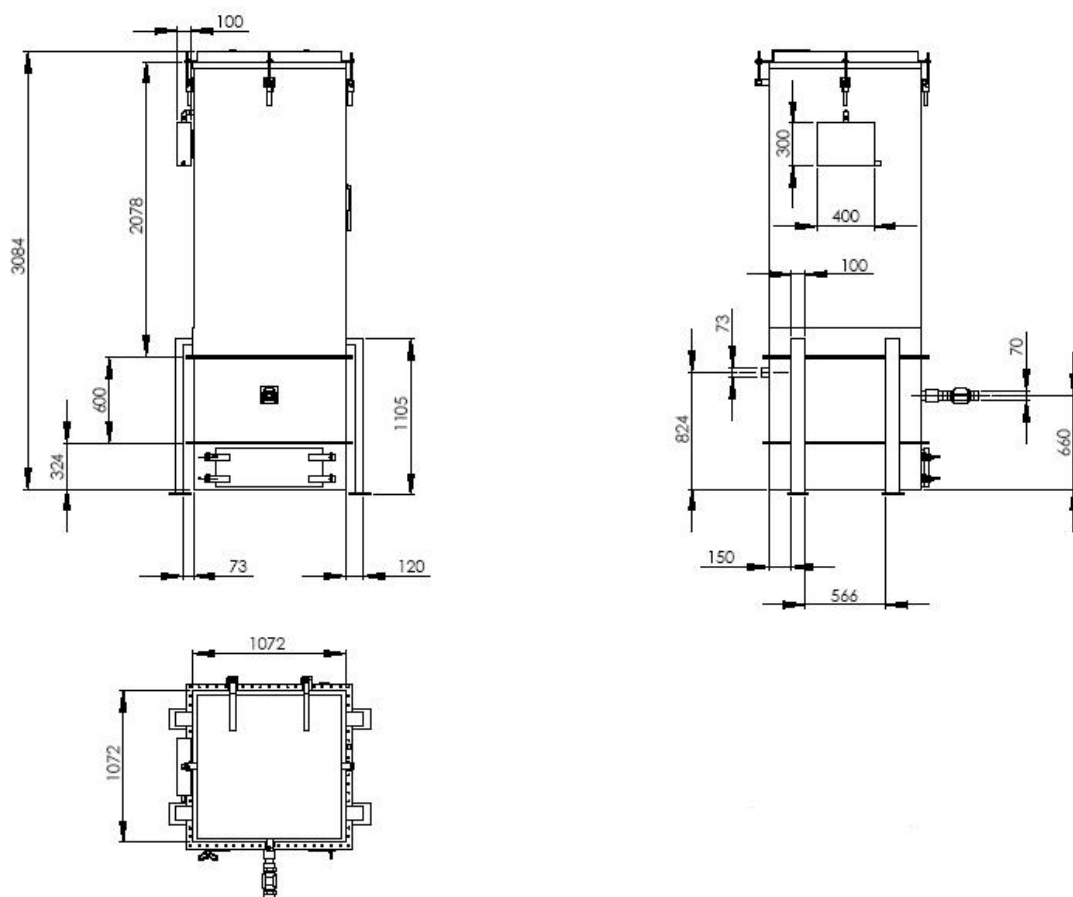
ภาพผนวกที่ ข5 ลักษณะเปลวไฟจากการติดไฟของก๊าซเชื้อเพลิง

ภาคผนวก ค

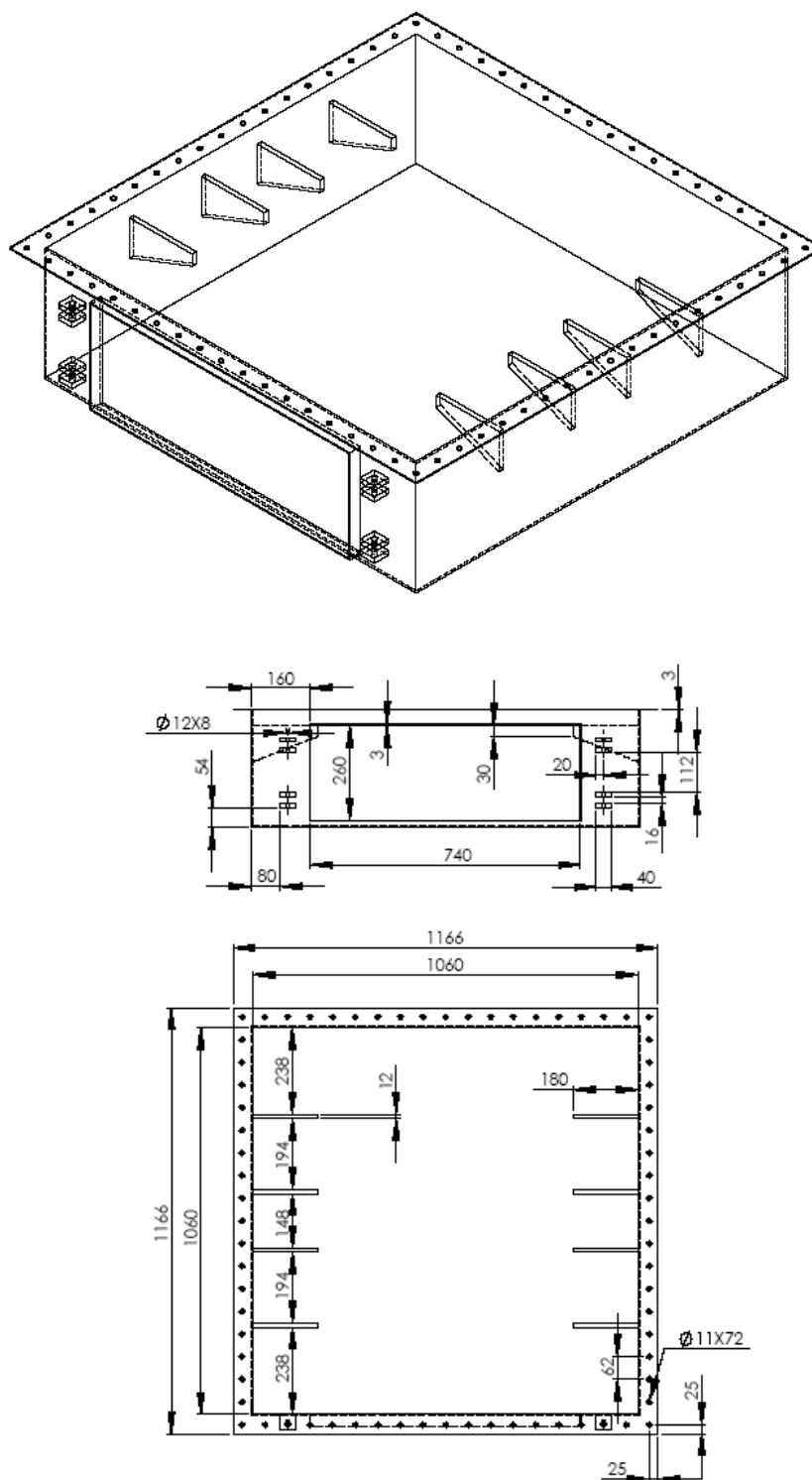
ขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง



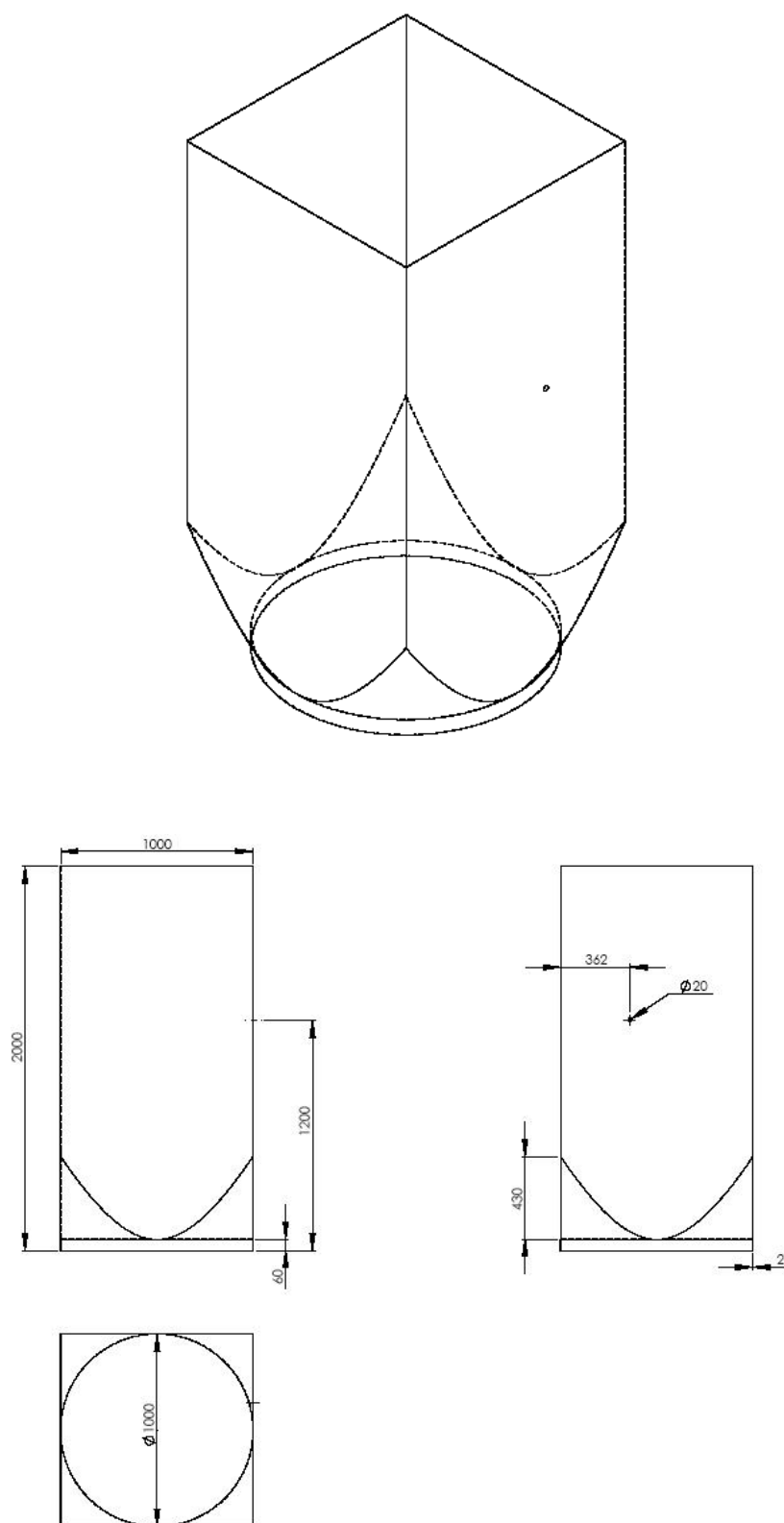
ภาพผนวกที่ ค1 ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดคอคอดเดี่ยว



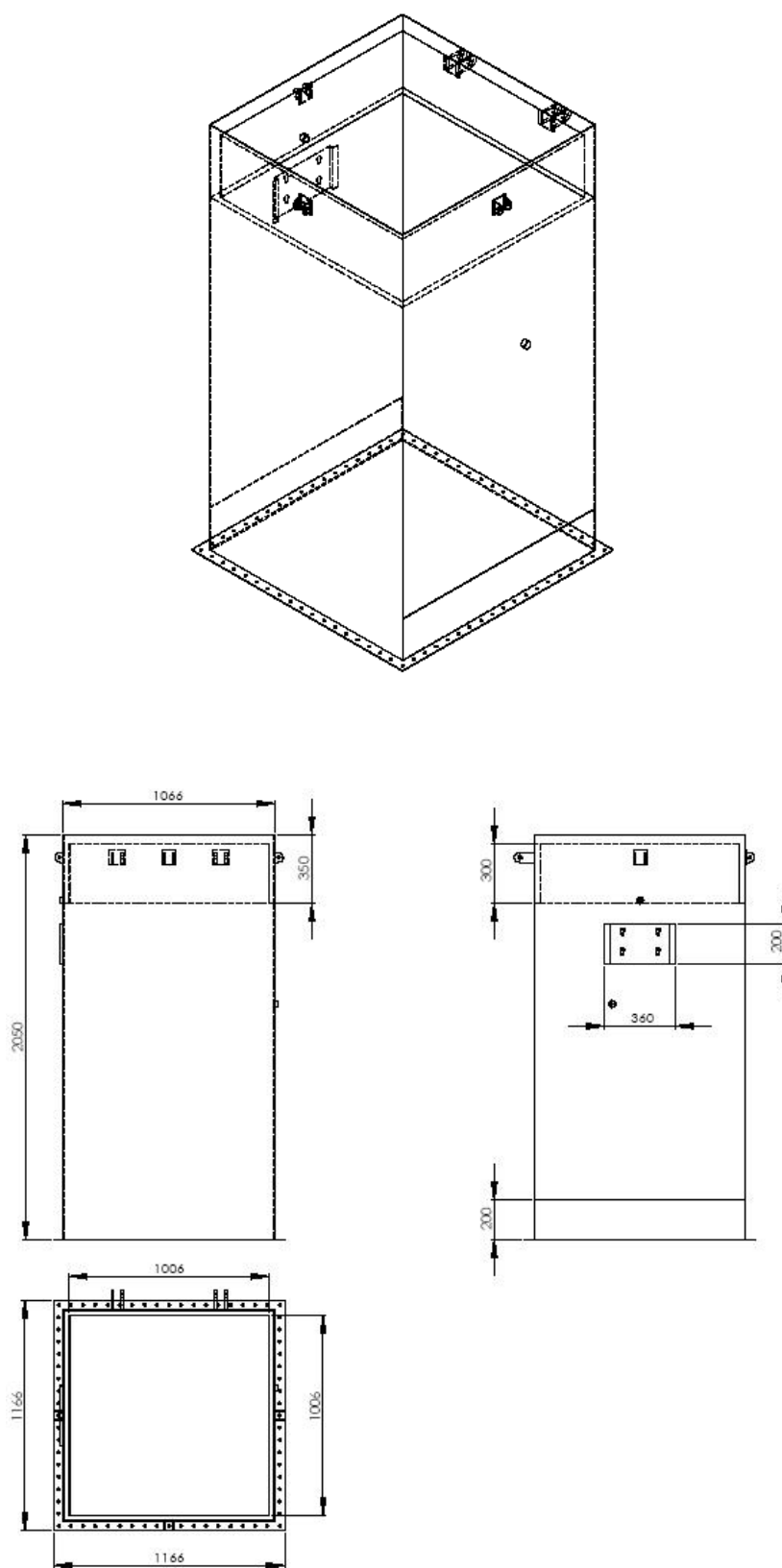
ภาพผนวกที่ ๒ รายละเอียดขนาดภายนอกของเตาผลิตแก้วชีวมวลแบบไหลลง ชนิดคอคอดเดี่ยว



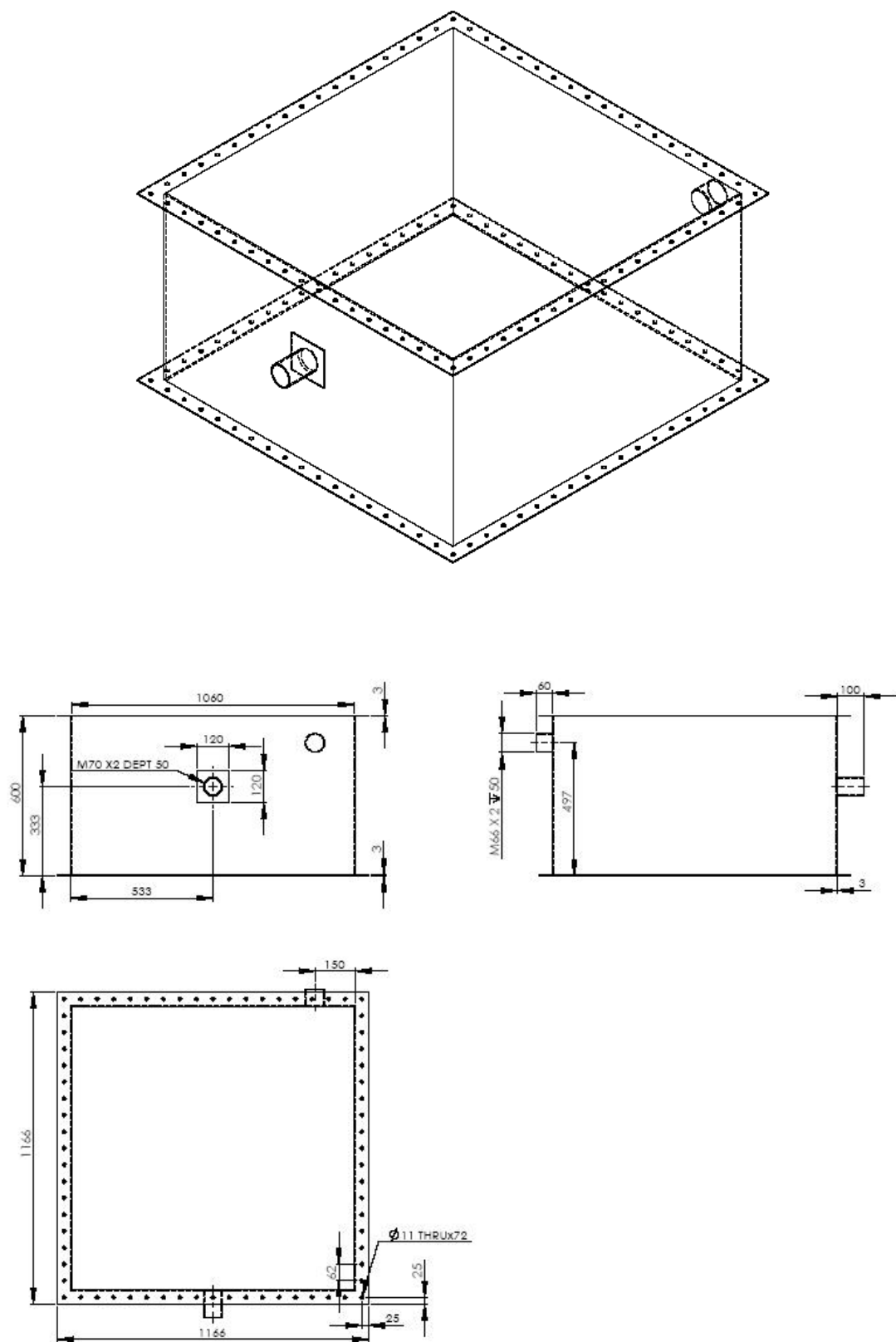
ภาพผนวกที่ ค3 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนฐานเตา



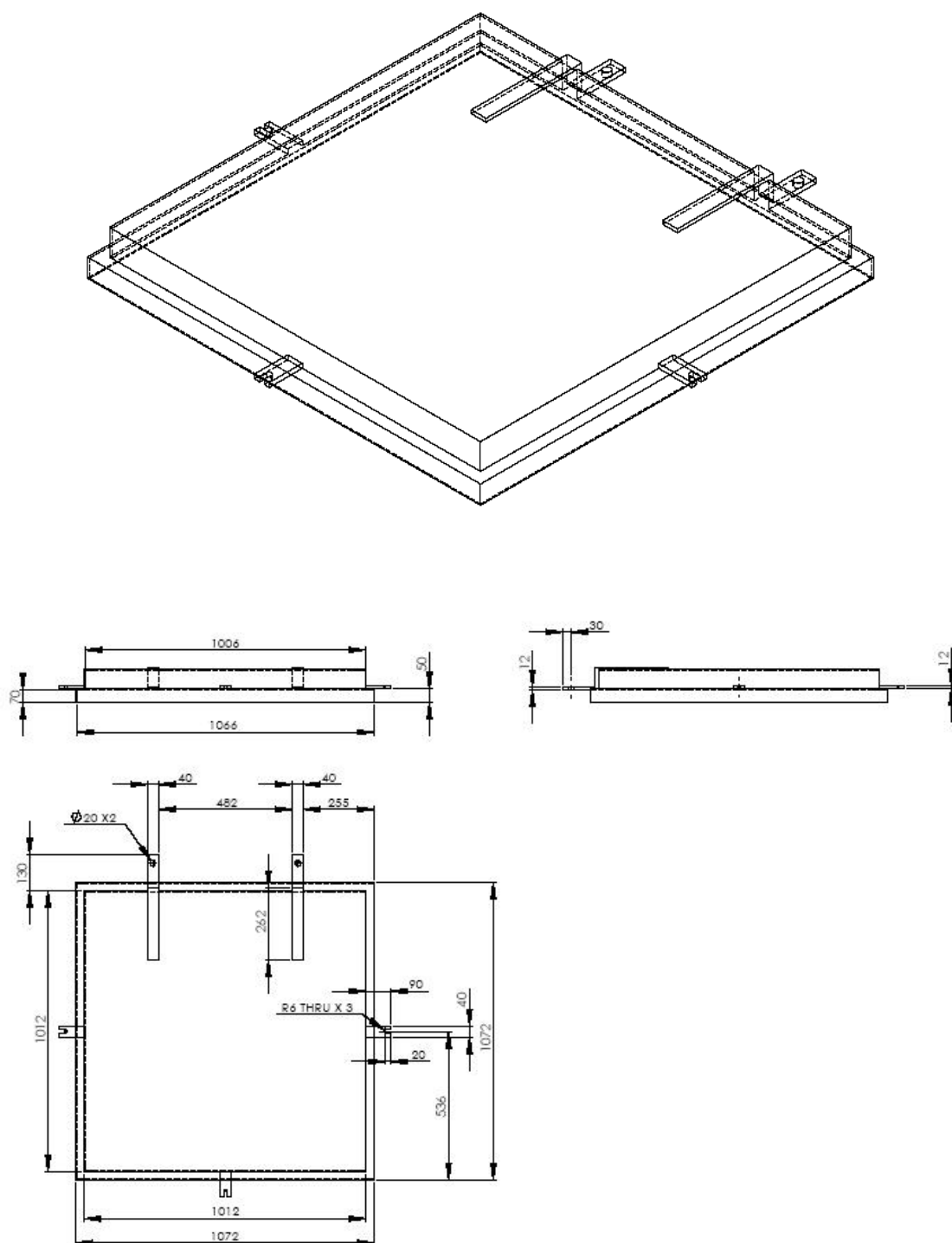
ภาพผนวกที่ ๔ รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนถังบรรจุเชื้อเพลิงส่วนใน



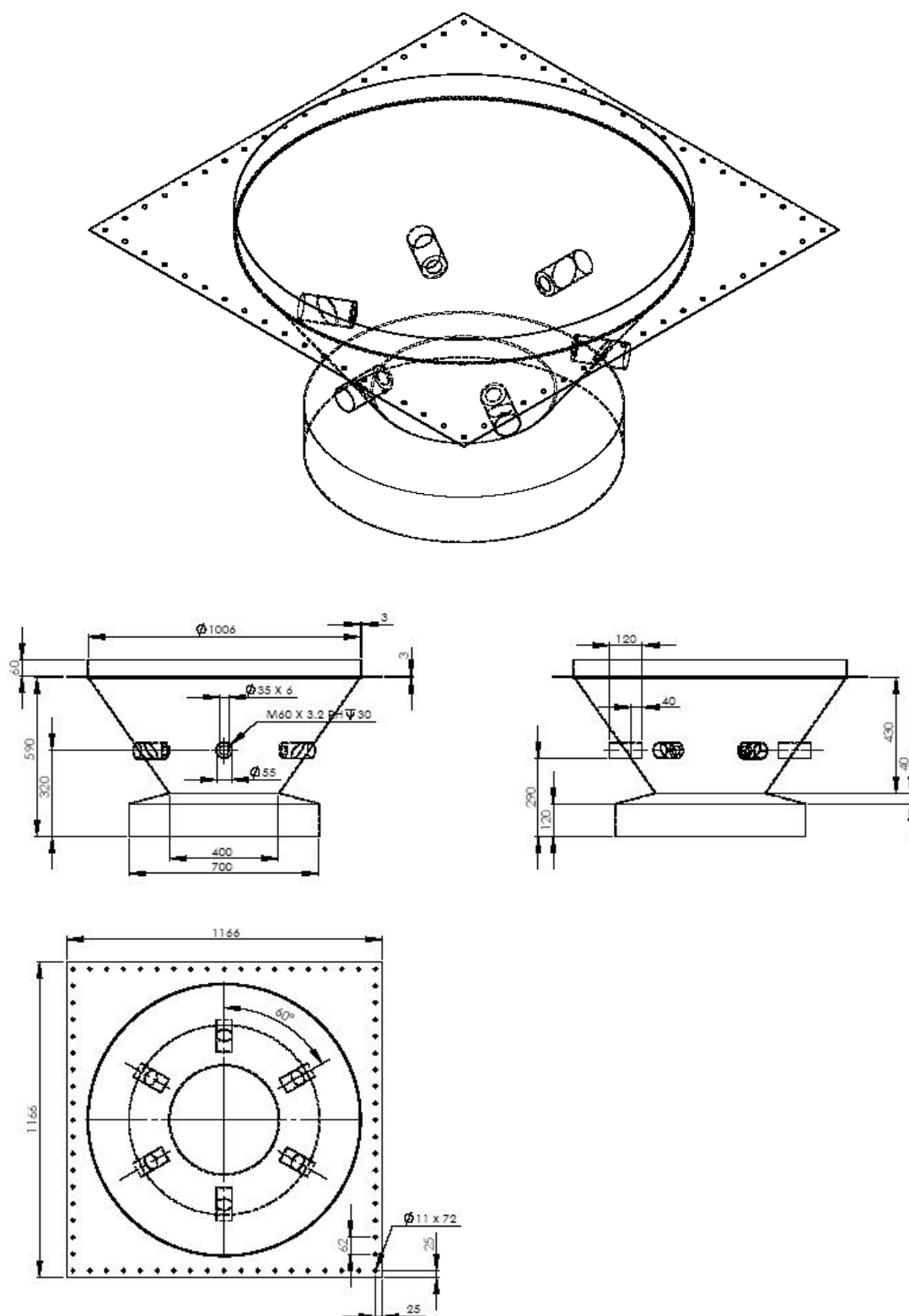
ภาพผนวกที่ ค5 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนถังบรรจุเชื้อเพลิงส่วนนอก



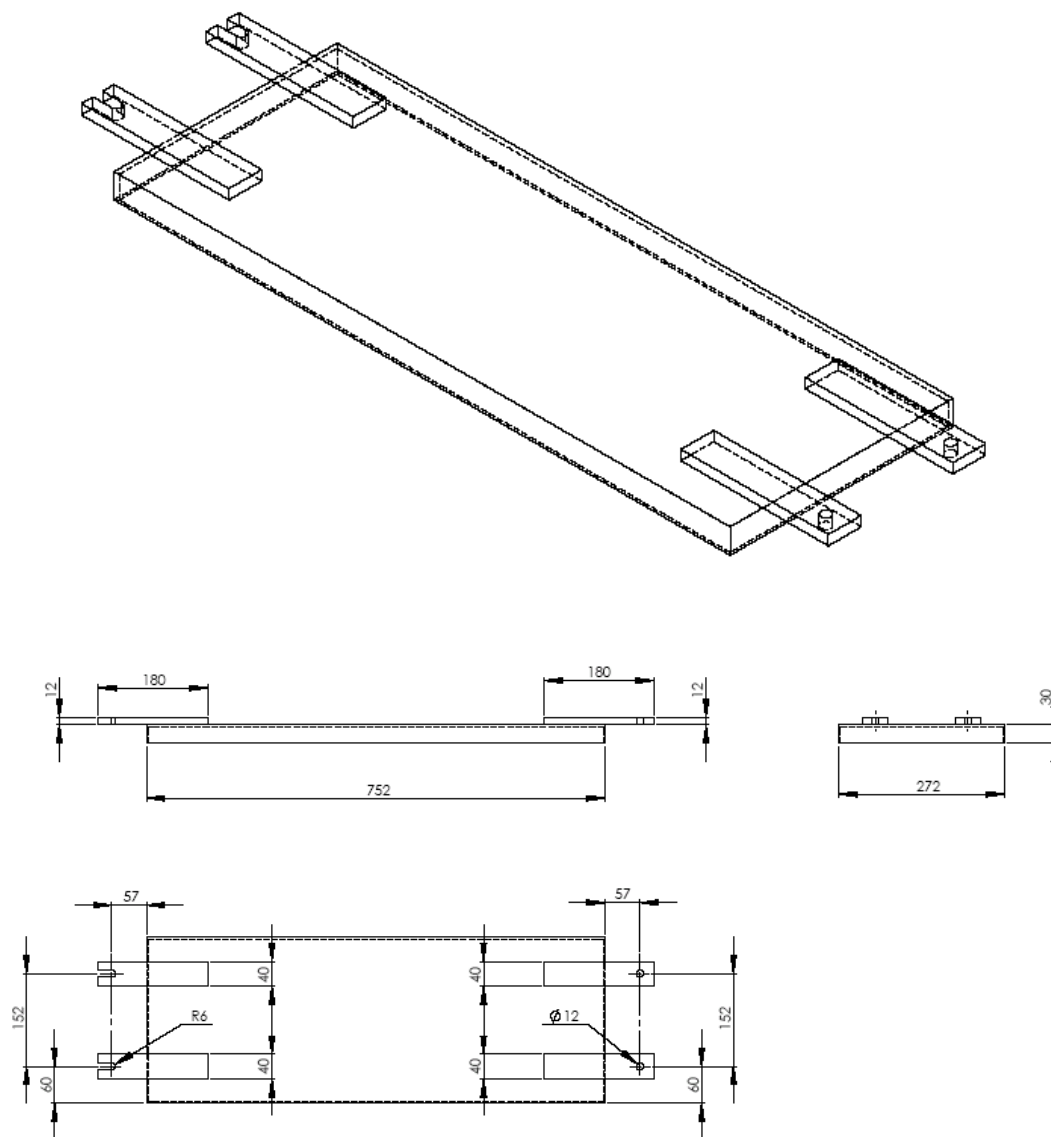
ภาพผนวกที่ ค6 รายละเอียดลักษณะและขนาดของเตาส่วนกลาง



ภาพผนวกที่ ๑7 รายละเอียดลักษณะและขนาดของฝ่าปัดถังบรรจุเชื้อเพลิง



ภาพผนวกที่ ค8 รายละเอียดลักษณะและขนาดของส่วนคอคอดเตา



ภาพผนวกที่ ๑ รายละเอียดลักษณะและขนาดของฝาปิดส่วนฐานเตา

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรงค์กร เพชรรัญย์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-