การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

สมรรถนะของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงและต่อเนื่อง โดยใช้เศษถ่านเป็นเชื้อเพลิง

PERFORMANCE OF CONTINUOUS DOWNDRAFT GASIFIER USING WASTE FROM BURNING RUBBER WOOD

พิชาญ มานะบรรยง, ชูเกียรติ คุปตานนท์ และ ปัญญรักษ์ งามศรีตระกูล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112
โทร 0-74212893 โทรสาร 0-74212893 E-mail:pichan.ma@jdmail.com

Pichan Manabunyung ,Chukiat Kooptarnond ,Panyarak Ngamsritragul
Department of Mechanical Engineering ,Faculty of Engineering,Prince of Songkla University HatYai,Songkhla 90112
Tel: 0-74212893 Fax: 0-74212893 E-mail: pichan.ma@jdmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของเตาชีวมวลแบบไหลลงซึ่งออกแบบให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยมีอุปกรณ์ที่สามารถเติมเชื้อเพลิงและเอาเถ้าออกได้ขณะที่เตายังทำงานอยู่ เตาผลิตก๊าซที่ออกแบบแบ่งเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยถังส่วนบนเป็นถังป้อนเชื้อเพลิง ถังส่วนกลางเป็นถังปฏิกรณ์ และถังส่วนล่างสำหรับเก็บเถ้า เศษถ่านที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้จากวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ไม้ฟืน(ยางพารา) ในหม้อไอน้ำ ส่วนประกอบเศษถ่านมีค่า C, H, N, O, S เท่ากับ 66.42, 0.91, 0.28, 13.81, และ 0 % (ฐานแห้ง) ตามลำดับ จากการทดสอบเบื้องต้นเป็นระยะเวลา 47 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง พบว่าเตาผลิตก๊าซมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 4.1 kg/hr และผลิตก๊าซได้ 18.71 Nm^3/hr ซึ่งก๊าซประกอบด้วย CO, CH_4, CO_2, Air เท่ากับ 29.56, ไม่มี, 3.69, 65.00 % ตามลำดับ

Abstract

This paper study the performance of continuous downdraft gasifier using wastes from burning rubber wood(as fuel for boiler) by installing continuous fuel feeding and ash removing system. There are three parts in the designed gasifier, fuel feeding system on the top, followed by gasification reactor system and ash collector system at the bottom. The waste from burning rubber wood has the values of C, H, N, O, S as 66.42, 0.91, 0.28, 13.81, and 0 % (dry basis) respectively. The first test of 47 hours continuously, showed that producer gas which a composition of CO, CH_4, CO_2 and Air as 29.56, not found, 3.69, and 65.00 % respectively has a flowrate of 18.71 Nm^3/hr with the fuel consumption of 4.10 kg/hr.

1.บทนำ

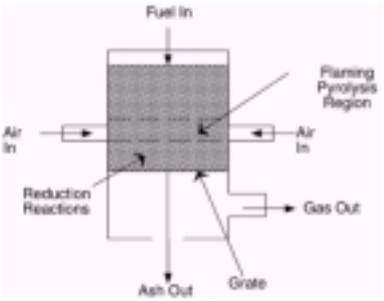
จากการที่ราคาน้ำมันเตามีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในภาคใต้หันมาใช้หม้อไอน้ำที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงโดยเฉพาะจากไม้ฟืนยางพารา เนื่องจากภาคใต้เป็นแหล่งที่มีไม้ฟืนจากยางพาราจำนวนมาก โดยหม้อไอน้ำขนาด 10 ตัน จะใช้ไม้ฟืนจากยางพาราเฉลี่ย 11,000 ตัน/ปี [1] แต่ในระหว่างการเผาไหม้ จะมีเศษถ่านร่วงลงมาจากตะกรับเตาซึ่งเป็นภาระที่ทางโรงงานต้องนำไปทิ้ง แต่เศษถ่านดังกล่าวยังมีคุณค่าสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ จึงมีแนวคิดในการนำเศษถ่านดังกล่าว(ขนาดประมาณ 1.5x1.5x1 ซม.) (รูปที่ 1) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาผลิตก๊าซโดยเตาผลิตก๊าซที่เลือกใช้เป็นเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง เนื่องจากสามารถนำก๊าซที่ผลิตได้ (อุณหภูมิ 400-500 ^{o}C [2]) ไปให้ความร้อนได้โดยตรง หรือใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน [3] เตาผลิตก๊าซแบบไหลลงที่ออกแบบจะมุ่งเน้นให้เตาผลิตก๊าซสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่เติมเชื้อเพลิงหรือนำเถ้าออกโดยไม่ต้องหยุดเตา

ในรายงานฉบับนี้จะเสนอข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบเตาผลิตก๊าซและผลการทดสอบเบื้องต้น เพื่อใช้ประกอบการใช้งานจริงต่อไป

รูปที่ 1 เศษถ่านที่ได้จากการเผาไหม้ไม้ฟืน (ยางพารา) ในหม้อไอน้ำ

2. การออกแบบเตาผลิตก๊าซ

หลักการทำงานของเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง [4] ดังรูปที่ 2 อากาศจะถูกดูดผ่านกลุ่มของหัวฉีด (Nozzle) ลงสู่ด้านล่าง ที่บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณ Combustion Zone ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 900-1200 ^{0}C ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในชั้นรีดักชั่นและชั้นกลั่นสลาย (135-600^{o}C) อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับชั้นรีดักชั่นนี้อยู่ที่ระหว่าง 500-1000 ^{0}C การออกแบบ กำหนดสร้างเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงขนาด 19 kW(อัตราการใช้เชื้อเพลิง 3.3 kg/hr) จะมี 3 ขั้นตอนด้วยกันดังนี้ 1) หาปริมาณการใช้อากาศ 2) ขนาดคอคอดในเตาปฏิกรณ์ ตำแหน่งหัวฉีดและขนาด 3) หาวิธีการป้อนเชื้อเพลิงและนำเถ้าออก ที่สามารถทำให้เตาทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดการทำงานของเตา



รูปที่ 2 เตาผลิตก๊าซแบบไหลลง

แสดงคุณสมบัติของเศษถ่าน Physical characteristics(ตารางที่ 1 ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเหมืองแร่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์), Proximate analysis (ตารางที่ 2 ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์), Ultimate analysis (ตารางที่ 3 ทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) และตารางที่ 4 เป็นผล Proximate analysis ถ่านไม้ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตถ่านไม้โดยตรง

ตารางที่ 1 Physical characteristics of waste from burning rubber wood (char coal)

Size (inch)	Bulk density (kg/m^3)
+3/8,-3/4	167

ตารางที่ 2 Proximate analysis of waste from burning rubber wood (charcoal)

Proximate analysis % wet basis (average)		
	Trial1	Trial2
Volatite matter(%)	23.07	23.85
Moisture(%)	14.02	11.10
Fixed carbon(%)	47.57	49.19
Ash(%)	15.34	15.86
High heating value^2	20.32(MJ/kg)	

ตารางที่ 3 Ultimate analysis of waste from burning rubber wood (charcoal) % dry basis (average)

Carbon(%)	66.42
Hydrogen(%)	0.91
Oxygen(%)	13.81
Nitrogen(%)	0.28
Sulfur(%)	0.00

ตารางที่ 4 Proximate analysis of charcoal [2]

Moisture content %	Ash %	Volatile matter %	Fixed carbon %
4.37	2.11	25.64	67.88

2.1 ปริมาณการใช้อากาศ

การหาปริมาณอากาศที่ใช้ ใช้วิธีการทำนายแบบ equilibrium model ซึ่งใช้ในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง [7] การคำนวณจะใส่ข้อมูลของเศษถ่าน ความชื้นเศษถ่าน อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิที่รีดักชั่นโซน โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

$C + CO_2 = 2CO$ (1)

$C + H_2O = CO + H_2$ (2)

$C + 2H_2 = CH_4$ (3)

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$ (4)

Equibrium constant for methane formation

$$K_1 = \frac{[CH_4]}{[H_2]^2} \quad (5)$$

Equibrium constant for the shift reaction

$$k_2 = \frac{[co_2][H_2]}{[CO][H_2O]} \quad (6)$$

$CH_xO_y + wH_2O + mO_2 + 3.76mN_2 = x_1H_2 + x_2\,CO + x_3CO_2 + x_4H_2O + x_5CH_4 + 3.76mN_2$ (7)

w =Water per kmol of biomass

จากสมการ (7) จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 6 ตัว x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 และ m ในการแก้สมการจะสร้างสมการเพิ่มจากสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน และใช้วิธี *Newton-Raphson* ในการแก้สมการ โดยกำหนดให้ความชื้นของเศษถ่าน 11 % (จากการวิเคราะห์), T1 เท่ากับ 35 ^{o}C (Ambient temperature) และ T2 เท่ากับ 830 ^{o}C (Reduction temperature)[4] จากการแก้สมการจะได้ผลลัพธ์ดังสมการ (8)

$CH_{0.164}O_{0.156}+0.101H_2O+0.589O_2+3.76(0.589)N_2=0.134H_2+0.611CO+0.389CO_2+0.047H_2O+0.001CH_4+3.76(0.589)N_2$ (8)

จากสมการ (8) พบว่าเศษถ่าน 1 kg ต้องใช้ปริมาณอากาศเข้าไปเผาไหม้จำนวน 5.10 kg หรือ Air/Fuel Ratio=5.10 และได้ปริมาณก๊าซ

จำนวน 5.22 Nm^3/kg (fuel) ดังนั้นเมื่อให้อัตราการใช้เชื้อเพลิง (เศษถ่าน) เท่ากับ 3.3 kg/hr จะต้องใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้ 16.83 kg/hr และ ปริมาณก๊าซที่ได้เท่ากับ 17.23 Nm^3/hr

2.2 ขนาดคอคอดในเตาปฏิกรณ์ ตำแหน่งหัวฉีดและขนาดหัวฉีด

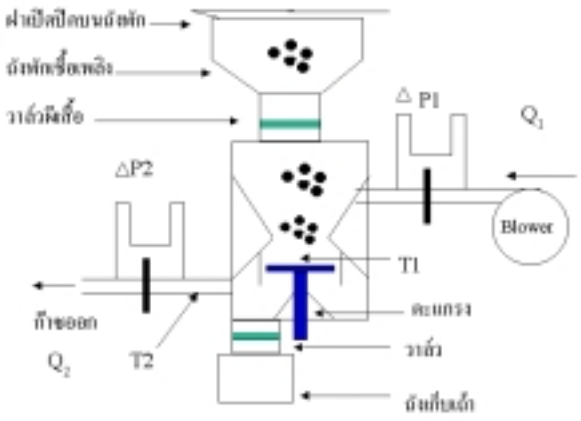
ขนาดของคอคอดในเตาปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับค่า SV (superficial velocity) เนื่องจากค่า SV เป็นตัวควบคุม ปริมาณก๊าซ อัตราการใช้เชื้อเพลิง องค์ประกอบของก๊าซ ปริมาณน้ำมันดิน [5] ได้กำหนดค่า SV อยู่ระหว่าง 0.8 – 2.5 m/s ในบริเวณ hearth zone

SV=อัตราการผลิตก๊าซ / พื้นที่หน้าตัด =(m^3/s) / (m^2) (9)

จากสมการ (9) อัตราการผลิตก๊าซเท่ากับ 17.23 Nm^3/ hr หรือ 20.52 x 10^{-3} m^3/s (ที่อุณหภูมิ 1000 $^{\circ}C$ ที่บริเวณคอคอด) ให้ SV=1.4 m/s (อยู่ระหว่าง 0.8–2.5 m/s) จะได้พื้นที่หน้าตัด 14.65 x $10^{-3}$$m^2$ หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm การตำแหน่งทางเข้าของหัวฉีด [2] จะอยู่เหนือคอคอดประมาณ 10 cm ความเร็วของอากาศที่เข้าสู่โซนเผาไหม้ที่เหมาะสม 32 m/s จาก [6] เสนอว่าที่ ขนาดคอคอด 12 cm ให้ใช้จำนวนหัวฉีดเท่ากับ 5 และขนาดหัวฉีด 12.7 mm

2.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิงและนำเถ้าออก

เพื่อให้เตาสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 3 โดยระบบป้อนเชื้อเพลิงจะประกอบด้วย 1) ฝาเปิดปิดบนถังพัก 2) ถังพักเชื้อเพลิง 3) วาล์วผีเสื้อซึ่งต่ออยู่ระหว่างถังพักกับเตาปฏิกรณ์ การทำงานในขณะเติมเชื้อเพลิง จะเปิดฝาตรงส่วนบนของถังพัก และปิดวาล์วผีเสื้อ เมื่อเติมเศษถ่านลงในถังพักแล้วจึงปิดฝาบน เปิดวาล์วผีเสื้อให้เศษถ่านไหลลงในเตาปฏิกรณ์ เมื่อเศษถ่านไหลลงหมดจึงปิดวาล์ว ระบบการนำเถ้าออกประกอบด้วย 1) ตะแกรงหมุนทำหน้าที่หมุนให้เถ้าตกลงมาโดยติดครีบไว้ที่เพลาสำหรับกวาดเถ้าลงในถังเก็บเถ้า 2) วาล์วขนาด 4 นิ้ว 3) ถังเก็บเถ้า การทำงานในการนำเถ้าออกจะเปิดวาล์วตรงถังเก็บเถ้าแล้วจึงหมุนตะแกรงให้เถ้าตก แล้วกวาดลงในถังเก็บ หลังจากนั้นจึงปิดวาล์วแล้วถอดเอาถังเก็บเถ้าออกไปเท เมื่อเรียบร้อยแล้วจึงประกอบกลับเข้าไปใหม่



รูปที่ 3 ระบบการป้อนเชื้อเพลิงและนำเถ้าออก

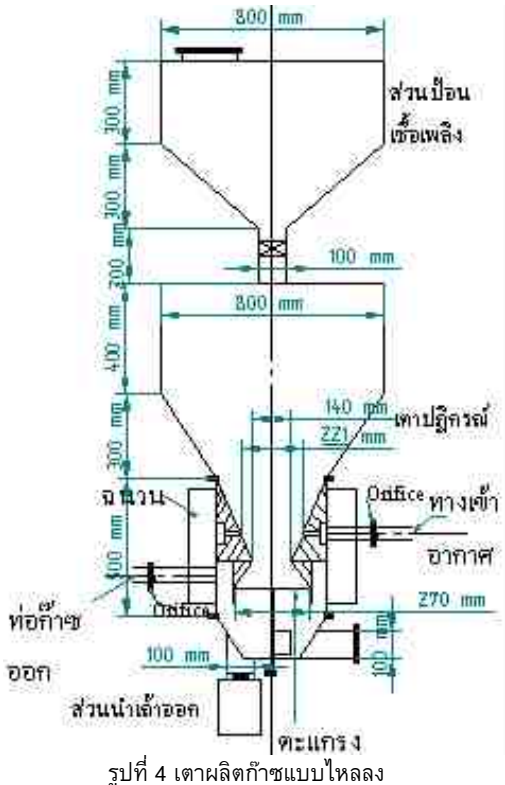
จากการออกแบบขนาดเตาที่ 19 kW (อัตราการใช้เชื้อเพลิง 3.3 kg/hr) จะได้รายละเอียดต่างๆ ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 4

ตารางที่ 5 รายละเอียดของเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงที่ออกแบบ

อัตราการใช้เศษถ่าน	3.3 kg/hr
ปริมาณอากาศที่ใช้	16.83 kg/hr, 4.67 g/s
ปริมาณก๊าซที่ได้	17.23 Nm^3/hr, 5.68 g/s
ขนาดคอคอด	14 cm
ขนาดหัวฉีด	12.7 mm (5 รู)
Air/Fuel Ratio	5.10
เศษถ่าน 1 kg ให้ก๊าซ	5.2 Nm^3

3. วิธีการทดลอง

การเตรียมเศษถ่าน นำเศษถ่านไปผึ่งแดดเพื่อให้ได้ความชื้นประมาณ 11 % ตามที่ได้กำหนดไว้ ทดลองเผาเศษถ่านในเตาผลิตก๊าซโดยเติมเชื้อเพลิงลงไปในเตาและจดบันทึกน้ำหนักเศษถ่านไว้ทุกครั้งที่เติมเชื้อเพลิง การวัดอุณหภูมิ (วัดอุณหภูมิของก๊าซที่ทางออก วัดอุณหภูมิที่บริเวณรีดักชั่นโซน) การให้อากาศจะใช้ Blower เป่าอากาศเข้าไป และวัดอัตราการไหลของปริมาณอากาศที่เข้าเตากับปริมาณก๊าซที่ได้โดยใช้แผ่น Orifice [9] โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบเป็นเวลา 47 ชั่วโมง และจดบันทึกปริมาณอากาศทุกๆ 1 ชั่วโมง ในระหว่างการทดสอบจะสังเกตปริมาณอากาศที่เข้าเตาถ้ามีปริมาณลดลงจะทำการหมุนตะแกรงเพื่อให้ขี้เถ้าไหลลง และเพื่อเป็นการรักษาระดับปริมาณอากาศที่เข้าเตา



รูปที่ 4 เตาผลิตก๊าซแบบไหลลง

4. ผลและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง

จากการทดสอบเผาเศษถ่านในเตาผลิตก๊าซ เป็นเวลา 47 ชั่วโมง ใช้เศษถ่านไป 195 kg ได้ข้อมูลตามตารางที่ 6 และรูปที่ 5 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซพบว่า CO, CH_4, CO_2, Air(O_2, N_2, H_2) มีค่า 29.56, ไม่พบ, 3.69, 65.00 % ตามลำดับ (CO วิเคราะห์โดย THAI INDUSTRAIL GASES ส่วนค่าอื่นๆ วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์) จาก[2] ค่า H_2 มีค่าประมาณ 0.2 % ซึ่งน้อย ดังนั้นเมื่อคิดเป็นพลังงานในก๊าซจึงนำค่า CO มาคิดเพียงค่าเดียว ซึ่งจะได้ค่าพลังงานของก๊าซเป็น 3.73 MJ/Nm^3 (ค่าความร้อนสูงของ CO มีค่า 3,020 kcal/m^3 [10])

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบกับการทดลองในเตาผลิตก๊าซที่สร้าง

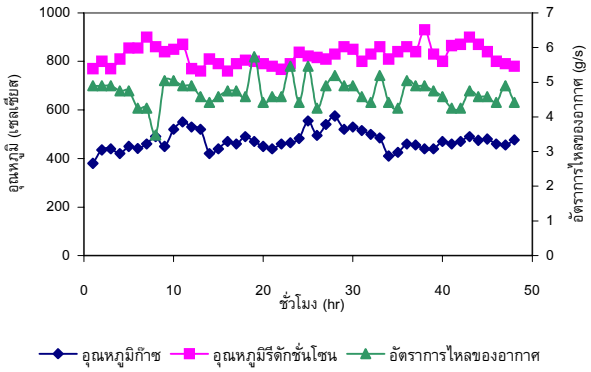
	การออกแบบ	ทดลอง
อัตราการใช้เชื้อเพลิง	3.3 kg/hr	4.10 kg/hr
ปริมาณอากาศที่ใช้	16.83 kg/hr 4.67 g/s	16.92 kg/hr 4.70 g/s
ปริมาณก๊าซที่ได้	17.23 Nm^3/hr 5.68 g/s	18.71Nm^3/hr 6.17 g/s
Air/Fuel Ratio	5.10	4.13
เศษถ่าน 1 kg ให้ก๊าซ	5.22 Nm^3	4.56 Nm^3
อุณหภูมิก๊าซที่ทางออก		380-575 ^{o}C
อุณหภูมิที่รีดักชั่นโซน	830 ^{o}C	770–930 ^{o}C

4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้ออกแบบไว้กับค่าที่ได้จากการทดลอง

จากตารางที่ 6 พบว่าเตาที่ออกแบบไว้ให้ปริมาณก๊าซ 4.56 Nm^3/kg(fuel) น้อยกว่าที่ออกแบบไว้ 12.64% เนื่องจากระหว่างการเผาไหม้ ขณะเติมเชื้อเพลิงซึ่งเกิดการติดขัดเนื่องจากวาล์วที่ป้อน(รูปที่ 3) มีขนาดเล็กทำให้การเติมใช้เวลานาน อากาศจึงวิ่งขึ้นสู่ด้านบนมากทำให้เกิดการเผาไหม้บริเวณด้านบน ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น

4.3 สมรรถนะของระบบ

อัตราการใช้เศษถ่าน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 kg/hr คิดเป็นกำลังที่ป้อนให้เตา 23.14 kW ประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 83.75 % การทำงานของเตาตลอดระยะเวลา 47 ชั่วโมง ในการป้อนเชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ไม่มีปัญหา แต่มีความยุ่งยากในการทำงานเนื่องจากวาล์วมีขนาด 4 นิ้ว ทำให้ต้องเติมเชื้อเพลิงบ่อย ในขณะที่การนำเถ้าออกจะทำงานโดยหมุนตะแกรงและที่ตะแกรงมีครีบสำหรับกวาดให้เถ้าลงสู่ถังเก็บ ในการหมุนตะแกรงเพื่อให้เถ้าตกจากเตาปฏิกรณ์สามารถทำงานได้ แต่ในระหว่างการทดสอบพบว่าในช่วง 18 ชั่วโมงแรก ตะแกรงสามารถหมุนทำงานได้ แต่ครีบไม่สามารถกวาดเถ้าลงในถังเก็บเถ้า ทำให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถขยับตะแกรงได้ ดังนั้นการทำงานของระบบป้อนเชื้อเพลิงและนำเถ้าออก ต้องมีการแก้ไข โดยในส่วนการป้อนเชื้อเพลิงจะใส่วาล์วให้ใหญ่ขึ้น และในการนำเถ้าออกจะทำการออกแบบใหม่



รูปที่ 5 อัตราการไหลของอากาศเข้าเตา(Q_1) อุณหภูมิก๊าซที่ออก(T_2) อุณหภูมิรีดักชั่นโซน(T_1) ในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง (รูปที่ 3)

5. สรุป

การนำเศษถ่านซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ไม้ฟืน (ไม้ยางพารา) ในหม้อไอน้ำ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง ได้ปริมาณก๊าซ 4.56 Nm^3/kg (fuel) แต่การทดสอบเบื้องต้นยังไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเท่าที่ควร ซึ่งได้อยู่ระหว่างการแก้ไขเพื่อทำการทดสอบต่อ โดยจะปรับปรุงในส่วนการป้อนเชื้อเพลิงจะใส่วาล์วให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้การเติมเชื้อเพลิงสะดวกขึ้น และในการนำเถ้าออกจะปรับปรุงกลไกให้สามารถนำเถ้าออกได้สะดวกขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ปฐมพงศ์ ชี้ทางดี และ ณัฐวุฒิ ธีระเกียรติกำจร. “ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแทนน้ำมันเตาในหม้อไอน้ำ” รายงานโครงงานวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2543

[2] บวรพรรณ คติการ. “ตัวกรองที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้(Testing of Suitable Filter for Charcoal Gasifier)”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2529

[3] P. Hasler and TH. Nussbaumer. “Gas cleaning for IC engine application from fixed bed biomass gasification”, Biomass & Bioenergy, 1999, Vol. 16, pp. 385-395

[4] รัตนชัย ไพรินทร์และคณะ. “กระบวนการ Gasification และการใช้พลังงานจาก Gasifier”, วารสารพลังงาน, ตุลาคม-ธันวาคม, 2541, หน้า 28-31

[5] T.B Reed.; R. Walt and A. Das. “Superficial velocity – the key to downdraft gasification”, Biomass conference of the Americas, 8/29/99, Oakland, CA

[6] “Wood gas as engine fuel”, FAO Forestry Department, 1986

[7] Z.A. Zainal.; R. Ali and K.N. Seetharamu. “Prediction of performance of downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials”, Energy Conversion &Management, 2001, Vol. 42, pp. 1499-1515

[8] D.L. Giltrap.; R. McKibbin and G.R.G. Barnes. “A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier”, Solar Energy, 2003, Vol. 74, pp. 85-91

[9] LMNO Engineering Research and Software Ltd. http://www.LMNOeng.com, 7860 Athens, Ohio 45701 USA, 2002

[10] บริษัท เอ็นเนอร์ คอนซัลแตนท์จำกัด “การอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน”, การฝึกอบรมหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงาน ของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม