

SIMULASI SECARA TERMODINAMIKA GASIFIKASI LIMBAH DAUN PADA *DOWNDRAFT GASIFIER* MENGGUNAKAN MODEL KONSTANTA KESETIMBANGAN : PENGARUH *EQUIVALENT RATIO*

Fajri Vidian^{1, a*}, Yossi Adi Sahputra²

^{1,2}.Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Jl Palembang-Prabumulih KM 32, Ogan Ilir (OI), Sumatera Selatan
^{a*} fajri.vidian@unsri.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilatar belakangi oleh banyaknya limbah Daun di Sumatera Selatan, khususnya di sekitar Universitas Sriwijaya, Inderalaya Ogan Ilir serta simulasi secara termodinamika merupakan pendekatan yang cukup baik untuk memprediksi komposisi gas hasil gasifikasi pada *downdraft gasifier*. Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh *equivalent ratio* terhadap komposisi gas hasil gasifikasi limbah daun, khususnya komposisi gas mampu bakar (CO , H_2 dan CH_4). Simulasi dikerjakan menggunakan model konstanta kesetimbangan yang dikombinasikan dengan kesetimbangan massa dan energi. Konstanta kesetimbangan dan kesetimbangan massa digunakan untuk membentuk persamaan komposisi gas pada temperatur yang ditentukan. Kesetimbangan energi digunakan untuk membentuk persamaan temperatur pada kondisi kesetimbangan. Persamaan-persamaan tersebut diselesaikan menggunakan metode Newton-Rhapson. Nilai *equivalent ratio* yang digunakan antara 0,2 s/d 0,4 dengan kandungan *moisture* 10%. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan nilai *equivalent ratio* cenderung menyebabkan penurunan komposisi CO , H_2 , CH_4 , dan LHV gas.

Kata Kunci : Simulasi Termodinamika, Gasifikasi, Limbah Daun, Konstanta Kesetimbangan

1. Pendahuluan

Berkurangnya cadangan energi fosil terutama minyak bumi telah menjadi permasalahan serius bagi dunia maupun indonesia. Sipat utama dari energi fosil adalah tidak dapat diperbaharui. Tentu saja dalam memecahkan permasalahan tersebut sangatlah diperlukan untuk mencari sumber energi alternatif yang sifatnya dapat diperbaharui.

Biomassa merupakan salah satu bentuk dari energi alternatif yang sifatnya dapat diperbaharui. Dalam pengembangan *roadmap* bidang keenergian Indonesia energi baru dan terbarukan memiliki peranan yang sangat penting dimana biomassa bersama sumber energi lain harus memenuhi 5% dari kebutuhan energi nasional [1], persentasi tersebut akan terus meningkat seiring perubahan waktu.

Limbah daun adalah salah satu jenis dari biomassa yang berpotensi untuk menghasilkan energi. Pemanfaatan limbah daun untuk menghasilkan energi pada saat ini sangat terbatas bahkan bisa dikatakan belum ada.

Pemanfaatan limbah daun untuk dikonversikan menjadi energi dapat dilakukan secara termokimia. Salah satu metode pengkonversian secara termokimia adalah gasifikasi. Melalui proses gasifikasi limbah daun dikonversikan menjadi gas mampu bakar (*combustible gas*) yaitu karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2) dan metan (CH_4). Gas mampu bakar tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menggerakkan mesin pembakaran dalam, turbin gas dan pembangkit uap pada boiler dll. Pengkonversian termokimia melalui gasifikasi memiliki keuntungan pada efisiensi pengkonversian yang tinggi serta polusi yang dihasilkan rendah [2].

Sebelum dilakukan pengujian gasifikasi limbah daun perlu dilakukan simulasi terhadap hasil yang mungkin dapat diperoleh. melalui simulasi. Banyak metode yang dapat dilakukan untuk mensimulasikan proses gasifikasi salah satu metode yang sederhana adalah secara termodinamika. Simulasi secara termodinamika dapat dilakukan dengan prinsip

konstanta kesetimbangan dan minimisasi energi bebas Gibbs. Simulasi menggunakan prinsip konstanta kesetimbangan lebih sederhana dibandingkan dengan prinsip minimisasi energi bebas Gibbs.

Beberapa simulasi secara termodinamika menggunakan prinsip kesetimbangan dengan jenis bahan bakar berbeda telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Jarunthammachote, (2006) [3] melakukan simulasi termodinamika menggunakan bahan bakar sampah padat kota, Zainal dkk, (2001) [4] melakukan simulasi menggunakan bahan bakar kayu, Attae dkk (2012) [5] melakukan simulasi gasifikasi menggunakan campuran batubara dan biomassa, Puig (2012) [6] melakukan simulasi menggunakan bahan bakar potongan kayu, Karamarkovic (2010) [7] melakukan simulasi menggunakan bahan bakar biomassa. Pada penelitian ini dilakukan simulasi termodinamika menggunakan bahan bakar limbah daun.

Simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan gambaran pengaruh *equivalent ratio* terhadap komposisi gas dan nilai kalor yang dapat diperoleh dari proses gasifikasi limbah daun.

2. Metode simulasi

Sebelum dilakukan simulasi terlebih dilakukan analisa proximat dan ultimat limbah Daun seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1. Data analisa ultimat bahan bakar tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan rumus kimia bahan bakar yang akan digunakan pada proses simulasi.

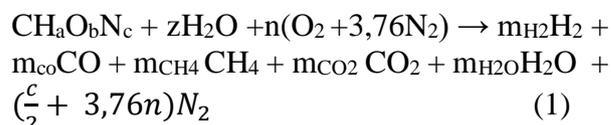
Tabel 1. Analisa Proksimat dan Ultimat Limbah Daun

Analisa Proksimat	Unit	Nilai
Moisture	%	8,64
Ash	%	5,79
Volatile	%	64,9
Fixed Carbon	%	20,78
Analisa Ultimat		
Carbon	%	46,31
Hidrogen	%	6,13
Nitrogen	%	1,0

Tabel 1 Lanjutan

Sulfur	%	0,31
Oksigen	%	40,46
Gross Calorific Value	Cal/gram	4371

Simulasi dilakukan dengan menerapkan persamaan konservasi massa, kesetimbangan termodinamika dan konservasi energi pada reaksi global gasifikasi (pers 1)



Dimana a,b,c merupakan jumlah atom hidrogen, oksigen dan nitrogen perjumlah atom carbon dalam bahan bakar, z jumlah moisture per kmol bahan bakar, n jumlah oksigen perkmol bahan bakar dan m jumlah komposisi masing-masing gas perkmol bahan bakar.

2.1. Konservasi massa

Komposisi masing-masing unsur harus diketahui dalam hal ini ada lima komposisi unsur yang harus diketahui. Komposisi unsur tersebut diperoleh melalui penerapan hukum konservasi massa (persamaan 2)

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i^n m_{\text{masuk},i} - \sum_i^m m_{\text{keluar},i} \quad (2)$$

Proses diasumsikan berlangsung pada kondisi aliran yang tunak (*steady flow*) maka $\frac{dm}{dt} = 0$ sehingga

$$\sum_i^n m_{\text{masuk},i} - \sum_i^m m_{\text{keluar},i} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_i^n m_{\text{masuk},i} = \sum_i^m m_{\text{keluar},i} \quad (4)$$

Hukum konservasi massa tersebut diterapkan pada masing-masing elemen (C,H,O) akan memberikasn 3 persamaan masing - masing :

$$m_{\text{CO}} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4} - 1 = 0 \quad (5)$$

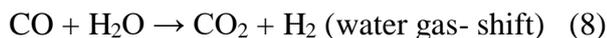
$$2m_{\text{H}_2} + 2m_{\text{H}_2\text{O}} + 4m_{\text{CH}_4} - a - 2z = 0 \quad (6)$$

$$m_{\text{CO}} + 2m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} - z - 2n - b = 0 \quad (7)$$

Tiga persamaan diatas tidak cukup untuk mendapatkan lima komposisi senyawa sehingga diperlukan dua persamaan lagi. Dua persamaan tersebut diperoleh dari kesetimbangan termodinamika.

2.2. Kestimbangan Termodinamika

Kestimbangan termodinamika yang diterapkan didasarkan pada kontanta kestimbangan. Konstanta kestimbangan dari reaksi gasifikasi diperoleh dari reaksi yang terjadi pada daerah kestimbangan (zona reduksi) yaitu :



Konstanta kestimbangan untuk reaksi-reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

$$K_1 = \frac{(m_{\text{CO}_2})(m_{\text{H}_2})}{(m_{\text{CO}})(m_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{(m_{\text{CH}_4})(m_{\text{total}})}{m^2_{\text{CH}_4}} \quad (11)$$

Konstanta kestimbangan reaksi (K) juga ditentukan oleh perubahan fungsi Gibbs

keadaan stándar dalam reaksi seperti pada persamaan berikut :

$$\ln K = -\frac{\Delta G_T^0}{RT} \quad (12)$$

Perubahan energi Gibbs pada kondisi stándar (ΔG_T^0) ditentukan oleh perubahan formasi energi bebas Gibbs dalam unsur yang dijelaskan pada Persamaan (13).

$$\Delta G_T^0 = \sum_{i=\text{produk}} \nu_i \Delta g_{f,T,i}^0 - \sum_{i=\text{reaktan}} \nu_i \Delta g_{f,T,i}^0 \quad (13)$$

Perubahan formasi energi bebas Gibbs dalam unsur ditentukan berdasarkan Persamaan (14).

$$\Delta g_{f,T,i}^0 = h_f^0 + a' T \ln(T) - b' T^2 - \left(\frac{c'}{2}\right) T^3 - \left(\frac{d'}{3}\right) T^4 + \left(\frac{e'}{2T}\right) + f' + g' T \quad (14)$$

Nilai enthalpi formasi masing – masing senyawa dan koefisien emperik pers 14 didapat dari Tabel 2.

Tabel 2. Nilai h_f^0 (kJ/mol) dan koefisien emperical (kJ/mol) [3]

Senyawa	h_f^0	a'	b	c	d	e	f	g
CO	-110.5	5.619 x 10 ⁻³	-1.190x10 ⁻⁵	6.383x10 ⁻⁹	-1.846x10 ⁻¹²	-4.891x10 ²	8.684 x 10 ⁻¹	-6.131 x 10 ⁻²
CO ₂	-393.5	1.949x10 ⁻²	3.122x10 ⁻⁵	2.448x10 ⁻⁸	6.946x10 ⁻¹²	4.891x10 ²	5.270	-1.207x10 ⁻¹
H ₂ O	-241.8	8.950x10 ⁻³	3.672x10 ⁻⁶	5.209 x10 ⁻⁹	1.478x10 ⁻¹²	0.0	2.868	1.722x10 ⁻²
CH ₄	-74.8	4.620x10 ⁻²	1.130x10 ⁻⁵	1.319x10 ⁻⁸	6.647x10 ⁻¹²	4.891x10 ²	1.411x10 ¹	2.234x10 ⁻¹

Dengan mengetahui suhu pada daerah gasifikasi/reduksi (T) maka nilai K dapat diketahui. Nilai K digunakan untuk menyelesaikan persamaan (5) – (7) dan persamaan (10) – (11) secara simultan dengan metode Newton Rhaspon. Komposisi gas diperoleh melalui penyelesaian persamaan diatas dengan suhu yang ditentukan.

2.3. Konservasi Energi

Suhu dan komposisi gas sebenarnya pada kondisi kestimbangan termodinamika diperoleh dengan menerapkan persamaan konservasi energi untuk kondisi aliran stedi.

$$(h_2 - h_1) + (E_{k,2} - E_{k,1}) + (E_{p,2} - E_{p,1}) = Q - W \quad (15)$$

Dimana :

h_i = enthalpi masuk dan keluar sistem

$E_{k,i}$ = energi kinetik masuk dan keluar sistem

$E_{p,i}$ = energi potensial masuk dan keluar sistem

Q = panas yang masuk dan keluar sistem

W = kerja masuk dan keluar sistem

dengan mengabaikan perubahan energi kinetik, energi potensial dan kerja pada sistem, maka persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$(h_2 - h_1) = Q \quad (16)$$

Jika proses diasumsikan berlangsung pada kondisi adiabatik, maka $Q = 0$, sehingga persamaan diatas menjadi.

$$h_{\text{keluar}} = h_{\text{masuk}} \quad (17)$$

Jika persamaan diatas diaplikasikan untuk proses pembakaran maka akan diperoleh persamaan berikut :

$$\sum_{i=\text{reaktan}} v_i (h_{f,i}^0 + \Delta h_{T,i}^0) = \sum_{i=\text{produk}} v_i (h_{f,i}^0 + \Delta h_{T,i}^0) \quad (18)$$

Dimana :

$$\Delta h_T = \int_{298}^T C_p(T) dT \quad (19)$$

Dengan :

$C_p(T)$ = Panas spesifik pada tekanan konstan (kJ/kmol K)

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (20)$$

$$\int_{298}^T C_p(T) dT = aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 + k \quad (21)$$

Dengan :

k = konstanta didapat dari integrasi

Nilai koefisien panas spesifik diperoleh dari Tabel 3.

Dengan mensubstitusikan persamaan (21) ke dalam persamaan (18) maka akan diperoleh persamaan (22) dibawah ini

$$\sum_{j=\text{reak}} h_{f,j}^0 = \sum_{i=\text{pro}} m_i h_f^0 + [(\sum_i m_i a_i)T + (\sum_i m_i b_i)T^2 + (\sum_i m_i c_i)T^3 + (\sum_i m_i d_i)T^4 + \sum_i m_i k_i] \quad (22)$$

Persamaan (22) selanjutnya diselesaikan menggunakan metode Newton Rhaspon untuk mendapatkan nilai T.

Simulasi dilakukan dengan metode iterasi hingga perbedaan antara suhu yang ditentukan terhadap suhu pada kondisi kesetimbangan termodinamika sekecil mungkin. Dalam simulasi ini perbedaan suhu $\leq 2^0\text{K}$

2.4. LHV Gas Mampu Bakar

Nilai kalor gas hasil simulasi dihitung berdasarkan rumus di bawah [9]

$$\text{LHV (kJ/Nm}^3) = y_{CO} \cdot 12621 + y_{H_2} \cdot 10779 + y_{CH_4} \cdot 35874 \quad (23)$$

2.5. Parameter Masukkan untuk Simulasi

Parameter yang dimasukkan dalam simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Analisa ultimat daun
2. *Equivalent Ratio* (0,2-0,4)
3. Moisture daun (10%)
4. Suhu gasifikasi (800 ^0C)

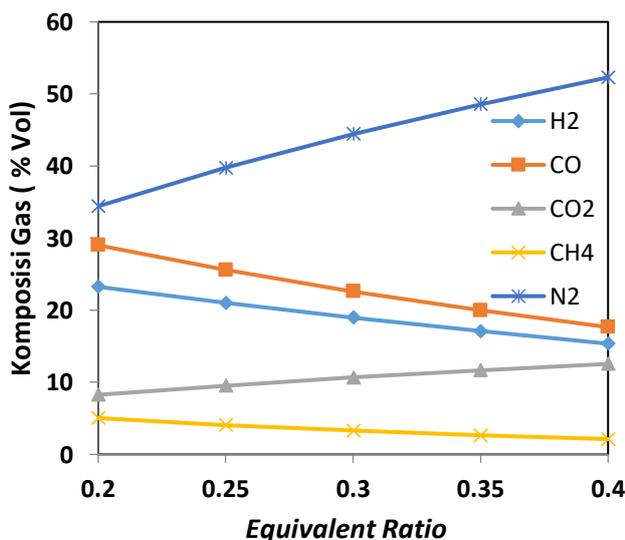
Tabel 3. Koefisien Panas Spesifik untuk Persamaan Empiris [8]

Senyawa	a	b	c	d	Jangkauan temperatur
Hidrogen	29.11	-	0.4003×10^{-5}	-	273 - 1800
Karbon Monoksida	28.16	0.1919×10^{-2}	0.5372×10^{-5}	0.8704×10^{-9}	273 - 1800
Karbon dioksida	22.26	5.981×10^{-2}	-3.501×10^{-5}	-7.469×10^{-9}	273 - 1800
Uap air	32.24	0.1923×10^{-2}	1.055×10^{-5}	-	273 - 1800
Metane	19.89	5.204×10^{-2}	1.269×10^{-5}	3.595×10^{-9}	273 - 1800
Nitrogen	28.90	-0.1571×10^{-2}	0.8081×10^{-5}	$11,01 \times 10^{-9}$	273 - 1800
				2.873×10^{-9}	

3. Hasil dan diskusi

3.1 Pengaruh *Equivalent Ratio* Terhadap Komposisi Gas.

Gambar 1 menunjukkan peningkatan *equivalent ratio* 0,2 s.d 0,4 akan meningkatkan komposisi N₂ dan CO₂ masing – masing antara 34,43 s/d 52,30% dan 8,27 s/d 12,56 %. Komposisi CO dan H₂ akan turun dengan jangkauan pengurangan masing – masing 29,01% menjadi 17,65% dan 23,25 % menjadi 15,36%. Kandungan CH₄ nilai konsentrasi gas yang dihasilkan kecil jika dibandingkan dengan komposisi gas CO dan H₂ yaitu turun antara 5,04% menjadi 2,12%. Pengurangan komposisi gas tersebut dikarenakan terjadi penurunan reaksi pada daerah kesetimbangan (*water gas shift reaction dan methane reaction*). Kecenderungan grafik (*trend*) yang dihasilkan pada simulasi ini sama dengan kecenderungan yang dihasilkan oleh Puig, dkk [6], Karamarkovik dkk [7]. dan Ramanan, dkk [10].

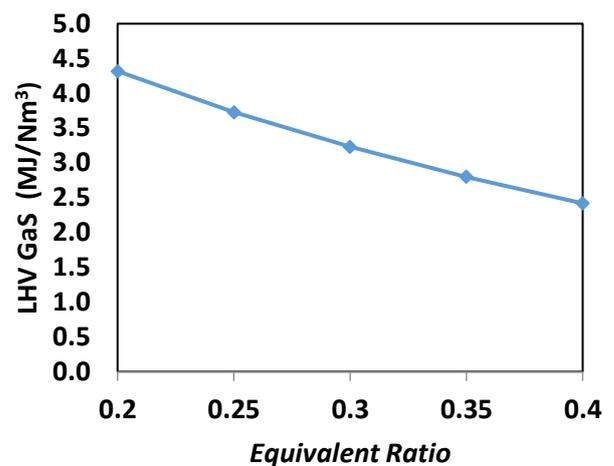


Gambar 1. Pengaruh *equivalent ratio* terhadap komposisi gas

3.2 Pengaruh *Equivalent Ratio* Terhadap Nilai Kalor Gas

Gambar 2 menyajikan peningkatan *equivalent ratio* dari 0,2 s/d 0,4 akan menurunkan nilai kalor gas mampu bakar. Hal ini dikarenakan terjadi pengurangan komposisi gas mampu bakar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Hasil simulasi menggambarkan nilai kalor gas yang dapat dihasilkan dari gasifikasi limbah daun berkisar antara 2,4 – 4,3 MJ/Nm³. Gas dengan nilai kalor tersebut dapat diaplikasikan untuk mengerakkan mesin pembakaran dalam ataupun mesin gas, akan tetapi belum dapat diaplikasi pada turbin gas. Aplikasi pada turbin gas mensyaratkan nilai kalor diatas 5 MJ/Nm³.



Gambar 2. Pengaruh *equivalent ratio* terhadap komposisi gas

3.3 Perbandingan Terhadap Hasil Penelitian Sebelumnya

Perbandingan hasil simulasi yang telah dilakukan terhadap beberapa simulasi sebelumnya dapat dilihat pada tabel 2. Perbandingan untuk masing-masing komposisi gas secara umum memperlihatkan hasil distribusi komposisi gas yang hampir sama, khususnya pada simulasi yang dilakukan oleh Puig, dkk [6] dan Karamarkovick, dkk [7]. Hal ini dikarenakan nilai *moisture* dan *equivalent ratio* yang di gunakan sama. Hasil simulasi Jarungmachote dkk [3] dan Zainal dkk [4] distribusi nilainya agak sedikit berbeda karena perbedaan pada kandungan *moisture* dan *equivalent ratio* yang digunakan. Secara keseluruhan hasil simulasi yang dilakukan memiliki distribusi yang sama dengan hasil sebelumnya.

Tabel 4. Perbandingan Terhadap Hasil Simulasi Sebelumnya

osisi Gas (% Vol)	Komp Karamar- kovick, [7]	Jarun gtha- mmachote, [3]	Z ainal, [4]	P uig,[6]	Model yang dilakukan
CO	27	18,52	19,61	26	22,62
H ₂	21	16,8	21,06	23	18,98
CO ₂	8	11,68	12,01	9	10,67
CH ₄	1	1,06	0,64	1	3,29
N ₂	42	51,94	46,68	42	44,45

3.4 Kesesuaian Tipe Gasifier untuk Proses Gasifikasi Limbah Daun.

Gasifikasi limbah daun memerlukan suatu perhatian khusus karena sipat daun yang sangat mudah terbakar serta memiliki *bulk density* yang sangat kecil. Sipat daun yang sangat mudah dan cepat habis terbakar akan mempengaruhi keberadaan zona-zona gasifikasi (pengerinan, pirolisa, pembakaran dan reduksi) dan mengurangi jumlah arang untuk reaksi gasifikasi sehingga dapat mengurangi jumlah gas mampu bakar yang dihasilkan. *Bulk density* yang rendah juga mempengaruhi gerakan bahan bakar didalam reaktor yang juga dapat menghambat proses pembentukan gas mampu bakar.

Downdraft gasifier yang memungkinkan untuk proses gasifikasi limbah daun adalah tipe tanpa daerah pengecilan atau leher (*throatless*) serta bagian atas reaktor terbuka (*open top*) sehingga dapat dikontrol zona gasifikasi terutama zona pengerinan yang keberadaanya harus terjaga.

4. Kesimpulan :

Dari Hasil simulasi yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan :

- Peningkatan *equivalent ratio* dari 0,2 – 0,4 akan menurunkan komposisi gas mampu bakar
- Peningkatan *equivalent ratio* dari 0,2 – 0,4 akan menurunkan LHV gas.
- Berdasarkan hasil simulasi gas yang dihasilkan dari gasifikasi limbah daun dengan nilai LHV antara 2,4 – 4,3 MJ/Nm³ dapat diaplikasikan untuk menggerakkan mesin pembakaran dalam atau mesin gas

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Saudara Bagus Wisma yang turut membantu dalam simulasi ini.

Referensi

- [1].Hassan, M.H., Mahlia, T.M.I., Nur, Hadi., ,”A Review on Energi Scenario and Sustainable Energi in Indonesia, Renewable and Sustainable Energy Review,16 (2012), 2316-2328.
- [2].Bridgwater,AV, ” *Thermal Processing of Biomass for Fuels and Chemical*” , Paper., 6th Asia- Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization.2002
- [3].Jarungthammachote. S, Dutta. A, “Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of downdraft gasifier waste gasifier”, *Energy*, 32:9 (2007), 1660-1669..
- [4]. Zainal. ZA., Ali.R., Lean.C.H., Seetharamu, Prediction of Performace of a Downdraft Gasifier using Equilibrium Modeling for Difference Biomass Material. *Energy Conversion Material*, 42 (2001), 1499-1551
- [5].Ataei. Abtin., Azimi. Alireza., Kalhori. Sahand.B., Abari. Maryam. F., Radnezhad. Hadi., Performance Analysis of a Co-gasifier for Organic Waste in Agriculture, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 1:6 (2012), 1-10
- [6].Puig-Arnavat. Maria, Bruno. J.C. and Coranas. A, “Modified Thermodynamic Equilibrium Model for Biomass Gasification: A Study of Influence of Operating Conditions”. *Energy & Fuels*, 26:2 (2012) 1385 – 1394
- [7].Karamarkovic. Rada., Karamarkovic. Vladan, Energy dan Exergy analysis of Biomass Gasification at Difference Temperatures, *Energy*, 35 (2010) 537 – 549.

- [8].Cengel. Y.A, Boles. M.A,“ Thermodynamic An Engineering Approach, McGraw-Hill, Inc (1994)
- [9].Seggiani, M.; Vitolo, S.; Puccini, M.; Bellini, A., Cogasification of Sewage Sludge in an Updraft gasifier. *Fuel*, 93(2011), 486-491
- [10].Ramanan. M. Ventaka., Lakshamanan. E, Sethumadhavan. R., Renganarayanan.S., Modeling and Experimental Validation of Cashew Nut Shell Char Gasification Adopting Chemical Equilibrium Approach.*Energy and Fuel*, 22 (2008) 2070-2078.