

# Pemanfaatan Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) Dalam Perancangan Kompor Biomassa

Muhammad Iwan Fermi

Lab. Pengendalian dan Perancangan Proses  
Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Univeristas Riau  
Kampus Binawidya Jl. HR Subrantas Km. 12,5 Pekanbaru 28293  
E-mail: miwanf@unri.ac.id

## Abstract

Biomass cook stoves using biomass (usually wood) as fuel in the combustion process. The heat generated from the combustion process can be used for culinary purposes. Stove is still widely used in society, but still made traditionally with a simple design that has low thermal efficiency resulting in high emissions of hazardous substances and require more fuel (wood). Computational Fluid Dynamics (CFD) method can be use to predict fluid flow patterns that occur in the stove and combustion chamber. CFD method can be used to get better geometry design of the combustion chamber, so the efficiency of the combustion reaction and heat transfer can be higher.

*Key words: Kompor biomassa, Computational Fluid Dynamics (CFD), Water Boiling Test (WBT).*

## 1. Pendahuluan

Pada tahun 2007, pemerintah memulai Program Konversi Minyak Tanah ke *Liquefied Petroleum Gas* (LPG). Program konversi ini bertujuan untuk mengefisienkan anggaran pemerintah karena subsidi untuk LPG relatif lebih kecil daripada subsidi minyak tanah, sekaligus mengurangi penyalahgunaan minyak tanah bersubsidi (Kementerian ESDM, 2012). Untuk daerah terpencil atau pedesaan, program konversi ini membuat minyak tanah menjadi semakin sulit di dapat dan harganya menjadi lebih mahal. Sementara, LPG masih menghadapi kendala pada sistem distribusi dan ketersediaan barang. Bagi masyarakat yang sudah terbiasa menggunakan minyak tanah dan akses untuk mendapatkan LPG masih sulit, kayu bakar merupakan pilihan untuk menggantikan minyak tanah (Vitali et al., 2013).

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berlimpah dan telah digunakan sejak lama. Sekitar 40% total konsumsi energi nasional yang digunakan oleh rumah tangga (terutama di pedesaan) berasal dari kayu bakar (*fuel wood*) (Abdullah, 2005). Di daerah pedesaan, biomassa ini (kayu bakar) dapat dengan mudah dijumpai dan murah (Larson and Kartha, 2000), dapat langsung digunakan pada proses pembakaran. Biomassa di alam tersedia dalam berbagai bentuk, seperti potongan batang kayu, ranting-ranting kayu, sisa ketaman kayu, limbah pertanian, batang dan pelepah sawit dan lain-

lain. Untuk keperluan sehari-hari seperti memasak, masyarakat menggunakan material biomassa (kayu bakar) sebagai bahan bakar. Kompor biomassa merupakan media yang biasa digunakan untuk melangsungkan reaksi pembakaran, kemudian panas yang dihasilkan dimanfaatkan untuk keperluan memasak.

Desain kompor biomassa yang digunakan oleh masyarakat, masih sangat sederhana sehingga efisiensi pembakaran masih rendah dan emisi bahan berbahaya yang dihasilkan juga tinggi. Untuk meningkatkan efisiensi pembakaran, ruang pembakaran pada kompor harus dibuat dengan memperhatikan pola aliran yang terbentuk ketika fluida (udara, gas pembakaran dan hasil pembakaran) melalui unggun kayu bakar. Selain itu, bentuk geometri ruang bakar juga sangat mempengaruhi pola aliran yang dihasilkan.

Reaksi pembakaran merupakan reaksi multi-fasa yang kompleks. Selain itu, bentuk geometri ruang-bakar kompor dan dimensi unggun bahan bakar (kayu bakar) yang terus berubah selama proses pembakaran, menjadikan proses ini kompleks dan sulit untuk melakukan pengukuran dan pengambilan data secara langsung.

Pada penelitian laboratorium, untuk setiap variasi geometri ruang bakar yang diteliti, model fisik ruang bakar tersebut harus dibuat terlebih dahulu. Kemudian dilakukan percobaan untuk pengukuran data temperatur, tekanan dan laju alir udara di dalam ruang bakar. Untuk mendapatkan

dimensi fisik geometri ruang bakar yang baik, metode eksperimen laboratorium memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit.

Metode CFD merupakan alat bantu yang sangat berguna dalam merancang geometri ruang bakar pada kompor biomassa. Metode CFD lebih efisien, cepat dan lebih hemat biaya dibandingkan eksperimen laboratorium. Sehingga pemodelan dengan metode CFD menjadi cara yang paling cocok untuk mendapatkan desain kompor yang optimal. Hasil yang lebih baik, sehingga pola aliran fluida yang dihasilkan akan dapat membantu berlangsungnya reaksi pembakaran dan proses perpindahan panas yang lebih efisien

## 2. Kompor Biomassa

Hingga saat ini, masih banyak rumah tangga, terutama di Indonesia, yang masih menggunakan kompor dengan bahan bakar kayu untuk keperluan memasak ataupun pemanasan. Kompor yang umum digunakan masih sederhana dan tidak jarang masih serupa dengan model *three-stone-fire* yang tidak dapat melangsungkan pembakaran dengan sempurna.

Secara garis besar, kompor berbahan bakar biomassa untuk keperluan memasak (*biomass cooking stove*) dapat dibagi menjadi kompor masak tradisional dan kompor masak yang telah diperbaiki desainnya (*improved cooking stoves*, ICS) (Bhattacharya and Abdul Salam, 2002). Dari segi desain, model kompor tradisional yang paling sederhana, mudah dibuat, mudah pengoperasiannya dan murah adalah *three-stone-fire* (Kshirsagar and Kalamkar, 2014). Kompor model *three-stone-fire* dibuat dari tiga buah batu yang disusun pada bidang datar membentuk segitiga. Kemudian diatas susunan batu tersebut diletakan peralatan memasak, sedangkan bahan bakar berupa kayu bakar diletakan di ruang di antara susunan batu tersebut. Proses pembakaran berlangsung pada ruang terbuka diantara susunan batu, tidak dilakukan pada tempat yang khusus, sehingga temperatur pembakaran dan jumlah udara yang diperlukan untuk proses pembakaran tidak dapat diatur atau dikendalikan.

Kompor model pembakaran terbuka atau model *three-stone-fire* memiliki beberapa kekurangan. Kompor model "*three-stone-fire*" beroperasi dengan rasio udara berlebih yang sangat besar, sehingga dapat menurunkan suhu pembakaran. Penurunan suhu ini dapat memicu pembakaran tidak sempurna dan menurunkan efisiensi termal. Jika digunakan di dalam rumah tanpa ventilasi udara yang baik, maka asap yang dihasilkan akan tertahan di dalam rumah. Asap ini dapat menyebabkan masalah kesehatan seperti penyakit saluran pernapasan, berat bayi lahir rendah, tuberkulosis (TBC), kanker paru-paru, penyakit jantung dan katarak (Fullerton et al., 2008) terutama pada anak-anak dan wanita (ibu rumah tangga) (Raman et al., 2013, Manoj et al., 2013). Selain itu, sebagian panas yang dihasilkan dari pembakaran lebih banyak yang terbuang ke lingkungan, dapat mencapai 30 – 90 % (Demirbaş, 2001), sehingga tidak semua panas yang dihasilkan digunakan untuk memasak, akibatnya efisiensi kompor menjadi rendah dan boros bahan bakar (Reed and Larson, 1996).

Desain kompor biomassa yang kurang baik merupakan salah satu penyebab emisi hasil pembakaran seperti gas CO yang dihasilkan cukup tinggi (Ndiema et al., 1998) selain oksida nitrogen, abu, arang dan jelaga. Pada proses pembakaran yang sempurna, akan dihasilkan gas karbon-dioksida (CO<sub>2</sub>) dan uap air. Proses pembakaran biomassa yang tidak sempurna, selain menghasilkan gas CO<sub>2</sub> dan uap air, juga dihasilkan zat-zat polutan seperti debu, gas SO<sub>2</sub> dan oksida-oksida Nitrogen (NO<sub>x</sub>), tetapi lebih sedikit menghasilkan Sulfur dibandingkan pembakaran bahan bakar fosil (seperti batubara) (Ndiema et al., 1998, Williams et al., 2012). Selain itu, pembakaran yang tidak sempurna juga akan menghasilkan gas karbon monoksida (CO), emisi polutan beracun, partikel-partikel dalam berbagai ukuran dan volatil dan senyawa organik semi-volatil (seperti formaldehid) (Clark MI et al., 2013, Bhattacharya and Abdul Salam, 2002, Maccarty et al., 2008).

Dengan desain yang lebih baik dari model *three-stone-fire*, kompor biomassa memiliki ruang pembakaran yang sudah dibuat khusus sehingga reaksi pembakaran tidak berlangsung di ruang terbuka. Kompor biomassa memiliki ruang pembakaran sehingga laju alir udara untuk pembakaran dapat diatur dan rugi panas yang hilang dapat dikurangi (Agenbroad et al., 2011a). Kompor biomassa desain sederhana masih memiliki efisiensi termal yang rendah (L'orange et al., 2012) sehingga jumlah panas yang dimanfaatkan juga rendah dan jumlah bahan bakar (kayu bakar) yang dibutuhkan menjadi lebih boros. Kompor biomassa tradisional memiliki efek signifikan dalam menghasilkan emisi gas rumah kaca (*Greenhouse gas*, GHG) yang dihasilkan dari pembakaran yang tidak sempurna, selain itu asap yang dihasilkan memiliki dampak yang negatif terhadap kesehatan (Bhattacharya and Abdul Salam, 2002).

## 3. Water Boiling Test

Untuk mengetahui kinerja suatu kompor, perlu dilakukan uji kinerja (*performance test*) kompor tersebut. Metode *Water Boiling Test* (WBT) merupakan salah satu metode yang banyak dan sering digunakan karena metode ini sudah dibakukan dan secara berkala diperbaharui (Maccarty et al., 2010, L'orange et al., 2012). Metode WBT merupakan metode uji laboratorium dengan kondisi lingkungan yang terkendali. Selain WBT, ada beberapa metode uji laboratorium untuk mengukur kinerja suatu kompor masak (*cooking stoves*) seperti *Controlled Cooking Test* (CCT), *Heterogeneous Testing Protocol* (HTP). Metode WBT terbaru berikut contoh lembar perhitungan (seperti efisiensi termal, *firepower*) dapat dilihat dan diperoleh dari laman:

<http://www.aprovecho.org/lab/pubs/testing>.

Untuk mengukur kinerja kompor pada saat operasional di lapangan, digunakan metode *Kitchen Performance Test* (KPT), *Stove use monitors* (SUMs), *Uncontrolled Cooking Test* (UCT) dan *Burning Cycle Test* (BCT) (Kshirsagar and Kalamkar, 2014).

Secara umum metode WBT dapat dibagi menjadi 3 tahap (Jetter and Kariher, 2009). Tahap pertama, pengujian

dilakukan dengan memanaskan air sebanyak 5 liter atau 2,5 liter hingga mendidih menggunakan panci ukuran standar tanpa ditutup. Pada tahap pertama, pengujian dimulai dari temperatur ruangan hingga air mendidih. Sedangkan pada tahap kedua, dilakukan dengan cara yang sama seperti tahap pertama tetapi dimulai pada saat kompor masih panas. Tahap ketiga merupakan kelanjutan dari tahap satu dan dua, setelah tahap satu atau dua selesai dilanjutkan dengan pendidihan (*simmering*) terhadap air yang tersisa pada suhu 3 °C dibawah titik didih selama 45 menit. Diantara ketiga tahapan, dilakukan pengukuran berat kayu mula-mula, berat air, suhu dan berat arang dan berat kayu bakar sisa (Maccarty et al., 2010).

#### 4. Natural dan Forced Draft

Pada proses pembakaran diperlukan udara dalam jumlah tertentu (stoikiometri) sesuai dengan persamaan reaksi pembakaran. Dalam reaksi pembakaran dibutuhkan Oksigen (O<sub>2</sub>) dalam jumlah tertentu. umumnya O<sub>2</sub> yang diperlukan didapat dari udara bebas yang terdiri dari 21% O<sub>2</sub> dan 79% N<sub>2</sub>, sehingga udara yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan O<sub>2</sub> pada reaksi pembakaran menjadi lebih besar atau yang disebut dengan udara-berlebih (*excess air*). Jumlah udara-berlebih yang biasa digunakan adalah 2 – 3 kali jumlah udara teoritik. Jumlah udara-berlebih yang digunakan sangat menentukan efisiensi termal kompor (Menghini et al., 2008).

Pasokan udara ke ruang pembakaran dapat dilakukan dengan aliran-alami (*natural draft*) atau aliran-paksa (*forced draft*). *Natural-draft* atau aliran (udara) alami, udara mengalir hanya berdasarkan perbedaan densitas (kerapatan) udara. Tempat dengan temperatur rendah akan memiliki densitas udara yang lebih besar dibandingkan dengan tempat dengan temperatur tinggi, sehingga udara akan bergerak atau mengalir secara alami dari tempat bertemperatur rendah ke tempat bertemperatur tinggi. Pada aliran-paksa (*forced draft*), udara dialirkan ke ruang pembakaran dengan bantuan kipas sehingga udara yang dialirkan dapat lebih banyak daripada aliran-alami.

Umumnya kompor biomassa tradisional beroperasi menggunakan aliran udara jenis aliran konveksi alami (*natural convection*) (Agenbrood et al., 2011a, Ravi et al., 2002). Sehingga untuk memenuhi kebutuhan udara berlebih, maka udara luar dialirkan menuju ruang pembakaran dengan bantuan kipas pendorong. Kompor biomassa dengan aliran udara paksa (*forced draft*) bekerja menggunakan prinsip gasifikasi sehingga memiliki keunggulan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan kompor dengan aliran-alami (Raman et al., 2013).

Proses gasifikasi merupakan rute yang banyak digunakan untuk mengubah biomassa menjadi energi. Kompor biomassa limbah pertanian yang beroperasi menggunakan prinsip gasifikasi, memiliki efisiensi 40 – 60% lebih tinggi dan emisi CO yang dihasilkan lebih rendah 50 – 70% dibandingkan kompor yang beroperasi dengan pasokan udara secara aliran alami (Varunkumar et al., 2012). Suhu nyala api yang dihasilkan oleh kompor gasifikasi dapat mencapai 1000 – 1100 °C, suhu yang tinggi ini menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih

tinggi sehingga dapat bekerja lebih efisien daripada kompor tradisional (Raman et al., 2013). Desain kompor yang baik akan memiliki kinerja dengan efisiensi termal tinggi dan luaran emisi berbahaya (seperti gas CO dan *Particulate Matter* (PM)) yang rendah.

#### 5. Pemanfaatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dalam perancangan Kompor

CFD merupakan metode komputasi yang digunakan untuk mempelajari dinamika fluida. Sifat properti material, kondisi operasi, reaksi yang terjadi serta bentuk geometri ruang tempat fluida mengalir akan sangat mempengaruhi dinamika fluida pada saat fluida tersebut berpindah. Metode CFD dapat memberikan informasi dinamika fluida seperti kecepatan fluida, arah alir fluida, tekanan, temperatur serta konsentrasi secara simultan. Hasil perhitungan dapat ditampilkan dalam bentuk degradasi warna, plot kontur atau vektor kecepatan.

Pada kompor biomassa, metode CFD memungkinkan peneliti memahami fenomena yang terjadi selama fluida mengalir dalam ruang pembakaran. Umumnya rancangan kompor biomassa, didapat dari hasil percobaan atau penelitian di laboratorium yang dilakukan secara trial-and-error menggunakan perhitungan perpindahan panas dan termodinamika sederhana. Cara ini memerlukan jumlah percobaan yang banyak karena geometri kompor dapat sangat bervariasi, sehingga memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Geometri kompor terutama ruang pembakaran dan pengaturan aliran udara di dalam ruang pembakaran sangat mempengaruhi kinerja kompor secara keseluruhan. Sementara pola aliran fluida di dalam kompor dan pengaruh aliran fluida dan geometri terhadap peristiwa perpindahan panas belum banyak mendapat perhatian (Ravi et al., 2002).

Reaksi pembakaran biomassa merupakan reaksi yang kompleks dan rumit, meliputi reaksi simultan pada fasa padat, cair dan gas (L'orange et al., 2012). Selain itu, geometri partikel biomassa yang tidak seragam, membuat peneliti harus membuat penyederhanaan pada geometri model bahan bakar (Haseli et al., 2013) dalam simulasi. Haseli (Haseli et al., 2011) mengembangkan model matematis 1-Dimensi (1D) untuk partikel tunggal biomassa dengan menganggap geometri biomassa berupa bola (*spheric*) yang meliputi fase pemanasan awal (*heating up*), *pyrolysis*, gasifikasi dan oksidasi arang serta reaksi pada fasa gas. Porteiro (Porteiro et al., 2006) mengembangkan model matematis dengan menanggapi partikel biomassa berbentuk silinder.

Mehrabian (Mehrabian et al., 2012) menggunakan metode CFD dengan geometri partikel biomassa berbentuk silinder dan bola untuk simulasi pembakaran. Dalam skala industri, Chaney (Chaney et al., 2012) memanfaatkan metode CFD dengan menggunakan program komersial CFD berupa Fluent untuk memberikan perkiraan lokasi yang optimal untuk penempatan saluran suplai bagi *secondary air* pada rancangan *boiler* biomassa. *Sugar Research Insitute* (SRI), Australia, telah menggunakan

metode CFD untuk penelitian dan pengembangan *boiler* berbahan bakar *bagasse* (Dixon et al., 2005).

Gomez (Gómez et al., 2014), menggunakan metode CFD untuk mengamati pengaruh fluks massa udara pada profil temperatur sepanjang unggun. Sementara Miltner (Miltner et al., 2007) menggunakan metode CFD untuk mengembangkan model 3-Dimensi (3D) untuk melakukan simulasi pembakaran pada unggun tetap.

Collazo (Collazo et al., 2012) mempelajari pengaruh rasio udara-bahan bakar berlebih dengan asumsi unggun tercampur sempurna (*perfectly mixed*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaturan distribusi pemasukan udara menjadi faktor kunci yang mempengaruhi tingkat emisi yang dihasilkan.

Agenbroad (Agenbroad et al., 2011a) mengembangkan model matematis sederhana dari *natural convection driven biomass cooking stoves*. Model ini digunakan untuk memperkirakan laju alir curah, suhu dan rasio udara berlebih berdasarkan geometri kompor dan masukan kondisi operasi berupa *firepower* kompor biomassa. Rasio udara berlebih dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah emisi CO dan *firepower* yang dihasilkan kompor biomassa. Agenbroad (Agenbroad et al., 2011b) menyempurnakan model yang dibuat oleh Agenbroad (Agenbroad et al., 2011a) dengan mengembangkan model tak berdimensi serta melakukan validasi dan penambahan media memasak (*cooking pot*).

Kausley (Kausley and Pandit, 2010) mengembangkan model satu dimensi (1-D) untuk kondisi tunak (*steady state*) dan tidak-tunak (*unsteady state*) yang mencakup proses kimia dan fisik yang terjadi selama proses pembakaran bahan bakar padat di dalam kompor. Studi yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh geometri kompor dan properti bahan bakar terhadap suhu maksimum efektif nyala api dan jumlah udara berlebih yang diperlukan.

Shiehnejadhesar (Shiehnejadhesar et al., 2013) menggunakan perangkat lunak Ansys® Fluent® untuk melakukan optimisasi-CFD pada kasus tungku (*furnace*) biomassa. Optimisasi dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi emisi gas CO dan mengurangi kebutuhan energi untuk kipas udara sekunder dengan mengatur diameter dan sudut nozel untuk udara sekunder.

## 6. Kesimpulan

Penggunaan metode CFD sangat membantu peneliti untuk memahami fenomena perpindahan panas serta dinamika fluida dalam ruang bakar dari kompor. Perbaikan pada desain kompor menghasilkan perubahan pada pola aliran udara dan gas didalam kompor dan ruang pembakaran sehingga meningkatkan utilisasi panas hingga 75% dan menghemat waktu pendidihan air hingga 50% dibandingkan kompor tradisional (Aker Lucky and Hossain, 2001).

Metode CFD dapat memperkirakan pola aliran yang terjadi pada setiap titik pada dimensi fisik ruang bakar kompor. Parameter geometri yang dihasilkan dari metode CFD kemudian dapat dioptimasi sehingga didapat ukuran geometri kompor yang optimal. Validasi model yang

digunakan pada metode CFD dapat dilakukan dengan data hasil eksperimen.

Dibandingkan metode percobaan, metode CFD dapat mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan untuk mempelajari interaksi dan pengaruh parameter desain kompor terhadap pola aliran fluida dan kinerja kompor sehingga dapat lebih menghemat biaya dan waktu.

## Daftar Pustaka

- Agenbroad, J., Defoort, M., Kirkpatrick, A. and Kreutzer, C. 2011a. A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves—Part 1: Setup and baseline validation. *Energy for Sustainable Development*, 15, 160-168.
- Agenbroad, J., Defoort, M., Kirkpatrick, A. and Kreutzer, C. 2011b. A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves—Part 2: With cook piece operation and the dimensionless form. *Energy for Sustainable Development*, 15, 169-175.
- Aker Lucky, R. and Hossain, I. 2001. Efficiency study of Bangladeshi cookstoves with an emphasis on gas cookstoves. *Energy*, 26, 221-237.
- Bhattacharya, S. C. and Abdul Salam, P. 2002. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 22, 305-317.
- Chaney, J., Liu, H. and Li, J. 2012. An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach. *Energy Conversion and Management*, 63, 149-156.
- Clark MI, Peel JI, Balakrishnan K, Breyse Pn, Chillrud Sn, Naeher Lp, Rodes Ce, Vette Af and Jm, B. 2013. Health and household air pollution from solid fuel use: the need for improved exposure assessment. *Environ Health Perspect* 121, 1120-1128.
- Collazo, J., Porteiro, J., Míguez, J. L., Granada, E. and Gómez, M. A. 2012. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler. *Energy Conversion and Management*, 64, 87-96.
- Demirbaş, A. 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42, 1357-1378.
- Dixon, T. F., Mann, A. P., Plaza, F. and Gilfillan, W. N. 2005. Development of advanced technology for biomass combustion—CFD as an essential tool. *Fuel*, 84, 1303-1311.
- Fullerton, D. G., Bruce, N. and Gordon, S. B. 2008. Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transac-*

- tions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene, 102, 843-851.
- Gómez, M. A., Porteiro, J., Patiño, D. and Míguez, J. L. 2014. CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion. *Fuel*, 117, Part A, 716-732.
- Haseli, Y., Van Oijen, J. A. and De Goey, L. P. H. 2011. A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle. *Bioresource Technology*, 102, 9772-9782.
- Haseli, Y., Van Oijen, J. A. and De Goey, L. P. H. 2013. Reduced model for combustion of a small biomass particle at high operating temperatures. *Bioresource Technology*, 131, 397-404.
- Jetter, J. J. and Kariher, P. 2009. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass and Bioenergy*, 33, 294-305.
- Kausley, S. B. and Pandit, A. B. 2010. Modelling of solid fuel stoves. *Fuel*, 89, 782-791.
- Kshirsagar, M. P. and Kalamkar, V. R. 2014. A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 580-603.
- L'orange, C., Defoort, M. and Willson, B. 2012. Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. *Energy for Sustainable Development*, 16, 3-12.
- Maccarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T. and Roden, C. 2008. A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for Sustainable Development*, 12, 56-65.
- Maccarty, N., Still, D. and Ogle, D. 2010. Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, 14, 161-171.
- Manoj, K., Sachin, K. and Tyagi, S. K. 2013. Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 265-285.
- Mehrabian, R., Zahirovic, S., Scharler, R., Obernberger, I., Kleditzsch, S., Wirtz, S., Scherer, V., Lu, H. and Baxter, L. L. 2012. A CFD model for thermal conversion of thermally thick biomass particles. *Fuel Processing Technology*, 95, 96-108.
- Menghini, D., Marra, F. S., Allouis, C. and Beretta, F. 2008. Effect of excess air on the optimization of heating appliances for biomass combustion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1371-1380.
- Miltner, M., Miltner, A., Harasek, M. and Friedl, A. 2007. Process simulation and CFD calculations for the development of an innovative baled biomass-fired combustion chamber. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1138-1143.
- Ndiema, C. K. W., Mpendazoe, F. M. and Williams, A. 1998. Emission of pollutants from a biomass stove. *Energy Conversion and Management*, 39, 1357-1367.
- Porteiro, J., Míguez, J. L., Granada, E. and Moran, J. C. 2006. Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle. *Fuel Processing Technology*, 87, 169-175.
- Raman, P., Murali, J., Sakthivadivel, D. and Vigneswaran, V. S. 2013. Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell. *Biomass and Bioenergy*, 49, 333-340.
- Ravi, M. R., Kohli, S. and Ray, A. 2002. Use of CFD simulation as a design tool for biomass stoves. *Energy for Sustainable Development*, 6, 20-27.
- Reed, T. B. and Larson, R. 1996. A wood-gas stove for developing countries. *Energy for Sustainable Development*, 3, 34-37.
- Shiehnejadhesar, A., Schulze, K., Scharler, R. and Obernberger, I. 2013. A new innovative CFD-based optimisation method for biomass combustion plants. *Biomass and Bioenergy*, 53, 48-53.
- Varunkumar, S., Rajan, N. K. S. and Mukunda, H. S. 2012. Experimental and computational studies on a gasifier based stove. *Energy Conversion and Management*, 53, 135-141.
- Williams, A., Jones, J. M., Ma, L. and Pourkashanian, M. 2012. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 113-137.