DEVELOPMENT OF BIOMASS PELLET BASED CLEAN COOKSTOVE FOR COOKING/HEATING APPLICATIONS

HIMANSHU

DEPARTMENT OF ENERGY SCIENCE AND ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY 2023

Development of Biomass Pellet Based Clean Cookstove for Cooking/Heating Applications

by

HIMANSHU

Department of Energy Science and Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

July 2023

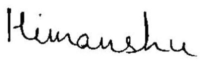
DEDICATED

TO

MY BELOVED PARENTS

DECLARATION

I hereby declare that the work presented here in the thesis entitled “Development of Biomass Pellet Based Clean Cookstove for Cooking/Heating Applications” has been carried out by me towards the partial fulfilment of the requirement for the award of the degree of Doctor of Philosophy at the Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi. The content of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma by me.



Himanshu

Entry No.: 2017ESZ8215

Email: esz178215@iitd.ac.in

Place: New Delhi

Date: 20th July, 2023

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Development of Biomass Pellet Based Clean Cookstove for Cooking/Heating Applications"** being submitted by **Mr. Himanshu** in fulfilment of the requirements for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work performed by him under our joint guidance and supervision at **Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi**.

Further, the results obtained herein have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree to the best of our knowledge.

Prof. S. K. Tyagi
Associate Professor
Department of Energy Science and Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

Prof. Sanjeev Jain
Former Professor
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

ACKNOWLEDGEMENTS

It gives me immense pleasure to express my gratitude to all those who supported me during the course of my study. First and foremost, I would like to express my deep gratitude to my research supervisors, Prof. Sanjeev Jain and Prof. S. K. Tyagi, for providing me thorough guidance, encouragement, and invaluable suggestions throughout my research work in spite of their busy academic and professional schedules.

I would like to extend my sincere thanks to the Student Research Committee (SRC) chairman (Prof. K. A. Subramanian) and all other members of my SRC (Prof. Anil Verma and Prof. K. Ravi Kumar) for providing their valuable suggestions during the various evaluation stages of my research work. I am thankful to Prof. S. C. Kaushik for his continuous motivation and support throughout this journey. I am also extremely grateful to Prof. K. K. Agarwal, Department of Mechanical Engineering for providing his guidance and support throughout this work.

Special thanks are due to Dr. L. D. Kala, Dr. Kunwar Pal, Dr. Ravita Lamba, Dr. Saket Verma, Mr. Abhishek Verma, Mr. Sandeep Singh, Mr. Prathvi Raj Chauhan, Mr. Raveesh G. Mr. Alok Kumar, Mr. Sivaprakash P., Ms. Riya Sharma, Mr. Sanjaya Sena for extending all kind of support during the period of my study at Solar Thermal Science Laboratory at Department of Energy Science and Engineering, IIT Delhi.

I wish to express my gratitude to my parents, wife and family members for providing their support and blessings that has helped me a lot in completing my research work.

Himanshu

(Himanshu)

ABSTRACT

More than 2.6 billion people across the globe do not have access to clean cooking facilities and still rely on traditional open fired cookstoves to fulfil their cooking energy needs. These traditional cookstoves are responsible for emissions of harmful pollutants into the environment deteriorating the human health and environment. Gasifier based cookstoves are an attractive option in comparison to traditional cookstoves as they offer higher efficiency, less smoke, uniform flame, flexibility to vary power output, and do not require continuous attention of the user during the operation. This study presents the development and optimization of biomass pellet based clean cookstove for cooking/heating applications. The experimental testing facilities have been established to investigate the thermal performance and emission characteristics of any cookstove. The comparative performance evaluation of five different cookstove models, including three forced draft cookstoves named as FD 1.1, FD 1.2, and FD 1.3, developed in the laboratory; a traditional cookstove; and LPG stove have been carried out under the same laboratory conditions. Further, the annual fuel savings and emission reduction potentials of these gasifier models have been estimated with respect to the baseline (traditional) stove.

An extensive literature survey highlights a huge variation in performance parameters among different cookstove models. Therefore, concept of star rating has been proposed in this study to accommodate all the performance parameters of a cookstove model into a single parameter based on the importance of each viz. $PM_{2.5}$, CO and thermal efficiency. The performance of the developed forced draft cookstove models viz. FD 1.1, FD 1.2, and FD 1.3 have been compared with the traditional, LPG and other MNRE approved cookstove models tested under similar operating conditions using star rating. It is found that FD 1.3 cookstove model is 3 star, while FD 1.1 and FD 1.2 cookstove models are in the category of 4 star, while

all other MNRE approved cookstoves ranged between 1 star and 3 star. Further, FD 1.2 cookstove model is found to be superior as compared to those of FD 1.1 and FD 1.3 models on the basis of the proposed star rating.

A two-dimensional axisymmetric computational fluid dynamics (CFD) model of the developed cookstove FD 1.2 has been created in ANSYS Fluent to analyze the fluid flow, temperature distribution, and the heat loss from different parts of the cookstove. The primary governing equations of continuity, momentum, and energy, and different models used to simulate phenomenon such as combustion, turbulence, and heat transfer have been presented. Grid independent test has been carried out by varying the mesh size to ensure the accuracy of computational results. Furthermore, the computational results have been validated with the experimental results acquired from the testing of the developed model FD 1.2. The simulation results indicated that the heat loss from the combustion chamber to the outer wall is predominant via conduction through the top plate of the cookstove and radiation from the outer wall of the combustion chamber as compared to the convection through preheated secondary air in the annulus chamber.

Thermal imaging test of FD 1.2 cookstove has also been carried out, and the outer surface temperature of the cookstove is found to be significantly higher than the permissible limit of 60 ˚C as prescribed by Bureau of Indian Standards. The thickness of insulation required to minimize the heat losses from the developed model has also been optimized and the influence of primary and secondary airflow rates on the performance of the final prototype has been investigated. Further, the effect of varying secondary airflow rates on the thermal efficiency and emissions of CO, NO and $PM_{2.5}$ at three different primary airflow rates has been analyzed. The performance of the final prototype has also been compared with the initially developed model, a traditional cookstove and an LPG stove. The emission factor of $PM_{2.5}$ and CO emissions from the developed final prototype is found to be four times and ten times lower as compared to the gold standard LPG stove, respectively.

The experimental results indicated that the pattern of secondary air introduction into the cookstove significantly affects the thermal efficiency and emission characteristics of gasifier models using processed biomass fuel. It has been observed that the uniform distribution of secondary air into the combustion chamber results in better mixing of air with the volatiles, leading to better emission characteristics. The thermal efficiency is found to be decreasing gradually with an increase in secondary airflow rate at each primary airflow rate. The emissions of CO and $PM_{2.5}$ first decrease and, thereafter, increase with an increment in secondary airflow rate for each primary airflow rate. However, the emissions of NO first increase, attain maximum value and, thereafter, decline with increase in secondary airflow rate. The emissions of CO and $PM_{2.5}$ are higher at both low and high values of secondary airflow rates. Therefore, an optimum secondary airflow rate exists, corresponding to the least emissions at each value of the primary airflow rate. The primary to secondary air ratio of 2:3 resulted in the lowest emissions of CO at different primary airflow rates.

सार

दुनिया भर में 2.6 अरब से अधिक लोगों के पास स्वच्छ खाना पकाने की सुविधाएं नहीं हैं और वे अभी भी अपनी खाना पकाने की ऊर्जा जरूरतों को पूरा करने के लिए पारंपरिक चूल्हों पर निर्भर हैं। ये पारंपरिक चूल्हे पर्यावरण में हानिकारक प्रदूषकों के उत्सर्जन के लिए जिम्मेदार हैं जो मानव स्वास्थ्य और पर्यावरण को खराब कर रहे हैं। गैसीफायर आधारित चूल्हे पारंपरिक चूल्हों की तुलना में एक आकर्षक विकल्प हैं, क्योंकि वे उच्च दक्षता, कम धुआं, समान लौ, अलग-अलग शक्ति उत्पादन के लिए लचीलापन प्रदान करते हैं, और इनके संचालन के दौरान उपयोगकर्ता के निरंतर ध्यान की आवश्यकता नहीं होती है। यह अध्ययन खाना पकाने/तापक अनुप्रयोगों के लिए बायोमास पेलेट आधारित स्वच्छ चूल्हे के विकास और अनुकूलन को प्रस्तुत करता है। किसी भी चूल्हे के ऊष्मीय प्रदर्शन और उत्सर्जन विशेषताओं की जांच के लिए प्रायोगिक परीक्षण सुविधाएं स्थापित की गई हैं। प्रयोगशाला में विकसित एफडी 1.1, एफडी 1.2 और एफडी 1.3 नाम के तीन प्रणोदित झोंक चूल्हे, एक पारंपरिक चूल्हे, और एलपीजी चूल्हे सहित पांच अलग-अलग चूल्हों का तुलनात्मक प्रदर्शन मूल्यांकन समान प्रयोगशाला स्थितियों के तहत किया गया है। इसके अतिरिक्त, आधारभूत (पारंपरिक) चूल्हे के संबंध में इन गैसीफायर मॉडल की वार्षिक ईंधन बचत और उत्सर्जन में कमी की क्षमता का अनुमान लगाया गया है।

एक व्यापक साहित्य सर्वेक्षण विभिन्न चूल्हों के बीच प्रदर्शन मापदंडों में भारी भिन्नता पर प्रकाश डालता है। इसलिए, प्रत्येक के महत्व के आधार पर चूल्हों के सभी प्रदर्शन मापदंडों जैसे कार्बन मोनोआक्साइड, पीएम$_{2.5}$ (परटीकुलेट मैटर) और ऊष्मीय दक्षता को एक ही मापदंड में समायोजित करने के लिए इस अध्ययन में स्टार रेटिंग की अवधारणा प्रस्तावित की गई है। । विकसित प्रणोदित झोंक चूल्हों एफडी 1.1, एफडी 1.2, और एफडी 1.3 के प्रदर्शन की तुलना स्टार रेटिंग का उपयोग करके समान परिचालन स्थितियों के तहत परीक्षण किए गए पारंपरिक, एलपीजी और अन्य एमएनआरई अनुमोदित चूल्हों के साथ की गई है। यह पाया गया है कि एफडी 1.3 चूल्हा 3 स्टार है, जबकि एफडी 1.1 और एफडी 1.2 चूल्हे 4 स्टार की

श्रेणी में हैं, जबकि अन्य सभी एमएनआरई अनुमोदित चूल्हे 1 स्टार और 3 स्टार के बीच हैं। इसके अतिरिक्त प्रस्तावित स्टार रेटिंग के आधार पर एफडी 1.2 चूल्हा एफडी 1.1 और एफडी 1.3 चूल्हों की तुलना में बेहतर पाया गया है।

चूल्हे के विभिन्न हिस्सों से द्रव प्रवाह, तापमान वितरण और गर्मी के नुकसान का विश्लेषण करने के लिए एनसिस फ्लुएंट में विकसित एफडी 1.2 चूल्हे का एक द्वि-आयामी अक्षीय कम्प्यूटेशनल तरल गतिशीलता (सीएफडी) मॉडल बनाया गया है। निरंतरता, संवेग और ऊर्जा के प्राथमिक नियामक समीकरण और दहन, विक्षोम और ऊष्मा हस्तांतरण जैसी घटनाओं का अनुकरण करने के लिए उपयोग किए जाने वाले विभिन्न मॉडल प्रस्तुत किए गए हैं। कम्प्यूटेशनल परिणामों की सटीकता सुनिश्चित करने के लिए जाल के आकार को अलग करके ग्रिड स्वतंत्र परीक्षण किया गया है। इसके अलावा, कम्प्यूटेशनल परिणामों को विकसित एफडी 1.2 चूल्हे के परीक्षण से प्राप्त प्रयोगात्मक परिणामों के साथ मान्य किया गया है। अनुकरण परिणामों से संकेत मिलता है कि दहन कक्ष से बाहरी दीवार तक का ऊष्म हस्तांतरण, वलय कक्ष में पहले से गरम द्वितीयक हवा के माध्यम से संवहन की तुलना में, चूल्हे की शीर्ष प्लेट और दहन कक्ष की बाहरी दीवार से विकिरण के माध्यम से प्रमुख है।

एफडी 1.2 चूल्हे का ऊष्मीय इमेजिंग परीक्षण भी किया गया है, और चूल्हे की बाहरी सतह का तापमान भारतीय मानक ब्यूरो द्वारा निर्धारित 60 डिग्री सेल्सियस की अनुमेय सीमा से काफी अधिक पाया गया है। विकसित चूल्हे से ताप हानि को कम करने के लिए आवश्यक इन्सुलेशन की मोटाई को भी अनुकूलित किया गया है और अंतिम प्रोटोटाइप के प्रदर्शन पर प्राथमिक और द्वितीयक वायु प्रवाह दरों के प्रभाव की जांच की गई है। इसके अलावा, तीन अलग-अलग प्राथमिक वायु प्रवाह दरों पर कार्बन मोनोआक्साइड, नाइट्रिक ऑक्साइड और पीएम$_{2.5}$ की ऊष्मीय दक्षता और उत्सर्जन पर अलग-अलग माध्यमिक वायु प्रवाह दरों के प्रभाव का विश्लेषण किया गया है। अंतिम प्रोटोटाइप के प्रदर्शन की तुलना प्रारंभिक रूप से विकसित मॉडल, एक पारंपरिक कुकस्टोव और एक एलपीजी स्टोव से भी की गई है। विकसित अंतिम

प्रोटोटाइप से पीएम$_{2.5}$ और कार्बन मोनोआक्साइड का उत्सर्जन कारक स्वर्ण मानक एलपीजी चूल्हे की तुलना में क्रमशः चार गुना और दस गुना कम पाया गया है।

प्रायोगिक परिणामों से संकेत मिलता है कि चूल्हे में द्वितीयक वायु परिचय का स्वरूप संसाधित बायोमास ईंधन का उपयोग करने वाले गैसीफायर मॉडल की ऊष्मीय दक्षता और उत्सर्जन विशेषताओं को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करता है। यह देखा गया है कि दहन कक्ष में द्वितीयक वायु के समान वितरण के परिणामस्वरूप वाष्पशील पदार्थों के साथ वायु का बेहतर मिश्रण होता है, जिससे बेहतर उत्सर्जन विशेषताएँ प्राप्त होती हैं। प्रत्येक प्राथमिक वायुप्रवाह दर पर द्वितीयक वायुप्रवाह दर में वृद्धि के साथ द्वितीयक दक्षता धीरे-धीरे कम होती पाई गई है। प्रत्येक प्राथमिक वायु प्रवाह दर पर द्वितीयक वायु प्रवाह दर में वृद्धि के साथ कार्बन मोनोआक्साइड और पीएम$_{2.5}$ का उत्सर्जन पहले कम होता है और उसके बाद बढ़ता है। हालाँकि, नाइट्रिक ऑक्साइड का उत्सर्जन पहले बढ़ता है, अधिकतम मूल्य प्राप्त करता है और उसके बाद, द्वितीयक वायुप्रवाह दर में वृद्धि के साथ गिरावट आती है। कार्बन मोनोआक्साइड और पीएम$_{2.5}$ का उत्सर्जन द्वितीयक वायुप्रवाह दर के निम्न और उच्च दोनों मूल्यों पर अधिक है। इसलिए, प्राथमिक वायु प्रवाह दर के प्रत्येक मूल्य पर न्यूनतम उत्सर्जन के अनुरूप एक इष्टतम माध्यमिक वायु प्रवाह दर मौजूद है। 2:3 के प्राथमिक से द्वितीयक वायु अनुपात के परिणामस्वरूप विभिन्न प्राथमिक वायुप्रवाह दरों पर कार्बन मोनोआक्साइड का सबसे कम उत्सर्जन पाया गया है।

CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

NOMENCLATURE

A	Mass of filter paper before deposition (mg)
a_s	Characteristic strain rate
B	Mass of filter paper after deposition (mg)
c	Reaction progress variable
C	Total volume of gases passed through sampler in an hour (L)
c_1	Net heating value of fuel (kJ/kg)
c_2	Net heating value of oil (kJ/kg)
CO	Carbon monoxide
CO_2	Carbon dioxide
C_p	Average specific heat of mixture at constant pressure (kJ/kg-K)
C_I	Species specific heat for i^{th} iteration
C_v	Specific heat of vessel (J/kg-K)
C_w	Specific heat of water (J/kg-K)
D	Diameter of stove (m)
EF_i	Emission factor of species i (g/kg)
$erfc^{-1}$	Inverse complementary error function
f	Mixture fraction space
H	Height of stove (m)
H_d	Total heat delivered to the cooking vessel (MJ_D)
h_i	Specific enthalpy for i^{th} species (kJ/kg)
h_o	Convective heat transfer coefficient (W/m^2-K)
K	Laminar thermal conductivity of mixture (W/m-K)
K_i	Thermal conductivity of insulation layer (W/m-K)
K_o	Thermal conductivity of mild steel (W/m-K)
M_f	Mass of fuel burnt (kg)
M_i	Mass of emitted species i (g)
m_v	Mass of vessel (kg)
m_w	Mass of water in the vessel (kg)

n	Total number of vessels utilized in the experiment
NO	Nitrogen oxide
Nu_L	Average Nusselt number for characteristic length L
O_2	Oxygen
G	Concentration of CO in the diluted exhaust gas (ppm)
P	Joint probability density function (PDF) of reaction progress
Pr	Prandtl number
Q	Volume of exhaust gases passing through duct in an hour (L/h)
Q_n	Power output (kW)
r	Radius of cookstove up to insulation layer (m)
Ra_L	Rayleigh number for characteristic length L
r_i	Radius of the cookstove without insulation (m)
r_o	Radius of the outermost layer of the cookstove with insulation (m)
Sc_t	Turbulent Schmidt number
$\overline{S_{Yc}}$	Mean source term
SFR	Finite rate flamelet source term
S_i	Species reaction rate for i^{th} species
T	Absolute temperature of the sampled gas fed to the analyzer (K)
T	Temperature (K)
t	Time required for operation of cookstove (h)
T_1	Initial temperature of the water (K)
T_2	Final temperature of water before changing the vessel (K)
T_3	Final temperature of the water in the last pot (K)
T_a	Ambient temperature (K)
T_f	Temperature of the fuel being burnt in the combustion chamber (K)
T_{fv}	Final temperature of vessel (K)
T_{fw}	Final temperature of water (K)
T_{iv}	Initial temperature of vessel (K)
T_{iw}	Initial temperature of water (K)
T_o	Temperature of surroundings (K)

T_s Average temperature of the outer wall without insulation (K)

$u_1, u_2, u_3, \ldots, u_n$ Uncertainties in $z_1, z_2, z_3, \ldots, z_n$

V Volume of exhaust gases (L)

U_o Initial mass of sample (g)

U_f Final mass of sample (g)

W Mass of the empty vessel along with the lid (kg)

w Mass of water filled in the vessel (kg)

W_1 Mass of fuel and cookstove measured before burning (kg)

W_2 Mass of fuel and cookstove measured after half an hour of burning (kg)

x Volume of oil used (ml)

X Burning rate of the cookstove (kg/h)

X_d Weight of sample after drying

X_o Weight of wet sample

Y Function

Y_i Mass fraction for i^{th} species

Z Amount of $PM_{2.5}$ per litre of sample passed through sampler (mg/L)

$z_1, z_2, z_3, \ldots, z_n$ Independent variables

Greek symbols

η Thermal efficiency of cookstove

Ψ Exergy efficiency of cookstove

ρ_f Density of fuel (kg/m^3)

ρ_a Density of air (kg/m^3)

ρ_o Density of oil (g/cm^3)

ε Equivalence ratio

ρ_∞ Density of oxidizer stream (kg/m^3)

μ_t Turbulent viscosity of mixture (Pa-s)

Abbreviations

AR Agricultural residue

ARC	Aprovecho Research Centre
BCT	Burning cycle test
BIS	Bureau of Indian Standards
CCT	Controlled cooking test
CDT	Cookstove durability test
CFD	Computational fluid dynamics
DTA	Differential thermal analysis
EC	Elemental carbon
FCR	Fuel consumption rate (kg/h)
FGM	Flamelet generated manifold
GACC	Global Alliance for Clean Cookstoves
GHGs	Greenhouse gases
HAP	Household air pollution
HTP	Heterogeneous testing protocol
KPT	Kitchen performance test
LMICs	Low- and middle-income countries
LPG	Liquified petroleum gas
MC	Moisture content
MNRE	Ministry of New and Renewable Energy
NBIC	National biomass cookstove initiative
NPIC	National program on improved chulah
OC	Organic carbon
PAHs	Polycyclic aromatic hydrocarbons
PM	Particulate matter
SA	Stochiometric air requirement
SGR	Specific gasification rate
SUMs	Stove use monitors
TBU	Technical Backup Unit
TCS	Traditional cookstove
TEG	Thermoelectric generator

TGA	Thermogravimetric analysis
TSF	Three stone fire
UCT	Uncontrolled cooking test
VFD	Variable frequency drive
WBT	Water boiling test