EMISSIONS OF AEROSOL AND GASES FROM ON-ROAD LIGHT DUTY VEHICLES

JAI PRAKASH

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2017

EMISSIONS OF AEROSOL AND GASES FROM ON-ROAD LIGHT DUTY VEHICLES

by

JAI PRAKASH

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2017

Dedicated to

My Father (Shukhdeo Prasad)
&
My Beloved Daughter (Navya)

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Emissions of Aerosol and Gases from On-Road Light Duty Vehicles"** being submitted by **Mr. Jai Prakash** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of the original bonafide research work carried out by him under my guidance and supervision. The thesis work, in my opinion, has reached the requisite standards fulfilling the requirement for the Degree of Doctor of Philosophy.

The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

(Dr. Gazala Habib)
Assistant Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to forward my sincere and special thanks to my supervisor Dr. Gazala Habib for her continuous support, encouragement, and patience throughout the guidance during my research work. I would like to forward my special thanks to Prof. Sangeeta Kohli, Prof. Shashi Mathur, and Dr. Arun Kumar for their critical evaluation of current research. I would like to thank to Dr. Ramya Sunder Raman, Prof. Chandra Venkataraman, Prof. Tarun Gupta, Prof. Olivier Boucher; Dr. Andy Grieshop, and Dr. Eric Lipsky for their support and inputs in my PhD work. I also thank to Department of Science and Technology, India for funding the project under fast track scheme (SR/FTP/ES-183/2010).

I gratefully acknowledge to Dr. P. K. Arora (Polltech Instrument Pvt. Ltd., Mumbai) for the fabrication of dilution sampling system. In addition, It is important to acknowledge my friends and lab mates Gaurav Singh, Sunil Gulia, Praveen, B., Pooja Srivastava, Barnidharan, S., Ananda Padhi, Kailasnath Sutar, Minza Haider, and Pankaj Sadavarte (IIT Bombay) for their valuable help.

Thanks are due to the laboratory and office staffs of Department of Civil Engineering, especially Dr. Sanjay Gupta, Ishwar Singh, S. S. Shukla, Rajeev Sharma, Amit Bundela, Jeet Ram, Rajveer Aggarwal, and Vikram Singh.

Last but not least I would like to acknowledge my family members for their love, continuous support and encouragement throughout my life at IIT Delhi and sparing me out of family duties to complete this research work.

Jai Prakash

ABSTRACT

This study reports the design and evaluation of portable dilution system (PDS) for emission measurement of stationary and mobile sources. The PDS consists of portable dilution tunnel, heated duct and particle sampling probe, zero air assembly, multi-stream particle sampler, flue gas analyzer, relative humidity and temperature sensors, vane probe velocity meter and power supply unit. The system mounted on trolley was used for measurement of aerosol and gaseous pollutants during on-road operation of light duty vehicles powered by diesel, gasoline, and compressed natural gas (CNG). The vehicles were selected on the basis of Bharat Stage categories-II, III, and IV. The distance and fuel based emission factors of climate relevant pollutants including organic and elemental carbon, water soluble ions, trace elements, and gaseous pollutants (CO, CO_2, and NO_x) have been presented in this work. The PDS evaluated under controlled laboratory condition showed complete quenching of aerosol at near ambient condition for dilution ratios below 70:1 for light duty vehicle. Homogenous mixing and insignificant particle loss in the range of 5-19% were observed in the dilution system. On-road diesel passenger cars emitted high $PM_{2.5}$ ranging from 56 to 356 mg km^{-1} composed of large EC fraction (37-65%), while emissions from gasoline and CNG vehicles were observed as 46-78 mg km^{-1} and 33-34 mg km^{-1} respectively contained low EC (5-15%) and remarkably high OC (46-91%). The mass absorption cross sections (MAC) of aerosol at 880 nm were estimated in the range of 1.2 to 4.2 m^2g^{-1} of $PM_{2.5}$ for diesel vehicles and were well explained by EC content of the aerosol samples. MAC for diesel vehicles showed similarity with values reported for wood fuel combustion in cooking stove indicating the two sources cannot be resolved on the basis of light absorption properties alone in source apportionment studies. The emissions from vehicles showed strong dependency on acceleration/deceleration, vehicle maintenance, engine type, and after-treatment technique. The national level emissions of aerosol and

gaseous pollutants (CO, CO_2, and NO_x) were estimated using new emission factors and fuel use data. The $PM_{2.5,}$ EC, and OC emissions from the on-road transport sector for the base year 2013 contributed 7%, 17%, and 6% of total emissions from India. On-road transport is the second largest source of EC in the Indian region. The high emission fluxes of EC were observed over golden quadrilateral road network where heavy duty diesel vehicles dominate the on-road fleet. On the other hand OC emission fluxes shaded the regions with dense urban road network where relatively higher efficiency vehicles of gasoline and CNG rule the traffic density. The new emission estimates have implications in improving uncertainty bound in regional climate assessment through climate models.

सार

यह अध्ययन स्थिर और मोबाइल स्रोतों के उत्सर्जन माप के लिए पोर्टेबल डिल्यूशन सिस्टम (पीडीएस) के डिजाइन और मूल्यांकन की रिपोर्ट करता है। पीडीएस में पोर्टेबल डिल्यूशन टनेल, तप्त वाहिका और कण नमूनाकरण जांच, शून्य हवा असेंबली, मल्टी-स्ट्रीम कण सैंपलर, फ्ल्यू गैस विश्लेषक, सापेक्षिक आर्द्रता और तापमान सेंसर, वेग मीटर और बिजली आपूर्ति इकाई शामिल हैं। डीजल, गैसोलीन और कॉम्प्रेस्ड नैसर्गिक गैस (सीएनजी) द्वारा संचालित हल्की ड्यूटी वाहनों के ऑन-रोड ऑपरेशन के दौरान ट्रॉली पर लगाए गए सिस्टम को एयरोसोल और गैसीय प्रदूषण के माप के लिए उपयोग किया गया था। वाहनों को भारत स्टेज श्रेणियों- II, III, और IV के आधार पर चुना गया था। इस काम में कार्बनिक और मौलिक कार्बन, पानी में घुलनशील आयनों, धातुओं, और गैसीय प्रदूषण (कार्बन मोनोऑक्साइड, कार्बन डाइऑक्साइड, और नाइट्रोजन आक्साइड) सहित जलवायु से संबंधित प्रदूषक की दूरी और ईंधन आधारित उत्सर्जन कारकों को प्रस्तुत किया गया है। नियंत्रित प्रयोगशाला की स्थिति के तहत मूल्यांकन किया गया पीडीएस ने प्रकाश ड्यूटी वाहन के लिए 70: 1 के नीचे डिल्यूशन अनुपात के लिए निकट परिवेश की स्थिति में एरोसोल की पूरी शमन को दिखाया। डिल्यूशन प्रणाली में घुलनशील मिश्रण और 5-19% की सीमा में कमजोर कण हानि देखी गई थी। ऑन-रोड डीजल यात्री कारों में बड़े मौलिक कार्बन अंश (37-65%) से बना 56-26 एमजी किमी $^{-1}$ से लेकर पीएम2.5 की उच्च मात्रा उत्सर्जित होती है, जबकि गैसोलीन और सीएनजी वाहनों के उत्सर्जन को 46-78 मिलीग्राम किमी $^{-1}$ के रूप में मनाया जाता था क्रमशः 33-34 मिलीग्राम किमी$^{-1}$ कम ईसी (5-15%) और उल्लेखनीय उच्च जैविक कार्बन (46- 9 1%) 880 एनएम पर एरोसोल के बड़े पैमाने पर अवशोषण पार अनुभाग (एमएसी) डीजल वाहनों के लिए पीएम 2.5 के 1.2 से 4.2 एम ^{2} जी $^{-1}$ की सीमा में अनुमानित थे और एरोसोल नमूनों की मौलिक कार्बन सामग्री द्वारा अच्छी तरह समझाया गया था। डीजल वाहनों के लिए एमएसी ने स्टूडिंग में लकड़ी ईंधन के दहन के लिए रिपोर्ट किए गए मूल्यों के साथ समानता दिखायी है, जो दर्शाता है कि दो स्रोतों को स्रोत विभाज्य अध्ययन में अकेले प्रकाश अवशोषण गुणों के आधार पर हल नहीं किया जा सकता है। वाहनों के उत्सर्जन में त्वरण / मंदी, वाहन रखरखाव, इंजन प्रकार, और उपचार के बाद तकनीक पर मजबूत निर्भरता दिखाई गई। एरोसोल और गैसीय प्रदूषण (कार्बन मोनोऑक्साइड, कार्बन डाइऑक्साइड, और नाइट्रोजन

आक्साइड) का राष्ट्रीय स्तर का उत्सर्जन नए उत्सर्जन कारकों और ईंधन के उपयोग के डेटा का उपयोग कर अनुमान लगाया गया था। आधार वर्ष 2013 के लिए ऑन-रोड परिवहन से पीएम2.5, मौलिक कार्बन और जैविक कार्बन उत्सर्जन, भारत से कुल उत्सर्जन में 7%, 17%, और 6% योगदान दिया। भारतीय क्षेत्र में ऑन-रोड परिवहन मौलिक कार्बन का दूसरा सबसे बड़ा स्रोत है। मौलिक कार्बन के उच्च उत्सर्जन फ्लक्स सुनहरा चतुर्भुज सड़क नेटवर्क पर निरीक्षण किया जहां भारी शुल्क वाले डीजल वाहनों पर सड़क के बेड़े पर हावी है। दूसरी ओर, जैविक कार्बन उत्सर्जन फ्लक्स ने घने शहरी सड़क नेटवर्क वाले क्षेत्रों को छायांकित किया, जहां गैसोलीन की अपेक्षाकृत उच्च दक्षता वाले वाहन और सीएनजी नियम यातायात घनत्व पर शासन करते हैं। जलवायु उत्सर्जन के माध्यम से क्षेत्रीय जलवायु मूल्यांकन में बाध्य अनिश्चितताओं को सुधारने में नए उत्सर्जन के अनुमानों का असर है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

Acronyms	Expanded form
AAOD	Absorption Aerosol Optical Depth
AEMS	Aerosol emission measurement system
ARAI	Automotive Research Association of India
ATN	Attenuation
BC	Black Carbon
BS	Bharat Stage
CFCs	Chlorofluorocarbons
CH4	Methane
CI	Compressed Ignition
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Carbon monoxide
CO_2	Carbon di-oxide
COPERT	Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport
CPCB	Central Pollution Control Board
CRDI	Common Rail Direct Ignition
CVS	Constant Volume Sampler
DI	Direct Ignition
DOC	Diesel Oxidation catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
DR	Dilution ratio
EC	Elemental Carbon
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ED-XRF	Energy Dispersive X-Ray fluorescence
FTP	Federal Test Procedure
GHGs	Greenhouse gases
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GPS	Global positioning System
HBEFA	Handbook of Emission Factors for Road Transport
HC	Hydrocarbon
HDV	Heavy duty vehicle
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometer
IEA	International Energy Agency
IEO	International Energy Outlook
IISER	Indian Institute of Science Education and Research
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

IR	Infrared
LDV	Light duty vehicle
LDDV	Light duty diesel vehicle
LDGV	Light duty gasoline vehicle
LMV	Light motor vehicle
LPM	Liter per minute
MIDC	Modified Indian driving cycle
MORTH	Ministry of Road Transport and Highway
MOEF	Ministry of Environment and Forests
MOPNG	Ministry of Petroleum and Natural Gas
MPFI	Multi point fuel ignition
MPS	Micro-Proportional Sampling System
MOBILE	Mobile vehicle emission model
MSA	Methane Sulphonic Acid
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEDC	New European driving cycle
NMVOC	Non-methane volatile organic carbon
NO_X	Oxides of nitrogen
N_2O	Nitrous oxides
OC	Organic Carbon
$PM_{2.5}$	Particulate Matter (diameter < 2.5 μm)
PDS	Portable Dilution System
PFD	Partial flow dilution
PEMS	Portable Emission Measurement Systems
PSAP	Particle soot/absorption photometer
QA	Quality assurance
QC	Quality control
QBQ	Quartz behind Quartz
QBT	Quartz behind Teflon
RF	Radiative Forcing
RH	Relative humidity
SI	Spark ignition
SIAM	Society of Indian Automobile Manufacturers
SOF	Soluble organic fraction
SRI	Southern Research Institute
TC	Turbocharger
TWC	Three way catalytic converter
TOA	Top of the Atmosphere
TOR	Thermal Optical Reflectance
TWC	Two-way catalyst

UDC	Unified driving cycle
USEPA	United States Environment Protection Agency
UV	Ultra-Violet
VKT	Vehicle kilometer travel