WASTE TO RESOURCE: ASSESSING THE REUSE POTENTIAL OF MSW INCINERATION BOTTOM ASH IN FLEXIBLE PAVEMENTS, EMBANKMENTS AND REINFORCED SOIL STRUCTURES

DEEPESH BANSAL

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
NEW DELHI-110016, INDIA

MARCH 2024

WASTE TO RESOURCE: ASSESSING THE REUSE POTENTIAL OF MSW INCINERATION BOTTOM ASH IN FLEXIBLE PAVEMENTS, EMBANKMENTS AND REINFORCED SOIL STRUCTURES

by

DEEPESH BANSAL

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016, INDIA

MARCH 2024

DEDICATED TO

MY FAMILY

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "Waste to Resource: Assessing the Reuse Potential of MSW Incineration Bottom Ash in Flexible Pavements, Embankments and Reinforced Soil Structures" being submitted by Mr. Deepesh Bansal to the Indian Institute of Technology Delhi is a record of bonafide research work carried out by him under our supervision and guidance. The thesis work, in our opinion, has reached the standard fulfilling the requirements for DOCTOR OF PHILOSOPHY degree. The research report and results presented in this thesis have not been submitted, in part or full, to any University or Institute for the award of any degree or diploma.

Prof. Manoj Datta
Emeritus Professor,
Department of Civil Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi,
New Delhi-110016
INDIA

Prof. G. V. Ramana
Professor,
Department of Civil Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi,
New Delhi-110016
INDIA

ACKNOWLEDGEMENTS

I express my sincere gratitude to my supervisors, Prof. Manoj Datta and Prof. G.V. Ramana whose guidance has shaped the development of my ideas and steered my understanding throughout this association. Without their supervision and constant encouragement, this thesis would not have materialized. I am incredibly grateful to Prof. G.V. Ramana for his trust in my abilities, motivation, and unwavering support.

I would like to thank the members of my Student Research Committee: Prof. Alok Madan, Prof. J. T. Shahu, and Prof. M. K. Singha, for their valuable suggestions during this work. A special acknowledgement to Prof. R. Ayothiraman and Prof. D. Shirole for their assistance in this academic journey.

My gratitude extends to the laboratory staff and technicians of the Civil Engineering Department, with a special mention of Mr. Manoj Neelam, Dr. Sanjay Gupta, Mr. Ramcharan, Mr. Alok, Mr. Lokender, Mr. D. Biswas, and Mr. Ramjanam.

I would like to acknowledge the support and assistance received from M/s Timarpur Okhla Waste Management Company Limited (TOWMCL), M/s Delhi MSW Solutions Ltd. (DMSWSL), and South Delhi Municipal Corporation (SDMC) in collecting incineration ash samples. Additionally, I appreciate the support from Sourabh Construction Private Limited officials in facilitating the collection of treated wastewater.

Heartfelt thanks to my friends and colleagues, including Dr. Aali, Dr. Mohit, Dr. Garima, Dr. Apoorva, Dr. Mayuresh, Dr. Chinju, Dr. Sourabh, Dr. Pranjal, Dr. Avinash, Dr. Deepak, Dr. Harshal, Dr. Debiprasad, Dr. Praveen, Dr. Prateek, and Mr. Sanchay, for making this journey comfortable and memorable. Special mention to my friends Dr. Vinay, Dr. Debaprakash, Mr. Somansh, Mr. Vinay, Mr. Akash, Mr. Ajay, and Mr. Yogesh for their consistent availability and unconditional support.

My sincere gratitude to my family (Mr. M. P. Bansal, Mrs. Neeta Bansal, Ms. Radhika, and Ms. Bhanu), without whom my Ph.D. dreams would not have come true. Their love, unwavering support, understanding, patience, and affection during my study have provided the necessary impetus for this thesis. I also want to acknowledge the constant support and motivation of my extended family members (Mr. Pawan, Mrs. Parul, Dr. Roopam, and Dr. Vatsala), who have helped me on this journey.

If there is an omission of someone's explicit mention, it is more due to the limitations or shortcomings of my memory than anything else, and I sincerely apologize for that. Lastly, I express my thanks to the almighty for providing me with the strength, patience, and sensibility to complete this work.

Om Namah Shivay!

ABSTRACT

The efforts to reduce the consumption of natural aggregates to meet sustainable development goals have necessitated the use of secondary materials in civil engineering applications. The experimental data in the literature suggests that municipal solid waste (MSW) incineration bottom ash (IBA) can potentially replace natural aggregates in field applications. However, IBA is currently disposed of in open dumps or sanitary landfills in India. An extensive literature review indicated that a comprehensive study characterizing bottom ash as fill material in pavements and reinforced soil structure (RSS) is missing. Additionally, IBA properties vary based on waste composition, pre-processing of waste, and plant operating conditions worldwide. Hence, a detailed study is undertaken investigating the geoenvironmental, geotechnical and mechanical characterization of IBA from Delhi for reusing as an alternative to natural aggregates in pavement subbase, subgrade, and embankments, and RSS. The incineration ash samples were collected from two MSW incineration facilities in New Delhi, India.

The physicochemical characteristics (like mineralogy, major and minor elements, total heavy metals) and leaching characteristics of ash samples were studied within the geoenvironmental characterization of incineration ashes. The influence of particle size, pH, and L/S on the leaching characteristics of IBA was studied in detail. Finally, leaching characteristics were compared with international reuse and disposal standards to determine their fate.

Grain size distribution, plasticity, compaction characteristics, hydraulic conductivity, abrasion, impact, soundness, shear strength, dynamic characteristics, pullout characteristics, etc., were studied within the geotechnical and mechanical characterization of IBA. The obtained properties were compared with regulatory standards to evaluate the reuse of IBA in pavement layers, embankments, and RSS.

The experimental results revealed that the leaching concentration of contaminants and organic content of IBA decreases with an increase in particle size. pH significantly influences the leaching of all inorganic constituents in IBA except chlorides, sulfates, and antimony. The results further indicate that IBA is suitable for disposal in non-hazardous waste landfills regardless of particle size at its intrinsic pH. However, it is recommended to dispose of IBA in monofils as co-disposal with MSW in sanitary landfills can cause the pH of IBA to shift towards the acidic range, which may exacerbate the contaminant leaching from IBA. The comparison of leaching test results with international regulatory standards for reuse demonstrates that using IBA in unbound applications is feasible in paved roads and earthworks subjected to minimal water infiltration.

The geotechnical investigation shows that IBA is a well-graded, non-plastic, lightweight material with adequate drainage characteristics. IBA offers high bearing (soaked CBR values of 40-48%) and shear strength (angle of shearing resistance of 46.3°-47.9°). The secant and resilient moduli of IBA are comparable to conventional material, suggesting its ability to withstand deformation under static and cyclic loading. Higher water absorption and abrasion values preclude its application in subbases of highways and urban roads. However, high strength, stiffness, hydraulic conductivity, durability, and leaching characteristics make IBA suitable for rural roads. IBA also fulfills the standard guidelines for use as fill material in road embankments and subgrades. The pullout test results demonstrate that the interaction coefficient of polymeric strips and geogrid in IBA (0.73-1.53 and 0.79-1.91, respectively) is comparable or higher to materials conventionally used as structural fill in RSS, indicating adequate bondage between IBA and geosynthetic reinforcement.

Based on comprehensive laboratory testing, constraints associated with reusing IBA in field applications were identified, and treatment processes like carbonation, blending, and washing were performed to improve the required properties of IBA. Two steps of washing and screening with treated wastewater for a total liquid-to-solid ratio of 6 L/kg and a total washing time of 15 min were found to improve the properties of fresh and carbonated IBA for open reuse.

Finally, the sustainability and economic feasibility of reusing IBA compared to natural aggregates was also assessed through life cycle assessment (LCA) and cost analysis. Among the three discussed scenarios with reference to the baseline condition, the reuse of treated IBA in road layers emerges as the most sustainable alternative till a distance of d+15 km (where d is the transportation distance for natural materials). It can be inferred from cost analysis that the reuse of treated IBA in pavement layers and RSS is also an economically viable option, irrespective of the transportation distance of the material.

सारांश

प्राकृतिक एग्रीगेट के उपभोग को कम करने के प्रयासों ने सतत विकास लक्ष्यों को पूरा करने के लिए सिविल अभियांत्रिकी अनुप्रयोगों में पुनर्निर्माण सामग्रियों का उपयोग आवश्यक बना दिया है। साहित्य में प्रयुक्त प्रयोगात्मक आंकड़े इस सुझाव को देते हैं कि नगर निगम सॉलिड वेस्ट (एमएसडब्ल्यू) दहन अशेष (आईबा) आधारभूत सामग्रियों की भूमि अनुप्रयोगों में प्राकृतिक एग्रीगेट की जगह ले सकता है। हालांकि, वर्तमान में आईबा को भारत में खुले भूमि या स्वच्छता से भरे भूमिगत ठोस कचरे के साथ डाला जा रहा है। एक व्यापक साहित्य समीक्षा ने इसे सड़क, एम्बैंकमैन्ट्, और रिइनफोर्स्ड सॉइल स्ट्रक्चर्स (आरएसएस) के रूप में ऐश की विस्तृत अध्ययन की कमी बताई। इसके अतिरिक्त आईबा की कैरेक्टरिस्टिक्स विभिन्न कचरे की संरचना, कचरे की पूर्व-प्रसंस्करण, और प्लांट के संचालन शर्तों के आधार पर बदलती रहती है। इसलिए, दिल्ली से आईबा की जीओएनवायरमेंटल, जियोटेक्निकल और मैकेनिकल विशेषताओं का विस्तृत अध्ययन किया गया है, जिसका उद्देश्य इसे पैवमेंट सबबेस, सबग्रेड, और इम्बैंकमेंट्स, और आरएसएस में प्राकृतिक एग्रीगेट के एक विकल्प के रूप में पुनःप्रयोग के लिए जांचना है। इस अध्ययन के लिए आईबा सैंपल् न्यू दिल्ली, भारत के दो नगर निगम सॉलिड वेस्ट इंसिनेरेशन सुविधाओं से एकत्र किए गए थे।

जीओएनवायरमेंटल विश्लेषण के अंदर, एश सैंपल्स की भौतिक-रासायनिक विशेषताएँ (मिनरलॉजी, प्रमुख और अल्प तत्व, कुल भारी धातु) और एश सैंपल्स की लीचिंग विशेषताएँ अध्ययन की गईं । आईबा की लीचिंग कैरेक्टरिस्टिक्स पर कण आकार, पीएच, और एल/एस के प्रभाव का विस्तृत अध्ययन किया गया। अंत में, लीचिंग कैरेक्टरिस्टिक्स को अंतरराष्ट्रीय पुनःप्रयोग और निस्तारण मानकों के साथ तुलना की गई थी ताकि इसका भविष्य तय किया जा सके।

आईबा की जीओटेक्निकल और मैकेनिकल विशेषता के अंदर ग्रेन साइज वितरण, प्लास्टिसिटी, संपीड़न विशेषताएँ, पारगणता, घिसाई, संघटन, इम्पैक्ट, साउंडनेस, शियर स्ट्रेंथ, गतिक विशेषताएँ,

पुलआउट विशेषताएँ आदि का अध्ययन किया गया। प्राप्त गुणधर्मों की तुलना विनियामक मानकों के साथ की गई थी ताकि आईबीए का पुनःप्रयोग पैवमेंट लेयर, इम्बैंकमेंट्स, और आरएसएस में मूल्यांकन किया जा सके।

प्रयोगशाला परिणाम से पता लगता है की आईबा की लीचिंग और आर्गेनिक कंटेंट कण का साइज बढ़ने पर काम हो जाती है । पीएच की वजह से आईबा में सभी अप्राकृतिक घटकों की लीचिंग पर प्रभाव पड़ता है सिर्फ क्लोराइड सल्फेट और अनितमोनी को छोड़ कर । परिणाम से यह भी पता चलता है की आईबा को नॉन-हजारड़ौस वैस्ट लैंडफिल्स में डाल सकते है उसके आंतरिक पीएच पर और किसी भी कण के साइज पर । इसके अतिरिक्त परिणाम से यह पता लगता है कि आईबा को मोनोफिल्स मे डालना चाहिए ना कि एमएसडब्ल्यू के साथ सेनेटरी लैंडफिल्स मे, क्योंकि इससे आईबा का पीएच एसिडिक रेंज मे चला जायेगा जिससे कंटामिनेंट कि लीचिंग बढ़ जाएगी । पुनःप्रयोग के लिए अंतरराष्ट्रीय नियामक मानकों के साथ लीचिंग परीक्षण के परिणामों की तुलना यह साबित करती है कि अप्रतिबंधित अनुप्रयोगों में आईबा का उपयोग सड़को और पृथ्वीकरण में संवेदनशील जल प्रवाह के परिचार में संभव है ।

जीओटेक्निकल और मैकेनिकल शैली में आईबा की जाँच ने दिखाया कि यह एक वेल ग्रेडेड, नॉन- प्लास्टिक, हल्के भौतिक लक्षणों वाला पदार्थ है जिसमें पर्याप्त ड्रेनेज लक्षण हैं। आईबा ने उच्च बेयरिंग (40-48% की सोकड़ सिबिआर मूल्य) और शियर स्ट्रेंथ (46.3°-47.9° की शीरिंग रेसिस्टेन्स का कोण) प्रदान किया है। आईबा का सेकंट और रेजिलिएंट मॉड्यूल सामान्य पदार्थ के समान है, जिससे स्थिर और साइक्लिक लोडिंग के तहत उसकी उत्कृष्टता का सुझाव है। उच्च जल अवशोषण और मलिनता मूल्य ने इसका अनुप्रयोग हाईवे और शहरी सड़कों के सबबेस में बाधित कर दिया है। हालांकि, उच्च स्ट्रेंथ, स्टिफनेस, परमाबिलिटी, स्थायिता, और लीचिंग विशेषताएं आईबा को गाँवी सड़कों के लिए उपयुक्त बनाती हैं। आईबा रोड एम्बैंकमेंट्स और सबग्रेड में पदार्थ के रूप में उपयोग के लिए मानक दिशा में है। पुलआउट परीक्षण के परिणाम दिखाते हैं कि आईबा और जीओसिंथेटिक पुनर्निर्माण

में पॉलीमेर स्ट्रिप्स और जीओग्रिड के बीच इंटरएक्शन कोइफिशिएंट (0.73-1.53 और 0.79-1.91, क्रमशः) सामग्रियों के बीच संरचनात्मक भंडारण की अद्यतित संकेत करती हैं।

व्यापक प्रयोगशाला परीक्षण के आधार पर, फ़ील्ड में आईबा का पुनर्उपयोग करने के संबंधित बाधाएँ पहचानी गईं और आईबा की आवश्यक गुणधर्मों को सुधारने के लिए कार्बोनेशन, मिश्रण, और धुलाई जैसी उपचार प्रक्रियाएं की गईं। ओपन पुनःप्रयोग के लिए प्रोसेसिंग के बाद फ्रेश और कार्बोनेटेड आईबा की गुणधर्मों को सुधारने के लिए 6 लीटर/किलोग्राम की कुल तरलता-स्थूल अनुपात और कुल धोने का समय 15 मिनट के साथ संरचित जल से स्क्रीनिंग के दो कदमों को उपयुक्त पाया गया।

अंत में, आईबा की पुनर्उपयोग की स्थायिता और आर्थिक योजना की तुलना में सतती और आर्थिक वाणिज्यिकता का मूल्यांकन भी लाइफ साइकिल असेसमेंट (एलसीए) और लागत विश्लेषण के माध्यम से किया गया। बेसलाइन स्थिति के संदर्भ में तीन चरणों के साथ तुलना करते समय, सड़क पर संशोधित आईबा का पुनःप्रयोग d+15 किमी की दूरी तक (जहां d प्राकृतिक एग्रीगेट के परिवहन की दूरी है) सबसे दक्ष विकल्प के रूप में प्रकट होता है। लागत विश्लेषण से सिद्ध होता है कि सड़क पर संशोधित आईबा का पुनःप्रयोग करना एग्रीगेट की दूरी के बिना एक आर्थिक विकल्प भी है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

Figure	Title	Page No.

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

MSW	:	Municipal Solid Waste
IBA	:	Incineration Bottom Ash
IFA	:	Incineration Fly Ash
RSS	:	Reinforced Soil Structures
UBA	:	Unsegregated Bottom Ash
OM	:	Overall Material
GSM	:	Gravel-sized Material
SLM	:	Soil-like Material
CA	:	Combined Incineration Ash
L/S	:	Liquid-to-solid
WtE	:	Waste-to-energy
MG	:	Moving Grate
RDF	:	Refused Derived Fuel
MDD	:	Maximum Dry Density
OMC	:	Optimum Moisture Content
MPT	:	Modified Proctor Test
CBR	:	California Bearing Ratio
CD	:	Consolidated Drained
CU	:	Consolidated Undrained
CS	:	Confining Stress
NS	:	Normal Stress
DS	:	Direct Shear
BS	:	Bulk Stress
LVDT	:	Linear Variable Differential Transformers
LOI	:	Loss on Ignition
DI	:	De-ionized
XRD	:	X-ray Diffraction
DBL	:	De-ionized water Batch Leaching
DCL	:	De-ionized water Column Leaching
HW	:	Hazardous Waste
NHW	:	Non-hazardous Waste

IW	:	Inert Waste
TCLP	:	Toxicity Characteristics Leaching Procedure
EU	:	European Union
LCA	:	Life Cycle Assessment
PS	:	Polymeric Strips
GG	:	Geogrid
PET	:	Polyester
C&D	:	Construction and Demolition
SM	:	Sintered Material
F&NF	:	Ferrous and Non-ferrous
PBL	:	pH-dependent Batch Leaching
ICDD	:	International Centre for Diffraction Data
XRF	:	X-ray Fluorescence
ICP-MS	:	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
DOC	:	Dissolved Organic Carbon
LA	:	Los Angeles
AIV	:	Aggregate Impact Value
NMA	:	Natural Mineral Aggregates
TWW	:	Treated Wastewater
WT	:	Washing with varying time
WL	:	Washing with varying L/S
SW	:	Step Washing
SWS	:	Single step Washing and Screening
TWS	:	Two steps Washing and Screening
GSD	:	Grain Size Distribution
DOC	:	Dissolved Organic Carbon
BDL	:	Below Detection Limit
YS	:	Yamuna Sand
BS	:	Badarpur Sand
SB	:	Single Batching
MB	:	Multiple Batching
MD	:	Machine Direction
CMD	:	Cross Machine Direction
GSB	:	Granular Subbase

WMM	:	Wet Mix Macadam
C-OM	:	Carbonated Incineration Ash
WF	:	Washed Fines
WW	:	Washed Water
ETP	:	Effluent Treatment Plant
FU	:	Functional Unit
GW	:	Global Warming
SOD	:	Stratospheric Ozone Depletion
IR	:	Ionizing Radiation
OFH	:	Ozone Formation, Human Health
FPM	:	Fine Particulate Matter
OFT	:	Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems
TA	:	Terrestrial Acidification
FE_u	:	Freshwater Eutrophication
ME_u	:	Marine Eutrophication
TE	:	Terrestrial Ecotoxicity
FE	:	Freshwater Ecotoxicity
ME	:	Marine Ecotoxicity
HCT	:	Human Carcinogenic Toxicity
H_nCT	:	Human Non-carcinogenic Toxicity
LU	:	Land Use
MRS	:	Mineral Resource Scarcity
FRS	:	Fossil Resource Scarcity
WC	:	Water Consumption
CM	:	Conventional Material
MSE	:	Mechanically Stabilized Earth

LIST OF ANNOTATIONS

SiO_2	:	Silica oxide
CaO	:	Calcium oxide
Al_2O_3	:	Aluminum oxide
Fe_2O_3	:	Ferric oxide
MgO	:	Magnesium oxide
K_2O	:	Potassium oxide
Na_2O	:	Sodium oxide
SO_3	:	Sulfur trioxide
P_2O_5	:	Phosphorus oxide
TiO_2	:	Titanium oxide
CO_2	:	Carbon dioxide
Cl	:	Chlorite
I_d	:	Relative density
ϕ'_p	:	Effective angle of internal friction at peak stress
ϕ'_c	:	Effective angle of internal friction at critical state
c'	:	Cohesion intercept
E_{50}	:	Secant elastic modulus
υ	:	Poisson ratio
ψ	:	Dilation angle
γ_d	:	Dry unit weight
M_r	:	Resilient modulus
Θ	:	Bulk stress
σ_d	:	Deviatoric stress
σ_c	:	Confining stress
P_a	:	Atmospheric pressure
τ_{oct}	:	Octahedral shear stress
k_1-k_{10}	:	Model c0oefficients,
R^2	:	Regression coefficient
V_s	:	Shear wave velocity
G_{max}	:	Maximum shear modulus
As	:	Arsenic
B	:	Boron

Ba	:	Barium
Co	:	Cobalt
Cd	:	Cadmium
Cr	:	Chromium
Cu	:	Copper
Mo	:	Molybdenum
Pb	:	Lead
Ni	:	Nickel
Sb	:	Antimony
Se	:	Selenium
Sn	:	Tin
V	:	Vanadium
Zn	:	Zinc
Cl^-	:	Chlorides
SO_4^{2-}	:	Sulfates
Avg	:	average
P_r	:	Peak pullout resistance
C_i	:	Soil reinforcement interaction coefficient
L_e	:	Embedment length of reinforcement
B	:	Width of reinforcement
σ_n	:	Normal stress
$\Delta\sigma_n$	:	Increase in normal stress
b_w	:	Width of polymeric strip
b_s	:	Spacing between polymeric strip
H	:	Height
i	:	Infiltration coefficient
T	:	Time period
C_R	:	Cost of road section
R_m	:	Rate of fill material
V	:	Volume of fill material per unit length
R_t	:	Freight rate of transportation
d	:	Transportation distance
CW	:	Cost of MSE Wall

R_g	:	Rate of geogrid
n	:	Number of reinforcement layers
S_v	:	Vertical spacing of reinforcement layers