

**STUDIES ON THE THERMAL PROTECTIVE
PERFORMANCE OF THERMAL LINER OF EXTREME
HEAT PROTECTIVE CLOTHING**

TATHAGATA DAS



**DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBRE ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
DECEMBER 2024**

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**STUDIES ON THE THERMAL PROTECTIVE
PERFORMANCE OF THERMAL LINER OF
EXTREME HEAT PROTECTIVE CLOTHING**

by

TATHAGATA DAS

Department of Textile and Fibre Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2024

.....to my parents.....

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**Studies on the Thermal Protective Performance of Thermal Liner of Extreme Heat Protective Clothing**”, being submitted by **Mr. Tathagata Das** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of “Doctor of Philosophy” is a record of bonafide research work carried out by him in the Department of Textile and Fibre Engineering, IIT Delhi. He has worked under our guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis.

To the best of my knowledge, the results contained in this thesis have not been submitted in part or full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

Apurba Das, PhD

Professor
Department of Textile and Fibre Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016
India

R Alagirusamy, PhD

Professor
Department of Textile and Fibre Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016
India

Place: New Delhi

Date:

Place: New Delhi

Date:

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to commence by conveying my boundless gratitude to the Divine for bestowing upon me the opportunity to reach this stage. I want to convey my deepest appreciation and highest regard to my research supervisors, Prof. Apurba Das and Prof. R Alagirusamy, for inspiring me to select this topic for my thesis. Their consistent support, guidance, and encouragement played a crucial role in the successful culmination of my project. Collaborating with them has been enriching, providing me with insights not just in academics but also on a personal level. I would like to extend my heartfelt gratitude to the esteemed members of my research committee, namely Prof. Abhijit Majumdar (Chairman), Prof. Wazed Ali, and Prof. Prabal Talukdar, for their precious insights, constructive feedback, and profound deliberations throughout the duration of my research endeavor.

I express my gratitude to IIT Delhi for its provision of infrastructure. The successful completion of the work would have been unattainable without the invaluable cooperation of the lab staff. I wish to acknowledge Mr. Pratap Singh Kalasua, Mr. Aftab Khan, Mr. Manoranjan Kundu, Mr. B. Biswal, Mr. Vikas Khatkar, Mr. Raj Kumar Tejanía, Mrs. Jyoti Kumar, Mr. Deepak Nautiyal, Mr. Raj Kumar, Mr. Krishan Kumar, Mr. Shreyansh Jain, Mr. Manjit Singh, Mr. Mahafuj Ali, Mr. Veerender Sharma, Mr. Abu Bakkar Chowdhury.

I would specially like to thank my seniors, juniors, and colleagues, Dr. Parna Nandi, Dr. Ranjna Kumari, Mr. Gourav Mishra, Mr. Ganesh Jogur, Mr. Temesgen Regassa, Mr. Ashraf Nafaz Khan, Dr. Sukumar Roy, Dr. Sudev Dutta, Dr. Robin Marlar, Mr. Jyotirmoy Das, Mr. Chirantan Shee, Mr. Sudhanshu Maurya, Mr. Siddhi Vardhan Rao, Mrs. Bhavna Rajput, Dr. Rochak Rathour, Ms Vandana Kumari, Mr. Sayak Nandi, Mr. Shantanu Verma, and Mr. Dharmendra Kumar for their

kind support. My sincere thanks go to my friends, Parna di, Ranjna, Ritesh, Biswal, Tapabrata, Sudip, Rasujit, Arijit, and Shreejit for their constant help and support.

It is hard to find appropriate words to express my gratitude to my wife, Keya, for consistently keeping me on the track, and offering a listening ear and a shoulder to lean whenever I needed. I would like to express my gratitude to all of my teachers, friends, and family members for their constant inspiration and steady support. Above all, it is crucial to acknowledge my deepest appreciation towards my parents, Mr. Nrishingha Charan Das and Mrs. Kalpana Das, as well as my elder sisters Bardi (Dr. Brojeswari Das), Buro (Dr. Tanusri Das), and Fuchi (Mrs. Banasri Das), for their unwavering support, invaluable guidance, and constant encouragement. I would like to express my gratitude to my brothers-in-laws (Dr. Naveen, Mr. Snehasis, and Mr. Srinath) for their constant support.

At last, I am immensely grateful to all those individuals who have played a direct or indirect role in aiding my growth as a researcher and, quite possibly, as a more refined individual over the course of the recent years.

Place: New Delhi
Date:

Tathagata Das

ABSTRACT

In this work, the effect of number of layer of the thermal liner on thermal protection properties of thermal protective clothing have been studied. An experiment has been conducted using three-level three-factor Box-Behnken designing method; factors used are number of layers of thermal liner, mass per unit area of thermal liner and intensity of radiant heat flux. Thermal liners with three different mass per unit areas (150 g/m^2 , 200 g/m^2 , and 250 g/m^2) have been prepared. Each thermal lines have been divided into three layers (single layer, double layer, and triple layer). All samples have been tested under three different radiant heat exposure (20 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , and 60 kW/m^2). ANOVA study has been performed to analyze the significance of the structural and test parameters and their interaction. Second-degree burn time or protection time has been observed to increase with the increase in the mass per unit area of thermal liner and decrease with increased heat flux. As number of layer increases, protection time also increases. The effect of number of layer is more prominent at a lower level of heat flux than a higher level of heat flux. thermal liner of 200 g/m^2 mass per unit area and three layered is selected for further studies.

To comprehend the impact of elementary construction parameters of nonwoven thermal liners on their thermal protective performance, the current research primarily emphasises on studying the effect of needle penetration depth and needle punch density of the thermal liner. Three layered thermal liners with 200 g/m^2 mass per unit area were prepared with three different punch densities (50 punches/cm^2 , 75 punches/cm^2 , and 100 punches/cm^2) and three needling depths (5 mm, 10 mm, and 15 mm). An experiment was carried out utilizing the 3^3 Box-Behnken designing approach; the factors employed were the radiant heat flux intensity, needle punch density, and needle penetration depth of the thermal liner. Thermal protective performance of thermal liners was measured at three discrete intensities of radiant heat exposures. To investigate the effect of

the test and construction parameters and their interaction, an analysis of variance study was carried out. It was observed that protection time rises with the decrease in needling depth and needle punch density at every level of heat flux. With the rise in incident radiant heat flux protection time also declines. Three layered thermal liners with 200 g/m^2 mass per unit area were prepared with 50 punches/cm² punch density and 5 mm needle penetration is selected for further studies.

The current study focuses on analyzing the effect of compressive stress on thermal liner and microclimate thickness (the distance between the wearer's skin and clothing) on the thermal protection of a thermal liner to understand the influence of working conditions and the fitting of protective clothing on its thermal protection and the safety of occupational workers. 3³ Box-Behnken design was utilized to carry out this study. The independent factors were compressive stress on the thermal liner, microclimate thickness, and heat flux. The radiant heat transfer index (RHTI₂₄) of the thermal liner against three different incident radiant heat flux levels was assessed. An analysis of variance study was performed to determine the significance of the independent parameters (compressive stress on the thermal liner, microclimate thickness, and heat flux), as well as their interaction on the dependent parameter (RHTI₂₄). It can be found that the RHTI₂₄ value increases with an increase in microclimate thickness at every level of heat flux. RHTI₂₄ value decreases as compressive stress on the thermal liner and heat flux increase. From this study, it can be concluded that loose-fit heat protective clothing that has a higher microclimate will provide higher safety to the wearer. In working conditions, where incident heat flux is low protective performance of thermal protective clothing will be high. When the applied compressive stress on the thermal liner is less, protective clothing will provide greater safety to occupational workers.

Working conditions have a profound influence on the thermal protective performance of heat protective clothing. The heat transfer index (HTI₂₄) of a multilayer thermal liner exposed to

varying degrees of heat flux under radiant, flame, and 50 % radiant – 50 % flame exposure was studied using a vertical TPP tester. A three-layer needle punched nonwoven thermal liner with five levels of moisture percentage (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, and 100 %) was evaluated at three levels of heat flux (20 kW/m², 30 kW/m², and 40 kW/m²). The regression analysis was used to assess the relationship among the HTI₂₄ value of the samples, moisture percentages in the thermal liner, and heat flux for these three kinds of heat exposure. Regression equations were developed to calculate the HTI₂₄ value of a three-layer thermal liner for radiant, flame, and 50% radiant – 50% flame exposure. Moisture has a positive influence on the heat transfer index (HTI₂₄) for every level of flame, and 50 % radiant – 50 % flame exposure, which indicates that as the moisture content rises, the heat transfer index (HTI₂₄) of the test samples correspondingly increases. On the other hand, at lower level of radiative heat flux, water percentage increases the HTI₂₄ value, while at higher level of radiative heat flux water percentage has an adverse impact on the HTI₂₄ value.

Lastly, Silica aerogel was developed in situ aramid needle punched nonwoven thermal liner via sol-gel process followed by ambient pressure drying technique using tetraethoxysilane (TEOS) as a precursor. The thermal liner was augmented with silica aerogel at three different add-on percentages relative to the weight of the nonwoven fabric. This incorporation aimed to investigate the influence of the aerogel add-on percentage on the thermal protective performance of the tested thermal liner. The wet gel surface was modified through a silylation process, varying concentrations of silylating agent, trimethylchlorosilane (TMCS), in hexane. The characterization of the aerogel-embedded thermal liner samples encompassed evaluations of thickness, air permeability, thermal conductivity, thermal stability (measured by TGA), and examination through Scanning Electron Microscopy and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The heat transfer index (HTI₂₄) was measured for every sample under radiant and flame heat exposure.

Analysis of Variance study has been performed to analyze the significance of the aerogel add-on percentage and concentrations of silylating agent on the heat transfer index (HTI_{24}) of the aerogel-embedded thermal liner. Aerogel embedded thermal liner, irrespective of aerogel add-on percentages and TMCS concentrations, provides higher protection under both radiant and flame exposure than non-aerogel nonwoven thermal liner. Both aerogel add-on percentage and TMCS concentration positively impact the HTI_{24} value for both flame and radiant heat exposure. This indicates that increase in both the aerogel add-on percentage and the TMCS concentration corresponds to a rise in the HTI_{24} value for both types of heat exposure. Higher protection against flame and radiant heat exposure makes aerogel-embedded thermal liners more suitable for extreme heat-protective clothing.

सारांश

इस कार्य में, ऊष्मा सुरक्षात्मक कपड़ों की ऊष्मा सुरक्षा गुणों पर थर्मल लाइनर की परतों की संख्या के प्रभाव का अध्ययन किया गया है। तीन-स्तरीय तीन-कारक बॉक्स-बेनकेन डिजाइनिंग विधि का उपयोग करके एक प्रयोग किया गया है; उपयोग किए गए कारक हैं थर्मल लाइनर की परतों की संख्या, थर्मल लाइनर का प्रति इकाई क्षेत्र में द्रव्यमान, और विकिरणित ऊष्मा प्रवाह की तीव्रता। थर्मल लाइनर्स को तीन अलग-अलग प्रति इकाई क्षेत्र द्रव्यमानों (150 g/m², 200 g/m² और 250 g/m²) में तैयार किया गया है। प्रत्येक थर्मल लाइनर को तीन परतों में विभाजित किया गया है (एकल परत, दोहरी परत और त्रिस्तरीय परत)। सभी नमूनों का परीक्षण तीन अलग-अलग विकिरणित ऊष्मा प्रवाह (20 kW/m², 40 kW/m² और 60 kW/m²) के तहत किया गया है। ANOVA अध्ययन किया गया है ताकि संरचनात्मक और परीक्षण पैरामीटरों तथा उनके पारस्परिक प्रभाव की महत्ता का विश्लेषण किया जा सके। दूसरे-डिग्री जलन का समय या सुरक्षा समय थर्मल लाइनर के प्रति इकाई क्षेत्र द्रव्यमान में वृद्धि के साथ बढ़ता हुआ पाया गया है, जबकि ऊष्मा प्रवाह में वृद्धि के साथ यह घटता है। जैसे ही परतों की संख्या बढ़ती है, सुरक्षा समय भी बढ़ता है। परतों की संख्या का प्रभाव निम्न स्तर के ऊष्मा प्रवाह पर उच्च स्तर के ऊष्मा प्रवाह की तुलना में अधिक स्पष्ट होता है। 200 g/m² प्रति इकाई क्षेत्र द्रव्यमान वाला और तीन परतों वाला थर्मल लाइनर आगे के अध्ययनों के लिए चुना गया है।

गैर-बुने हुए थर्मल लाइनर्स के मूल निर्माण मानकों का उनकी थर्मल सुरक्षा प्रदर्शन पर प्रभाव समझने के लिए, वर्तमान शोध मुख्य रूप से थर्मल लाइनर की सुई प्रवेश गहराई और सुई पंच घनत्व के प्रभाव के अध्ययन पर जोर देता है। 200 g/m² प्रति इकाई क्षेत्र द्रव्यमान वाले तीन परतों के थर्मल लाइनर्स को तीन अलग-अलग पंच घनत्वों (50 punches/cm², 75 punches/cm², और 100 punches/cm²) और तीन सुई प्रवेश गहराइयों (5 mm, 10 mm, और 15 mm) के साथ तैयार किया गया। 3³ बॉक्स-बेनकेन डिजाइनिंग दृष्टिकोण का उपयोग करते हुए एक प्रयोग किया गया; उपयोग किए गए कारक थे विकिरणित ऊष्मा प्रवाह की तीव्रता, सुई पंच घनत्व, और थर्मल लाइनर की सुई प्रवेश गहराई। थर्मल लाइनर्स के थर्मल सुरक्षा प्रदर्शन को विकिरणित ऊष्मा प्रवाह की तीन अलग-अलग तीव्रताओं पर मापा गया। परीक्षण और निर्माण पैरामीटरों और उनके पारस्परिक प्रभाव का अध्ययन करने के लिए, एक वैरिएंस विश्लेषण (ANOVA) किया गया। यह पाया गया कि हर ऊष्मा प्रवाह स्तर पर सुई प्रवेश गहराई और सुई पंच घनत्व में कमी के साथ सुरक्षा समय बढ़ता है। विकिरणित ऊष्मा प्रवाह की तीव्रता में वृद्धि के साथ सुरक्षा समय घटता है। 200 g/m² प्रति इकाई क्षेत्र द्रव्यमान वाले तीन परतों के थर्मल लाइनर्स, जिनमें 50 punches/cm² पंच घनत्व और 5 mm सुई प्रवेश गहराई है, को आगे के अध्ययनों के लिए चुना गया।

वर्तमान अध्ययन थर्मल लाइनर पर संपीड़न तनाव (कंप्रेसिव स्ट्रेस) और माइक्रोकलाइमेट मोटाई (उपयोगकर्ता की त्वचा और कपड़ों के बीच की दूरी) के थर्मल सुरक्षा पर प्रभाव का विश्लेषण करने पर केंद्रित है। इसका उद्देश्य कार्यशील परिस्थितियों और सुरक्षात्मक कपड़ों के फिटिंग का थर्मल सुरक्षा और व्यावसायिक श्रमिकों की सुरक्षा पर प्रभाव समझना है। इस अध्ययन को करने के लिए 3³ बॉक्स-बेनकेन डिजाइन का उपयोग किया गया। स्वतंत्र कारक थे थर्मल लाइनर पर संपीड़न तनाव, माइक्रोकलाइमेट मोटाई, और ऊष्मा प्रवाह। थर्मल लाइनर के रेडिएंट हीट ट्रांसफर इंडेक्स (RHTI₂₄) को तीन अलग-अलग विकिरणित ऊष्मा प्रवाह स्तरों के विरुद्ध आंका गया। वैरिएंस विश्लेषण (ANOVA) अध्ययन यह निर्धारित करने के लिए किया गया कि स्वतंत्र पैरामीटरों (थर्मल लाइनर पर संपीड़न तनाव, माइक्रोकलाइमेट मोटाई, और ऊष्मा प्रवाह) और उनके पारस्परिक प्रभाव का निर्भर पैरामीटर (RHTI₂₄) पर क्या महत्व है। यह पाया गया कि RHTI₂₄ का मान प्रत्येक ऊष्मा प्रवाह स्तर पर माइक्रोकलाइमेट मोटाई बढ़ने के साथ बढ़ता है। RHTI₂₄ का मान थर्मल लाइनर पर संपीड़न तनाव और ऊष्मा प्रवाह बढ़ने के साथ घटता है। इस अध्ययन से यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि ढीले-फिट वाले ऊष्मा सुरक्षात्मक कपड़े, जिनमें माइक्रोकलाइमेट मोटाई अधिक होती है, उपयोगकर्ता को अधिक सुरक्षा प्रदान करेंगे। कार्यशील परिस्थितियों में, जहां विकिरणित ऊष्मा प्रवाह कम होता है, थर्मल सुरक्षात्मक कपड़ों का सुरक्षा प्रदर्शन उच्च होता है। जब थर्मल लाइनर पर लगाया गया संपीड़न तनाव कम होता है, तो सुरक्षात्मक कपड़े व्यावसायिक श्रमिकों को अधिक सुरक्षा प्रदान करते हैं।

कार्य परिस्थितियों का ऊष्मा सुरक्षात्मक कपड़ों के थर्मल सुरक्षा प्रदर्शन पर गहरा प्रभाव पड़ता है। विभिन्न ऊष्मा प्रवाह स्तरों पर विकिरण, ज्वाला और 50 % विकिरण – 50 % ज्वाला संपर्क के तहत मल्टीलेयर थर्मल लाइनर के ऊष्मा स्थानांतरण सूचकांक (HTI₂₄) का अध्ययन वर्टिकल TPP टेस्टर का उपयोग करके किया गया। तीन-परतों वाले सुई-पंचित गैर-बुने हुए थर्मल लाइनर, जिसमें नमी के पांच स्तर (0 %, 25%, 50%, 75%, और 100%) थे, का तीन ऊष्मा प्रवाह स्तरों (20 kW/m², 30 kW/m², और 40 kW/m²) पर मूल्यांकन किया गया। प्रतिगमन विश्लेषण का उपयोग करके HTI₂₄ मान, थर्मल लाइनर में नमी का प्रतिशत, और इन तीन प्रकार की ऊष्मा संपर्क स्थितियों के लिए ऊष्मा प्रवाह के बीच संबंध का मूल्यांकन किया गया। विकिरण, ज्वाला, और 50% विकिरण – 50% ज्वाला संपर्क के लिए तीन-परत वाले थर्मल लाइनर के HTI₂₄ मान की गणना के लिए प्रतिगमन समीकरण विकसित किए गए। नमी का HTI₂₄ पर सकारात्मक प्रभाव पाया गया, विशेष रूप से ज्वाला और 50% विकिरण – 50% ज्वाला संपर्क के लिए। यह इंगित करता है कि नमी बढ़ने के साथ परीक्षण नमूनों का HTI₂₄ मान भी बढ़ता है। दूसरी ओर, निम्न विकिरण ऊष्मा प्रवाह स्तर पर जल प्रतिशत HTI₂₄ मान को बढ़ाता है, जबकि उच्च विकिरण ऊष्मा प्रवाह स्तर पर जल प्रतिशत का HTI₂₄ मान पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है।

अंततः, सिलिका एयरोजल को **इन-सीटू** एमिड सुई-पंचित गैर-बुने हुए थर्मल लाइनर में **सोल-जेल प्रक्रिया** के माध्यम से विकसित किया गया, इसके बाद **एंबियंट प्रेशर ड्राईंग तकनीक** का उपयोग किया गया, जिसमें टेट्रा-एथोक्सीसिलेन (**TEOS**) को प्रीकर्सर के रूप में उपयोग किया गया। सिलिका एयरोजल को गैर-बुने हुए कपड़े के वजन के सापेक्ष तीन अलग-अलग ऐड-ऑन प्रतिशतों में थर्मल लाइनर में जोड़ा गया। इस समावेशन का उद्देश्य परीक्षण किए गए थर्मल लाइनर के थर्मल सुरक्षात्मक प्रदर्शन पर एयरोजल ऐड-ऑन प्रतिशत के प्रभाव की जांच करना था। गीले जेल की सतह को साइलिलेशन प्रक्रिया के माध्यम से संशोधित किया गया, जिसमें साइलिलेटिंग एजेंट ट्राइमेथिलक्लोरोसिलेन (**TMCS**) की हेक्सेन में विभिन्न सांद्रताओं का उपयोग किया गया। एयरोजल-एम्बेडेड थर्मल लाइनर नमूनों की विशेषताओं में मोटाई, वायु पारगम्यता, ऊष्मा चालकता, थर्मल स्थिरता (**TGA** द्वारा मापी गई), और स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (**SEM**) और फोरियर-ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी (**FTIR**) के माध्यम से परीक्षा शामिल थी। प्रत्येक नमूने के लिए विकिरणित और ज्वाला ऊष्मा संपर्क के तहत ऊष्मा स्थानांतरण सूचकांक (**HTI₂₄**) को मापा गया। वैरिएंस विश्लेषण (**ANOVA**) अध्ययन किया गया ताकि एयरोजल ऐड-ऑन प्रतिशत और साइलिलेटिंग एजेंट की सांद्रता का एयरोजल-समाहित थर्मल लाइनर के ऊष्मा स्थानांतरण सूचकांक (**HTI₂₄**) पर प्रभाव का विश्लेषण किया जा सके। एयरोजल-समाहित थर्मल लाइनर, चाहे एयरोजल ऐड-ऑन प्रतिशत और **TMCS** सांद्रता कुछ भी हो, गैर-एयरोजल गैर-बुने हुए थर्मल लाइनर की तुलना में विकिरणित और ज्वाला संपर्क दोनों के तहत उच्च सुरक्षा प्रदान करता है। एयरोजल ऐड-ऑन प्रतिशत और **TMCS** सांद्रता दोनों का ज्वाला और विकिरण ऊष्मा संपर्क के लिए **HTI₂₄** मान पर सकारात्मक प्रभाव पड़ता है। इसका अर्थ है कि एयरोजल ऐड-ऑन प्रतिशत और **TMCS** सांद्रता में वृद्धि दोनों प्रकार की ऊष्मा संपर्क स्थितियों के लिए **HTI₂₄** मान को बढ़ाने के लिए सहसंबद्ध है। ज्वाला और विकिरण ऊष्मा संपर्क के खिलाफ उच्च सुरक्षा के कारण, एयरोजल-समाहित थर्मल लाइनर्स अत्यधिक ऊष्मा सुरक्षात्मक कपड़ों के लिए अधिक उपयुक्त हैं।

TABLE OF CONTENTS

Certificate	i
Acknowledgements	ii
Abstract	iv
Table of Contents	xiii
List of Tables	xix
List of Figures	xxi

CHAPTER 1: Introduction and objectives

1.1. Introduction	3
1.2. Motivation.....	7
1.2. Objectives	8

CHAPTER-2: Literature review

2.1 Introduction	11
2.2 Thermal Environments and Burn Injuries.....	13
2.3 Extreme Heat Protective Clothing.....	15
2.4 Requirements of Extreme Heat Protective Clothing	16
2.5. Evaluation Methodologies of Extreme Heat Protective Clothing	18
2.5.1. Thermal Protective Performance test (TPP).....	19

2.5.2. Total Heat Loss test (THL)	21
2.5.3. Stored Energy Test (SET).....	21
2.5.4. Instrumented Manikin test.....	22
2.6. Research on Firefighters' Protective Clothing.....	21
2.6.1. Fibres used in firefighters' protective clothing.....	23
2.6.2. Characteristics of thermal exposures and protective performance.....	24
2.6.3. Physical characteristics of heat protective clothing assemblies.....	25
2.6.4. Moisture in heat protective clothing assemblies and moisture barriers.....	28
2.6.5. Compression and stored energy.....	31
2.7. Some New Approaches for Enhanced Thermal Protection.....	31
2.8. Summary.....	35

CHAPTER-3: Development, testing and evaluation of thermal protective performance of thermal liner with differing mass per unit area and number of layers

3.1. Introduction	39
3.2. Materials and methods	
3.2.1. Materials	42
3.2.2. Methods.....	44
3.2.2.1. Experimental method.....	44
3.2.2.2. Testing methods.....	47
3.3. Results and discussion.....	50
3.3.1. Box Behnken Analysis.....	52
3.3.1.1. Adequacy of the model.....	57

3.3.2. Effect of mass per unit area and heat flux on protection time.....	58
3.3.3. Effect of mass per unit area and number of layers on protection time.....	59
3.3.4. Effect of heat flux and number of layer on protection time.....	61
3.4. Conclusion.....	63
3.5. Significant contribution from this chapter.....	63

CHAPTER-4: Development, testing and evaluation of thermal protective performance of multilayer thermal liner with differing structural and process parameters

4.1 Introduction	67
4.2 Materials and methods	
4.2.1 Materials	69
4.2.1.1. Nonwoven Fabrics preparation.....	70
4.2.2. Methods	71
4.2.2.1. Experimental method.....	71
4.2.2.2. Testing methods.....	72
4.3. Results and discussion.....	74
4.3.1. Effect of needle punch density and needle penetration depth on protection time.....	79
4.3.2. Effect of needle punch density and heat flux on protection time.....	81
4.3.3. Effect of needle penetration depth and heat flux on protection time.....	82
4.4. Conclusion	83
4.5. Significant contribution from this chapter.....	85

CHAPTER-5: Performance assessment of multilayer thermal liner with different microclimate thickness subjected to different levels of compressive stress

5.1 Introduction	89
5.2 Materials and methods	
5.2.1 Materials	91
5.2.1.1. Nonwoven Fabrics preparation.....	92
5.2.2. Method.....	93
5.2.2.1. Experimental method.....	93
5.2.2.2. Testing methods	95
5.3. Results and discussion	98
5.3.1. Compression study	98
5.3.2. Box Behnken Analysis	98
5.3.3. Adequacy of the model	104
5.3.4. Effect of microclimate thickness and compressive stress.....	105
5.3.5. Effect of heat flux and compressive stress.....	107
5.3.6. Effect of microclimate thickness and compressive stress.....	108
5.3.7. Optimization of the parameters	109
5.4. Conclusion.....	110
5.5. Significant contribution from this chapter.....	111

CHAPTER-6: Performance assessment of multilayer thermal liner with different moisture content subjected to different kind of thermal exposure

6.1. Introduction	115
6.2. Materials and methods	
6.2.1. Materials	118
6.2.1.1. Nonwoven Fabrics preparation	118

6.2.2. Methods	119
6.2.2.1. Testing methods	120
6.3. Results and Discussions.....	122
6.3.1. Effect of moisture percentage at 20 kW/m ² heat exposure.....	123
6.3.2. Effect of moisture percentage at 30 kW/m ² heat exposure.....	125
6.3.3. Effect of moisture percentage at 40 kW/m ² heat exposure.....	127
6.3.4. Effect of moisture in radiant exposure.....	129
6.3.5. Effect of moisture in 50 % radiant - 50 % flame exposure.....	130
6.3.6 Effect of moisture in flame exposure	131
6.4. Conclusion.....	132
6.5. Significant contribution from this chapter.....	132

CHAPTER-7: Enhancement of thermal protective performance of multilayer thermal liner through the incorporation of synthesized silica aerogel

7.1. Introduction	135
7.2. Materials and methods	
7.2.1 Materials	137
7.2.1.1. Nonwoven Fabrics preparation	138
7.2.1.2. Silica Aerogel Synthesis	138
7.2.1.2.1. Sol-Gel Process.....	139
7.2.1.2.2. Silylation and ambient pressure drying	139
7.2.2. Methods.....	141
7.2.2.1. Experimental Methods	141
7.2.2.2. Methods of Characterization.....	142

7.2.2.2.1. Surface morphology	142
7.2.2.2.2. Thermo gravimetric Analysis (TGA).....	142
7.2.2.2.3. Attenuated total reflection infra-red (ATR-IR) spectroscopy.....	142
7.2.2.3. Testing methods	143
7.3. Results and discussions	144
7.3.1. Fabric morphology.....	144
7.3.2. Thermogravimetric Analysis	146
7.3.3. Attenuated total reflection infra-red (ATRIR) spectroscopy	147
7.3.4. Physical Properties of Aerogel Embedded Liner	148
7.3.5. Heat protective performance	152
7.3.5.1. Regression analysis	155
7.4 Conclusions	158
7.5. Significant contribution from this chapter.....	158
CHAPTER-8: Summary and Future scope	
8.1 Summary and conclusion	161
8.2. Future scope	164
References.....	165
Publications.....	189
Bio-data.....	191

LIST OF TABLES

Table No.	Table Title	Page No.
Table 3.1.	Mass per unit area and number of layers of used nonwoven thermal liner.	43
Table 3.2.	Selected parameters and their levels for Box-Behnken experiments	45
Table 3.3.	Plan of experimental runs	46
Table 3.4.	Experimental result for Box Behnken design	54
Table 3.5.	Available functions and their sequential sum of square values	55
Table 3.6.	Lack of fit test data of the functions	55
Table 3.7.	Analysis of variance for response surface	56
Table 4.1.	Chosen parameters and their levels	71
Table 4.2.	Plan of the Experiment	72
Table 4.3.	Basic properties of the specimens	76
Table 4.4.	Experimental results	78
Table 4.5.	Analysis of Variance (ANOVA)	79
Table 5.1.	Physical and thermal properties of the test thermal liner	92
Table 5.2.	Factors and levels of the independent parameters	93
Table 5.3.	Plan of the Experiment	94
Table 5.4.	Thickness, porosity, and bulk density value at different compressional stress	100
Table 5.5.	Response value of the experiments	101
Table 5.6.	Available models and their sequential sum of square values	102

Table 5.7.	Lack of fit test data of the models	102
Table 5.8.	Analysis of variance for response surface	103
Table 6.1.	HTI ₂₄ values of the test samples	123
Table 6.2.	ANOVA results for radiant heat exposure	129
Table 6.3.	ANOVA table for 50 % radiant - 50 % flame exposure testing	130
Table 6.4.	ANOVA table for flame exposure	131
Table 7.1.	Experimental design	141
Table 7.2.	Physical properties of the aerogel embedded thermal liner	152
Table 7.3.	Heat transfer index (HTI ₂₄) value for radiative and flame exposure	155
Table 7.4.	ANOVA table for radiant heat exposure	156
Table 7.5.	ANOVA table for flame exposure	157

LIST OF FIGURES

Figures	Figure Title	Page No.
Figure 2.1.	Firefighter fatalities by cause of injury	12
Figure 2.2.	Typical multilayered configuration of firefighters' protective clothing	18
Figure 3.1.	Schematic diagram of test samples	44
Figure 3.2.	Components of multilayered test samples. (a) outer layer, (b) moisture barrier, (c) thermal liner, (d) sample with single layer thermal liner, (e) sample with two layer thermal liner, (f) sample with three layer thermal liner	44
Figure 3.3.	Schematic representation of the testing instrument	49
Figure 3.4.	Stoll curve with result of first three samples	49
Figure 3.5.	Porosity value as a function of number of layers	51
Figure 3.6.	Air permeability as a function of number of layers	52
Figure 3.7.	Thermal resistance value as a function of number of layers	52
Figure 3.8.	Major diagnostic plot of the model. (a) Actual vs Predicted, (b) Residual vs predicted	57-58
Figure 3.9.	Effect of mass per unit area and heat flux on protection time	59
Figure 3.10.	Effect of number of layers and mass per unit area on protection time	61
Figure 3.11.	Effect of number of layers and heat flux on protection time	62
Figure 4.1.	TGA thermogram of Nomex IIIA fibre	70
Figure 4.2.	Schematic presentation of the instrument	73

Figure 4.3.	Interaction between Stoll curve and result of first sample	74
Figure 4.4.	Thermal Resistance value as a function of punch density	77
Figure 4.5.	Plot of experimental protection time and predicted protection time results	77
Figure 4.6.	Effect of needle penetration depth and punch density on the protection time of the samples	81
Figure 4.7.	Effect of heat flux and punch density on the protection time of the samples	82
Figure 4.8.	Effect of heat flux and punch density on the protection time of the samples	83
Figure 5.1.	Schematic of the RHTI ₂₄ test instrument	96
Figure 5.2.	INSTRON 3365 with compression test head	97
Figure 5.3.	Sample holding frame	97
Figure 5.4.	Compression and recovery graph of test samples	98
Figure 5.5.	Temperature rise curve with exposure time	99
Figure 5.6.	Major diagnostic plot of the function. (a.) Predicted vs actual, (b.) Residual vs predicted	104-105
Figure 5.7.	Effect of microclimate thickness and compressive stress	106
Figure 5.8.	Effect of heat flux and compressive stress	108
Figure 5.9.	Effect of microclimate thickness and compressive stress	109
Figure 6.1.	Padding Mangle	120
Figure 6.2.	Schematic diagram of the testing instrument	121

Figure 6.3.	Testing instrument. (a) TPP tester, (b) Radiant exposure, (c) Flame exposure, (d) 50 % radiant – 50 % Flame exposure	122
Figure 6.4.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 20 kW/m ² heat flux Temperature rises of the calorimeter at 20 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	124
Figure 6.5.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 30 kW/m ² heat flux Temperature rise of the calorimeter at 30 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	125
Figure 6.6.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 40 kW/m ² heat flux Temperature rise of the calorimeter at 40 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	126
Figure 6.7.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 20 kW/m ² heat flux Temperature rise of the calorimeter at 20 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	127
Figure 6.8.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 30 kW/m ² heat flux Temperature rise of the calorimeter at 30 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	128
Figure 6.9.	Effect of moisture percentage on the heat transfer index (HTI ₂₄) of the test thermal liner at 40 kW/m ² heat flux Temperature rise of the calorimeter at 40 kW/m ² heat flux. (a) Radiant exposure, (b) 50 % Radiant - 50 % Flame exposure, (c) Flame exposure	128
Figure 7.1.	Silica aerogel synthesis process	140
Figure 7.2.	7.2(A). SEM image of aerogel embedded nonwoven fabric with add-on percentages of 20 %, 7.2(B). SEM image of aerogel embedded nonwoven fabric with add-on percentages of 40 %, 7.2(B). SEM image of aerogel embedded nonwoven fabric with	145

add-on percentages of 40 %, (i) TMCS concentration 5 %, (ii)
TMCS concentration 10 %, (iii) TMCS concentration 15 %

Figure 7.3.	Thermograph of the nonwoven fabric and aerogel-embedded nonwoven fabric	147
Figure 7.4.	ATRIR spectra of the samples	148
Figure 7.5.	Relation between thickness and add-on percentage, TMCS concentration	149
Figure 7.6.	Relation between air permeability and add-on percentage, TMCS concentration	150
Figure 7.7.	Relation between thermal conductivity and add-on percentage, TMCS concentration	151
Figure 7.8.	Relationship between flame heat transfer index and add-on percentage, TMCS concentration	153
Figure 7.9.	Relationship between radiative heat transfer index and add-on percentage, TMCS concentration	154
Figure 7.10.	Experimental and predicted values under radiant heat exposure	156
Figure 7.11.	Experimental and predicted values under flame heat exposure	157