

**STUDY ON THE PERFORMANCE CHARACTERIZATION  
OF OUTER LAYER OF FIRE PROTECTIVE CLOTHING**

**ROCHAK RATHOUR**



**DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBRE ENGINEERING**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**SEPTEMBER 2023**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2023

All rights reserved

**STUDY ON THE PERFORMANCE CHARACTERIZATION  
OF OUTER LAYER OF FIRE PROTECTIVE CLOTHING**

by

**ROCHAK RATHOUR**

**Department of Textile and Fibre Engineering**

**Submitted**

*In fulfillment of requirements for the awards of the degree of Doctor of Philosophy to  
the*



**Indian Institute of Technology Delhi**

**September 2023**

..... *dedicated to all my beloved*

## **CERTIFICATE**

This is to certify that the thesis entitled “**Study on performance characterization of outer layer of fire protective clothing**” submitted by **Mr. Rochak Rathour** (Entry No. **2018TTZ8458**) to the **Indian Institute of Technology Delhi** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in the **Department of Textile Technology**, is a record of bonafide research work carried out by him. Mr. Rochak Rathour has worked under our guidance and supervision and fulfilled the requirements for the submission of the thesis.

The results contained in this thesis are original and have not been submitted in partial or full, to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

**Dr. Apurba Das**

Professor

Department of Textile and Fibre Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi - 11016

**Dr. Ramasamy Alagirusamy**

Professor

Department of Textile and Fibre Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi - 11016

## **ACKNOWLEDGEMENT**

Words of appreciation and gratitude fall short of acknowledging the inspiring guidance, valuable suggestions, and constant encouragement provided by **Prof. Apurba Das** and **Prof. Ramasamy Alagirusamy** at every stage of this research. I enjoyed and learned a lot working under him throughout my Ph.D. I gratefully acknowledge the help and suggestions of my SRC members **Prof. R. S. Rengasamy, Dr. S. Wazed Ali, Prof. Prabal Talukdar** (Department of Mechanical Engineering) and other faculty members of the Department of Textile and Fibre Engineering and other departments.

I gratefully acknowledge the help and cooperation of the lab staff, especially Mr. Raj Kumar Tejanian, Mr. B. Biswal, Mr. Pratap Singh, Mr. Manjit Singh, Mr. Vikas Khatkar, Mr. Veerender Sharma, Mr. Mahafuj Ali, Mr. Abu Bakkar Chowdhury, Mr. Deepak Nautiyal, Mr. Aftab, Mr. Krishan Kumar, Mr. Raj Kumar, Ms. Jyoti and Mr. Shreyansh Jain. I am thankful to all my seniors, friends and juniors, especially Dr. J. Krishnasamy, Mr. Ashraf Khan, Ms. Bhavna, Ms. Meenakshi, Mr. Tathagata, Ms. Lekhani, Mr. Shubham, Mr. Sandeep, Mr. Sudhanshu, Mr. Siddhivardhan, Mr. Amit, Mr. Anubhav, Mr. Shaswat Nakrani, Mr. Kundan, Mr. Zeeshan, Mr. Mohit, Mr. Rohit, Mr. Pranav and Ms. Divya for their help, support and encouragement. I also express my heartfelt thanks to my beloved friends Mr. Prabhakar, Mr. Indresh, Mr. Sumit, Mr. Aditya Kara, Mr. Sudheer, Mr. Ankur, Mr. Abhishek and Mr. Pratyush. At last, I would like to thank everyone who contributed directly or indirectly during my research work.

I express my sincere gratitude to my grandparents, parents, uncle, brother and sister-in-law, sister, nephew and friends for their motivation, moral support and understanding.

**Date:**

**Rochak Rathour**

**Place:** New Delhi

## **ABSTRACT**

Three types of fires define the thermal environment prevailing in the active workplace - routine, hazardous and emergency. Firefighters face multiple challenges during an operation, making their job risky and potentially dangerous. Turnout suits worn by the firefighters are multilayer assemblies of functional fabrics comprising the outer layer (shell fabric), a middle layer (moisture barrier), an inner layer (thermal liner) and a face fabric. The purpose of fire protective clothing is to keep firefighters safe from heat and other hazards. Many investigations have been conducted to learn about and characterize the protective clothing worn by firefighters and others in similar situations. Because the outer layer is the first layer of fire protective clothing, its role and importance are higher because it protects against thermal injuries, trauma, and toxic fumes, and it must therefore have high heat resistance, thermal release rate, and mechanical properties. Properties (Protective performance, mechanical and comfort) and durability (during repeated heat exposure) of the outer layer of fire protective clothing depend on thickness, areal density, porosity, moisture content, heat flux, and air gap or microclimate thickness (distance between the fabric and copper sensor) with horizontal and vertical orientation and structure (weave design). The current level of research on the outer layer of fire protective clothing may be incapable of describing all of the required properties in a single study. As a result, a comprehensive and collective study of the outer layer is more important for improving the performance characterization of the outer layer of fire protective clothing. So, the purpose of this thesis is to a better understanding of the performance characterization of the outer layer of fire protective clothing.

The effects of heat flux intensity, pick density, and air gap between the fabric and the sensor on the outer layer of multilayered turnout suits were investigated. The material was selected because of the superior thermal protection afforded by Nomex IIIA. Benchtop experiments

were developed to simulate the conditions firefighters face. Based on a three-factor and three-level Box-Behnken model, a system equation was developed for the prediction of the protection time (t-protection). An analysis of variance was performed on the predicted values of t-protection obtained for all the experimental blocks in the design space, and the results confirmed that the system equation, along with the coefficients of linear interactive and square terms, is significant, allowing for the efficient use of the system equation in t-protection prediction. The accuracy of the system equation was checked by comparing t-protection and t\*-protection which revealed a linear relationship with a high correlation coefficient ( $R^2 = 0.975$ ). To analyze the effects of the independent variables on protection time, 3D surface response curves were created. The nature of the surfaces was critically analyzed by developing regression equations for the contours and the diagonals. The findings of this chapter motivate further research into the effect of repeated radiative heat exposure (low, medium, and high) on the protective performance of the outer layer of fire protective clothing.

Analysis of the effect of repeated radiative heat exposure (Low, medium and high) on the protective performance of the outer layer of fire protective clothing is more important. Four independent variables were considered: fabric material, pick density, exposure cycles and heat flux intensity. In addition to radiative protective performance (RPP), changes in the thickness, shrinkage, and mass were also tracked. An evaluation of properties was conducted at the end of each cycle to determine the effects of the heat flux (21, 42 and 63 kW/m<sup>2</sup>), number of exposure cycles (from one to five) and effects of each attribute. Two types of fabrics were used in this study, one made with meta-aramid (Nomex® IIIA) yarns in both warp and weft (type-A fabric), and the other made with Nomex® IIIA (warp) and para-aramid (Kevlar®)(weft) (type-B fabric). Type-A fabrics displayed a greater degree of differentiation in their properties than Type-B fabrics. A regression analysis conclusively

established that pick density significantly affects the performance of the outer layer of fire protective clothing.

The thermal protective performance rating (TPP) allows for the evaluation of thermal protection. Comfort levels were measured by testing the thermal resistance and water vapour transmission rate (WVTR) of a number of different woven fabric patterns and pick density. Thermal protective performance and comfort performance are more influenced by the fabric's weaving pattern (plain, twill 2/2, twill 3/1, satin, and honeycomb), picks per inch (40, 50, and 60), ply of yarn (2-ply and 3-ply), and type of material (meta-aramid and para-aramid). Thermal protection performance (TPP) of all fabrics were evaluated in response to high levels of heat flux ( $80 \pm 2 \text{ kW/m}^2$  or  $2 \text{ cal/cm}^2/\text{sec}$ ) of radiative heat and flame exposures (50:50). When compared to other weaves with the same number of picks per inch, the TPP rating of honeycomb weave was found to be high. The TPP rating and fabric areal density are both decreased when changing from three to two yarn plies, but the percentage loss in areal density is high. Honeycomb woven fabrics had good thermal resistance when compared to fabrics with a different weaving pattern. The TPP rating and thermal resistance improved while the WVTR decreased as the number of fabric picks per inch increased across the board for the studied woven structures. The multiple linear regression equation (model) is significant for the TPP rating.

One study aimed to analysis the effects of structural configurations and thread density on the mechanical properties [bursting strength, tensile properties (breaking strength, breaking elongation and fabric assistance), tear strength and seam properties (unsewn fabric breaking strength, sewn fabric breaking strength and seam efficiency)] of the outer shell fabric used in protective clothing of firefighters. The specimen fabric produced with Nomex IIIA yarns, was woven with twill 2/2, 5 end sateen and honeycomb weaves. All samples have the same end density of 42, but the pick density was adjusted to five different levels (40,

46, 52, 58 and 64). The empirical relation between the mechanical properties of fabric and weave structure was established with the help of regression equations. The effect of pick density and weave structures on the mechanical properties of these fabrics was examined using ANOVA statistical analysis. It was observed that for the same picks per inch, weft way tensile strength, elongation and fabric assistance of honeycomb woven fabrics were better as compared to the fabrics of other patterns. At the same picks per inch, sateen woven fabrics have higher tear strength and seam performance than other weaves.

The horizontal and vertical orientation of fabrics and moisture content were used to enhance the performance of fire protective clothing. Using surface response methodology, a multi-parametric experimental equation is obtained for calculating  $H_T$  and  $V_T$  for horizontal and vertical orientation respectively and creating the relationship between process parameters such as moisture content ( $M$ : 0% to 100%), heat flux ( $Q$ : 21 to 63 kW/m<sup>2</sup>) and microclimate thickness ( $d$ : 0 to 25 mm). A good correlation coefficient ( $R^2 = 0.973$  and  $0.967$  for horizontal and vertical orientation respectively) between the two sets of estimates are observed. As fabrics absorb more moisture, a water film forms around solid fibers. As a result, solid fibers cannot absorb more water, leaving free water between them. In dry materials, heat is transferred through solid fibers and air voids. Water has a higher heat conductivity than air.

## सारांश

सक्रिय कार्यस्थल में प्रचलित तापीय वातावरण को तीन प्रकार की आग परिभाषित करती है - नियमित, खतरनाक और आपातकालीन। एक ऑपरेशन के दौरान अग्निशामकों को कई चुनौतियों का सामना करना पड़ता है, जिससे उनका काम जोखिम भरा और संभावित रूप से खतरनाक हो जाता है। अग्निशामकों द्वारा पहने जाने वाले सूट या अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों के बहुपरत संयोजन होते हैं जिनमें बाहरी परत (शेल फैब्रिक), एक मध्य परत (नमी अवरोधक), एक आंतरिक परत (थर्मल लाइनर) और एक फेस फैब्रिक शामिल होता है। अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों का उद्देश्य अग्निशामकों को आग और अन्य खतरों से सुरक्षित रखना है। अग्निशामकों और इसी तरह की स्थितियों में अन्य लोगों द्वारा पहने जाने वाले सुरक्षात्मक कपड़ों के बारे में उनकी विशेषता जानने के लिए कई जांच की गई हैं। क्योंकि बाहरी परत अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की पहली परत है इसलिए इसकी भूमिका और महत्व अधिक है क्योंकि यह आग, आघात और जहरीले धुएं से बचाती है, और इसलिए इसमें उच्च ऊष्मा प्रतिरोध और यांत्रिक गुण होने चाहिए। अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के गुण (सुरक्षात्मक प्रदर्शन, यांत्रिक और आराम) और स्थायित्व (बार-बार आग के संपर्क के दौरान) मोटाई, क्षेत्र घनत्व, सरंधता, नमी की मात्रा ऊष्मा प्रवाह, और वायु अंतराल या माइक्रोकलाइमेट मोटाई (त्वचा और कपड़े के बीच की दूरी) ), क्षैतिज और ऊर्ध्वाधर अभिविन्यास और संरचना (बुनाई डिजाइन) पर निर्भर करते हैं। अग्नि सुरक्षा कपड़ों की बाहरी परत पर शोध का वर्तमान स्तर एक अध्ययन में सभी आवश्यक गुणों का वर्णन करने में असमर्थ हो सकता है। परिणामस्वरूप, अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के प्रदर्शन लक्षण वर्णन में सुधार के लिए बाहरी परत का व्यापक और सामूहिक अध्ययन अधिक महत्वपूर्ण है। इसलिए, इस शोध का उद्देश्य अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के प्रदर्शन लक्षण वर्णन की बेहतर समझ को विकसित करना है।

मल्टीलेयर टर्नआउट सूट की बाहरी परत पर ऊष्मा प्रवाह की तीव्रता, पिक घनत्व और कपड़े और सेंसर के बीच की दूरी के प्रभावों की जांच की गई। Nomex IIIA का चयन इसके द्वारा प्रदान की जाने वाली बेहतर तापीय सुरक्षा के कारण किया गया था। अग्निशामकों को जिन स्थितियों का सामना करना पड़ता है उनका अनुकरण करने के लिए प्रयोगशाला उपकरण विकसित किए गए थे। तीन-कारक और तीन-स्तरीय बॉक्स-बेनेकेन मॉडल के आधार पर सुरक्षात्मक समय की भविष्यवाणी के लिए एक सिस्टम समीकरण विकसित किया गया था।

डिज़ाइन स्थान में सभी प्रयोगात्मक ब्लॉकों के लिए प्राप्त सुरक्षात्मक समय के अनुमानित मूल्यों पर भिन्नता का विश्लेषण किया गया था, और परिणामों ने पुष्टि की कि सिस्टम समीकरण, रैखिक इंटरैक्टिव और वर्ग शर्तों के गुणांक के साथ महत्वपूर्ण हैं, जो अनुमति देता है कि सुरक्षात्मक समय भविष्यवाणी में सिस्टम समीकरण का कुशल उपयोग उपयुक्त है। सिस्टम समीकरण की सटीकता की जाँच  $t$ - सुरक्षात्मक समय और  $t^*$ - सुरक्षात्मक समय की तुलना करके की गई, जिसमें उच्च सहसंबंध गुणांक ( $R^2 = 0.975$ ) के साथ एक रैखिक संबंध का पता चला। सुरक्षा समय पर स्वतंत्र चर के प्रभावों का विश्लेषण करने के लिए, थ्री डी सतह प्रतिक्रिया वक्र बनाए गए थे। आकृति और विकर्णों के लिए प्रतिगमन समीकरण विकसित करके सतहों की प्रकृति का गंभीर विश्लेषण किया गया। इस अध्याय के निष्कर्ष अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के सुरक्षात्मक प्रदर्शन पर बार-बार विकिरण ताप जोखिम (कम, मध्यम और उच्च) के प्रभाव पर आगे के शोध को प्रेरित करते हैं।

अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के सुरक्षात्मक प्रदर्शन पर बार-बार विकिरण ताप जोखिम (कम, मध्यम और उच्च) के प्रभाव का विश्लेषण अधिक महत्वपूर्ण है। चार स्वतंत्र चर पर विचार किया गया: कपड़े की सामग्री, पिक घनत्व, एक्सपोजर चक्र और ऊष्मा प्रवाह की तीव्रता। विकिरण सुरक्षात्मक प्रदर्शन (आरपीपी) के अलावा, मोटाई, सिकुड़न और द्रव्यमान में परिवर्तन की भी जांच की गयी। ऊष्मा प्रवाह (21, 42 और 63 किलोवाट / मीटर<sup>2</sup>) के प्रभाव, एक्सपोजर चक्र की संख्या (एक से पांच तक) और प्रत्येक विशेषता के प्रभाव को निर्धारित करने के लिए प्रत्येक चक्र के अंत में गुणों का मूल्यांकन किया गया था। इस अध्ययन में दो प्रकार के कपड़ों का उपयोग किया गया, एक ताना और बाना (टाइप-ए फैब्रिक) दोनों में मेटा-एरामिड (नोमेक्स IIIA) यार्न से बना, और दूसरा नोमेक्स IIIA (ताना) और पैरा-एरामिड या केवलार (बाना) (टाइप-बी फैब्रिक)। टाइप-ए कपड़ों ने टाइप-बी कपड़ों की तुलना में अपने गुणों में अधिक भिन्नता प्रदर्शित की। एक प्रतिगमन विश्लेषण ने निर्णायक रूप से स्थापित किया कि पिक घनत्व अग्नि सुरक्षात्मक कपड़ों की बाहरी परत के प्रदर्शन को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करता है।

थर्मल सुरक्षात्मक प्रदर्शन (टीपीपी) रेटिंग थर्मल सुरक्षा के मूल्यांकन की अनुमति देती है। कई अलग-अलग बुने हुए कपड़े के पैटर्न और पिक घनत्व के थर्मल सुरक्षात्मक प्रदर्शन (टीपीपी) रेटिंग, थर्मल प्रतिरोध और जल वाष्प संचरण दर (डब्ल्यूवीटीआर) का परीक्षण करके आराम के स्तर को मापा गया था। थर्मल सुरक्षात्मक

प्रदर्शन और आरामदायक कपड़े के बुनाई पैटर्न (सादे, टवील 2/2, टवील 3/1, साटीन और हनीकॉम्ब), प्रति इंच पिक्स (40, 50, और 60), धागो के मोडो (2-प्लाई और 3-प्लाई ) और सामग्री का प्रकार (मेटा-एरामिड और पैरा-एरामिड) से अधिक प्रभावित होते हैं। सभी कपड़ों के थर्मल सुरक्षा प्रदर्शन (टीपीपी) रेटिंग का मूल्यांकन ऊष्मा प्रवाह के उच्च स्तर ( $80 \pm 2$  किलोवाट / मीटर<sup>2</sup> या 2 कैलोरी/सेमी<sup>2</sup>/सेकंड) विकिरण ऊष्मा और विकिरण: आग (50:50) के एक्सपोजर (50:50) के जवाब में किया गया था। जब प्रति इंच समान संख्या में पिक्स के साथ अन्य बुनाई की तुलना की गई, तो हनीकॉम्ब बुनाई की टीपीपी रेटिंग अधिक पाई गई। तीन से दो यार्न प्लाई में बदलने पर टीपीपी रेटिंग और फैब्रिक एरिया घनत्व दोनों कम हो जाते हैं, लेकिन एरिया घनत्व में प्रतिशत हानि अधिक होती है। विभिन्न बुनाई पैटर्न वाले कपड़ों की तुलना में हनीकॉम्ब बुने हुए कपड़ों में अच्छा थर्मल प्रतिरोध होता है। टीपीपी रेटिंग और थर्मल प्रतिरोध में सुधार हुआ जबकि डब्ल्यूवीटीआर में कमी आई क्योंकि अध्ययन किए गए बुने हुए कपड़ों के लिए प्रति इंच धागो की संख्या में वृद्धि हुई। टीपीपी रेटिंग के लिए एकाधिक रैखिक प्रतिगमन समीकरण (मॉडल) महत्वपूर्ण है।

एक अन्य अध्ययन का उद्देश्य अग्निशामकों के सुरक्षात्मक कपड़ों में उपयोग किए जाने वाले बाहरी आवरण के यांत्रिक गुणों पर संरचनात्मक विन्यास और धागो की संख्या के प्रभावों का विश्लेषण करना था [फटने की ताकत, तन्य गुण (तोड़ने की ताकत, तोड़ने की लम्बाई और कपड़े की सहायता), फाड़ने की ताकत और सिलाई गुण (बिना सिलने वाले कपड़े को फाड़ने की ताकत, सिले हुए कपड़े को फाड़ने की ताकत और कपड़े की सीम दक्षता)]। नोमेक्स IIIA धागे से निर्मित कपड़ा, टवील 2/2, साटीन और हनीकॉम्ब बुनाई के साथ बुना गया था। सभी कपड़ों में ताना घनत्व समान (42) है, लेकिन बाना घनत्व को पांच अलग-अलग स्तरों (40, 46, 52, 58 और 64) पर समायोजित किया गया था। प्रतिगमन समीकरणों की सहायता से कपड़े और बुनाई संरचना के यांत्रिक गुणों के बीच अनुभवजन्य संबंध स्थापित किया गया था। इन कपड़ों के यांत्रिक गुणों पर बाना घनत्व और बुनाई संरचनाओं के प्रभाव की जांच एनोवा सांख्यिकीय विश्लेषण का उपयोग करके की गई थी। यह देखा गया कि समान बाना घनत्व के लिए, हनीकॉम्ब बुनाई के बुने हुए कपड़ों की बाने की तन्य शक्ति, बढ़ाव और फैब्रिक सहायता अन्य पैटर्न के कपड़ों की तुलना में बेहतर थी। प्रति इंच समान बाना घनत्व पर, साटीन बुनाई के बुने हुए कपड़ों में अन्य बुनाई की तुलना में अधिक फाड़ने की शक्ति और सीम दक्षता होता है।

अग्नि सुरक्षा कपड़ों के प्रदर्शन को बढ़ाने के लिए कपड़ों के क्षैतिज और ऊर्ध्वाधर अभिविन्यास और नमी की मात्रा के प्रभावों का अध्ययन किया गया था। सतह प्रतिक्रिया कार्यप्रणाली का उपयोग करते हुए, क्षैतिज और ऊर्ध्वाधर अभिविन्यास के लिए क्रमशः क्षैतिज और लंबवत सुरक्षात्मक समय की गणना करने और नमी की मात्रा (एम: 0% से 100%), ऊष्मा प्रवाह (क्यू: 21 से 63 किलोवाट / मीटर<sup>2</sup>) और माइक्रॉक्लाइमेट मोटाई (डी: 0 से 25 मिमी) जैसे प्रक्रिया मापदंडों के बीच संबंध बनाने के लिए एक बहु-पैरामीट्रिक प्रयोगात्मक समीकरण प्राप्त किया। अनुमानों के दो सेटों के बीच एक अच्छा सहसंबंध गुणांक (क्षैतिज और ऊर्ध्वाधर अभिविन्यास के लिए क्रमशः आर<sup>2</sup> = 0.973 और 0.967) देखा गया है। जैसे-जैसे कपड़े अधिक नमी सोखते हैं, ठोस रेशों के चारों ओर पानी की फिल्म बन जाती है। परिणामस्वरूप, ठोस रेशे अधिक पानी को अवशोषित नहीं कर पाते, जिससे उनके बीच मुक्त पानी रह जाता है। शुष्क सामग्रियों में, ऊष्मा का स्थानांतरण ठोस रेशों और वायु रिक्तियों के माध्यम से होता है। पानी में हवा की तुलना में अधिक तापीय चालकता होती है।

# CONTENTS

	Page No.
Certificate	i
Acknowledgement	iii
Abstract	v
Contents	ix
List of Figures	xvii
List of Tables	xxi
<b>Chapter 1: Introduction and Objectives</b>	
1.1 Introduction	1
1.2 Motivation	6
1.3 Objectives	7
<b>Chapter 2: Literature review</b>	
2.1 Introduction	9
2.2 Thermal environment	9
2.3 Hazards in thermal environment	10
2.3.1 Thermal hazards	10
2.3.2 Smoke hazards	10
2.3.3 Physiological Hazards	11
2.3.4 Psychological Hazards	11
2.3.5 Blood borne and pathogens	11
2.3.6 Chemical hazards	12
2.3.7 Chronic illnesses	12
2.4 Fire protective clothing	12

2.4.1 Materials and their roles in fire protective clothing	13
2.4.2 Durability of fire protective clothing	14
2.4.2.1 Factors affecting the durability of fire protective clothing	15
2.4.2.1.1 Weathering	15
2.4.2.1.2 Light	15
2.4.2.1.3 Heat	16
2.4.2.1.4 Laundering	16
2.4.2.1.5 Heat exposure	17
2.4.3 Mechanical properties of fire protective clothing	19
2.4.3.1 Factors influencing mechanical properties	20
2.4.3.2 Tensile strength	21
2.4.3.3 Tearing strength	23
2.4.3.4 Bursting strength	25
2.4.3.5 Seam breaking strength	25
2.4.4 Comfort Properties	25
2.4.4.1 Thermo-physiological wearing comfort	26
2.4.4.2 Skin sensorial wear comfort	29
2.4.4.3 Ergonomic wear comfort	29
2.4.4.4 Psychological comfort	29
2.5 Thermal Protective performance	30
2.5.1 Enhancement of thermal protective performance with the help of airgaps	37
2.6 Summary	39

## **Chapter 3: Effect of different parameters on the protective performance of the outer layer of fire protective clothing**

3.1 Introduction	41
3.2 Materials and methods	41
3.2.1 Materials	41
3.2.2 Selection of fabric for outer-shell	42
3.2.2 Methods	43
3.2.2.1 Physical properties	43
3.2.2.1.1 Thread Density	43
3.2.2.1.2 Areal density	43
3.2.2.1.3 Thickness	43
3.2.2.1.4 Air permeability	43
3.2.2.1.5 Cover factor	43
3.2.2.2 Radiative protective performance	44
3.2.2.3 Evaluation of protection time for fire protective clothing	46
3.2.2.4 Box-Behnken Design of Experiment	47
3.3 Results and Discussions	48
3.3.1 Physical properties	48
3.3.2 Box-Behnken model	49
3.3.3 Data reduction technique	53
3.3.4 Two-Factor Response	55
3.3.4.1 Analysis of P-Q surface	55
3.3.4.2 Analysis of P-d surface	57
3.3.4.3 Analysis of Q-d surface	60
3.4 Summary	63

## **Chapter 4: Study on the effect of repeated radiative heat exposure (low, medium and high) on protective performance of the outer layer of fire protective clothing**

4. 1 Introduction	65
4.2 Materials and Methods	66
4.2.1 Materials	66
4.2.1 Methods	67
4.2.1.1 Physical Properties	67
4.2.1.2 Radiative protective performance (RPP)	68
4.2.1.3 Analysis of Raw Data	68
4.3 Results and discussion	70
4.3.1 Physical properties	70
4.3.2 Analysis of change in thickness	71
4.3.2.1 Effects of thermal exposure on fabric thickness at $Q= 21$ and $42 \text{ kW/m}^2$	72
4.3.2.2 Effects of thermal exposure on thickness of fabrics at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$	73
4. 3.3 Analysis of change in surface area	74
4. 3.3.1 Effects of thermal exposure on shrinkage of fabrics at $Q = 21$ and $42 \text{ kW/m}^2$	74
4. 3.3.2 Effects of thermal exposure on shrinkage of fabrics at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$	75
4. 3.4 Analysis of change in Mass	76
4. 3.4.1 Effects of thermal exposure on mass of fabrics at $Q = 21$ and $42 \text{ kW/m}^2$	76
4.3.4.2 Effects of thermal exposure on mass of fabrics at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$	78
4. 3.5 Analysis of change in RPP ratings	79
4.4 Summary	81

**Chapter 5: Study on the effect of woven structure and constructional parameters on the protective and comfort performance of outer layer of fire protective clothing**

5.1 Introduction	83
5.2 Materials and Methods	84
5.2.1 Materials	84
5.2.2 Methods	86
5.2.2.1 Physical properties	86
5.2.2.2 Thermal protective performance	86
5.2.2.3 Comfort properties	87
5.2.2.3.1 Thermal resistance	87
5.2.2.3.2 Water Vapor Transmission Rate	87
5.2.2.4 Statistical analysis	87
5.3 Results and discussion	88
5.3.1 Physical Properties	88
5.3.2 Thermal protective performance	89
5.3.3 Comfort Properties	95
5.3.3.1 Thermal resistance	95
5.3.3.2 Water vapour transmission rate	100
5.4 Summary	104

**Chapter 6: Analysis of the effect of constructional parameters and type of structure on the mechanical performance of outer layer of fire protective clothing**

6.1 Introduction	107
6.2 Materials and Methods	109
6.2.1 Materials	109
6.2.2 Methods	109
6.2.2.1 Physical properties	109

6.2.2.2 Mechanical properties	110
6.2.2.3 Statistical Analysis	111
6.3 Results and Discussions	112
6.3.1 Physical properties	112
6.3.2 Mechanical properties	113
6.3.2.1 Bursting strength	113
6.3.2.2 Tensile properties	115
6.3.2.2.1 Breaking strength	115
6.3.2.2.2 Breaking elongation	118
6.3.2.2.3 Fabric assistance	121
6.3.2.3 Tear strength	123
6.3.2.4 Seam properties	126
6.3.2.4.1 Unsewn fabric breaking strength	126
6.3.2.4 .2 Sewn fabric breaking strength	128
6.3.2.4.3 Seam efficiency	130
6.4 Summary	133

**Chapter 7: Study on the effect of direction of flame exposure and moisture content on thermal protective performance of outer layer of fire protective clothing**

7.1 Introduction	135
7.2 Materials and methods	136
7.2.1 Materials	136
7.2.2 Methods	136
7.2.2.1 Physical Properties	136
7.2.2.2 Flame Protective Performance (FPP)	137
7.3 Results and Discussion	139
7. 3.1 Physical Properties	139

7.3.2 Box-Behnken DOE	139
7.3.3 Response surface Plot analysis	142
7.3.4 Effect of moisture content at low level and high level of heat flux and microclimate thickness	148
7. 4 Summary	152

## **Chapter 8: Conclusions and future scope of work**

8.1 Conclusions	153
8.2 Future scope of work	155

## **References**

## **Bio-Data**

## List of Figures

<b>Caption</b>	<b>Name</b>	<b>Page No.</b>
Figure 1.1	Various layers of fire protective clothing	1
Figure 3.1	Schematic diagram showing the various components of radiative protective performance Tester	45
Figure 3.2	Stoll criteria curve (— blue) and experimental plot (— red) using cumulative heat as a function of time	46
Figure 3.3	Location of points corresponding to process variables in the design space of a three-factor Box-Behnken design	47
Figure 3.4	Predicted protection time v/s actual protection time	50
Figure 3.5	Analysis of P-Q surface (a) Output response t- protection for factors P and Q	56
Figure 3.6	Analysis of P-d surface (a) Output response t- protection for factors P and d	59
Figure 3.7	Analysis of Q-d surface (a) Output response t- protection for factors Q and d	61
Figure 4.1	Schematic diagram of sample holder showing the position of markings on test specimens prepared for the estimation of shrinkage	68
Figure 4.2	Change in thickness of type-A fabric as a percentage of the initial thickness at (a) $Q = 21\text{kW/m}^2$ and (b) $Q = 42\text{ kW/m}^2$	72
Figure 4.3	Change in thickness of fabric as a percentage of the initial thickness at $Q = 63\text{ kW/m}^2$ for (a) type-A fabric, (b) type-B fabric	73
Figure 4.4	Change in shrinkage of type-A fabric at (a) $Q = 21\text{kW/m}^2$ and (b)	75

$$Q = 42 \text{ kW/m}^2$$

Figure 4.5	Change in shrinkage of fabric at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$ for (a) type-A fabric, (b) type-B fabric	76
Figure 4.6	Change in mass loss of type-A fabric as a percentage of the initial mass at (a) $Q = 21 \text{ kW/m}^2$ and (b) $Q = 42 \text{ kW/m}^2$	77
Figure 4.7	Change in mass loss of fabric as a percentage of the initial mass at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$ for (a) type-A fabric, (b) type-B fabric	78
Figure 4.8	Change in RPP of fabric at $Q = 63 \text{ kW/m}^2$ for (a) type-A fabric, (b) type-B fabric	80
Figure 5.1	Schematic diagram and the component of thermal protective performance tester	86
Figure 5.2	Effect of twill weave on (a) TPP rating and (b) maximum temperature	89
Figure 5.3	Effect of different types of weave on (a) TPP rating and (b) maximum temperature	90
Figure 5.4	Effect of ply on (a) TPP rating and (b) maximum temperature	92
Figure 5.5	Effect of type of material on TPP Rating and maximum temperature	93
Figure 5.6	Effect of twill weave on the thermal resistance of fabric	95
Figure 5.7	Effect of different types of weave on the thermal resistance of fabric	96
Figure 5.8	Effect of ply on the thermal resistance of fabric	97
Figure 5.9	Effect of type of material on the thermal resistance of fabric	97
Figure 5.10	Effect of twill weave on Water vapor transfer rate	100
Figure 5.11	Effect of different types of weave on Water vapor transfer rate	101
Figure 5.12	Effect of ply on Water vapor transfer rate	101
Figure 5.13	Effect of type of material on Water vapor transfer rate	102

Figure 6.1	Effect of picks per inch and fabric structure on bursting strength	114
Figure 6.2	Effect of picks per inch and fabric structure on breaking strength in warp direction	115
Figure 6.3	Effect of picks per inch and fabric structure on breaking strength in weft direction	116
Figure 6.4	Effect of picks per inch and fabric structure on breaking elongation in the warp direction	118
Figure 6.5	Effect of picks per inch and fabric structure on breaking elongation in the weft direction	119
Figure 6.6	Effect of picks per inch and fabric structure on fabric assistance in warp direction	121
Figure 6.7	Effect of picks per inch and fabric structure on fabric assistance in weft direction	122
Figure 6.8	Effect of picks per inch and fabric structure on tear strength in warp direction	124
Figure 6.9	Effect of picks per inch and fabric structure on tear strength in weft direction	124
Figure 6.10	Effect of picks per inch and fabric structure on unsewn breaking strength in the warp direction	126
Figure 6.11	Effect of picks per inch and fabric structure on unsewn breaking strength in the weft direction	127
Figure 6.12	Effect of picks per inch and fabric structure on sewn breaking strength in the warp direction	128
Figure 6.13	Effect of picks per inch and fabric structure on sewn breaking strength in the weft direction	129

Figure 6.14	Effect of picks per inch and fabric structure on seam efficiency in warp direction	131
Figure 6.15	Effect of picks per inch and fabric structure on seam efficiency in weft direction	131
Figure 7.1	Schematic diagram of various components of Horizontal FPP Tester	138
Figure 7.2	Schematic diagram of various components of Vertical TPP tester	139
Figure 7.3	Correlation between predicted and actual protection time of Horizontal (A) and Vertical (B) exposure	142
Figure 7.4	Output response of horizontal orientation (A) and vertical orientation (B) of flame exposure on protection time in the middle level of moisture content (M)	144
Figure 7.5	Output response of horizontal orientation (A) and vertical orientation (B) of flame exposure on protection time in the middle level of heat flux (Q)	145
Figure 7.6	Output response of horizontal orientation (A) and vertical orientation (B) of flame exposure on protection time in the middle level of microclimate thickness (d)	146
Figure 7.7	Effect of moisture content and correlation of protection time with the moisture content at $Q=21$ and $d=0$	148
Figure 7.8	Effect of moisture content and correlation of protection time with the moisture content at $Q=21$ and $d=25$	149
Figure 7.9	Effect of moisture content and correlation of protection time with the moisture content at $Q=63$ and $d=0$	149
Figure 7.10	Effect of moisture content and correlation of protection time with moisture content at $Q = 63$ and $d = 25$	150

## List of Tables

<b>Caption</b>	<b>Name</b>	<b>Page No.</b>
Table 2.1	Important findings related to comfort properties	27
Table 2.2	Evaluation of the thermal protective performance of fire protective clothing under different levels of heat exposure	33
Table 3.1	Box-Behnken design space with three process parameters at three levels	48
Table 3.2	Physical properties of fabrics	49
Table 3.3	ANOVA results of the Response model	51
Table 3.4	Coded and actual values for output response as a function of protection time 't'	52
Table 3.5	Computed values of t-protection under different experimental conditions	54
Table 3.6	Sub equations for the P-Q surface at d= -1, 0 and 1 levels	55
Table 3.7	Sub equations for the P-d surface at Q = -1, 0 and 1 levels	58
Table 3.8	Sub equations for the Q-d surface at P = -1, 0, and 1 levels	60
Table 4.1	Characteristics of type-A and type-B fabrics	67
Table 4.2	Initial physical properties and RPP rating of samples	71
Table 4.3	Experimentally determined values of mass loss (%), Shrinkage (%) and change in thickness (%) at Q = 63 kW/m <sup>2</sup>	71

Table 5.1	Specification of fabric samples	85
Table 5.2	Physical properties of all woven fabrics	88
Table 5.3	Coefficient of correlation value for linear equation between TPP rating and physical properties and maximum temperature	94
Table 5.4	ANOVA of the multiple linear regression equation	94
Table 5.5	Coefficient of correlation value for linear equation between thermal resistance and physical properties	99
Table 5.6	ANOVA of the multiple linear regression equation	99
Table 5.7	Coefficient of correlation value for linear equation between water vapour transmission rate and physical properties	103
Table 5.8	ANOVA of the multiple linear regression equation	103
Table 6.1	ASTM standards for the measurement of mechanical properties	110
Table 6.2	Physical properties of fabric samples	112
Table 6.3	Average float length and weave interlacing coefficient of different woven structures	113
Table 6.4	Two-factor ANOVA analysis of bursting strength	114
Table 6.5	Two-factor ANOVA analysis of breaking strength	116
Table 6.6	Two-factor ANOVA analysis of breaking elongation	119
Table 6.7	Two-factor ANOVA analysis of fabric assistance	122

Table 6.8	Two-factor ANOVA analysis of tear strength	125
Table 6.9	Two-factor ANOVA analysis of unsewn fabric breaking strength	127
Table 6.10	Two-factor ANOVA analysis of sewn fabric breaking strength	129
Table 6.11	Two-factor ANOVA analysis of seam efficiency	132
Table 7.1	Three process parameters and levels of Box-Behnken design	140
Table 7.2	Output response of flame exposure in horizontal and vertical orientation	141
Table 7.3	Values of protection time at all possible combinations of process parameter	143