DESIGN AND DEVELOPMENT OF FABRIC ASSEMBLIES FOR EXTREME COLD WEATHER CLOTHING

GNANAUTHAYAN. G

DEPARTMENT OF TEXTILE TECHNOLOGY

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2019

DESIGN AND DEVELOPMENT OF FABRIC ASSEMBLIES FOR EXTREME COLD WEATHER CLOTHING

by

GNANAUTHAYAN. G

DEPARTMENT OF TEXTILE TECHNOLOGY

Submitted

In fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2019

Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**Design and development of fabric assemblies for extreme cold weather clothing**" being submitted **by Mr. Gnanauthayan. G.**, 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. Gnanauthayan. G. has worked under our guidance and supervision and fulfilled the requirements for the submission of the thesis.

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

Dr. R. S. Rengasamy
Professor
Department of Textile Technology
Indian Institute of Technology
New Delhi, 110016 India

Dr. V.K. Kothari
Professor
Department of Textile Technology
Indian Institute of Technology
New Delhi, 110016 India

Acknowledgements

I would like to express my deepest gratitude to my supervisors, Prof. R. S. Rengasamy and Prof. V. K. Kothari, Department of Textile Technology, IIT Delhi, for their invaluable guidance, whole-hearted supervision and endless encouragement throughout tenure of this work. They always gave me the freedom to pursue my own interests and provided me with insightful suggestions and support in developing an independent thinking and research skills. They have been exceptional mentor and I appreciate both our professional and personal discussions over the years. The knowledge and wisdom I have gained from them will forever guide me in entire life.

I owe an exceptional gratitude to my Student Research Committee (SRC) members, Prof. R. Alagirusamy, and Prof. Apurba Das, Department of Textile Technology and Prof. B. Premachandran, Department of Mechanical Engineering, for their kind and useful suggestions throughout the research work.

I thank the whole Textile staff especially Mr. Rajkumar Tejania, Mr. Varun Saxena, Mr. B. Biswal, Mr. Pratap Singh, Mr. Fakirchand, Mr. Rishipal, Mr. M. Kundu and Mr.Vikas Khatkar – for their help and support during this research work. In my daily routine research work, I have been blessed with a friendly and cheerful group of friends. I convey my special thanks to Rajat Kumar Baldua, Renuka, Nabo Kumar Barman, Vikrant Dhupade, Rosina Begam, Shabaridhran, Sockalingam, Vijay Goud, Rahul Gadkari, Ghanshyam, Krishnasamy, Sanchi, Swathi, Sanskrita, Srikrishna, Vikas Singh, Suprio Chakroborty, Bipin Kumar, Niharika, Ashwini Dash, Navdeep, Mahadev, Prabakaran, Manjunath, Sathiyaseelan, Premnath, Muthukumar, Karthikeyan, Praveen Kumar, Baranidharan, Venkatesan, Sathish Kannan, Arun, Manikandan, Sabapathy and many others, for their warm company and unwavering support in my ups and downs at various stages of my Ph.D. work made my stay at IIT pleasant and memorable.

There is no word to express my love and gratitude to my family who have supported and encouraged me through this journey. My sincere gratitude to my parents, younger brother and other family members, who always supported me consistently in the research duration.

My heartfelt thanks to my wife Priyanka and son Agastya for their everlasting love and sacrifices, which sustained my interest in research and motivated me towards the successful completion of this research work.

Gnanauthayan. G

Abstract

The extreme cold weather clothing is essential for survival in sub-zero temperatures with uncertain extremities such as wind, rain, snow etc. The main purpose of this research work is to explore a light-weight thermal insulation layer which could provide optimum insulation for the wearer at sub-zero temperatures. The required thermal insulation for a wearer is highly dependent on his/her metabolic heat protection, ambient temperature and other factors such as wind chill. It is also necessary to consider the various heat transfer modes and how they are affected by fabric structure and constituent fibres before designing the insulation layer. An insulation layer having high porosity provides space for air and in turn lower the heat transfer by conduction. However, heat transfer by convection and radiation might increase. The heat loss by convection and radiation would be dominate in windy and low ambient temperature respectively.

In this work the effect of nonwovens' structural parameters such as thickness, areal density, porosity and fibre parameters such as fibre linear density and cross-section on thermal resistance have been studied. Polyester fibres of solid and hollow cross-section were used to prepare thermally bonded nonwovens. Thermal resistance of nonwovens increases with decrease in fibre denier. For a given porosity of nonwoven, the finer fibre nonwovens have smaller mean flow pore size, entrapping more air, thus reducing radiation heat loss. The heat transfer through hollow fibre nonwovens having very high porosities is dominated by radiation and natural convection.

In the case of multilayer nonwovens, finer fibres must be kept at the outer most layer. If the coarser fibres are kept at the outer most layer, then the large open spaces in that layer allows air to move freely thus, reducing the insulating capacity. Finer fibre nonwovens

lose thermal resistance considerably under compression. Multilayer nonwovens with at least two layers of hollow fibres gave higher thermal resistance under compression.

A one dimensional heat transfer model from human body to environment through a porous structure has been developed using a computational fluid dynamics software. The simulation shows that, fine fibres are effective in reducing the total heat loss. In the case of coarse fibre nonwovens, heat losses by convection and radiation are prominent.

An instrument is developed to evaluate heat transfer characteristics of multilayer layer fabrics at sub-zero temperatures. This instrument can be used to evaluate many thermo-physiological characteristics of fabrics and their ensembles such as heat loss, thermal resistance, and also survival time under various combination of metabolic rate, ambient temperatures and thermal resistance. The instrument is found to give good reproducibility in measuring heat loss and thermal resistance across all ambient temperature conditions.

The survival time is highly affected by the metabolic heat productions, ambient temperature and fabric thermal insulation. When the ambient temperature is -60 ºC, the hollow fibre nonwovens are prone to more heat loss than the solid fibre nonwovens. A study on measuring temperature gradients across multilayer ensemble has been conducted.

सार

अत्यधिक ठंड के मौसम के कपड़े अनिश्चित चरम सीमाओं जैसे कि हवा, बारिश, बर्फ आदि के साथ उप-शून्य तापमान में जीवित रहने के लिए आवश्यक हैं। इस शोध कार्य का मुख्य उद्देश्य एक हल्के वजन वाले थर्मल इन्सुलेशन परत का पता लगाना है, जो इष्टतम इन्सुलेशन प्रदान कर सकता है उप-शून्य तापमान पर पहनने वाला। एक पहनने वाले के लिए आवश्यक थर्मल इन्सुलेशन उसकी / उसके चयापचय गर्मी सुरक्षा, परिवेश के तापमान और हवा के झोंके जैसे अन्य कारकों पर अत्यधिक निर्भर है। इन्सुलेशन परत को डिजाइन करने से पहले विभिन्न गर्मी हस्तांतरण मोड और कपड़े की संरचना और घटक तंतुओं से कैसे प्रभावित होते हैं, इस पर विचार करना भी आवश्यक है। उच्च छिद्रों वाली एक इन्सुलेशन परत हवा के लिए स्थान प्रदान करती है और बदले में चालन द्वारा गर्मी हस्तांतरण कम करती है। हालांकि, संवहन और विकिरण द्वारा गर्मी हस्तांतरण बढ़ सकता है। संवहन और विकिरण द्वारा गर्मी का नुकसान क्रमशः हवा और कम परिवेश के तापमान पर हावी होगा।

इस कार्य में नॉनवेंस के संरचनात्मक मापदंडों जैसे मोटाई, क्षेत्र घनत्व, छिद्र और फाइबर मापदंडों जैसे फाइबर रैखिक घनत्व और थर्मल प्रतिरोध पर क्रॉस-सेक्शन के प्रभाव का अध्ययन किया गया है। ठोस और खोखले क्रॉस-सेक्शन के पॉलिएस्टर फाइबर का इस्तेमाल थर्माइज्ड बॉन्डेड नॉनवॉवन तैयार करने के लिए किया जाता था। फाइबर डेवियर में कमी के साथ नॉनवॉवन का थर्मल प्रतिरोध बढ़ता है। नॉनवॉवन के दिए गए पोरसिटी के लिए, महीन फाइबर नॉनवॉएन्स का मतलब छोटी तादाद में छिद्र का आकार होता है, जिससे अधिक हवा फंसती है, जिससे विकिरण गर्मी का नुकसान कम होता है। खोखले फाइबर nonwovens के माध्यम से गर्मी हस्तांतरण बहुत उच्च porosities होने विकिरण और प्राकृतिक संवहन द्वारा हावी है।

बहुपरत nonwovens के मामले में, महीन तंतुओं को सबसे बाहरी परत पर रखा जाना चाहिए। यदि मोटे रेशे को सबसे बाहरी परत पर रखा जाता है, तो उस परत में बड़े खुले स्थान हवा को इस प्रकार स्वतंत्र

रूप से स्थानांतरित करने की अनुमति देते हैं, जिससे इन्सुलेट क्षमता कम हो जाती है। महीन फाइबर nonwovens संपीड़न के तहत काफी थर्मल प्रतिरोध खो देते हैं। खोखले फाइबर के कम से कम दो परतों के साथ बहुपरत nonwovens ने संपीड़न के तहत उच्च तापीय प्रतिरोध दिया।

एक झरझरा संरचना के माध्यम से मानव शरीर से पर्यावरण तक एक आयामी गर्मी हस्तांतरण मॉडल एक कम्प्यूटेशनल तरल गतिकी सॉफ्टवेयर का उपयोग करके विकसित किया गया है। सिमुलेशन से पता चलता है कि, ठीक फाइबर कुल गर्मी के नुकसान को कम करने में प्रभावी हैं। मोटे फाइबर nonwovens के मामले में, संवहन और विकिरण द्वारा गर्मी के नुकसान प्रमुख हैं।

उप-शून्य तापमान पर बहुपरत परत वस्त्रों की गर्मी हस्तांतरण विशेषताओं का मूल्यांकन करने के लिए एक उपकरण विकसित किया गया है। इस उपकरण का उपयोग कपड़ों की कई थर्मो-फिजियोलॉजिकल विशेषताओं और उनके पहनावा जैसे गर्मी के नुकसान, थर्मल प्रतिरोध, और चयापचय दर, परिवेश के तापमान और थर्मल प्रतिरोध के विभिन्न संयोजन के तहत उत्तरजीविता के समय का मूल्यांकन करने के लिए किया जा सकता है। सभी परिवेश के तापमान की स्थिति में गर्मी के नुकसान और थर्मल प्रतिरोध को मापने के लिए यह उपकरण अच्छा प्रजनन क्षमता प्रदान करता है।

जीवित रहने का समय चयापचय गर्मी प्रस्तुतियों, परिवेश के तापमान और कपड़े थर्मल इन्सुलेशन से अत्यधिक प्रभावित होता है। जब परिवेश का तापमान -60 ^{o}C होता है, तो खोखले फाइबर नॉनवॉएन्स को ठोस फाइबर नॉनवॉएन्स की तुलना में अधिक गर्मी के नुकसान का खतरा होता है। बहुपरत कलाकारों की टुकड़ी में तापमान ढालों को मापने पर एक अध्ययन आयोजित किया गया है।

Contents

List of Figures

List of Tables