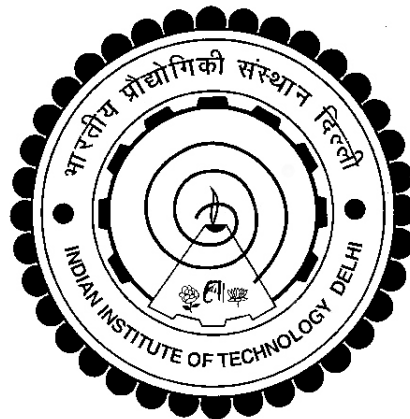


**DEVELOPMENT OF FLEXIBLE AEROGEL-EMBEDDED
BLANKET AS FIRE-RETARDANT, THERMAL AND
ACOUSTIC INSULATION FOR AEROSPACE APPLICATIONS**

JAYA SHARMA



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

APRIL 2024

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

**DEVELOPMENT OF FLEXIBLE AEROGEL-EMBEDDED
BLANKET AS FIRE-RETARDANT, THERMAL AND
ACOUSTIC INSULATION FOR AEROSPACE APPLICATIONS**

By

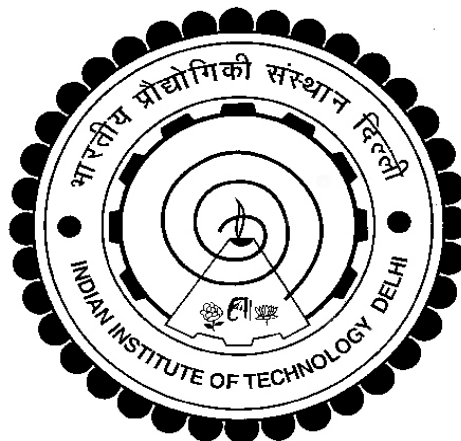
JAYA SHARMA

Department of Textile and Fiber Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy

to the



**DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBER ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

April 2024

Dedicated To My Parents

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**Development of Flexible Aerogel-embedded Blanket as Fire-Retardant, Thermal and Acoustic Insulation for Aerospace Applications**” being submitted by **Ms. Jaya Sharma**, Entry No. 2019TTZ8674 to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work carried out by her. Ms. Jaya Sharma has worked under my 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 for the award of any degree or diploma.

Prof. Javed N Sheikh

Department of Textile and Fiber Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016

Prof. B. K. Behera

Department of Textile and Fiber Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016

Date:

Place: New Delhi

ACKNOWLEDGEMENT

Words of appreciation and gratitude fall short of acknowledging the inspiring guidance, valuable suggestions, and constant encouragement provided by Prof. Javed N Sheikh and B. K. Behera 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 by my SRC members Prof. R.S. Rengasamy, Prof. Samrat Mukhopadhyay, Prof. Shivaji Gholap (Department of Chemistry), and other faculty members of the department.

I gratefully acknowledge the help and cooperation of the lab staff, especially Dr. Vikas Khatkar, Mr. Devendra Prasad Mishra and Mr. Rupesh Ganvir. I am thankful to all my friends especially, Dr. Sumit Vishwakarma, Ms. Lekhani Tripathi, Mr. Sandeep Olhan, Mr. Soumya Choudhary, Mr. Shubham Agnihotri, Ms. Shivangi Shukla, Ms. Sameer Behera, Mr. Prabhjot and Mr. Omender for their constant help, support, and encouragement. At last, I would like to thank everyone who contributed directly or indirectly during my research work.

I sincerely thank my mother, father, husband, brother, sister, and friends for their motivation, moral support, and understanding.

Date:

Jaya Sharma

Place: New Delhi

Abstract

Silica aerogels have emerged as a groundbreaking material in the 21st century, distinguished by their extraordinarily porous structure. These advanced materials boast a wide range of specific surface areas from 100 to 1600 m²/g and exhibit low refractive index ranging from 1.007 to 1.240. The versatility of silica aerogels extends to a multitude of uses, including their role as adsorbents for harmful substances, elements in sensor technology, dielectrics, filtration systems, detectors for Cherenkov radiation, energy absorption mechanisms, bases for catalysis, transporters, extraction agents and protective wear.

Aerogel encapsulates air within the chain of linked pearls and enables aerogels to contain between 80% and 99.8% air, making them among the lightest solids available and providing them with exceptional insulating properties. The air trapped in these voids significantly reduces heat transfer through both conduction and convection, contributing to aerogel's status as one of the best insulating materials available. The air inside the aerogel's pores is immobilized, limiting the movement of air molecules and thus reducing the ability of heat to transfer through the material. When the ambient air pressure is reduced at higher altitudes, the already low thermal conductivity of the trapped air decreases even further. Consequently, the thermal insulation effectiveness of aerogels is amplified in these conditions.

The effectiveness of aerogel in acoustic insulation is also influenced by its porosity, pore size distribution, and the density of the material. The ability to engineer aerogels with specific properties allows for the customization of the material to target specific sound frequencies, enhancing its utility across a broad range of applications. For instance, aerogels can be designed to have a higher performance in absorbing low, medium, or high-frequency sound waves, making them suitable for various environments, from industrial settings to residential and commercial buildings where noise reduction is desired.

Silicon dioxide, the constituent material of silica aerogels, is inherently non-flammable. Unlike organic materials, silica does not combust, nor does it support combustion. This makes silica aerogel a particularly effective material for fire resistance, as it can withstand exposure to high temperatures without igniting or degrading. This combination of attributes establishes silica aerogel as an exceptionally suitable material for scenarios demanding substantial thermal insulation and fire resistance capabilities.

However, the integration of silica aerogels into everyday uses faces limitations due to their inherent brittleness, which presents challenges in processing. The nanostructured network that gives aerogels their lightweight and insulating properties also makes them fragile and prone to cracking or shattering under mechanical stress. This brittleness restricts the use of aerogels in applications where materials may be subject to impact, vibration, or bending forces. Aerogel releases fine dust particles, which are fragments of the aerogel structure. This dust can be an irritant, posing health risks when inhaled and necessitating protective measures during handling and processing. The propensity to emit dust also complicates the integration of aerogels into environments where air purity is critical.

Many aerogels, especially silica-based ones, are naturally hydrophilic, meaning they readily absorb water. This absorption can significantly affect their structural integrity and insulating properties. In environments with high humidity or direct exposure to water, the performance of aerogels can be compromised unless they are properly treated or coated to repel water.

The manufacturing of aerogels involves sophisticated processes, including supercritical drying, which requires specialized equipment and conditions to avoid the collapse of the aerogel structure. The complexity of these processes contributes to higher production costs and limits the ability to produce aerogels on a large scale. Perhaps the most significant limitation to the widespread adoption of aerogels is their cost. The intricate manufacturing process, coupled with the need for specialized materials and equipment, makes aerogels significantly more

expensive than traditional insulating materials like polyurethane foam. The high cost is a barrier for many potential applications, especially where large quantities of material are required. Research has identified multiple methods to reinforce the mechanical properties of silica-based aerogels, including extending the ageing process, applying polymers for silica network cross-linking, introducing additional phases or flexible precursors to the silica sol, and incorporating strong covalent bonds between particles. Challenges associated with aerogels involve their propensity to emit dust, inherent attraction to water, risk of shrinking in volume, the need for complex processing, and importantly, their price, which is considerably higher than that of traditional materials such as polyurethane foam. Overcoming these obstacles is crucial for expanding the range of practical applications for these promising materials.

This thesis presents a detailed investigation into the synthesis of silica aerogels using sol-gel technology under ambient pressure drying, with a strong emphasis on optimizing the entire synthesis process. The research meticulously optimized catalytic conditions using both acid and base catalysts to fine-tune the hydrolysis and condensation reactions of the silica precursor, crucial for controlling the gelation process and achieving the desired structural integrity and porosity. Additionally, the molar concentration of the precursor to solvent was adjusted to influence the aerogel's microstructure directly, targeting optimal pore size and distribution for improved insulating and mechanical properties. A significant focus was also placed on making the aerogels hydrophobic through surface modification, which involved optimizing the concentration of hydrophobic agents to enhance moisture resistance without compromising structural integrity. Process times for each synthesis step, including gelation, aging, and hydrophobic treatment, were optimized for ideal properties. Furthermore, multiple solvent exchanges were employed to mitigate capillary pressure during drying, preventing shrinkage and preserving the aerogel's microstructure. Through these comprehensive optimizations, the research succeeded in producing silica aerogels with controlled porosity, superior mechanical

properties, and effective hydrophobicity, paving the way for their broader application across various industries.

The next chapter investigates a streamlined method for producing silica aerogels, focusing on the use of a precursor containing unhydrolyzed methyl groups. This approach notably omits the process of surface modification, a step typically involved in enhancing the hydrophobicity of aerogels. In addition, it details the optimization of acid-base catalysts, crucial for effectively controlling the sol-gel reaction that forms the aerogel structure. A significant innovation in this method is the avoidance of multiple solvent exchanges, a procedure traditionally necessary to minimize capillary forces during drying, which can lead to structural shrinkage and compromise the aerogel's integrity. The chapter further presents a detailed comparison of the properties of aerogels produced using this novel approach with those of conventional aerogels. The development of aerogel-embedded glass and ceramic blankets through the in-situ synthesis of aerogel under ambient pressure conditions is explored for use in aero-engine applications. Utilizing a two-step acid-base synthesis process with tetraethyl orthosilicate (TEOS) as the silica source, this approach addresses the inherent fragility of aerogels by incorporating them into a fibrous matrix.

This network imparts the composite material with comprehensive structural integrity and macroscopic flexibility, overcoming the brittleness typically associated with aerogels. The aerogel blanket demonstrates superior thermal and acoustic insulation properties post-synthesis, signifying a substantial improvement over traditional insulation materials. Furthermore, the aerogel blanket meets stringent fire-resistance standards, making it suitable for critical applications such as thermal shielding in aero-engines.

In the subsequent chapter, the in-situ production of aerogel for the creation of an aerogel-embedded blanket is explored, utilizing methyltrimethoxysilane (MTMS) as the silica source and employing ambient pressure drying for synthesis. This process omits surface modification

steps, leading to the formation of an aerogel that is both flexible and compressible, making it suitable for application in aeroengine insulation. The influence of the MTMS precursor concentration on the characteristics of the aerogel-embedded blankets is thoroughly investigated, with particular attention to how variations in precursor concentration impact the aerogel's physical properties, including its degree of shrinkage. This analysis extends to examine the effects of aerogel shrinkage on the overall physical attributes of the developed blankets. The incorporation of aerogel into the blanket matrix significantly enhances its thermal and acoustic insulation properties, attributed to the aerogel's ability to trap air within its structure. Furthermore, the aerogel-embedded blankets demonstrate enhanced fire resistance, a critical requirement for their application as insulation shields in aeroengines.

The challenge of dusting associated with aerogel-embedded blankets has led to the exploration of a novel solution: the development of 3D woven spacer fabrics. These three-dimensional textiles are crafted by intertwining two distinct layers of fabric with pile yarns, using advanced weaving or knitting techniques. Renowned for their lightweight, superior formability, and adaptability, spacer fabrics have found widespread applications in industries such as aerospace, shipbuilding, and automotive. The customizable nature of these substrate allows for tailored adjustments to pile height and frequency by altering yarn types and fabrication methods. This flexibility enables precise control over the fabric's density and air permeability, making 3D woven spacer fabrics a promising alternative to traditional porous materials for various protective applications.

In the last chapter, the development of aerogel-embedded 3D woven basalt spacer fabrics is presented, achieved through ambient pressure drying with the use of both precursors. This innovative technique showcases outstanding mechanical strength, enhanced thermal stability, remarkable sound insulation, and unparalleled thermal insulation efficacy. The inclusion of pile structures within these fabrics significantly contributes to their structural integrity,

effectively preventing aerogel particles from shedding. The exceptional thermal insulation observed in these 3D woven blankets can be attributed to the synergistic effect of the aerogel's nano-3D network structure and the inherent thermal insulating qualities of basalt fibers. Adjustments in pile height and the overall thickness of the spacer fabrics directly influence the mechanical properties, demonstrating the customizable nature of these materials. Furthermore, variations in the sol-gel parameters, particularly the dilution ratio of precursor to solvent, were found to impact the aerogel's characteristics, thereby affecting the overall performance of the resulting blankets. This comprehensive exploration highlights the potential of aerogel-embedded 3D woven basalt spacer fabrics in providing effective insulation solutions with enhanced durability and performance.

This research presents a methodical strategy for engineering robust and lightweight aerogel-embedded blankets, specifically designed for advanced insulation applications. These innovative materials are adept at providing effective thermal insulation, soundproofing, and fire protection, making them highly suitable for a diverse range of practical uses across various sectors including building, aerospace, and construction industries.

सार

21वीं सदी में सिलिका एरोजेल एक अभूतपूर्व पदार्थ के रूप में उभरा है, जो असाधारण रूप से अपनी छिद्रपूर्ण संरचना के लिए प्रचलित है। जुड़ी हुई मोतियों की श्रृंखला जैसी दिखने वाली यह संरचना एरोजेल को 80% और 99.8% के बीच हवा को कैद करने में सक्षम बनाती है, जो इसे उपलब्ध सबसे हल्के ठोस पदार्थों में से एक बनाती है और उन्हें असाधारण इन्सुलेट गुण प्रदान करती है। ये उन्नत पदार्थ 100 से 1600 वर्ग मीटर/ग्राम तक विशिष्ट सतह क्षेत्रों की एक विस्तृत श्रृंखला का दावा करता हैं और 1.007 से 1.240 तक कम अपवर्तक सूचकांक प्रदर्शित करता हैं। सिलिका एरोजेल की बहुमुखी प्रतिभा कई उपयोगों तक फैली हुई है, जिसमें हानिकारक पदार्थों के लिए अधिशोषक के रूप में उनकी भूमिका, सेंसर प्रौद्योगिकी में तत्व, डाइलेक्ट्रिक्स, निस्पंदन सिस्टम, चेरनकोव विकिरण के लिए डिटेक्टर, ऊर्जा अवशोषण तंत्र, उत्प्रेरक के लिए आधार, ट्रांसपोर्टर, निष्कर्षण एजेंट, सुरक्षात्मक शामिल हैं।

एरोजेल अपनी संरचना में हवा को समाहित करता है, जो इसके उल्लेखनीय इन्सुलेशन गुणों के पीछे एक महत्वपूर्ण कारक है। इस पदार्थ में एक अत्यधिक छिद्रपूर्ण मैट्रिक्स है जो परस्पर जुड़े नैनो-आकार के कणों और रिक्तियों से बना है। इन रिक्त स्थानों में फंसी हवा चालन और संवहन दोनों के माध्यम से गर्मी हस्तांतरण को काफी कम कर देती है, जो उपलब्ध सर्वोत्तम इन्सुलेशन पदार्थ में से एक के रूप में एरोजेल की स्थिति में योगदान करता है। एरोजेल के छिद्रों के अंदर की हवा स्थिर हो जाती है, जिससे हवा के अणुओं की गति सीमित हो जाती है और इस प्रकार पदार्थ के माध्यम से गर्मी स्थानांतरित करने की क्षमता कम हो जाती है। यह विशेषता एरोजेल को विभिन्न प्रकार के अनुप्रयोगों में एक प्रभावी इन्सुलेटर बनाती है, इमारतों और परिधानों में थर्मल इन्सुलेशन से लेकर अंतरिक्ष अन्वेषण में उपयोग तक जहां चरम तापमान को नियंत्रित करना महत्वपूर्ण है। एरोजेल की अनूठी संरचना, छोटे, हवा से भरी गुहाओं के विशाल नेटवर्क के साथ, न केवल तापीय चालकता को कम करती है, बल्कि इसकी हल्की प्रकृति और कम घनत्व के बावजूद महत्वपूर्ण दबाव का सामना करने की क्षमता में भी योगदान देती है। जब अधिक ऊंचाई पर परिवेशी वायु का दबाव कम हो जाता है, तो फंसी हुई हवा की पहले से ही कम तापीय चालकता

और भी कम हो जाती है। नतीजतन, इन स्थितियों में एरोजेल की थर्मल इन्सुलेशन प्रभावशीलता बढ़ जाती है।

ध्वनिक इन्सुलेशन में एरोजेल की प्रभावशीलता इसकी सरंधता, छिद्र आकार वितरण और सामग्री के घनत्व से भी प्रभावित होती है। विशिष्ट गुणों के साथ एरोजेल को इंजीनियर करने की क्षमता विशिष्ट ध्वनि आवृत्तियों को लक्षित करने के लिए पदार्थ के अनुकूलन को अनुमति देती है, जिससे अनुप्रयोगों की एक विस्तृत श्रृंखला में इसकी उपयोगिता बढ़ जाती है। उदाहरण के लिए, एरोजेल को कम, मध्यम या उच्च आवृत्ति वाली ध्वनि तरंगों को अवशोषित करने में उच्च प्रदर्शन के लिए डिज़ाइन किया जा सकता है, जिससे वे औद्योगिक सेटिंग्स से लेकर आवासीय और वाणिज्यिक भवनों तक विभिन्न वातावरणों के लिए उपयुक्त हो जाते हैं, जहां शोर में कमी वांछित है।

सिलिकॉन डाइऑक्साइड, सिलिका एरोजेल का घटक पदार्थ, स्वाभाविक रूप से गैर-ज्वलनशील है। कार्बनिक पदार्थों के विपरीत, सिलिका दहन नहीं करता है, न ही यह दहन का समर्थन करता है। यह सिलिका एरोजेल को अग्नि प्रतिरोध के लिए विशेष रूप से प्रभावी सामग्री बनाता है, क्योंकि यह प्रज्वलित या खराब हुए बिना उच्च तापमान के संपर्क में आ सकता है। विशेषताओं का यह संयोजन पर्याप्त थर्मल इन्सुलेशन और अग्नि प्रतिरोधक क्षमताओं की मांग वाले परिदृश्यों के लिए सिलिका एरोजेल को एक असाधारण उपयुक्त सामग्री के रूप में स्थापित करता है।

हालाँकि, रोजमर्रा के उपयोग में सिलिका एरोजेल का एकीकरण उनकी अंतर्निहित भंगुरता के कारण सीमाओं का सामना करता है, जो प्रसंस्करण में चुनौतियां पेश करता है। एरोजेल के साथ अतिरिक्त चुनौतियों में धूल उत्सर्जित करने की उनकी प्रवृत्ति, पानी के प्रति अंतर्निहित आकर्षण, मात्रा में कमी का जोखिम, जटिल प्रसंस्करण की आवश्यकता और महत्वपूर्ण रूप से उनकी कीमत में शामिल है, जो पॉलीयुरेथेन फोम जैसी पारंपरिक सामग्रियों की तुलना में काफी अधिक है। इन आशाजनक पदार्थ के लिए व्यावहारिक अनुप्रयोगों की सीमा का विस्तार करने के लिए इन बाधाओं पर काबू पाना महत्वपूर्ण है।

नैनोसंरचित नेटवर्क जो एरोजेल को उनका हल्का और इन्सुलेशन गुण प्रदान करता है, उन्हें नाजुक भी बनाता है और यांत्रिक तनाव के तहत टूटने या टूटने का खतरा होता है। यह भंगुरता उन अनुप्रयोगों में एरोजेल के उपयोग को प्रतिबंधित करती है जहां पदार्थ प्रभाव, कंपन या झुकने वाली ताकतों के अधीन हो सकता है। एरोजेल महीन धूल कण छोड़ता है, जो एरोजेल संरचना के टुकड़े होते हैं। यह धूल परेशान करने वाली हो सकती है, सांस के साथ अंदर जाने पर स्वास्थ्य के लिए खतरा पैदा कर सकती है जिसे संभालने और प्रसंस्करण के दौरान सुरक्षात्मक उपायों की आवश्यकता होती है। धूल उत्सर्जित करने की प्रवृत्ति एरोजेल के ऐसे वातावरण में एकीकरण को भी जटिल बनाती है जहां हवा की शुद्धता महत्वपूर्ण है। कई एरोजेल, विशेष रूप से सिलिका-आधारित, स्वाभाविक रूप से हाइड्रोफिलिक होते हैं, जिसका अर्थ है कि वे आसानी से पानी को अवशोषित करते हैं। यह अवशोषण उनकी संरचनात्मक अखंडता और इन्सुलेशन गुणों को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित कर सकता है। उच्च आर्द्रता या पानी के सीधे संपर्क वाले वातावरण में, एरोजेल के प्रदर्शन से समझौता किया जा सकता है जब तक कि उन्हें पानी को पीछे हटाने के लिए ठीक से उपचारित या लेपित न किया जाए।

एरोजेल के निर्माण में सुपरक्रिटिकल सुखाने सहित परिष्कृत प्रक्रियाएं शामिल होती हैं, जिसके लिए एरोजेल संरचना के पतन से बचने के लिए विशेष उपकरण और स्थितियों की आवश्यकता होती है। इन प्रक्रियाओं की जटिलता उच्च उत्पादन लागत में योगदान देती है और बड़े पैमाने पर एरोजेल का उत्पादन करने की क्षमता को सीमित करती है। शायद एरोजेल को व्यापक रूप से अपनाने में सबसे महत्वपूर्ण सीमा उनकी लागत है। जटिल विनिर्माण प्रक्रिया, विशेष सामग्रियों और उपकरणों की आवश्यकता के साथ मिलकर, एरोजेल को पॉलीयुरेथेन फोम जैसी पारंपरिक इन्सुलेट सामग्री की तुलना में काफी अधिक महंगा बनाती है। उच्च लागत कई संभावित अनुप्रयोगों के लिए एक बाधा है, खासकर जहां बड़ी मात्रा में पदार्थ की आवश्यकता होती है। अनुसंधान ने सिलिका-आधारित एरोजेल के यांत्रिक गुणों को सुदृढ़ करने के लिए कई तरीकों की पहचान की है, जिसमें उम्र बढ़ने की प्रक्रिया को बढ़ाना, सिलिका नेटवर्क क्रॉस-

लिकिंग के लिए पॉलिमर लगाना, सिलिका सोल में अतिरिक्त चरण या लचीले अग्रदूतों को शामिल करना और कणों के बीच मजबूत सहसंयोजक बंधन को शामिल करना शामिल है।

यह थीसिस संपूर्ण संश्लेषण प्रक्रिया को अनुकूलित करने पर जोर देने के साथ, परिवेशी दबाव सुखाने के तहत सोल-जेल तकनीक का उपयोग करके सिलिका एरोजेल के संश्लेषण की एक विस्तृत जांच प्रस्तुत करती है। अनुसंधान ने सिलिका अग्रदूत की हाइड्रोसिलिस और संक्षेपण प्रतिक्रियाओं को ठीक करने के लिए एसिड और बेस उत्प्रेरक दोनों का उपयोग करके उत्प्रेरक स्थितियों को सावधानीपूर्वक अनुकूलित किया, जो जेलेशन प्रक्रिया को नियंत्रित करने और वांछित संरचनात्मक अखंडता और सरंध्रता प्राप्त करने के लिए महत्वपूर्ण है। इसके अतिरिक्त, विलायक के अग्रदूत की सांद्रता को एरोजेल के माइक्रोस्ट्रक्चर को सीधे प्रभावित करने के लिए समायोजित किया गया था, जिससे बेहतर इन्सुलेशन और यांत्रिक गुणों के लिए इष्टतम छिद्र आकार और वितरण को लक्षित किया गया था। सतह संशोधन के माध्यम से एरोजेल को हाइड्रोफोबिक बनाने पर भी महत्वपूर्ण ध्यान केंद्रित किया गया था, जिसमें संरचनात्मक अखंडता से समझौता किए बिना नमी प्रतिरोध को बढ़ाने के लिए हाइड्रोफोबिक एजेंटों की सांद्रता को अनुकूलित करना शामिल था। प्रत्येक संश्लेषण चरण के लिए प्रक्रिया समय, जिसमें जेलेशन, उम्र बढ़ना और हाइड्रोफोबिक उपचार शामिल हैं, को आदर्श गुणों के लिए अनुकूलित किया गया है। इसके अलावा, सुखाने के दौरान केशिका दबाव को कम करने, सिकुड़न को रोकने और एरोजेल की माइक्रोस्ट्रक्चर को संरक्षित करने के लिए कई विलायक एक्सचेंजों को नियोजित किया गया था। इन व्यापक अनुकूलन के माध्यम से, अनुसंधान नियंत्रित सरंध्रता, बेहतर यांत्रिक गुणों और प्रभावी हाइड्रोफोबिसिटी के साथ सिलिका एरोजेल का उत्पादन करने में सफल रहा, जिससे विभिन्न उद्योगों में उनके व्यापक अनुप्रयोग का मार्ग प्रशस्त हुआ।

अगला अध्याय अनहाइड्रोलाइज्ड मिथाइल समूहों वाले अग्रदूत के उपयोग पर ध्यान केंद्रित करते हुए, सिलिका एरोजेल के उत्पादन के लिए एक सुव्यवस्थित विधि की जांच करता है। यह दृष्टिकोण विशेष रूप से सतह संशोधन की प्रक्रिया को छोड़ देता है, जो आमतौर पर एरोजेल की हाइड्रोफोबिसिटी को बढ़ाने

में शामिल एक कदम है। इसके अलावा, यह एसिड-बेस उत्प्रेरक के अनुकूलन का विवरण देता है, जो एरोजेल संरचना बनाने वाले सोल-जेल प्रतिक्रिया को प्रभावी ढंग से नियंत्रित करने के लिए महत्वपूर्ण है। इस महत्वपूर्ण नवीन पद्धति में कई विलायक आदान-प्रदान से बचते हुए, इस प्रक्रिया में पारंपरिक रूप से सुखाने के दौरान केशिका बलों को कम करना आवश्यक है, जिससे संरचनात्मक संकोचन हो सकता है और एरोजेल की अखंडता से समझौता हो सकता है। अध्याय आगे इस नवीन दृष्टिकोण का उपयोग करके उत्पादित एयरोजेल के गुणों की पारंपरिक एयरोजेल के गुणों की विस्तृत तुलना प्रस्तुत करता है। एरो-इंजन अनुप्रयोगों में उपयोग के लिए परिवेशी दबाव स्थितियों के तहत एरोजेल के इन-सीटू संश्लेषण के माध्यम से एरोजेल-एम्बेडेड ग्लास और सिरामिक कंबल के विकास का पता लगाया गया है। सिलिका स्रोत के रूप में टेट्राएथिल ऑर्थोसिलिकेट (टीईओएस) के साथ दो-चरणीय एसिड-बेस संश्लेषण प्रक्रिया का उपयोग करते हुए, यह दृष्टिकोण रेशेदार मैट्रिक्स में शामिल करके एरोजेल की अंतर्निहित नाजुकता को संबोधित करता है।

यह नेटवर्क समग्र पदार्थ को व्यापक संरचनात्मक अखंडता और मैक्रोस्कोपिक लचीलेपन को प्रदान करता है, जो आमतौर पर एरोजेल से जुड़ी भंगुरता पर काबू पाता है। एरोजेल कंबल संश्लेषण के बाद बेहतर थर्मल और ध्वनिक इन्सुलेशन गुणों को प्रदर्शित करता है, जो पारंपरिक इन्सुलेशन पदार्थ पर पर्याप्त सुधार का संकेत देता है। इसके अलावा, एरोजेल कंबल कड़े अग्नि-प्रतिरोध मानकों को पूरा करता है, जो इसे एयरो-इंजन में थर्मल परिरक्षण जैसे महत्वपूर्ण अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त बनाता है।

अगले अध्याय में, एरोजेल-एम्बेडेड कंबल के निर्माण के लिए एरोजेल के इन-सीटू उत्पादन का पता लगाया गया है, जिसमें सिलिका स्रोत के रूप में मिथाइलट्राइमेथॉक्सीसिलेन (एमटीएमएस) का उपयोग किया जाता है और संश्लेषण के लिए परिवेशी दबाव सुखाने का उपयोग किया जाता है। यह प्रक्रिया विशेष रूप से सतह संशोधन चरणों को छोड़ देती है, जिससे एक एरोजेल का निर्माण होता है जो लचीला और संपीड़ित दोनों होता है, जो इसे एयरोइंजन इन्सुलेशन में अनुप्रयोग के लिए उपयुक्त बनाता है। एरोजेल-एम्बेडेड कंबल की विशेषताओं पर एमटीएमएस अग्रदूत सांद्रता के प्रभाव की पूरी तरह से जांच की जाती है, इस

बात पर विशेष ध्यान दिया जाता है कि पूर्ववर्ती सांद्रता में भिन्नता एरोजेल के भौतिक गुणों को कैसे प्रभावित करती है, जिसमें इसकी सिकुड़न की डिग्री भी शामिल है। यह विश्लेषण विकसित कंबलों की समग्र भौतिक विशेषताओं पर एरोजेल सिकुड़न के प्रभावों की जांच करने के लिए विस्तारित है। ब्लैकेट मैट्रिक्स में एरोजेल को शामिल करने से इसके थर्मल और ध्वनिक इन्सुलेशन गुणों में काफी वृद्धि होती है, जिसका श्रेय इसकी संरचना के भीतर हवा को फंसाने की एरोजेल की क्षमता को जाता है। इसके अलावा, एरोजेल-एम्बेडेड कंबल उन्नत अग्नि प्रतिरोध को प्रदर्शित करते हैं, जो एयरोइंजन में इन्सुलेशन ढाल के रूप में उनके अनुप्रयोग के लिए एक महत्वपूर्ण आवश्यकता है।

एरोजेल-एम्बेडेड कंबलों से जुड़ी धूल झाड़ने की चुनौती ने एक नए समाधान की खोज को जन्म दिया है: 3डी बुने हुए स्पेसर फैब्रिक का विकास। ये त्रि-आयामी वस्त्र उन्नत बुनाई या बुनाई तकनीकों का उपयोग करके, ढेर के धागों के साथ कपड़े की दो अलग-अलग परतों को जोड़कर तैयार किए जाते हैं। अपने हल्के वजन, बेहतर निर्माण क्षमता और अनुकूलनशीलता के लिए प्रसिद्ध, स्पेसर फैब्रिक्स को एयरोस्पेस, जहाज निर्माण और ऑटोमोटिव जैसे उद्योगों में व्यापक अनुप्रयोग मिला है। इन सब्सट्रेट की अनुकूलन योग्य प्रकृति यार्न के प्रकार और निर्माण विधियों को बदलकर ढेर की ऊंचाई और आवृत्ति के अनुरूप समायोजन की अनुमति देती है। यह लचीलापन कपड़े के घनत्व और वायु पारगम्यता पर सटीक नियंत्रण सक्षम बनाता है, जिससे 3डी बुने हुए स्पेसर कपड़े विभिन्न सुरक्षात्मक अनुप्रयोगों के लिए पारंपरिक झरझरा सामग्री का एक आशाजनक विकल्प बन जाते हैं।

पिछले अध्याय में, एरोजेल-एम्बेडेड 3डी बुने हुए बेसाल्ट स्पेसर फैब्रिक का विकास प्रस्तुत किया गया है, जो दोनों पूर्ववर्तियों के उपयोग के साथ परिवेशीय दबाव सुखाने के माध्यम से प्राप्त किया गया है। यह नवीन तकनीक उत्कृष्ट यांत्रिक शक्ति, बढ़ी हुई थर्मल स्थिरता, उल्लेखनीय ध्वनि इन्सुलेशन और अद्वितीय थर्मल इन्सुलेशन प्रभावकारिता प्रदर्शित करती है। इन कपड़ों के भीतर ढेर संरचनाओं का समावेश उनकी संरचनात्मक अखंडता में महत्वपूर्ण योगदान देता है, जो एरोजेल कणों को प्रभावी ढंग से गिरने से रोकता है। इन 3डी बुने हुए कंबलों में देखे गए असाधारण थर्मल इन्सुलेशन का श्रेय एरोजेल के नैनो-3डी नेटवर्क

संरचना के सहक्रियात्मक प्रभाव और बेसाल्ट फाइबर के अंतर्निहित थर्मल इन्सुलेशन गुणों को दिया जा सकता है। ढेर की ऊंचाई में समायोजन और स्पेसर कपड़ों की समग्र मोटाई सीधे यांत्रिक गुणों को प्रभावित करती है, जो इन सामग्रियों की अनुकूलन योग्य प्रकृति को प्रदर्शित करती है। इसके अलावा, सोल-जेल मापदंडों में भिन्नता, विशेष रूप से विलायक के अग्रदूत के कमजोर पड़ने के अनुपात, एरोजेल की विशेषताओं को प्रभावित करने के लिए पाए गए, जिससे परिणामस्वरूप कंबल के समग्र प्रदर्शन पर असर पड़ा। यह व्यापक अन्वेषण उन्नत स्थायित्व और प्रदर्शन के साथ प्रभावी इन्सुलेशन समाधान प्रदान करने में एरोजेल-एम्बेडेड 3डी बुने हुए बेसाल्ट स्पेसर फैब्रिक की क्षमता पर प्रकाश डालता है।

यह शोध विशेष रूप से उन्नत इन्सुलेशन अनुप्रयोगों के लिए डिज़ाइन किए गए मजबूत और हल्के एरोजेल-एम्बेडेड कंबलों की इंजीनियरिंग के लिए एक व्यवस्थित रणनीति प्रस्तुत करता है। ये नवीन सामग्रियां प्रभावी थर्मल इन्सुलेशन, ध्वनिरोधी और अग्नि सुरक्षा प्रदान करने में माहिर हैं, जो उन्हें भवन, एयरोस्पेस और निर्माण उद्योगों सहित विभिन्न क्षेत्रों में व्यावहारिक उपयोग की एक विस्तृत श्रृंखला के लिए अत्यधिक उपयुक्त बनाती हैं।

Contents

	Page No.
Certificate	i
Acknowledgments	ii
Abstract	iii
Table of Contents	xvi
List of Figures	xxv
List of Tables	xxxvii
List of Abbreviations	xxxix
Chapter 1: Introduction	1
1.1 Background	2
1.2 Motivation	7
Chapter 2: Research Objectives	9
2.1 Principal objective	10
2.2 Sub-objectives	10
Chapter 3: Literature Review	12
3.1 Introduction	13
3.2 Classification of aerogel	16
3.3 Synthesis of aerogels	17
3.3.1 Structure and Network Formation	18
3.3.2 Ageing	20
3.3.3 Drying	21
3.3.3.1 Supercritical drying (SCD)	23
3.3.3.2 Freeze-drying (FD)	24
3.3.3.3 Ambient pressure drying (APD)	25

3.4 Strategies to make aerogel with lesser shrinkage by ambient pressure drying	26
3.4.1 Reaction mechanism of synthesis of silica aerogel	27
3.4.1.1 For Silicon Alkoxide	27
3.4.1.2 Water-Soluble Silicates	28
3.5. Properties of aerogel	29
3.5.1 Insulation properties of silica aerogels	30
3.5.2 Mechanical properties of silica aerogels	32
3.6. Tailoring the properties of aerogel	33
3.6.1 Influence of fibres content on shrinkage and density of silica aerogel composites	34
3.6.2 Effect of fibres on the mechanical performance of silica aerogel composites	37
3.6.3 Effect of fibre content on the thermal conductivity of silica aerogel composites	41
3.7 Preparation of silica aerogel nonwoven blanket and its properties	45
3.7.1 Factors affecting thermal properties of blankets	50
3.7.2 Factors affecting acoustic properties of the blankets	54
3.7.3 Factors affecting Fire-resistance properties of blankets	55
3.7.4 Factors affecting Mechanical properties of blankets	58
3.8 Spacer fabrics	61
3.8.1 3D spacer fabrics	61
3.8.2 Knitted spacer fabrics	62
3.8.3 Woven spacer fabric	62
3.8.4 Spacer structures connected with core piles	62
3.8.5 Spacer structures connected with woven cross-links on shuttle room	63

3.9 Applications	64
3.9.1 Aerogel blanket for thermal insulation	64
3.9.2 Fire retardation	65
3.9.3 Sound Insulation	66
3.9.4 Clothing and Apparel	66
3.9.5 Housing, Refrigerators, Skylights, and Windows	66
3.10 Summary & Outlook	66
Chapter 4: Materials and Methods	68
4.1 Introduction	69
4.2 Materials	70
4.2.1 Glass Nonwoven	70
4.2.2 Ceramic Nonwoven	71
4.2.3 Basalt Fibre	71
4.2.4 Chemicals	73
4.2.4.1 Tetraethyl orthosilicate (TEOS)	73
4.2.4.2 Methyltrimethoxysilane (MTMS)	73
4.2.4.3 Trimethylchlorosilane (TMCS)	74
4.3 Methodology	74
4.3.1 Preparation of Basalt spacer fabric	74
4.3.2 Method to synthesis of aerogel	76
4.3.3 In-situ synthesis of silica aerogel in textile substrate	78
4.4 Characterization	78
4.4.1 Characterization of aerogel	78
4.4.1.1 Density	78

4.4.1.2 Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface area and Pore size distribution	79
4.4.1.3 Microstructural Analysis	79
4.4.1.4 Identification of Functional groups of aerogel	80
4.4.1.5 Thermal stability and crystallinity of aerogel	80
4.4.1.6 Determination of Hydrophobicity	80
4.4.1.7 Assessment of Absorption of Organic liquids and oils	80
4.4.2 Characterization of aerogel-embedded blankets	81
4.4.2.1 Bulk Density	81
4.4.2.2 Textural/microstructures of aerogel-embedded blankets	81
4.4.2.3 Thermal conductivity of aerogel-embedded blankets	81
4.4.2.4 Thermal stability of aerogel-embedded blankets	82
4.4.2.5 Determination of Hydrophobicity of aerogel-embedded blankets	82
4.4.2.6 Mechanical properties of aerogel-embedded blankets	82
4.3.2.6.1 Compression Properties of aerogel-embedded blankets	82
4.3.2.6.2 Flexural strength of aerogel-embedded blankets	82
4.4.2.7 Fire-resistance properties of aerogel-embedded blankets	82
4.4.2.8 Sound absorption of aerogel-embedded blankets	83

Chapter 5: Optimization of silica aerogel synthesis using Tetraethyl orthosilicate (TEOS) precursor under ambient pressure drying **85**

5.1 Introduction	86
5.2 Materials and Methodology	87

5.2.1. Materials	87
5.2.2. Synthesis of silica aerogel	87
5.3. Results and Discussion	89
5.3.1 Impact of the EtOH/TEOS molar ratio	89
5.3.2 Influence of acid catalyst concentration	91
5.3.3 Effect of base catalyst concentration	92
5.3.4 Microstructure analysis of aerogel	94
5.3.5 FT-IR spectroscopy	96
5.3.6 Surface area and Pore size distribution of aerogel	97
5.3.7 Thermal stability and contact angle of aerogel	98
5.4. Conclusions	100
Chapter 6: Optimization of silica aerogel synthesis using Trimethoxymethylsilane (MTMS) precursor under ambient pressure drying	102
6.1 Introduction	103
6.2 Methodology	105
6.2.1. Materials	105
6.2.2. Synthesis of silica aerogels	106
6.3. Result and discussion	107
6.3.1 Morphology and physical properties of silica aerogel	107
6.3.2 Surface area and pore size distribution	110
6.3.3 Thermal, functional, and Hydrophobic property of silica aerogel	110
6.3.4 Absorption Behaviour of silica aerogel	112
6.4 Conclusions	116

Chapter 7: To determine the effect of TEOS based silica aerogel concentration in the glass & ceramic nonwoven blankets on their thermal, acoustic, mechanical, and fire-resistance properties	117
7.1 Introduction	118
7.2 Materials and Methodology	121
7.2.1. Materials	121
7.2.2. In-situ synthesis of aerogel-embedded Nonwoven blanket	121
7.3. Result and Discussion	122
7.3.1 Development of aerogel-embedded glass blankets	122
7.3.1.1 Specific surface area and pore size distribution of aerogel	122
7.3.1.2 Thermal properties of aerogel-embedded glass blankets	124
7.3.1.3 Microstructure analysis of aerogel-embedded glass blankets	125
7.3.1.4 Acoustic Properties of aerogel-embedded glass blankets	127
7.3.1.5 Hydrophobicity of Aerogel embedded Glass Blankets	129
7.3.1.6 Mechanical properties of Aerogel embedded glass blankets	130
(a) Flexural properties	130
(b) Compression properties	131
7.3.1.7 Thermal stability of aerogel-embedded glass blankets	133
7.3.1.8 Evaluation of Fire-proof properties of aerogel embedded glass blankets	133
7.3.2 Development of aerogel-embedded Ceramic blankets	135
7.3.2.1 Structure analysis of aerogel-embedded ceramic blankets	135
7.3.2.2. Functional characterization of aerogel embedded ceramic blankets	137
7.3.2.3. Contact angle of aerogel-embedded ceramic blankets	139

7.3.2.4. Thermal properties and bulk density of aerogel-embedded ceramic blankets	139
7.3.2.5. Thermal stability of aerogel embedded ceramic blankets	140
7.3.2.6. Mechanical characterization of aerogel embedded ceramic blankets	141
7.3.2.7. Acoustic properties of aerogel-embedded ceramic blankets	143
7.3.2.8. Fire-resistance of aerogel-embedded ceramic blanket properties	145
7.3.2.9. BET analysis of aerogel matrix	146
7.4. Conclusions	147
Chapter 8: To determine the effect of MTMS-based silica aerogel concentration in the glass & ceramic nonwoven blankets on their thermal, acoustic, mechanical, and fire-resistance properties	149
8.1 Introduction	150
8.2 Materials and Methodology	152
8.2.1. Materials	152
8.2.2. In-situ synthesis of aerogel in nonwoven fabric	152
8.3. Result and Discussion:	154
8.3.1 Thermal properties of aerogel-embedded blankets	154
8.3.2 Acoustic properties of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	156
8.3.3 Flexural properties of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	158
8.3.4 Thermal stability of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	160
8.3.5 Evaluation of Fire-proof properties of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	161
8.3.6 Hydrophobicity of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	162

8. 3.7 Specific surface area and pore size distribution of aerogel	162
8.4 Conclusions	164
Chapter 9: Design and development of silica aerogel-embedded 3D woven spacer fabric blanket to achieve desired thermal, acoustic, mechanical, and fire-resistance properties for aerospace applications	165
9.1 Introduction	166
9.2 Materials and Methodology	168
9.2.1. Materials	168
9.2.2. Production of cellular spacer textile substrate	168
9.2.3 In-situ synthesis of aerogel in the spacer textile substrate using TEOS Precursor	169
9.2.4 In-situ synthesis of aerogel in the spacer textile substrate using MTMS Precursor	171
9.3 Result and discussion	173
Part: A In-situ synthesis of aerogel-embedded basalt spacer blankets using TEOS precursor	173
9.3.1 Bulk density of aerogel-embedded basalt spacer blankets	173
9.3.2 Thermal conductivity of aerogel-embedded basalt spacer blankets	175
9.3.3 Acoustic properties of aerogel-embedded basalt spacer blankets	177
9.3.4 Compressive properties of aerogel-embedded basalt spacer blankets	178
9.3.5 Thermogravimetric analysis of aerogel-embedded basalt spacer blankets	179
9.3.6 Wettability of aerogel-embedded basalt spacer blankets	180
9.3.7 Fire-resistance of aerogel-embedded basalt spacer blankets	180

Part: B In-situ synthesis of aerogel-embedded basalt spacer blankets using MTMS precursor	182
9.3.8 Bulk density of aerogel-embedded basalt spacer blankets	182
9.3.9 Thermal conductivity of aerogel-embedded basalt spacer blankets	183
9.3.10 Acoustic properties of aerogel-embedded basalt spacer blankets	185
9.3.11 Compressive properties of aerogel-embedded basalt spacer blankets	186
9.3.12 Thermogravimetric analysis of aerogel-embedded basalt blankets	187
9.3.13 Wettability of aerogel-embedded Basalt blankets	188
9.3.14 Fire-resistance of aerogel-embedded Basalt blankets	189
9.4 Conclusions	190
Chapter 10: Summary and Conclusions	192
Scope for future work	199
References	200
Publication details	235
Curriculum vitae	236

List of Figures

Figures	Titles	Page No.
Figure 3.1	(a) Opaque silica aerogel monolith with ultra-low density (c) SEM images of aerogel (c) Semi-transparent silica aerogel prepared under supercritical drying (d) Fire-resistance of Semi-transparent silica aerogel prepared under ambient pressure drying	14
Figure 3.2	Evolution of aerogel	15
Figure 3.3	Classification of aerogel	17
Figure 3.4	Microstructure of silica aerogel	19
Figure 3.5	The influence of pH on the hydrolysis and condensation rates of alkoxysilanes	20
Figure 3.6	Oswald ripening process	21
Figure 3.7	Process of synthesis of aerogel	21
Figure 3.8	Holes of different diameters exposed to drying surface pressure	22
Figure 3.9	Drying of aerogel in a supercritical state	24
Figure 3.10	Phase diagram of the freeze-drying process	24
Figure 3.11	Images of silica gel generated during supercritical drying (left) and ambient drying (right)	25
Figure 3.12	Schematic representation of the overall synthesis process for aerogels by ambient pressure drying & Spring back effect	27
Figure 3.13	Factors contributing to the thermal conduction through porous materials	30

Figure 3.14	(a) Monoliths made by crosslinking polyol (Repeat unit n and polyol molecular weight) (b) Bending of prepared aerogel block with n=5650 polymers from the side (left) and front (right)	33
Figure 3.15	Silica aerogel (a) final density as a function of Tencel® weight fraction of fibre (b) cumulative volume shrinkage for ambient pressure and supercritical drying	35
Figure 3.16	Density and shrinkage of silica aerogel composites as a function of reinforcement with (a) attapulgite fibres, APD [108], (b) silica fibres, APD	36
Figure 3.17	Stress-strain curves of silica aerogels under compressive load for various degrees of fibre reinforcement and aerogel composites' final densities	38
Figure 3.18	Mechanical properties of silica aerogel composites: (a) flexural modulus and (b) maximum stress for super critically dried and ambient pressure dried silica aerogel composites reinforced with Tencel, respectively[115], as a function of fibre volume, (c and d) bulk density and compressive strength of silica aerogel composites as a function of fibre weight fraction[116], (e and f) compressive strength and bulk density of silica aerogel composites as a function of fibre weight fraction	40
Figure 3.19	Influence of fibre amount on the thermal conductivity of silica aerogel composites: (a) volume% of sepiolite fibres [107] (b) wt% of attapulgite fibres	42

Figure 3.20	Thermal conductivity of silica aerogel composites: (a,a') effect of contact patterns of the reinforcement with SiC fibres (diameter between 2 and 5 mm), measured at 300 K and ambient pressure[122] (b) volume fraction of glass fibres, with 2–4 mm diameter[112] (c) mass fraction of glass fibres, 12 mm diameter	44
Figure 3.21.	(a)Thermal conductivity of Tencel fibres–silica composite aerogels prepared via ambient pressure and supercritical drying [106] (b) Thermal conductivity as a function of fiber volume fraction for APD and SCD aerogels with Tencel fibers of 8 mm	45
Figure 3.22	Mechanism of Synthesis of Silica Aerogel Nonwoven Blanket by ambient pressure drying	47
Figure 3.23	Synthesis procedure of silica aerogel nonwoven blanket by supercritical drying	47
Figure 3.24	(a) Variation of the thermal diffusivity of silica aerogel/PET nonwoven composite with silica aerogel content [130] (b) Changes in protection time (s) with decreasing molar ratio of MeOH: MTMS in aerogel	50
Figure 3.25	Bulk density and thermal conductivity of GF/aerogels with the increasing	51
Figure 3.26	Effect of mole ratio of H ₂ O/TEOS on physical properties of GF/aerogel composites: (a) effect on bulk density and porosity; (b) effect on thermal conductivity	52

Figure 3.27	Thermal conductivity of the silica xerogel/alumina fibre composite	52
Figure 3.28	(a) Thermal conductivity of aerogel-treated nonwoven fabrics compared to calculated values without aerogel (b) Relative water vapor permeability of aerogel-treated nonwoven fabrics [140] (c) Thermal resistance (d) Thermal conductivity at -15°C, -20°C, and -25°C, respectively	53
Figure 3.29	A plot of change in thermal conductivity with change in pH of silica sol for blanket	54
Figure 3.30	Control PET nonwoven and silica aerogel/PET nonwoven composites on SAC	55
Figure 3.31	Images of the samples and residual after the cone calorimeter test (H1-H5:: H2O: TEOS (S):: 2-6 respectively	56
Figure 3.32	(a)HRRs of different composites under 35 kW/m ² radiant heat flux (b) HRRs of different composites under 60 kW/m ² radiant heat flux	57
Figure 3.33	Effect of initial sol pH on fire resistance of composites Acids	57
Figure 3.34	Effect of aging time on composites fire resistance in samples prepared at (a) pH 4; (b) pH 8	58
Figure 3.35	(a) Flexural stress-strain curves (b) Compressive stress-strain curves of the silica aerogel/alumina fibre	58
Figure 3.36	Flexural stress-strain curves (a) and flexural modulus (b) of the five composites with various molar ratios in the three-bending bending test	59

Figure 3.37	(a) The three-point bending flexural stress-strain curve of the samples (b)The compressive stress-strain curves of the samples	60
Figure 3.38	(a) Flexural stress-strain curves in three-point loading tests of the samples	60
Figure 3.39	Textile structure for aerogel blanket	61
Figure 3.40	Face-to-face weaving technique for velvet fabric production	63
Figure 3.41	Different types of hollow structures (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) complex shaped and (d) hexagonal shaped	64
Figure 3.42	Flexible aerogel blankets and solid aerogel boards. (a) Aerogel blankets (b) aerogel panel and (c) Super insulating aerogel blanket	65
Figure 3.42	Aerogel/aerogel blanket placed over Bunsen flame (a) Rose shielded by the aerogel over a Bunsen (b) Temperature difference of 900°Cthrough flame a 6 mm aerogel blanket	65
Figure 4.1	Cross-section representation of Piled spacer fabric	75
Figure 4.2	Customized rapier spacer weaving machine	75
Figure 4.3	Design for piled spacer fabric.	76
Figure 4.4	Synthesis of silica aerogel	77
Figure 4.5	Fabricated setup for fire-testing of aerogel-embedded blankets	83
Figure 4.6	Impedence tube for sound absorption coefficient of aerogel-embedded blankets	84
Figure 5.1	Schematic illustration of the synthesis of silica aerogel	89

Figure 5.2	Effect of EtOH/TEOS molar ratio (M) on the bulk density, Volume shrinkage, and gelation time of silica aerogels	91
Figure 5.3	The impact of oxalic acid concentration on the volume shrinkage and bulk density of aerogels	92
Figure 5.4	Effect of Base concentration on the bulk density, volume shrinkage, and gelation time of silica aerogels	93
Figure 5.5	XRD pattern at EtOH/TEOS molar ratio of 15	94
Figure 5.6	(a) FESEM images of prepared silica aerogel (b) TEM image at TEOS:EtOH:H ₂ O molar ratio at 1:15:5.8, 0.01M oxalic acid and 1 M NH ₄ OH	95
Figure 5.7	Ambient pressure dried silica aerogels at various TEOS/EtOH ratios	96
Figure 5.8	FTIR spectroscopy of aerogels formed with varying ratios of the TEOS/EtOH (Z)	97
Figure 5.9	(a) N ₂ adsorption-desorption isotherms and (b) Pore size distribution of silica aerogels	98
Figure 5.10	Wettability of silica aerogel at all molar concentrations (Z1-Z5), Z3 after calcination at 370°C for 20 mins	99
Figure 5. 11	Thermal stability of silica aerogel at all precursor molar ratios	100
Figure 6.1	Preparation scheme of silica aerogels under ambient pressure drying	106
Figure 6.2	Bulk density and Gelation time of prepared aerogel at the different precursor molar concentrations (MeOH: MTMS ~ 20 to 45)	108

Figure 6.3	Image of the silica aerogels produced at different precursor molar concentrations	109
Figure 6.4	(a,b,c,d) FE-SEM images of prepared aerogel and (e,f) TEM and higher magnification image of silica aerogel at MTMS: MeOH::35	109
Figure 6.5	(a) Isotherms of nitrogen adsorption and desorption, and (b) Pore size distribution curve of silica aerogel prepared at molar ratio MeOH: MTMS:: 35	110
Figure 6.6	(a) Contact angle of silica aerogel (b) Aerogel floats on the water (c) FTIR spectrum of silica aerogel prepared at molar ratio MeOH: MTMS:: 35:1	111
Figure 6.7	Thermal stability of aerogel	112
Figure 6.8	Capacity of silica aerogel to absorb organic chemicals	113
Figure 6.9	Absorption and desorption of ethanol by the silica aerogel	114
Figure 6.10	(a) Nitrogen adsorption and desorption isotherm (b) Pore-size distribution curve for silica aerogel after multiple oil absorption and desorption prepared at molar ratio MeOH: MTMS::35 (K4)	115
Figure 7.1	Schematic of synthesis of aerogel-embedded nonwoven blanket	121
Figure 7.2	N ₂ adsorption-desorption results of all samples after drying, (a) N ₂ adsorption-desorption isotherms; (b) Pore diameter distribution.	124
Figure 7.3	Thermal conductivity and bulk density of aerogel-embedded glass blankets	125

Figure 7.4	Photograph of aerogel blankets at different EtOH/TEOS concentrations	126
Figure 7.5	SEM images of aerogel blankets at different EtOH/TEOS concentrations	127
Figure 7.6	Sound absorption coefficient of aerogel-embedded glass blankets	129
Figure 7.7	NRC of aerogel-embedded glass blankets	129
Figure 7.8	Contact angle of aerogel-embedded blankets	130
Figure 7.9	Flexural stress-strain curves of the aerogel blanket	131
Figure 7.10	Uniaxial compression of aerogel-embedded glass blanket	132
Figure 7.11	Thermogravimetric analysis of aerogel-embedded glass blanket	133
Figure 7.12	Photographic images of aerogel blankets at various dilution ratio(Z1-Z6)	134
Figure 7.13	(a) Fire-testing set-up (b) Nonwoven matt untreated after fire testing	135
Figure 7.14	SEM images of aerogel-embedded ceramic blankets at different solvent concentrations	137
Figure 7.15	Photograph of aerogel-embedded ceramic blankets at different EtOH/TEOS concentrations	137
Figure 7.16	Density and thermal conductivity of prepared aerogel-embedded ceramic blankets	138
Figure 7.17	Spectra before and after surface modification of L3 aerogel	139
Figure 7.18	Hydrophobicity of prepared aerogel-embedded ceramic blankets	140

Figure 7.19	TGA of prepared aerogel-embedded ceramic blankets	141
Figure 7.20	3-point bending of aerogel-embedded blanket	142
Figure 7.21	Sound absorption coefficient aerogel-embedded ceramic Blanket	144
Figure 7.22	NRC of prepared aerogel-embedded ceramic blankets	145
Figure 7.23	Fire-resistance of prepared aerogel-embedded ceramic blankets	146
Figure 7.24	(a) N ₂ adsorption/desorption isotherms of L2, L3, L4 aerogel (b) Pore size distributions L2, L3, L4 aerogel	147
Figure 8.1	Schematic of synthesis of aerogel-embedded nonwoven blanket	153
Figure 8.2	(a) Density and Gelation time of aerogel-embedded glass and ceramics blankets (b) Thermal conductivity of aerogel- embedded glass and ceramic blankets	155
Figure 8.3	(a) Photographic image of aerogel-embedded glass (JG1- JG6) and (JC1-JC6) ceramic blankets	156
Figure 8.4	(a) Microstructure of aerogel-embedded glass and ceramic blankets	156
Figure 8.5	Sound absorption coefficient of aerogel-embedded glass (JG1-JG6) and ceramic blankets (JC1-JC6)	157
Figure 8.6	Sound absorption coefficient of aerogel-embedded glass (JG1-JG6) and ceramic blankets (JC1-JC6)	158
Figure 8.7	Flexural properties of Aerogel-embedded glass (JG1-JG6) and ceramic (JC1-JC6) blankets	160

Figure 8.8	Thermal stability of aerogel-embedded glass(JG1-JG6) and ceramic blankets (JC1-JC6)	160
Figure 8.9	Aerogel-embedded glass (JG1-JG6) and ceramic (JC1-JC6) blankets after fire-testing	161
Figure 8.10	Contact angle of Aerogel-embedded glass (JG1-JG6) and ceramic (JC1-JC6) blankets	162
Figure 8.11	(a) N ₂ adsorption/desorption isotherms of silica aerogel (J3,J4) (b) Pore size distribution	163
Figure 9.1	(a) Design of basalt, (b) Customised Spacer Machine (c) Cross-sectional view of spacer fabric of 8,4 and 2 mm	169
Figure 9.2	Schematic of in-situ synthesis of aerogel-embedded basalt blankets using TEOS precursor	171
Figure 9.3	Schematic of in-situ synthesis of aerogel-embedded basalt blankets using MTMS precursor.	172
Figure 9.4	Bulk Density of Cellular basalt spacer fabric of 2, 4 and 8 mm thickness	173
Figure 9.5	Bulk Density of aerogel-embedded cellular basalt spacer fabric of varying thickness	174
Figure 9.6	Aerogel-embedded basalt blankets prepared using TEOS precursor	175
Figure 9.7	Bulk Density of Cellular basalt spacer fabric of 2, 4, and 8 mm thickness	176
Figure 9.8	Thermal conductivity of aerogel-embedded cellular basalt spacer fabric of varying thickness	176

Figure. 9.9	Air-entrapment mechanism aerogel-embedded blankets of 2, 4 and 8mm thickness	176
Figure 9.10	Sound absorption coefficients (SAC) aerogel-embedded cellular basalt blankets of varying thickness	178
Figure 9.11	Compression properties aerogel-embedded cellular basalt blankets of varying thickness	179
Figure 9.12	Thermal stability aerogel-embedded cellular basalt blankets of 2, 4 and 8mm thickness	180
Figure 9.13	Wettability of aerogel-embedded blankets of 2, 4 and 8mm thickness	180
Figure 9.14	Aerogel-embedded cellular basalt blanket after fire testing	181
Figure 9.15	Bulk density of spacer fabric of various thicknesses	182
Figure 9.17	Photographic image of aerogel-embedded cellular blankets of 2, 4 and 8 mm thicknesses	183
Figure 9.18	Thermal conductivity of spacer blankets of various thicknesses	184
Figure 9.19	Thermal conductivity of Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	185
Figure 9.20	Sound absorption coefficient (SAC) of Spacer fabric and Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	186
Figure 9.21	Compressive properties of Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	187
Figure 9.22	Thermal stability of Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	188

Figure 9.23	Wettability of Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	199
Figure 9.24	Fire-resistance of Aerogel-embedded basalt spacer blankets of various thicknesses	190

List of the Tables

Figures	Titles	Page No.
Figure 3.1	Table 3.1. The advantage and disadvantage of the aerogel synthesis method	18
Table 3.2.	Comparison between various drying methods	26
Table 3.3	Properties of silica aerogel	29
Table 3.4	Enhancing the mechanical properties of silica aerogel using additives	32
Table 3.5	Aerogel-embedded nonwoven blanket	48
Table 4.1	Mechanical properties of different fibres	72
Table 4.2	Thermal properties of different fibres	73
Table 5.1	Nomenclature of prepared aerogels	89
Table 6.1	Physical properties of aerogel	107
Table 6.2	Organic liquid/oil quantity absorbed by silica aerogel and its surface tension	112
Table 6.3	Comparison of absorption capacity with other absorbents	115
Table 7.1	Physical properties of prepared pure aerogel	123
Table 7.2	Properties of aerogel-embedded glass blankets	123
Table7.3	Flexural properties of aerogel blankets	131
Table7.4	Compressional properties of aerogel blankets	132
Table7.5	Thermophysical properties of aerogel embedded ceramic blankets	136
Table 7.5	Compressive properties of aerogel-embedded ceramic blankets	142
Table 7.6	Pore parameters of the aerogel matrix	147
Table 8.1	Nomenclature of developed aerogel-embedded blankets	154

Table 8.2	Flexural strength and modulus of aerogel-embedded glass blankets at 15 and 30% strain level	159
Table 8.3	Flexural strength and modulus of aerogel-embedded ceramics blankets at 15 and 30% strain level	159
Table 8.4	Surface area, pore radius and pore size of J3 and J4 aerogels	163
Table 9.1	Specifications of aerogel-embedded basalt blanket using TEOS precursor	171
Table 9.2	Specifications of aerogel-embedded basalt blanket using MTMS precursor	173

List of abbreviations

Abbreviations	Description
TEOS	Tetraethyl orthosilicate
MTMS	Trimethoxymethylsilane
SCD	Supercritical drying
FD	Freeze-drying
APD	Ambient pressure drying
TMCS	Trimethylchlorosilane
SAC	Sound Attenuation Coefficient
BJH	Barrett–Joyner–Halenda
BET	Brunauer-Emmett-Teller