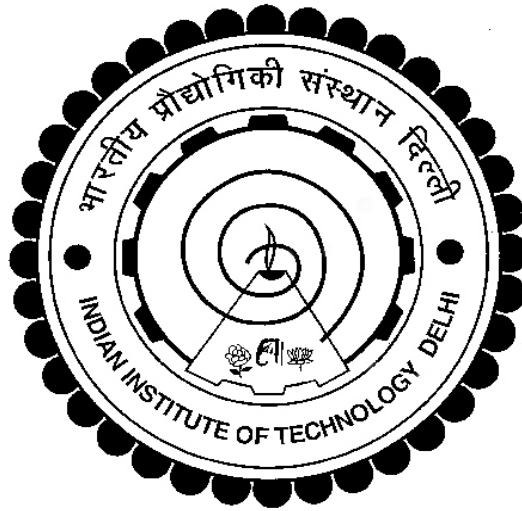


# **ACOUSTIC BEHAVIOR OF TEXTILE STRUCTURES**

**PARIKSHIT PAUL**



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

May 2023

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

# **ACOUSTIC BEHAVIOR OF TEXTILE STRUCTURES**

by

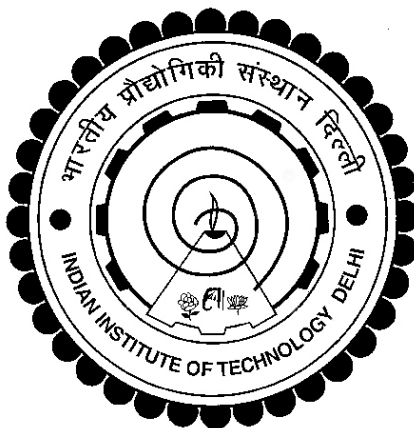
**PARIKSHIT PAUL**

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**

May 2023

**Dedicated To My Parents**

## **CERTIFICATE**

This is to certify that the thesis entitled “**Acoustic behavior of textile structures**” being submitted by **Mr. Parikshit Paul**, Entry No. **2019TTZ8466** 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 him. Mr. Parikshit Paul 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.

**Date:**

**Prof. B K Behera**

**Place:** New Delhi

Department of Textile and Fiber Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016

## **ACKNOWLEDGEMENT**

Words of appreciation and gratitude fall short of acknowledging the inspiring guidance, valuable suggestions, and constant encouragement provided by Prof. 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. Alagirusamy, Dr Samrat Mukhopadhyay, Prof. Josemon Jacob (Department of Materials Science and Engineering), and other faculty members of the department.

I gratefully acknowledge the help and cooperation of the lab staff, especially Dr. Vikas Khatkar, Mr. Manoranjan Kundu, and Mr. Rupesh Ganvir. I am thankful to research associate Dr. Meenakshi Ahirwar for her kind assistance. I am thankful to all my friends especially, Ms. Lekhani Tripathi, Mr. Sandeep Olhan, Mr. Soumya Choudhary, Ms. Jaya Sharma, Mr. Shubham Agnihotri, Ms. Shivangi Shukla, Ms. Shikha Yadav for their constant help, support, and encouragement. At last, I would like to thank everyone who had contributed directly or indirectly during my research work.

I express my sincere gratitude to my mother, father, wife, daughter, brother, and friends for their motivation, moral support, and understanding.

**Date:** 17-5-2023

**Parikshit Paul**

**Place:** New Delhi

## **Abstract**

Noise is a complicated, nonperiodic sound that affects humans and other species. The International Commission on Biological Effects of Noise states that the risks caused by noise are still "often underestimated" in fields ranging from governmental regulation to medical practice. Noise pollution contributes to hearing loss, tinnitus, and hypersensitivity. It can also worsen or cause cardiovascular disease, type 2 diabetes, sleep disorders, stress, memory and attention issues, children's learning delays, and low birth weight. Animal health and welfare are also impacted by noise pollution. Animals use sound for several purposes: navigating, locating food, luring mates, and fending off predators. They struggle to carry out these duties due to noise pollution, which impacts their survival capacity. Passive methods reduce noise by transforming the sound energy from noise into heat. One of the best examples of passive materials is porous materials that minimize sound energy by dispersing heat energy because of their void structure. At higher sound frequencies, passive noise suppression is more effective.

Textile structures are lightweight and porous, which makes them a decent choice for sound absorption, even though they are not particularly effective materials for sound barrier solutions. Although there has been much research on textiles for reducing noise pollution in the past, those studies still lack a systematic and comprehensive methodology. The difficulty is preserving or improving the audio environment while achieving the appropriate sound levels. Developing textile-based acoustic materials and structures needs to follow a scientific methodology. It is necessary to investigate acoustical materials' eco-friendly and economically advantageous qualities, such as cost-effectiveness, lightweight, and recyclability. Production of nonwoven fabrics is quicker and less expensive because it does not involve a stage of yarn manufacturing.

In the first chapter of this research, polyester staple fiber, flax comber noil, and jute caddies were used to examine the effect of fiber type, fiber fineness, fiber cross-sectional shape, and fabric areal density on the acoustic properties of needle-punched nonwoven fabrics. In this study, a comparison has been carried out between synthetic and natural fibers using the same process and machine settings. The noise reduction coefficient and the sound absorption coefficient of polyester staple fiber, flax comber noil, and jute caddies were determined, and the effect of different variables on acoustic characteristics was investigated using the impedance tube system. According to this investigation, the hollow conjugated cross-section of polyester fiber offers the greatest sound absorption characteristics. Nonwoven materials manufactured using recyclable and biodegradable jute caddies and flax comber noil are less expensive than polyester synthetic fiber and exhibit significant sound absorption behavior. Higher punch density increases the interlocking among the fibers. As a result, the fabric porosity decreases, causing a hindrance to the propagation of sound. The existence of an air layer gives layered nonwoven structures enhanced sound absorption characteristics.

The most suitable textile for acoustic purposes is nonwoven. Nevertheless, they lack aesthetic quality. The lack of structural integrity of the nonwoven fabrics is its intrinsic flaw. This flaw does not exist in woven fabrics. A three-dimensional weaving technique can develop a multilayer orthogonal structure using the third set of binder threads in addition to the traditional warp and weft. Textile structures in three dimensions are one of the least researched possibilities for acoustic insulation. Because no prior research has been done, it establishes a range of investigations on the acoustic behaviors of three-dimensional woven orthogonal fabrics. Therefore, in the second chapter of this research, the acoustic behavior of unidirectional (UD), two-directional (2D), and three-dimensional (3D) woven fabrics developed using glass, jute, and flax yarns were investigated. The effect of weave geometry, number of stuffer layers, and fiber type on the acoustic behavior of three-dimensional orthogonal woven fabrics was also

determined. Natural fibers such as jute and flax yarns were preferred because of their biodegradability and superior sound-absorbing qualities. 3D hybrid orthogonal structures were developed to utilize the properties of both glass and natural fibers (jute, recycled shoddy) together. Jute and flax orthogonal fabrics exhibited better acoustic behavior than glass fabrics. This study implies that three-dimensional orthogonal fabrics can be used to avoid the naturally low sound absorption characteristics of two-dimensional materials. Compared to jute or recycled denim waste yarn, hybrid fabrics made with glass exhibited less sound absorption due to their solid circular cross-section.

It has been observed that the acoustic performance of woven and nonwoven structures is mainly dependent on the structure's bulk density/porosity/air space. All these parameters influence the air flow resistivity of the fabrics. Static air flow resistivity is one of the well-known characteristics used to describe the acoustical behavior of porous materials. The visco-inertial effects at low frequencies are characterized by static airflow resistance. Consequently, the investigation of the airflow resistance of the fabrics and its correlation with the sound absorption coefficient becomes an important part of this study. Therefore, in the third chapter of this research, an instrument based on ISO 9053 standard was fabricated to measure airflow resistivity. It was observed that as areal density increases, the airflow resistance also increases. The airflow resistance increases with increase in mass density and decrease in porosity. With an increase in punch density, observable variations in airflow resistance were seen. Low porosity accounts for low airflow resistivity of 3D orthogonal fabrics manufactured from glass roving due to the round and solid structure of glass fiber. Plain orthogonal fabrics show maximum airflow resistivity due to maximum number of interlacements. Three-dimensional orthogonal woven fabrics made of jute and flax yarn shows improved airflow resistivity due to multiscale micromorphology. It was observed that the sound absorption coefficient and airflow

resistance were directly proportional to each other for different type of fabrics (woven, nonwoven etc.) and different variations (fiber type, weave type, stuffer layers etc.) considered.

Acoustic materials can work in two broad principles: sound absorption and sound insulation. While fibrous structures are considered suitable for sound absorption, the fiber-reinforced composite materials can be used as a barrier to sound transmission. In addition, fiber-reinforced composite materials are well known for their load-bearing properties. Therefore, the acoustic properties of composites are significantly important when used in buildings and civil structures as they must effectively insulate against noise and heat along with high strength to weight ratio. Composites possess excellent properties such as low weight, high strength and stiffness, and impact resistance, enabling them to be used in automobiles as acoustic and load-bearing components. The sound transmission loss and sound absorption can be enhanced if the composites are used in conjunction with other sound barrier fillers. Using textile structural composites with reinforcements such as nonwoven, 3D woven, and hybrid structures can fulfil dual load bearing and sound insulation purposes.

Therefore, in the fourth chapter of this research, the acoustic performance of fiber-reinforced composites pertaining to different type of textile structures, fiber volume fraction, and orientation of fibers were explored. The two-dimensional and three-dimensional orthogonal fabrics developed using glass, jute, and flax woven fabrics were used as reinforcement to develop composites using a vacuum-assisted resin infusion technique. The acoustic behavior of the developed composites was thoroughly investigated. The sound absorption coefficient of neat epoxy resin is lower than fibers. It was observed that sound absorption coefficient of composites was less than the three-dimensional orthogonal woven fabrics used as reinforcement. Composites with different types of fibers, varying weave geometry, and the number of stuffer layers show similar sound absorption coefficients. This behavior is due to

the infusion of epoxy resin. Compared to other composite forming manufacturing techniques, compression molding is a simpler technique. The nonwoven composites were developed using compression molding. It was observed that compression-molded composites made of jute nonwoven have the potential to be used as better sound-absorbing materials. Therefore, it can be stated that the selection of reinforcement for the development of composite material for acoustic application should be made purely based on end-use applications because composites prepared from identical fiber volume fraction using different fibers have no significant difference in their sound insulation value.

The sound absorption properties of composite materials can be improved by incorporating nanofillers, allowing these composites to be used as both sound-insulating and sound-absorbing materials. Investigation of incorporating nanofillers such as graphene, silica, and other metal oxides into textile structural composites to boost their sound absorption properties is reportedly a grey area. Nanomaterials/nanofillers are good at absorbing acoustic energy due to their large surface area and effective airflow resistance. Though some research is performed using silica, iron nanoparticles, and graphene to modify the sound absorption properties of polyurethane, silica, and melamine foam, a scant amount of research has been done on the acoustic behavior of nanoparticle-filled epoxy resin composites. Therefore, in the fourth chapter of this research, an effort has been made to investigate acoustic behavior of composites incorporating nanoparticles. Graphene is among the most promising nanomaterials due to its special qualities, such as being thin, robust, and having superior heat conductivity to other materials. Other nanofillers used were copper oxide, iron oxide, and silicon dioxide nanoparticles. It was observed that adding nanoparticles can greatly improve the acoustic behavior of composite materials in the higher frequency ranges due to the damping characteristics of nanofillers.

Thus, systematic research has been done on the acoustic performance of nonwovens, unidirectional textile structures, two-dimensional structures, and three-dimensional structures. Hybrid orthogonal woven structures, spacer fabrics, and honeycomb structures were also characterised for their acoustic properties. The natural fiber wastes that are widely available and would otherwise be thrown out such as flax comber noil, and jute caddies, are efficient and beneficial value-added textile materials can be used in acoustic applications. In this study, sustainable recycled textile-based sound-absorbing materials were developed, and these materials were found suitable for acoustic applications as composite reinforcement and porous fibrous material form.

## सार

शोर एक जटिल, गैर-आवधिक ध्वनि है जो मनुष्यों और अन्य प्रजातियों को प्रभावित करती है। शोर के जैविक प्रभावों पर अंतर्राष्ट्रीय आयोग का कहना है कि शोर के कारण होने वाले जोखिमों को अभी भी सरकारी विनियमन से लेकर चिकित्सा अभ्यास तक के क्षेत्रों में "अक्सर कम करके आंका" जाता है। ध्वनि प्रदूषण सुनवाई हानि, टिनिटस और अतिसंवेदनशीलता में योगदान देता है। यह कार्डियोवैस्कुलर बीमारी, टाइप 2 मधुमेह, नींद विकार, तनाव, स्मृति और ध्यान के मुद्दों, बच्चों के सीखने में देरी और जन्म के समय कम वजन को भी खराब या कारण बना सकता है। ध्वनि प्रदूषण से पशु स्वास्थ्य और कल्याण भी प्रभावित होते हैं। जानवर कई उद्देश्यों के लिए ध्वनि का उपयोग करते हैं: नेविगेट करना, भोजन का पता लगाना, साथियों को लुभाना और शिकारियों को मारना। वे ध्वनि प्रदूषण के कारण इन कर्तव्यों को पूरा करने के लिए संघर्ष करते हैं, जो उनकी जीवित रहने की क्षमता को प्रभावित करता है। निष्क्रिय तरीके ध्वनि ऊर्जा को शोर से गर्मी में बदलकर शोर को कम करते हैं। निष्क्रिय सामग्री के सबसे अच्छे उदाहरणों में से एक छिद्रपूर्ण सामग्री है जो अपनी शून्य संरचना के कारण गर्मी ऊर्जा को फैलाकर ध्वनि ऊर्जा को कम करती है। उच्च ध्वनि आवृत्तियों पर, निष्क्रिय शोर दमन अधिक प्रभावी है।

कपड़ा संरचनाएं हल्की और छिद्रपूर्ण होती हैं, जो उन्हें ध्वनि अवशोषण के लिए एक अच्छा विकल्प बनाती हैं, भले ही वे ध्वनि बाधा समाधान के लिए विशेष रूप से प्रभावी सामग्री न हों। यद्यपि अतीत में ध्वनि प्रदूषण को कम करने के लिए वस्त्रों पर बहुत शोध किया गया है, फिर भी उन अध्ययनों में एक व्यवस्थित और व्यापक पद्धति की कमी है। कठिनाई उचित ध्वनि स्तरों को प्राप्त करते समय ऑडियो वातावरण को संरक्षित या सुधार रही है। कपड़ा आधारित ध्वनिक सामग्री और संरचनाओं को विकसित करने के लिए एक वैज्ञानिक पद्धति का पालन करने की आवश्यकता है। ध्वनिक सामग्री के पर्यावरण के अनुकूल और आर्थिक रूप से लाभप्रद गुणों की जांच करना आवश्यक है, जैसे कि लागत-प्रभावशीलता, हल्का और पुनर्चक्रण। गैर-बुना कपड़ों का उत्पादन तेज और कम महंगा है क्योंकि इसमें धागे के निर्माण का एक चरण शामिल नहीं है।

इस शोध के पहले अध्याय में, पॉलिएस्टर स्टेपल फाइबर, फ्लेक्स कॉम्बर नोइल और जूट कैडीज का उपयोग सुई-पंच वाले गैर-बुना कपड़ों के ध्वनिक गुणों पर फाइबर प्रकार, फाइबर फाइनेस, फाइबर क्रॉस-सेक्शनल आकार और कपड़े अवास्तविक घनत्व के प्रभाव की जांच करने के लिए किया गया था। इस अध्ययन में, एक ही प्रक्रिया और मशीन सेटिंग्स का उपयोग करके सिंथेटिक और प्राकृतिक फाइबर के बीच तुलना की गई है। पॉलिएस्टर स्टेपल फाइबर, फ्लेक्स कॉम्बर नोइल और जूट कैडीज के शोर में कमी गुणांक और ध्वनि अवशोषण गुणांक निर्धारित किए गए थे, और प्रतिबाधा ट्यूब सिस्टम का उपयोग करके ध्वनिक विशेषताओं पर विभिन्न चर के प्रभाव की जांच की गई थी। इस जांच के अनुसार, पॉलिएस्टर फाइबर का खोखला संयुग्मित क्रॉस-सेक्शन सबसे बड़ी ध्वनि अवशोषण विशेषताओं की पेशकश करता है। पुनर्नवीनीकरण और बायोडिग्रेडेबल जूट कैडीज और फ्लेक्स कॉम्बर नोइल का उपयोग करके निर्मित गैर-बुना सामग्री पॉलिएस्टर सिंथेटिक फाइबर की तुलना में कम महंगी है और महत्वपूर्ण ध्वनि अवशोषण व्यवहार प्रदर्शित करती है। उच्च पंच घनत्व फाइबर के बीच इंटरलॉकिंग को बढ़ाता है। नतीजतन, कपड़े की सरंधता कम हो जाती है, जिससे ध्वनि के प्रसार में बाधा उत्पन्न होती है। एक वायु परत का अस्तित्व स्तरित गैर-बुना संरचनाओं को बढ़ी हुई ध्वनि अवशोषण विशेषताओं को देता है।

ध्वनिक उद्देश्यों के लिए सबसे उपयुक्त वस्त्र गैर बुना हुआ है। फिर भी, उनमें सौंदर्य गुणवत्ता की कमी है। गैर-बुने कपड़ों की संरचनात्मक अखंडता की कमी इसका आंतरिक दोष है। बुने हुए कपड़ों में यह दोष मौजूद नहीं है। एक त्रि-आयामी बुनाई तकनीक पारंपरिक ताने-बाने और गीलेपन के अलावा बाइंडर थ्रेड्स के तीसरे सेट का उपयोग करके एक बहुस्तरीय ऑर्थोगोनल संरचना विकसित कर सकती है। तीन आयामों में कपड़ा संरचनाएं ध्वनिक इन्सुलेशन के लिए कम से कम शोध की गई संभावनाओं में से एक हैं। क्योंकि कोई पूर्व शोध नहीं किया गया है, यह तीन आयामी बुने हुए ऑर्थोगोनल कपड़ों के ध्वनिक व्यवहार पर जांच की एक श्रृंखला स्थापित करता है। इसलिए, इस शोध के दूसरे अध्याय में, कांच, जूट और सन धागे का उपयोग करके विकसित यूनिडायरेक्शनल (यूडी), दो-दिशात्मक (2 डी), और तीन-आयामी (3 डी) बुने हुए कपड़ों के ध्वनिक व्यवहार की जांच की गई। त्रि-आयामी ऑर्थोगोनल बुने हुए

कपड़ों के ध्वनिक व्यवहार पर बुनाई ज्यामिति, स्टफर परतों की संख्या और फाइबर प्रकार का प्रभाव भी निर्धारित किया गया था। जूट और सन यार्न जैसे प्राकृतिक फाइबर को उनकी बायोडिग्रेडेबिलिटी और बेहतर ध्वनि-अवशोषित गुणों के कारण पसंद किया गया था। ग्लास और प्राकृतिक फाइबर (जूट, पुनर्नवीनीकरण घटिया) दोनों के गुणों का एक साथ उपयोग करने के लिए 3 डी हाइब्रिड ऑर्थोगोनल संरचनाओं को विकसित किया गया था। जूट और फ्लेक्स ऑर्थोगोनल कपड़ों ने ग्लास कपड़ों की तुलना में बेहतर ध्वनिक व्यवहार का प्रदर्शन किया। इस अध्ययन का तात्पर्य है कि दो-आयामी सामग्रियों की स्वाभाविक रूप से कम ध्वनि अवशोषण विशेषताओं से बचने के लिए त्रि-आयामी ऑर्थोगोनल कपड़ों का उपयोग किया जा सकता है। जूट या पुनर्नवीनीकरण डेनिम अपशिष्ट धागे की तुलना में, कांच से बने हाइब्रिड कपड़ों ने अपने ठोस गोलाकार क्रॉस-सेक्शन के कारण कम ध्वनि अवशोषण का प्रदर्शन किया। यह देखा गया है कि बुनी हुई और गैर-बुनी हुई संरचनाओं का ध्वनिक प्रदर्शन मुख्य रूप से संरचना के थोक घनत्व / सरंधता / वायु स्थान पर निर्भर है। ये सभी पैरामीटर कपड़ों की वायु प्रवाह प्रतिरोधकता को प्रभावित करते हैं। स्थैतिक वायु प्रवाह प्रतिरोधकता छिद्रपूर्ण सामग्री के ध्वनिक व्यवहार का वर्णन करने के लिए उपयोग की जाने वाली प्रसिद्ध विशेषताओं में से एक है। कम आवृत्तियों पर विस्को-जड़तीय प्रभाव स्थैतिक वायु प्रवाह प्रतिरोध की विशेषता है। नतीजतन, कपड़ों के वायु प्रवाह प्रतिरोध की जांच और ध्वनि अवशोषण गुणांक के साथ इसका सहसंबंध इस अध्ययन का एक महत्वपूर्ण हिस्सा बन जाता है। इसलिए, इस शोध के तीसरे अध्याय में, एयरफ्लो प्रतिरोधकता को मापने के लिए आईएसओ 9053 मानक पर आधारित एक उपकरण बनाया गया था। यह देखा गया कि जैसे-जैसे एरियल घनत्व बढ़ता है, वायु प्रवाह प्रतिरोध भी बढ़ता है। वायु प्रवाह प्रतिरोध द्रव्यमान घनत्व में वृद्धि और सरंधता में कमी के साथ बढ़ता है। पंच घनत्व में वृद्धि के साथ, एयरफ्लो प्रतिरोध में अवलोकन योग्य भिन्नताएं देखी गईं। ग्लास फाइबर की गोल और ठोस संरचना के कारण ग्लास रीविंग से निर्मित 3 डी ऑर्थोगोनल कपड़ों की कम एयरफ्लो प्रतिरोधकता के लिए कम सरंधता जिम्मेदार है। सादे ऑर्थोगोनल कपड़े इंटरलेसमेंट की अधिकतम संख्या के कारण अधिकतम एयरफ्लो प्रतिरोधकता दिखाते हैं। जूट और सन यार्न से बने त्रि-

आयामी ऑर्थोगोनल बुने हुए कपड़े मल्टीस्केल माइक्रोमोर्फोलॉजी के कारण बेहतर एयरफ्लो प्रतिरोधकता दिखाते हैं। यह देखा गया कि ध्वनि अवशोषण गुणांक और वायु प्रवाह प्रतिरोध विभिन्न प्रकार के कपड़ों (बुने हुए, गैर-बुने हुए आदि) के लिए एक दूसरे के सीधे आनुपातिक थे और विभिन्न विविधताओं (फाइबर प्रकार, बुनाई प्रकार, स्टर परतों आदि) पर विचार किया गया था।

ध्वनिक सामग्री दो व्यापक सिद्धांतों में काम कर सकती है: ध्वनि अवशोषण और ध्वनि इन्सुलेशन। जबकि रेशेदार संरचनाओं को ध्वनि अवशोषण के लिए उपयुक्त माना जाता है, फाइबर-प्रबलित मिश्रित सामग्री का उपयोग ध्वनि संचरण के लिए एक बाधा के रूप में किया जा सकता है। इसके अलावा, फाइबर-प्रबलित मिश्रित सामग्री अपने लोड-असर गुणों के लिए अच्छी तरह से जानी जाती है। इसलिए, इमारतों और नागरिक संरचनाओं में उपयोग किए जाने पर कंपोजिट के ध्वनिक गुण काफी महत्वपूर्ण होते हैं क्योंकि उन्हें वजन अनुपात के साथ-साथ शोर और गर्मी के खिलाफ प्रभावी ढंग से इन्सुलेट करना चाहिए। कंपोजिट में कम वजन, उच्च शक्ति और कठोरता, और प्रभाव प्रतिरोध जैसे उत्कृष्ट गुण होते हैं, जिससे उन्हें ऑटोमोबाइल में ध्वनिक और लोड-असर घटकों के रूप में उपयोग किया जा सकता है। ध्वनि संचरण हानि और ध्वनि अवशोषण को बढ़ाया जा सकता है यदि कंपोजिट का उपयोग अन्य ध्वनि बाधा भराव के साथ संयोजन के रूप में किया जाता है। गैर-बुना, 3 डी बुना और हाइब्रिड संरचनाओं जैसे सुदृढीकरण के साथ कपड़ा संरचनात्मक कंपोजिट का उपयोग दोहरे भार असर और ध्वनि इन्सुलेशन उद्देश्यों को पूरा कर सकता है।

इसलिए, इस शोध के चौथे अध्याय में, विभिन्न प्रकार की कपड़ा संरचनाओं, फाइबर वॉल्यूम अंश और फाइबर के अभिविन्यास से संबंधित फाइबर-प्रबलित कंपोजिट के ध्वनिक प्रदर्शन का पता लगाया गया था। ग्लास, जूट और फ्लेक्स बुने हुए कपड़ों का उपयोग करके विकसित दो-आयामी और तीन-आयामी ऑर्थोगोनल कपड़ों का उपयोग वैक्यूम-असिस्टेड राल इन्फ्यूजन तकनीक का उपयोग करके कंपोजिट विकसित करने के लिए सुदृढीकरण के रूप में किया गया था। विकसित कंपोजिट के ध्वनिक व्यवहार की पूरी तरह से जांच की गई थी। साफ एपॉक्सी राल का ध्वनि अवशोषण गुणांक फाइबर की तुलना में

कम है। यह देखा गया कि कंपोजिट का ध्वनि अवशोषण गुणांक सुदृढीकरण के रूप में उपयोग किए जाने वाले त्रि-आयामी ऑर्थोगोनल बुने हुए कपड़ों से कम था। विभिन्न प्रकार के फाइबर, अलग-अलग बुनाई ज्यामिति, और स्टर परतों की संख्या वाले कंपोजिट समान ध्वनि अवशोषण गुणांक दिखाते हैं। यह व्यवहार एपॉक्सी राल के जलसेक के कारण होता है। अन्य समग्र बनाने वाली विनिर्माण तकनीकों की तुलना में, संपीडन मोल्डिंग एक सरल तकनीक है। संपीडन मोल्डिंग का उपयोग करके गैर-बुना कंपोजिट विकसित किए गए थे। यह देखा गया कि जूट से बने संपीडन-मोल्ड किए गए कंपोजिट में बेहतर ध्वनि-अवशोषित सामग्री के रूप में उपयोग किए जाने की क्षमता है। इसलिए, यह कहा जा सकता है कि ध्वनिक अनुप्रयोग के लिए समग्र सामग्री के विकास के लिए सुदृढीकरण का चयन विशुद्ध रूप से अंतिम उपयोग अनुप्रयोगों के आधार पर किया जाना चाहिए क्योंकि विभिन्न फाइबर का उपयोग करके समान फाइबर वॉल्यूम अंश से तैयार कंपोजिट में उनके ध्वनि इन्सुलेशन मूल्य में कोई महत्वपूर्ण अंतर नहीं है।

नैनोफिलर को शामिल करके मिश्रित सामग्री के ध्वनि अवशोषण गुणों में सुधार किया जा सकता है, जिससे इन कंपोजिट को ध्वनि-इन्सुलेटिंग और ध्वनि-अवशोषित सामग्री दोनों के रूप में उपयोग किया जा सकता है। अपने ध्वनि अवशोषण गुणों को बढ़ावा देने के लिए कपड़ा संरचनात्मक कंपोजिट में ग्रेफेन, सिलिका और अन्य धातु ऑक्साइड जैसे नैनोफिलर को शामिल करने की जांच कथित तौर पर एक ग्रे क्षेत्र है। नैनोमैटेरियल्स / नैनोफिलर अपने बड़े सतह क्षेत्र और प्रभावी वायु प्रवाह प्रतिरोध के कारण ध्वनिक ऊर्जा को अवशोषित करने में अच्छे हैं। हालांकि पॉलीयुरेथेन, सिलिका और मेलामाइन फोम के ध्वनि अवशोषण गुणों को संशोधित करने के लिए सिलिका, लौह नैनोकणों और ग्राफीन का उपयोग करके कुछ शोध किए जाते हैं, नैनोपार्टिकल से भरे एपॉक्सी राल कंपोजिट के ध्वनिक व्यवहार पर बहुत कम शोध किया गया है। इसलिए, इस शोध के चौथे अध्याय में, नैनोकणों को शामिल करने वाले कंपोजिट के ध्वनिक व्यवहार की जांच करने का प्रयास किया गया है। ग्राफीन अपने विशेष गुणों के कारण सबसे आशाजनक नैनोमैटेरियल्स में से एक है, जैसे कि पतला, मजबूत होना और अन्य सामग्रियों के लिए बेहतर गर्मी चालकता होना। उपयोग किए जाने वाले अन्य नैनोफिलर कॉपर ऑक्साइड, आयरन ऑक्साइड और

सिलिकॉन डाइऑक्साइड नैनोकणों थे। यह देखा गया कि नैनोपार्टिकल्स को जोड़ने से नैनोफिलर्स की नमी विशेषताओं के कारण उच्च आवृत्ति रेंज में मिश्रित सामग्री के ध्वनिक व्यवहार में काफी सुधार हो सकता है।

इस प्रकार, गैर-बुना, यूनिडायरेक्शनल वस्त्र संरचनाओं, दो-आयामी संरचनाओं और तीन आयामी संरचनाओं के ध्वनिक प्रदर्शन पर व्यवस्थित शोध किया गया है। हाइब्रिड ऑर्थोगोनल बुने हुए संरचनाओं, स्पेसर कपड़े और मधुकोश संरचनाओं को भी उनके ध्वनिक गुणों के लिए चिह्नित किया गया था। प्राकृतिक फाइबर अपशिष्ट जो व्यापक रूप से उपलब्ध हैं और अन्यथा बाहर फेंक दिए जाएंगे जैसे कि फ्लेक्स कॉम्बर नोइल, और जूट कैडी, कुशल और लाभकारी मूल्य वर्धित वस्त्र सामग्री का उपयोग ध्वनिक अनुप्रयोगों में किया जा सकता है। इस अध्ययन में, टिकाऊ पुनर्नवीनीकरण वस्त्र-आधारित ध्वनि-अवशोषित सामग्री विकसित की गई थी, और इन सामग्रियों को समग्र सुदृढीकरण और छिद्रपूर्ण रेशेदार सामग्री के रूप में ध्वनिक अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त पाया गया था।

## Table of contents

Certificate	
Acknowledgement	i
Abstract	ii
Table of contents	xiv
List of Figures	xix
List of Tables	xxiii
List of Abbreviations	xxv
<b>Chapter 1: Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Background	1
1.2 Motivation	9
<b>Chapter 2: Research objectives</b>	<b>12</b>
2.1 Principal objective	12
2.2 Sub-objectives	12
<b>Chapter 3: Literature review</b>	<b>14</b>
3.1 Sound	14
3.2 Behavior of sound wave with the material surface	14
3.2.1 Absorption	14
3.2.2 Transmission	15
3.2.3 Reflection	15
3.2.4 Refraction	15
3.2.5 Diffraction and diffusion	15
3.2.6 Reverberation	15
3.2.7 Echoes	15
3.3 Mathematics of Sound	16
3.3.1 Vector Representation	16
3.3.2 The Complex Plane	17
3.3.4 Sound Generation	18
3.3.5 Wavelength and Angular Wave Number	19
3.3.6 Period, Angular Frequency, and Frequency	20
3.3.7 Band in Octave and 1/3 Octave	21
3.3.8 The speed of sound	21
3.3.9 The Wave Equation	24
3.4 Acoustical properties	27
3.4.1 Impedance	27

3.4.2 The intensity and sound level	27
3.4.3 Sound attributes	27
3.4.4 The decibel scales	28
3.4.5 Acoustic Performance	28
3.4.6 Impedance Tube Measurements	30
3.4.6.1 Reflections—Normal Incidence	30
3.4.6.2 Finite Impedance - Oblique Incidence Reflections	31
3.4.6.3 Diffuse field absorption coefficient calculation geometry	33
3.4.7 Noise Reduction Coefficient (NRC)	34
3.4.8 Airflow resistivity	34
3.5 Poroelastic material	36
3.6 Acoustic materials	36
3.7 Acoustic textile structure	37
3.7.1 Advantage of textile structures for acoustic applications	38
3.7.2 Limitations of acoustic textile structures	38
3.7.3 Materials used to create acoustical textiles.	39
3.7.4 Applications of acoustic textiles	39
3.7.5 Acoustic characteristics of textile fibers	40
3.7.6 Acoustic characteristics of woven fabrics	41
3.7.7 Acoustic characteristics of nonwoven fabrics	43
3.7.8 Acoustic characteristics of the knitted structure	45
3.7.9 Acoustic characteristics of composites	46
3.7.10 Textile waste composites used as acoustic materials.	49
3.7.11 Acoustical panel structure	50
3.7.12 Nanomaterial Application	52
3.7.13 Shear thickening fluid and acoustic performance	52
3.7.14 Functional finish for acoustic applications	53
3.8 Impedance prediction methods for fibrous materials	56
3.8.1 Parameters of models	56
3.8.1.1. Flow resistivity	56
3.8.1.2 Porosity	56
3.8.1.3 Tortuosity	57
3.8.1.4 Viscous characteristic length	57
3.8.1.5 Thermal characteristic length	58
3.8.1.6 Static thermal permeability	58
3.8.2 Propagation models	59
3.8.2.1 Motionless-skeleton models	59
3.8.2.2 Delany–Bazley model	60
3.8.2.3 Garai and Pompoli model	61
3.8.2.4 Delany–Bazley–Miki model	61
3.8.2.5 Wilson’s model	62
3.8.2.6 Johnson–Champoux–Allard (JCA) model	63
3.8.2.7 Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL) model	63
3.8.2.8 Theory of micro-perforated panels	64
3.8.2.9 The corresponding electrical circuit for a thin cloth in the suggested model	65
<b>Chapter 4: Materials and Methods</b>	<b>67</b>
4.1 Materials	67

4.2 Methodology	67
4.2.1 Preparation of nonwoven samples	67
4.2.2 Manufacturing of woven fabric samples	68
4.2.3. Composite preparation	70
4.2.3.1 Development of thermoset composites using compression molding with nonwoven preforms	70
4.2.3.2 Development of 3D woven structural composites using vacuum-assisted resin infusion molding	71
4.2.3.3 Application of graphene to the polymer composites	72
4.2.3.4 Application of metal oxide nanoparticles to the composites	72
4.2.4. Measurement of fabric thickness and areal density	72
4.2.5 Sound absorption coefficient measurement	73
4.2.6 Airflow resistance of nonwovens and 3D woven fabrics	76
4.2.6.1 Fabrication of airflow resistance instrument	76
4.2.6.2 Measurement of airflow resistance	78
4.2.7 Tensile test of textile-reinforced composites	78
<b>Chapter 5: To investigate the effect of fibre type, fibre linear density, fibre cross-sectional shape, fabric areal density, number of layers, and fabric porosity on acoustic properties of needle punched nonwoven fabrics</b>	<b>79</b>
5.1 Introduction	79
5.2 Materials	80
5.3 Methodology	84
5.3.1 Development of nonwoven samples	84
5.3.2 Measurement of fabric thickness and areal density	84
5.3.3 Measurement of acoustical properties	84
5.4 Results and Discussion	84
5.4.1 Effect of fiber fineness on acoustic properties	84
5.4.2 Effect of nonwoven areal density on acoustic properties	86
5.4.2.1 Effect of 3-Denier polyester staple fiber on acoustic properties	86
5.4.2.2 Effect of 10 Denier polyester staple fiber on acoustic properties	87
5.4.2.3 Effect of 4 Denier hollow conjugate polyester fiber on acoustic properties	88
5.4.2.4 Effect of 4 Denier hollow polyester fiber on acoustic properties	89
5.4.2.5 Effect of 7 Denier hollow conjugate polyester fiber on acoustic properties	90
5.4.2.6 Effect of flax comber noil on acoustic properties	91
5.4.2.7 Effect of jute caddies on acoustic properties	92
5.4.3 Effect of fiber cross-sectional shape on sound absorption characteristics	94
5.4.4 Effect of different fibers on acoustic characteristics having an areal density of 550 gram/meter <sup>2</sup>	95
5.4.5 Effect of different fibers on acoustic characteristics having an areal density of 650 gram/meter <sup>2</sup>	97
5.4.6 Effect of punch density on acoustic characteristics of nonwoven	99
5.4.7 Effect of the number of layers on acoustic properties of nonwoven fabrics	100
5.5 Conclusions	102
<b>Chapter 6: To determine the effect of weave architectures, fibre types, and weave geometry on acoustic behaviours of various woven constructions such as unidirectional fabric, 2d fabric, 3d solid structures, 3d hollow, and 3d hybrid structures</b>	<b>104</b>

6.1 Introduction	104
6.2 Materials	105
6.3 Methodology	105
6.3.1 Development of UD, 2D, 3D, 3D hollow, and 3D hybrid fabrics	105
6.3.2 Characterization of sound absorption properties	113
6.4 Results and Discussion	113
6.4.1 Effect of weave architecture on acoustic behaviors of various woven constructions such as unidirectional (UD) fabric, 2D fabric, and 3D solid structures	113
6.4.2 Effect of different fibers on acoustic characteristics of the three-dimensional orthogonal fabric	115
6.4.3 Effect of different weave geometry on acoustic characteristics of the three-dimensional orthogonal fabric	116
6.4.4 Effect of the number of stuffer layers on acoustic characteristics of the three-dimensional orthogonal fabric	118
6.4.5 Effect of hybridization on acoustic characteristics of the three-dimensional orthogonal fabric	119
6.4.6 Acoustic behavior of three-dimensional woven honeycomb, spacer, and five-layer two-dimensional flax fabric	121
6.5 Conclusions	123
<b>Chapter 7: To investigate the effect of air flow resistance on acoustic performance of nonwovens and 3d woven structures</b>	<b>124</b>
7.1 Introduction	124
7.2 Materials	126
7.2.1 Preparation of nonwoven fabrics	126
7.2.2 Preparation of woven fabrics	126
7.4 Results and Discussion	128
7.4.1 Effect of fiber fineness on airflow resistivity of nonwoven	128
7.4.2 Effect of areal density on airflow resistivity of nonwoven	130
7.4.3 Effect of punch density on airflow resistivity of three-denier polyester nonwoven	137
7.4.4 Effect of fiber cross-sectional shape on airflow resistivity of nonwovens	138
7.4.5 Effect of fiber type on airflow resistivity of three-dimensional orthogonal fabrics	139
7.4.6 Effect of the number of stuffer layers on airflow resistivity of three-dimensional orthogonal jute fabrics	141
7.4.7 Effect of weave geometry on airflow resistivity of 3D orthogonal glass fabrics	142
7.5 Conclusions	143
<b>Chapter 8: To investigate the acoustic behaviour of fibre-reinforced composite materials developed using nonwoven, 3d orthogonal and 3d hybrid orthogonal fabrics</b>	<b>145</b>
8.1 Introduction	145
8.2 Materials	147
8.3 Methodology	150
8.3.1 Sample preparation	150

8.3.1.1 Development of 3D woven structural composites using vacuum-assisted resin infusion molding	150
8.3.1.2 Development of thermoset composites using compression molding with nonwoven preforms	151
8.3.2 Tensile test of 3D textile reinforced composites	151
8.3.3 Acoustic characterization of composite materials	152
8.4 Results and Discussion	152
8.4.1 Effect of fiber type on the sound absorption coefficient of compression molded composites	152
8.4.2 Effect of fiber types on the sound absorption coefficient of composites made from three-dimensional orthogonal composites	157
8.4.3 The effect of the number of stuffer layers on the sound absorption behavior of jute orthogonal composites	157
8.4.4 Effect of weave geometry on sound absorption behavior of three-dimensional orthogonal composites made from plain, twill, and matt orthogonal fabrics	160
8.4.5 Acoustic behavior of hybrid three-dimensional orthogonal composites	162
8.5 Conclusions	165
<b>Chapter 9: Approaches to enhance acoustic performance of fibre-reinforced composite materials by incorporating some nanofillers</b>	<b>166</b>
9.1 Introduction	166
9.2 Materials	168
9.3 Methodology	171
9.3.1 Sample preparation	171
9.3.2 Acoustic characterization of composite materials	171
9.4 Results and Discussion	172
9.4.1 Effect of graphene powder on the sound absorption behavior of flax-reinforced composites	172
9.4.2 Effect of silicon-dioxide nanoparticles on the sound absorption characteristics of flax-reinforced composites	173
9.4.3 Effect of CuO nanoparticle on the sound absorption characteristics of flax composites	174
9.4.4 Effect of iron-oxide nanoparticles on the sound absorption characteristics of flax-reinforced composites	175
9.5 Conclusions	176
<b>Chapter 10: Summary and Conclusions</b>	<b>178</b>
10.1 Summary	178
10.2 Conclusions	181
<b>Scope for future work</b>	<b>183</b>
<b>References</b>	<b>185</b>
<b>List of Publications</b>	<b>218</b>
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>219</b>

## List of Figures

<b>Figures</b>	<b>Title</b>	<b>Page No.</b>
Figure 3.1	Vector representation	16
Figure 3.2	Rotating Vector Representation of Harmonic Motion	18
Figure 3.3	Wavelength and frequency in the air at 20 °C (68 °F)	20
Figure 3.4	Propagation of sound wave in a tube	22
Figure 3.5	Representative Cube	25
Figure 3.6	Sound Wave Interaction with a Surface	29
Figure 3.7	Measurements of the Absorption Coefficient Using Impedance Tubes	30
Figure 3.8	Diffuse field absorption coefficient calculation geometry	33
Figure 3.9	The equivalent circuit model	65
Figure 4.1	Nonwoven manufacturing process using Dilo needle loom	68
Figure 4.2	Single rapier electronic dobby loom	69
Figure 4.3	Compression molding process to develop thermoset composites	70
Figure 4.4	Compression molding machine	71
Figure 4.5	Development of composites using VARTM for woven composites	72
Figure 4.6	Impedance Tube System for Sound Absorption Measurement	74
Figure 4.7	Epilog Helix 24 laser cutting machine	74
Figure 4.8	Impedance tube with 30mm diameter	75
Figure 4.9	Impedance tube with 100mm diameter	75
Figure 4.10	Test rig for airflow resistance measurement	77
Figure 4.11	Schematic diagram of airflow resistance testing equipment	77
Figure 5.1	Nonwoven using flax comber noil	81
Figure 5.2	Nonwoven using jute caddies	81
Figure 5.3	Nonwoven using 4 denier hollow conjugated polyester fibers	82
Figure 5.4	Nonwoven using 7 denier hollow conjugated polyester fibers	82
Figure 5.5	Nonwoven using 3 denier regular polyester fibers	82
Figure 5.6	Nonwoven using 4 denier hollow polyester fibers	83
Figure 5.7	Nonwoven using 10 denier regular polyester fibers	83
Figure 5.8	Nonwoven using 6, 1.4 denier polyester fibers	83

Figure 5.9 SAC of nonwoven of 200 gram/meter <sup>2</sup>	85
Figure 5.10 Sound absorption coefficient of 3D polyester nonwoven	87
Figure 5.11 Sound absorption coefficient of 10 D polyester nonwoven	88
Figure 5.12 Sound absorption coefficient of 4DHC polyester nonwoven	89
Figure 5.13 Sound absorption coefficient of 4 DH polyester nonwoven	90
Figure 5.14 SAC of 7 DHC polyester nonwoven	91
Figure 5.15 SAC of flax comber noil nonwoven	92
Figure 5.16 SAC of jute caddies nonwoven	94
Figure 5.17 NRC of 350 g/m <sup>2</sup> nonwovens	95
Figure 5.18 SAC of 350 g/m <sup>2</sup> nonwovens	95
Figure 5.19 NRC of 550 g/m <sup>2</sup> nonwovens	97
Figure 5.20 SAC of 550 g/m <sup>2</sup> nonwovens	97
Figure 5.21 NRC of 650 g/m <sup>2</sup> nonwoven	98
Figure 5.22 SAC of 650 g/m <sup>2</sup> nonwovens	99
Figure 5.23 Relationship of SAC with punching density	100
Figure 5.24 Relationship of SAC with the number of layers	101
Figure 6.1 2D and 3D samples manufactured using different fibers	110
Figure 6.2 3D honeycomb fabrics, spacer fabric and 2D fabric	110
Figure 6.3 Hybrid 3D fabrics	111
Figure 6.4 Top view, side view, and lifting plan of sample W1	111
Figure 6.5 Top view, side view, and lifting plan of sample W2	112
Figure 6.6 Top view, side view, and lifting plan of sample W3	112
Figure 6.7 SAC of woven samples	114
Figure 6.8 SAC of 3D woven samples	116
Figure 6.9 SAC of different weave geometries of 3D samples	117
Figure 6.10 SAC of 3D orthogonal fabrics of 3, 4, and 5 layers	118
Figure 6.11 Effect of hybridization on SAC of 3D fabrics	120
Figure 6.12 SAC of honeycomb and spacer fabrics	122
Figure 6.13 Honeycomb fabric woven before opening	123
Figure 7.1 Schematic diagram of the airflow resistance measurement equipment	125

Figure 7.2 Airflow resistance measurement designed according to ISO 9053	126
Figure 7.3 Effect of fiber fineness on airflow resistivity of nonwoven	129
Figure 7.4 Effect of fiber fineness on SAC of nonwoven	129
Figure 7.5 Effect of areal density on airflow resistivity of 3 D polyester nonwoven	130
Figure 7.6 Effect of areal density on SAC of 3 D polyester nonwoven	131
Figure 7.7 Effect of areal density on airflow resistivity of 10 D polyester nonwoven	131
Figure 7.8 Effect of areal density on SAC of 10 D polyester nonwoven	132
Figure 7.9 Effect of areal density on airflow resistivity of 4 DHC polyester nonwoven	132
Figure 7.10 Effect of areal density on SAC of 4 DHC polyester nonwoven	133
Figure 7.11 Effect of areal density on airflow resistivity of 4 DH polyester fiber nonwoven	133
Figure 7.12 Effect of areal density on SAC of 4 DH polyester nonwoven	134
Figure 7.13 Effect of areal density on airflow resistivity of 7 DHC polyester nonwoven	134
Figure 7.14 Effect of areal density on SAC of 7 DHC polyester nonwoven	135
Figure 7.15 Effect of areal density on airflow resistivity of flax comber noil nonwoven	135
Figure 7.16 Effect of areal density on the SAC of nonwoven made from flax comber noil	136
Figure 7.17 Effect of areal density on airflow resistivity of jute caddies nonwoven	136
Figure 7.18 Effect of areal density on SAC of jute caddies nonwoven	137
Figure 7.19 Effect of punching density on airflow resistivity of 3 D polyester nonwoven	138
Figure 7.20 Effect of punching density on SAC of 3D polyester nonwoven	138
Figure 7.21 Effect of fiber cross-sectional shape on airflow resistivity of nonwovens	139
Figure 7.22 Effect of fiber cross-sectional shape on SAC of nonwovens	139
Figure 7.23 Effect of fiber type on airflow resistivity of 3D solid fabrics	140
Figure 7.24 Effect of fiber type on SAC of 3D solid fabrics	140
Figure 7.25 Effect of the number of stuffer layers on airflow resistivity of 3D jute fabric	141
Figure 7.26 Effect of the number of stuffer layers on SAC of 3D jute fabrics	142
Figure 7.27 Effect of weave geometry on airflow resistivity of 3D glass fabrics	143
Figure 7.28 Effect of weave geometry on SAC of 3D glass fabrics	143
Figure 8.1 Composites manufactured from 3D orthogonal woven using different fibers	148
Figure 8.2 Composites manufactured using 3D hybrid orthogonal fabrics	149
Figure 8.3 Composites manufactured using 3D hybrid orthogonal fabrics	149

Figure 8.4 Composites manufactured from nonwoven using different fibers	150
Figure 8.5 Zwick/Roell Z250 universal strength tester	152
Figure 8.6 Effect of fiber type on SAC of compression molded composites	153
Figure 8.7 Compression molded composites after tensile test	154
Figure 8.8 Effect of fiber type on the tensile strength of compression molded composites	154
Figure 8.9 Effect of fiber types on SAC of 3D orthogonal composites	155
Figure 8.10 3D woven orthogonal composites after tensile test	156
Figure 8.11 Effect of fiber types on the tensile strength of 3D orthogonal composites	156
Figure 8.12 Effect of the number of stuffer layers on SAC of jute orthogonal composites	158
Figure 8.13 3D woven orthogonal composites after tensile test	159
Figure 8.14 Effect of number of stuffer layers on the tensile strength of 3D jute composites	160
Figure 8.15 Effect of weave geometry on SAC of 3D orthogonal composites	161
Figure 8.16 3D woven orthogonal composites after tensile test	161
Figure 8.17 Effect of weave geometry on tensile strength of 3D composites	162
Figure 8.18 SAC of hybrid three-dimensional orthogonal composites	163
Figure 8.19 NRC of hybrid three-dimensional orthogonal composites	163
Figure 8.20 3D woven orthogonal composites after tensile test	164
Figure 8.21 Tensile strength of hybrid 3D orthogonal composites	164
Figure 9.1 Flax composites with different percentages of graphene nanofiller	169
Figure 9.2 Flax composites with different percentages of SiO <sub>2</sub> nanoparticles	170
Figure 9.3 Flax composites with different percentages of CuO nanoparticles	170
Figure 9.4 Flax composites with different percentages of FeO nanoparticles	170
Figure 9.5 Effect of graphene powder on SAC of flax composites	173
Figure 9.6 Effect of SiO <sub>2</sub> nanoparticles on SAC of flax composites	174
Figure 9.7 Effect of CuO nanoparticle on SAC of flax composites	175
Figure 9.8 Effect of FeO nanoparticles on SAC of flax composites	176

## **List of Tables**

<b>Tables</b>	<b>Title</b>	<b>Page No.</b>
Table 3.1	Octave and 1/3 octave calculation	21
Table 3.2	Classification of sound along with the frequency	28
Table 5.1	Properties of fibers used for nonwoven	81
Table 5.2	Details of nonwoven made from different polyester fibers of 200 gm/m <sup>2</sup>	85
Table 5.3	Structural and acoustic details of 3D polyester nonwoven	86
Table 5.4	Structural and acoustic characteristics of 10 D polyester nonwoven	88
Table 5.5	Structural and acoustic characteristics of 4 DHC polyester fiber nonwoven	89
Table 5.6	Structural and acoustic characteristics of 4 DH polyester nonwoven	90
Table 5.7	Structural and acoustic characteristics of 7 DHC polyester nonwoven	91
Table 5.8	Structural and acoustic characteristics of flax comber noil nonwoven	92
Table 5.9	Structural and acoustic characteristics of jute caddies nonwoven	93
Table 5.10	Relationship of noise reduction coefficient with punching density	100
Table 5.11	Relationship of NRC with the number of layers	102
Table 6.1	Mechanical properties of fibers	105
Table 6.2	Weaving parameters for various woven fabrics	106
Table 6.3	Weaving parameters of orthogonal 3D fabrics	107
Table 6.4	Fabric parameters of 3D orthogonal fabric using 900 tex jute yarn	107
Table 6.5	Specification of the hybrid fabrics	108
Table 6.6	Weaving parameters of honeycomb and spacer woven structures	109
Table 6.7	Specification of 3D honeycomb and spacer fabrics	109
Table 6.8	NRC of woven samples	114
Table 6.9	NRC of 3D orthogonal woven samples	116
Table 6.10	NRC of different weave geometries of 3D woven fabrics	117
Table 6.11	Effect of stuffer layers on NRC of 3d fabrics	118
Table 6.12	NRC of hybrid 3D orthogonal fabric	120
Table 6.13	NRC of honeycomb, spacer fabrics	122
Table 8.1	Physical properties of epoxy resin and curing agent	148

Table 8.2 Effect of fiber type on NRC of compression molded composites	153
Table 8.3 Effect of fiber types on NRC of 3D orthogonal composites	155
Table 8.4 Effect of the number of stuffer layers on NRC of jute orthogonal composites	159
Table 8.5 Effect of weave geometry on NRC of 3D orthogonal composites	162
Table 9.1 Technical specifications of nanofillers	169
Table 9.2 Effect of graphene nanoparticles on NRC of flax composites	172
Table 9.3 Effect of SiO <sub>2</sub> nanoparticles on NRC of flax composites	173
Table 9.4 Effect of CuO nanoparticle on NRC of flax composites	175
Table 9.5 Effect of FeO nanoparticles on NRC of flax composites	176

## LIST OF ABBREVIATIONS

<b>Abbreviation</b>	<b>Description</b>
UD	Uni-directional
2D	Two dimensional
3D	Three dimensional
NRC	Noise reduction coefficient
SAC	Sound absorption coefficient
D	Denier
HC	Hollow conjugated
H	Hollow
SiO <sub>2</sub>	Silicon dioxide
CuO	Copper oxide
FeO	Iron oxide
g/m <sup>2</sup>	Gram per square meter