Akustička svojstva ploča od usitnjenog drva

Plavčić, Vedrana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:202207

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

PREDIPLOMSKI STUDIJ
STRUČNI STUDIJ DRVNA TEHNOLOGIJA

VEDRANA PLAVČIĆ

AKUSTIČKA SVOJSTVA PLOČA OD USITNJENOG DRVA

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, rujan 2021.

PODACI O ZAVRŠNOM RADU

AUTOR:	Vedrana Plavčić 0068229775
NASLOV:	Akustička svojstva ploča od usitnjenog drva
TITLE:	Acoustic properties of panel from fragmented wood
PREDMET:	Ploče od usitnjenog drva
MENTOR:	Doc. dr. sc. Nikola Španić
IZRADU RADA JE POMOGAO:	-
RAD JE IZRAĐEN:	Sveučilište u Zagrebu – Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Zavod za tehnologije materijala
AKAD. GOD.:	2020./2021.
DATUM OBRANE:	24.09.2021.
RAD SADRŽI:	Stranica: 21 Slika: 19 Tablica: 3 Navoda literature: 9

SAŽETAK:

U ovom završnom radu napravljen je pregled dostupne literature iz područja akustike, odnosno akustičkih svojstava ploča od usitnjenog drva. U radu su sistematizirani podaci o pločama izrađenim prvenstveno iz zamjenske lignocelulozne sirovine, za koje je poznato da su bolji izolatori/prenosioci zvuka od ploča izrađenih iz klasične drvne sirovine. Rezultati obrađenih znanstvenih članaka drugih autora sugeriraju da svojim prisustvom u prostoru (vanjskom ili unutarnjem) ploče od usitnjenog drva značajno pridonose stvaranju specifične akustičke slike. Pritom ploče građene u obloge zidova, stropova i podova, odnosno ploče iz kojih je izrađen namještaj, ovisno o izvedbi, mogu prigušiti, pojačati i gotovo u potpunosti izmijeniti akustiku nekog prostora.

PREDGOVOR

Ovim putem zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nikoli Španiću na pomoći, nesebično prenesenom znanju, a ponajviše na strpljenju i podršci prilikom izrade Završnog rada. Također se želim zahvaliti i ostalim profesorima na prenesenom znanju tijekom mog studiranja.

Najveća hvala mojoj obitelji, mojim roditeljima, mom bratu Zvonimiru koji su bili uz mene i davali mi nesebičnu podršku tijekom mog školovanja. Velika hvala mojim prijateljima i kolegama koje sam upoznala tijekom studiranja i koji su bili uz mene.

Hvala mom Dariu.

Hvala Vam na bezuvjetnoj podršci, pomoći, strpljenju i povjerenju.

Vedrana Plavčić

	IZJAVA **O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**	**OB FŠDT 05 07**
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

„„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagrebu, 24.09.2021. godine

vlastoručni potpis

Vedrana Plavčić

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. TEMELJI AKUSTIKE 2

2.1 Zvuk 2

2.2. Zvučni tlak (pritisak zvuka) 2

2.3. Razlika tlaka zvuka i decibel 3

2.4. Povećanje tlaka zvuka za više izvora zvuka 3

2.5. Frekvencija zvuka 4

2.6. Učinkovitost u pogledu zvuka pri planiranju životnog prostora 5

2.7. Valne duljine zvuka 5

2.8. Vrijednosti razine zvuka 6

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 7

3.1. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih iz bambusa 7

3.1.1. Izrada ploča iverica iz bambusa 7

3.1.2. Ispitivanje akustičkih svojstava 8

3.1.3. Rezultati ispitivanja akustičkih svojstava ploča iverica iz bambusa 8

3.1.3.1. Rezultati određivanja gustoće 8

3.1.3.2. Gubitci u prijenosu zvuka 8

3.1.3.3. Apsorpcija zvuka 9

3.2. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih iz rižine slame 10

3.2.1. Izrada ploča iverica iz rižine slame i drva 11

3.2.2. Ispitivanje akustičkih svojstava ploča 11

3.2.3. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije zvuka ploča iverica iz rižine slame i drva 11

3.3. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih od tropskih brzorastućih vrsta 12

3.3.1. Ispitivanje akustičkih svojstava ploča 13

3.3.2. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije zvuka ploča iverica tropskih brzorastićih vrsta drva 13

3.4. Akustička svojstva rastresitih drvnih vlakana i slabo prešanih ploča iz drvnih vlakana 15

3.4.1. Ispitivanje akustičkih svojstava drvnih vlakana 15

3.4.2. Rezultati ispitivanja akustičkih svojstva rastresitih drvnih vlakana 17

4. ZAKLJUČAK 20

5. LITERATURA 21

1. UVOD

Drvo je prirodni materijal koji se dobiva od drvenastih biljaka, uglavnom od debla stabla. Nehomogen, anizotropan, porozan, higroskopan i vlaknast materijal koji je sastavljen od celuloze (40-50%), lignina (25-30%), drvnih polioza (20-30%) i popratnih tvari (smole, minerali itd.) (https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_(materijal)). Izrađeno je od stanica koje se zbog svog izduženog oblika nazivaju vlakanca drva. Uz vlakanca drva, u drvu se nalaze i druge stanice kao što su traheide, traheje i parenhim.

Drvne ploče su materijali koji su izrađeni lijepljenjem drvne sirovine različitih vrsta, oblika i kvalitete. Osnovne vrste drvnih ploča su: ploče od uslojenog drva i ploče od usitnjenog drva. Ploče od uslojenog drva dijele se na dvije podvrste: furnirske ploče i stolarske ploče, dok se ploče od usitnjenog drva dijele na dvije podvrste: ploče iverice i ploče vlaknatice.

Furnirska ploča (šperploča) dobiva se ljuštenjem furnira i mogu biti troslojne i višeslojne.

Ploče iverice dobivaju se od iverja drva ili drugih lignoceluloznih sirovina (slama, lan, konoplja i sl.) vezanih ljepilom od sintetskih ili prirodnih smola uz djelovanje topline i tlaka. Ploče iverice dijelimo također po mjestu uporabe, pa tako ploče koje se koriste u unutrašnjosti i za proizvodnju namještaja koriste se ploče iverice s mikroivjerjem, dok se u graditeljstvu koriste OSB ploče s makroiverjem.

Ploče vlaknatice proizvode se međusobnim pretpletanjem vlakanaca drva ili drugih lignoceluloznih tvari zagrijavanjem pod tlakom ili bez djelovanja tlaka, uz dodatak vezivnih tvari. Izolacijske vlaknatice proizvode se mokrim postupkom koje su male gustoće i tvrde ploče vlaknatice (lesonit ploče) koje su velike gustoće, a suhim postupkom proizvode se srednje guste vlaknatice MDF koje su poznate pod nazivom medijapan ploče.

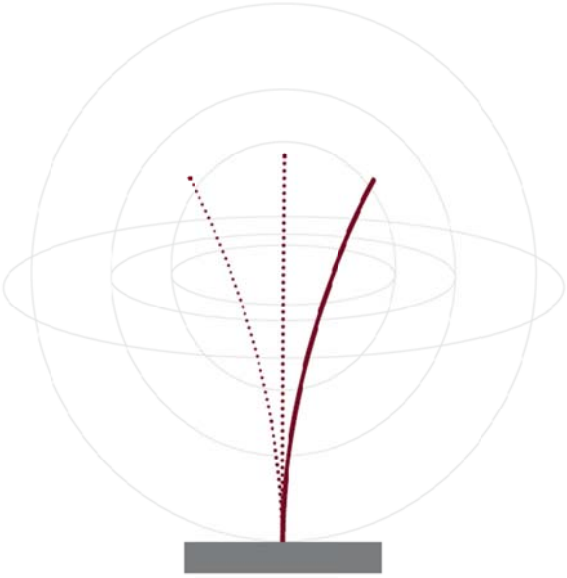
Ploče od usitnjenog drva najmanje su zahtjevne u odnosu na sve druge vrste drvnih ploča. Za njihovu proizvodnju mogu se upotrijebiti gotovo sve vrste i oblici lignoceluloznih sirovina. Najčešća i najvažnija sirovina koja se koristi u proizvodnji ploča od usitnjenog drva jest drvo, iako se mogu upotrebljavati i jednogodišnje biljke kao što su lan, slama, konoplja, kukuruzovina itd. Osnovna prednost ploča od usitnjenog drva jest uporaba šumskih drvnih sortimenata bez tehničke vrijednosti (metrica, višemetrica, panjevina, granjevina, ostaci debla, itd.), industrijskih ostataka (drvni ostaci u primarnoj i doradnoj pilani, drvni ostaci u proizvodnji furnira i ploča, itd.) te reciklažnog drvnog materijala (neupotrebljiv namještaj, ostaci građevinskog drva, itd.) (Jambreković, 2004).

Budući da su opisani osnovni pojmovi i navedene podvrste ploča od usitnjenog drva, valja napomenuti da se drvo i materijali na bazi drva često koriste kao unutarnja završna obrada u zgradama gdje je potrebno smanjiti razinu zvuka u određenoj prostoriji. Kontrola buke, koja je svaki neželjeni zvuk postaje sve važnija. Ono što je pridonijelo povećanju buke jest rast stanovništva, širenje uporabe radnih strojeva, širenje gradskih središta i dr.

2. TEMELJI AKUSTIKE

2.1 Zvuk

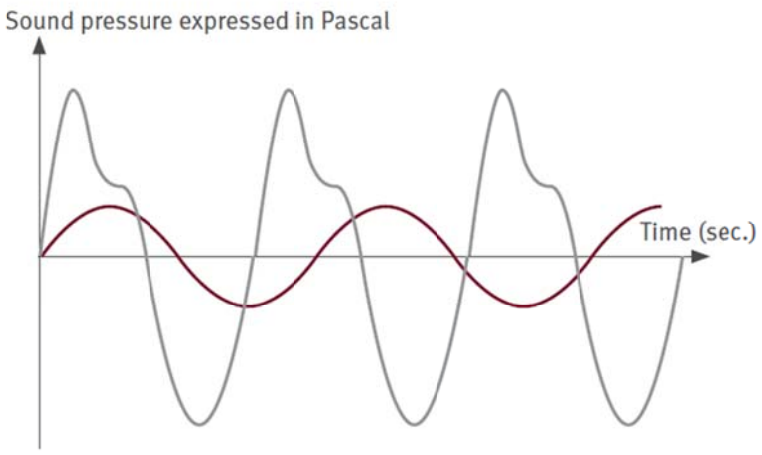
Zvuk je mehanički val frekvencija od 16 do 20 kHz to jest u rasponu u kojem ga čuje ljudsko uho koji može sadržavati skladne tonove, glazbu, buku, pucketanje kao i izgovorene riječi (EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10) . Sve zvučne događaje uzrokuje neznatna varijacija tlaka zraka koja se širi u okolini izvora te se s toga pozivamo na zvuk tona, glazbe, buke ili govora. Zvuk se uvijek širi u obliku prostornih longitudinalnih valova u zraku. Zvučni val je ponavljajuća vremenska i prostorna varijacija tlaka zraka ili njegove odgovarajuće gustoće. Zvučni valovi putuju kroz medij poput zraka i drugih plinova, tekućina poput vode ili krutih tvari, na primjer kamenja, pa zbog tog razloga razlikuje se zračna, fluidna i strukturna buka. Kada zvuk prodire kroz zid ili drugu građevinsku komponentu incidentna buka u zraku pretvara se u strukturnu buku (vibracije zida) i nakon toga se zračna buka odražava na udar vibracijskim zidom. Oni zvukovi koje primatelj ne želi nazivaju se bukom.



Slika 1. *Prikaz širenja zvuka u obliku prostornih longitudinalnih valova u zraku (**Izvor:** https://hr.wikipedia.org/wiki/Zvuk)*

2.2. Zvučni tlak (pritisak zvuka)

Vibracije tlaka zraka nazivaju se zvučnim tlakom, pa je stoga moguće odrediti pritisak zraka bilo kojeg zvučnog događaja, bilo da se radi o jednom zvuku, tonu, govoru ili glazbi. Što je zvučni događaj glasniji veće su razlike u tlaku i posljedično tome veći je zvučni pritisak. Ljudski slušni sustav u stanju je osjetiti minimalni zvučni pritisak od 20 qPa = 0,00002 Pascal što je vrlo niska vrijednost i pokazuje osjetljivost ljudskog uha, ali ponekad izloženost na zvučni pritisak od 20 Pascala čak i na vrlo kratko vremensko razdoblje može dovesti do trajne štete.



Slika 2. *Zvučni tlak izražen u Pascalima*
*(**Izvor:** EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10)*

2.3. Razlika tlaka zvuka i decibel

Decibel je definiran kao logaritamska mjerna jedinica koja izražava razinu zvučnog tlaka. Razina zvuka ili zvučni pritisak obično se izražava kao razina zvučnog tlaka ili razina zvuka. Razina zvuka od 0 decibela postavljena je kao prag percepcije zvučnog pritiska prosječnog čovjekovog slušnog sustava. Poznata je ljestvica između 0 decibela (skraćeno dB) i 120 – 140 dB. Izlaganje na dulji vremenski period, buka od 80 dB i nadalje ili izloženost od 120 dB i više može dovesti do oštećenja sluha.

Tablica 1. *Primjeri razine glasnoće različitih složenih zvukova*

Izvor zvuka (buke)	**Nivo šuma** (dB)
Granica čujnosti	0
Šum lišća	10
Šaputanje	20
Tiho sviranje radija u kući	40
Običan govor	65
Automobili 50 km/h (8m)	70
Simfonijski orkestar (fortissimo)	80
Disco club (unutar prostorije)	90
Zrakoplov (uzlijetanje, 100m)	110
Granica bola	120

2.4. Povećanje tlaka zvuka za više izvora zvuka

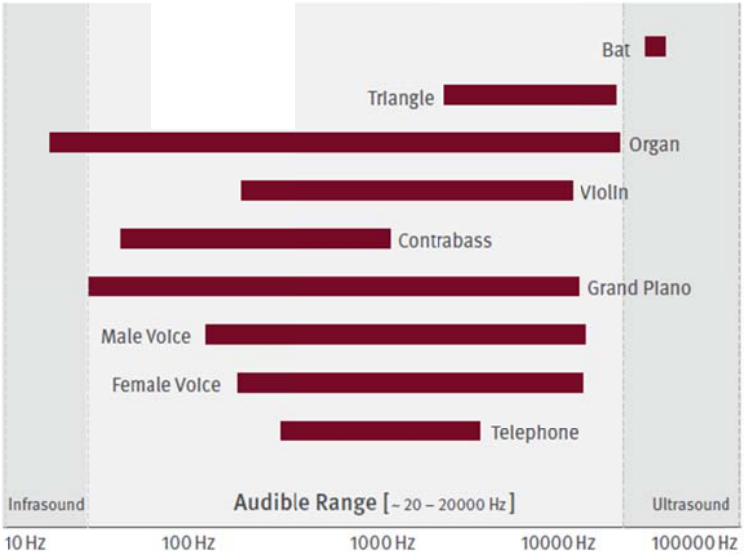
Povećanje broja izvora zvuka za dva puta uvijek rezultira povećanjem razine za 3 dB, što je faktor deset porast za 10 dB, a faktor sto u povećanju za 20 dB.

Tablica 2. *Povećanje zvučnog tlaka za identične izvore zvuka*

Primjeri alarma	Povećanje vrijednosti dB
1	62 dB
2	62 + 3 = 65 dB
3	62 + 5 = 67 dB
4	62 + 6 = 68 dB
5	62 + 7 = 69 dB
10	62 + 10 = 72 dB
15	62 + 12 = 74 dB
20	62 + 13 = 75 dB
50	62 + 17 = 79 dB
100	62 + 20 = 82 dB

2.5. Frekvencija zvuka

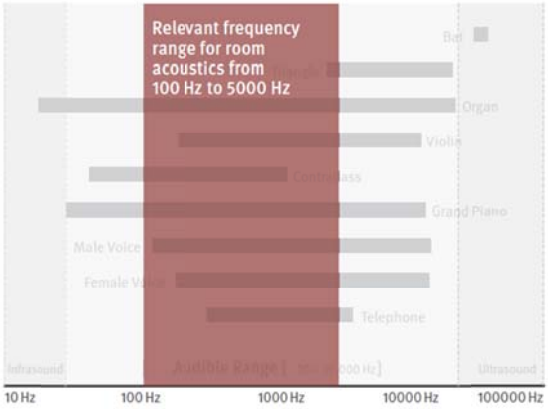
Frekvencija označava broj promjena zvučnog tlaka ili vibracija u sekundi. Frekvencija od 1000 Hz jednaka je 1000 vibracija u sekundi. Čisti tonovi zvučni su događaji jedne frekvencije. Tonovi različitih frekvencija nazivaju se šumom ili zvukom, ovisno o frekvencijskom sastavu. Osjetljivost ljudskog slušnog susatava uveliko ovisi o učestalosti. Posebno je izrađen u učestalosti ljudskog govora između 250 Hz i 2000 Hz, pa je vrlo korisno kada slušamo nekoga tko govori, ali ako dolazi do prekida govora ovaj se frekvencijski raspon doživljava posebno neugodno i kao takav može snažno utjecati na komunikaciju.



Slika 3. *Frekvencije mjerene u hercima – Hz*
*(**Izvor:** EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10)*

2.6. Učinkovitost u pogledu zvuka pri planiranju životnog prostora

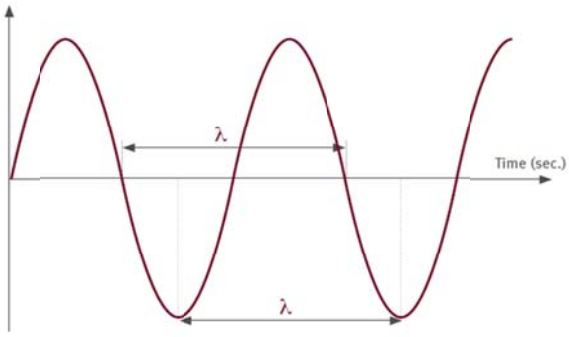
Raspon frekvencija koji se mora uzeti u obzir pri planiranju sobe temelji se na ljudskom slušnom sustavu s jedne strane i što je s druge strane tehnički razumo i izvedivo. Frekvenciju iznad 5000 Hz zrak prigušuje do te mjere da nije razumno uzeti u obzir prilikom planiranja akustike prostorije, dok ispod 100 Hz treba uzeti u obzir.



Slika 4. *Relevantni frekvencijski raspon za sobnu akustiku od 100 do 5000 Hz*
*(**Izvor:** EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10)*

2.7. Valne duljine zvuka

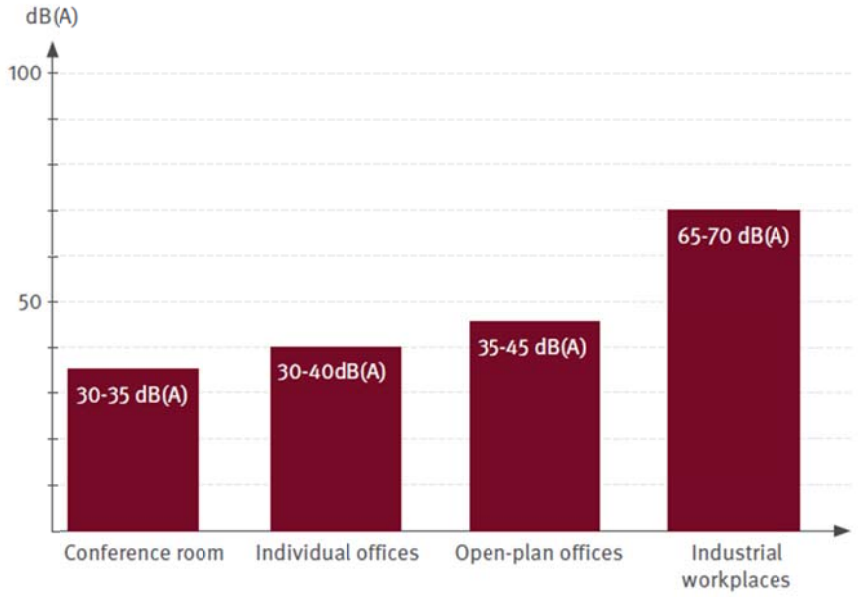
Svaka zvučna frekvencija povezana je sa zvučnim valom određene valne duljine. U zraku val od 100 Hz ima produžetak od 3,40 metara, dok val od 5000 Hz ima produžetak od samo oko 7 centimetara. Sukladno tome, zvučni valovi relevantni za sobnu akustiku imaju duljinu između 0,07 m i 3,40 m. Kao što vidimo, dimenzije zvučnih valova nalaze se unutar raspona dimenzija soba i namještaja.



Slika 5. *Zvučni tlak izražen u Pascalima*
*(**Izvor:** EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10)*

2.8. Vrijednosti razine zvuka

Relevantni parametar za objektivnu procjenu utjecaja buke na radnoj stanici je takozvana razina ocjene, koja se s jedne strane sastoji od izmjerene, prosječne razine zvučnog tlaka u prostoriji, a s druge strane prilagodbe u skladu s karakteristikama buke, kao i trajnim utjecajem. Razina ocjenjivanja obično se temelji na ocjenjivačkom razdoblju od osam sati tijekom kojeg je obično dovoljno uhvatiti kratko, reprezentativna vremenska razdoblja. Visoka razina pozadinske buke utječe na koncentraciju i intelektualnu učinkovitost pa iz tog razloga postoji nekoliko propisa i standarda u pogledu najveće dopuštene pozadinske buke.



Slika 6. *Preporučene vrijednosti razine pozadinske buke u skladu s DIN EN 11690 (**Izvor:** EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10)*

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

3.1. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih iz bambusa

Autori Karlinasari i sur. (2012a) izradili su i ispitali akustička svojstva ploča iverica, za što je kao sirovina korišten bambus. Vršni dijelovi stabljike bambusa izrezani su na dijelove duge 40 cm, prerezani na pola, ručno usitnjeni i prosijavanjem klasirani u tri klase veličina čestice koje su korištene (slika 7).

Slika 7. *Čestice bambusa različitih veličina: a) vuna, b) srednja i c) fina granulacija (**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012a)*

Sitne i srednje čestice nastale su preradom sječke u individualni iver. Čestice srednje veličine pripremljene su dodatnim mljevenjem i prosijavanjem za što je korišten mlin rafinator (disk) pritom su dobivene čestica širine 2 - 3 mm, debljine 0,5 mm i duljine 10 mm. Sitne čestice dobivene su ponovnom obradom čestica srednje veličine u mlinu čekičaru uz primjenu sita primjerene veličine oka. Čestice u obliku vune dobivene su presijecanjem segmenata bambusa i predstavljaju individualna vlakna isčupana iz strukture bambusa. Čestice vune imale su dimenzije: duljina 50 mm, debljina 0,2 do 0,5 mm i širina 3 do 5 mm. Svi tipovi čestice nakon usitnjavanja sušeni su na 70 – 80 °C kroz dva dana, do sadržaja vlage od oko 10%.

3.1.1. Izrada ploča iverica iz bambusa

Ploča iverica s niskom i srednjom gustoćom 0,5 g/cm^3 i 0,8 g/cm^3 proizvedena je primjenom izocijanatne smole dodane u iznosu od 12% (maseno) u odnosu na masu osušenih čestica bambusa. Ljepilo je na čestice naneseno primjenom rotacijske mješalice s bubnjem opremljene pištoljem za tlačno nanošenje ljepila.. Oblijepljene čestice su se nakon toga ručno raspodijelile u kalup za oblikovanje ploče dimenzija 700 x 700 x 10 m. Tako pripremljeni sirovi tepisi ploča zatim su prešani pri temperaturi od 150 °C i pritiskom od 2,5 N/mm^2 u vremenskom periodu od 10 minuta. Gotove ploče su kondicionirane na sobnoj temperature (25 °C) pri relativnoj vlazi zraka od 65% dva tjedna prije ispitivanja akustičnih svojstava.

3.1.2. Ispitivanje akustičkih svojstava

Ispitivanje je izvedeno u sobi za odjek u Laboratoriju za građevinsku akustiku, odjela za fizičko inženjerstvo Bandung Technology Instituta. Svaka ploča bila je postavljena kao pregrada u otvor između dvije prostorije za vrijeme ispitivanja. Jedna soba bila je izvor zvuka, sadržavala je generator buke, a druga je bila prijemna soba. Razina zvučnog tlaka mjerena je raznim frekvencijama u intervalu od 125 do 4000 Hz u izvornoj i u prijemnoj sobi te je zabilježeno vrijeme odjeka u istom radnom rasponu. Oprema koja se koristila za ispitivanje zvuka jest generator buke, mjerač razine zvuka, analizator i zvučnik. Dobru zvučnu izolaciju karakterizira mali prijenosi energije kroz zid. Nakon ispitivanja izrezana su tri velika i tri mala uzorka sa svake ploče tračnom pilom kako bi se odredio koeficijent apsorbcije zvuka i provelo ispitivanje gustoće uzorka. Koeficijent apsorbcije zvuka određen je pomoću impedancijske cijevi. Dvije impedancijske cijevi korištene su za pokrivanje frekvencija od 100 do 4000 Hz. Točnije veća cijev promjera 98 mm korištena je za frekvencije do 1600 Hz, a manja cijev, promjera 44 mm korištena je za frekvencije od 1600 – 4000 Hz. Gustoća je izračunata kao omjer mase i volumena (g/cm^3) te su se za svaku ploču izvršila tri ponavljanja pojedinog mjerenja.

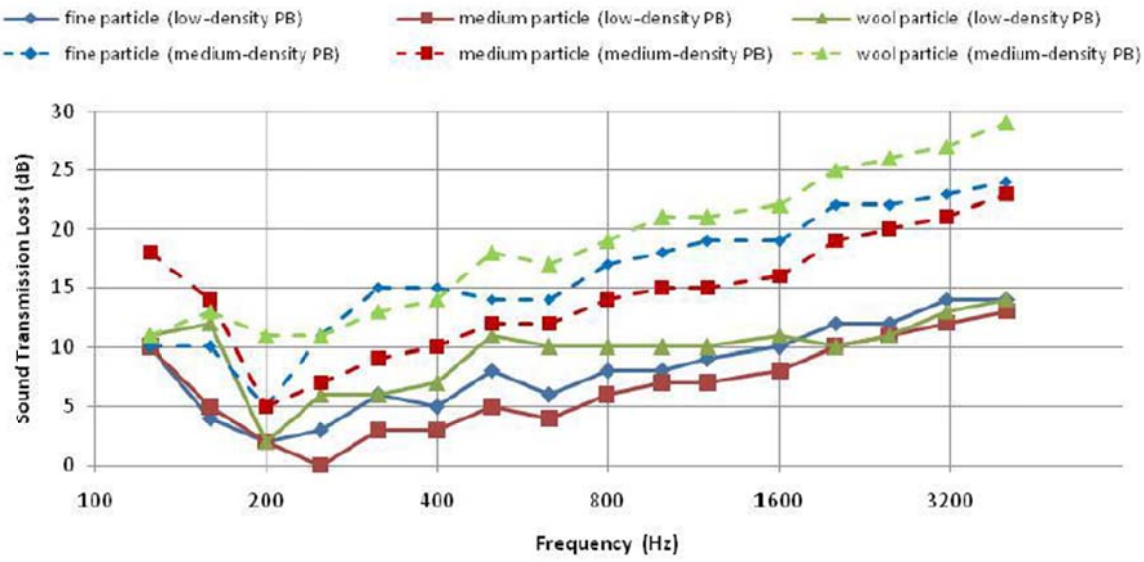
3.1.3. Rezultati ispitivanja akustičkih svojstava ploča iverica iz bambusa

3.1.3.1. Rezultati određivanja gustoće

Autori Karlinasari i sur. (2012a) utvrdili su da je stvarna srednja gustoća ploča iverice značajno varirala, neovisno o ciljanoj gustoći ploča. Prosječne stvarne gustoće iverica izrađenih iz sitnih i srednjih čestica, odnosno vune bile su 0,45, 0,44 i 0,41 g/cm^3, odnosno za ploče male gustoće (ciljana gustoća od 0,5 g/cm^3). Kod ploča srednje gustoće (ciljane gustoće 0,8 g/cm^3), stvarna gustoće ploča izrađenih od sitnih i srednjih čestica, odnosno vune bile su 0,70, 0,64 i 0,65g/cm^3. Ove varijacije gustoće autori opisuju činjenicom da se nakon prešanja i tijekom kondicioniranja, debljina ploče smanjila pa je zbog toga i gustoća automatski manja.

3.1.3.2. Gubitci u prijenosu zvuka

Gubitak prijenosa također poznat je kao indeks smanjenja zvuka odnosno sposobnost materijala da izolira zvuk. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je na niskim frekvencijama do 500 Hz vrijednost gubitka u prijenosu bila oko 0 do manje od 20 dB za iverice debljine 10 mm. Iverica niske gustoće, sastavljena od čestica srednje veličine imala je najnižu vrijednost gubitka u prijenosu. Iverice niske gustoće imale su maksimalnu vrijednost gubitka u prijenosu od oko 15 dB na frekvenciji od 4000 Hz (slika 8).



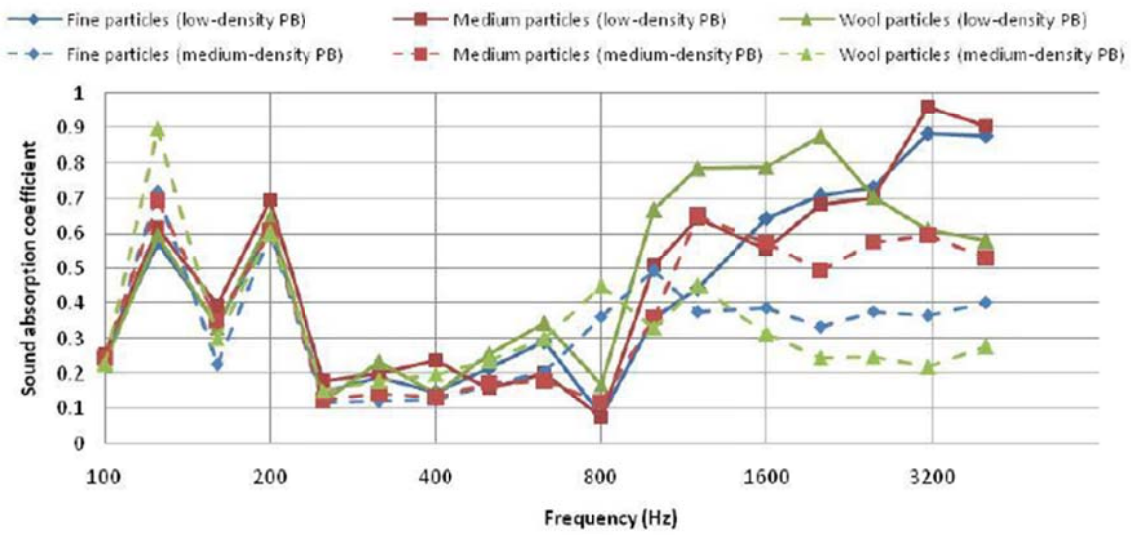
Slika 8. *Rezultati mjerenje gubitka prijenosa zvuka za bambusove iverice debljine 10 mm (**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012a)*

Faktori materijala koji doprinose odupiranju prijenosu zvuka jesu gustoća, debljina i krutost. Za jednostavne homogene ploče primarno fizikalno svojstvo koje kontrolira zvuk u zraku i gubitak u prijenosu je masa po jedinici površine ploče građevinskog elementa, koji je poznat kao "zakon o masi". Za materijale unutar određenog raspona frekvencija vrijedi ovo teorijsko pravilo. Stupanj izolacije materijala ovisi o zakonu mase, odnosno što je materijal teži bolje izolira. Na niskim frekvencijama vrijednosti gubitka u prijenosu ovise o krutosti ploče. Točnije ploče će se teže savijati kada ih udaraju zvučni valovi, a poznato je da što je ploča veće tvrdoće to je više otporna na savijanje. Upravo na potonje navedenim tvrdnjama autori Karlinasari i sur. (2012a) zaključuju da su iverice niske gustoće imale manju sposobnost savijanja dok su ih udarali zvučni valovi što dokazuju vrlo niske vrijednosti indeksa smanjenja zvuka (0 do 5 dB), posebice u slučaju ploča izrađenih iz čestica manjih dimenzija. Kod srednjih frekvencija, vrijednosti gubitka u prijenosu povećale su se s masom ispitivanih ploča. Ploče veće gustoće, debljine 10 mm pokazale su se kao dobri izolacijski materijali, posebice pri frekvencijama većim od 500 Hz. Na visokim frekvencijama, indeks smanjenja zvuka pratio je efekt "koindicidencije". Pri ovakvim uvjetima, vrijednosti gubitka u prijenosu će smanjiti zvučne valove u zraku, a valovi savijanja u ploči postati će sinkronizirani što samim time rezultira učinkovitim prijenosom energije. Na "kritičnoj frekvenciji" javlja se učinak koincidencije. Rezultati ispitivanja sugeriraju da u ovom slučaju nije postignuta kritična frekvencija (slika 8), čija se vrijednost gubitka u prijenosu nastavila povećavati do frekvencije od 4000 Hz.

3.1.3.3. Apsorpcija zvuka

Koeficijenti apsorpcije zvuka za iverice niske i srednje gustoće na niskim frekvencijama (<250 Hz) su oscilirale, s najvećom apsorpcijom zvuka između 125 i

200 Hz (slika 9.). Vrijednosti apsorpcije zvuka na tim frekvencijama slične su po gustoćama ploča i tipovima (veličinama) čestica korištenima za njihovu izradu. Na srednjim frekvencijama (250 do 800 Hz), vrijednosti koeficijenta bile su niske i ne više od 0,4, što znači da su ploče odražavale zvuk na tim frekvencijama. U rasponu visokih frekvencija (> 1000 Hz) fluktuacije u apsorpciji zvuka pri svakoj ispitanoj frekvenciji pokazale su da iverice niske gustoće imaju veće vrijednosti od iverica srednje gustoće. Naime, činilo se da koeficijenti apsorpcije zvuka rastu sa smanjenjem veličine čestica za proizvodnju ploča. Izuzetak su ploče iz vune, srednje gustoće, koje su u frekvencijskom rasponu od 1000 do 2500 Hz imale veće vrijednosti od ploča s čestica manjih dimenzija.



Slika 9. *Koeficijent apsorbcije zvuka za iverice niske i srednje gustoće*
*(**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012a)*

Na osnovi dobivenih rezultata autori Karlinasari i sur. (2012a) zaključili su da su ploče iverice manje gustoće izrađene iz bambusa dobre za apsorpciju zvuka dok su ploče veće gustoće dobre kao zvučni izolatori. Stoga se, u kontekstu građevinskih materijala ploče od bambusa mogu preporučiti za dijelove zidova i podova.

3.2. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih iz rižine slame

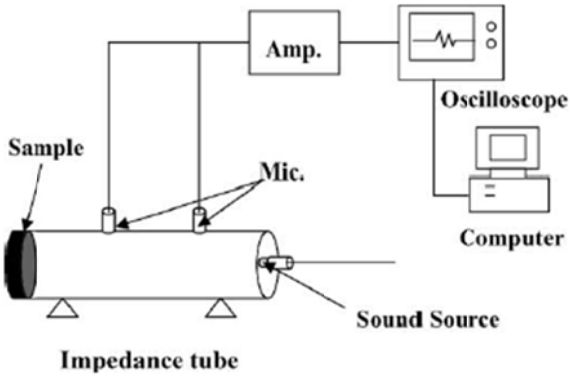
Autori Yang, Kim i Kim (2003) ispitali su akustička svojstva ploča izrađenih iz rižine slame i drva, s projektiranom gustoćom od 0,4 do 0,8 g/cm^3. Sirovina iz rižine slame pripremljena je na način da se najprije uklonilo gornih 10 cm stabljike, nakon čega je ista prerezana na tri dijela, uz dodatno usitnjavanje na čestice duljine 2, odnosno 4 cm.

3.2.1. Izrada ploča iverica iz rižine slame i drva

Za izradu ploča korištena je opisana sirovina i UF smola (65% suhe tvari) uz dodatak 10% (maseno) katalizatora na bazi amonijeva klorida. Ploče su izrađene s 0, 10, 20 i 30% dodatka rižine slame. Nakon oblijepljivanja drvnog iverja i slame, izrađene su ploče dimenzija 25 × 20 × 1 cm. Ploče su najprije prešane na hladno, pri tlaku od 2 bar, a zatim vruće prešane (140 °C) pri tlaku od 3,5 bar. Ukupno vrijeme prešanja iznosilo je 2 minute (hladno), odnosno 4 minute (vruće). Izrađene ploče kondicionirane su pri 25 °C i 65 % relativne vlažnosti tjedan dana prije ispitivanja.

3.2.2. Ispitivanje akustičkih svojstava ploča

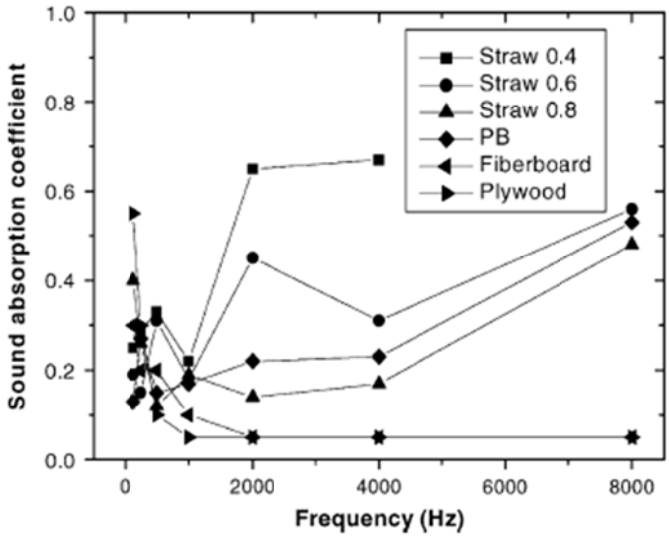
Koeficijenti apsorpcije zvuka mjereni su metodom impedancijske cijevi (u skladu s normom ASTM CA 384 – 98) kako bi se istražila mogućnost zamjene izolacijskog materijala i izolacijskih ploča u drvenim konstrukcijama. Na slici 10 hhematski je prikazana ispitna aparatura.



***Slika 10**. Shematski prikaz aparata za mjerenje apsorpcije zvuka (**Izvor:** Yang, Kim i Kim, 2003)*

3.2.3. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije zvuka ploča iverica iz rižine slame i drva

Na slici 11. prikazani su rezultati ispitivanja iz kojih je moguće zaključiti da porozni materijali općenito koji apsorbiraju zvuk imaju dobra svojstva zvučne izolacije u širokom rasponu frekvencija, jer veće pore daju bolja zvučna izolacijska svojstva. Izrađene ploče sa specifičnom gustoćom od 0,4 i 0,6 g/cm^3 imaju veće koeficijente apsorpcije zvuka od klasične iverice, vlaknatice i furnirske ploče izrađene iz drva u frekvencijskom području od 500 – 800 Hz. Navedeno je uzrokovano niskom specifičnom masom ovih ploča koje su poroznije od usporednih ploča izrađenih isključivo iz drva, neovisno o njihovoj konstrukciji i/ili veličini i obliku osnovne sirovine.



Slika 11. *Koeficijent apsorpcije zvuka ploča iz rižine slame i drva (**Izvor:** Yang, Kim i Kim, 2003)*

Autori Yang, Kim i Kim (2003) također su zaključili da ploče sa specifičnom gustoćom od 0,8 g/cm^3 pokazuju niže koeficijente apsorpcije zvuka od iverica u frekvencijskom području od 1000 – 8000 Hz. To objašnjavaju činjenicom da su u tim pločama mnoge pore ispunjene što smanjuje ukupni volumen pora dok su mehanička svojstva neznatno poboljšana. Iako je koeficijent apsorpcije zvuka smanjen do frekvencije od 1000 Hz on se smanjivao i zatim se ponovno povećavao. Smanjenje i povećanje bilo je posljedica specifičnih karakteristika zvuka koji rižina slama reflektira pri 1000 Hz, ali i koja apsorbira zvuk u srednjem i visokom frekvencijskom rasponom. Usporedno, ploče vlaknatice i furnirske ploče pokazale su smanjenje koeficijenta apsorpcije zvuka s povećanjem frekvencije zbog njihovih specifičnih svojstava da apsorbiraju zvuk u niskofrekventnom području, ali i reflektiraju zvuk u srednjem i visokom frekvencijskom rasponu. Naime kao što je već prethodno navedeno da eksperimentalne ploče specifične gustoće od 0,4 i 0,6 g/cm^3 imaju veće koeficijente apsorpcije zvuka od komercijalnih ploča i stoga djelomično ili čak potpuno mogu zamijeniti izolacijski materijal u drvnim konstrukcijama. na kraju svog istraživanja, autori navode da su ploče niske specifične gustoće klasificirane kao kruti izolacijski materijal. Takvi komercijalni izolacijski materijali, iako dobrih svojstava, u pravilu su štetni za ljudsko zdravlje, pa bi ovakve ploče od čestica rižine slame i drva mogle riješiti problem akustike prostora, uz očuvanje ljudskog zdravlja,.

3.3. Akustička svojstva ploča iverica izrađenih od tropskih brzorastućih vrsta

Autori Karlinisari i sur., (2012b) izradili su i ispitali akustička svojstva ploča iverica iz brzorastućih tropskih vrsta drva. Pritom su drvo albicije, akacije i maniija usitnili na čestice veličine 0,5 × 2-3 × 10 mm koje su osušene do oko 10% vlage.

Iz tako pripremljene drvne sirovine izradili su ploče dimenzija 350 × 350 × 10 mm, ciljane gustoće 0,5 i 0,8 g/cm^3. Za izradu ploča koristili su izocijanatno ljepilo koje je na drvno iverje dodano u iznosu od 12% ovisno o masi apsolutno suhog drva. Ručno pripremljen sirovi tepih prešan je 10 minuta pri temperaturi od 150 °C i tlaku od 2,5 N/mm^2. Uzorci ploča kondicionirani su na sobnoj temperaturi (25 °C) i 65% relativne vlažnosti zraka dva tjedna prije ispitivanja.

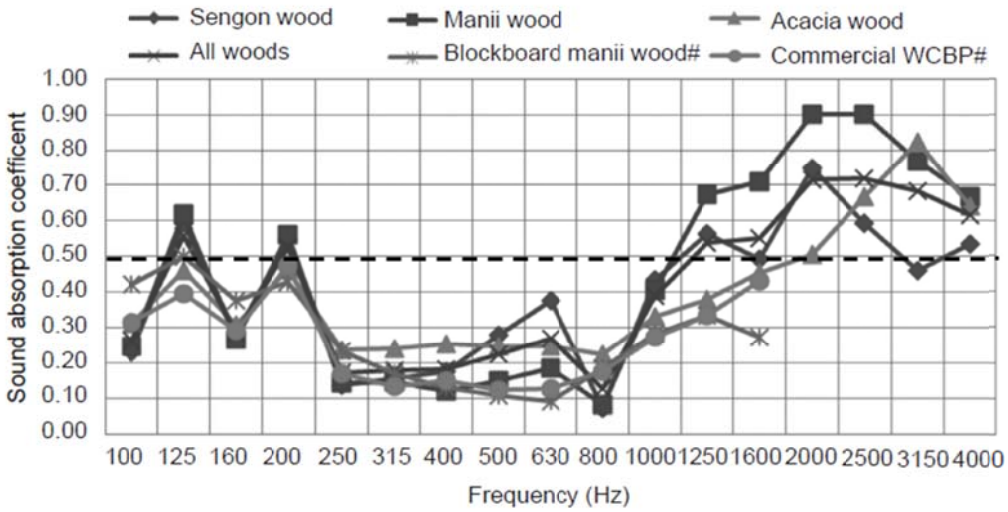
3.3.1. Ispitivanje akustičkih svojstava ploča

Mjerenja koeficijenta apsorpcije zvuka izvršena su pomoću impedancijske cijevi u skaldu s odrednicama norme prema JIS A – 1405-1963 (JIS 1963). Dvije različite impedancijske cijevi korištene su za pokrivanje frekvencijskog raspona od 100 do 4000 Hz. Veća cijev, promjera 98 mm korištena je za frekvencije veće do 1600 Hz dok je manja cijev, promjena 44 mm korištena za frekvencijski raspon od 1600-4000 Hz.

Slika 12. *Uzorci materijala za mjerenje koeficijenta apsorpcije zvuka, a) akacija, b) mani, c) albicija (**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012b)*

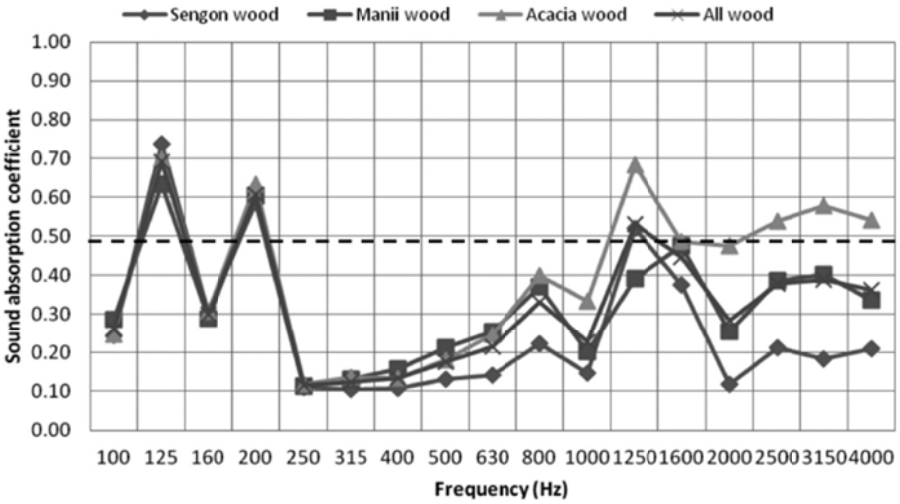
3.3.2. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije zvuka ploča iverica tropskih brzorastućih vrsta drva

Koeficijenti apsorpcije zvuka eksperimentalnih ploča iverica u usporedbi s podacima za komercijalne ploče prikazani su na slikama 13. i 14. U frekvenciji niske rezonancije (<250 Hz), iverice niske gustoće imale su manju apsorpciju zvuka od iverica srednje gustoće s vrijednostima koje su varirale od oko 0,20 do 0,65. Na srednjim frekvencijama od 250-800 Hz većina vrijednosti apsorpcije zvuka od iverica niske i iverica srednje gustoće bile su ispod 0,4.



Slika 13. *Koeficijenti apsorpcije zvuka na različitim frekvencijama za ploče iverice gustoće 0,5 g /cm^3 (**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012b)*

Kako su se frekvencije povećavale iznad 1000 Hz (visoka frekvencija), iverica niske gustoće pokazala je fluktuaciju koeficijenata apsorpcije zvuka dosežući maksimalnih 0,9 pri 2000 Hz. Za frekvencije veće od 2000 Hz koeficijenti apsorpcije zvuka za većinu uzoraka bili su iznad 0,5 što je vidljivo na slici 13. Apsorpcija zvuka za ploču srednje gustoće varirala je u visokim frekvencijama s maksimalnom vrijednošću od 0,7 pri 1250 Hz nakon čega se smanjila na 2000 Hz prije nego se ponovno podigla na ispod 0,6 što je prikazano na slici 14.



Slika 14. *Koeficijenti apsorpcije zvuka na različitim frekvencijama za ploče iverice gustoće 0,8 g /cm^3 (**Izvor:** Karlinasari i sur., 2012b)*

Na slici 13. prikazani su također i eksperimentalni podaci Martiandi i sur. (2010.) za ploče niske gustoće od masivnog drva manija (oplata) i komercijalnih ploča iverica iz drvne vune povezane cementnom. U frekvencijskom rasponu od 100 do 1600 Hz apsorpcija zvuka bila je ispod 0,5. Koeficijent apsorpcije zvuka

ploča fluktuirao je na niskim frekvencijama, a zatim se smanjio na srednjoj frekvenciji i nastavio se povećavati na viskom frekvencijama do 1600 Hz. Slično ivericama, vlaknaticama i furnirskoj ploči koje su testirali Yang, Kim i Kim (2003), veća apsorpcija zvuka primijećena je u frekvencijskom rasponu od 100-4000 Hz. Prosječna apsorpcija zvuka svih ispitanih iverica iz brzorastućih vrsta pokazala je da ploče odbijaju zvuk u srednjoj frekvenciji i apsorbiraju ga na niskim i visokim frekvencijama. Eksperimentalne ploče srednje gustoće imale su koeficijente apsorpcije zvuka veće od ploča niske gustoće na niskim frekvencijama. Pri visokim frekvencijama (>1000 Hz), iverice niske gustoće imale su dobra svojstva apsorbiranja zvuka u usporedbu s frekvencijama ploča srednje gustoće. U niskim frekvencijama (<250 Hz) fluktuacije apsorpcije zvuka pri svakoj ispitanoj frekvenciji imale su gotovo slične vrijednosti za svaku vrstu iverice u istoj gustoći. Autori Karlinasari i sur. (2012b) to objašnjavaju odgovorom specifičnih karakteristika drva ili drugih materijala od prirodnih vlakana na nisku frekvenciju zvuka pri istoj gustoći ploče. U isto vrijeme na visokim frekvencijama sposobnost iverica da apsorbiraju više zvučnih vibracija ne pokazuje neki poseban trend.

Na osnovi eksperimentalno utvrđenih rezultata autori su zaključili da se ploče iverice izrađene iz brzorastućih vrsta drva mogu koristiti pri projektiranju kao dio višeslojnih akustičnih apsorbera za mnoge svrhe kao što su oblaganje krovova i zidova, podloge i unutarnje površine za zid i strop u zgradama u graditeljstvo i za dizajn interijera.

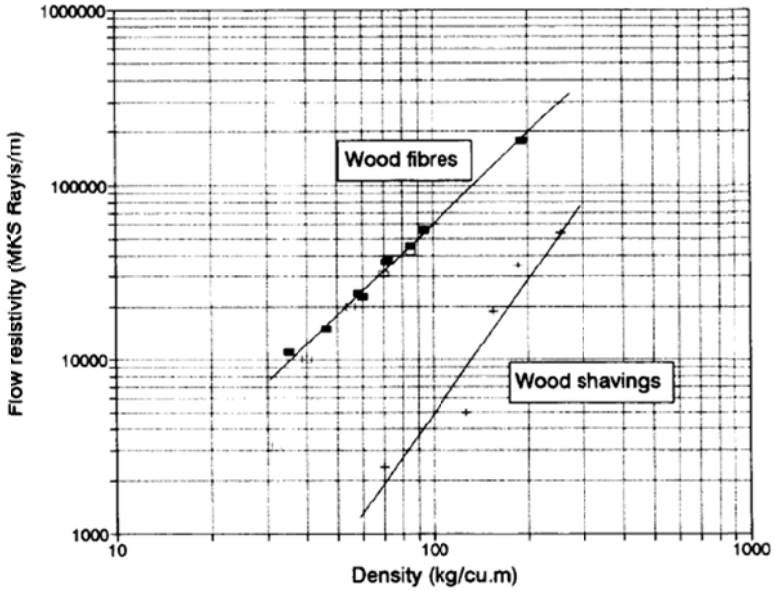
3.4. Akustička svojstva rastresitih drvnih vlakana i slabo prešanih ploča iz drvnih vlakana

Wassilieff (1996), ispitao je akustička svojstva rastresitih drvnih vlakana pripremljenih za proizvodnju ploča vlaknatica srednje gustoće (MDF), odnosno drvnih strugotina pripremljenih prosijavanjem kroz sito s otvorom oka od 2 mm. Većina ispitnog uzorka sastojala se samo od drvenih vlakana ili strugotina fizički upakiranih u cijev za držanje uzoraka koja se koristi za akustična mjerenja. Nekoliko ispitnih uzoraka napravljeno je i uz korištenje slabe otopine PVA ljepila koja bi mogla imati akustična svojstva. Ono što se pokazalo kao vrlo teško proizvesti jest homogene uzorke pomoću bez značajnije primjene tlaka, odnosno veziva, što je kao posljedicu imalo to da se utjecaj dodatka PVA ljepila na vlakna nije mogao utvrditi.

3.4.1. Ispitivanje akustičkih svojstava drvnih vlakana

Na slici 15. prikazana je situacija vezana uz akustička svojstva uzoraka iz drvnih vlakana i drvnih strugotina gdje je vidljivo da su se udjeli apsorpcije značajno smanjili što je vjerojatno povezano sa sadržajem vode. Uz navedene tipove uzoraka u radu su ispitana i akustička svojstva MDF ploča i oplemenjenih ploča iverica, kao inherentnih materijala sa visokim otporom strujanja

zraka/niskom poroznošću, a u slučaju iverice, naizgled materijalima s visokim zavojima. Razumno uklapanje teorije u izmjerene koeficijente apsorpcije za ivericu moglo se postići samo ako su pretpostavljene vrlo velike i nerealne vrijednosti zavojitosti (oko 200).



Slika 15. *Otpornost protoka zraka u odnosu na gustoću uzorka za ispitne uzorke izrađene od drvnih vlakana (**Izvor:** Wassilieff, 1996)*

Otopornost strujanja (protoka) zraka svakog uzorka mjerena je statičnom metodom opisanom u normi ASTM C 522-87. Metoda uključuje mjerenje pada tlaka u uzorku za poznatu količinu protoka zraka kroz uzorak. Na uzorku koji se koristio za mjerenje apsorpcije zvuka, mjerena je i otpornost strujanja zraka. Pad vrijednosti otpora strujanju zraka pri niskoj gustoći pripisuje se tome što se vlakna „skupljaju“, pa je u ovom slučaju otpornosti strujanja određena i na relativno velikim prostorima između nakupina vlakana, a ne vlaknima u rasutom (rastresitom) stanju.

Poroznost uzorka određena je na tri načina. Prva metoda bila je statička metoda koja je uključivala jednostavnu uporabu Boyleova zakona. Statičkom metodom određena je statička poroznost s točnošću od ± 0,05. Druga metoda jest dinamička metoda koja je uključivala mjerenje rezonantne frekvencije jednostavnim susatavom s oprugom mase. Treća metoda određivanja poroznosti uključivala je jednostavan izračun na temelju poznate gustoće drvnih vlakana.

Apsorpcija zvuka određena je sustavom s impendancijskim cijevima. Pri normalnom padu incidencije mjereni su koeficijenti apsorpcije zvuka pomoću konvencionalnog aparata sa stojećim valom (impedancijska cijev) s uzorkom promjera 90 mm. Gornja granična frekvencija cijevi iznosila je 2200 Hz iako bi se pouzdana mjerenja u nekim slučajevima mogla izvršiti do 2500 Hz.

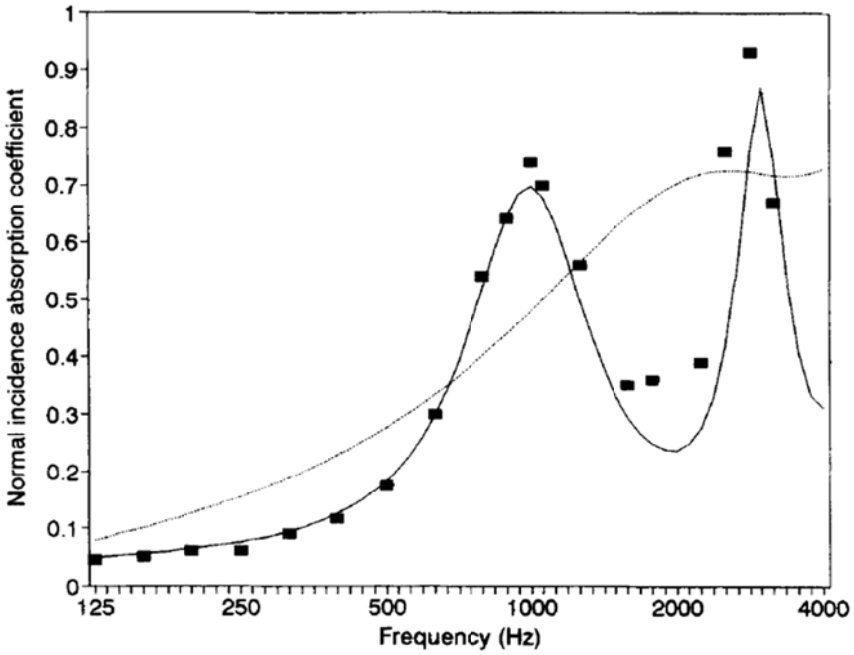
3.4.2. Rezultati ispitivanja akustičkih svojstva rastresitih drvnih vlakana

U tablici 3. navedeni su rezultati ispitivanja akustičkih svojstava uzoraka rastresitih drvnih vlakana, odnosno strugotine.

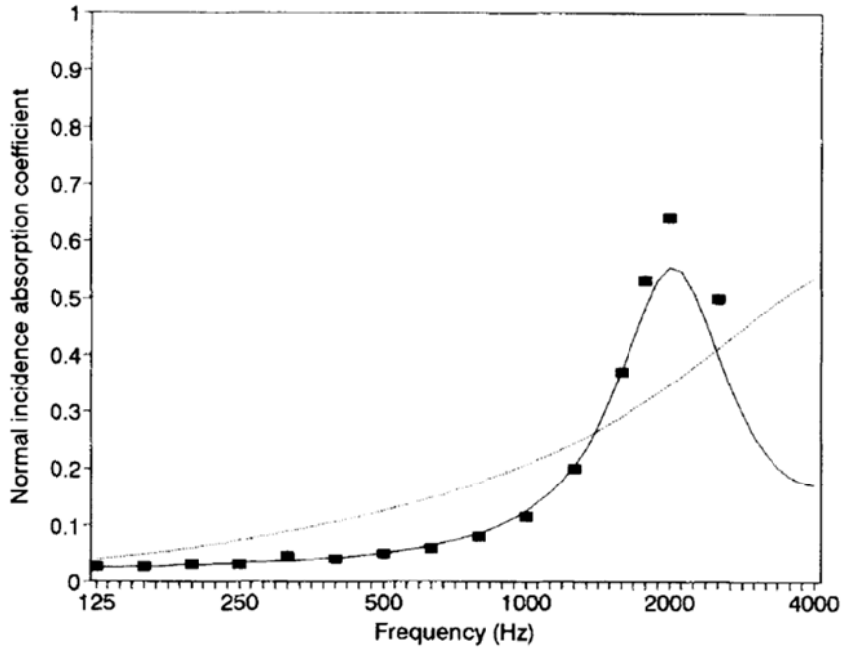
Tablica 3. *Rezultati ispitivanja akustičkih svojstava (**Izvor:** Wassilieff, 1996)*

Statička poroznost, Ωs	1 - ρ/1000	
Dinamička poroznost, Ω	1 - ρ/500	
Proračunata poroznost, Ω	1 - ρ/575	
Zakrivljenost, q2	0.036ρ + 1	samo za strugotine
	0.01ρ + 1	samo za drvena vlakna
Otpornost strujanja zraka	$0.035\ \rho^{2.57}$	samo za strugotine
	$20.8\rho^{1.73}$	samo za drvena vlakna

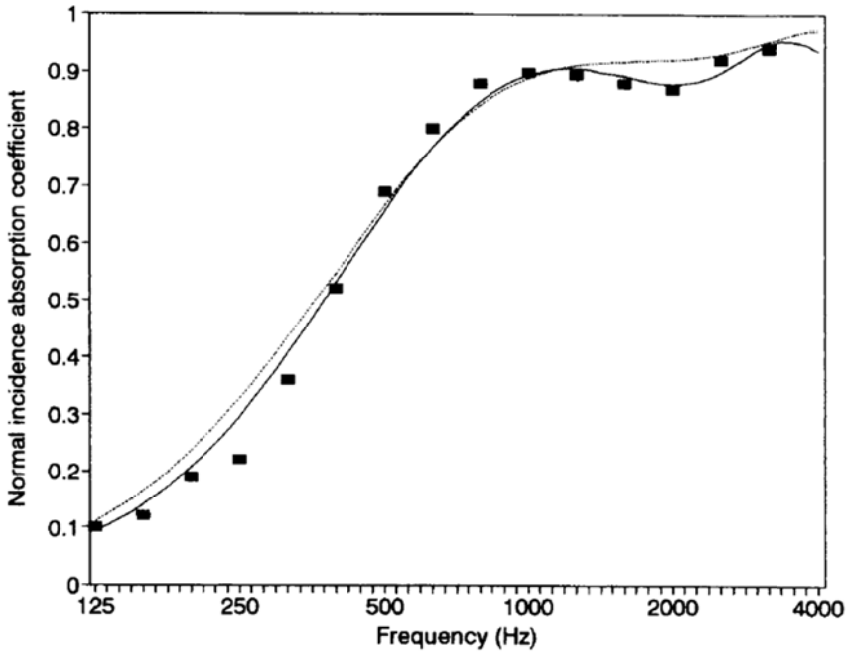
Na osnovi podataka navedenih u tablici 3., Wassilieff (1996) pripremio je grafove odnosa normalnog incidencijskog apsorpcijskog koeficijenta i frekvencije zvuka za ploče iverice izrađene primjenom cementnog veziva (sl. 16. i 17.), odnosno za rastresita drvna vlakna (sl. 18. i 19).



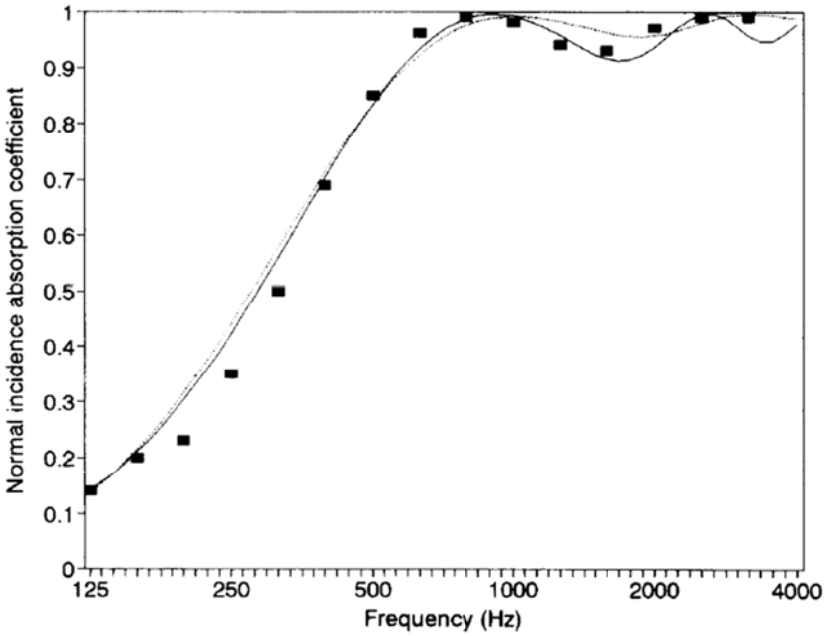
Slika 16. *Apsorpcija zvuka komercijalne ploča iz drvne vune povezane cementnim mlijekom, debljine 50 mm (**Izvor:** Wassilieff, 1996)*



Slika 17. *Apsorpcija zvuka komercijalne ploča iz drvne vune povezane cementnim mlijekom, debljine 25 mm (**Izvor:** Wassilieff, 1996.)*



Slika 18. *Apsorpcija zvuka rastresitih drvnih vlakana kalifornijskog bora, debljina nasipa = 50 mm (**Izvor:** Wassilieff, 1996.)*



Slika 19. *Apsorpcija zvuka rastresitih drvnih vlakana kalifornijskog bora, debljina nasipa = 75 mm (**Izvor:** Wassilieff, 1996.)*

Na osnovi rezultata ispitivanja Wassilieff (1996), je zaključio da se apsorpcija zvuka materijala na bazi rastresitih drvnih vlakana, kao i onih napravljenih iz drvnog iverja (neovisno o tipu veziva) mogu relativno jednostavno opisati klasičnim teorijama širenja zvuka kroz individualne materijale. No, zaključuje i da bi za bolje razumijevanje teorijski dobivenih podataka, u jednadžbe svakako trebalo uvrstiti i faktor oblika, učestalosti i distribucije pora drvnog materijala, što proračune automatski čini značajno složenijima.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovi provedene analize dostupne literature može se zaključiti slijedeće:

- ploče iverice niže gustoće imaju veći koeficijent apsorpcije zvuka od iverica više gustoće, no ta je tvrdnja usko vezana uz sirovinu i izravno je povezana s gustoćom gotovih proizvoda,
- ploče iz zamjenske lignocelulozne sirovine (bambus, rižina slama itd.) imaju vrlo dobre karakteristike, posebice u području visoke frekvencije zvuka,
- ploče iverice dobrih akustičkih svojstava u pravilu su nešto lošijih mehaničkih svojstava, što je opet povezano uz sastav sirovine, ali i tehnološki proces proizvodnje ploča,
- ploče iz zamjenske lignocelulozne sirovine, zbog svojih dobrih akustičkih svojstava. povoljne su za uporabu kao izolacijski materijal u graditeljstvu (obloge zidova, stropova i podova).

5. LITERATURA

1. Jambreković, V., 2004: Drvne ploče i emisija formaldehida. Šumarski fakultet, Zagreb.
2. Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N., Hadi, Y.S., 2012a: Acoustical properties of particleboards made from betung Bamboo (Dendrocalamus asper) as building construction material. Bioresources, 7(4): 5700-5709.
3. Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Hadi, Y.S., 2012b: Development of particleboard from tropical fact-growing species for acoustic panel. Journal of Tropical Forest Science, 24(1): 64-69.
4. Martiandi, B, Mardikanto, T.R., Karliasari, L., 2010: Physical, mechanical and acoustical properties of composite board from manii wood. U: Nawawi D.S. i sur. (ur.), Proceedings of the 13th National Seminar of MAPEKI. 11 November 2010, Bali, pp. 49-56
5. Wassilieff, C., 1996: Sound absorption of wood-based materials. Applied Acoustics, 48 (4): 339-356.
6. Yang, H.S., Kim, D.J., Kim, H.J. 2003: Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. Bioresource Technology, 86: 117-121.
7. ***EGGER - The fundamentals of acoustics EN_11/10
8. *** https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_(materijal) (Pristupljeno: 24.05.2021.)
9. *** https://hr.wikipedia.org/wiki/Zvuk (Pristupljeno: 28.05.2021.)