

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Märten Haugas

Akende suuruse ja omaduste varieerimise mõju
hoone energiatõhususele

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

Juhendaja: Tõnu Mauring, PhD

Tartu 2015

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS	3
2. TEOREETILINE OSA	4
2.1 Energiatõhusa maja iseloomustus	4
2.2 Maja küttevajadus	6
2.3 Soojuslik mugavus	7
2.4 Akna iseloomustus ja parameetrid	9
2.5 Klaaspakettide kattekihid	11
2.6 Akende paigutuse mõju hoone küttevajadusele	12
2.7 Aknast siseneva soojuskiirguse hulka vähendavad tegurid	13
2.8 Akna hind	13
2.9 Klaaspakettide tulevik	14
2.10 Aknaraam	15
3. MATERJAL JA METOODIKA	16
3.1 Maja	16
3.2 Aknad	19
3.3 Programmid	21
4. TULEMUSED JA ARUTELU	23
4.1 Variant 1	24
4.2 Variant 2	27
4.3 Variant 3	29
4.4 Variant 4	31
4.5 Variant 5	34
5. KOKKUVÕTE	38
6. KASUTATUD ALLIKAD	39
Summary	44

1. SISSEJUHATUS

Mida aasta edasi, seda enam kallinevad kütused ning karmistuvad nõuded hoonete energiatõhususele. Kuna hooned on pikalt püsivad ja pikaajalise mõjuga [1] ning nende kütmiseks kuluva energia hulk hõlmab suure osa elamusektoris kuluvast energiast [2–5], on just hoonetega seonduva energiakulu vähendamine suure tähtsusega. Eestis kulub ligikaudu kolmandik kasutatavast energiast elamutele [6]. Soojakaod läbi akna moodustavad kuni 60% kogu hoone soojakadudest [7], seega on just akende ja nendest lähtuva energiabilansi optimeerimine väga suure potentsiaaliga energiasäästu seisukohast.

Teema olulisust näitab ka see, et alates aastast 2020 peavad Euroopa Liidu otsuse järgi kõik ehitatavad ja suurel määral renoveeritavad hooned olema liginullenergiahooned [7-8]. Selle eesmärgi saavutamiseks tuleb kasutusele võtta uued tehnoloogiad ning pöörata rohkem tähelepanu ehituskvaliteedile ja kasutatavatele materjalidele ning arvestada hoone erinevate komponentide mõju selle energiatarbele.

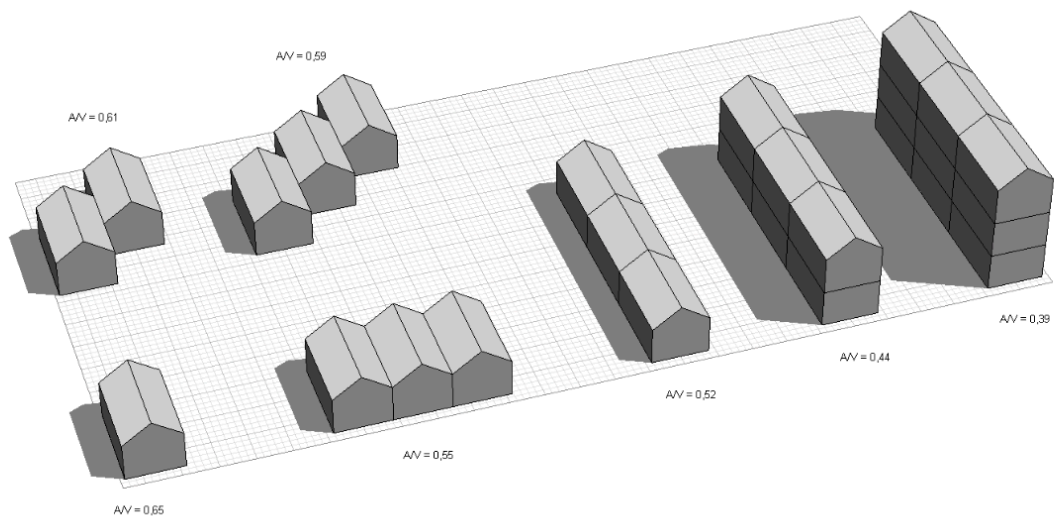
Antud töö eesmärgiks on leida sobivamad lahendused akende paigutuse ja tehniliste parameetrite osas, silmas pidades nii hoone küttevajadust kui ka majanduslikku tasuvust ehk selgitada välja, kas kallima ning paberil paremate parameetritega akna eest tasub rohkem maksta või pole võrreldes odavama akna kasutamisega suurt vahet. Selle töö tulemused kehtivad nii-öelda homse päeva energiatõhusate majade kohta. Suure energiatarbe ja paljude soojakadudega hoone kohta antud töös leitavad tulemused ei sobi.

2. TEOREETILINE OSA

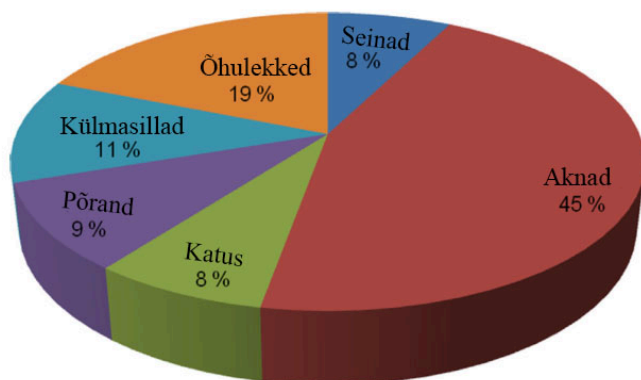
2.1 Energiatõhusa maja iseloomustus

Energiatõhususest räägitakse ja sellega tegeletakse igapäevaselt järjest rohkem. Kuna tarbijaid tuleb juurde ning lõppkokkuvõttes on ressursid piiratud, siis tuleb leida lahendus, mis kõigi huve arvestaks ja ka jätkusuutlik oleks. Seega tuleb arenduse käigus silmas pidada, et kodumasinad tarbiksid vähem elektrit, autod vähem kütust ning ka ehitatavad hooned peaksid olema järjest säästlikumad. Et akendest lähtuv kasu oleks võimalikult suure osakaaluga, peab ka maja, kus neid aknaid kasutatakse, olema projekteeritud ja ehitatud energiasäästu silmas pidades. Kui hoone on halva kvaliteediga, on akende mõju selle küttevajadusele palju väiksem kui energiatõhusal majal.

Kvaliteetse ja energiatõhusa maja etaloniks võib pidada passiivmaja, mis on ehitatud vastavalt Darmstadt Passive House Institute'i ettekirjutustele [10]. Selle kavandamisel ja ehitamisel järgitakse teatud põhimõtteid, mille abil on võimalik väikse lisakuluga säästa tulevikus nii raha kui loodust. Põhimõte on optimeerida neid hoone elemente, mis on niigi tähtsad - välispiire, aknad ja ventilatsioon. Passiivmaja on kompaktne (Joonis 1), ilma erinevate väljasopistusteta, et välisõhuga kontaktis oleva seina pindala asjatult suur ei oleks. Vastasel juhul tooks see kaasa liigsed soojakaod ning suurema küttevajaduse. Lisaks peab passiivmaja olema õhupidav, maksimaalne õhuvahetuskordsus peab jääma alla $0,6 \text{ h}^{-1}$. See saavutatakse liitekohtade õhutihedaks teipimisega ning tuuletõkkeplaatide jm kasutamisega hoone ehitamisel. Õhulekkeid võib esineda eelkõige komponentide liitekohtadest, näiteks akna-seina liitekohad, paneelide liitekohad jms. Samuti on energiatõhusates majades kasutusel rohkemal määral isoleerivat materjali, et vähendada seintest ja katusest lähtuvaid soojakadusid. Hoone erinevatest elementidest lähtuva soojakao osakaalu illustreerib joonis 2. Erinevad detailid peavad olema külmasillavabalt ühendatud, mis tähendab, et läbi isoleeriva materjali ei tohi läbi viia suure soojusjuhtivusega elemente (nt isoleerimata betoonpost läbi korruste). Edasine energiasääst on saavutatud päikseenergia kasutamisega maja ja sooja vee kütmiseks ning elektri tootmiseks.



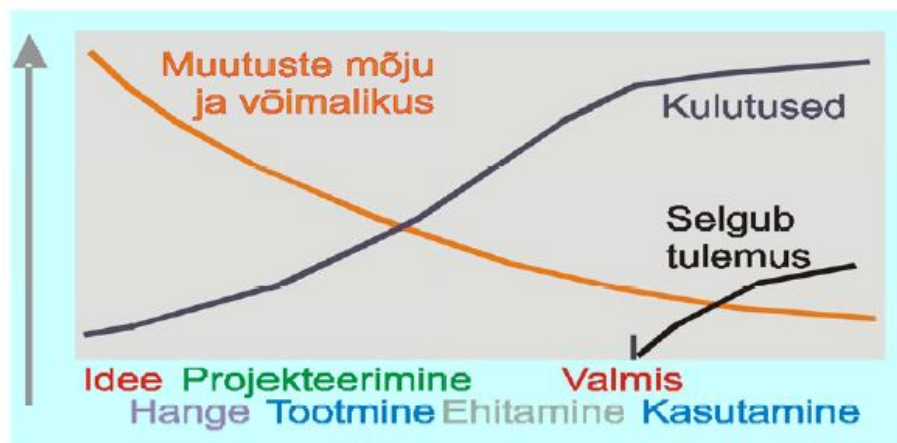
Joonis 1. Hoone pindala-ruumala suhe, näitab hoone kompaktsuse tähtsust [11].



Joonis 2. Hoone erinevatest elementidest lähtuva soojakao osakaal [12].

Hetkel kehtiva energiatõhususe miinimumnõuete järgi ei tohi ehitatavate väikeelamute energiatarve Eestis ületada $160 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Järgides lähitulevikus normiks saavaid nõudeid, on tegelikkuses võimalik juba praegu säästa üle 90% hetkel kehtivate määrusete poolt sätestatud energiatarbe miinimumnõuetest. Määruses on sätestatud piirid ka madalaenergiahoonele, mille energiatarve võib olla kuni $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, ning ligi nullenergiahoonele, mille energiatarve võib olla kuni $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Seega pole antud nõuded eriti karmid, kuid kindlasti on jäetud suurem varu arvestades Eesti jahedat kliimat – aastakeskmine temperatuur $4,3\text{-}6,5^\circ\text{C}$ [13].

Parima tulemuse saavutamiseks tuleb eelnevalt kirjeldatud passiivmaja ehitamiseks vajalike põhimõtete järgimisega arvestada juba projekti algusjärgus. Kui maja juba ehitatakse, ei ole võimalik enam suuri muudatusi sisse viia ning tuleviku energiasäästlikkust suurendada. Muutuste mõju ja võimalikkust ning kulustuste kasvu nende muutuste ellu viimiseks illustreerib joonis 3.



Joonis 3. Energiatõhususe tagamiseks tuleb sellele tähelepanu pöörata juba projekti algfaasis [14]. x-teljel on kujutatud projekti ajaliskulgu, y-teljel on skemaatiliselt kujutatud kulustuste kasvu ning muutuste mõju ja võimalikkust projekti edenedes. Mida hilisemas faasis on soov tõsta hoone energiatõhusust, seda suuremad on selle saavutamiseks tehtavad kulud ning väiksem saavutatav mõju.

2.2 Maja küttevajadus

Hoone netoküttevajadus näitab, kui palju on vaja toas soovitud temperatuuri saavutamiseks energiat kulutada, kui arvesse on juba võetud vabasoojuse ja passiivse Päikse soojuskiirguse hulk. Kütteks vajalik soojushulk sõltub välistest teguritest (välisõhu temperatuur ja selle ajaline kestus, tuule kiirus, hoone asend ilmakaarte suhtes, päiksekiirguse intensiivsus) ning sisemistest teguritest (hoone välispiirete soojuspidavus, õhupidavus, soojusallikate olemasolu ja tehniline seisukord, soovitatav sisetemperatuur jne) [15]. Samuti tuleb arvesse

võtta hoone kompaktsust ja kavandit, akende paiknemist ning lähedal asuvaid varjutavaid hooneid [15–17].

Energiatõhusates hoonetes pööratakse suurt tähelepanu selle kütmisele passiivsete vahenditega. Päikse soojusenergia passiivsel kasutamisel saavutatakse hoone soojusmugavus Päikse soojusenergia rakendamise teel, võttes arvesse kohaliku kliima iseärasusi ja hoone ehitamiseks kasutatavaid materjale [19]. Hoone kütmiseks kasutatavate passiivsete võimaluste hulka kuulub akendest lähtuva Päikse vabaenergia kasutamine. Lisaks on võimalik hoone üks sisesein ehitada tampsavist, mis kogub päeval soojusenergia endasse ja öösel kiirgab seda ümbritsevasse õhku. Kõigist praegu saada olevatest taastuvatest energiaallikatest on päikseenergia kõige suuremahulisem, ammendumatum ja puhtam [20].

Lisaks Päiksele panustavad hoone kütmisele ka kodumasinad ning majas elavad inimesed, kellest eralduv vabasoojus moodustab olulise osa maja küttevajadusest. Majas, kus elab viis inimest, on küttevajadus väiksem kui majas, kus elab vaid kaks. Ühe täiskasvanu küttevõimsus on 70 W [21].

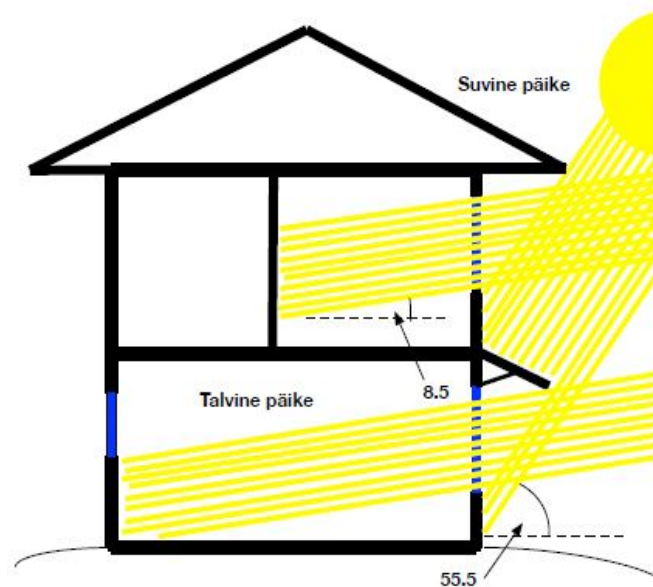
2.3 Soojuslik mugavus

Energiatõhusates majades on energiasäästuga samaväärselt tähtis ka hoone sisekliima ning inimeste soojuslik mugavus (ingl. k *thermal comfort*). Kuna arenenud riikides veedavad inimesed 90% ajast siseruumides [22], on sisekliima ja hoones viibimise ajal inimeste heaoluga arvestamine tähtis aspekt. Meeldiva sisekliima korral viibivad inimesed meelsamini hoones ning ka nende töövõime on suurem. Energiatõhusas majas on soojuslik mugavus tagatud nii suvel kui talvel [23]. Soojuslik mugavus on saavutatud, kui inimene on rahul teda ümbritseva soojusliku keskkonnaga [24]. Piisava soojusmugavuse korral ei soovi hoones viibija tunda soojema ega jahedamana, kui tema käest küsida soojusliku olukorra ja eelistuse kohta [22].

Paigaldades hoonele liiga palju aknaid ning mitte pöörates tähelepanu erinevatele katetele, mis varjaks liigset Päikest, tekib ülekuumenemisoht. Aknast lähtuv positiivne soojusvoog

aitab küll ruume kütta, aga liiga intensiivse päiksekiirguse korral (Eestis kliimas märtsist oktoobrini) võib temperatuur tõusta liiga kõrgele ja põhjustada majas viibijatele ebamugavust. Mida suurem on akende osakaal, seda suurem on võimalus ülekuumenemiseks. Liigse päiksekiirguse blokeerimiseks võib akende ette paigaldada välisrulood, horisontaalsed sirmid (ingl. k *overhang*), vertikaalsed sirmid (ingl. k *fins*) või ribid (ingl. k *venetian blinds*) [25]. Nende õige paigalduse ja kasutamise korral on võimalik talve madalal oleva Päikse kiirgus tупpa ning ruume soojendada. Suvel, kui Päike on kõrgel, blokeerivad sirmid-rulood-ribid suure nurga all langeva päiksekiirguse ning selletõttu ei tõuse sisetemperatuur soovitud oluliselt kõrgemaks.

Eestis langeb päiksekiirgus suvel keskpäeval $55,5^\circ$ nurga all ning talvel keskpäeval $8,5^\circ$ nurga all [26], seda illustreerib joonis 4. Aastas on päiksepaistet keskmiselt 1600-1900 tundi, mis on 36-44% võimalikust [27].



Joonis 4. Päiksekiirguse langemisnurgad Eestis suvel ja talvel keskpäeval [28].

Energiatõhususe miinimumnõuete määramise kohaselt peavad lääne- ning lõunapoolsetel välisseintel asuvad aknad, mille pindala on üle 1 m^2 , olema g-arvuga kuni 0,4. Vastasel juhul tuleb kasutada suvekuudel ülekuumenemise vältimiseks muid lahendusi [9]. Lisaks peab

elu- ja magamistubade lääne- ja lõunakülgedel paiknevate akende klaasiosa pind moodustama maksimaalselt 30% välisseina pindalast. Avatavate akende pindala peab sellisel juhul olema vähemalt 5% nende ruumide põrandapindalast.

2.4 Akna iseloomustus ja parameetrid

Energiatõhusates hoonetes on aknal energiasäästu ja –bilansi seisukohalt väga suur roll. Lisaks energiasäästule peaks aken läbi laskma võimalikult palju päevavalgust, võimaldama sisse ja välja vaadata, mitte laskma soojust seest välja, laskma soojuskiirgusel siseneda tuppa talvisel ajal ning suvisel ajal mitte laskma üleliia palju soojust sisse ning vältima tuuletõmbuse teket [29].

Energiatõhustes majades kasutatavad aknad on reeglina kolmekihilise paketiga ning külmasillavaba raamiga. Klaasidevaheline õhuruum on täidetud inertgaasiga, tavaliselt argooniga, harvem krüptoniga. Energiasäästlikuks loetakse klaaspakette, mille U-arv jääb 0,4 ja 1,0 W/m²K vahele [30], raami puhul on sama näitaja 0,6 kuni 0,8 W/m²K [31].

Põhilisteks akent iseloomustavateks tehnilisteks parameetriteks on selle U-arv (ingl. *U-value*) ehk soojusjuhtivus ning g-arv ehk päiksekiirguse läbilaskvust. Akna U-arv näitab piirde soojusläbilaskvust, mõõtühik W/m²K. See leitakse klaaspakettide ja aknaraamide puhul eraldi, kuid väljendatakse ka kogu soojusläbilaskvusena, arvestades mõlemaid komponente. Akna U-arvu mõjutavad olulisel määral muuhulgas ka klaaspaketi materjal, klaaspaketi kihtide arv, õhuvahe suurus pakettide vahel, kasutatav inertgaas, raami disain, materjal ja tüüp ning muud osad [7].

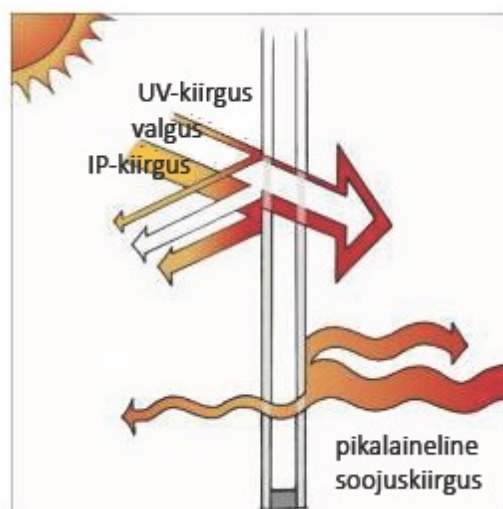
g-arv (ingl. k *g-value*) näitab klaaspaketi lühilainelise kiirguse läbilaskvust, seda väljendatakse protsendina kogu kiirgusest. g-arvu mõjutavad klaasi tüüp, klaaspakettide arv, klaaside paksus ning erinevad kattedehid klaasi peal. Mida rohkem on klaaspaketikihte ning mida paksemad need on, seda väiksem on g-arv [29]. g-arvu väärtus kattedehita puhta selge klaasi puhul võib olla kuni 90% ning alla 10% klaaside puhul, mida katab kõrgläikega kiht [7]. g=0,3 tähendab, et tuppa siseneb 30% päiksekiirgusest ülekande või sekundaarse

soojusena, mida saab kasutada hoone kütmiseks. g -arv on seega võtmeparameeter hoone energiatarbimise vähendamise ning kütmise, jahutamise ja ventileerimise seisukohalt [32].

U - ja g -arv muutuvad vastassuunaliselt - kui klaaspaketi U -arv tõuseb, siis g -arv väheneb ning vastupidi. Seega ei ole veel olemas aknaid, mis oleks väga hea soojapidavusega ning laseks läbi ka palju päiksekiirgust. Kuna klaasil ja raamil on erinev U -arv, siis peab sellega arvestama ka hoone projekteerimisel ning energiaarvutuste koostamisel. Üldiselt on raamil soojusjuhtivus suurem kui klaasil ning seega on energiabilansi ja fragmenteerituse suhtes otstarbekam üks suur aken kui kolm väikest. Akna klaasil on suurem mõju kogu akna soojuslikele omadustele, kuna see hõlmab suurima osa aknast (raam on väiksema pindalaga). Seega määrab klaaspaketi U -arv suuresti ära kogu akna soojusjuhtivuse väärtuse [7]. Eriti tuleb sellega arvestada energiatarbimises majades, kuna seal on iga võidetud või kaotatud kWh soojusenergiat suurema tähtsusega kui tavalistes majades.

Ye *et al.* [33] järgi ideaalsel aknal suvisel ajal soojusneelduvus puudub, nähtav valgus läbib klaasi, kuid muu lainepikkusega kiirgus peegeldatakse tagasi. Lisaks saab pikalaineline kiirgus seest välja minna, kuid väljast tulev kiirgus peegeldub täielikult tagasi ehk et g -arv on minimaalne. Talvisel ajal oleks ideaalsel aknal maksimaalselt suur g -arv ning soojusjuhtivus ja soojakadu minimaalne. Uute akende ja eriti klaaspakettide arengut silmas pidades, tuleks järgida just neid parameetreid ja kohandada vastavalt võimalustele.

Aknale langev kiirgus osalt peegeldub, osalt neeldub ja osalt läbib klaasi (joonis 5). See, kui palju peegeldub, neeldub või läbib sõltub lainepikkusest, kaldenurgast ja materjali optilistest omadustest [29]. Kasutamaks hoone siseõhu tõstmiseks maksimaalsel määral ära aknast sisenevat Päikse soojuskiirgust, on vajalik, et lühilaineline kiirgus siseneks läbi akna tupp ja pikalaineline soojuskiirgus peegelduks toas olles akendelt tagasi, mitte ei läbiks seda. Selles olukorras on saadav soojuslik efekt maksimaalne.



Joonis 5. Aknale langevast päiksekiirgusest osa peegeldub, osa neeldub ja osa läbib seda [34].

2.5 Klaaspakettide kattedkihid

Klaaspakettide energiasäästlikumaks muutmiseks on välja tehnoloogia, mille käigus kaetakse klaasid õhukese metallkihiga, mis vähendab klaaspaketi soojusjuhtivust. Need kihid kantakse klaaspaketi sisemistele külgedele, et vältida võimalikke vigastusi kattedkihile ja sellega tekkivaid probleeme [29]. Kattedkihid on selektiivsed, mis tähendab, et need lasevad läbi teatud lainepikkusega kiirgust (nähtav valgus), kuid peegeldavad ebavajaliku lainepikkusega kiirgust klaasilt tagasi [35]. Seega väheneb ka klaasi g -arv. Mõningatel juhtudel on tegu soovitud omadusega, kui eesmärgiks on aknast liigset lisasoojust ruumi mitte lasta, kuid üldiselt kaotatakse g -arvu vähenemisega siiski ruumide kütmiseks vajalikku tasuta soojuskiirgust. Tavalise kattedkihtideta kolmekihilise akna kasutamisel kattedkihtidega akende asemel kuluks maja kütmiseks kaks korda rohkem energiat [21].

Manz ja Menti [36] viisid läbi katse, millest selgus, et vaid kolmekihiline ja kattedkihtidega paketi akende kasutamine lõunafassaadil on energeetiliselt positiivne ja soojakadu on väiksem kui aknast siseneva soojuskiirguse hulk. Tavapärased ühe- ja kahekihilistest akendest lähtuv soojakadu on suurem kui sealt sisenev soojuskiirgus.

2.6 Akende paigutuse mõju hoone küttevajadusele

Ligi 60% hoonete soojakadudest põhjustavad aknad [7]. Traditsiooniliselt on passiivmajadel enamus aknaid paigaldatud hoone lõunaküljele, kasutamaks maksimaalselt ära Päikse kiirgusenergiat hoone kütmisel. Kuna aknad on võrreldes hoone muu välispiirdega suurema soojusjuhtivusega, siis paigutatakse soojakadude vähendamiseks põhjaküljele aknaid minimaalselt. Positiivne soojusvoog põhjapoolsetest akendest puudub. Samas on Persson *et al.* [21] järgi võimalik suurendada akende osakaalu põhjaküljel ilma, et see aasta raames maja küttevajadust suurel määral mõjutaks. Nende väitel ei mõjuta energiasäästlike akende kasutamine talvisel perioodil maja küttevajadust, kuid suvisele jahutusvajadusele on neil palju olulisem mõju.

Energiatõhusate akende kasutamine võib olla parem kui hästi isoleeritud sein ilma akendeta, kuna läbi akna tulevat päiksekiirgust on võimalik kasutada maja soojendamiseks. Lisaks selgitasid Persson *et al.* välja, et vähendades akende pindala lõunaküljel 20% või isegi 50% esialgsest, ei mõjutanud see aastast küttevajadust suurel määral, sest hea isolatsiooniga seinad ($U=0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$), energiatõhusad aknad ja soojustagastusega ventilatsioonisüsteem vähendavad maja küttevajadust üheskoos ning üksikutel elementidel on omaette väiksem mõju. Suurim küttevajadus on talvel, kui Päikest paistab vähem ja see on madalamal kui teistel aastaegadel ja seega ei ole võimalik nii palju päikseenergiat kasutada [21].

Rusikareegli järgi peaks akende klaasi pindala olema mitte väiksem kui 10% põranda pindalast [37], optimaalne on 20% kuni 30%, oleneb vastavalt sellest, kas aknad on koondatud lõunaküljele või jaotatud ühtlasemalt eri ilmakaarte vahel [18]. Akende suurus ja osakaal seina pindalast ei mõjuta energia tootmise tippvõimsust suurel määral, kuid kasutades lõunapoolsel küljel suuremaid aknaid, tõuseb ka ventilatsioonimäär ning akna ees tuleb kasutada varje. Vastasel korral tõuseb suvel jahutamiseks kuluva energia hulk suurel määral [21].

Hea soojustus vähendab maja nõudlust passiivse päikseenergia järele. Sel juhul on Päiksel mõõdukas mõju siseõhu temperatuurile ning hoonet võib teoreetiliselt pöörata ilmakaarte suhtes ka 180° ilma, et maja energiabilansis suurt muutust toimuks. Lisaks on vahe

energiabilansis väike, kui võrrelda maju, mille aknad on jaotatud võrdselt eri ilmakaarte suhtes ja maju, millel enamus akendest asuvad lõunafassaadil. Kui lõunaküljele paigutatud akendega maja orienteerida põhjasuunaliselt, on see väiksema energiatõhususega kui võrdselt jaotatud akendega maja, kui see pöörata põhja suunda. Kuna aknad on ühtlasemalt kõigi hoone külgede vahel jaotatud, ei sõltu hoonesse siseneva päiksekiirguse hulk nii suurel määral vaid ühel küljel asuvate akende pindalast. Küttevajadus on kõige väiksem juhul, kui majad on orienteeritud põhja- või lõunasuunaliselt. Siiski pole üldiselt erilist vahet, mis ilmakaare suhtes maja orienteerida [21].

2.7 Aknast siseneva soojuskiirguse hulka vähendavad tegurid

Läbi akna tупpa jõudva soojuskiirguse hulk sõltub lisaks tehnilistele parameetritele ja akende paigutusele ka teisest teguritest. Klaasi pind pole kunagi täiesti puhas, õhus lenduv tolm jm mustus vähendavad akent läbiva päiksekiirguse hulka. Samuti võivad lähedal asuvad puud aastatega kasvada nii suureks, et hakkavad aknaid varjutama. Lisaks võivad tulevikus lähedusse ehitatavad hooned varjutada juba olemasolevaid maju ning nende aknaid ja vähendada või täielikult blokeerida aknast siseneva päiksekiirguse. Sellisel juhul tuleb kasutusele võtta teised küttemeetodid, mis võivad suurendada maja kütteenergiavajadust ja küttearvete olulise kasvu.

2.8 Akna hind

Akna tellimisel ei mõtle klient alati selle kasutamiseega kaasnevatele kuludele-tuludele, vaid peamiseks kriteeriumiks on tihti esmainvesteeringu suurus. Samas on võimalik natuke kallima akna korral säästa tulevikus küttekuludelt märkimisväärseid summasid. Akna hind kujuneb kahe komponendi - raami ja klaaspaketi - hinnast. Raami hind sõltub materjalist (raud, alumiinium, puit, plast), millest see tehakse, disainist, termilise isolatsiooni astmest ja samuti eriomadustest (avanev, mitteavanev). Klaaspaketi hinna määravad kasutatav klaas (tavaline, kirgas), klaasi kattedihid, paketi vaheliistu tüüp ning pakettidevahelise ruumi

täitmiseks kasutatav gaas [38]. Tabelis 1 on esitatud enimkasutatavate inertgaaside soojusjuhtivus ning hind 1 m³ kohta (hinnad sõltuvad ka kogusest). Saint Gobain Glass-st saadud hinnapakumiste põhjal võib väita, et samade parameetritega akende korral võib krüptoonitüüpi klaaspaketi hind olla kuni 70% kallim kui argoonitüüpi klaaspakettide korral [38].

Tabel 1. Klaaspakettides kasutatavate gaaside soojusjuhtivus ning hind 1 m³ gaas kohta.

Gaas	U, W/m ² K [7]	Hind, €/m ³ [39]
Õhk	0,026	-
Argoon	0,018	10
Krüptoon	0,0095	300
Ksenoon	0,0055	11000

Üldiselt kasutatakse klaaspakettide täitmiseks argooni just selle hinna tõttu, aga kui on vaja saavutada kitsama profiili ja väiksema soojusjuhtivusega akent, tuleb eelistada kallimat krüptooni [7]. Ksenooni kasutatakse väga harva vaid erijuhtude või teaduslike uuringute korral. Gaasi lekkemäär aastas on vastavalt normile 1% kogusest [35].

Akende paigaldamisel on samuti tähtis osa sellel, kuidas aken tulevikus toimima hakkab. Oskamatu paigaldamisega on võimalik akendest lähtuv teoreetiline kasu ära nullida, seega tuleb need lasta paigaldada professionaalide poolt. Akende transpordi ja paigalduse maksumuseks arvestatakse 10% akende hinnast [40], kuigi see võib firmati erineda.

2.9 Klaaspakettide tulevik

Praegusel ajal on veel standardiks paigaldada kahekihilisi klaaspaketiga aknaid, kuid energiasäästu silmas pidades tuleb eelistada kolmekihilisi pakette, kuna need juhivad soojust vähem kui ühe- või kahekihilise paketiga aknad. Võimalik on toota ka üle kolme kihiga klaaspakette, kuid need on oma kaalu, suuruse ja hinna tõttu üsna ebapraktilised [7] ning praegustele ja lähituleviku standarditele ja ootustele vastavad ka kolmekihilised klaaspaketid.

Et akende kaal ei tõuseks, hind oleks mõistlik ning energiasääst suureneks, tehakse pidevalt tööd veel paremate omadustega akende väljatöötamiseks. Välja on pakutud aerogeeliga täidetud klaaspaketid, inertgaasi asendamine vaakumiga, faasi muutvate materjalide kasutamine jms [7], kuid selliste tehnoloogiatega aknad ei ole veel oma kalli omahinna ning keerulise tootmistehnoloogia tõttu turustamiseks kõlblikud.

Lisaks hoones kuluva soojusenergia säästule ning soojusmugavuse tõusule on paremate akende kasutamisel kasu ka loodusele. Kuna üle poole soojakadudest lähtub akendest, on neil väga suur mõju hoonete küttevajadusele ja energiabilansile. Seega on lisaks maja elanikele ka keskkonnale kasulikum kvaliteetsete energiatõhusate akende tootmine ja kasutamine [41].

2.10 Aknaraam

Nii nagu klaaspakett, on ka raam energiasäästu seisukohast oluline. Üldiselt juhivad raamid soojust paremini kui klaaspaketid, kuid nende pindala on (olenevalt aknast) palju väiksem, seega ei mõjuta need maja energiabilanssi nii palju kui klaaspaketi omadused. Seejuures tuleb arvestada, et mida väiksem on aken, seda suurem osakaal on raamil.

Mittemetallraamide soojusjuhtivuslikud omadused on paremad kui metallraamidil ning seetõttu peaks energiasäästu silmas pidades kasutama just neid [7]. Praeguse aja kõige energiasäästlikumaks raamiks loetakse isoleeritud klaaskiust aknaraami, mille $U_f=0,26$ W/m²K [42].

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1 Maja

Töö põhineb energiatõhusal majal, mis valmis 2013. aastal ning asub Tartu lähedal Ülenurme vallas Õssu külas. Kõetavat pinda on 151,7 m², majakarp vastab B energiaklassi [43] hoonele.

Maja arhitekti abiga koostati originaaljoonisele lisaks veel neli alternatiivset vaadet hoone lõunapoolsest küljest, millel muudeti akende pindala ning nende hulka nii, et kahel variandil oleks aknaid vähem ja kahel rohkem ning need projektid oleks reaalselt teostatavad ja majad ehitatavad.

Päikse soojuskiirguse maksimaalseks kasutamiseks asuvad energiatõhusate majade aknad enamuses hoone lõunaküljel, varjulistel külgedel asuvaid aknaid on väga vähe ning need on mõõtmetelt väiksed. Seetõttu muudeti alternatiivsete välisplaanide koostamisel ainult lõunaküljel paiknevate akende pindala ning hulka, kuna neil on hoone energiabilansile oluline mõju. Maja muud parameetrid ning teiste külgede akende paigutus ja pindala jäid samaks. Maja põhja-, ida- ja lääne-poolsetel külgedel on kokku 7,91 m² aknaid.

Erinevate lõunaküljevaadete illustreerimiseks koostati joonised programmiga ArchiCad. Järgnevalt on ära toodud kõikide variantide pildid lõunafassaadist.



Joonis 6. Variant 1, lõunaküljel 50,91 m² aknaid.



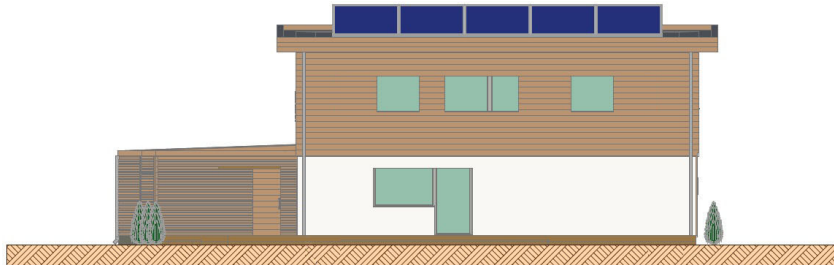
Joonis 7. Variant 2, lõunaküljel 36,85 m² aknaid.



Joonis 8. Variant 3, lõunaküljel 31,57 m² aknaid. Maja, millel töö põhineb.



Joonis 9. Variant 4, lõunaküljel 18,60 m² aknaid.



Joonis 10. Variant 5, lõunaküljel 11,80 m² aknaid.

3.2 Aknad

Töösse valiti klaaspaketid, mille U-arv varieeruks 0,4 kuni 0,7 W/m²K vahel ning g-arv 0,4 kuni 0,7 vahel või nendele väärtustele lähim võimalik variant. Nende parameetritega paketid on sobilikud energiatõhusas majas kasutamiseks ning hetkel toodetavate klaaspakettide tippfase.

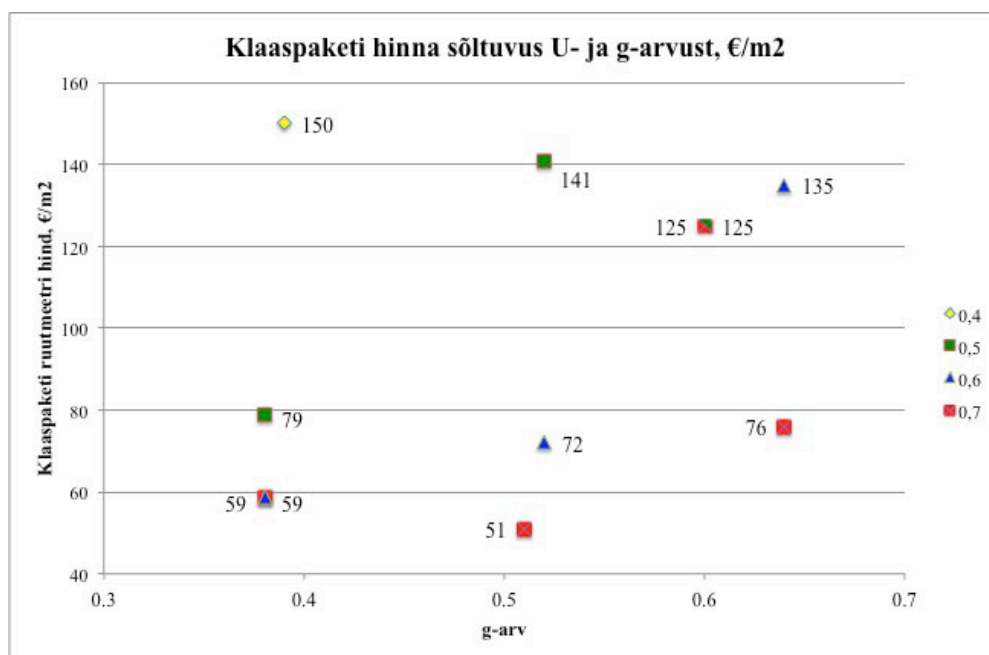
Hinnapäring klaaspakettide kohta saadeti Saint Gobain Glass Estonia SE-le, kuna antud ettevõtte on Eesti (ja maailma) üks juhtivaid klaaspakettide tootjaid ning nende poolt pakutav tarkvara tegi sobilike pakettide valimise väga lihtsaks. Kõik hinnapakkumised on seisuga 12.05.2015, kajastamaks võimalikult värsket seisut, mitte mõne kuu tagust olukorda. Saint Gobain arvestab klaaspaketi elueaks kuni 30 aastat [38].

Esialgu plaaniti töösse võtta 16 erinevate parameetriga klaaspaketti (neli erinevat U-arvu korda nelja erineva g-arvuga), kuid seoses Saint Gobain Glass-i teatud tehnoloogiliste ja logistiliste ning üldise klaaspakettide füüsikaliste eripärade tõttu ei ole võimalik realselt kõiki paberil kirja pandud pakette toota. Seega viidi analüüs läbi 11 erinevate parameetritega

klaaspakettidega. Tabelis 2 tärniga tähistatud klaaspakettide hinnad peavad paika eeldusel, et vastavad klaasid oleks Tartu tehase laos olemas. Hetkel need sealt puuduvad ning vastavate akende tellimise soovi korral lisanduks nendele hindadele ka suuremad transpordikulud.

Tabel 2. Töös kasutatavate klaaspakettide kirjeldus ja hind m² kohta.

Jrk nr	Klaas	Kattekiht	Gaas	Profiil, mm	U, W/m ² K	g	Hind, €/m ²
1	Diamant	Planitherm ONE	Kr 90%	4-16-6-16-4	0,4	0,39	150
2	Diamant	Planitherm ONE	Ar 90%	6-16-6-16-6	0,5	0,38	79
3	Planiclear	Planitherm XN	Kr 90%	6-14-8-14-6	0,5	0,52	141
4*	Diamant	Planitherm MAX	Ar 90%	4-20-4-20-4	0,5	0,60	125
5	Planiclear	Planitherm ONE	Ar 90%	4-14-4-14-4	0,6	0,38	59
6	Planiclear	Planitherm XN	Ar 90%	6-14-8-14-6	0,6	0,52	72
7*	Diamant	Planitherm LUX	Kr 90%	3-12-4-12-3	0,6	0,64	135
8	Planiclear	Planitherm ONE	Ar 90%	4-12-4-12-4	0,7	0,38	59
9	Planiclear	Planitherm XN	Ar 90%	4-12-4-12-4	0,7	0,51	51
10*	Diamant	Planitherm MAX	Ar 90%	4-14-4-14-4	0,7	0,60	125
11*	Diamant	Planitherm LUX	Ar 90%	4-14-4-14-4	0,7	0,64	76



Joonis 11. Klaaspaketi hinna sõltuvus U- ja g-arvust. Legendis on kirjas klaaspaketi U-arv, g-arv on kirjas x-teljel.

Antud töösse ei kaasatud erinevate parameetritega raame, vaid kasutati ettevõtte SmartWin poolt pakutavat raami, mis on ennast energiatõhususe poolest tõestanud ($U_f=0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$) ning kasutusel enamustel Eestis ehitatud energiatõhusatel hoonetel. SmartWin toodab puit-alumiinium süvispaigaldatavat raami, mis omab passiivmajale sobiliku komponendi sertifikaat [44].

3.3 Programmid

Erinevate lõunakülgede ja klaaspakettidega majade kohta viidi läbi energiaarvutused kasutades Passive House Institute'i poolt loodud Exceli-põhist programmi Passive House Planning Package (PHPP) 8 [45], mis põhineb standardis EVS-EN ISO 13790:2008 [46] kirjeldatud meetoditel. Sinna on sisestatud täpsed andmed maja välispiirde, akende, asukoha, kütte- ja jahutussüsteemide, varjutustingimuste jm kohta.

Kokku hoitud soojusenergia maksumus arvutati Certified Passive House Designer (CEPH) poolt loodud passiivmajatehnoloogia infomaterjali tasuvusarvutuse jaoks tehtud Exceli-põhise arvutustabeli abil [47]. Selle abil leiti kokku hoitava energiaühiku ekvivalentmaksumus. Arvutused viidi läbi diskonteeritult ehk arvestati raha väärtuse muutumist ajas, inflatsioonist puhastatud intressi väärtuseks oli 3%.

Klaaspaketid koostati programmiga Calumen II, mis on loodud ettevõtte Saint Gobain Glass poolt ning võimaldab kokku panna nende pakutavad erinevatest klaasidest kliendile sobivad klaaspaketid.

Maja erinevate lõunaküljekavandite loodi programmiga Archicad 18.0.0.

4. TULEMUSED JA ARUTELU

Maja lõunakülje mõõtmed on 12,61 x 6,79 m ja pindala seega 85,6 m². Kõikide majade lõunaküljel paiknevate akende pindalad ja osakaal maja lõunaküljest on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Erinevate variantide lõunakülgedel asuvate akende ja klaasi pindala ning akende osakaal maja lõunakülje pindalast.

Variant	Akna pindala lõunaküljel, m ²	Klaaspaketi pindala aknast, m ²	Akna pindala lõunaküljest, %
1	50,91	42,40	60
2	36,85	29,80	43
3	31,57	25,30	37
4	18,60	15,10	22
5	11,80	9,10	14

Eestis maksab gaasiga kütmisel üks kWh 0,06 eurot [48]. 18.05.2015 seisuga maksab elektribörsi Nord Pool Spot järgi üks MWh elektrienergiat 25 eurot. Arvestades maksude, aktsiiside ja muude lisanduvate kuludega, võib ühe kWh elektrienergia hinnaks lugeda 0,02532 eurot [49], [50]. Kuna Eestis on avatud elektriturg, muutub selle hind pidevalt ning olenevalt asjaoludest on muutustevahemik üpris suur.

Võttes arvesse, et passiivmaja maksimaalne kütteenergia netovajadus on 15 kWh/m²a ja antud maja sisepindala on 151,7 m², võib maja küttevajadus olla kuni 2275 kWh/a, et seda saaks pidada passiivmajaks.

4.1 Variant 1

Tabelis 4 on kirjas maja variant 1 akende hinnad kõikide klaaspakettide korral. Vaatluse all olevatest akna pindalaga hoonetest on variant 1 kõige kallimad aknad. Asjaolu on tingitud sellest, et akende pindala on võrreldes teiste variantidega kõige suurem. Kõige kallimad aknad maksavad 28 804 eurot ning kõige odavamad 24 464 eurot.

Tabel 4. Variant 1 akende maksumus erinevate klaaspakettide korral.

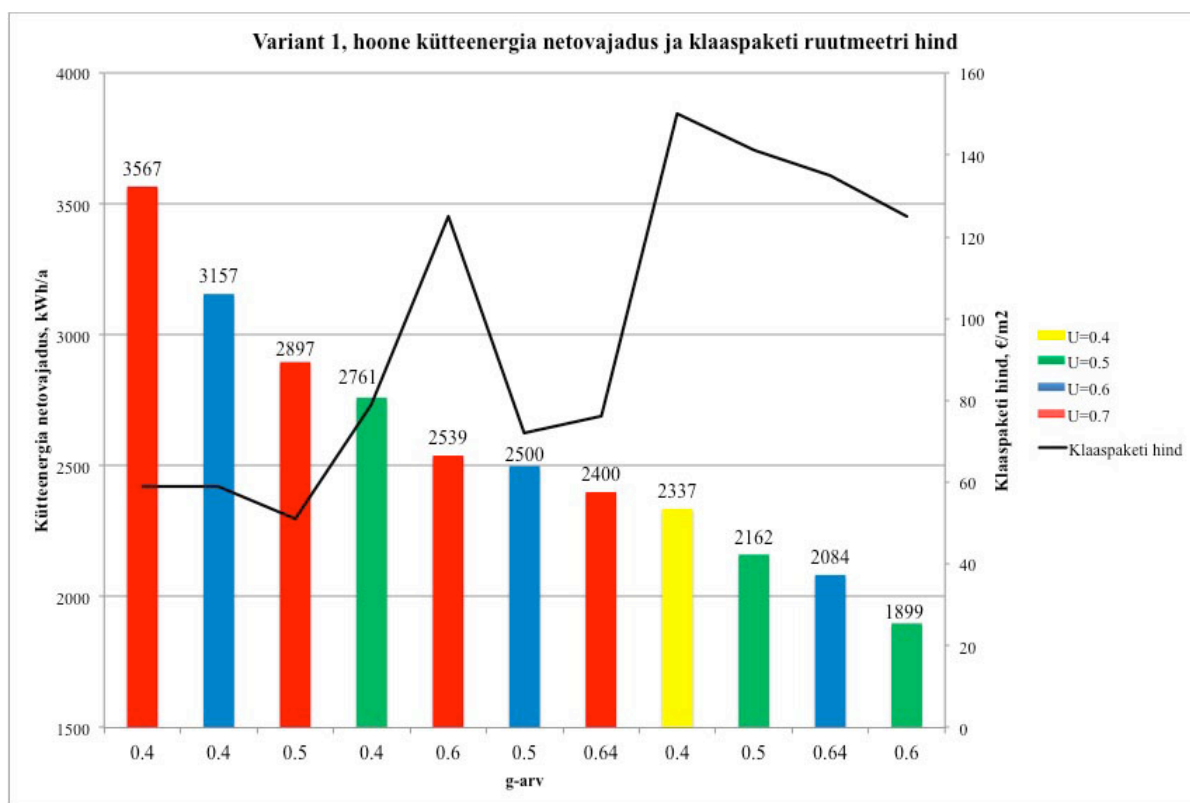
Jrk nr	U, W/m ² K	g	Raami hind, €	Klaaspaketi hind, €	Akna hind kokku, €
1	0,4	0,39	21634	7170	28804
2	0,5	0,38		3781	25415
3	0,5	0,52		6758	28392
4	0,5	0,60		5975	27609
5	0,6	0,38		2830	24464
6	0,6	0,52		3456	25090
7	0,6	0,64		6453	28087
8	0,7	0,38		2830	24464
9	0,7	0,51		2433	24067
10	0,7	0,60		5975	27609
11	0,7	0,64		3776	25410

Kütteenergia netovajaduse sõltuvus klaaspaketi ruutmeetri hinnast on toodud joonisel 12. Kõige rohkemate akendega maja küttevajadus jäi erinevate klaaspakettide korral 3567 kWh/a ja 1899 kWh/a vahele, seega on vahe pea 1,9-kordne.

Töös siin ja edaspidi tulevatel graafikutel tähistavad erinevat värvi tulbad klaaspakettide erinevaid U-arvusid. x-teljel on toodud vastavate U-arvudega klaaspakettide g-arvud.

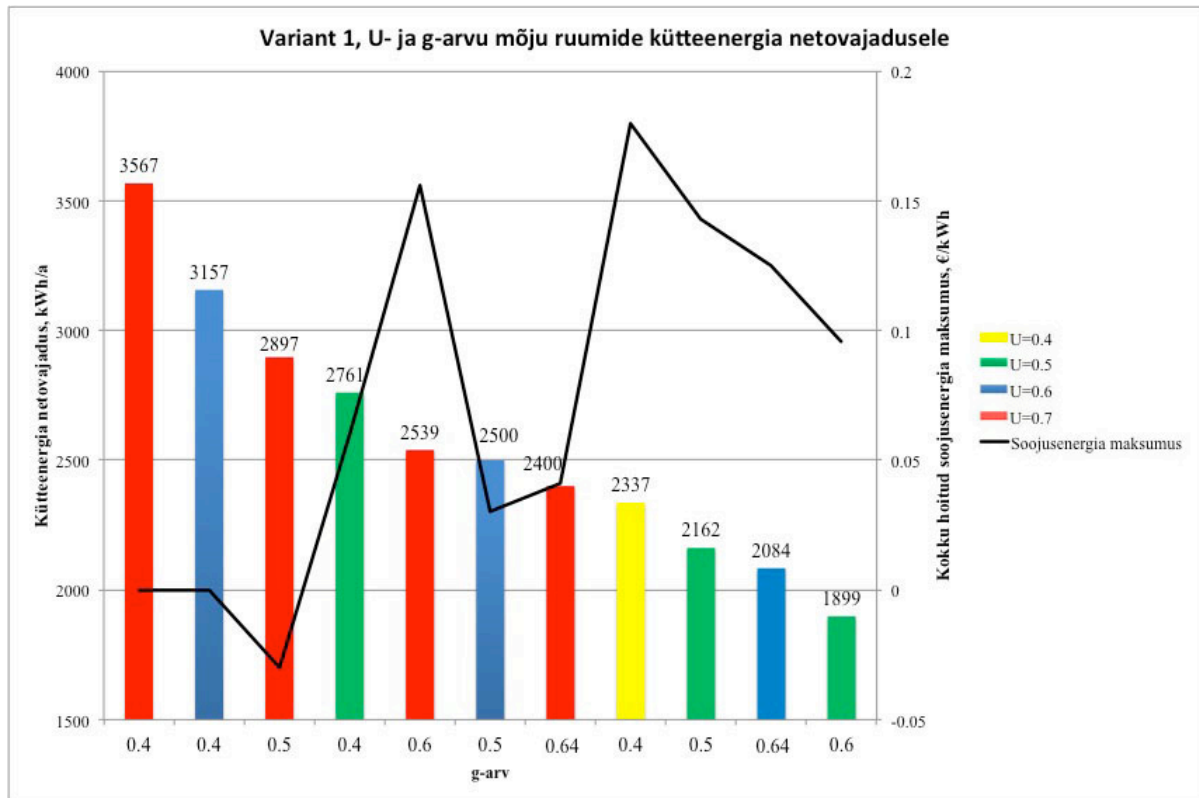
Joonistelt 12 ja 13 on näha, et selgelt paremini ja kütteenergiäsäästlikumalt käituvad klaaspaketid, mille g-arv on suurem ehk lasevad rohkem päikseenergiat tuppa. Seega mida

rohkem päikseenergiat tuleb läbi klaasi, seda väiksem on küttevajadus. Energiatõhusate majade korral ei mängi akna soojusjuhtivus esmast rolli. Juhul, kui kasutusel on klaaspakett, mille $U=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,4$, kulub kütteenergiaks 2337 kWh/a. Samas klaaspaketi, mille $U=0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, kuid $g=0,5$ korral on kütteks kuluvat energiat vaja 2162 kWh/a. Seega on g -arvul suurem mõju hoone küttevajadusele kui U -arvul. Pigem võib aken rohkem soojust seest välja juhtida, aga kui läbi sama akna siseneb tuppa rohkem päikeenergiat, on see ikkagi energeetiliselt kasulik. Lisaks on antud kahe näite puhul odavam see variant, mille kasutamise korral on hoone kütteenergiavajadus väiksem. Seega on nii alginvesteering kui ka edasised küttearved väiksemad.



Joonis 12. Variant 1 kütteenergia netovajadus ja klaaspaketi ruutmeetri hind.

Kui arvestada, et passiivmaja nõuete täitmiseks võib antud hoone netoküttevajadusele olla kuni 2275 kWh/a, siis antud variandi korral on see nõue täidetud vaid kolme kõige parema klaaspaketi kasutamisel. Teistel juhtudel on antud väärtus liiga kõrge ning nende klaaspakettide kasutamisel ei saaks antud maja liigitada passiivmajaks.



Joonis 13. Variant 1 kütteenergia netovajadus ja kokku hoitud soojusenergia hind.

4.2 Variant 2

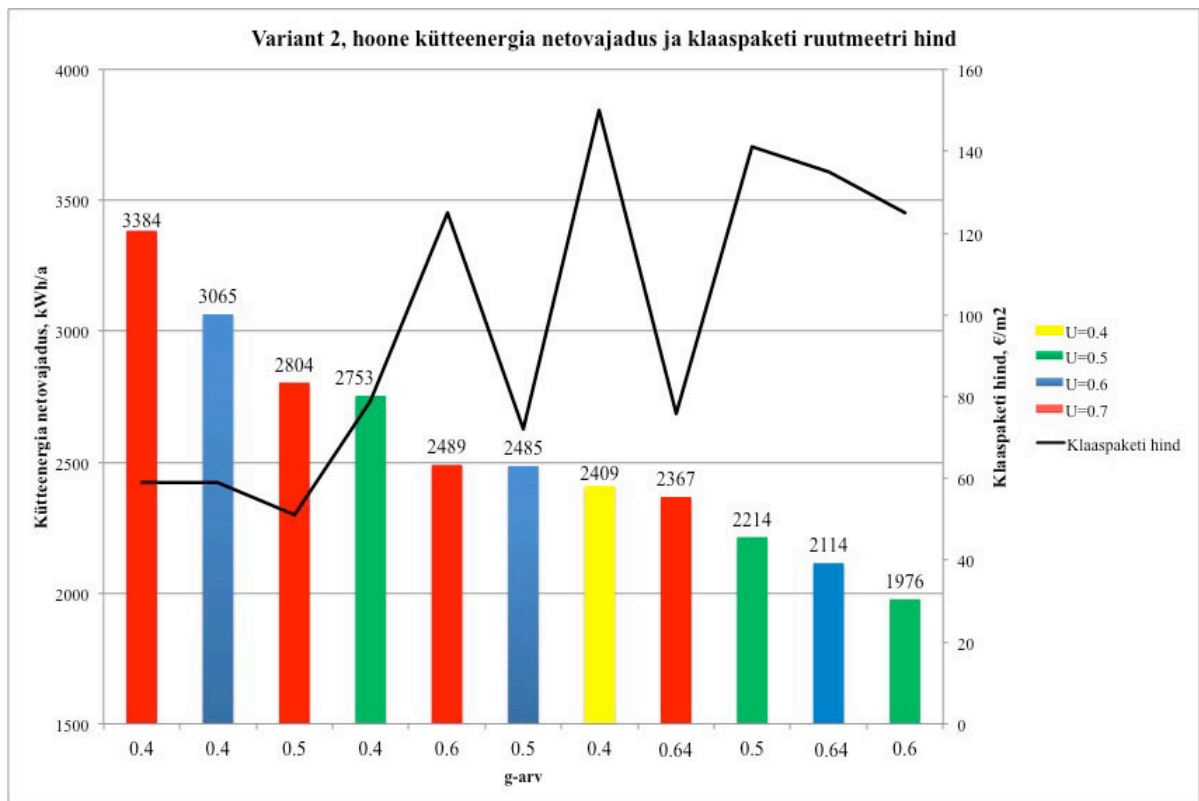
Tabelis 5 on kirjas variant 2 akende hinnad erinevate klaaspakettide korral. Kõige kallimad aknad maksavad 22738 eurot ning kõige odavamad 19281 eurot.

Tabel 5. Variant 2 akende maksumus erinevate klaaspakettide korral.

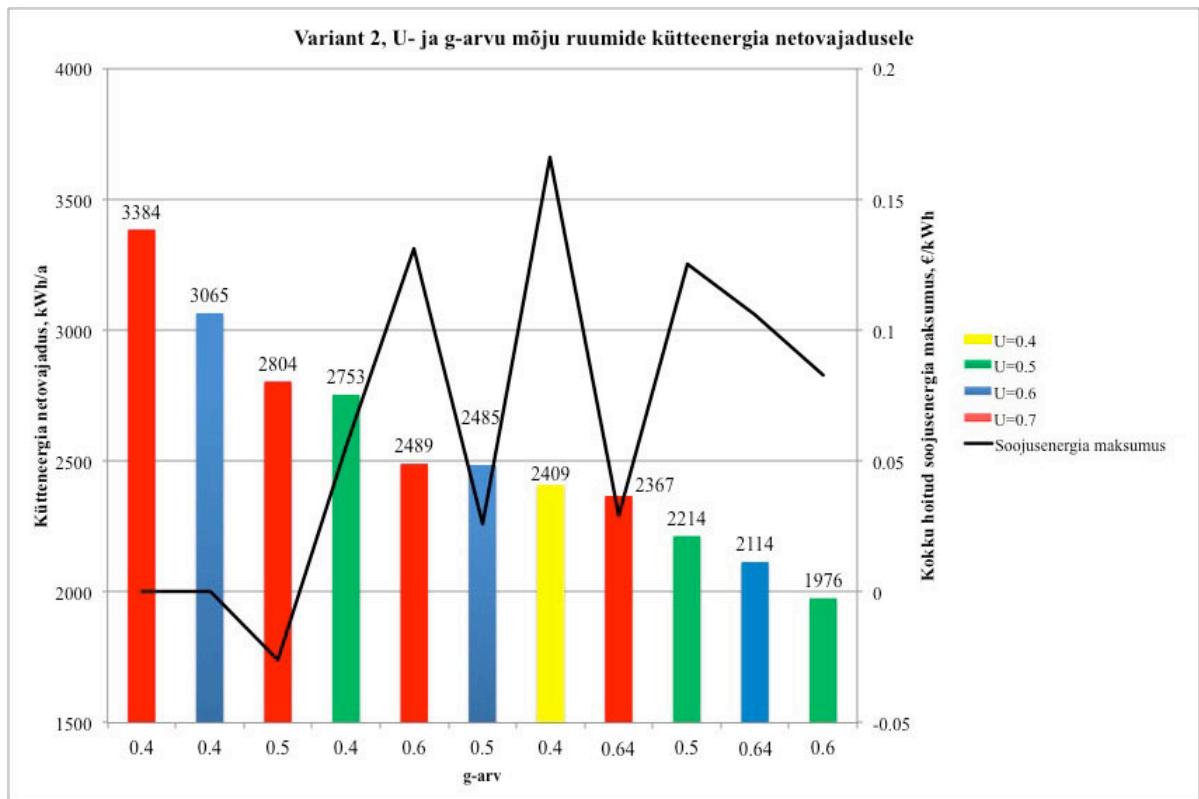
Jrk nr	U, W/m ² K	g	Raami hind, €	Klaaspaketi hind, €	Akna hind kokku, €
1	0,4	0,39	17506	5232	22738
2	0,5	0,38		2759	20265
3	0,5	0,52		4932	22438
4	0,5	0,60		4360	21866
5	0,6	0,38		2065	19571
6	0,6	0,52		2522	20028
7	0,6	0,64		4709	22215
8	0,7	0,38		2065	19571
9	0,7	0,51		1775	19281
10	0,7	0,60		4360	21866
11	0,7	0,64		2651	20157

Joonisel 14 on näha, et erinevate klaaspakettide kasutamise korral on vahe kütteenergiavajaduses märkimisväärne - kõige kehvema variandi korral 3384 kWh/a ning kõige parema korral 1976 kWh/a, erinevus 1408 kWh/a. Nende kahe klaaspaketi hinnaerinevus on 2295 eurot. Seega tehes 2295 euro suuruse lisainvesteeringu, on võimalik aastas võita kuni 1408 kWh energiat. Ühe ruutmeetri kütava pinna kohta on võimalik säästa 9,3 kWh/m²a, mis on väga palju, arvestades, et passiivmaja kütteenergia netovajadus on maksimaalselt 15 kWh/m²a.

Joonistelt 14 ja 15 on näha, et sarnaselt variandile 1 on 2275 kWh/a nõue täidetud kolme kõige parema klaaspaketi kasutamise korral.



Joonis 14. Variant 2 kütteenergia netovajadus ja klaaspaketi ruutmeetri hind.



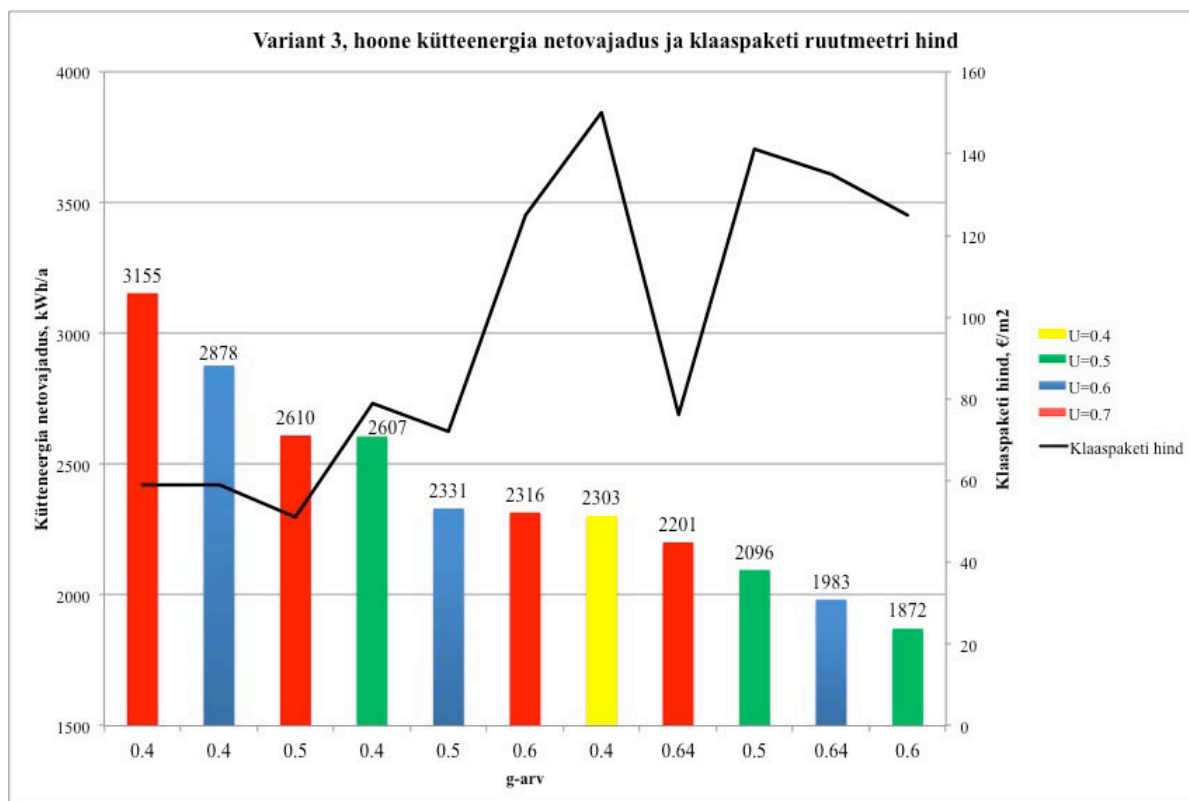
Joonis 15. Variant 2 kütteenergia netovajadus ja kokku hoitud soojusenergia hind.

4.3 Variant 3

Tabelis 6 on kirjas variant 3 akende hinnad kõikide klaaspakettide korral. Kõige kallimad aknad maksavad 20541 eurot ning kõige odavamad 17518 eurot.

Tabel 6. Variant 3 akende maksumus erinevate klaaspakettide korral.

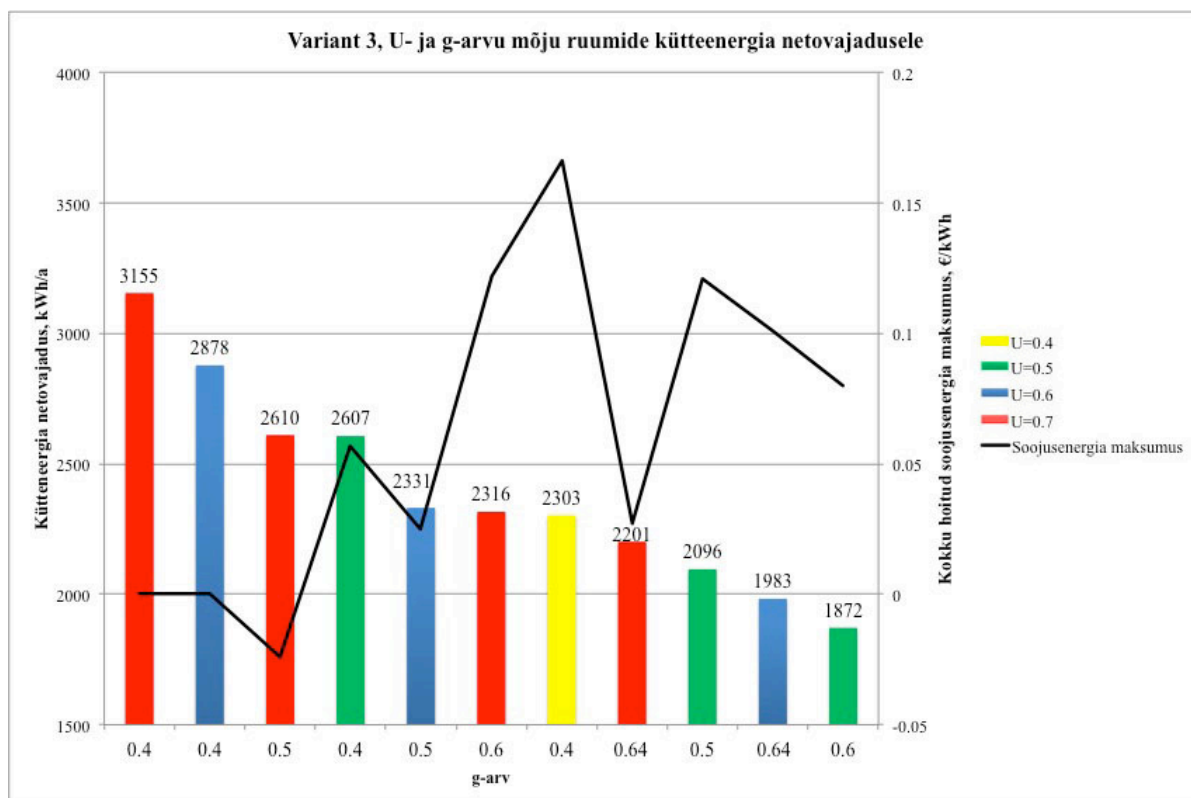
Jrk nr	U, W/m ² K	g	Raami hind, €	Klaaspaketi hind, €	Akna hind kokku, €
1	0,4	0,39	15965	4576	20541
2	0,5	0,38		2413	18378
3	0,5	0,52		4313	20278
4	0,5	0,60		3813	19778
5	0,6	0,38		1806	17771
6	0,6	0,52		2206	18171
7	0,6	0,64		4119	20084
8	0,7	0,38		1806	17771
9	0,7	0,51		1553	17518
10	0,7	0,60		3813	19778
11	0,7	0,64		2318	18283



Joonis 16. Variant 3 kütteenergia netovajadus ja klaaspaketi ruutmeetri hind.

Variant 3 puhul on passiivmaja netoenergiavajadus täidetud nelja klaaspaketi korral ning napilt jääb nõuete piirist välja paremuselt viies. Võrreldes eelmise kahe majavariandiga, on tegu parema variandiga. Põhjus on tõenäoliselt akende väiksemas pindalas. Esimese kahe puhul võib olla aknaid liiga palju ja energiavajadus kõrgem jahutusele ja ventilatsioonile rohkem kuluva energia tõttu.

Variant 3 puhul on $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,64$ klaaspaketi kasutamine võrreldes seda ümbritsevate ja samaväärseid küttevajadusi pakkuvate klaaspakettide kasutamisega kuni üle kolme korra odavam ühe kWh säästetud soojusenergia kohta.



Joonis 17. Variant 3 kütteenergia netovajadus ja kokku hoitud soojusenergia hind.

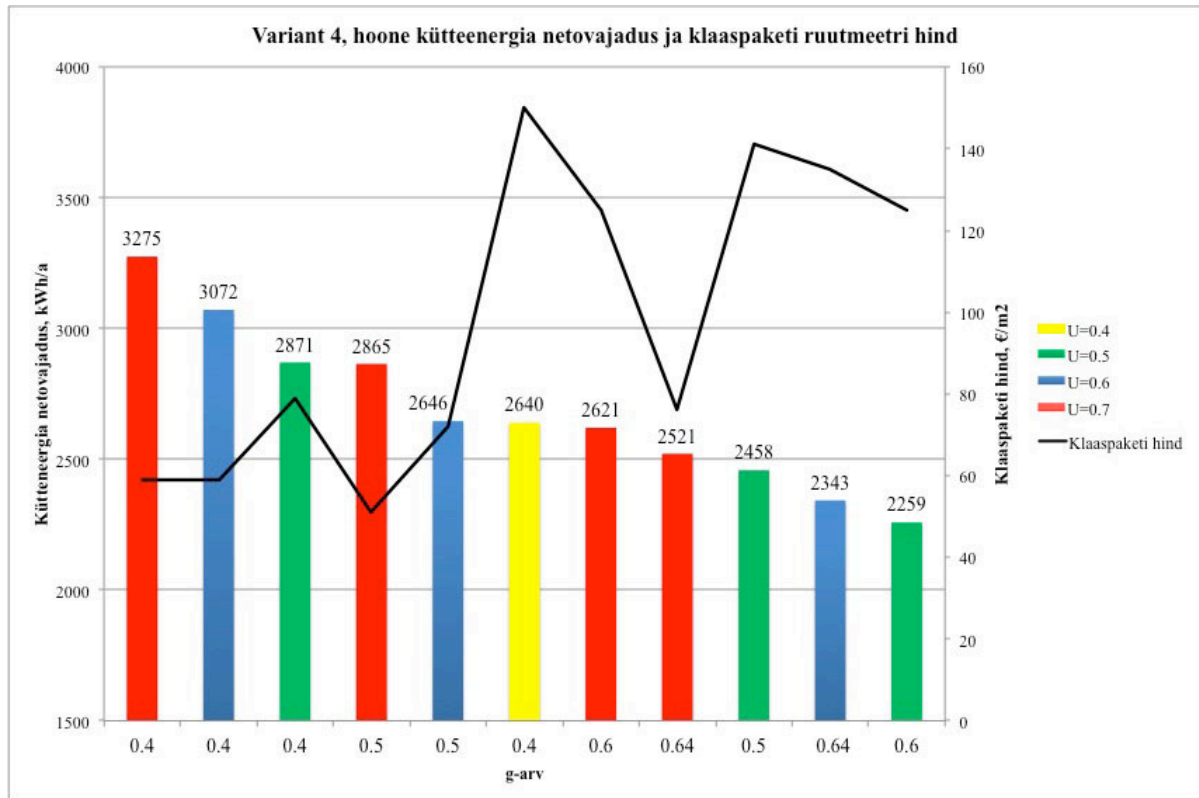
4.4 Variant 4

Tabelis 7 on kirjas variant 4 akende hinnad kõikide klaaspakettide korral. Kõige kallimad aknad maksavad 13 917 eurot ning kõige odavamad 11 881 eurot.

Tabel 7. Variant 4 akende maksumus erinevate klaaspakettide korral.

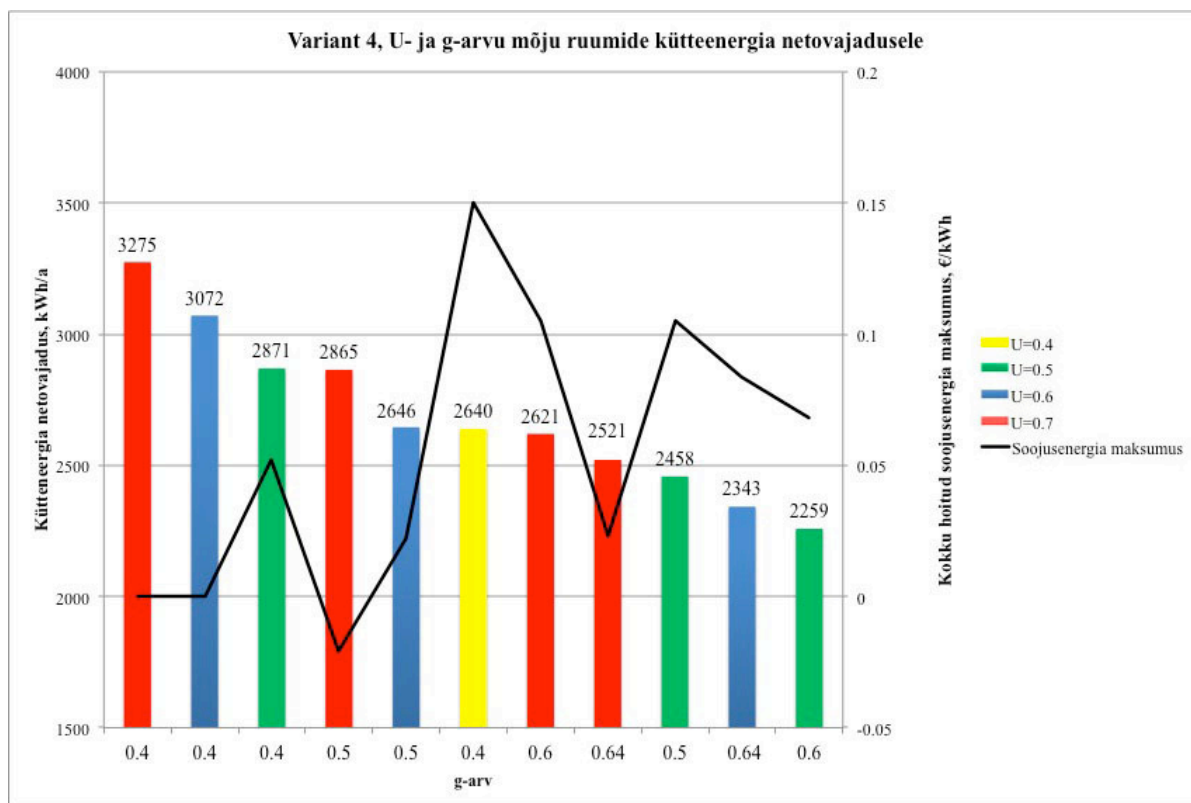
Jrk nr	U, W/m ² K	g	Raami hind, €	Klaaspaketi hind, €	Akna hind kokku, €
1	0,4	0,39	10835	3082	13917
2	0,5	0,38		1625	12460
3	0,5	0,52		2905	13740
4	0,5	0,60		2568	13403
5	0,6	0,38		1216	12051
6	0,6	0,52		1485	12320
7	0,6	0,64		2774	13609
8	0,7	0,38		1216	12051
9	0,7	0,51		1046	11881
10	0,7	0,60		2568	13403
11	0,7	0,64		1561	12396

Variant 4 puhul on passiivmaja 15 kWh/m²a täidetud vaid juhul, kui kasutatakse klaaspaketti, mille U=0,5 W/m²K ning g=0,6. Seega sobib nõude täitmiseks vaid üks klaaspakett.



Joonis 18. Variant 4 kütteenõue netovajadus ja klaaspaketi ruutmeetri hind.

Joonisel 19 nähtavate andmete järgi paistab kõige parem hinna-küttevajaduse suhe olema aknal, mille $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,64$. Juhul, kui passiivmaja netoküttevajaduse nõuet ei järgita, on hinna ja küttevajaduse suhe paremad klaaspakettidel, mille $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,52$ või mille $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,64$. Teiste klaaspakettide korral on saadav kasu väiksem või küttevajadus liialt suur.



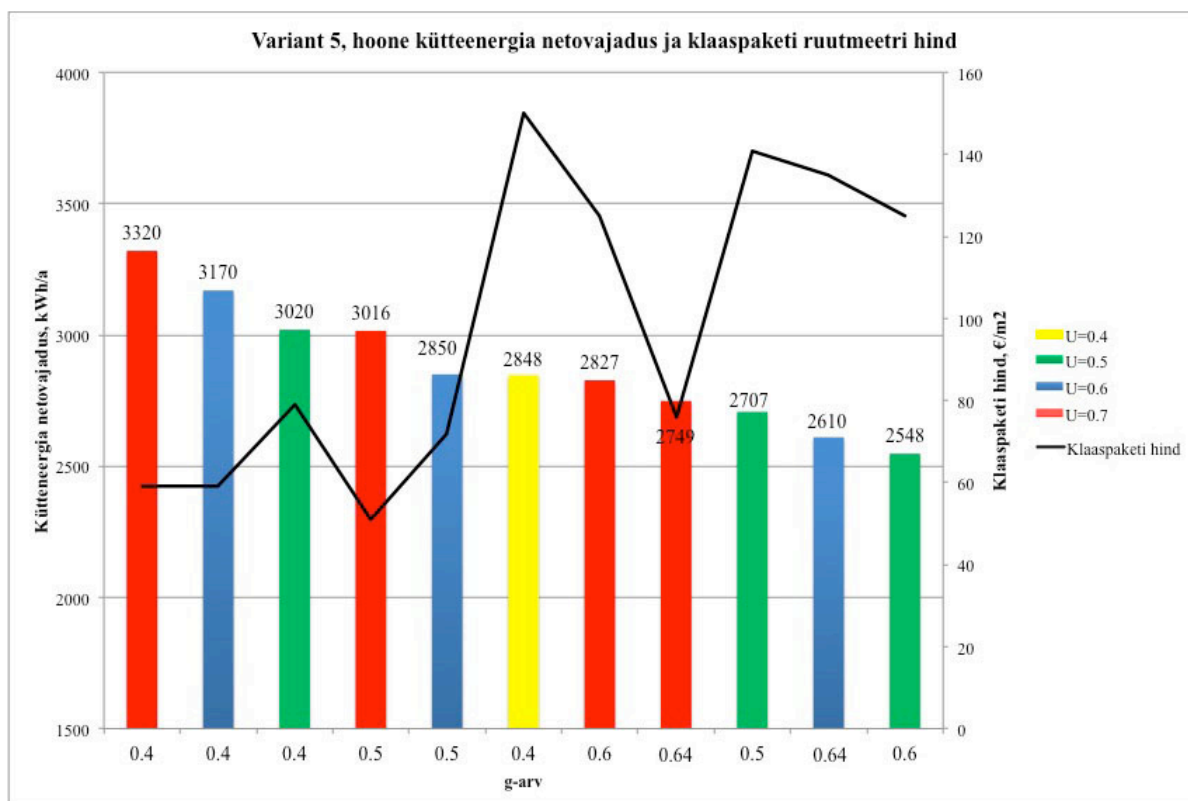
Joonis 19. Variant 4 kütteenergia netovajadus ja kokku hoitud soojusenergia maksumus.

4.5 Variant 5

Tabel 8 järgi maksavad kõige väiksema pindalaga akende korral vastavalt klaaspaketile aknad 10322 kuni 11763 eurot. Lisainvesteering on kuni 1441 eurot.

Tabel 8. Variant 5 akende hinnad erinevate klaaspakettide korral.

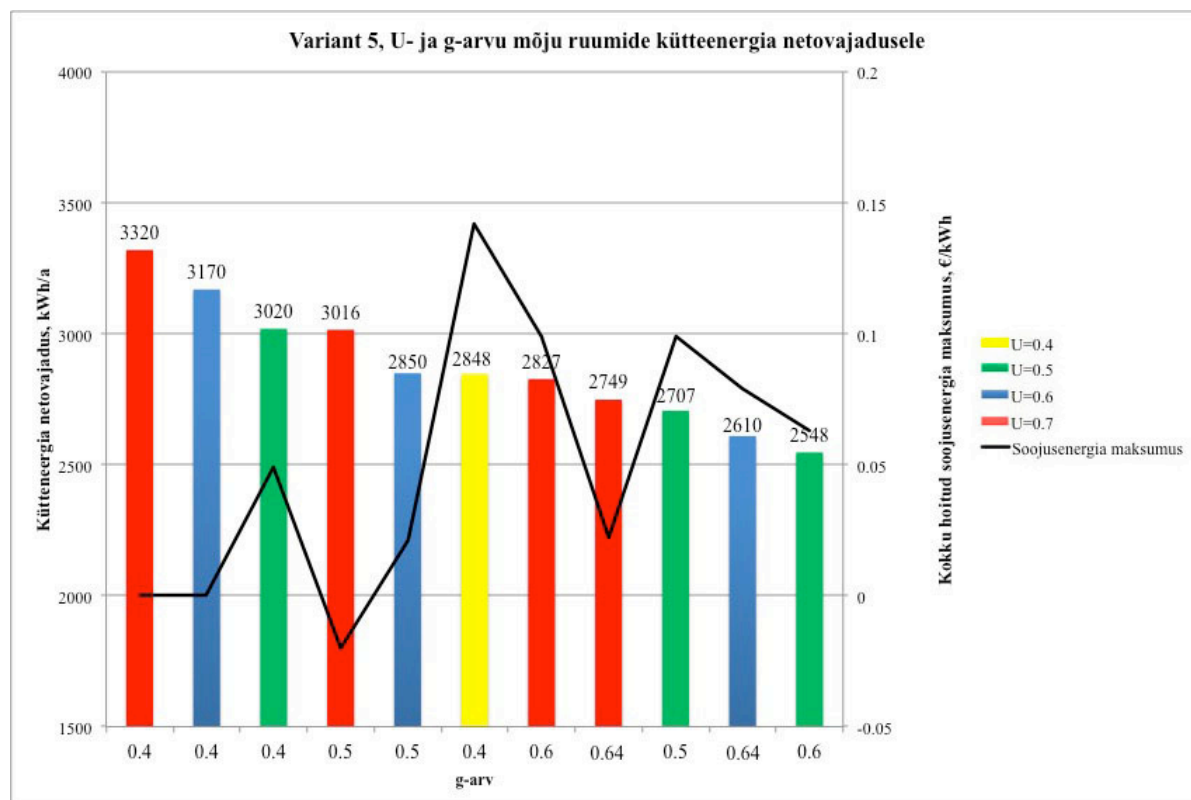
Jrk nr	U, W/m ² K	g	Raami hind, €	Klaaspaketi hind, €	Akna hind kokku, €
1	0,4	0,39	9583	2180	11763
2	0,5	0,38		1149	10732
3	0,5	0,52		2054	11637
4	0,5	0,60		1817	11340
5	0,6	0,38		860	10443
6	0,6	0,52		1050	10633
7	0,6	0,64		1962	11545
8	0,7	0,38		860	10443
9	0,7	0,51		739	10322
10	0,7	0,60		1817	11340
11	0,7	0,64		1104	10687



Joonis 20. Variant 5 kütteenenergia netovajadus ja klaaspaketi ruutmeetri hind.

Joonisel 21 on näha, et klaaspakett, mille $U=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ on keskmiste hulgas (kuid võrreldes pakettidega, mille $g=0,4$, siis see on siiski kõige energiasäästlikum; vahe 170-470 kWh/a). Kuna akende pindala on väiksem, on soojusjuhtivusel selle võrra jälle väiksem mõju kütteenergiavajadusele ja enam mõjutab seda klaasi g -arv.

Lisaks ei piisa nii väiksest aknapindalast, et täita passiivmaja $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nõue hoone netoküttevajaduse kohta ja seega ei ole nii väheste akendega lõunafassaad passiivmajale sobilik. Ka ei aitaks suurel määral antud juhul olukord, kui suurendataks hoone teistel külgedel akna pindala, kuna neilt külgelt ei piisa päiksekiirgusest, et akende energiabilanss oleks positiivne.



Joonis 21. Variant 5 kütteenergia netovajadus ja kokku hoitud soojusenergia maksumus.

Üldiselt saab kõikide majavariantide kohta kokkuvõtvalt öelda, et energiatõhusate majade korral on pigem tark valida aken, mille g -arv on suurem ja kaotada natuke soojusjuhtivuses, kui püüelda maksimaalse soojapidavuse poole ja seeläbi ohverdada akent läbiva soojuskiirguse hulka. Antud aknad on niigi kvaliteetsed ning neist lähtuv natuke suurem soojakadu ei kaalu üles olukorda, kus aken küll on madala soojusjuhtivusega, kuid samas ei lase piisaval määral päiksesoojuskiirgust tuppa ning tuleb puudujääv kütteenergiavajadus muude vahenditega rahuldada. Lisaks on tulemustest näha, et mida väiksem on akende pindala, seda väiksem on nende mõju maja kütteenergia netovajadusele.

Kõikide töösse kaasatud klaaspakettide puhul eksisteerib üks pakett ($U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,51$), mille iga säästetud kWh energiat on odavam kui baasvariandil. See tuleneb konkreetse paketi odavamast hinnast ning ainult sellele argumendile toetudes ei tohiks vaid seda konkreetset klaaspaketti teistele eelistada. Üldiselt paistab hea hinna ja energiasäästu suhtega silma klaaspakett, mille $U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,64$. Võib lisada, et väikse g -arvuga klaaspaketi korral pole mõtet lisakulutusi (nt gaasi osas, asendades argoon krüptoniga) teha, et saavutada väiksem soojusjuhtivus. Kasulik on kaotada natuke soojusjuhtivuses ja võita läbi akna sisenevas päiksekiirguse hulgas kui vastupidi.

Ka selgus tulemustest, et kuigi kirjanduse järgi on optimaalne akna-seina pindala suhe 20-30% [18], on antud töös käsitletud majavariantide puhul kõige energiatõhusam ja kõige tolerantsem erinevate parameetritega klaaspakettide suhtes variant 3, mille lõunaküljest moodustavad aknad 37%. Seega on 20-30% aknapindala pigem soovitus ja häid tulemusi energiabilansi ja küttevajaduse osas on võimalik saavutada ka suurema pindalasuhte korral. Siiski tuleb meeles pidada, et suuremal aknapindalal on maja kütte- ja jahutusvajadusele suurem mõju kui väiksel aknapindalal.

Kõikide majavariantide puhul on kõige väiksemad kütteenergia netovajadused akende puhul, mille klaaspakettide parameetrid on

- $U=0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,52$
- $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,64$
- $U=0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $g=0,60$.

5. KOKKUVÕTE

Hoonete energiatõhusus tuleb iga aastaga järjest enam teemakorda. Juba viie aasta pärast, aastal 2020 peavad Euroopa Liidu direktiivi järgi kõik ehitatavad ja olulisel määral rekonstrueeritavad hooned olema liginullenergiatarbega. Selle eesmärgi saavutamiseks tuleb tegutsema hakata juba varem.

Kuni 60% hoonete soojakadudest põhjustavad aknad. Neil on suur roll hoone energabilansi kujunemisel, akendest võib väga palju soojusenergiat kaotsi minna, kuid neid on võimalik kasutada ka hoone passiivseks kütmiseks. Lisaks mõjutavad aknad inimeste soojuslikku mugavust ja üldist heaolu hoones viibides. Seega on akandel hoonetele ja seal viibivatele inimestele väga suur mõju ning hoone energiasäästlikuks muutmisel on aknad väga suure potentsiaaliga.

Antud töö eesmärgiks oli uurida akende suuruse ja tehniliste parameetrite varieerimise mõju energiatõhusa maja kütteenergia netovajadusele. Töö käigus koostati viis lõunaküljel asetsevate akende erinevate pindaladega hoone mudelit ja küsiti hinnapakumised Saint Gobain Glass-st (kokku üheteistkümnele erinevate parameetritega klaaspaketile; U-arv varieerub vahemikus 0,4...0,7 W/ m²K ja g-arv 0,4...0,7). Erinevate majade ja klaaspakettide andmed sisestati hoonete energiatõhususe arvutamiseks Passive House Institute-i poolt välja töötatud Passive House Planning Package 8 arvutustabelisse.

Saadud tulemustest selgus, et energiatõhusa maja kütteenergia netovajadusele on suurem mõju akna g-arvul, mis näitab, mitu protsenti päiksekiirgusest läbib klaaspaketti ja siseneb hoonesse. Klaaspaketi U-arv, mis näitab selle soojusjuhtivust (mõõtühik W/m²K), ei mõjuta kütteenergiavajadust nii olulisel määral kui seda tegi g-arv. Võrreldes baasvariandiga, mille puhul kütteenergiavajadus on kõige suurem, on energiasäästlikumate akende lisainvesteeringu suurus akende eluea jooksul kuni 0,15 €/kWh. Samas peab arvestama, et lisainvesteering on ühekordne, kuid kasu saadakse igal aastal ja igal korral, kui Päike paistab.

6. KASUTATUD ALLIKAD

- [1] M. Ryghaug, K. H. Sørensen, “How energy efficiency fails in the building industry,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 3, pp. 984–991, 2009.
- [2] G. C. Bakos, “Insulation protection studies for energy saving in residential and tertiary sector,” *Energy Build.*, vol. 31, no. 3, pp. 251–259, 2000.
- [3] M. Karavassili, “Towards a Sustainable Housing Policy in Greece - Achieving Environmental and Energy Efficiency in Buildings and Settlements,” Kavala, Kreeka, 1998.
- [4] R. M. Pulselli, E. Simoncini, N. Marchettini, “Energy and energy based cost–benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 5, pp. 920–928, 2009.
- [5] Euroopa Liit, “EU Transport in Figures. Statistical Pocketbook 2014,” Luxemburg, 2014.
- [6] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, “Hoonete energiatõhusus.” [Online]. <https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus/hoonete-energiatohusus>. [11.05.2015].
- [7] E. Cuce, S. B. Riffat, “A state-of-the-art review on innovative glazing technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 695–714, 2015.
- [8] “Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/13/EL, hoonete energiatõhususe kohta.” [Online]. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32010L0031>. [26.03.2015].
- [9] Vabariigi Valitsus, *Energiatõhususe miinimumnõuded*. Eesti, 2015.

- [10] Passive House Institute, “Nõuded passiivmajale.” [Online]. http://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm. [07.05.2015].
- [11] Active through Passive!, “Energiatõhusate hoonete kavandamine,” *Jätkusuutliku ja madala energiatarbega hoonete ja rajatiste kasutamise arendamine Lätis ja Eestis*, pp. 1–24.
- [12] S. Grynning, A. Gustavsen, B. Time, B. P. Jelle, “Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 185–192, 2013.
- [13] Estonica, “Eestimaa kliima.” [Online]. http://www.estonica.org/et/Loodus/Asend_ja_looduslikud_tingimused/Kliima/. [17.05.2015].
- [14] T. Kalamees, “Ehitusfüüsika seos hoone energiatõhususega.”, Tallinna Tehnika Ülikool.
- [15] K. Ingermann, J. Rustamova, “Hoonete soojustarbe planeerimine ja prognoosimine.”
- [16] M. Numan, F. Almaziad, W. Al-Khaja, “Architectural and urban design potentials for residential building energy saving in the Gulf region,” *Appl. Energy*, vol. 64, no. 1–4, pp. 401–410, 1999.
- [17] U. T. Aksoy, M. Inalli, “Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 12, pp. 1742–1754, 2006.
- [18] L. Vanhoutteghem, S. Svendsen, “Modern insulation requirements change the rules of architectural design in low-energy homes,” *Renew. Energy*, vol. 72, pp. 301–310, 2014.
- [19] K. Rabah, “Development of energy-efficient passive solar building design in Nicosia Cyprus,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 6, pp. 937–956, 2005.

- [20] C. Peng, Y. Huang, Z. Wu, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, 2011.
- [21] M. L. Persson, A. Roos, M. Wall, “Influence of window size on the energy balance of low energy houses,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 3, pp. 181–188, 2006.
- [22] M. Frontczak, P. Wargocki, “Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 4, pp. 922–937, 2011.
- [23] J. Schnieders, A. Hermelink, “CEPHEUS results: measurements and occupants’ satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 2, pp. 151–171, 2006.
- [24] ASHRAE Standard 55-2004, “Thermal environmental conditions for human occupancy,” Atlanta, 2004.
- [25] A. Offiong, A. U. Ukpoho, “An analysis of solar gain through externally shaded window of buildings,” *Renew. Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 131–150, 2004.
- [26] Põltsamaa Ametikool, “Päiksekiirgus. Aastaaegade vaheldumine.”
- [27] Eesti Entsüklopeedia, “Eesti kliima.” [Online]. http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_kliima. [17.05.2015].
- [28] T. M. Kull, “Päikseenergia passiivse kasutamise potentsiaal erineva geomeetria ja komponentidega hoonetel Eesti kliimas.,” Tartu Ülikool, 2013.
- [29] B. P. Jelle, “Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings—Measurement and calculation,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 116, pp. 291–323, 2013.

- [30] Passive House Institute, “Energiatõhususe sertifikaadiga klaaspaketid.” [Online]. http://www.passiv.de/komponentendatenbank/verglasung/sort:u_g/how:asc/max:9999/ [14.05.2015].
- [31] Passive House Institute, “Energiatõhususe sertifikaadiga aknaraamid.” [Online]. http://www.passiv.de/komponentendatenbank/festverglasung/sort:u_w/how:asc/max:9999/ [14.05.2015].
- [32] T. E. Kuhn, “Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady-state laboratory measurements,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 388–402, 2014.
- [33] H. Ye, X. Meng, B. Xu, “Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window,” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 164–172, 2012.
- [34] Building Green, “Reducing heat flow through windows,” 2008.
- [35] Saint Gobain Glass Eesti, “Korduma kippuvad küsimused.” [Online]. <http://glassolutions.ee/kkk>. [16.05.2015].
- [36] H. Manz, U.-P. Menti, “Energy performance of glazings in European climates,” *Renew. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 226–232, 2012.
- [37] Swedish Building Regulation, *The National Board of Housing, Building and Planning (Boverket)*. Rootsi, 1999.
- [38] K. Looga, intervjuu, 05.2015.
- [39] AGA Gaas, hinnapakumine. 17.04.2015.
- [40] A. Kajaste, intervjuu, 03.2015.

- [41] O. Dahlstrøm, “ELEMENTS OF A WOOD-BASED PASSIVE HOUSE Modern highly effective windows,” *Sci. Technol.*, 2010.
- [42] J. Carmody, “High Performance Windows and Facades,” 2007.
- [43] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, *Kaalatud energiaerikasutuse ja energiatõhususarvu määramine*.
- [44] Passive House Institute, “SmartWin raami sertifikaat,” 2015. [Online]. http://www.passiv.de/komponentendatenbank/files/pdf/zertifikate/zd_pro-passivhausfenster_smartwinfix_en.pdf.
- [45] Passive House Institute, “PHPP tutvustus,” 2015. [Online]. http://passivehouse.com/04_phpp/04_phpp.htm. [07.05.2015].
- [46] Eesti Vabariigi standard EVS-EN 13790:2008, Energy performance of building - Calculation of energy use for space heating and cooling.
- [47] Certified European Passive House Designer, *Passiivmajatehnoloogia infomaterjal 2. osa*.
- [48] Ihaste Gaas, “Energiakandjate kütteväärtused ja arvestuslik energiaühiku maksumus.” 2015. [Online]. http://www.ihastegaas.ee/maagaasi_tugevused_vordlus [18.05.2015]
- [49] Nord Pool Spot, Elektrienergia börs. 2015. [Online]. <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/SYS1/Daily/?view=table> [18.05.2015]
- [50] Eesti Gaas, “Elektripaketid.” [Online]. <http://www.gaas.ee/elekter/elektripaketid/> [18.05.2015]

The influence of window size and parameters on building's heating demand

Mårten Haugas

Summary

Energy efficiency of buildings is becoming year after year a more talked about topic. According to the European Union directive by the year 2020 all new buildings have to be near-zero-energy buildings. To accomplish this, action must be taken now.

Up to 60% of a building's energy loss is caused by windows. They have a great impact on building's energy balance - windows can be the source of vast thermal energy loss, but also they can be used as a house's passive heating system. Furthermore the windows play an important role in shaping thermal comfort and general wellbeing. Thus the windows have a great influence on people's everyday life and they have a potential to be a way of altering energy balance and net heating demand of a building.

The goal of my thesis was to analyse the influence of changing the size and parameters of windows on building's net energy demand. Five different south facades were developed/projected for the building which the thesis is based on. Price quote of windows with eleven different parameters (U-value ranging from 0,4 to 0,7 W/m²K and g-value as well) was obtained from Saint Gobain Glass. Energy calculations were made using Passive House Planning Package 8.

The results showed that the influence of window's g-value is greater than the influence of its U-value. It is better to rather sacrifice a little in U-value if there is a chance of gaining in g-value. Energy lost from the bigger U-value is small compared to the gain of the bigger g-value. The cost of additional investment during window's life time is 0,15 €/kWh or less for the house this thesis is based on. It has to be accounted for that the additional investment is non-recurring yet the gained profit is increasing year by year until the Sun shines.

TÄNUAVALDUSED

Suured tänud juhendaja Tõnu Muringule igakülge abi ja töö valmimist soosiva suhtumise eest. Lisaks tänan Sense OÜ arhitekt Eneli Markvarti, spetsialist Kristo Kalbet ning spetsialist Arnika Kajastet tööd puudutavate küsimuste kiire ja asjaliku lahendamise eest ning Saint Gobain Glass müügiinsener Kadi Loogale igakülge abi eest.

Erilised tänusõnad emale ja teistele pereliikmetele usu eest töö valmimisse!

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Märten Haugas (sünnikuupäev: 31.08.1990)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

"Akende suuruse ja parameetrite varieerimise mõju hoone energiatarbimisele",

mille juhendaja on Tõnu Muring

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 19.05.2015