



SOOJUSTEHNIKA INSTITUUT

Soojusenergeetika õppetool

MSE40LT

Priidik Kant

**ERINEVATE KOLLEKTORTÜÜPIDE TEHNILIS-
MAJANDUSLIK VÕRDLUS EESTI KLIIMAS**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn

2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”20...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”20...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”20... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusenergeetika õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Priidik Kant

Õppekava: Soojusenergeetika

Juhendaja: vanemteadur, PhD. Siim Link

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Eesti keeles:

Erinevate kollektortüüpide tehnilis-majanduslik võrdlus Eesti kliimas

Inglise keeles: Techno-economic comparison of different solar thermal collector types in the Estonian climate

Lõputöös lahendatavad ülesanded:

Nr. Tutvustus

1. Ülevaade päikesekollektorite tehnoloogiast ja kasutusvõimalustest.
2. Ülevaade päikesekollektorite poolt toodetava soojuse arvutamise meetodikast.
3. Erinevate kollektorite tootlikkuse võrdlus.
4. Erinevate kollektorite poolt toodetava soojuse hinnavõrdlus.

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Erinevate päikesekollektorite tootlikkuse arvutamine, erinevate päikesekollektorite tasuvusarvutus.

Töö keel: Eesti

Kaitsmistaoetus esitada dekanaati hiljemalt 14.05.2014 **Töö esitamise tähtaeg**.....

Üliõpilane Priidik Kant /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Siim Link /allkiri/ kuupäev.....

SISUKORD

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bakalaureusetöö ülesanne | 3 |
| SISSEJUHATUS..... | 6 |
| 1. PÄIKESEKIIRGUSE JA PÄIKESEENERGIA MÕISTE JA OLEMUS..... | 7 |
| 2. PÄIKESEENERGIA KASUTAMINE HOONETE SOOJUSVARUSTUSES | 8 |
| 2.1 Päikeseenergia aktiivne kasutamine..... | 8 |
| 3. PÄIKESEKOLLEKTORITE TÜÜBID JA TEHNOLOOGIA..... | 9 |
| 3.1 Lamekollektorid | 9 |
| 3.1.1 Lamekollektori ehitus..... | 9 |
| 3.2 Vaakumtorukollektorid | 11 |
| 4. PÄIKESEKOLLEKTORITE KASUTUSVÕIMALUSED | 14 |
| 5. PÄIKESEKOLLEKTORITE POOLT TOODETAVA SOOJUSE ARVUTAMISE METOODIKA..... | 15 |
| 6. ERINEVATE PÄIKESEKOLLEKTORITE VÕRDlus | 17 |
| 6.1 Kollektorite valik..... | 17 |
| 6.1.1 Lamekollektor ASK 26 | 17 |
| 6.1.2 Vaakumtorukollektor Kloben Sky Pro 12 CPC 58 | 18 |
| 6.2 Valitud kollektorite toodang erinevate kaldenurkade korral kuude kaupa | 18 |
| 6.2.1 ASK 26 kogu brutotoodang..... | 18 |
| 6.2.2 Kloben Sky Pro 12 CPC 58 kogu brutotoodang | 22 |
| 6.3 Kollektorite võrdlus toodangu järgi | 25 |
| 7. KOLLEKTORITE POOLT TOODETAVA SOOJUSE HINNAVÕRDlus | 27 |
| 7.1 Sooja tarbevee valmistamine elektriga..... | 28 |
| 7.2 Sooja tarbevee valmistamine ASK 26 lamekollektoriga..... | 29 |
| 7.3 Sooja tarbevee valmistamine Kloben Sky Pro 12 CPC 58 vaakumtorukollektoriga | 29 |
| KOKKUVÕTE..... | 31 |
| SUMMARY | 32 |
| KASUTATUD ALLIKAD..... | 33 |
| | |
| Sele 3.1. Lamekollektori stiliseeritud läbilõige..... | 10 |
| Sele 3.2. Vaakumtoru lihtsustatud tööpõhimõte | 13 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sele 4.1. Hoone päikeseküttesüsteem | 14 |
| Sele 5.1. Lame- ja vaakumtorukollektorite kasuteguri sõltuvus temperatuuride vahest..... | 16 |
| Sele 6.1. Kollektori toodang kuude kaupa | 19 |
| Sele 6.2. Kollektori toodang kuude kaupa | 19 |
| Sele 6.3. Kollektori toodang ja kuude kaupa | 20 |
| Sele 6.4. Kollektori toodang kuude kaupa | 20 |
| Sele 6.5. Kollektori toodang kuude kaupa | 21 |
| Sele 6.6. Kollektori toodang sõltuvalt kaldenurgast | 21 |
| Sele 6.7. Kollektori toodang kuude kaupa | 22 |
| Sele 6.8. Kollektori toodang kuude kaupa | 23 |
| Sele 6.9. Kollektori toodang kuude kaupa | 23 |
| Sele 6.10. Kollektori toodang kuude kaupa | 24 |
| Sele 6.11. Kollektori toodang kuude kaupa | 24 |
| Sele 6.12. Kollektori toodang sõltuvalt kaldenurgast | 25 |
| Sele 6.13. Kollektorite soojuse toodang aasta kohta | 26 |
| Sele 6.14. Soojuse toodang apertuurpinna kohta | 26 |
| Sele 7.1. Kollektorite poolt toodetav soojus ja sooja tarbevee vajadus | 28 |

SISSEJUHATUS

Päikeseenergiat on võimalik kasutada hoone soojusvarustuse tagamiseks. Selleks kasutatakse päikesekollektoreid. Kollektorite poolt toodetavat soojust on võimalik kasutada nii hoone kütteks kui ka sooja tarbevee valmistamiseks. Käesolevas töös uuritakse erinevate kollektortüüpide rakendamist ja nende tasuvust Eesti kliimas.

Töö on jaotatud tinglikult kolmeks osaks. Esimeses osas antakse ülevaate päikeseenergia kasutamise teoreetilistest alustest. Peamiseks on ülevaate andmine päikesekollektorite tehnoloogiast ja kasutusvõimalustest. Teises osas kirjeldatakse ning antakse ülevaade päikesekollektorite poolt toodetava soojuse arvutamise meetodikast. Kolmas osa toob välja antud töö peaesmärgi, milleks on erinevat tüüpi päikesekollektorite tootlikkuse võrdlemine kollektorite erineva kaldenurga korral ja kollektorite poolt toodetava soojuse hinnavõrdlus, mille alusel saamegi päikesekollektori valiku teha vastavalt soovitud eesmärgile. Selleks kasutatakse turul saada olevate päikesekollektorite tehnilisi andmeid. Investeeringu suuruste hindamiseks on küsitud hinnapakkumisi päikesekollektoreid müüvatelt ettevõtetelt. Antud tulemuste põhjal on välja selgitatud, millist tüüpi päikesekollektorit ja millise kaldenurgaga on tehnilis-majanduslikult kõige optimaalsem kasutada.

1. PÄIKESEKIIRGUSE JA PÄIKESEENERGIA MÕISTE JA OLEMUS

Maa peamiseks energiaallikaks on Päike, kust elektromagnetlainetena ning eelnevalt Maa atmosfääri läbides saabub maapinnale kiirgus, mida antud töös lihtsustuse huvides võib nimetada „päikeseenergiaks“. Päike on Maale kõige lähem täht, tema ligikaudne läbimõõt on $1,392 \cdot 10^9$ m ja mass, mis ületab Maa massi 330000 korda, on $1,99 \cdot 10^{30}$ kg. Päikese pinnalt lähtub kiirgusena energiavoog $3,86 \cdot 10^{26}$ W. Sellest Maa atmosfääri ülempiirile jõuab vaid $\frac{1}{2}$ miljardikku osa, moodustades aasta jooksul energiahulga ligikaudu $5,4 \cdot 10^{12}$ TJ. Solaarkonstandiks nimetatakse Maa atmosfääri välispinnale langevat päikesepinna normaalisuunalist päikesekiirte kiirgusvoogu, kui Maa asetseb keskmisel kaugusel päikesest. Kuna Päike on Maa tiirlemise ellipsi fookuses, siis ei ole solaarkonstant püsisuurus. Talvisel pööripäeval on solaarkonstandi maksimumväärtuseks 1399 W/m^2 ning suvisel pööripäeval on miinimumväärtuseks 1310 W/m^2 . [1]

Päikeseenergia ehk solaarenergia on Päikese kiirguse kasutamine mingit liiki energia saamiseks. Maakerale jõudva päikeseenergia kogus ületab praeguse energianõudluse kuni 15000 korda. Eestis on aastase päikesekiirguse energia ühe ruutmeetri kohta ligikaudu 1300 kWh. Selle varieerumine aasta jooksul on küllaltki suur. Pilvitul juunipäeval võib tulemus olla $8,5 \text{ kWh/m}^2$, pilvisel talvapäeval aga $0,02 \text{ kWh/m}^2$. [2]

Maakera igale ruutmeetrile langeb keskmiselt selline hulk päikeseenergiat, mis võimaldaks teoreetiliselt toota aastas igalt ruutmeetrilt 1700 kWh energiat. Tegelikult tuleb arvestada, et päikesekiirguse intensiivsus on piirkonniti ebaühtlane ning tootmisel tekivad kaod. [2]

Päikeseenergia on ökoloogiliselt puhas ning meie perspektiivis ammendamatu. Sellest tulenevalt võimegi päikeseenergia kasutamise lugeda täielikult taastuvenergiaallikate hulka.

2. PÄIKESEENERGIA KASUTAMINE HOONETE SOOJUSVARUSTUSES

Päikesekiirgusel põhineva hoone kütmise saab jagada kaheks: passiivne päikeseküte ja aktiivne päikeseküte. Passiivne päikeseküte seisneb selles, kui päikesekiirgus soojendab hoone konstruktsioonelemente või ruumides olevaid esemeid. Aktiivse päikesekütte korral kannab läbi päikesekollektorite pumbatav või puhutav soojuskandja soojuse soojusvahetisse või soojussalvestisse ning nende kaudu keskkütte- või sooja tarbevee valmistamise süsteemi. [3]

Käesolevas töös vaadeldakse aktiivset päikesekütet ehk kollektorite rakendamist.

2.1 Päikeseenergia aktiivne kasutamine

Päikeseenergia aktiivse kasutamise tehnoloogia seisneb selles, et päikese poolt kiiratud energia muundatakse erinevate süsteemide ja seadmete abil elektriks või soojuseks. [4]

Päikeseenergia aktiivsel kasutamisel kasutatakse päikesekollektoreid. Ameerika Ühendriikide Energiainformatsiooni Agentuur (EIA) on jaotanud need vastavalt töötemperatuurile kolme kategooriasse: [5], [6], [7], [8]

- Madaltemperatuurilised kollektorid – temperatuur $< 40^{\circ}\text{C}$. (kvalifitseeruvad ka passiivse päikeseenergia kasutamise alla).
- Kesktemperatuurilised kollektorid – temperatuur $40\text{-}300^{\circ}\text{C}$.
- Kõrgtemperatuurilised kollektorid – temperatuur $> 400^{\circ}\text{C}$.

Antud töös uuritakse ja võrreldakse kesktemperatuuriliste kollektorite hulka kuuluvaid lamekollektoreid (ingl k. - *flat plate*) ja vaakumtorukollektoreid (ingl k. - *evacuated tube*). [5]

3. PÄIKESEKOLLEKTORITE TÜÜPID JA TEHNOLOOGIA

Kõige levinumateks päikesekollektorite tüüpideks Eestis on lamekollektorid ja vaakumtorukollektorid. [9]

Järgnevalt uuritaksegi nende tööpõhimõtet hoone küttesüsteemis.

3.1 Lamekollektorid

Lamекollektori tööpõhimõte seisneb selles, et päikesekiirgus läbib kollektori pinnal oleva läbipaistva katteplaadi ning langeb tumedale pinnale. Seda nimetatakse absorbeerivaks pinnaks. See pind on ühenduses torudega, kus voolab soojuskandja. Päikesekiirgus kantakse soojusena üle soojuskandjale, mis omakorda transpordib soojuse tarbimisse või akumulatsioonipaaki. [10]

Lamекollektori erinevused võrreldes vaakumtorukollektoriga on järgnevad: [11]

- Kollektori omahind ja paigaldus on odavamad.
- Kollektori efektiivsus on madalam.
- Lihtsam puhastada.
- Väiksem tööiga.

3.1.1 Lamekollektori ehitus

Lamекollektori ehitus on kihiline. Seel 3.1 on kujutatud lamekollektori läbilõige ning on kujutatud ka orienteeriv energiavoode osakaal protsentuaalselt (g; r; l; u). Tegelikuses sõltuvad need konkreetsest olukorrast ning on päeva jooksul muutuvad. [13]

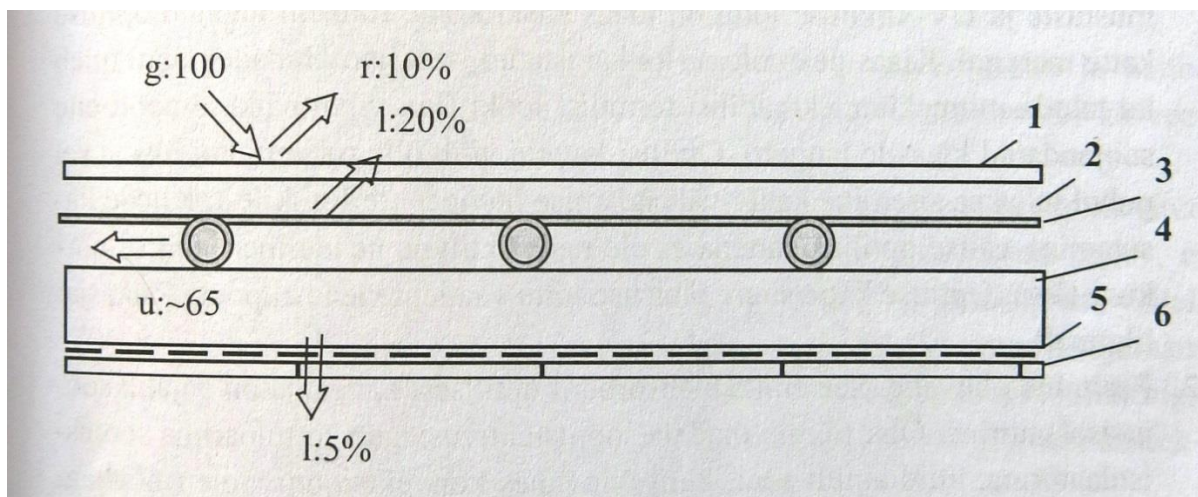
g - kogukiirgus, mille langemisnurk päeva möödudes muutub;

r - peegeldunud kiirgus;

l - kaod. Konvektsioonist tingitud kadu välisõhku ning kiirguse ja soojusjuhtivuse kombineeritud kadu absorberi ja klaasi vahel. See sõltub olulisel määral tuulekiirusest. Läbi tagumise seina on kaod määratud isolatsiooni soojusjuhtivuse ja konvektsiooniga välisõhku.

Läbi külgliseinte on soojuskaod suhteliselt väikesed;

u - soojuskandja kasulik energia. [13]



Sele 3.1. Lamekollektori stiliseeritud läbilõige [12]

Selel 3.1 on kollektori kihid nummerdatult ja jagunevad järgnevalt alustades päikesepoolsest kihist: [13]

- 1) Optiline kate – 3-5 mm paksune spetsiaalselt tugevdatud klaas, mille ülesandeks on sisemuse kaitsmine tolmu, sademete ja muude väliskeskkonna mõjude eest. Samuti on selle ülesandeks absorberi konveksiooni takistamine. Klaasi puhul on vajalik selle eelnev karastamine, sest hoovihmade puhul tuleb sellel taluda termilisi lööke. Optilise katte materjalidena on kasutusel ka mitmekihiline läbipaistev õhukanalitega polükarbonaatplastik. Siiski on sellel väike ultraviolettkiirguse kindlus ning on ka vastuvõtlikum kriimustustele ja kahjustustele. Kui optilisi katteid on rohkem kui üks, siis kasutatakse sisemise kattena teflonkilet. Mehaanilise nõrkuse tõttu ei ole otstarbekas välise kattena kilet kasutada.
- 2) Pealmine õhuvahe – eraldab optilist katet absorberist ning on vajalik soojusisolaatorina. Õhk on madala soojusjuhtivusteguri tõttu üks parimatest soojusisolaatoritest. Õhuvahe jäetakse alla 20 mm, et ei tekiks konveksioonivoolusid. Ringvoolude vältimiseks eraldatakse suurem õhuvahe vahepealse teise optilise kattega. Õhuvahe ei tohi olla hermeetiline, sest siis hakkab õhk seal soojenedes paisuma ja rõhk tõuseb. Välistemperatuuri alanemisel ja seega õhu temperatuuri langemisel võib teatud aegadel õhuniiskus välja kondenseeruda. Õhuvahesse kogunev niiskus vähendab optilise katte läbipaistvust. Sellepärast peab õhuvahe olema tuulutatav.
- 3) Absorber – päikesekiirguse muundurina toimib must matt pind ning selle ülesandeks on ka tekkiva soojuse ülekandmine soojuskandjale.

- 4) Alumine soojusisolatsioon – tähtis on soojustada ka alumine külj, sest soojus levib kõikides suundades. Selle valmistamine on lihtsam, sest alumisel küljel ei ole vaja optilist läbipaistvust. Reeglina kasutatakse 40-60 mm paksust kihti, mille soojusisolatsioonimaterjalina võib kasutada kivivilla, klaasvilla või vahtpolüüretaan. Isolatsioonimaterjal peab taluma suhteliselt kõrgeid temperatuure, sest avariisituatsioonis võib absorberi temperatuur tõusta kuni 200 °C.
- 5) Peegel – vajalik infrapunase kiirguse tagasisuunamiseks. Kollektori põhi kaetakse sageli stanniolikihiga (tinafoolium).
- 6) Põhi – kollektori konstruktsioonelement, mis ühendab küljeraami ja hoiab kollektorit koos. Valmistatakse see alumiiniumist, plastist või veekindlast vineerist.
- 7) Joonisel näitamata küljeraam peab olema sedavõrd tugev, et tagada kollektori piisav jäikus nii transpordi kui ka montaaži vältel. Küljeraam isoleeritakse 20-30 mm isolatsioonimaterjali kihiga. Küljeraame valmistatakse üldjuhul alumiiniumist või töödeldud puidust. [13]

3.2 Vaakumtorukollektorid

Vaakumtorukollektoris „püüavad“ päikesekiiri topeltklaasiga vaakumtorud. Kollektor koosneb alusraamist, vaakumtorudest ja soojustorudest. Viimased on vaakumtorukollektori peamiseks tööorganiks. [15]

Soojustoru on suuteline juhtima suuri soojusvoogusid kasutades selleks ära soojuskandja faasimuutuse soojuse. Teda võib vaadelda kui 10 000 W/m²K-e efektiivse soojusjuhtivusteguriga varrast. Soojustoru on ligi 30 korda suurema soojusjuhtivusega kui samade mõõtmetega vasktoru. Soojustoru jaguneb kolmeks tsooniks: [14]

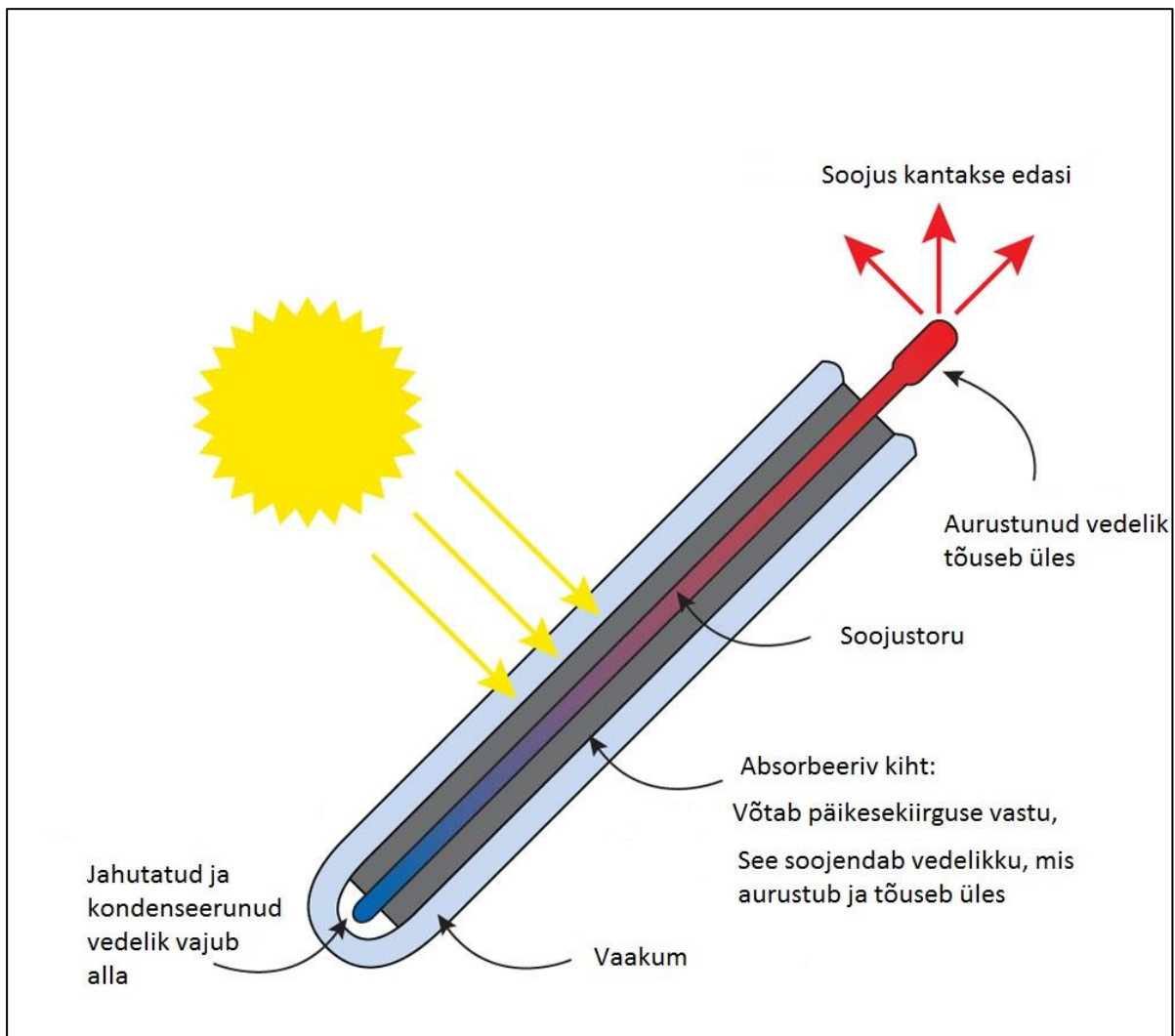
- 1) Aurustustsoon – toru võtab väliskeskkonnast vastu soojust ning sellele järgneb soojuskandja aurustumine.
- 2) Transporditsoon – koosneb toru keskel paiknevast aurukanalist ja toru seina sisepinnale kujundatud kapillaarpoorsest vedelfaasikanalist. Sellisel juhul toimub soojuskandja transport tahi abil. (Saab kasutada ka termosifoontoru, kus soojuskandja transport toimub gravitatsioonijõudude abil). Taht on kapillaarpoorne materjal, mis juhib vedelikku.

- 3) Kondensaator – aurustunud soojuskandja kondenseerub välise jahutuse toimel. Kondensaatoritsooni paigaldatakse tavaliselt ka töötemperatuuri või ülekantavat võimsust reguleeriv seade. [14]

Soojustoru soojuskandja koostis valitakse vastavalt töötemperatuurile. Selleks on tavaliselt vesi. Eesti kliimas tuleb madala välistemperatuuri tõttu kasutada mingit vee baasil tehtud vedelikku. [15]

Vaakumtorukollektori tööpõhimõte seisnebki selles, et soojuskandja aurustub Päikese poolt kuumutatavas otsas ning kondenseerub toru teises otsas, kus seda jahutatakse kollektori kontuuris ringleva veega või vee-glükooli lahusega. Vastavalt eelnevalt kirjeldatud soojustoru tööpõhimõttele, voolab kondenseerunud soojuskandja tagasi kuumutatavasse otsa ning protsess algab uuesti. Soojusülekanne toimub vaakumtorus ainult kindlas suunas. [15], [16]

Vaakumtoru koosneb kahest üksteise sees olevatest otstest kokku sulatatud klaastorudest. Nende vahele on tekitatud vaakum. Klaastoru sisepinnal asub kiirgust neelav ning peegeldumisvastase toimega kattedkiht, mis muundab päikesekiirguse soojuseks ning kannab selle üle soojustorule. Sellega tagatakse vaakumtoru suur efektiivsus. Soodustamiseks süsteemi toimimist ka pilves ilmaga, on vaakumtoru varustatud infrapunast kiirgust läbilaskva kihiga. Materjali valikus kasutatakse borosilikaatklaasi, mis on ilmastikukindel ja peab vastu näiteks nii peale kukkuvatele puuokstele kui ka rusikasuurustele raheteradele. [15], [16]



Sele 3.2. Vaakumtoru lihtsustatud tööpõhimõte [17]

4. PÄIKESEKOLLEKTORITE KASUTUSVÕIMALUSED

Antud töös on uuritud päikesekollektoreid (lamekollektorid ja vaakumtorukollektorid), mida kasutatakse hoone soojusvarustuses kahel viisil: [18]

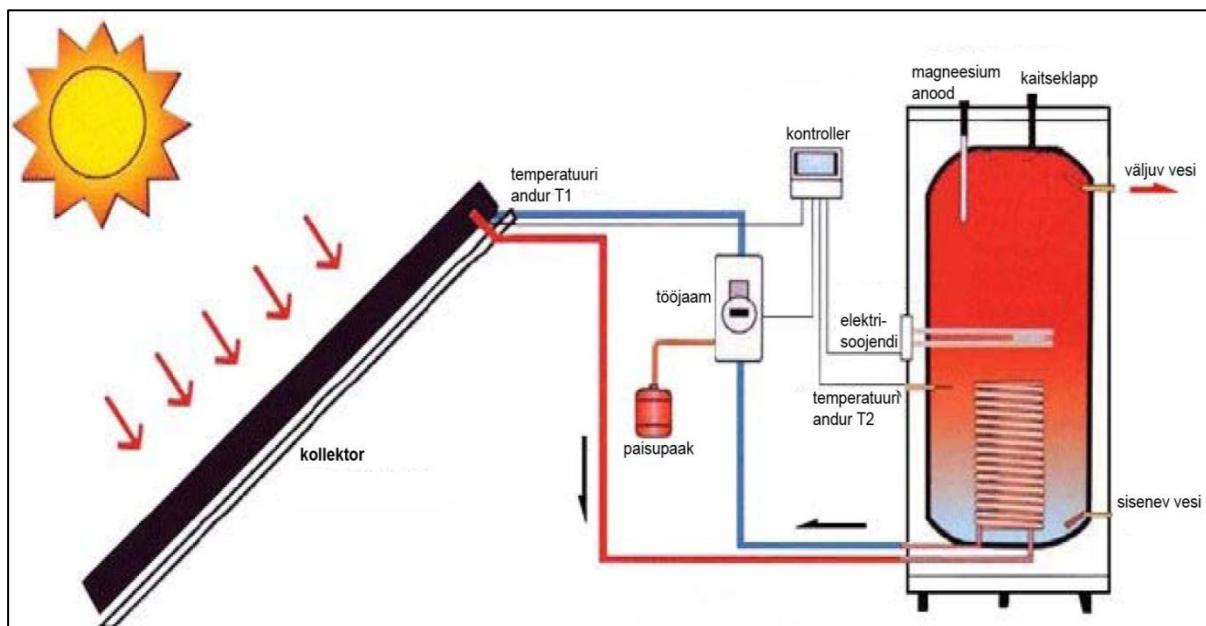
- hoone kütteks
- sooja tarbevee valmistamiseks.

Loomuliku ringlusega termosifoonseadmega rakendust sooja tarbevee saamiseks kasutatakse laialdaselt lõunapoolsetes riikides, kus välistemperatuur ei lange aastaringselt alla 0 °C. Selline süsteem on avatud – soe vesi voolab otse läbi kollektori. [18]

Eesti kliimas ei ole sellise süsteemi kasutamine sobilik ning tuleks kasutada suletud ringlusega kollektorit, kus soojuskandjaks on külmumiskindel vedelik.

Hoone kütte- ja soojaveevarustuse süsteem koosneb lisaks päikesekollektorile veel tarbevee boilerist, akumulatsioonipaagist, ringluspumbast ja juhtimiseadmetest. [18]

Selel 4.1 on näha üks võimalik variant hoone päikeseküttesüsteemi kohta.



Sele 4.1. Hoone päikeseküttesüsteem [19]

Nagu hilisematest arvutustest selgus, siis Eesti tingimustes ei ole päikesekiirgus piisav selleks, et tagada aastaringselt sooja tarbevee valmistamine ning reaalses süsteemides on lisaks päikesekollektoritele tarvis kasutada lisakütteallikat.

5. PÄIKESEKOLLEKTORITE POOLT TOODETAVA SOOJUSE ARVUTAMISE METOODIKA

Antud töös kasutati päikesekollektorite võrdlemiseks ja nende poolt toodetava soojuse arvutamiseks organisatsiooni ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation) poolt loodud sertifitseerimissüsteemi The Solar Keymark ning Jan Erik Nielsen'i poolt välja töötatud arvutusprogrammi.

The Solar Keymark loodi selleks, et kindlustada kõrge kvaliteet päikeseenergiast soojust genereerivatele seadmetele ning kaubanduslike barjääride vähendamiseks Euroopa turul. Kvaliteedimärk, mille The Solar Keymark päikesekollektorile annab, vastab Euroopa standarditele EN 12975 ja EN 12976. Laboreid, kus vastavad testid tootlikkuse leidmiseks kasutatavate parameetrite kindlakstegemiseks tehakse, toetab ka Euroopa Komisjon. [20]

Arvutuste aluseks on järgnev valem, mis iseloomustab päikesekollektori tootlikkust: [21]

$$q = A \cdot (\eta_0 \cdot G - a_1 \cdot dT - a_2 \cdot dT^2) \quad [W] \quad (5.1)$$

A - kollektori jõudlusparameetritele vastav pindala [m²]

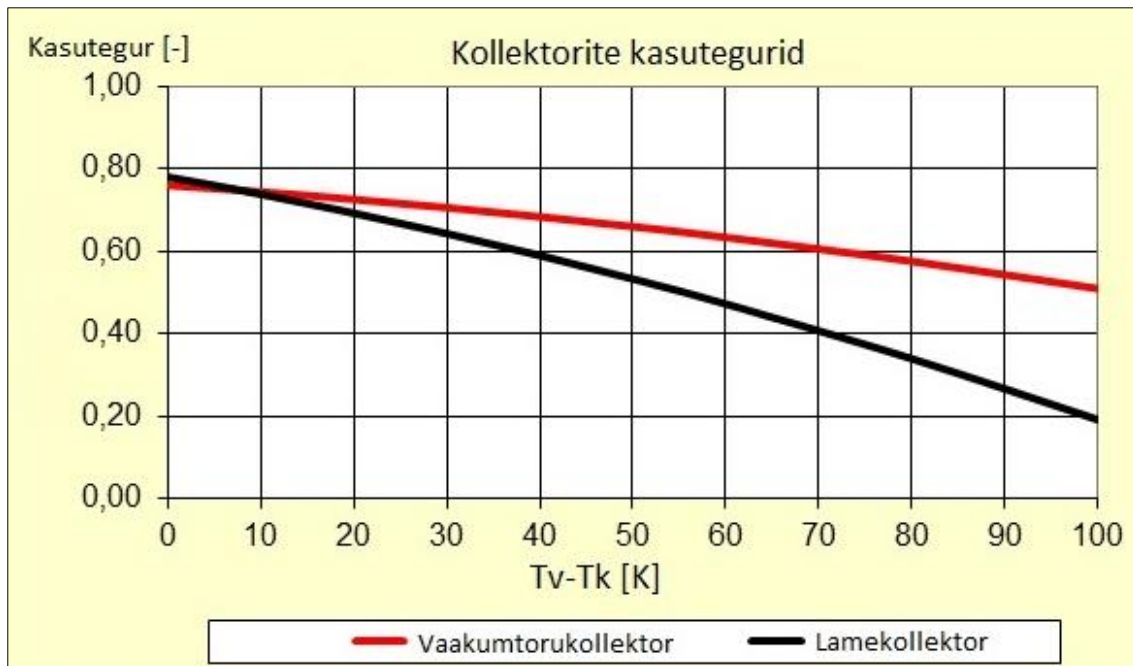
Kollektori tootlikkuse leidmiseks kasutatavad parameetrid: [21]

- η_0 - optiline kasutegur [-]
- a_1 – esimest järku soojuskao koefitsient [W/m²K]
- a_2 – teist järku soojuskao koefitsient [W/m²K²]

Kollektori töötingimused: [21]

- G - päikese kiirguse intensiivsus kollektori tasapinnal [W/m²]
- dT - soojuskandja keskmise temperatuuri ja keskkonna temperatuuri vahe [K]

Selel 5.1 on kujutatud lamekollektori ja vaakumtorukollektori kasuteguri sõltuvus soojuskandja keskmise temperatuuri ja keskkonna temperatuuri vahest.



Sele 5.1. Lame- ja vaakumtorukollektorite kasuteguri sõltuvus temperatuuride vahest [21]

Lamekollektori ja vaakumtorukollektori parameetritena on kasutatud ESTIF uuringu keskmisi parameetreid. [21]

6. ERINEVATE PÄIKESEKOLLEKTORITE VÕRDLUS

6.1 Kollektorite valik

Võrdluse aluseks on võetud turul pakutavad päikesekollektorid – üks lamekollektor ja üks vaakumtorukollektor. Eelnevalt kirjeldatud metoodika alusel on arvatud mõlema päikesekollektori tootlikkus kuude kaupa ja aasta lõikes.

Võrdluse aluseks on päikesekollektorite erinevad kaldenurgad lähtudes tööeesmärgi ühest osast, milleks on kõige optimaalsema kaldenurga väljaselgitamine. Antud töös arutati tootlikkus kollektoritele kaldenurkadega 30°, 40°, 45°, 50° ja 60° ning suunaga lõunasse. [22] Päikesekiirguse andmed (päikesekiirguse intensiivsus) vastavalt asukoha koordinaatidele leiti kasutades tarkvara HOMER. [23]

Asukohaks on võetud Tallinn.

6.1.1 Lamekollektor ASK 26

Uuritavaks lamekollektoriks sai valitud ASK 26. Antud kollektor omab The Solar Keymark sertifikaati.

Kollektori tehnilised andmed sertifikaadi järgi: [24]

- Kollektori avatud pind (apertuurpind) – 2,36 m²
- Kollektori brutopind – 2,6 m²
- Pikkus – 1,233 m
- Laius – 2,109 m
- Optiline kasutegur (η_0) – 0,751
- Soojuslähikandegur (a_1) – 3,389 W/m²K
- Temperatuurist sõltuv soojuslähikandegur (a_2) – 0,013 W/m²K²

6.1.2 Vaakumtorukollektor Kloben Sky Pro 12 CPC 58

Uuritavaks vaakumtorukollektoriks sai valitud Kloben Sky Pro 12 CPC 58. Antud kollektor omab The Solar Keymark sertifikaati.

Kollektori tehnilised andmed sertifikaadi järgi: [25]

- Kollektori avatud pind (apertuurpind) – 2,28 m²
- Kollektori brutopind – 2,59 m²
- Pikkus – 1,927 m
- Laius – 1,343 m
- Optiline kasutegur (η_0) – 0,718
- Soojuslähikandegur (a_1) – 1,051 W/m²K
- Temperatuurist sõltuv soojuslähikandegur (a_2) – 0,004 W/m²K²
- Torude arv – 12

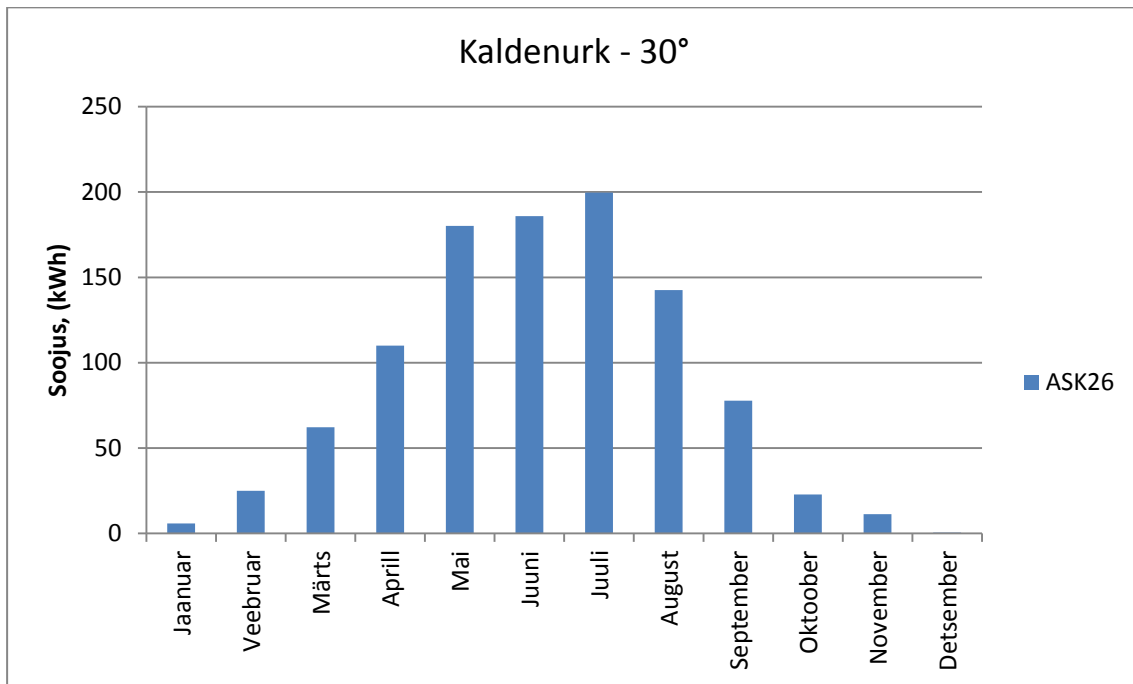
6.2 Valitud kollektorite toodang erinevate kaldenurkade korral kuude kaupa

Järgnevalt on välja toodud arvutustulemused päikesekollektorite kogu brutotoodangu kohta kuude kaupa. Antud arvutustes kasutati eelnevalt kirjeldatud arvutusmetoodikat ning arvutati kollektorite toodangud sertifikaadis olevate andmete põhjal. Eesmärgiks oli välja selgitada optimaalne kaldenurk.

6.2.1 ASK 26 kogu brutotoodang

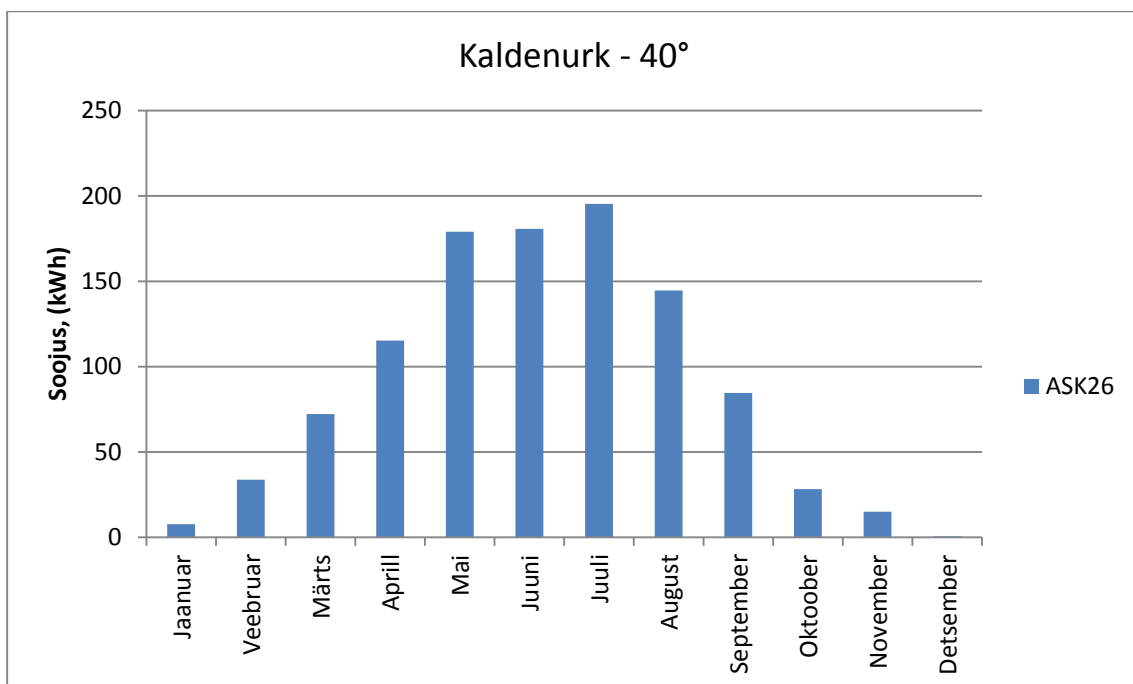
Seledel 6.1 – 6.5 on toodud vaadeldava lamekollektori kogu brutotoodang kuude kaupa vastavalt kollektori kaldenurgale.

Kollektor kaldenurgaga 30° :



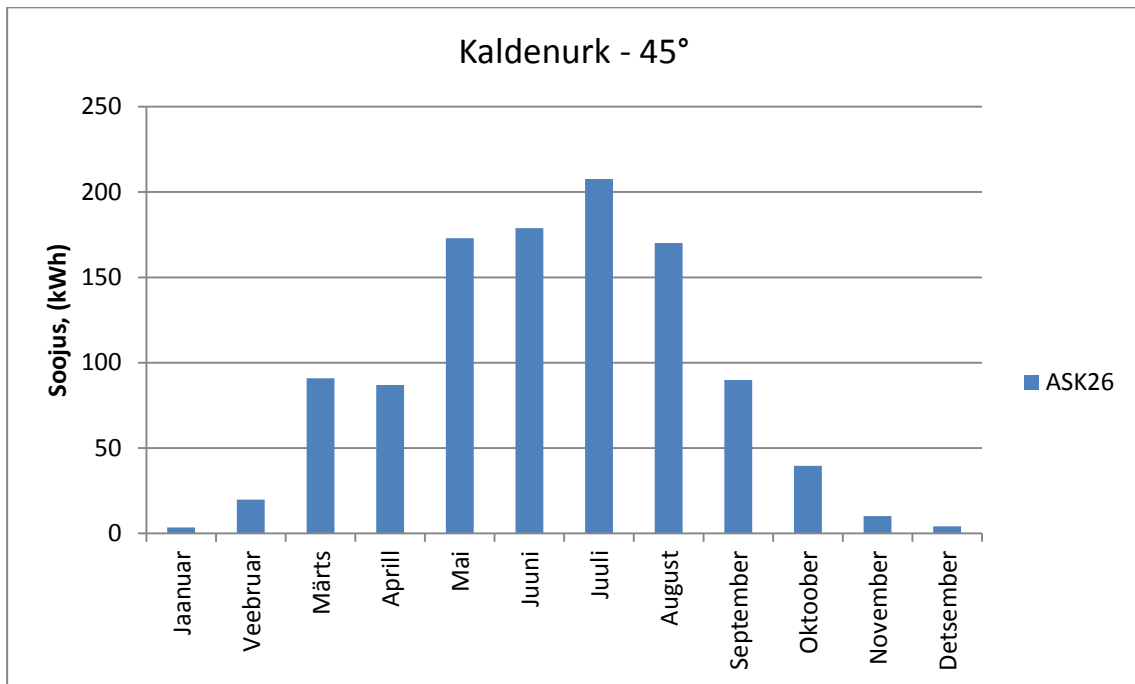
Sele 6.1. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 40°:



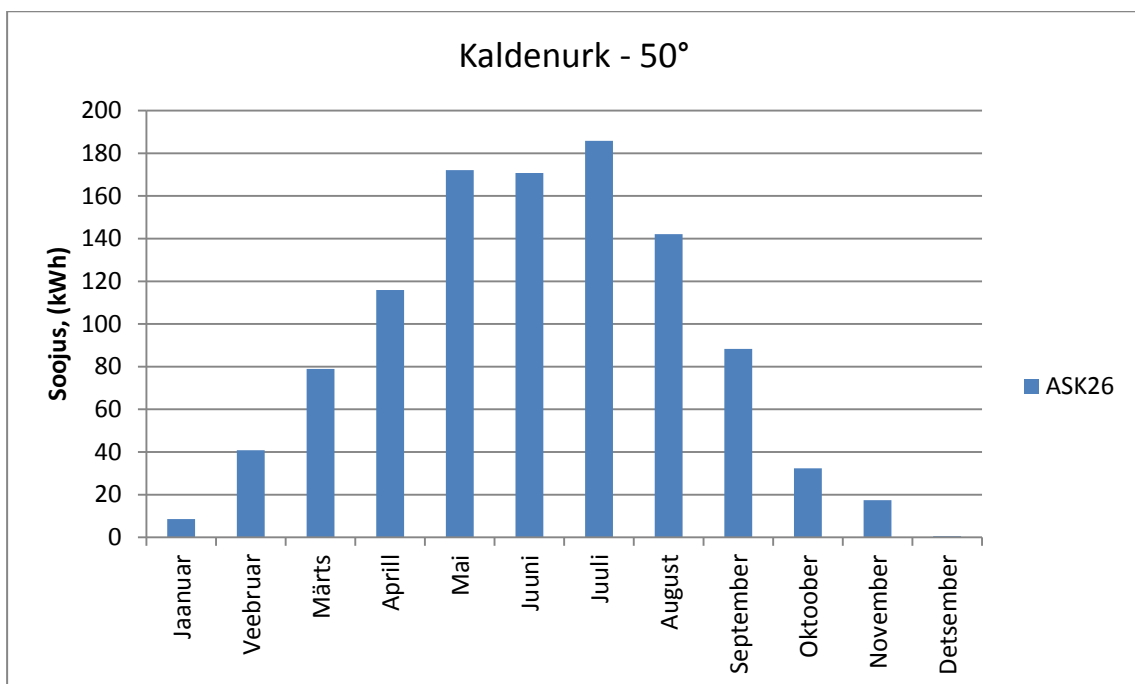
Sele 6.2. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 45°:



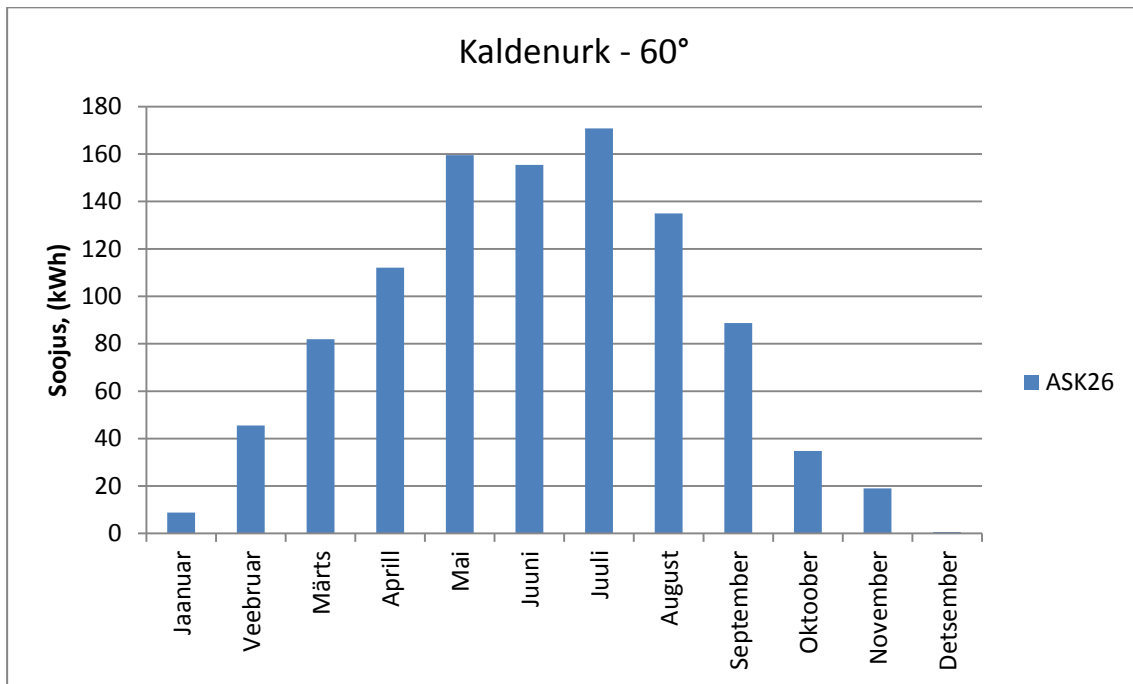
Sele 6.3. Kollektori toodang ja kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 50°:



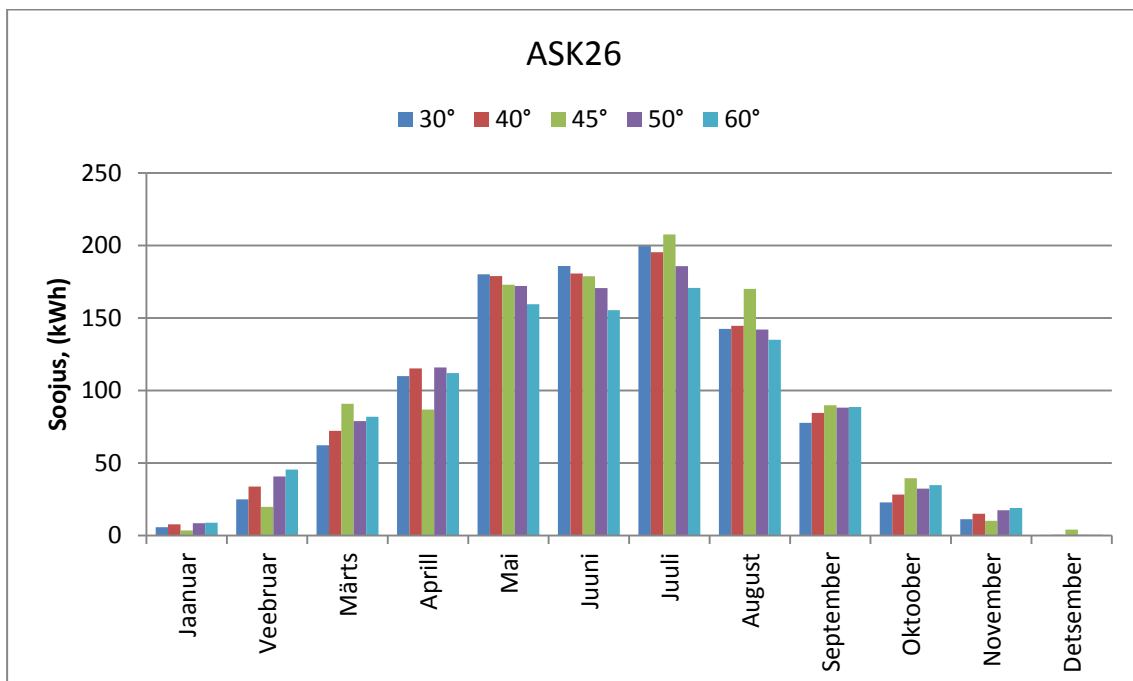
Sele 6.4. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 60°:



Sele 6.5. Kollektori toodang kuude kaupa

Järgnevalt on välja toodud seel 6.6 lamekollektor ASK 26 toodangu võrdlus erinevate kaldenurkade puhul kuude kaupa.



Sele 6.6. Kollektori toodang sõltuvalt kaldenurgast

Seelt 6.6 näeme, et kuuel kuul aastast (märtsis, juulis, augustis, septembris, oktoobris ja detsembris) annab 45° kaldenurk kõige suurema toodangu. Jaanuaris, veebruaris ja novembris

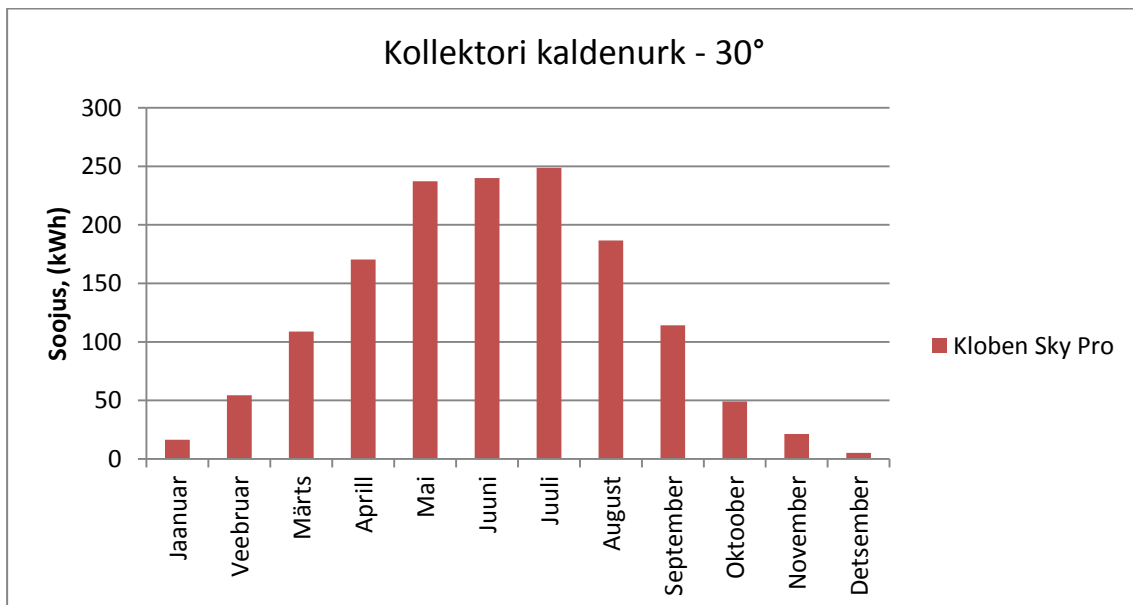
on toodang suurim 60-kraadise nurga korral. Mais ja juunis on toodang kõige suurem 30-kraadise nurga korral ning aprillis on suurim toodang 40-kraadise nurga korral.

Võime järeldada, et parimat tulemust ei saavutata alati ühe kindla kaldenurga korral.

6.2.2 Kloben Sky Pro 12 CPC 58 kogu brutotoodang

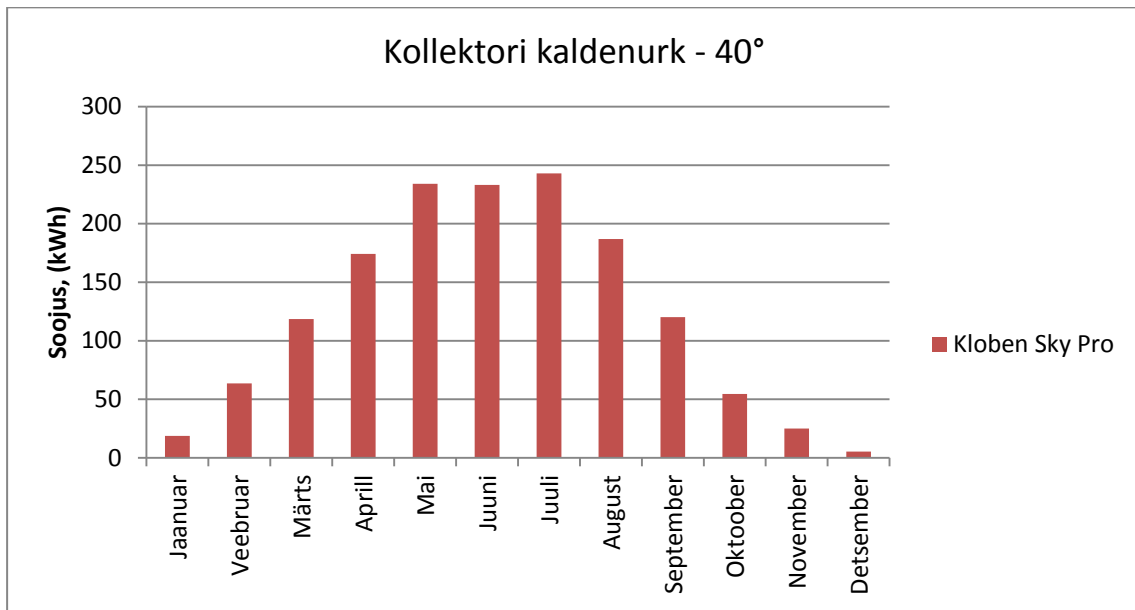
Seledel 6.7 – 6.11 on toodud vaadeldava vaakumtorukollektori kogu brutotoodang kuude kaupa vastavalt kollektori kaldenurgale.

Kollektor kaldenurgaga 30° :



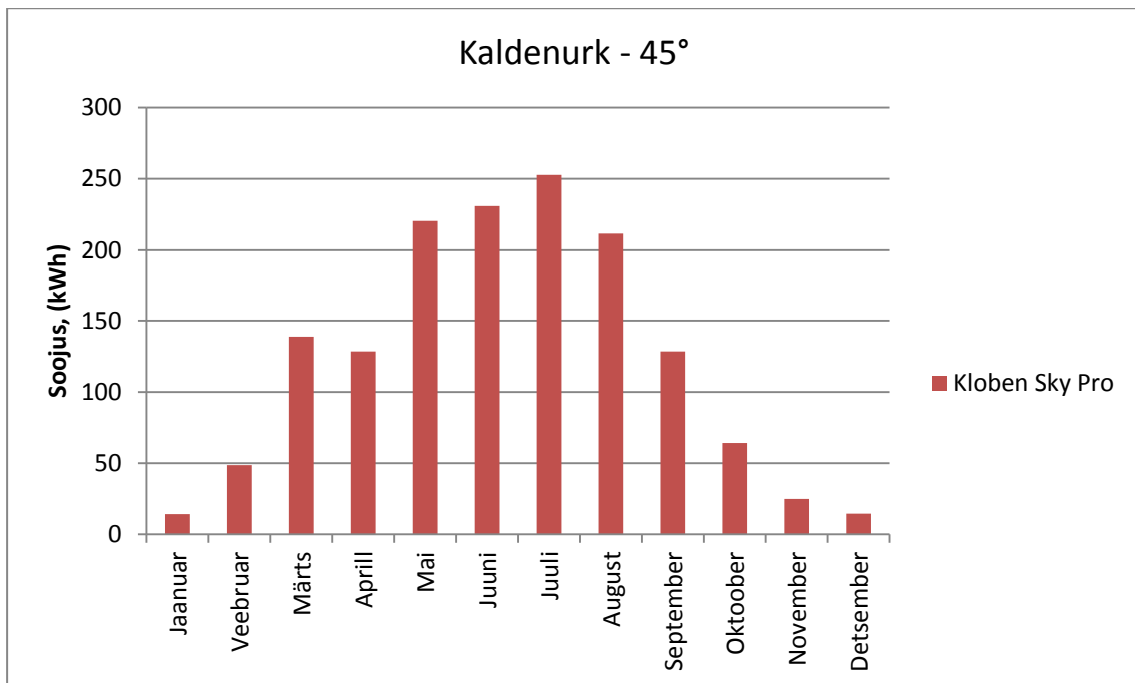
Sele 6.7. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 40° :



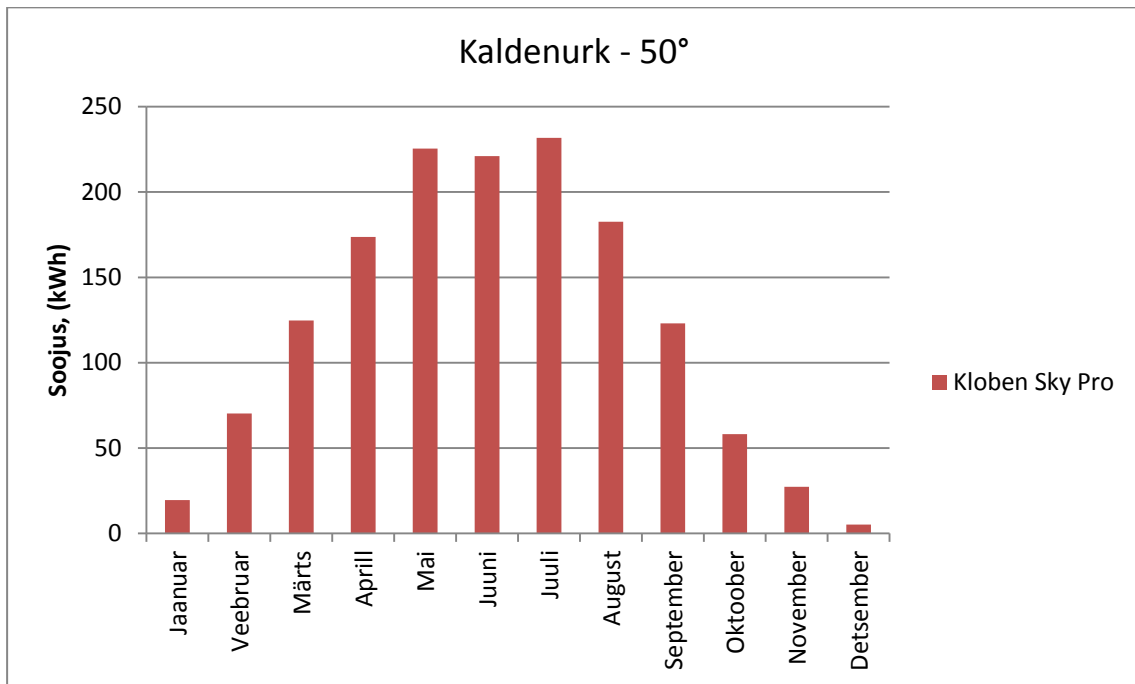
Sele 6.8. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 45° :



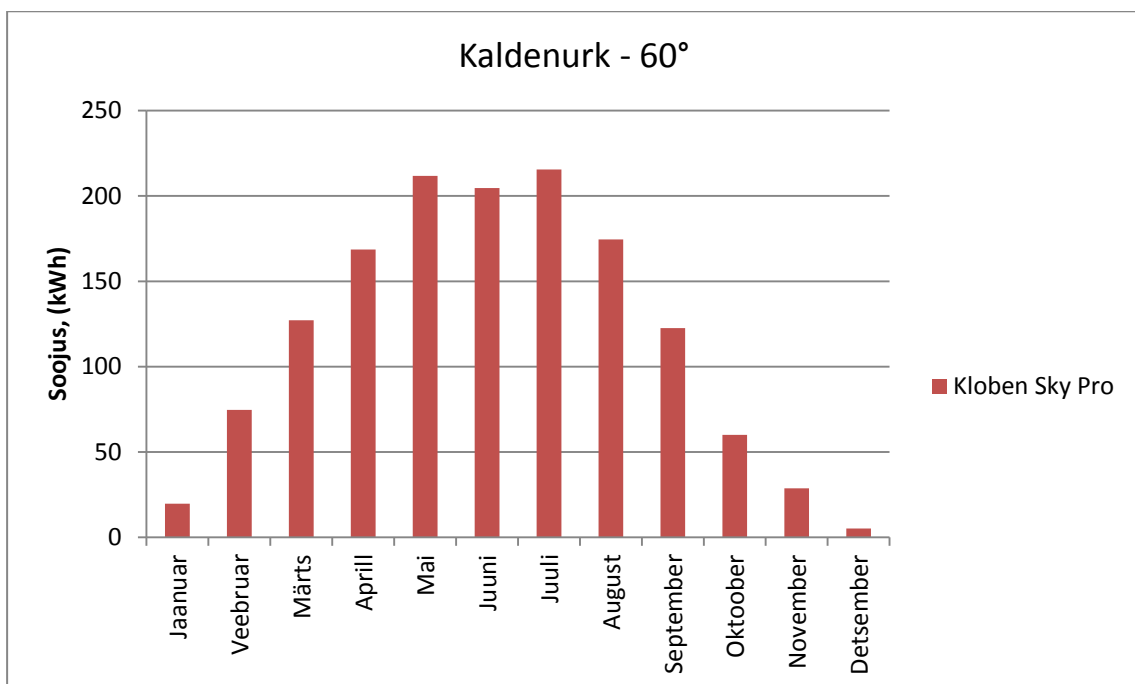
Sele 6.9. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 50° :



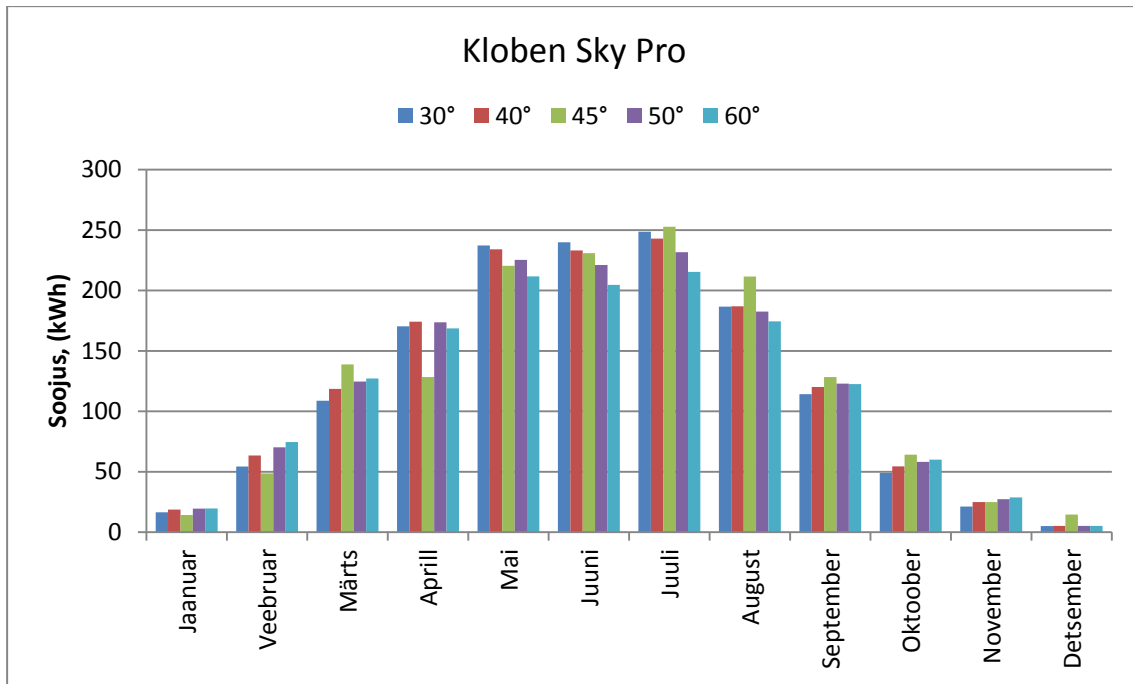
Sele 6.10. Kollektori toodang kuude kaupa

Kollektor kaldenurgaga 60° :



Sele 6.11. Kollektori toodang kuude kaupa

Järgnevalt on välja toodud seel 6.12 vaakumtorukollektor Kloben Sky Pro 12 CPC 58 toodangu võrdlus erinevate kaldenurkade puhul kuude kaupa.



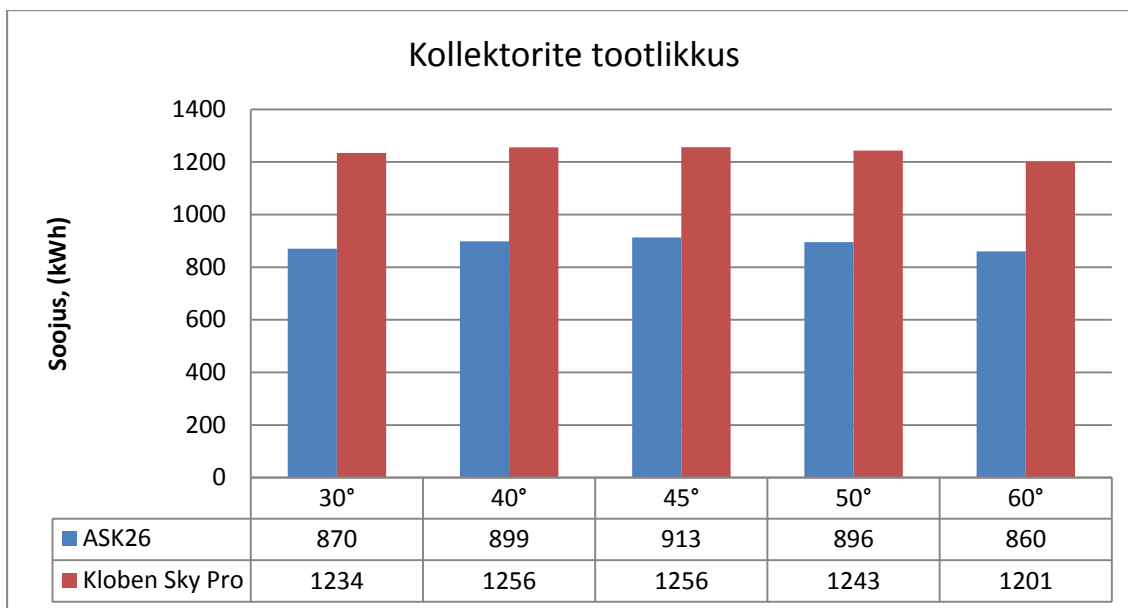
Sele 6.12. Kollektori toodang sõltuvalt kaldenurgast

Selelt 6.12 näeme, et kuuel kuul aastast (märtsis, juulis, augustis, septembris, oktoobris ja detsembris) annab 45° kaldenurk kõige suurema toodangu. Jaanuaris, veebruaris ja novembris on toodang suurim 60-kraadise nurga korral. Mais ja juunis on toodang kõige suurem 30-kraadise nurga korral ning aprillis on suurim toodang 40-kraadise nurga korral.

Võime järeldada, et parimat tulemust ei saavutata alati ühe kindla kaldenurga korral. Lisaks näeme, et nii lamekollektori kui ka vaakumtorukollektori suurimad toodangud on samadel kuudel.

6.3 Kollektorite võrdlus toodangu järgi

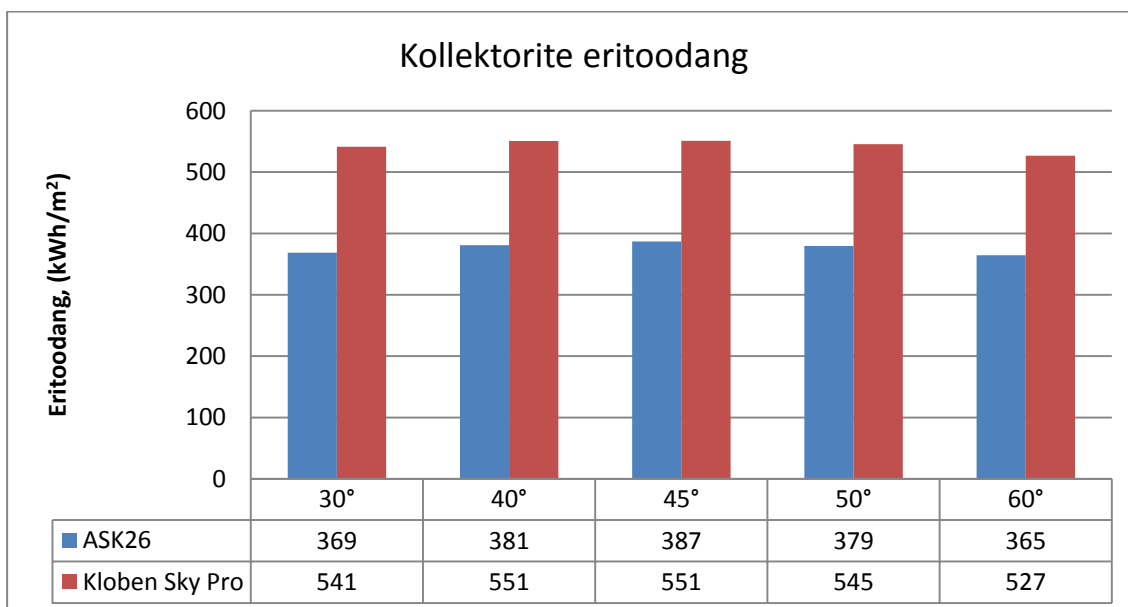
Kollektorite võrdluse aluseks on võetud soojuste toodang aastast. Tootlikkus on arvatud mõlema kollektori puhul erinevate kaldenurkade korral. Võrdlus on toodud selel 6.13. Oluline on märkida, et arvatud toodang arvestab ka süsteemi kadusid (jahtumiskaod) – s.t on soojuste netotoodang.



Sele 6.13. Kollektorite soojuse toodang aasta kohta

Nagu tulemustest näha, on lamekollektori puhul suurim tootlikkus 45-kraadise kaldenurga korral. Vastavalt 913 kWh. Vaakumtorukollektori puhul annavad nii 40-kraadine kui ka 45-kraadine nurk kõige suurema tootlikkuse. Lamekollektori tootlikus on vastavalt 913 kWh ja vaakumtorukollektoril 1256 kWh aasta kohta. Seega on vaakumtorukollektori aastane soojuse netotoodang suurem.

Võrdlusmomendina on välja toodud ka kollektorite eritoodang - soojuse toodang apertuurpinna kohta. (kWh/m²)



Sele 6.14. Soojuse toodang apertuurpinna kohta

7. KOLLEKTORITE POOLT TOODETAVA SOOJUSE HINNAVÖRDLUS

Järgnevalt on uuritud mõlema valitud päikesekollektori poolt toodetud soojuste hinda ja selle kujunemist.

Vaadeldi päikesekollektorite kasutamist sooja tarbevee valmistamiseks.

Sooja vee valmistamiseks vajaminev energiahulk:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_{sv} - t_{kv}), \quad (7.1)$$

kus c – vee erisoojus (J/(kg·K)),

m – vee mass (kg),

t_{sv} – vee lõpptemperatuur (°C),

t_{kv} – vee algtemperatuur (°C).

Vee erisoojus on 4187 J/(kg·K), sooja vee temperatuur on võetud 55 °C, külma vee temperatuuriks on võetud 8 °C. [26]

Antud töös on arvestatud, et ühes kuus kulub 4 m³ sooja vett. Aluseks on võetud ühepereelamu, kus kuus kulub 10 m³ vett. Uuringute põhjal on selgunud, et 40 % kogu pere poolt tarbitavast veest moodustab soe vesi. [27] Seega aastas kulub sooja vett kokku 48 m³. 1 m³ vee mass on 1000 kg. [28] Vee mass on 48000 kg.

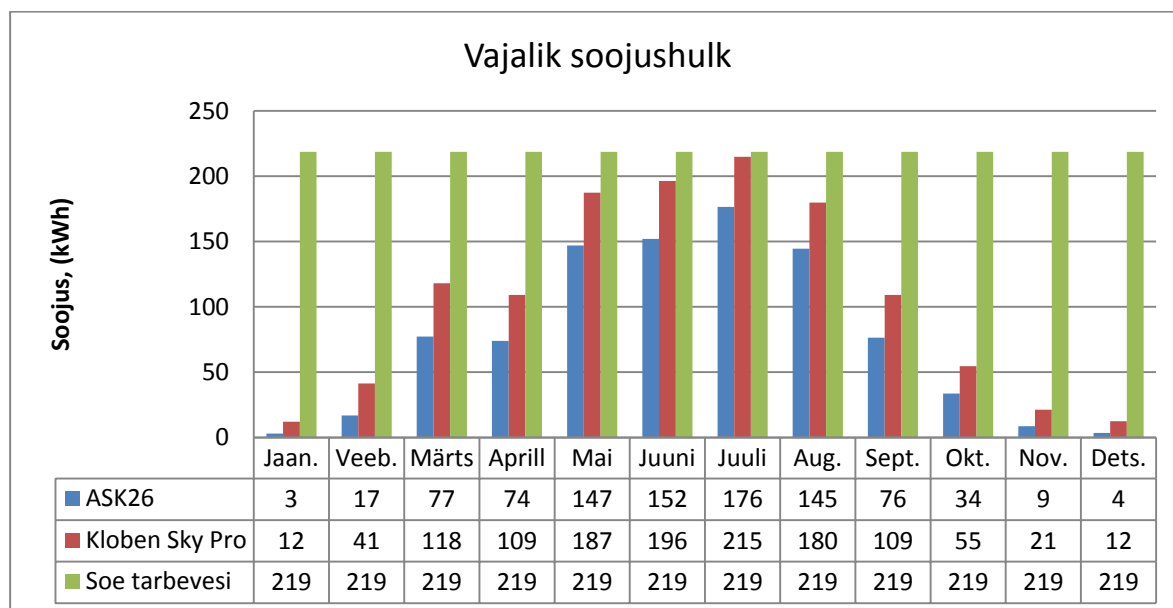
$$Q = 4187 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 48000 \text{ kg} \cdot (55^\circ C - 8^\circ C) = 9445872000 \text{ J} \cong 2623,9 \frac{kWh}{a} \quad (7.2)$$

Ühes kuus sooja vee valmistamiseks vajaminev energiahulk:

$$Q = 2623,9 \frac{kWh}{a} \div 12 \cong 219 \frac{kWh}{k} \quad (7.3)$$

Sele 7.1 kajastab kui palju sooja vee vajadusest katavad päikesekollektorid. Kaldenurgaks on valitud 45° vastavalt maksimaalsele tootlikkusele antud kaldenurkade võrdluses. Kuna vaakumtorukollektori tootlikkus oli võrdne nii 40° kui ka 45° korral, tehti valik arvestades lamekollektori suurimat toodangut. Lamekollektori paneelide arvu ja vaakumtorukollektori torude arvu valimisel jälgiti, et toodang ei ületaks soojuste vajadust. Valiti 1 lamekollektori

paneel ja 12 vaakumtorukollektori toru. ASK 26 kasulik soojuse toodang on 913 kWh/a, Kloben Sky Pro 12 CPC 58 kasulik soojuse toodang on 1256 kWh/a.



Sele 7.1. Kollektorite poolt toodetav soojus ja sooja tarbevee vajadus

7.1 Sooja tarbevee valmistamine elektriga

Võrdluse aluseks võeti olukord, kus osa vajaminevast soojast veest tehakse elektriga. Elektri hinnaks võeti 130 EUR/MWh – hinnanguline hind, mis sisaldab elektrienergia hinda, võrguteenuse hinda, taastuvenergia tasu, elektriaktsiisi ja käibemaksu. [29], [30]
Arvestatud on ka jahtumiskadusid (15 %) sooja tarbevee valmistamisel. [31]

Rahaline kokkuhoid aastas kui lamekollektori ASK 26 kasulik soojuse toodang on 913 kWh/a:

$$913 \frac{kWh}{a} \cdot 0,13 \frac{\text{€}}{kWh} = 118,7 \text{ €/a} \quad (7.4)$$

Rahaline kokkuhoid aastas kui vaakumtorukollektori Kloben Sky Pro 12 CPC 58 kasulik soojuse toodang on 1256 kWh/a:

$$1256 \frac{kWh}{a} \cdot 0,13 \frac{\text{€}}{kWh} = 163,3 \text{ €/a} \quad (7.5)$$

7.2 Sooja tarbevee valmistamine ASK 26 lamekollektoriga

Lamекollektori ASK 26 puhul tehti kindlaks, mitu paneeli tuleks paigutada, et tagada sooja vee valmistamiseks vajaminek energiahulk. Seejärel küsiti hinnapakkumist kollektoreid müüvalt ettevõttelt kogu süsteemi väljaehitamiseks. Oluline on, et kollektori toodang ei ületa sooja tarbevee vajadust kõige suurema tootlikkusega kuus, milleks on juuli. Uuritakse kollektorit, mis on paigutatud 45-kraadise kaldenurga korral.

Päikesekollektorite poolt toodetava soojuse arvutamise meetodika järgi ei ületa ühe lamekollektori paneeli korral kollektori toodang soojuse vajadust juulis. Toodetava soojuse hulk on 913 kWh/a. Arvestatud on süsteemi jahtumiskadusid – 15 %. [31]

Ettevõttelt küsitud hinnapakkumise tulemused olid järgnevad:

- 1 kollektor – 500 €
- Torustik koos pumbagrupi ja automaatikaga – 600 €
- Katusekinnitused ja paigaldus – 500 €
- Boiler – 700 €

Hindadele lisandub käibemaks. (20%)

1 paneeliga süsteemi kogumaksumus on järgmine:

$$1 \cdot 500\text{€}(+km) + 600\text{€}(+km) + 500\text{€}(+km) + 700\text{€}(+km) = 2760 \text{ €} \quad (7.6)$$

Tasuvusaeg 1 paneeliga lamekollektori puhul on järgmine:

$$\frac{2760\text{€}}{118,7\text{€}/a} = 23,3 a \quad (7.7)$$

7.3 Sooja tarbevee valmistamine Kloben Sky Pro 12 CPC 58 vaakumtorukollektoriga

Vaakumtorukollektori Kloben Sky Pro 12 CPC 58 puhul tehti kindlaks, mitu vaakumtoru tuleb süsteemile paigutada, et tagada sooja vee valmistamiseks vajaminev energiahulk. Seejärel küsiti hinnapakkumist kollektoreid müüvalt ettevõttelt kogu süsteemi väljaehitamiseks. Siin tuleb samuti jälgida, et kollektori toodang ei ületa sooja tarbevee vajadust kõige suurema tootlikkusega kuus, milleks on juuli. Uuritakse kollektorit, mis on paigutatud 45-kraadise kaldenurga korral.

Päikesekollektorite poolt toodetava soojuse arvutamise meetodika järgi ei ületa 12 toruga kollektori toodang soojuse vajadust juulist. Toodetava soojuse hulk on 1256 kWh/a. Arvestatud on süsteemi jahtumiskadusid – 15 %. [31]

Ettevõttelt küsitud hinnapakkumise tulemused olid järgnevad:

- 1 toru hind – 70 €
- Torustik koos pumbagrupi ja automaatikaga – 600 €
- Katusekinnitused ja paigaldus – 500 €
- Boiler – 700 €

Hindadele lisandub käibemaks. (20%)

12 vaakumtoruga süsteemi kogumaksumus on järgmine:

$$12 \cdot 80€(+km) + 600€(+km) + 500€(+km) + 700€(+km) = 3168 € \quad (7.8)$$

Tasuvusaeg 12 vaakumtoruga kollektori puhul on järgmine:

$$\frac{3168€}{163,3€/a} = 19,4 a \quad (7.9)$$

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti päikeseenergia kasutamist hoone soojusvarustuses Eesti kliimas. Võrdluse aluseks võeti Eestis kõige levinumad kollektorite tüübid aktiivse päikesekütte korral – lamekollektor ja vaakumtorukollektor.

Kollektorite poolt toodetava soojuse arvutamiseks kasutati tehnilisi näitajaid, mis on toodud sertifitseerimissüsteemi The Solar Keymark alusel väljastatud sertifikaadis ja Jan Erik Nielsen'i poolt välja töötatud arvutusprogrammi. Autor valis uuritavateks kollektoriteks lamekollektor ASK 26 ja vaakumtorukollektor Kloben Sky Pro 12 CPC 58. Sertifikaadi järgi saadi kollektorite tehnilised andmed ja vajalikud parameetrid.

Mõlema kollektori puhul arvutati välja tootlikkus erinevate kaldenurkade korral. Selgus, et kõige suurema toodangu annavad kollektorid kui nad paigutada 40- või 45-kraadise nurga all. Lamekollektoriga saadi soojuse aastane toodang arvutuste järgi 387 kWh/m² ja vaakumtorukollektoriga vastavalt 551 kWh/m². Nagu tulemustest näha, on vaakumtorukollektori efektiivsus suurem. Võrdlusmomendina toodi välja ka soojuse toodang investeeritud EUR-i kohta, milleks on vastavalt 0,33 kWh/EUR lamekollektori puhul ja 0,4 kWh/EUR vaakumtorukollektori puhul.

Et välja selgitada, kumb vaadeldavatest kollektoritest oleks Eesti kliimas tehnilis-majanduslikult optimaalsem, leiti mõlema kollektori puhul lihttasuvusaeg võrreldes elektri kasutamisega soojuse genereerimiseks. Ettevõteltel küsitud hinnapakumisel kogu süsteemi väljaehitamiseks selgus, et vaakumtorukollektori alginvesteering on suurem. Lihttasuvusajaks võrreldes elektri kasutamisega soojuse genereerimiseks tuleb lamekollektori puhul 23,3 aastat ja vaakumtorukollektori puhul 19,4 aastat.

Antud tulemuste põhjal selgus, et tehnilis-majanduslikult on kõige optimaalsem kasutada vaakumtorukollektorit. Kuigi vaakumtorukollektor on alginvesteeringult kallim, andis see odavama soojuse hinna kui lamekollektor.

SUMMARY

The purpose of this study was to examine the use of solar thermal energy in the heat distribution system in the Estonian climate. The comparison was based on the most common types of collectors used in Estonia in the active solar heating systems – the evacuated tube collector and the flat-plate collector.

Calculation program created by Jan Erik Nielsen and technical indicators, which are issued under The Solar Keymark Certification were used in order to calculate the heat produced by the collectors. The author chose the flat-plate collector ASK 26 and the evacuated tube collector Kloben Sky Pro 12 CPC 58 to be used in this study. The collectors specifications and necessary performance parameters were obtained by The Solar Keymark Certification.

The productivity of both collectors were calculated in different angles. It appeared that the collectors were the most productive if the collectors placed at an angle of 40 or 45 degrees. According to the calculations flat-plate collector's annual net production of heat was 387 kWh/m² and for evacuated tube collector it was 551 kWh/m². As seen from the results, the efficiency is higher with evacuated tube collector. Also the heat production per invested EUR was calculated for comparison which respectively are 0,33 kWh/EUR for flat-plate collector and for 0,4 kWh/EUR evacuated tube collector.

To find out which of the observed collectors would be techno-economically more optimal in the Estonian climate, the profitability for both collectors were calculated and compared to the circumstance where heat was generated by electricity. The system, where domestic hot water was heated by the collectors, was observed and the comparison was based on a situation in which the water was heated by electricity. The asking price of the companies for the construction of the whole system revealed that the initial investment is higher for the evacuated tube collectors. The payback period for the flat-plate collector is 23,3 years and for the evacuated tube collector it is 19,4 years.

The results showed that it is techno-economically more optimal to use evacuated tube collector. Even though the evacuated tube collector's initial investment is higher, we can see that it gives a lower price for heat than flat-plate collector.

KASUTATUD ALLIKAD

1. Ots, A. „Soojustehnika aluskursus“, Tallinn 2011. Lk. 756.
2. Tanning, L. „Maaailma energia ülevaade“, Tallinn 2010. Lk. 104
3. Tanning, L. „Maaailma energia ülevaade“, Tallinn 2010. Lk. 105.
4. What Is Solar Energy? [WWW] <http://whatsolarenergy.net> (26.09.2013)
5. Energy Information Administration kodulehekülg [WWW] <http://www.eia.gov> (26.09.2013)
6. Solar Panels Plus [WWW] <http://www.solarpanelsplus.com/all-about-solar/how-solar-heating-works> (08.05.2014)
7. Solarhomeenergy's Weblog [WWW] <http://solarhomeenergy.wordpress.com> (08.05.2014)
8. Solar Thermal Energy [WWW] http://courses.engr.illinois.edu/npre201/webproject/projects_2008/Klenck%20and%20Basu/SolarThermalWebPage_files/Page324.htm (08.05.2014)
9. Soletek OÜ kodulehekülg [WWW] <http://www.soletek.eu/Tooted> (26.09.2013)
10. Flat Plate Solar Collectors [WWW] http://www.flasolar.com/active_dhw_flat_plate.htm (26.09.2013)
11. Soletek OÜ kodulehekülg [WWW] <http://www.soletek.eu/Lamekollektorid> (26.09.2013)
12. Tomson, T. „Helioenergeetika“, Tallinn 2000. Lk. 41.
13. Tomson, T. „Helioenergeetika“, Tallinn 2000. Lk. 41-44.
14. Konspekt aines „Soojus- ja massileviseadmed“, A. Vrajer
15. Keskkonnatehnika otsustajate ja asjatundjate ajakiri [WWW] <http://www.keskkonnatehnika.ee/?head=2&pageid=278&language=estonian> (28.09.2013)
16. Mahjouri, F. Vacuum Tube Liquid Vapor (Heat Pipe) Collectors. [Online] Thermo Technologies (28.09.2013)
17. Home Power kodulehekülg [WWW] <http://www.homepower.com/articles/solar-water-heating/equipment-products/solar-collectors-behind-glass> (28.09.2014)
18. Volker-quaschning kodulehekülg [WWW] <http://www.volker-quaschning.de/index.php>, <http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals4/index.php> (17.03.2014)

19. Akrom-Ex OÜ kodulehekülg [WWW]
<http://www.akromex.com/2012/#.U2eR7qKODiw> (06.05.2014)
20. ESTIF kodulehekülg [WWW] <http://www.estif.org>,
<http://www.estif.org/solarkeymarknew/index.php> (17.03.2014)
21. ESTIF kodulehekülg [WWW] <http://www.estif.org/solarkeymark/collector-theory.php>
(17.03.2014)
22. Solar Pro kodulehekülg [WWW] <http://solarprofessional.com/articles/design-installation/optimizing-thermal-collector-tilt-angles> (17.03.2014)
23. HOMER Energy kodulehekülg [WWW] <http://www.homerenergy.com> (17.03.2014)
24. Päikesekollektori tehniline informatsioon. The Solar Keymark sertifikaat DIN
CERTCO 011-7S746 F
25. Päikesekollektori tehniline informatsioon. The Solar Keymark sertifikaat DIN
CERTCO 011-7S1476 R
26. Konspekt aines „Soojusvarustussüsteemid“, A. Hlebnikov
27. 50Pluss kodulehekülg [WWW] <http://www.50pluss.ee/saastlik-eluviis> (13.05.2014)
28. Engineering Toolbox kodulehekülg [WWW]
http://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html
(13.05.2014)
29. AS Eesti Energia kodulehekülg [WWW] <https://www.energia.ee/elektriarve-kujunemine> (06.05.2013)
30. AS Eesti Energia kodulehekülg [WWW] <https://www.energia.ee/et/hinnakiri>
(06.05.2013)
31. ESTIF kodulehekülg [WWW] http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/policies/downloads/Simple_Calculation.pdf (17.03.2014)