

Esa Savola

PERUNAJAUHOTEHTAAN ENERGIATE- HOKKUUDEN JA ENERGIAOMAVARAI- SUUDEN PARANTAMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Esa Savola: Perunajauhotehtaan energiatehokkuuden ja energiaomavaraisuuden parantaminen
Improving the energy efficiency and energy self-sufficiency of the potato starch factory
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Toukokuu 2023

Energianhankinnan muuttuva toimintaympäristö on aiheuttanut viime aikoina suurta vaihtelua sähkön hinnoissa. Tämä on aiheuttanut haasteita yritysten liiketoiminnan suunnittelulle sekä toiminnan kannattavuudelle. Muuttunut toimintaympäristö on asettanut vaatimuksen investoinneille, jotka pyrkivät kehittämään yrityksen prosessien energiatehokkuutta sekä energiaomavaraisuutta. Tämän työn tarkoituksena on tarkastella perunajauhotehtaan prosessin energiankulutusta ja pohdita millä keinoin sitä voitaisiin pienentää. Toisaalta keinona varautua vaihtelevia sähkön hintoja vastaan tarkastellaan tapoja parantaa energiaomavaraisuutta.

Työn alussa tarkastellaan tärkkelysperunajauhon valmistamista ja käyttöä. Perunajauhon valmistamisessa perunoista erotetaan kaikki ylimääräinen ja vain tärkkelys jää jäljelle. Monivaiheisessa prosessissa pesun ja murskauksen jälkeen ainevirrasta erotetaan soluneste ja perunakuitu. Tämän jälkeen ylimääräinen neste poistetaan kuivaamalla, jonka jälkeen saadaan valmista perunatärkkelysjauhoa. Suurin osa valmistetusta jauhosta menee kemianteollisuuden käyttöön, mutta käyttöä on myös esimerkiksi elintarviketeollisuudessa.

Tärkkelysperunajauhon valmistusprosessissa kuitenkin kuluu paljon energiaa. Iso osa energiasta kuluu yleisesti käytetyssä leijukuivauksessa, jossa kuivausilman lämmittämiseen käytetään nestekaasua. Käytetyn ilman korkean lämpötilan takia poistoilman mukana menee paljon energiaa hukkaan. Tämän energian talteen ottamiseksi voitaisiin käyttää lämmöntalteenottojärjestelmiä. Kohteissa, joissa tulo- ja poistoilma kanavat sijaitsevat erillään, toimivin vaihtoehto on nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä. Siinä energia siirretään lämmönsiirtonesteeseen avulla ilmavirrasta toiseen, jolloin vältetään myös kostean ja kuivemman ilman sekoittuminen.

Energiaomavaraisuudella taas tarkoitetaan sitä, että yritys pyrkii tuottamaan osan käyttämästään energiasta itse esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimaloiden avulla. Tässä työssä tarkastelu rajattiin sähköä tuottaviin aurinkopaneelijärjestelmiin niiden helpon saatavuuden ja nopean yleistyksen takia. Aurinkopaneelijärjestelmän mitoitus varten luotiin laskentatyökalu, jonka avulla voidaan mitoittaa erilaisia paneelijärjestelmiä käyttäen haluttuja alkuarvoja.

Tärkeässä osassa työssä esitettyjen kehitysehdotusten arvioinnissa on niiden taloudellinen kannattavuus. Sekä lämmöntalteenotto- ja aurinkopaneelijärjestelmän tapauksessa käytettiin kuluarvioimiseen sellaista metodia, jossa puolet kuluista katetaan omalla pääomalla. Loppuosa katettiin lainalla, jonka koroksi määriteltiin 5,1 %. Esimerkki lämpötiloissa 400 kW lämmöntalteenottojärjestelmä aiheuttaa vuosittain noin 9400 € säästöt. Järjestelmän arvioidulla hankintakustannuksella tämä tarkoittaa lainalle yhdeksän vuoden ja järjestelmälle 15 vuoden takaisinmaksuaikaa. Aurinkopaneelijärjestelmälle tehtiin esimerkki mitoitus noin 80 kilowatin järjestelmästä. Järjestelmän vuotuiseksi säästökseen saatiin 4970 €, kun sähkön hinnaksi arvioitiin 0,08013 €/kWh. Järjestelmän arvioidulla hankintakustannuksella lainalle saadaan 13 ja järjestelmälle 21 vuoden takaisinmaksuaika.

Tehtyjen esimerkkilaskelmien perusteella varsinkin lämmöntalteenottojärjestelmään investoiminen olisi järkevää. Se tuottaisi vuodessa merkittäviä säästöjä ja myös takaisinmaksuajat olisivat suhteellisen lyhyet. Aurinkopaneelijärjestelmän tapauksessa investoiminen ei olisi järkevää kustannusten takia. Nykyisillä sähkön hinnoilla takaisinmaksuajat ovat pitkät ja parempi kannattavuus vaatisi sähkön hinnan nousua. Kuitenkin jos haluttaisiin lisäsuojaa hinnanvaihteluista vastaan voisi järjestelmän investoimista harkita.

Avainsanat: Tärkkelysperunajauho, energiatehokkuus, energiaomavaraisuus, lämmöntalteenotto, aurinkoenergia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PERUNAJAUHON VALMISTAMINEN JA KÄYTTÖ	2
2.1 Perunajauhon teollinen valmistaminen	2
2.2 Perunajauhon käyttö elintarvike- ja kemianteollisuudessa	5
3. PROSESSIN ENERGIANKULUTUS JA ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN	6
3.1 Prosessin energiankulutus	6
3.2 Lämmöntalteenotto	7
4. ENERGIAOMAVARAISUUDEN PARANTAMINEN	12
5. MITOITTAMINEN JA TALOUDELLISET VAIKUTUKSET	15
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	21

1. JOHDANTO

Kaikki teollinen tuotanto kuluttaa paljon energiaa, ja se onkin usein yksi tuotannon merkittävimmistä kulueristä. Energiaa kuluu niin tuotantoprosesseihin kuin muihin ylläpitäviin toimintoihin, kuten valaistukseen ja lämmitykseen. Yritystoiminnan kannattavuuden parantamiseksi on tärkeää, että yritys saa pidettyä energiankäytön kustannukset mahdollisimman alhaisina. Tämän varmistamiseksi yritysten on tärkeä varmistaa prosessien energiatehokkuus.

Muutokset maailmanpolitiikassa ovat kuitenkin aiheuttaneet yritystoiminnalle uuden haasteen. Epävakaas ja toimitushaasteet energiasektorilla ovat aiheuttaneet ongelmia sähkön saatavuuden lisäksi sähkön hinnassa. Viime vuoden aikana sähkön hinnan vaihtelut ovat kasvaneet vaikeuttaen liiketoiminnan ennustamista ja kannattavuutta [1]. Nämä tapahtumat ovat kiihdyttäneet entisestään tulevaisuuden energiamurrosta ja varsinkin energiaomavaraisuuden rooli niin valtio- kuin yritystasolla on kasvanut.

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella perunajauhotehtaan tuotantoprosessin energiakulutusta ja pohtia, miten prosessin energiatehokkuutta ja energiaomavaraisuutta voitaisiin parantaa kustannustehokkaasti. Työ on tehty yhteistyössä Evijärven Peruna Oy:n kanssa, ja työssä tarkastellaan heidän käyttämäänsä tuotantoprosessia ja sen parantamista. Energiatehokkuuden parannusehdotusten lisäksi työn yhtenä osana luodaan laskentatyökalu, jonka avulla tehdasalueelle voidaan mallintaa aurinkopaneelijärjestelmä osana energiaomavaraisuuden parantamista. Työn tavoitteena on tuottaa yritykselle teknistaloudellinen arvio, jota se voi hyödyntää yritystoimintansa kannattavuuden kehittämisessä tulevaisuuden päätöksenteossa.

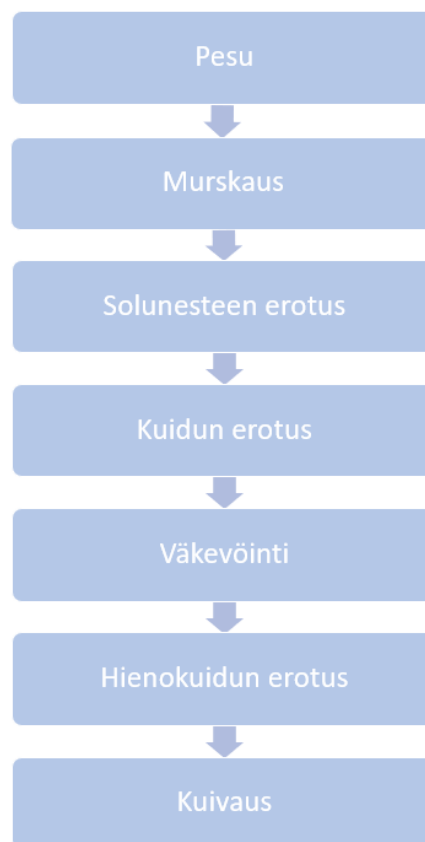
Työn alussa tarkastellaan perunatärkkelyksen valmistusta sekä käyttöä. Tämän jälkeen esitellään tarkasteltavan kohteen energiankäyttö energiamuodoittain. Lisäksi tarkastellaan energiatehokkuuden parantamiseen soveltuvia ratkaisuja painottuen erityisesti leijukuivauksen lämmöntalteenoton kehittämiseen. Seuraavassa luvussa tarkastellaan energiaomavaraisuuden parantamista hyödyntäen aurinkoenergiaa. Ennen johtopäätöksiä tarkastellaan vielä erilaisten keinojen teknistaloudellista sopivuutta ja mitoitusta hyödyntäen laskentatyökaluja. Työn lopussa johtopäätöksiin kerätään työn tärkeimmät havainnot sekä esitetään työn kannalta tärkeimmät tulokset.

2. PERUNAJAUHON VALMISTAMINEN JA KÄYTTÖ

Tärkkelysperunajauhoa valmistetaan teollisesti ympäri maailmaa, ja sillä on olemassa monenlaisia käyttökohteita. Tärkkelysperunajauhon valmistus on monivaiheinen prosessi, jossa raa'asta perunasta erotetaan muut ainesosat ja jäljelle jää vain tärkkelys. Valmistettua tärkkelysjauhoa voidaan käyttää elintarviketeollisuuden lisäksi esimerkiksi kemianteollisuudessa, jossa siitä valmistetaan muunnos tärkkelyksiä.

2.1 Perunajauhon teollinen valmistaminen

Tärkkelysperunajauhon valmistaminen on monivaiheinen prosessi, jossa pääraaka-aineesta, eli tärkkelyksestä, poistetaan kaikki muut aineet. Prosessissa syntyvät sivuainevirrat hyödynnetään, joten ne kerätään talteen erotuksen yhteydessä. Prosessia kuvaava yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Yksinkertaistettu perunajauhon tuotantoprosessi

Perunajauhon valmistus alkaa raaka-aineen vastaanotolla tehtaalle. Raaka-aine, joka sisältää perunoiden lisäksi multaa, kiviä ja muita epäpuhtauksia, saapuu tehtaan vastaanottoalueelle, jossa se punnitaan. Sen lisäksi sille suoritetaan näytteenotto, jotta varmistutaan kuorman laadusta ja tärkkelyspitoisuudesta. [2]

Perunan prosessointi aloitetaan raaka-aineen seulonnalla. Siinä perunoiden seasta poistetaan mahdollisimman paljon kuivamultaa esimerkiksi tärinätehostetun erotusmaton avulla. Kuivamulta putoaa seulan väleistä pois, ja se johdetaan jätevirtana ulos tuotantolaitoksesta. [2] Seulonnasta jäljelle jäänyt raaka-ainevirta johdetaan eteenpäin välivarastointiin.

Varastoinnista perunat johdetaan kevyen tavaran erottimen kautta pesuriin. Kevyen tavaran erottimessa perunoiden seasta poistetaan kaikki niitä kevyempi materiaali. Pesurissa raaka-ainevirta pestään veden avulla siten, että jäljelle ei jää kuin puhdasta raaka-ainetta [2]. Pesurissa haluttu puhtaustaso saavutetaan perunoiden keskinäisen hankauksen lisäksi suihkuttamalla perunoita korkeapaineisella vedellä, jolloin myös perunoiden pintaan kiinni jääneet epäpuhtaudet saadaan poistettua [3].

Perunoiden puhdistamisen jälkeen perunat murskataan. Murskauksessa saadaan nestemäinen perunamassa, jossa perunakuidusta on irrotettu tärkkelys ja soluneste. [4] Murskauksen tavoitteena on tuottaa tasainen massa, jotta siirtäminen seuraavaan prosessin vaiheeseen onnistuu helposti.

Murskauksesta perunamassa johdetaan solunesteen erotukseen, joka tapahtuu dekantterisentrifugilla [2]. Dekantterisentrifugin toiminta perustuu vaakatasossa olevaan säiliöön, jonka sisällä on ruuvikuljetin. Pyörivä ruuvikuljetin kuljettaa säiliön ulkoreunoille hakeutuneen kiinteän aineen ulos säiliöstä ja eteenpäin prosessissa. Massan nestemäinen jae, soluneste, hakeutuu säiliön keskiosaan, josta se voidaan kerätä talteen. [5]

Dekantterisentrifugilta jäljelle jäänyt massa sisältää pääasiassa enää perunakuitua ja tärkkelysmaitoa, joka on veden ja tärkkelyksen seos. Se voidaan johtaa pyöröseulalle, jossa perunakuitu saadaan erotettua [2]. Seulan pyörivä liike ja painovoima aiheuttavat tärkkelyksen kulkeutumisen seulan läpi, jolloin se saadaan kerättyä talteen. Sen sijaan isompi rakenteinen perunakuitu jää seulaan, josta se saadaan kerättyä pois. [5]

Edellisestä vaiheesta saatu tärkkelysmaito ei kuitenkaan ole vielä täysin puhdasta vaan se sisältää tärkkelyksen lisäksi nestettä sekä hienokuituja [2]. Näiden määrää pystytään pienentämään separaattorin avulla. Separaattorissa ainevirta johdetaan pyörivään kartion muotoiseen tilaan, jonka pyörimisliike aiheuttaa raskaamman tärkkelyksen hakeutumisen ulkoreunoille. Samalla kevyempi hienokuitu ja osa ylimääräisestä nesteestä jäävät keskelle, josta ne voidaan johtaa ulos prosessista. [6]

Separoinnin jälkeen nestemäinen seos johdetaan hydrosykloniin. Hydrosyklonissa seoksesta poistetaan vielä jäljelle jäänyttä hienokuitua. [2] Erottaminen tapahtuu syöttämällä ainevirta korkealla paineella suppiloon, jossa sen liike aiheuttaa pyörteen. Pyörteessä raskaammat jakeet hakeutuvat pyörteen reunoille, kun taas kevyempi materiaali hakeutuu pyörteen keskelle ylöspäin nousevaan pyörteeseen. [7] Syötetystä jakeesta jää jäljelle pääasiassa vain tärkkelystä ja vettä, ja suurin osa ylimääräisestä kiintoaineesta saadaan poistettua.

Hydrosyklonilta jäljellä oleva seos johdetaan imukuivaukseen. Imukuivauksessa seoksesta imetään pois nestettä ja jäljelle jäävä kiinteä aine kerätään talteen. Tarkasteltavassa kohteessa imukuivaukseen käytetään avonaista rumpukuivainta [2]. Siinä alipaineistettua rumpua kastetaan vettä ja tärkkelystä sisältävään altaaseen. Rumpu pyörii jatkuvasti, jolloin sen pintaan jää kostea tärkkelysjauhoa samalla kun se imee nestettä pois seoksesta rummun sisällä olevan alipaineen avulla. Rummun pinnalle jääneen tärkkelysjauhon ulkokerros kaavitaan pois, jolloin kostea tärkkelysjauho saadaan talteen. [8] Lisäsuodatuksen varmistamiseksi vain päällyskerros kaavitaan pois, ja alemmat kerrokset jätetään toimimaan suodattimena.

Kun kostea tärkkelysjauho on saatu talteen pitää se vielä kuivata. Tämä tehdään käyttäen leijukuivausta. Leijukuivauksessa kostea tärkkelysjauho sekä kuuma ilma syötetään kuivaimen sisään. Kuivaimessa ainevirrat sekoittuvat samalla kun tärkkelysjauho kuivaa. Tämän takia kuivauksen jälkeen sekoittunut ainevirta johdetaan sykloniin, jolloin tärkkelysjauho ja kostea ilma saadaan erotettua. [9] Tämän vaiheen jälkeen prosessista saadaan ulos valmista tärkkelysjauhoa, joka siirretään ilman avulla varastosiiloon ja siitä edelleen pakkaamoon. [2]

Tärkkelysjauhon lisäksi prosessissa saadaan sivuainevirtoina solunestettä sekä perunakuitua. Ne kerätään talteen ja niitä voidaan käyttää erilaisiin tarkoituksiin. Solunestettä voidaan käyttää lannoitteena peltoalueille, jolloin niiden avulla saadaan vähennettyä tarvetta käyttää kemiallisia lannoitteita. Perunakuitua taas voidaan käyttää esimerkiksi tuotantoeläinten ravintona, mutta myös muita mahdollisia käyttökohteita tutkitaan jatkuvasti.

2.2 Perunajauhon käyttö elintarvike- ja kemianteollisuudessa

Perunajauhoa käytetään ympäri maailmaa sekä elintarvike- että kemianteollisuudessa. Sen laaja käyttö perustuu sen sopiviin ominaisuuksiin, joiden avulla saadaan tuotettua esimerkiksi tietynlaisia kemikaaleja. Suomessa perunajauhoa tuotettiin vuonna 2021 37,5 miljoonaa kiloa [10]. Tässä työssä tarkasteltavassa laitoksessa tuotetaan noin 10 % kaikesta Suomessa tuotetusta jauhosta [2]. Suomen netto tuotantomäärä on 37,6 miljoonaa kiloa kun huomioidaan viennin ja tuonnin osuudet. Tuotannosta käytetään elintarviketeollisuudessa 4,5 miljoonaa kiloa, ruokakäytössä 2,8 miljoonaa kiloa ja loput 30,3 miljoonaa kiloa käytetään muussa teollisuuskäytössä [10].

Elintarviketeollisuudessa perunajauhon käyttö perustuu sen hyvään nesteen sitomiskykyyn. Hyvä nesteen sitomiskyky verrattuna muihin tärkkelystyypppeihin johtuu perunatärkkelysrakeiden suuremmasta koosta, joka mahdollistaa mainitut ominaisuudet. [11] Tämän takia perunajauhoa käytetäänkin runsaasti esimerkiksi lihajalosteiden, kuten makkaran, valmistuksessa. Perunajauhon avulla koostumus saadaan halutunlaiseksi samalla kun makkaraan saadaan sidottua nestettä siten, että myös makuominaisuudet saadaan tavoitelluiksi. [12]

Muussa teollisuuskäytössä tärkkelysperunajauhoa käytetään runsaasti paperiteollisuudessa. Paperiteollisuudessa tärkkelysperunajauhosta valmistettua modifioitua tärkkelystä käytetään vahvistamaan paperin rakennetta sekä tuomaan paperille sen ominainen väri. Tärkkelysperunajauhon käyttö myös mahdollistaa sen, että paperille saadaan sen hyvät tulostus- ja kirjoitusominaisuudet. Paperiteollisuuden lisäksi perunatärkkelyksestä valmistetaan myös muita erikoistärkkelyksiä, joita voidaan käyttää esimerkiksi kemianteollisuudessa. Kemianteollisuus käyttää perunajauhoa, koska se muodostaa vahvoja sidoksia, jotka kuitenkin ovat joustavia. [12]

Perunatärkkelyksen muita käyttökohteita ovat sen käyttö lääketeollisuudessa, tekstiiliteollisuudessa sekä tuotantoeläinten ruokana. Tutkimusten perusteella on myös todettu, että perunatärkkelyksen tuotannosta syntyvistä jätevirroista voitaisiin tuottaa polttoainekäyttöön sopivaa etanolia. Polttoaineen tuotanto perustuu jätevirtojen nesteyttämiseen ja edelleen fermentointiin eli käymiseen. [12] Todennäköisesti tämä toiminta ei kuitenkaan olisi kannattavaa jätteiden ominaisuuksien takia.

3. PROSESSIN ENERGIANKULUTUS JA ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Teollisessa valmistuksessa kuluu runsaasti energiaa ja se on myös tuotannon suurin kuluerä raaka-aineiden hankinnan lisäksi. Tämän takia yrityksille onkin tärkeää tarkastella niiden energiatehokkuutta eli niiden käyttämän energiankäytön hyötysuhdetta. Tehokkuuden parantamiseksi yritykset voivat esimerkiksi pyrkiä suunnittelemaan prosessejaan mahdollisimman paljon energiaa säästäväksi sekä sellaisiksi, että hukkaenergiaa saadaan kerättyä talteen. Samalla saadaan pienennettyä hankittavan sähkön määrää ja luotua merkittäviä kulutussäästöjä yritystoiminnalle.

3.1 Prosessin energiankulutus

Perunajauhon valmistusprosessissa kuluu energiaa runsaasti prosessin eri vaiheissa. Suurin energiankulutus prosessissa on kuivauksella ja erityisesti yleisesti käytetyssä leijukuivauksessa. Muuten prosessissa energiaa kuluu eri jakeita kuljettavien pumppujen käyttöön, perunamassan murskaamiseen sekä jakeiden erotteluun. [2] Perunajauhon valmistuksessa käytetään pääasiallisina energianlähteinä sähköä ja kuivaamiseen nestekaasua, mutta myös muita energiamuotoja voi olla käytössä.

Tarkasteltavassa laitoksessa sähköä kuluu vuodessa 1,2 GWh. Käytetystä sähköstä prosessin osuus on 765 MWh ja loput menevät yleiseen kiinteistön ja sivutoimintojen ylläpitoon. Sähkön lisäksi perunajauhon valmistuksessa käytetään leijukuivauksessa nestekaasupoltinta tärkkelysjauhon kuivaamiseen. Nestekaasua käytetään vuodessa 125 t, jolloin sen osuus vuotuisesta prosessin energiankäytöstä on 1600 MWh, [2] kun nestekaasu on propaania, jolloin siitä saatava energia on 12,8 kWh/kg [13]. Laitoksen käyttämäksi kokonaisenergiaksi saadaan 2,8 GWh.

Tärkkelysperunajauhon tuotanto ei ole kuitenkaan ympärivuotista, vaan tuotanto sijoittuu toukokuun ja lokakuun välille. Tällöin laitoksen energia kuluu pitkälti kesän aikana, eikä tuotannossa ole tarvetta esimerkiksi tilojen erilliselle lämmitykselle peruslämpötilan pitämisen lisäksi. Tuotannon ulkopuolella kuitenkin kuluu energiaa erityisesti jätevesialtaan ilmastukseen. Ilmastukseen käytetään 55 kW pumppua, joka toimii tuotantojakson ajan täydellä teholla ympäri vuorokauden [2]. Käyttövuorokausia sille tulee noin 180, joka vastaa 4320 tuntia. Pumpun käyttämän sähkön määräksi voidaan arvioida noin 237MWh.

Tämä osuus sisältyy prosessin ulkopuoliseen sähköenergian kulutukseen, jonka suuruus on noin 435 MWh. Tällöin pumppu kattaa hieman yli puolet prosessin ulkopuolisesta energiankulutuksesta. Sen takia sen kuluttaman energianosuus onkin hyvin merkittävä.

3.2 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenottojärjestelmän tarkoituksena on ottaa lämpöä sisältävästä ainevirrasta lämpöenergiaa talteen ja näin ollen pienentää kokonaisenergiankulutusta. Talteen otettava energia käytetään usein teollisissa prosesseissa prosessin tuloilman lämmittämiseen tai vaihtoehtoisesti esimerkiksi tuotantotilojen lämmittämiseen tarpeen mukaan. Energiaa voidaan ottaa talteen esimerkiksi savukaasuista tai muista prosessista tulevista lämpimistä virroista olettaen, että niiden lämpötila on riittävän korkea.

Yleisesti lämmöntalteenottoon käytettävät järjestelmät voidaan jaotella niiden toimintaperiaatteen mukaan. Yleisesti käytettävät järjestelmät ovat nestekiertoisen lämmöntalteenotto, vastavirta- ja ristivirtalämmönsiirrin sekä regeneratiivinen lämmönsiirrin. [14] Järjestelmät eroavat toimintaperiaatteensa lisäksi rakenteellisesti ja eroja on myös esimerkiksi ainevirtojen sekoittumisessa.

Nestekiertoisessa lämmöntalteenotossa poisto- ja tuloilmayksiköt voivat sijaita erillään toisistaan ja energiansiirto yksiköiden välillä tapahtuu hyödyntäen nesteseosta. Käytettävä nesteseos on yleensä vesietyleeniglykoliseosta. Järjestelmässä oleva pumppu kierättää nesteseosta paneelien välillä, jolloin talteen saatu energia siirtyy poistoilmasta tuloilmaan. [14]

Vastavirta- ja ristivirtalämmönsiirtimen toiminta perustuu ainevirtojen kulkeutumiseen lämpöpinnan eri puolilla. Energiaa siirtyy pinnan läpi johtumalla lämpimämmästä ainevirrasta kylmempään. Nämä kaksi lämmönsiirrintyyppiä eroavat ainoastaan niissä liikkuvien ainevirtojen suunnan perusteella. Vastavirtalämmönsiirtimessä lämpöpinnan eri-puoliset ainevirrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin, kun taas ristivirtalämmönsiirtimessä ainevirrat liikkuvat ristikkäisiin suuntiin. Näiden lämmönsiirrinten välillä ristivirtalämmönsiirrin on yleensä tehokkaampi johtuen sen paremmasta kyvystä hyödyntää lämpöpintoja tehokkaammin. [15]

Regeneratiivisessä lämmönsiirtimessä toimintaperiaate poikkeaa hieman edellisistä. Siinä energian siirtämiseen käytetään pyörivää kennoa, jolloin osa lämpimän ilman sisältämästä energiasta siirtyy kylmään tuloilmaan [16]. Samalla kuitenkin myös kosteutta siirtyy ilmavirroista toiseen mikä voi aiheuttaa ongelmia.

Regeneratiivinen lämmönsiirrin on tehokkain lämmöntalteenottojärjestelmistä [16]. Sen suurin ongelma on kuitenkin ilmavirtojen osittainen sekoittuminen, jota ei tapahdu

muissa lämmönsiirrin tyypeissä. Tarkasteltavan kohteen tapauksessa, kun pääasiallinen lämmöntalteenoton tarkastelukohde on kuivausilman lämmöntalteenotto, estää se regeneratiivisen lämmönsiirrimen käytön. Tämä johtuu poistoilman täysin kosteasta tilasta, jolloin sitä ei haluta sekoittaa kuivempaan tuloilmaan. Toisaalta muita lämmönsiirrintyyppäjä ei voida käyttää sen takia, että tulo- ja poistoilma aukot sijaitsevat eri paikoissa eikä niiden johtaminen samaan paikkaan ole teknisesti mahdollista. Tällöin ainoaksi kohteseen sopivaksi ratkaisuksi kelpaa nestekiertoinen lämmöntalteenotto järjestelmä, jonka mitoitus tarkastellaan alempana.

Lämmöntalteenottojärjestelmän mitoittamista varten voidaan käyttää kaavoja, jotka sopivat lämmönsiirron arvioimiseen. Lämpökapasiteettivirta saadaan määritettyä yhtälöllä [15]

$$\dot{C} = \dot{m} \cdot c_p, \quad (1)$$

jossa \dot{m} on massavirta yksikössä kg/s ja c_p on aineen ominaislämpökapasiteetti yksikössä J/kg°C. Massavirta saadaan määritettyä tilavuusvirran ja tiheyden avulla yhtälöllä

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho, \quad (2)$$

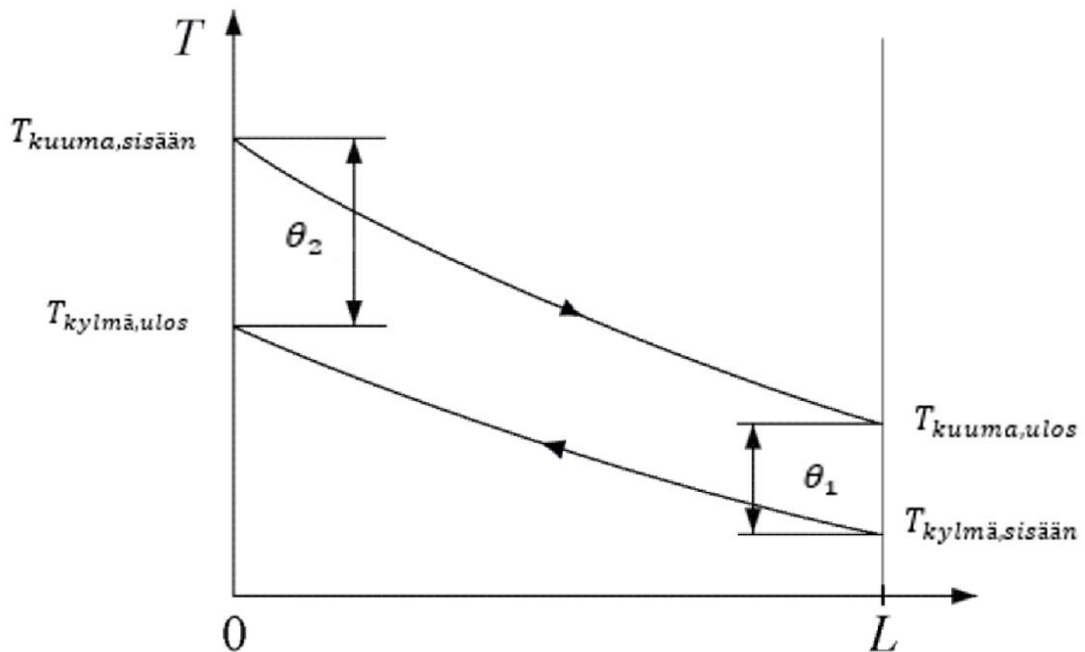
jossa \dot{V} on tilavuusvirta m³/s ja ρ on aineen tiheys yksikössä kg/m³. Kaavalla 1 määritetyn lämpökapasiteettivirran avulla saadaan määritettyä lämmönsiirrimessä siirtyvä teho yhtälöllä [15]

$$\Phi = \dot{C} \cdot \Delta T, \quad (3)$$

jossa \dot{C} on lämpökapasiteettivirta yksikössä W/°C ja ΔT on lämpötilan muutos virtauksessa yksikössä °C. Kun lämmönsiirrimen toimintaa tarkastellaan huomataan, että sen sisällä lämpötila ei ole vakio, joten myöskään lämmönsiirtyminen ei ole tasaista. Tällöin lämpötilan laskemiseen täytyy käyttää logaritmista lämpötilaeroa [15]

$$\Delta T_{ln} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right)}, \quad (4)$$

jossa θ_2 on lämpimän virtauksen tulolämpötilan ja kylmän virtauksen poistumislämpötilan välinen ero. θ_1 on lämpimän virtauksen poistumislämpötilan ja tulevan virtauksen tulolämpötilan välinen ero. Logaritmissen lämpötilaeron tekijät on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Logaritminen lämpötilaero, muokattu lähteestä [15].

Kun logaritminen lämpötilaero on saatu laskettua, saadaan siirtyvä teho laskettua. Lämmönsiirtimessä siirtyvä teho saadaan yhtälöstä [15]

$$\Phi = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln}, \quad (5)$$

jossa U on lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin yksikössä $W/m^2\text{°C}$, A lämmönsiirtopinta-alan suuruus yksikössä m^2 ja ΔT_{ln} on logaritminen lämpötilaero. Lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin kuvaa lämmönsiirtymistä ainevirtojen ja materiaalien välillä virtauksissa. Yllä esiteltyjen kaavojen avulla voidaan laskea eri virtauksien välillä siirtyneen energian lisäksi lämmönsiirtimissä siirtyneet energiat. Muodostamalla nämä yhtälöt yhtä suuriksi saadaan määritettyä, kuinka paljon energiaa saadaan talteen, kun valitaan tietynlaiset raja-arvot lämmöntalteenottojärjestelmälle. [15]

Yhtälön 3 avulla ratkaistaan poistoilmavirrasta nesteeseen ja nesteestä tuloilmavirtaan siirtynyt teho massavirtojen avulla. Yleisesti lämmönsiirtonesteinä käytetään veden ja etyleeniglykolin seosta, jonka massavirta vaikuttaa siirrettävään lämpötehoon. Poistoilma paneelissa tiivistyy vettä, mikä voidaan huomioida lisäämällä tiivistymisen vaikutus ilmasta poistettavan energian määrään. Poistoilman lämpötila vaihtimen jälkeen

määritetään ilman tiivistymisen vaikutusta, mutta vapautuneen energian suuruus tiivistymisen kanssa esitetään vertailun vuoksi. Tiivistymisen huomioiva laskennallinen tarkastelu on haastavaa, mikä johtuu tiivistyneen veden aiheuttamasta lämmönsiirtohäviöstä. Yhtälön (5) avulla voidaan määrittää, kuinka paljon energiaa siirtyy tuloilma ja poistoilma pattereissa. Kun lämpöteholle asetetaan tavoitearvo 400 kW, saadaan lämpötilan muutokset määritettyä. Tavoitearvot ja muut lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lämmönvaihtimen mitoituksen lähtöarvot.

Suure	Arvo	Yksikkö
Lämpöteho	400	kW
Lämmönsiirtokerroin	100	$W/m^2\text{°C}$
Tuloilman lämpötila	5	°C
Poistoilman lämpötila	56	°C
Tuloilman suhteellinen kosteus	50	%
Poistoilman suhteellinen kosteus	100	%
Tuloilman tiheys	1,26698	kg/m^3
Poistoilman tiheys	1,0125	kg/m^3
Ilman tilavuusvirta	8,84	m^3/s
Ilman ominaislämpökapasiteetti 5 °C	1,012	$kJ/kg\text{°C}$
Ilman ominaislämpökapasiteetti 55 °C	1,1934	$kJ/kg\text{°C}$
100 % suht. kosteus		
Ominaislämpökapasiteetti 35 % Etyleeniglykoli	3,59	$kJ/kg\text{°C}$
Veden ominaishöyrystyslämpö	2260	kJ/kg
Lämmönsiirtonesteen lämpötila tulo- patterin jälkeen/ ennen poistopatteria	15	°C
Lämmönsiirtonesteen lämpötila tulo- patteria ennen/ poistopatterin jälkeen	43	°C

Lähtöarvot perustuvat pääasiassa lämpötilojen sekä lämmönsiirtonesteen ominaisuuksien osalta yrityksen saamaan tarjoukseen lämmönvaihtimesta. Lisäksi yrityksellä oli tiedossa poistoilman lämpötila ja tilavuusvirta. [2] Lämmönsiirtokertoimen U arvo valittiin

hyödyntäen tietoa, että ainevirroista toinen on ilmaa matalassa paineessa ja toinen nestettä, joka on suurelta osin vettä [15]. Muut tiedot saatiin ilman ja veden yleisten aineominaisuuksien avulla.

Annettujen tietojen avulla saadaan selvitettyä tuloilman lämpötila vaihtimien jälkeen. Lisäksi saadaan määritettyä tarvittava lämmönsiirtoala sekä lämmönsiirtonesteen massavirta. Taloudellinen tarkastelu voidaan tehdä, kun yrityksen saaman tarjouksen mukaan vastaavan tehoinen järjestelmä ilman asennus- ja rakennuskuluja maksaisi noin 80 000 € [2]. Jos muiksi kuluiksi arvioidaan 30 000 € saadaan kokonaiskuluiksi 110 000 €. Taloudellinen tarkastelu suoritetaan siten, että kuluista puolet katetaan omalla pääomalla ja loppupuolisko katetaan lainalla. Lainan koroksi valitaan 5,1 % [17]. Säästö lasketaan vertaamalla tarvittavan nestekaasun määrää, kun propaania olevan nestekaasun hinta on 0,026 €/kWh [18]. Näiden tietojen avulla lasketaan lainan sekä järjestelmän takaisinmaksuajat.

4. ENERGIAOMAVARAISUUDEN PARANTAMINEN

Teollisuuslaitoksen energiaomavaraisuudella tarkoitetaan laitoksen riippumattomuutta ulkopuolisesta energiantuotannosta. Yleisesti teollisuuslaitoksilla tämä voidaan toteuttaa tuottamalla laitoksen tarvitsema energia itse. Tuotantotapoja voivat olla esimerkiksi tuulitai aurinkovoimalat. Lisäksi pienet voimalaitokset, jotka tuottavat energiaa esimerkiksi biopolttoaineilla, luokitellaan energian itsenäiseksi tuottamiseksi. Energiaomavaraisuuden parantaminen sisältää siis kaikki toimet joiden avulla yritys pyrkii nostamaan itsenäisesti tuotetun energian osuutta.

Viime vuosina varsinkin aurinkopaneelijärjestelmien hankinta osana energiaomavaraisuuden parantamista on korostunut [19]. Paneelijärjestelmien tavoitteena on tuottaa teollisuuslaitoksien tarvitsemaa sähköenergiaa ja näin ollen pienentää sähkönkulutusta. Sähkönkulutuksen pienentämisellä saadaan aikaan merkittäviä kustannussäästöjä. Järjestelmät myös tarjoavat yritykselle pienen puskurin heilahtelevia sähkönhintoja vastaan, mikä tarjoaa vakautta liiketoiminnasta syntyville kuluille.

Aurinkopaneelijärjestelmien yleisyyden ja nykyisen helpon hankittavuuden takia tässä työssä tarkastellaan vain niitä keinona energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Aurinkopaneelijärjestelmiä on monenlaisia, mutta tarkastelu rajoitetaan vain sähköä tuottaviin järjestelmiin.

Aurinkopaneelien toiminta perustuu auringon säteilyn fotonien keräämiseen kennostoon, jossa ne aiheuttavat elektronien irtoamista. Kun kennoston eri osiot yhdistetään toisiinsa, saadaan aikaan virtapiiri, jossa irronneet elektronit kulkevat ja saavat aikaan sähkövirran. Tämä sähkövirta voidaan kerätä ja käyttää hyödyksi esimerkiksi pumppujen pyörittämiseen. Aurinkopaneeli saadaan aikaan yhdistämällä aurinkokennoja ja kun paneelit yhdistetään, saadaan aikaan paneelijärjestelmä. Tällä tavalla järjestelmän jännitettä sekä saatua sähkötehoa saadaan nostettua sekä säädettyä halutunlaiseksi. Paneelien lisäksi järjestelmään kuuluvat paneelien telineet sekä kytkentään käytettävä sähköelektroniikka, kuten johtimet ja invertterit eli taajuusmuuntimet. [20]

Aurinkopaneelijärjestelmän sähkön tuotantoon on muutamia vaikuttavia tekijöitä. Paneelijärjestelmän koko sekä tehokkuus vaikuttavat järjestelmän sähköntuotantoon. Myös paneelien sijoittelulla sekä suuntaamisella on merkitystä [21]. Suuntaamisella tarkoitetaan sitä, että aurinkopaneelijärjestelmä on asetettu siten, että se on mahdollisimman pitkän ajan valoisasta ajasta kohtisuorassa auringon säteilyä vasten. Tällöin järjestelmän tuo-

tanto on mahdollisimman suuri ja järjestelmällä saadaan tuotettua mahdollisimman paljon energiaa. Sijoittelu taas tarkoittaa sitä, että järjestelmä asetetaan siten, että ympäristö aiheuttaa siihen mahdollisimman vähän varjoja.

Paneelijärjestelmän suuntaamiseen vaikuttaa muutama asia. Järjestelmän sijainnin lisäksi merkittävin tekijä on vuodenaika, sillä varsinkin Pohjoismaissa auringon korkeus vaihtelee merkittävästi vuodenajan mukaan. Tässä työssä suuntauksen kulma pidetään vakiona ympäri vuoden ja se määritetään sellaiseksi, että sen avulla saadaan suurin mahdollinen tuotanto aikavälillä toukokuu-lokakuu. Tämä aikavälin valinta johtuu siitä, että tuotantolaitoksen suurin ulkopuolinen sähkönkulutus johtuu ilmastuspumpusta, jonka sähkönkulutusta paneelijärjestelmällä pyritään kattamaan. Ilmastuspumppu toimii täydellä teholla koko edellä mainitun ajanjakson, joka on myös yrityksen vuosittaisen tuotannon sisältävä aikaväli.

Aurinkopaneelijärjestelmän optimaalinen kallistuskulma saadaan määritettyä esimerkiksi erilaisilla laskureilla. Käytetyn laskurin avulla järjestelmän optimaaliseksi kallistuskulmaksi tuotantokaudella saadaan 33° [22]. Järjestelmän yleiseen suuntaamiseen taas käytetään perusmallia siitä, että pohjoisella pallonpuoliskolla järjestelmän suuntaaminen etelään on optimaalista. Tämän lisäksi tuotannon määrittämiseksi tarvitaan tieto alueen keskimääräisestä auringon säteilymäärästä sekä käytettävien paneelien tiedot. Paneelien tehon avulla voidaan määrittää se määrä paneeleja, joilla saadaan katettua haluttu osuus sähköenergiankulutuksesta. Aurinkopaneelijärjestelmän tuotantoa voidaan tarkastella yksinkertaisella yhtälöllä [23]

$$E_{PV} = G \cdot A \cdot \eta, \quad (6)$$

jossa G on paneelipinta-alalle saapuva säteily määrä, A on järjestelmän pinta-ala ja η on käytettävien paneelien hyötysuhde. Tämä kaava antaa järjestelmän teoreettisen maksimituotannon eikä se huomioi järjestelmässä syntyviä häviöitä. Häviöt voidaan kuitenkin huomioida käyttämällä lisäkerrointa 0,86, joka saadaan kun häviöiden arvioidaan olevan suuruudeltaan 14 % [24].

Kun käytetään paneelipinta-alalle tulevalle säteily määrälle esimerkiksi tuntikohtaista dataa, saadaan silloin tuotetulle sähkön määrälle laskettua arvio. Tuntikohtaista tietoa saadaan esimerkiksi Ilmatieteenlaitoksen sivuilta, josta pystyy hakemaan tietoa eri mittausasemilta. Tämän tiedon avulla lasketaan jokaisen tunnin sähköntuotanto. Tuntikohtaisten tulosten summana saadaan vuoden aikana tuotettu sähköenergia. Kun tuntikohtai-

sesta energiantuotannosta vähennetään ilmastuspumpun käyttämä sähköenergia, saadaan ilmastuspumpun ja paneelijärjestelmän sähkötase. Tätä voidaan verrata tämän hetkiseen tilanteeseen, jolloin voidaan määrittää esimerkiksi optimaalista järjestelmän kokoa. Myös tuotannon ulkopuolisten kuukausien energiantuotanto huomioidaan ja sen suuruus määritetään.

Kokonaisuutena kuitenkin laskennassa tehdään sellainen yksinkertaistus, että sähkönkulutusta ei tarkastella kuin ilmastuspumpun osalta. Tämän avulla tilannetta voidaan hienommin yksinkertaistaa eikä esimerkiksi varsinaisen prosessin häiriöitä ja vaihtelevaa energiakulutusta tarvitse huomioida. Todellisuudessa tehdään prosessissa kuluu sähköä myös muuhun tuotantokaudella ja sen ulkopuolella. Yksinkertaistus johtaa siihen, että ylimääräinen sähkö myydään. Lisäksi tehdään sellainen oletus, että paneelijärjestelmän tuotanto lasketaan suorana auringonsäteilynä. Tällöin järjestelmälle saadaan optimituotanto, vaikka todellisuudessa järjestelmän tuotanto ei olisi niin suurta. Tämä johtuu siitä, että säteilynkulma vaihtuu eikä kaikkea säteilyä saada talteen.

Aurinkopaneelijärjestelmän mitoittamiseen ja laskentatyökalun luomiseen käytetään Ilmatieteen laitoksen sivuilta saatavia lähtöarvoja. Mittauspaikaksi on valittu Jyväskylän lentoaseman mittauspiste, koska se on kohdetta lähinnä oleva säteilyä mittaava havaintoasema. Laskentaan käytetään vuoden 2022 tuloksia [25]. Aurinkopaneeleiksi on valittu 525 Wp kaksipuoleiset monikidekennopaneelit, joiden hyötysuhteeksi on ilmoitettu 22,1 %. Yksittäinen paneeli on korkeudeltaan 2094 millimetriä ja leveydeltään 1134 millimetriä, jolloin sen pinta-ala on noin 2,4 m². [26] Esimerkkimitoitus tehdään paneelijärjestelmälle, jossa on 150 paneelia. Tuotetun sähkön arvon määrittämiseen käytetään vuoden 2023 helmikuun keskihintaa, joka on 80,13 €/MWh [27]. Järjestelmän kokonaiskustannuksia arvioidaan käyttämällä kuluille arvoa 1 €/kWh [19]. Syntyvistä kustannuksista puolet katetaan omalla pääomalla ja loppupuolisko lainalla. Lainan korkoksi valitaan 5,1 % [17]. Näiden tietojen avulla lasketaan lainan sekä järjestelmän takaisinmaksuajat. Vertailun vuoksi lasketaan myös rajahinta, jolla esimerkki paneelijärjestelmän takaisinmaksuaika olisi 15 vuotta. Tällä rajahinnalla lasketaan lisäksi lainan takaisinmaksuaika.

5. MITOITTAMINEN JA TALOUDELLISET VAIKUTUKSET

Luvuissa kolme ja neljä on esitetty mitoitusperiaatteet lämmönvaihtimelle ja aurinkopaneelijärjestelmälle. Näissä luvuissa määriteltyjen esitetöjen ja laskentatapojen perusteella voidaan nyt määrittää tekniset arvot. Niiden määrittämisen jälkeen saadaan laskettua järjestelmien taloudelliset vaikutukset, minkä jälkeen voidaan arvioida vaihtoehtojen kannattavuutta.

Luvussa kolme esitettyjen lämmönvaihtimen mitoitusperiaatteiden ja lähtöarvojen avulla voidaan nyt määrittää lämmönvaihtimelle halutut arvot. Taulukossa 2 on esitetty laskennasta saadut tulokset.

Taulukko 2. Lämmönvaihtimen mitoituksen tulokset.

Suure	Arvo	Yksikkö
Ilmasta poistettu energia sisältäen tiivistymisen	2 187	kW
Tuloilman lämpötila patterin jälkeen	40	°C
Poistoilman lämpötila patterin jälkeen ilman tiivistymistä	18	°C
Lämmönsiirto pinta-ala	700	m ²
Lämmönvaihto nesteen massavirta	4	kg/s

Laskelmien perusteella tuloilman lämpötilaksi saadaan lämmönsiirtopatterin jälkeen 40 °C. Poistoilman lämpötilaksi saatiin ilman tiivistymistä 18 °C. Tiivistymisessä vapautuva energia on moninkertainen, mikä aiheuttaa todellisuudessa huomattavasti korkeamman poistoilman lämpötilan patterin jälkeen, kun siirretään sama määrä energiaa. Tämä johtuu siitä, että energiaa ei voida ottaa enempää talteen kuin järjestelmä pystyy luovuttamaan eteenpäin. Laskelman perusteella myös lämmönsiirtopinta-alan arvoksi saadaan todella suuri luku. Tämä johtuu järjestelmän heikosta lämmönläpäisykerroimesta. Huono lämmönläpäisykerroin taas johtuu siitä, että energiaa siirretään kahden virtaavan kaasun välillä, jolloin lämmönsiirtyminen ei ole tehokasta.

Saatujen lämmönvaihtimen mitoituservojen perusteella määritetään järjestelmän taloudelliset vaikutukset. Niiden avulla voidaan määrittellä järjestelmän kannattavuutta ja pohdita mahdollisen investoinnin järkevyyttä. Taloudelliset vaikutukset ja järjestelmän takaisinmaksuajat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Lämmönvaihtimen taloudelliset vaikutukset.

Suure	Arvo	Yksikkö
Vuotuinen nestekaasun kustannus	41 481	€
Vuotuinen nestekaasun kustannus lämmönvaihtimella	32 114	€
Vuotuinen säästö	9 367	€
Omapääoma	55 000	€
Lainan suuruus	55 000	€
Lainan takaisinmaksuaika	9	vuotta
Lämmönvaihtimen takaisinmaksuaika	15	vuotta

Taloudellisen laskennan tuloksena saatiin määritettyä lämmönvaihtimen aiheuttama vuotuinen säästö. Lisäksi saatiin määritettyä järjestelmän ja lainan takaisinmaksuajat. Saatujen tulosten perusteella huomataan, että järjestelmän takaisinmaksuaika on suhteellisen lyhyt ja vuotuisten säästöjen suuruus huomattava. Tämän perusteella yrityksen kannattaisi harkita järjestelmän hankintaa, koska sen aiheuttamat vuotuiset säästöt olisivat merkittävät.

Luvussa neljä esitettyjen laskentaperusteiden avulla voidaan tehdä energiantuotanto laskelma aurinkopaneelijärjestelmälle. Esitietojen avulla on määritetty paneelijärjestelmän pinta-ala. Pinta-alan ja vuoden säteilydatan perusteella on määritetty kuinka paljon järjestelmä tuottaa vuodessa energiaa. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Paneelijärjestelmän energiantuotanto.

Suure	Arvo	Yksikkö
Paneelien määrä	150	kpl
Paneeliston pinta-ala	356	m ²
Paneeliston teho	79	kWh
Aurinkoenergian vuosituotanto	62	MWh
Aurinkoenergiantuotanto tuotantokaudella	47	MWh
Pumpun sähkönkulutus tuotantokaudella	243	MWh

Saatujen tulosten perusteella huomataan, että mallinnettu paneelijärjestelmä kattaa vain noin neljäsosan pumpun sähkönkulutuksesta. Tämä johtuu pumpun suuresta energiakulutuksesta. Toisaalta myös Suomen säteilyolosuhteet ovat sellaiset, että ne eivät ole optimaaliset aurinkoenergiatuotannolle. Tuloksista ilmenee myös, että suurin osa energiantuotannosta sijoittuu tuotantokaudelle. Tämä on hyvä asia, sillä silloin myös energiankulutus on suurinta. Tulosten perusteella paneelijärjestelmällä voidaan määrittää taloudelliset lukuarvot. Järjestelmän kustannukset ja takaisinmaksuajat on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Aurinkopaneelijärjestelmän taloudelliset vaikutukset.

Suure	Arvo	Yksikkö
Järjestelmän hinta	1	€/Wh
Sähkön hinta	0,08013	€/kWh
Pumpun sähkön kulutuksen kulut vuodessa	19 426	€
Paneelien tuottaman sähkön arvo vuodessa	4970	€
Järjestelmän kustannus	79 000	€
Omapääoma	40 000	€
Lainan takaisinmaksuaika vuosina	13	vuotta
Järjestelmän takaisinmaksuaika vuosina	21	vuotta
Vaadittu sähkön hinta, jos järjestelmän takaisinmaksuaika on 15 vuotta	0,11	€/kWh
Lainan takaisinmaksuaika, kun sähkön hinta on 0,11 €/kWh	9	vuotta

Taloudellisen laskennan tuloksena saatiin määritettyä aurinkopaneelijärjestelmän tuottaman sähkön arvo vuodessa. Tuotetun sähkön osuus pumpun kulutuksesta on noin viidesosan. Lainan ja järjestelmän takaisinmaksuajat ovat suhteellisen pitkiä, mikä johtuu matalasta sähkön hinnasta. Takaisinmaksuajat kuitenkin lyhenevät huomattavasti, kun sähkön hinta kasvaa. Tämän takia hankintapäätöksen tekeminen onkin erityisen vaikeaa, koska sähkön hinnan tasoa pitäisi pystyä ennustamaan todella monen vuoden päähän. Tämän takia järjestelmän hankinnan todellista kannattavuutta kannattaisi tarkastella siten, että käytettäisiin sähkön hinnalle erilaisia hintaskenaarioita ja pohdittaisiin niiden toteutumistodennäköisyyksiä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tarkoituksena oli tarkastella miten perunajauhotehtaan energiatehokkuutta ja energiaomavaraisuutta voitaisiin parantaa. Tarkastelu aloitettiin käytettävästä prosessista ja sen energiakulutuksesta. Tämän jälkeen tarkasteltiin erilaisia tapoja, joilla prosessia ja liiketoimintaa voitaisiin kehittää. Lopulta tavoitteena oli tarkastella kehitysvaihtoehtojen taloudellista kannattavuutta ja sen perusteella tehdä johtopäätökset.

Perunajauhotehtaan prosessin energiankulutusta tarkasteltaessa huomattiin, että merkittävä osa energiasta kuluu leijukuivaukseen. Tämä johtuu käytettävän ilman korkeasta lämpötilasta ja ilman suuresta käyttömäärästä. Lämmönvaihtimen osalta ensimmäisenä määriteltiin minkä tyyppinen lämmönvaihdin sopisi kohteeseen. Määrittävinä tekijöinä olivat tulo- ja poistoilma aukkojen sijainnin lisäksi vaatimus siitä, että täysin kosteaa poistoilmaa ei haluttu sekoittaa tuloilmaan. Tämän perusteella sopivimmaksi ratkaisuksi valikoitui nestekiertoinen lämmönvaihdin, jossa tulo- ja poistoilmapatterit voidaan sijoittaa eri paikkoihin.

Työssä järjestelmälle mitoitettiin nestekiertoinen lämmönvaihdin, jonka avulla poistoilmasta saatiin kerättyä talteen energiaa. Kerätyn energian avulla voitiin lämmittää tuloilmaa, minkä avulla saatiin aikaan huomattavia vuosittaisia säästöjä. Tässä tarkastelussa huomataankin hyvin se, että varsinkin korkeita lämpötiloja käyttävissä prosesseissa on tärkeä tarkastella sitä, että hukkalämpöä ei päädy ympäristöön.

Energiaomavaraisuuden osalta keskityttiin pääasiassa siihen, miten energiaomavaraisuutta voidaan parantaa aurinkopaneelijärjestelmän avulla. Työssä luotiin aurinkopaneelijärjestelmän mitoitustyökalu, jonka avulla voidaan arvioida halutunlaisen järjestelmän kannattavuutta. Esimerkki mitoituksen perusteella päädyttiin johtopäätökseen, että taloudellisesti tämän hetkisillä sähkön hinnoilla järjestelmään investointi ei olisi kovin järkevää. Kuitenkin korkeammalla hinnalla järjestelmän hankinnan kannattavuus paranisi huomattavasti.

Järjestelmän kannattavuus on kuitenkin vain osa energiaomavaraisuutta. Toinen tärkeä tekijä on se, että järjestelmä tarjoaa yritykselle puskurin muuttuvia hintoja vastaan. Aurinkopaneelijärjestelmät vähentävät ostettavan sähkön määrää, jolloin vaihtelevat hinnat eivät ole niin merkittävässä roolissa. Onkin tärkeää tarkastella tätä tekijää silloin kun markkinoilla on olemassa riski pitkään jatkuvasta, voimakkaasta, sähkön hinnan vaihtelusta. Tämän arviointi voi kuitenkin olla todella vaikeaa varsinkin, kun aurinkopaneelijärjestelmien takaisinmaksuajat ovat pitkiä.

Yritysten tekemillä investoinneilla on kuitenkin iso merkitys siinä, miten heidän liiketoimintansa kehittyi. Varsinkin energiapuolen investoinneilla yritykset voivat parantaa liiketoimintansa kannattavuutta. Kun yritykset investoivat liiketoimintansa kehittämiseen, johtaa se usein myös positiiviseen kilpailuun sekä parhaassa tapauksessa uusien, parempien, toimintamallien luomiseen. Tämä johtaa lopulta tehokkaampaan ja ympäristöystävällisempään liiketoimintaan, joka lopulta tarjoaa yrityksille tavan säästää huomattavia summia samalla vastaten jatkuvasti muuttuvaan kysyntään.

LÄHTEET

- [1] Työ- ja elinkeinoministeriö. Toimialojen tilannekuva nousseiden energiakustannusten johdosta, 2022. https://vm.fi/documents/1410877/104583605/Toimiala_tilanne_ty%C3%B6ryhm%C3%A4_TEM_muistio_8.11.pdf/fd49f541-947a-41e2-db72-ee2aaa6cb64a/Toimiala_tilanne_ty%C3%B6ryhm%C3%A4_TEM_muistio_8.11.pdf?t=1668078388712 (viitattu 26. huhtikuuta 2023).
- [2] Antila M. Henkilökohtainen tiedonanto, Evijärven Peruna Oy, 2023.
- [3] Thomsen L. International Starch: The Production of High Quality Potato Starch, 2018. <http://www.starch.dk/isi/starch/tm5www-potato.asp> (viitattu 18 helmikuuta 2023).
- [4] International Starch Institute, Potato Starch Production. <http://www.starch.dk/isi/starch/img/Tm05-5e%20Potato%20starch.pdf> (viitattu 18. huhtikuuta 2023).
- [5] Berk Z. Food Process Engineering and Technology, San Diego, Academic Press, 217-232, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373660-4.X0001-4>.
- [6] Opetushallitus, Separaattorin rakenne ja toiminta. <https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/separaattorin-rakenne-ja-toiminta.pdf> (viitattu 7. maaliskuuta 2023).
- [7] Ji L, Paul P, Shanbhag BK, Dixon I, Kuang S, He L. Emerging application of hydrocyclone in biotechnology and food processing, Separation and Purification Technology 293, 122992, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122992>.
- [8] Komline-Sanderson, Rotary Drum Vacuum Filter. <https://www.komline.com/products/rotary-drum-vacuum-filter/> (viitattu 18. huhtikuuta 2023).
- [9] Traub D. Flash Drying, 2001. <https://www.process-heating.com/articles/86597-flash-drying> (viitattu 15 huhtikuuta 2023).
- [10] LUKE, Luonnonvarakeskus, Ravintotase muuttujina Vuosi, Elintarvike ja Tieto, 2021, https://statdb.luke.fi:443/PxWebPxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__02_Maatalous__08_Muut__02_Ravintotase/02_Ravintotase.px/ (viitattu 23. helmikuuta 2023).
- [11] Waterschoot J, Gomand S, Fierens E, Delcour J. Production, structure, physico-chemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches, Starch - Starke 67, 14-29, 2015. DOI: 10.1002/star.201300238.
- [12] International Potato Center, Potato Processing and Uses. <https://cipotato.org/potato/potato-processing-uses/> (viitattu 3. huhtikuuta 2023).
- [13] Suomen Kaasuyhdistys ry, Maakaasun käsikirja, 2014. <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/> (viitattu 23. helmikuuta 2023).
- [14] Seppänen O. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka, Helsinki, sisäilmayhdistys, 1996.

- [15] Saari J. Heat exchanger dimensioning, Lappeenranta university of technology, 2010. https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/saari__heat_exchanger_dimensioning.pdf.
- [16] Aktershev SP, Mezentsev IV, Mezentseva NN. Parametric study of a regenerative heat exchanger for ventilation with a periodic change in the air flow direction, Applied Thermal Engineering 202, 117831, 2022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117831.
- [17] Suomen Pankki, Yrityslainojen korot nousivat voimakkaasti vuonna 2022. https://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot2/tilastotiedotteet_fi/rahalaitosten-tase/2023/yrityslainojen-korot-nousivat-voimakkaasti-vuonna-2022/ (viitattu 30. huhtikuuta 2023).
- [18] Index mundi, Propane Monthly Price. <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=propane&months=60¤cy=eur> (viitattu 18. huhtikuuta 2023).
- [19] Philipps S. Photovoltaics Report, Ise Fraunhofer, 2023. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (viitattu 18. huhtikuuta 2023).
- [20] Motiva, Auringosta sähköä, 2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa (viitattu 17. huhtikuuta 2023).
- [21] N'Tsoukpoe KE. Effect of orientation and tilt angles of solar collectors on their performance: Analysis of the relevance of general recommendations in the West and Central African context, Scientific African 15, e01069 ,2022. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e01069.
- [22] Solar Sena, Optimal Solar Panel Tilt Angle Calculator, 2022. <https://solarsena.com/solar-panel-tilt-angle-calculator/> (viitattu 16. huhtikuuta 2023).
- [23] Kalogirou S. McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, San Diego, United Kingdom, Elsevier Science & Technology, 2017. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4986274>.
- [24] PVGIS, Solar calculator, 2023. <https://photovoltaic-software.com/pv-software-calculators/online-free-photovoltaic-software/pvgis> (viitattu 22.3.2023).
- [25] Ilmatieteenlaitos, Havaintojen lataus. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (viitattu 3. huhtikuuta 2023).
- [26] Ralos, Ralos aurinkopaneeli 525 W. <https://ralos.fi/tuote/ralos-aurinkopaneeli-525-wp/> (viitattu 5. huhtikuuta 2023).
- [27] Nord Pool, Market data. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data/1/Dayahead/Area-Prices/FI/Hourly/> (viitattu 18. maaliskuuta 2023).