

Martti Santavuori
Energian tuotto käänteisosmoosilaitteistolle
suolan erottamiseksi merivedestä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

15.9.2015

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Martti Santavuori Energian tuotto käänteisosmoosipumpulle suolan erottamiseksi merivedestä 30 sivua + 3 liitettä 30.11.201
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Jukka Karppinen, lehtori, Metropolia ammattikorkeakoulu. Kari Saari, DI. yli-insinööri, energiatekniikan laitos Aalto-yliopisto.
<p>Työssä selvitettiin, kuinka aurinkokennon ja polttokennon rinnakkain kytkennällä voidaan tuottaa tarvittava sähköteho käänteisosmoosilaitteelle suolan erottamiseksi merivedestä ja mitoittaa tämä järjestelmä valtamerikonttiin siirrettäväksi nopeasti katastrofitilanteisiin välittömän juomavesitarpeen tyydyttämiseksi. Lisäksi tarkasteltiin, voivatko paikallisesti, aurinkovoimalla tuotettu vety ja kymmenkertainen vesivirtaama laskea puhdistetun veden hinnan tasolle, jolla sen käyttö myös kasteluun on mielekästä.</p> <p>Työ perustuu kirjallisiin lähteisiin, joista selvitetään komponenttien rakenne ja toiminta pääpiirteittäin ja lisäksi esitetään niiden hinnat laitteistojen kokoonpanokustannusten selvittämiseksi.</p> <p>Kerätyillä tiedoilla suoritettiin kokoonpano- ja käyttökustannusten kapitalointi 20 vuoden ajalle valituilla vesivirtaamilla. Tämä tehtiin kolmena versiona, katastrofitilanteeseen, toisena kymmenkertaisella virtaamamäärällä kasteluvesikäyttöön ja kolmantena dieselkäytöllä. Saatua energia- ja litrahintoja vertaillaan aiemmin tehtyihin vastaaviin selvityksiin. Vertailun voidaan todeta osoittavan sen, että suunniteltujen laitteistojen tuotteistamisen kustannukset ovat järkevällä tasolla sekä veden puhdistamisen, että valmistuksen ja käytön mukaan tuomien sosioekonomisten mahdollisuuksien kannalta.</p>	
Avainsanat	SWRO, aurinkokenno, PEMfc

Author(s) Title	Martti Santavuori Energy Production for Sea Water Reverse Osmosis System
Number of Pages Date	30 pages + 3 appendices 15 november 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electric Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Jukka Karppinen, Senior Lecturer, Metropolia Kari Saari, Master of Science in Technology, Chief Eng. in the Energy Technology Department, Aalto University.
<p>The purpose of this work was to find out how to use PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) and SOC (Solar Cell) to produce energy for a SWRO (Sea Water Reverse Osmosis system) to filter salt off seawater. Another purpose was to design the configuration so that it fits in a shipping container, to be rapidly transportable to a catastrophe area, where clean water is needed immediately. It was also analyzed, if locally, solar power generated hydrogen, and a bigger water flow cheapen costs of the clean water so much, that it can be used for irrigation.</p> <p>The work is based on literary sources, from which the prices and the functions of components that are needed for the construction of the equipment of both systems, were worked out.</p> <p>The assembling and the operating expenses were recapitalized up for time of twenty years with the collected material and the quantified water flow. This was made with three variations: The first one, when the water flow is 22 cube meters per day and the hydrogen is transported. The second one with 220 cube meters per day with locally produced hydrogen and the third one with energy by a diesel aggregate with 22 cube meter water flow. The costs, cube meter water per euros and kilo watt hour per euros, were compared to similar researches made before. The results indicate that the manufacturing costs are reasonable with both systems for filtering salt from seawater.</p>	
Keywords	SWRO, Solar Cell, PEMfc

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laitteisto	2
3	Laitteiston komponentit	3
3.1	Käänteisosmoosilaitteisto	4
3.2	Aputoiminnot	7
3.2.1	Lämmönvaihdin	7
3.2.2	Laitetilan jäähdytystarve	9
3.2.3	Muut aputoiminnot	10
3.3	Hakkuriteholähde	10
3.4	Ohjaus, taajuusmuuttajat	11
3.5	Superkondensaattorit	14
3.6	Aurinkokenno	16
3.7	Polttokenno	18
3.7.1	Polttokennon mitoittaminen	20
3.7.2	Kennovalinta	22
3.7.3	Vedyn ja kosteutusvirtaamaan tehotarve	23
3.7.4	Hapetus- ja jäähdytysvirtaaman tehotarve	25
3.8	Vetypolttoaine	27
3.9	Suojaus ja mittaus, asennuslaitteisto ja asennusalusta	27
4	Kapitalointi	28
5	Yhteenveto	31
	Lähteet	33

Liitteet

Liite 1. Kymmenkertainen tuotanto.

Liite 2. Dieselvoimalla tuotettu energia.

Liite 3. Taulukot.

Lyhenteet

μScm	Mikrosievertiä senttimetrillä. Mitataan sähkönjohtavuudella partikkeli- pitoisuutta.
AC	Vaihtovirta.
bar	Paineen yksikkö.
C	Kondensaattori, kapasitanssi [F] faradi.
DC	Tasavirta.
e	Matemaattinen vakio, Neperin luku 2,718...
ERT	Turbiinijärjestelmä, jolla rejektipaineella tuotetaan sähkövirtaa.
f	Taajuus [Hz] hertsi.
hp	Hevosvoima, noin 0,75 kW
I	Virta [A].
J	Joule, energian yksikkö, vastaa Ws.
L	Kela, käämi, induktanssi [H] henry.
m	Metri, tai etuliitteenä milli, tuhannesosa.
P	Teho [W].
PEM	Proton Exchange Membrane Fuel Cell, suora protoninvaihto polttokenno.
PX	Rejektipaineen hyödyntäminen.

R	Vastus [Ω] ohmi.
RO	Reverse Osmosis, käänteisosmoosi
SC	Solar Cell, aurinkokenno.
SWRO	Seawater Reverse Osmosis, merivedestä suolan poistava käänteisosmoosi.
T	Lämpötila [$^{\circ}\text{C}$] astetta celsiusta.
TDS - luku	Ilmoittaa liuenneiden partikkeleiden määrän milligrammoina kilogrammassa vettä.
U	Jännite [V].

1 Johdanto

Tarkoituksena oli suunnitella omakotitalolle verkosta riippumaton sähköntuotanto perustuen aurinko- ja polttokennon rinnakkainkäytölle. Opiskelujen edetessä, osaksi toisen ohjaajani yli-insinööri Kari Saaren ajatuksesta, kiinnostus suuntautui sähkön tuottamiseen käänteisosmoosipumpulle suolan erottamiseksi merivedestä.

Syksyllä 2013 selvisi, että Punaisen Ristin vedenpuhdistus katastrofitilanteissa perustuu dieselvoimaan, sekä hiekka- ja aktiivihiihluuodatukseseen, vaikka maailmassa käänteisosmoosilla puhdistetaan miljoonia kuutiometrejä vettä päivittäin [1]. Osmoosilaitteiden sekä sähkökennojen hyötysuhteet, hinnat ja toiminta-ajat ovat kehittyneet tasolle, jolla paikallisesti tuotetun vesilitran hinta alittaa läheltäkin tapahtuvan kuljetuksen kustannukset.

Jo suunnittelun alkuvaiheessa järjestelmän kustannustaso suhteessa tuotetun vesilitran hintaan osoittautui sellaiseksi, että laitteiston rakentaminen puhtaasti kaupallisesta näkökulmasta olisi taloudellisesti kannattavaa. Näin voitaisiin myös tukea alkuperäistä humanitääristä lähtökohtaa.

Koska kaikki tarvittavat laitteet ovat kaupallisesti saatavilla, tässä työssä ei paneuduta yksityiskohtaisesti eri komponenttien rakenteisiin, vaan esitetään toimintaperiaatteet ja mitoitetaan ne halutun vesivirtaamaan mukaan.

Laitteiston pitää olla helposti ja nopeasti siirrettävissä kulloiseenkin toimintapaikkaan.

Työssä edetään esittämällä kaaviona laitteistokokonaisuus. Seuraavaksi määritetään haluttu virtaama ja esitetään pääkomponentit ja mitoitetaan laitteisto. Lopuksi lasketaan kustannukset ja kapitaloidaan litrahinta.

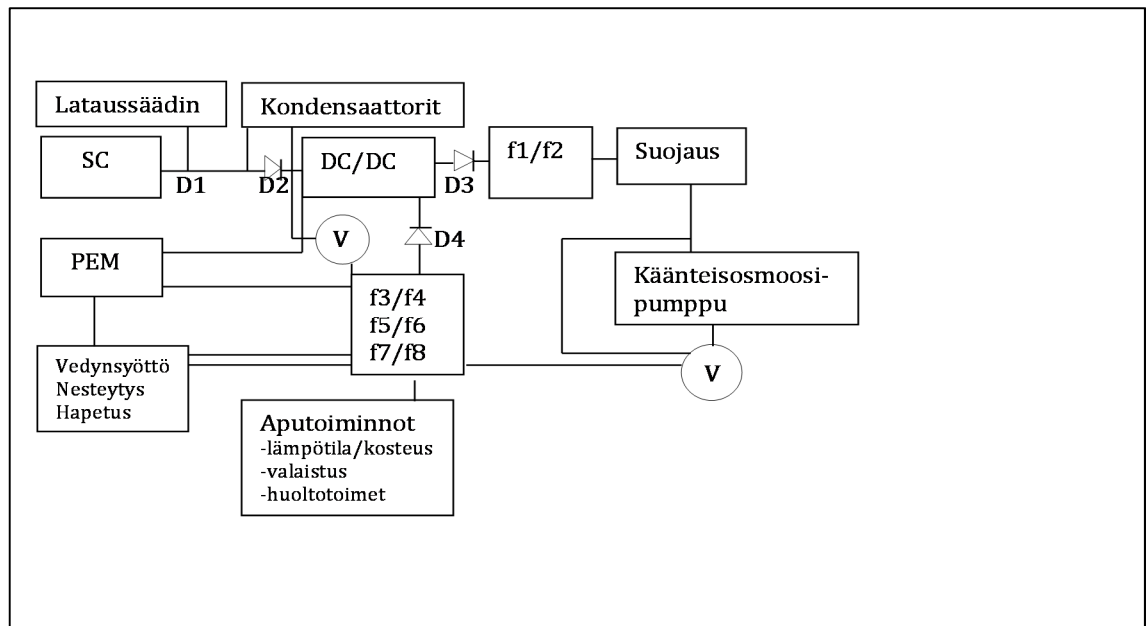
2 Laitteisto

Kuljetettavuus on yksi suunnittelun lähtökohdista. Tämän johdosta laitteisto on mitoitettu siten, että se mahtuu valtamerikonttiin, joka on helposti kuljetettavissa käytännössä minne tahansa ja ankkuroitavissa puhdistettavaan veteen.

SWRO:n (Seawater Reverse Osmosis) tuoton kasvattaminen muutamasta kuutiosta kymmeneen vuorokaudessa ei juuri kasvata sen kokoa. Valittu asennustilavuus asettaa kuitenkin puhtaan veden vuorokausivirtaaman noin kahteenkymmeneen kuutiometriin. Tämä on teholähteiden mitoitusperuste. Valintaperusteina ovat lähteiden kuutiotilavuus suhteessa tehoon, erittäin vähäinen huoltotarve sekä se, että toimiessaan ne ovat täysin saasteettomia. Päästönä on polttokennon puhdas vesi, ja valittuina lähteinä ovat aurinko- ja polttokenno.

Laitteiston toimintaperiaatteena kaksi tasavirtalähdettä, SC (Solar Cell) ja PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) toimivat rinnan. Näistä SC on ensisijainen. SC varaa kondensaattorit ja alkaa syöttää hakkuriteholähdettä, joka edelleen syöttää kuormaa ohjaavaa taajuusmuuttajaa f1/f2. Kun SC alkaa sammua alkavat kondensaattorit purkautua. Niiden yli olevaa jännitettä mitataan ja sen laskettua riittävän alas mittaustieto käynnistää PEM:n. Estosuuntainen diodi D2 estää kondensaattorien varautumisen PEM:n tehosta, joka suuntautuu kokonaisuudessaan hakkuriteholähteeseen syöttämään kuormaa. Kun SC alkaa herätä, rupeaa se varaamaan kondensaattoreita ohjauksen mukaisella teholla. Varauksen ollessa riittävä kondensaattorien jännitteen mitta-
us ohjaa PEM:n sammumaan. Ja sama kierto jatkuu.

Diodit 3 ja 4 suojaavat laitteistoa jännitepiikeiltä, ja taajuusmuuttajat f3/f4 ja f5/f6 ohjaavat PEM:n aputoimintoja. Taajuusmuuttaja f7/f8 vastaa aputoimintojen syötöstä. Toiminta esitetään lohkokaaaviona seuraavalla sivulla kuvassa 1.



Kuva 1. Laitteiston lohkokaavio

Osmoosilaitteiston suunnittelun tavoitteena on syöttövesipumpun vakiovirtaus, jotta tiedetään täsmällisesti kuinka suurelle ihmismäärälle tuotto riittää. On myös tarkoituksenmukaista hyödyntää jo yleisesti myynnissä olevia sovelluksia, jolloin lopputuotteen hinta on kohtuullisen helposti kapitaloitavissa rakentamisen mielekkyyden selvittämiseksi.

Tässä työssä ei keskitytä tehon optimointiin, joka on enemmänkin konkreettisen kokoonpanon sisältö, vaan ensisijaisesti kokoamaan laitteisto yhteensopivista komponenteista, joiden mitoitus on tavoiteltuun vesivirtaamaan nähden mielekkäällä tasolla.

3 Laitteiston komponentit

Komponenttien tiedot on kerätty sekä internetin välityksellä asianomaisten valmistajien sivustoilta että kyselyin suoraan valmistajilta. Tämän lisäksi tarkistettiin laskennallisesti laitteiden tehotarpeet sähkökennojen mitoittamiseksi, jollei valmistajalta oltu saatu näitä tietoja. Tässä työssä esitetään myös hankintahinnat, jotka ovat kapitaloinnin pohjana. Laitteiden elinkaaret ovat valmistajien antamia tietoja.

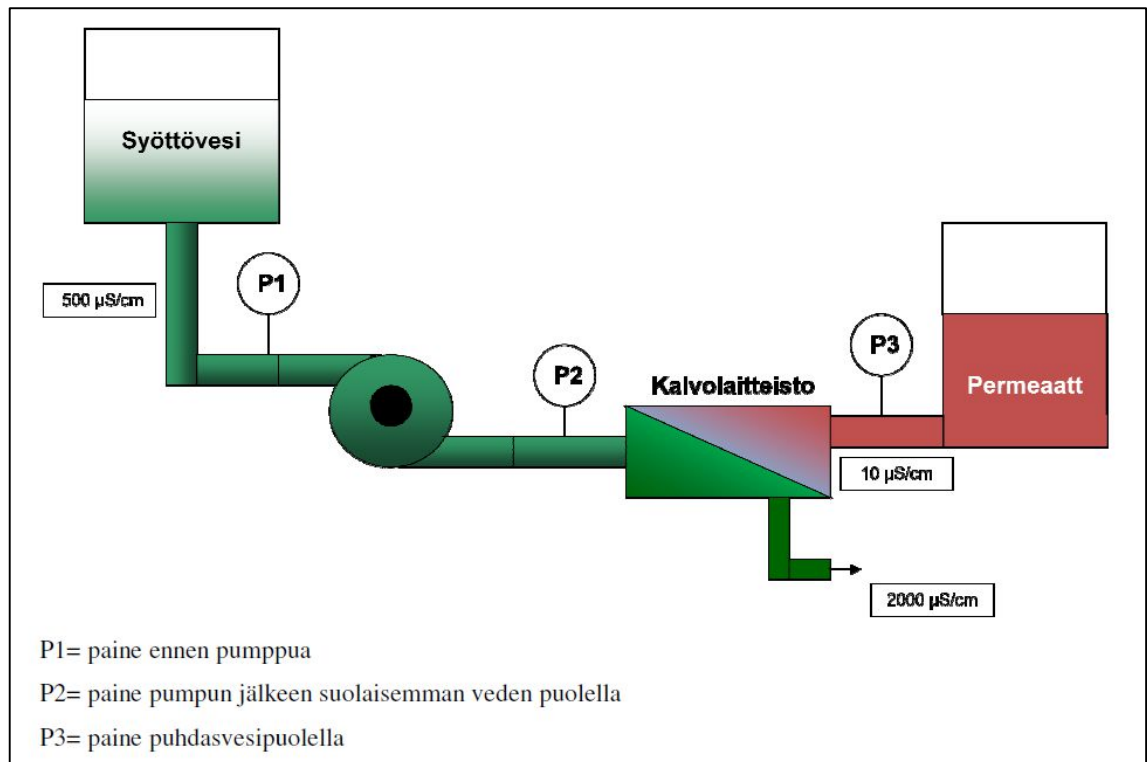
Seuraavassa luettelossa esitetään laitteiston komponentit:

1. käänteisosmoosilaitteisto
2. aputoiminnot (lämmönvaihdin)
3. hakkuritehonlähde
4. ohjaus, taajuusmuuttajat
5. superkondensaattorit
6. aurinkokenno
7. polttokenno
8. vetypolttoaine
9. suojaus, mittaus, asennuslaitteisto, asennusalusta.

3.1 Käänteisosmoosilaitteisto

Osmoosi on ilmiö, jota hyödyntämällä voidaan puhdistaa vettä. Veden osmoottinen paine vähenee, jos siihen liukenee ainesosia, kuten suolaa. Esimerkiksi kasvien juurisoluihin seinämän sisäpuolisessa vedessä on ainesosia liuenneena enemmän kuin maaperän vedessä. Juurisolujen ulkopuolella oleva korkeampi osmoottinen paine ”pumppaa” veden soluseinämän läpi.

Paineistamalla ainesosia sisältävä vesi saadaan tämä ilmiö muuttumaan käänteiseksi, käänteisosmoosiksi. Kalvon läpi pääsee virtaamaan vain pienimolekyylinen puhdas vesi, permeaatti, ja ohivirtaukseksi jää konsentraatti eli rejekti [2, s. 23]. Tämä periaate näkyy seuraavan sivun kuvassa 2.



Kuva 2. Periaatekuva osmoosilaitteistosta. Timo Oja, 2009. Korkeapainekattiloiden vesike-
miakurssi. 15.–16.1.2009 Mikkeli [2, s. 23].

Puhdistettavan veden happamuus ja partikkelipitoisuus määräävät kalvon laadun. Suodatustarve määrää kalvon tyyppin. Opinnäytetyön kohteena on laite, joka ensisijaisesti suodattaa veteen liuennutta suolaa. Kalvot voivat olla putkimaisia tai päällekkäin pakattuja käärittynä spiraalimaisesti.

Puhdistuksen vaatima kalvopaine riippuu puhdistustarpeesta. Murtoveden, kuten Suomenlahti, jossa suolapitoisuus vaihtelee välillä 2–6 ‰, kalvopaineeksi voi riittää 6 bar., kun taas esimerkiksi Atlantin 3 ‰ suolapitoisuuden poistamiseen vaaditaan jopa 60 bar:n kalvopaine [3, s. 2].

Kalvopaineen nostamiseen tarvittavaa sähkötehoa voidaan pienentää huomattavasti käyttämällä kalvoa läpäisemättömän rejectin painetta ja esimerkiksi Clark-pumppua [3, s. 4; 4].

Osmoosilaitteistoja on saatavissa kaupallisesti ja niitä valmistetaan Suomessakin myyntiin. Opinnäytetyössä valitaan hollantilaisen Lenntech BV:n ja amerikkalaisen Well Water Sysemsin sivustoilta, kuvat 3 ja 4 sivuilla 6 ja 7, pumpuksi Epro 6000-SW.

100 to 6,000 Gallons Per Day


EPRO Series Sea Water Commercial Reverse Osmosis Systems 100 to 6,000 GPD

STANDARD FEATURES:

- T.F.C. Sea Water R.O. Membrane
- Corrosion Resistant Triplex Plunger Pump
- 316SS High-Pressure Tubing
- Safety Pressure Relief Valve
- 5-Micron Sediment Prefilter
- Stainless Steel Frame (except on EPRO-100SW)
- Fiberglass Pressure Vessels
- Automatic Feed Water Shut-off Valve

OPTIONAL FEATURES:

- Low Pressure Shut-off Switch
- Flowmeters
- 316 Stainless Steel Pump
- 50Hz Motor
- Prefilter Pressure Gauges
- Automatic Permeate Flush
- TDS Monitor
- High-Rejection Membranes
- 12V(EPRO-100SW Only) or 24V D.C. Motor



MODEL
EPRO-150SW

SYSTEM SPECIFICATIONS:

Model	Production*		3rd Year	Inlet Size	No. of Elements	Element Size	Designed Recovery	MOTOR SPECIFICATIONS:			
	GPD	LPD	Operating Pressure (psi)					60Hz/230V Phase	HP	50Hz/220/380/415V Phase	HP
EPRO-100SW	100	380	905	3/8"	1	2.5" x 14"	6%	1	3/4	1	1/2
EPRO-150SW	150	570	776	3/4"	1	2.5" x 21"	5%	1	1.5	1	1.5
EPRO-350SW	350	1,325	790	3/4"	1	2.5" x 40"	10%	1	1.5	1	1.5
EPRO-600SW	600	2,270	774	3/4"	2	2.5" x 40"	18%	1	1.5	1	1.5
EPRO-1000SW	1,000	3,785	795	3/4"	3	2.5" x 40"	19%	1	2	1	2
EPRO-1500SW	1,500	5,675	885	3/4"	4	2.5" x 40"	25%	1	3	1	3
EPRO-3000SW	3,000	11,350	894	3/4"	3	4" x 40"	35%	3	5	3	5
EPRO-4500SW	4,500	17,035	856	1.5"	5	4" x 40"	30%	3	7.5	3	7.5
EPRO-6000SW	6,000	22,710	927	1.5"	7	4" x 40"	30%	3	10	3	10

*Based on feed water with TDS of 36,000 ppm and temperature of 25°C (77°F)

WEIGHTS & DIMENSIONS: (Optional Features may increase dimensions)

Model	Approximate Shipping Dimensions				Approximate Unit Dimensions			
	Length (in/cm)	Width (in/cm)	Height (in/cm)	Weight (lbs/kg)	Length (in/cm)	Width (in/cm)	Height (in/cm)	Weight (lbs/kg)
EPRO-100SW	20/50	26/66	16/40	90/40	15/38	20/50	10/25	70/32
EPRO-150SW	40/100	30/75	26/66	175/80	35/89	24/60	18/46	150/70
EPRO-350SW	58/150	30/75	26/66	200/90	50/127	24/60	18/46	175/80
EPRO-600SW	58/150	30/75	26/66	230/105	50/127	24/60	18/46	200/90
EPRO-1000SW	58/150	30/75	26/66	260/120	50/127	24/60	18/46	230/105
EPRO-1500SW	58/150	30/75	26/66	290/130	50/127	24/60	18/46	260/120
EPRO-3000SW	70/180	52/132	60/150	750/340	61/155	40/100	48/122	580/264
EPRO-4500SW	70/180	52/132	60/150	750/340	61/155	40/100	48/122	660/300
EPRO-6000SW	70/180	52/132	60/150	950/430	61/155	40/100	48/122	860/390

Kuva 3. Lenntech. Kuvan taulukoissa ovat alimmana tiedot EPRO-6000SW:stä. Sivustoa ei löytnyt enää 12.9.2015. Siksi seuraavalla sivulla kuvassa 4 esitetään vastaavat tiedot.

EPRO-6000SW	6,000	22,710	927	1.5"	7	4" x 40"	30%	3	10	3	10
*Based on feed water with TDS of 36,000 ppm and temperature of 25°C (77°F)											

Kuva 4. Taulukkorivi on vastaava kuin kuvan 3 ensimmäisen taulukon alin rivi. Löydettävissä osoitteista Home » Well Water Systems » RO High Flow » EPRO Standard » EPRO-6000 [5] ja EPRO™ Residential/Commercial Seawater Reverse [18]. Kuvissa oleva TDS-luku tarkoittaa mg liuenneita partikkeleita / kg vettä. Standardimeriveden (valtameret) luku on 34 483 [4, s.17]. Ja 10 hp = 7,5 kW.

Lenntech ei vastannut hintakyselyyn. Kuvan 4 osoitteista löytyi vastaavan pumpun hinnaksi **8000 €** [18]. Tehotarpeeksi saadaan kuvan 3 ylemmästä taulukosta **7,5 kW**, ja toiminta-ajaksi lasketaan 5 000 tuntia yhdellä kalvojen vaihtokerralla.

3.2 Aputoiminnot

Järjestelmän tuottama lämpömäärä ja kosteus ovat niin suuret, että koneellinen jäähdytys ja ilmanvaihto ovat välttämättömiä. Tämän lisäksi tarvitaan sähkönsyöttö sekä huoltotoiminnoille että valaistukselle.

3.2.1 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin on selkeästi ylimitoitettu. Vaihtimeksi valittiin kuvan 5 porvoollaisen Ensto Enervent Oy:n valmistama Pelican eco PRO greenair HP, joka on mitoitettu 350 m³ tilaan [6].



Kuva 5. Pelican eco PRO greenair HP [6].

Laitteen tekniset tiedot ovat taulukossa 1. Taulukosta saadaan suoraan tarvittavaksi tehoksi puhaltimille 340 W ja kompressorille 980 W, yhteensä **1,32 kW**. Laitteen myyntihinnaksi on ilmoitettu **10 563,56 €**. Lämmönvaihtimien toimintaikä on nykyään yleisesti kymmeniä tuhansia tunteja.

Taulukko 1. Pelican eco PRO greenair HP:n tekniset tiedot. Sähkötehot ovat riveillä 5, puhaltimet ja 17, kompressorin [6].

YLEISET TEKNISET TIEDOT	PELICAN PRO GREENAIR HP
Maksimi ilmavirta (suodattimet F5)	+160/-173 l/s
Minimi ilmavirta (suodattimet F5)	+104/-104 l/s
Huoneiston koko lämmitys (1–2 l/s/m ²)	80–160 m ²
Huoneiston koko jäähdytys (1–3 l/s/m ²)	60–160 m ²
Puhaltimet á (tulo ja poisto)	170 W
Kanavakoko	Ø 200 mm
Paino	165 kg
Vakio suodattimet	F5/F5
Vaihtoehtoiset suodattimet	F7/F7
Ylikuumenemissuoja	Kyllä
Ääni tuloilmakanavaan puhallinnopeuksilla 20, 40, 60, 80, 100 %	
LWA, dB(A)	–, –, 49, 52, 52
LPA, dB(A) 10 m ² : äänenabsorptio	–, –, 45, 48, 48
Jännite	230 V~/50 Hz
Sulake	16 A hidas
Lämpöpumpun kylmäaine	R410A, 1,5 kg
Kompressorin nimellisteho	0,98 kW
Lämpöpumpun lämmitys COP	6,04
Lämpöpumpun jäähdytys EER *	9,22
Kondenssivesiliitäntä	2 kpl Ø 32 mm
Kompressorin säätö	30–100 %
Poistoilman min. lämpötila, jossa saavutetaan hyvä lämmitysteho	+20°C

* EER = COP*3,4

PRO Greenair HP -laitteilla saavutettava lämmitysteho lasketaan seuraavasti:

$$\begin{aligned} \text{Lämmitysteho} &= \rho_i \times c_{pi} \times q_v \times \Delta T \\ &= 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ kJ/(Kxkg)} \times 120 \text{ l/s} \times 9^\circ\text{C} = 1296 \text{ W} \end{aligned}$$

ρ_i	ilman tiheys, 1,2 kg/m³
c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1,0 kJ/(kgK)
q_v	ilmavirta, l/s
ΔT	ylilämpö, °C

3.2.2 Laitetilan jäähdystarve

Laitteistoa tullaan käyttämään todennäköisimmin alueilla, joissa ympäristön ja laitetilan keskimääräisenä vuorokautisena lämpötilaerona voi olla jopa 20 °C. Tämän rinnalla suurimman jäähdystarpeen aiheuttaa kuitenkin polttokenno. Muun laitteiston vähäisten resistiivisten häviöiden johdosta niiden tuottamaa lämpö määrää ei kennolämmön eikä tilajäähdystyksen lisäksi tarvitse ottaa laskennallisesti huomioon määriteltäessä jäähdystykseen kuluva tehoa. Esimerkiksi läpi virtaava vesi jäähdyttää osmoosilaitetilan.

Alaluvun 3.7.4 mukaan polttokennon ideaali toimintalämpötila on 60 °C. Polttokennon vapaasta konvektiosta ja säteilystä johtuva lämmön siirtymä voidaan laskea kaavalla yksi (liite 3)

$$\Phi = \alpha_{kok} A \Delta t \frac{W}{m^2 K},$$

(1)

jossa α_{kok} on liitteestä kolme saatu kokonaislämmönsiirtoluku. Konvektiosta tulee 5,5 ja säteilystä noin 8 W/m²K. A on kennon pinta-ala 5,6 m² ja Δt 40 K pinnan ja ympäristön välinen lämpötila ero. Tässä kennon konvektion lämmönsiirtoluku on laskettu olettaen koko pinta pytytasoiseksi

$$\Phi_{Ke} = 13,5 * 5,6 * 40 \frac{W}{m^2} = 3,0 \text{ kW}$$

Näin suurta siirtymää ei ole mielekäästä jäähdyttää, joten kenno lämpöeristetään ympäristöstään. (Ohjaaja Kari Saaren kommentista) Normaalin lämpöeristeen lämmönjohtavuus on noin 0,04 W/mK, jolloin 10 cm paksun eristeen lämmönläpäisykerroin on 0,4 W/m²K. Lämmönsiirto kennosta ulkotilaan pienenee siis noin 1/30 osaan (13,5 W/m²K - --> 0,4W/m²K), jolloin kennosta konttiin siirtyvä lämpöteho on vain noin 100 W.

Ilmanvaihdosta johtuvan ulkoilman jäähdysteho saadaan massavirrasta kaavalla kaksi

$$\Phi = m'_i * C_p * \Delta T \quad (2)$$

jossa Φ on laitteen jäähdytysteho. Taulukon 1 rivillä 18 ilmoitettu EER – luku ilmoittaa kuinka monta kW:a jäähdytystehoa saadaan yhdellä kW:lla sähkötehoa. EER – luku on amerikkalaisen mallin mukainen ja todellinen kerroin on EER/3,4, joten jäähdytystehoksi saadaan 2,7 kW. m_i on tuloilman massavirta ($120 \text{ l/s} \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 = 0,156 \text{ kg/s}$), C_p on ilman ominaislämpökapasiteetti 1 kJ/kg K. Lasketaan syntyvä lämpötilaero Δt K. Kaavasta kaksi saadaan

$$\Delta t = \frac{2,7 \text{ kW}}{0,156 \text{ kg/s} \cdot 1 \text{ kJ/kgK}} = 17,3 \text{ K}$$

Näin voidaan taulukon 1 ja kaavan kaksi mukaan todeta valitun laitteen jäähdytystehon riittävän ilman lämpötilaerosta sekä muusta toiminnasta muodostuvan lämpömäärän jäähdyttämiseen.

3.2.3 Muut aputoiminnot

Valaistus toteutetaan ledvalaisimilla ja huoltotoimenpiteille varataan pistorasiat. Valaistukselle ja huoltotoimenpiteille varataan yhteensä 1,5 kW. Tämä teho riittää ylläpitotoimintoihin, jotka ovat tehotarpeen mitoituksen pohjana. Laitteiston käyttöikähuollot vaativat suuremman tehon, mutta tällöin puhdistusprosessi ei ole toiminnassa, joten lähteiden tehon tuotto riittää huoltotoimille.

3.3 Hakkuriteholähde

DC/DC hakkuriteholähteellä voidaan joko nostaa tai laskea sisääntulojännitettä. Tässä nostetaan virtalähteiden 35 V:n jännite taajuusmuuttajan välipiiriin n. 500 V:iin pääjännitteen, 415 V:n, ylläpitämiseksi. Käytetään step-Up- eli boost-hakkuria.

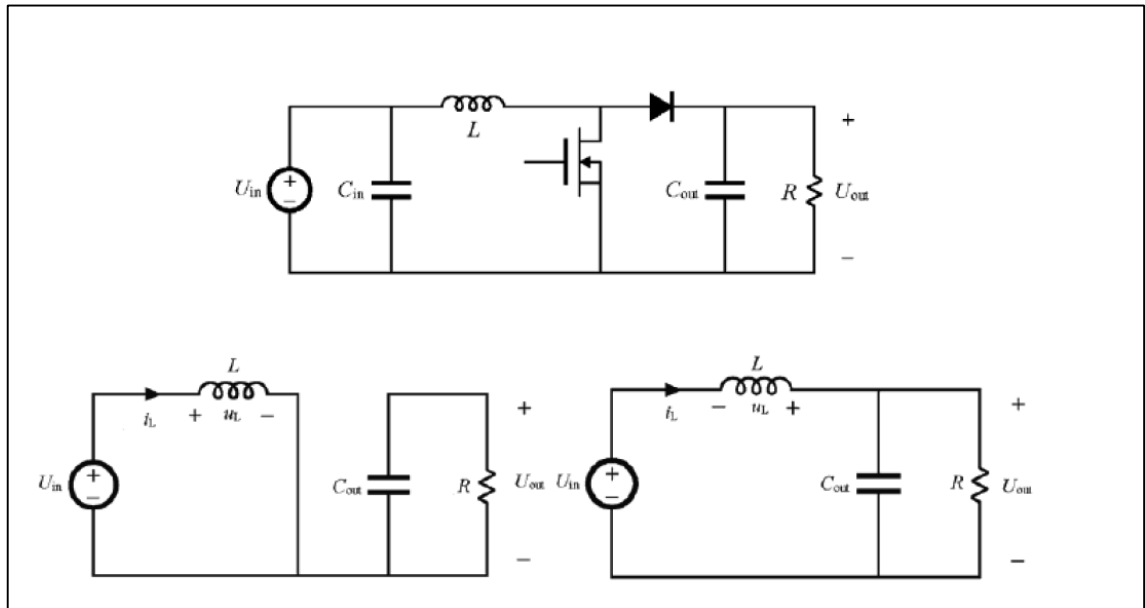
Hakkurit - Aalto University Wiki [7] kertoo hakkureista:

Step-up hakkuri (boost) Step-Up muuttaja nostaa tasajännitettä halutulle tasolle, joten ulostulo virran täytyy suhteessa pienentyä. Puolijohdekytkimen johtaessa piiri on ns. oikosulussa ja kelan virta ja kelan rautasydämeen varastoitunut energia kasvavat. Varastoituvan energian määrä riippuu kytkimen aukioloajasta ja kelan induktanssista. Diodi estää kondensaattorin purkautumisen puolijohdekytkimen kautta, joten kondensaattori purkautuu kuormaan päin ja jännite kuorman yli laskee. Kun puolijohdekytkin suljetaan, kelan sydämeen varastoitunut energia indusoituu kelan kierrettyyn kuparilangoitukseen jännitepiikkinä. Nyt diodi alkaa johtaa. Kela vastustaa virran muutosta ja sen energia purkautuu diodin kautta

kuormalle ja kondensaattorille. Toiminta jatkuu buck-hakkurin tapaan tietyllä pulssisuhteella.

$$D = \frac{U_{out} - U_i}{U_{out}}$$

Tässäkin tapauksessa ulostulojännite saadaan säädettyä halutuksi muuttamalla kytkimen johtamisaikaa. [7].

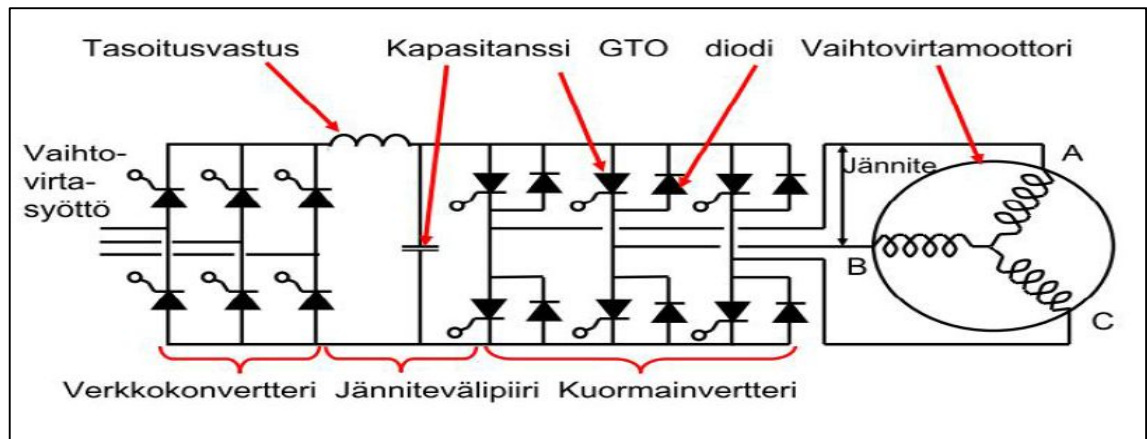


Kuva 6. Hakkuri ilman ohjauspiirejä, kytkin auki, transistori johtaa ja kytkin kiinni, transistori johtamaton [7].

Hakkuriteholähteelle ei löytynyt hintatietoa. Taajuusmuuttajien hintaan suhteutettuna tämän tehoisen hakkurin hinnaksi määritellään **500 €**.

3.4 Ohjaus, taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajat ovat puolijohdeohjattuja laitteita, joilla voidaan muokata sähkö haluttuun muotoon esimerkiksi vaihtovirtamoottorin ohjaamiseksi. Ne voidaan jakaa neljään osaan: tasasuuntaajaan, välipiiriin, vaihtosuuntaajaan ja ohjauspiiriin, kuva 7.



Kuva 7. Taajuusmuuttajan toimintaperiaate ilman ohjauspiiriä [8].

Verkkokonvertteri on tasasuuntaussilta, jossa vaihtovirta tasasuunnataan välipiiriin. kuviossa 7 jänniteohjattu, josta se edelleen vaihtosuunnataan kuormalle haluttuun muotoon.

Kennot ovat tasavirtalähteitä, joten tasasuuntausta ei nyt tarvita, vaan syöttö tapahtuu suoraan välipiiriin.

Polttokenno PEM tarvitsee toimiakseen vedyn syötön ja hapetus- ja jäähdytysvirtaaman sekä membraani- eli elektrolyyttikalvojen kostutuksen.

Lasketaan kaavalla kolme virrat pääjännitteestä, kun laiteteho on kolmivaiheisena 7,5 kW

$$P = U_p * \sqrt{3} * I \cos\varphi, \quad (3)$$

jossa P on tarvittava kolmivaiheteho 7,5 kW, U_p pääjännite 415 v, I vaihevirta ja $\cos\varphi$ tehokerroin, joka on yleensä noin 0,85. Osmoosilaitteiston maksivirraksi tulee **12,3 A**.

Aputoimintojen ilmanvaihto ja huoltotoimenpiteet yhtäaikaiseksi maksimitehoksi arvioidaan noin 3 kW. Ja lasketaan kaavalla neljä

$$P = U * I * \cos\varphi, \quad (4)$$

jossa P on tarvittava teho 3 kW, U vaihejännite 230 V, I vaihevirta ja $\cos\varphi$ tehokerroin 0,85, saadaan virran maksimiksi **15,4 A**.

- Taajuusmuuttaja f1/f2 ohjaa käänteisosmoosipumppua ja sen jatkuvan virran keston pitää olla 13 A ja tehon keston 7,5 kW.
- Taajuusmuuttaja f3/f4 ohjaa aputoimintoja, joiden yhtäaikainen maksimiteho on 3 kW. Virran keston pitää olla 16 A.
- Taajuusmuuttajat f5/f6 ja f7/f8 ohjaavat kaasuvirtaamia. Näiden tuottamiseen tarvittava teho on niin vähäinen, että virran kestoksi riittää 2 A. Virtaustehot esitetään kohdassa 3.7 Polttokenno.

Tässä yhteydessä voidaan todeta, että kennokäytössä vetyvirtaamaa ohjataan lähinnä magneettiventtiilein. Jäähdytys edellyttää kuitenkin paineistamista (kohta 3.7 Polttokenno), ja tästä syystä mallinnetaan myös vety- ja kosteusvirtaamat pumppukäytölle.

Taulukko 2. ACS880–1 taajuusmuuttajien tekniset tiedot [9, s. 12].

$U_N = 400 \text{ V (380–415 V)}$. Tehoarvot pätevät 400 V nimellisjännitteellä.											
Nimellisarvot			Kevyt ylikuormitus		Raskas käyttö		Melutaso	Lämpöhäviö	Ilma- virta	Tyypimerkintä	Runko- koko
I_N A	I_{max} A	P_N kW	I_{Ld} A	P_{Ld} kW	I_{Hd} A	P_{Hd} kW	dBA	W	m ³ /h		
2,4	3,1	0,75	2,3	0,75	1,8	0,55	46	30	44	ACS880-01-02A4-3	R1
3,3	4,1	1,1	3,1	1,1	2,4	0,75	46	40	44	ACS880-01-03A3-3	R1
4	5,6	1,5	3,8	1,5	3,3	1,1	46	52	44	ACS880-01-04A0-3	R1
5,6	6,8	2,2	5,3	2,2	4	1,5	46	73	44	ACS880-01-05A6-3	R1
7,2	9,5	3	6,8	3	5,6	2,2	46	94	44	ACS880-01-07A2-3	R1
9,4	12,2	4	8,9	4	7,2	3	46	122	44	ACS880-01-09A4-3	R1
12,6	16	5,5	12	5,5	9,4	4	46	172	44	ACS880-01-12A6-3	R1
17	21	7,5	16	7,5	12,6	5,5	51	232	88	ACS880-01-017A-3	R2
25	29	11	24	11	17	7,5	51	337	88	ACS880-01-025A-3	R2

Nimellisarvot	Runko- koko	Korkeus 1 (mm)	Korkeus 2 (mm)	Leveys (mm)	Syvyys (mm)	Paino (kg)	
I_N	Jatkuva nimellisvirta ilman ylikuormitettavuutta 40 °C lämpötilassa.	R1	405	370	155	226	6
P_N	Tyypillinen moottoriteho, kun ylikuormitusta ei ole.	R2	405	370	155	249	8
I_{max}	Suurin sallittu lähtövirta. 10 sekunnin ajan käynnistyksen yhteydessä, sen jälkeen niin kauan kuin taajuusmuuttajan lämpötila sallii.	R3	471	420	172	261	10
Kevyt ylikuormitus		R4	573	490	203	274	18,5
I_{Ld}	Jatkuva virta, 110 % I_{Ld} 1 min/5 min 40 °C lämpötilassa.	R5	730	596	203	274	23
P_{Ld}	Tyypillinen moottoriteho kevyellä ylikuormituksella.	R6	726	569	251	357	45
Raskas käyttö		R7	880	600	284	365	55
I_{Hd}	Jatkuva virta, 150 % I_{Hd} 1 min/5 min 40 °C lämpötilassa.	R8	963	681	300	386	70
P_{Hd}	Tyypillinen moottoriteho raskaassa käytössä.	R9	955	680	380	413	98

Virta-arvot riippuvat syöttöjännitteestä.
Nimellisarvot pätevät, kun käyttöympäristön lämpötila on 40 °C. Korkeammissa lämpötiloissa (enint. 55 °C) kuormitettavuus alenee 1 %/1 °C.
K1 = korkeus kytkentäkotelon kanssa
K2 = korkeus ilman kytkentäkoteloa
Leveys ja syvyys kytkentäkotelon kanssa

Tuoteluettelo | ABB industrial drive ACS880 single drive -taajuusmuuttajat 13

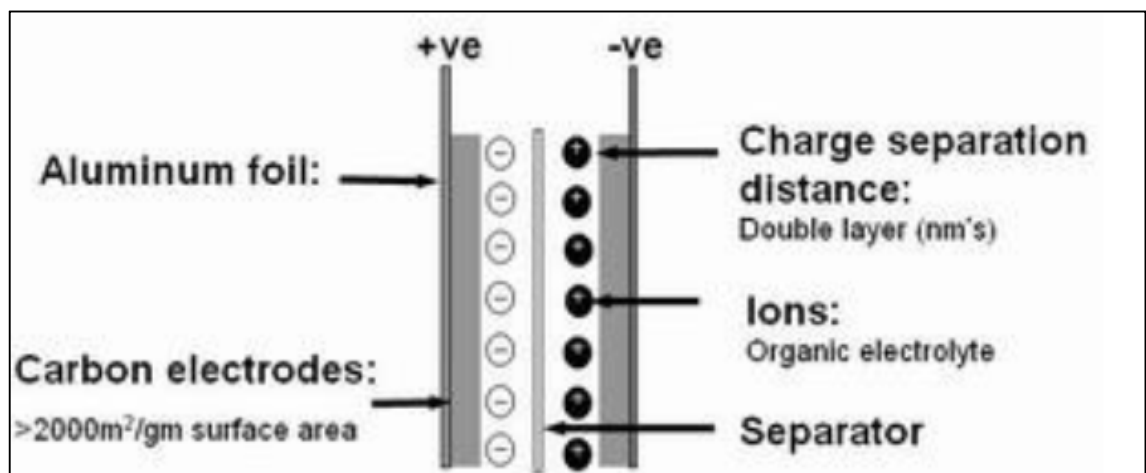
Valittiin AAB:n taulukosta (2) ACS880–1 taajuusmuuttajiksi seuraavat taajuusmuuttajat

- f1/f2 ACS880-01-017A-3
- f3/f4 ACS880-01-12A6-3
- f5/f6 f7/f8 ACS880-01-02A4-3.

Näille saatiin ABB:n Etelä-Suomen myynnistä puhelimitse yhteishinnaksi noin **2000 €**. Toimintaikä on vastaava kuin hakkuriteholähteillä [7; 9].

3.5 Superkondensaattorit

Wikipedia määrittelee superkondensaattorin kondensaattoriksi, jonka varauskykyä on kasvatettu pinta-alaa lisäämällä [10]. Kuvasta 8 näkyy kuinka hiiltä, perustuen hiilen molekyyliarakenteeseen, käyttämällä saadaan kondensaattorin pinta-ala kasvamaan.



Kuva 8. Superkondensaattorin rakenne [11, s.13].

Superkondensaattorien kapasitanssi voi olla jopa 5000 F ja tehotiheys jopa 6 000 W/kg. Energiatiheys on 1–10 Wh/kg. Niiden lataus on erittäin nopeaa, vain joitain sekunteja tai kymmeniä sekunteja. Latausvirtaa täytyy rajoittaa kun ladataan tyhjää superkondensaattoria. Superkondensaattori on täynnä, kun nimellisjännite saavutetaan, eikä mitään ylilataussuojausta tarvita [11].

Superkondensaattoreiden elinikä on noin 10 vuotta, ja niitä voidaan ladata lähes rajattomasti, lataussyklien määrä on ~1 000 000. Nämä mainitut ominaisuudet sekä kehityskaaren alkuvaihe puoltavat kondensaattorien käyttöä akkujen sijaan.

Superkondensaattoreiden ongelmana on niiden nopea itsepurkautuminen, joka voi olla ~5 % vrk. [11, s. 13]. Tässä työssä itsepurkautumisaika ei ole merkittävä tekijä, koska niiden käytön tarkoituksena on ylläpitää tehoa tuntia lyhyemmissä jaksoissa, lähinnä estämään polttokennon edestakaista toimintaan esimerkiksi pilveilyn johdosta.

Hakkurin jännite U_{out} on n. 500 V riittävän toimintajännitteen takaamiseksi ja, kun osmoosipumpun käyttöjännite U_{in} on 415 V, voidaan ajatella, että jännite saa pudota 20 %.

Kaava viisi, kondensaattorin hetkellinen jännite

$$U_C = U_0 e^{\frac{-t}{RC}}, \quad (5)$$

jossa U_C on kondensaattorin hetkellinen jännite. U_0 on lähteen, eli kennon jännite. e on Neperin luku, C kondensaattorin kapasitanssi, tässä 40 F. R on vastus, joka lasketaan tehoyhtälöstä $R = U_P^2/P$, jossa P on osmoosilaitteen teho ja U_P pääjännite. Aika t kuluu jännitteen putoamiseen 80 %:iin. Lasketaan kaavalla viisi

$$iU_0 = U_0 e^{\frac{-t}{RC}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0,8U_0 = U_0 e^{\frac{-t}{RC}} \Rightarrow t = \ln 0,8 * RC$$

$$\Rightarrow t = \ln 0,8 * 23 * 40 \Rightarrow n. 3,5 \text{ min}$$

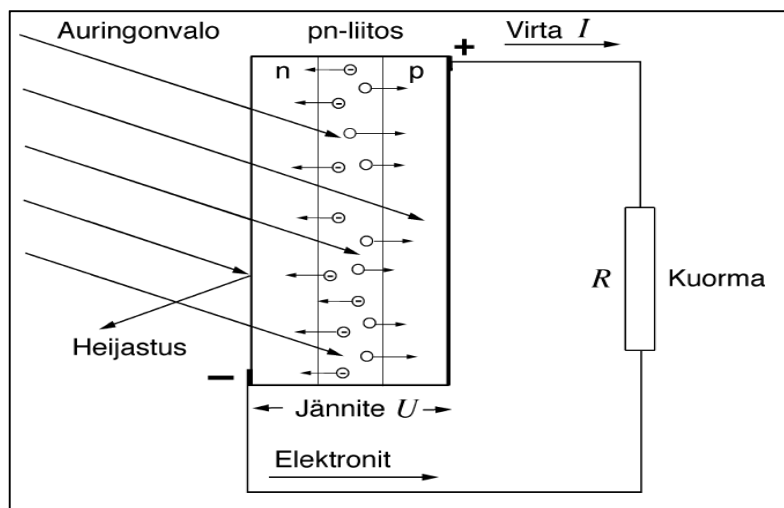
Kolmen ja puolen minuutin purkautumisaikaa ei voida pitää riittävänä pilveilevänä päivänä. Energiatiheyden mukaan kolmen minuutin purkautumisaika edellyttää yli 30 kg painavaa kondensaattoria. Kytkeällä näitä useampia rinnan purkautumisaika pitenee lukumäärän kertalukuna, koska kondensaattorien rinnankytkennän mukaan $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.

Suurifaradisille kondensaattoreille ei löytynyt hintoja. Korkein hinnoiteltu faradiarvo, mikä löytyi, oli tämä 40 F kiinalainen ja hinta n. **30 €**. Elinikä 10 v.

Kapitaloinnin kannalta se, onko kondensaattorien hinta sata tai tuhat euroa, ei ole merkityksellinen tekijä. Mutta sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025 osa 1 antaa seuraavat hintaesimerkit: Hintataso on 200–600€/kW ja 50–150 €/Wh. 5–10 vuoden sisällä päästäneen 10–15 €/Wh hintaan. Vuoteen 2020 mennessä voisi hinta pudota nykytasosta tekijällä 10–100 [12, s. 130]. Kapitalointilaskelmaan liitetään kondensaattoreiden hinnaksi **6000 €**.

3.6 Aurinkokenno

Aurinkokenno, Solar Cell on laite, useimmiten puolimetalli piistä levyksi muokattu kiekko, jossa toinen puoli absorboi auringon säteilyn fotoneja. Fotonien energia vapauttaa varauksenkuljettajia muodostaen samalla aukkoja. Kytkemällä kuorman kautta absorptiopuoli vastakkaiseen puoleen alkavat varauksenkuljettajat kulkea kytkennän kautta täyttämään aukot synnyttäen sähkövirran. Yksittäisen kennon jännite on 0,5–0,6 V ja virrantiheys noin 32 mA/cm². Tämän johdosta sekä virran, että jännitteen nostamiseksi kennoja kytketään rinnan ja edelleen sarjaan [13]. Kuvassa 9 kennoperiaate.

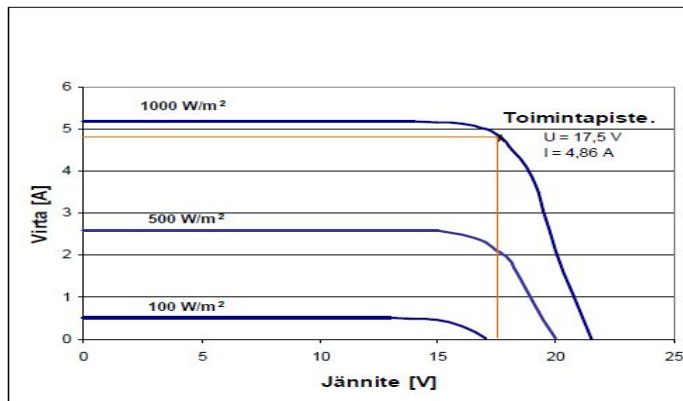


Kuva 9. Aurinkokennon toimintaperiaate [13].

Aurinkokenno on siis periaatteessa suuri fotodiodi, jonka tuottama teho riippuu auringon säteilymäärästä ja -kulmasta. Suomessa yhdelle neliömetrille aurinko säteilee par-

haissa olosuhteissa noin 1,0 kW:n teholla. Piikennon teoreettinen hyötysuhde on 31 %, mutta kytkennöistä ja muusta resistiivisyydestä johtuen kennot saavuttavat noin 18 %:n hyötysuhteen [13].

Kennolla on toimintapiste, joka riippuu säteilytehosta. Jotta kennosta saadaan suurin hyöty, sitä tulee kuormittaa säteilytehoa vastaavalla toimintapisteellä. Seuraavalla sivulla kuvassa 10 näkyy eri säteilytehon toimintapisteitä.



Kuva 10. Aurinkokennon toimintapisteitä [13].

Markkinoilta löytyy lataussäätimiä, joilla voidaan ohjata kennon kuormitusta toimintapisteeseen säteilyn muuttuessa.

Lataussäädin asennetaan aurinkopaneelien ja kondensaattorien väliin. Se valvoo, että kondensaattorit latautuvat optimaalisella tavalla. Lataus tapahtuu täydellä teholla silloin kun kondensaattorit ovat vajaat, minkä jälkeen tapahtuu ylläpitolataus vakiojännitteellä. Superkondensaattoreilla ylläpitolatauksen vaaraa ei ole [11]. Lataussäätimellä paneeleista saadaan aina maksimiteho, vaikka paneelien jännite muuttuu auringonsäteilyn muutoksen mukaan. Säätimissä on sisäänrakennettu diodi, joka estää virtaa karkaamasta kondensaattoreista paneeleille niiden ollessa jännitteettömiä [11].

Aurinkopaneeliksi valitaan 2 kappaletta Aurinko E5, paneeliteho 5 kWp, Fronius 3~ [14].



Kuva 11. Aurinko E5, paneeliteho 5 kWp (tarkoittaa huipputehoa, peak) Fronius [14].

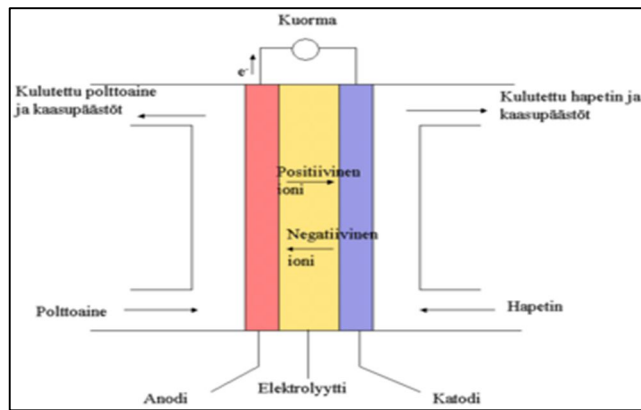
Tässä paneelit eivät käänny auringon kierron mukaan. Suuntausmekanismin tuoma lisääntynyt säteilyenergia ei riitä käytännössä kattamaan riittävästi sen asennus-, käyttö- eikä huoltokustannuksia [15]. Kapitalointihinnaksi tulee **5 000 €** [15].

Kuvan 4 paneelin hinta on Hinta: 7 790–8 180 €. Näitä tarvittaisiin kaksi kappaletta jolloin kokonaispinta-alaksi tulee 66 m² ja kapitalointihinnaksi tulisi 16 000 € [15]. Aurinkokennoston toimintaikä ilman liikkuvia osia on kymmeniä vuosia.

3.7 Polttokenno

Polttokenno on laite, jossa useimmiten vetyyn perustuvan, sähkökemiallisen reaktion seurauksena syntyy ulkoinen virtapiiri sekä lämpöenergiaa. Tätä virtapiiriä voidaan joko suoraan tai epäsuorasti, ohjauksen, muuntamisen tai suuntaamisen kautta kuormittaa sähkölaiteilla sekä hyödyntää syntynyttä lämpöenergiaa sellaisenaan tai edelleen sähkön tuottamiseen. Kuvassa 12 esitetään kennon toimintaperiaate.

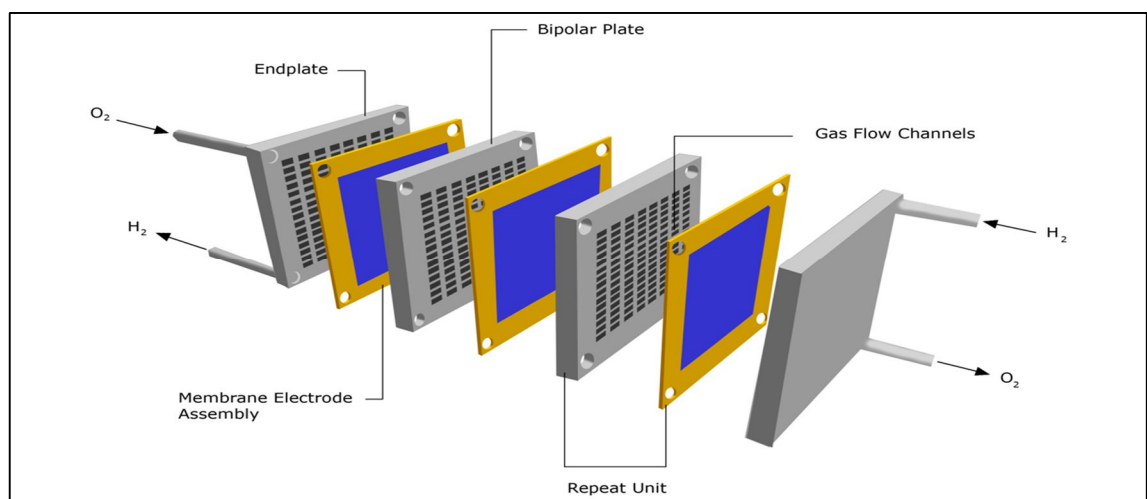
Polttokenno tuottaa osmoosilaitteistolle tarvittavan energian öisin ja tilanteissa, joissa aurinkokennosto on sammunut ja kondensaattorit ovat purkautuneet.



Kuva 12. Polttokennon yleisperiaate [16].

Kennossa polttoaine, PEM–kennossa puhdas vety, hapettuu anodilla katalyytin vaikutuksesta eli luovuttaa elektronin, joka kuorman vaikutuksesta siirtyy ulkoiseen virtapiiriin. Elektronin irtoamisen seurauksena positiivinen protoni kulkeutuu elektrolyytin läpi katodille ja pelkistyy esimerkiksi ilman hapen kanssa vesimolekyyliksi, kun negatiiviset elektronit virtaavat ulkoisen sähköpiirin kautta katodille.

Yksittäisen kennon jännite on kuormitettuna vain noin 0,6 V. Tämän johdosta niitä pakataan ja kytketään kuvan 13 mukaisesti sarjaan stackeiksi bipolaarilevyillä, joilla saadaan myös kaasu- ja kosteusvirtaamat mahdollisimman tasaisesti koko katalyyttikalvon alueelle.



Kuva 13. Stackin periaate [17].

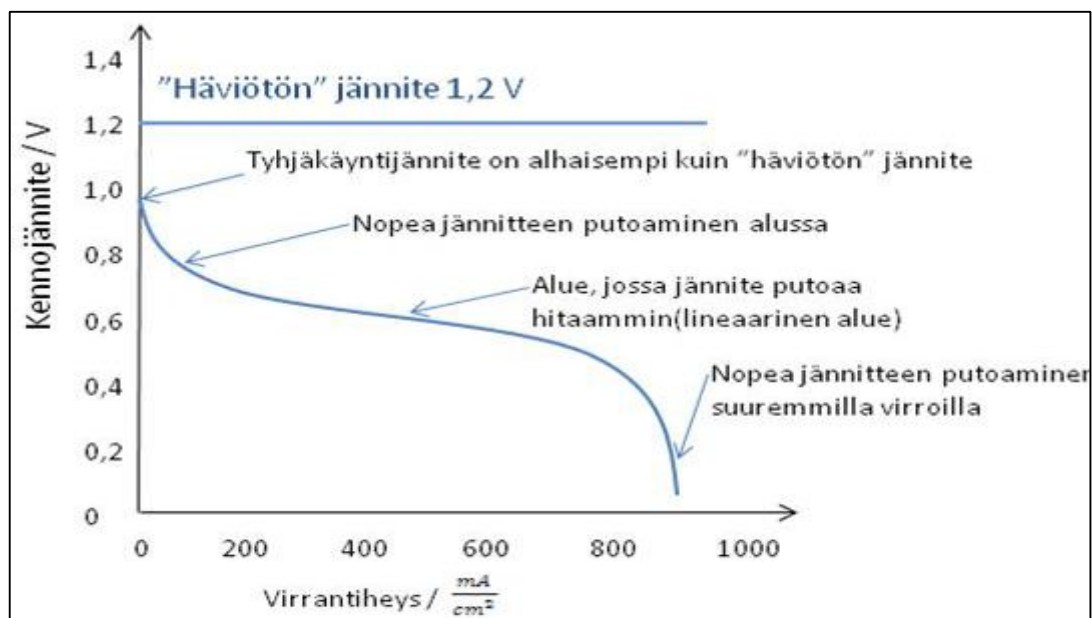
Kennoja luokitellaan eri tyypeiksi elektrolyytin mukaan:

- Fosforihappopolttokenno **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Sulakarbonaattipolttokenno **MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell)
- Kiinteäoksidipolttokenno **SOFC** (Solid Oxid Fuel Cell)
- Alkalipolttokenno **AFC** (Alkaline Fuel Cell)
- Protoninvaihtopolttokenno **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell tai Polymer Electrolyte Fuel Cell)

Näistä SOFC ja PEM ovat esimerkiksi ajoneuvosovellusten kannalta mielenkiintoisimmat. Näistä SOFC toimii korkeissa lämpötiloissa ja sitä käytetään CHP-järjestelmissä, sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (Combined heat and Power). Kokonaishyötysuhde voi nousta 90 %:iin. Tässä työssä polttokennona on PEM, joka yksinkertaisuutensa ja matalan toimintalämpönsä johdosta sopii paremmin tähän sovellukseen. Se toimii missä tahansa asennossa ja käynnistyy lähes viiveettä ja voi saavuttaa 60 %:n sähkötehohyötysuhteen.

3.7.1 Polttokennon mitoittaminen

Kuvasta 14 nähdään polttokennolla olevan toimintapiste, jossa virta ja jännite tuottavat maksimitehon.



Kuva 14. Kuvasta nähdään, että toimintapiste asettuu n. 0,7 V:n ja 300 mA/cm²:n kohtaan [18, s.17].

Järjestelmän tehotarpeeksi on saatu muun laitteiston mitoituksesta 10,32 kW. Polttokenno PEM vaatii toimiakseen vedyn syötön, elektrolyytin, eli membraanikalvon kosteusvirtaamaan sekä hapetus- ja jäähdytysvirtaaman. Lasketaan näiden toimintojen tarvitsema teho 10,5 kW tuottavalle PEM-kennostolle.

Polttokennon sähkötehosta lasketaan vedyn massavirta, josta saadaan tilavuusvirta ja siitä edelleen tarvittava pumppausteho. Kennon tehoesimerkki on nähtävissä teoksessa *Kemiallinen termodynamiikka energiatekniikassa*, Markku J. Lampinen ja Ari Seppälä [19]. Kirjan esimerkki koskee SOFC-kennoa. Tässä alaluvussa se on sovellettu PEMille.

Janafin taulukosta (liite 3) saadaan 25 °C toimintalämpötilassa Gibbsin energiaksi vesihöyryn muodostumisreaktio $\Delta G^0_f[\text{H}_2\text{O}(\text{g}); T = 298,15 \text{ K}] = 228 \cdot 10^3 \text{ J/mol}$, ja standarditilaa vastaava teoreettinen kennojännite tässä lämpötilassa on

$$U^0(T) = -\frac{\Delta G^0(T)}{nF} \quad (6)$$

jossa kerroin n on 2 vedyn kaksiatomisuudesta johtuvasta elektroniluvusta, F on Faradayn vakio ja T lämpötila

$$U^0 = \frac{228 \cdot 10^3 \text{ J}}{2 \cdot 96500 \text{ As}} = 1,181 \text{ V}$$

Kun kennoreaktio ei tapahdu standarditilassa, voidaan kennojännite laskea kaavalla seitsemän

$$U = U_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_A^a a_B^b}{a_C^c a_D^d}, \quad (7)$$

jossa R on yleinen kaasuvakio, T reaktion lämpötila, a_A , a_B , a_C , ja a_D ovat reagoivien kaasujen ja reaktiotuotteina syntyvien kaasujen paineita. Eksponentit a,b,c ja d ovat reaktion $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$ stöikiömetriset kertoimet. Kaavasta seitsemän saadaan

$$U = 1,181 + \frac{8,314 * 298,15}{2 * 96500} \ln \frac{4,8 * 0,21^{\frac{1}{2}}}{1,2} \approx 1,189 \text{ V},$$

kun vedyn paineena on 4,8 bar ja hapen osapaine ilmassa 0,21 bar ja vesihöyryn 1,2 bar.

Kytetään kennoja sarjaan 120 kpl, jolloin termodynaaminen kennojännite on $120 * 1,189 \text{ V} = 143,0 \text{ V}$. Olkoon kokonaisvetyvirta $n'_{\text{H}_2} = 0,2 \text{ mol/s}$, joka 120 kennon sarjakytkennöillä merkitsee sähkövirtaa

$$I = \frac{2 * F n'_{\text{H}_2}}{N} = \frac{2 * 96500 \text{ As/mol} * 0,2 \text{ mol/s}}{120} = 322 \text{ A}, \quad (8)$$

Teoreettiseksi sähkötehoksi saadaan näin 46,0 kW. Todellisuudessa kuormitetun kennon jännite johtuen sisäisistä häviöistä on noin 0,7–0,75 V, joten tehoksi saadaan $322 \text{ A} * 84\text{--}90 \text{ V} = 27,0\text{--}29 \text{ kW}$ ja sähköhyötysuhteeksi noin 59–63 %. Hyötysuhde on 300–350 K lämpötilatasolla hieman pienempi, eli noin 55–60 %.

3.7.2 Kennovalinta

Ballard Power Systems on maailman suurimpia PEM-kennojen tuottajia. Heiltä saatiin tarjous 23. heinäkuuta 2015 oheisesta Stacsta (kuva 15).



BALLARD[®]

SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE





FCvelocity-9SSL

Ballard Power Systems offers a proton exchange membrane (PEM) fuel cell stack based on our proven, fourth generation transportation stack technology.

Available now to customers with fuel cell stack integration capabilities, the FCvelocity-9SSL is designed to perform in rugged conditions and is scalable depending upon customer requirements. Stacks are available in power increments from approximately 4 to 21 kilowatts.

The FCvelocity-9SSL provides stable electrical power to a system over a wide range of operating and environmental conditions. A liquid-cooled, hydrogen-fueled product, the FCvelocity-9SSL uses Ballard's standard fuel cell components.

Suitable for motive applications, the FCvelocity-9SSL features fast, dynamic response, robust and reliable operation and durable packaging.

The FCvelocity-9SSL establishes a new standard of performance by optimizing reliability, power density and compatibility with customer system requirements.

Please contact us for product availability and pricing.

PRODUCT SPECIFICATIONS

Rated Power [kW] ¹	3.8	4.8	10.5	14.3	17.2	21.0
DC voltage (at 300A) ¹	12.8	16.0	35.0	48.0	57.4	70.2
Mass (with no coolant) [kg]	7.1	7.2	10.7	13	15	17
Stack core length [mm]	92	104	174	220	255	302
Stack core width [mm]	760	760	760	760	760	760
Stack core height [mm]	60	60	60	60	60	60

Type:	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance:	Maximum current	300A
	Shock and vibration	Automotive ²
Fuel:	Fuel composition (pre-humidification)	> 95% H ₂ ³
Oxidant:	Oxidant composition (pre-humidification)	Compressed ambient (filtered to remove particulates)
Stack Temperatures:	Storage temperature ⁴	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
	Start-up temperature	> 2° C (> 36° F)
	Fluid inlet temperature (operating)	2 to 68° C (36 to 154° F) ¹
	External ambient temperature (operating)	-25 to 75° C (-13 to 167° F) ⁴

Additional information available upon request.

1. Values achieved at Ballard-specified conditions at the beginning of operational life.
2. Vibration 5g, meets USABC/98L, CRADA No. SC961447 USABC 18. Shock: 5g sections of EC 60068-2-27 6a and EC 60068-2-29 6b.
3. H₂ purity as per SAE specifications: D719 with exceptions.
4. Allowable temperature following approved Ballard dry out procedure only, without dry out procedure +2-60°C.

Kuva 15. Kuvan taulukossa vasemmalta kolmannella pystyvirvillä on Ballard Power Systems'in tarjoama 10.5kW FCvelocity-9SSL fuel cell stack [20].

3.7.3 Vedyn ja kosteusvirtaamaan tehotarve

Edellisen sivun taulukosta 4 valitaan FCvelocity-9SSL fuel cell stackin sähköarvoiksi

Teho 10,5 kW

Virta I 300 A
 Jännite U DC 35 V

Kohdan 3.7.1 mukaan todellinen kennojännite on 0.7 V, josta saadaan kennolukumääräksi $35 \text{ V} / 0,7 \text{ V} = 50$ kpl, josta edelleen kohdan yksi mukaan moolivirraksi saadaan 0,077 mol/s. Vety esiintyy kaksiatomisena H_2 , ja kaavasta kahdeksan saadaan seuraava muoto

$$n_{\text{H}_2} = \frac{50 * 300}{2 * 96500} = 0,077 \frac{\text{mol}}{\text{s}},$$

josta massavirraksi, kun vedyn moolimassa on 2 g,

$$m' = 0,154 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,000154 \text{ kg/s}$$

PEMin tarvitseman pienen paine-eron johdosta voidaan ajatella vedyn olevan kokoon puristumatonta jolloin pumppausteho on

$$P = V' * \Delta p, \tag{9}$$

jossa P on tarvittava teho, V' on tilavuusvirta, Δp paine-ero ja vedyn tiheys on 90 g/m^3 . Tilavuusvirta kaavasta 7, jossa m' on massavirta ja ρ on tiheys

$$V' = \frac{m'}{\rho} \tag{10}$$

$$\Rightarrow V' = \frac{0,000154 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0017 \text{ m}^3/\text{s},$$

ja saadun tilavuusvirran, $0,0017 \text{ m}^3/\text{s}$, kun paine-eroksi on määritelty $20 \text{ mbar} = 20 * 10^{-3} * 10^5 \text{ Pa} = 2\,000 \text{ Pa}$, voidaan laskea edellisen sivun kaavalla yhdeksän edelleen pumppaustehoksi,

$$P = 0,0017 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 2\,000 \text{ Pa} = 3,4 \text{ W}$$

Näin ollen $10,5 \text{ kW}$:n tuottamiseen tarvittavan vety- ja membraanikalvojen kosteusvirtaaman ylläpitämiseen riittää alle **10 W**:n teho [18, s.32–40].

3.7.4 Hapetus- ja jäähdytysvirtaaman tehotarve

Ideaalinen toimintalämpötila on PEMille noin 60°C . Jos kennon jäähdytys tapahtuu ilmavirtauksella ja syöttöilmavirtauksen lämpötilaksi oletetaan 20°C , jäähdytykseen tarvittava ilmamäärä on riittävän suuri myös vetymäärän $0,155 \text{ g/s}$ hapetukseen.

Kennon kokonaishyötysuhde η on noin 60% alaluvun 3.7.1 mukaan. Jäähdytysilman lämpötilannousun oletetaan olevan noin 40°C , ja kaavoista 11 ja 12 saadaan laskettua lämpöteho Φ

$$P_{tot} = P_{säh} + \Phi \quad (11)$$

$$P_{säh} = P_{tot} * \eta, \quad (12)$$

joissa P_{tot} on kokonaisteho, $P_{säh}$ on sähköteho $7,5 \text{ kW}$ ja η on hyötysuhde $0,6$

$$P_{tot} = \frac{P_{säh}}{\eta} \Rightarrow$$

$$P_{tot} = \frac{10,5}{0,6} \text{ kW} = 17,5 \text{ kW}$$

ja lämpötehoksi tulee

$$\Phi = P_{tot} - P_{säh} \Rightarrow$$

$$\Phi = 17,5 \text{ kW} - 10,5 \text{ kW} = 7 \text{ kW}$$

ja edelleen

$$\Phi = m'_i * C_p * \Delta T \Rightarrow \quad (13)$$

$$m'_i = \frac{\Phi}{C_p * \Delta T} \Rightarrow$$

$$m'_i = \frac{7,0 \text{ kW}}{1 \text{ J (Ws) / kgK} * 40 \text{ K}} = 0,175 \text{ g/s},$$

jossa m'_i on massavirta ja C_p on ilman ominaislämpökapasiteetti joulea kilogrammaa ja astetta kelviniä kohti. Ilman tiheys on $1,293 \text{ kg/m}^3$, ja siitä edelleen tilavuusvirraksi saadaan 135 l/s . Kaavasta 6 saadaan jäähdytysvirran pumppaustehoksi $P_{\text{teor}} = 270 \text{ W}$. Koska pumpun hyötysuhde on n. $0,8$, tulee ilmajäähdytyksellä todelliseksi tarvittavaksi pumppaustehoksi kaavalla 14

$$P_{\text{tod}} = \frac{P_{\text{teor}}}{\eta} \Rightarrow \quad (14)$$

$$P_{\text{tod}} = \frac{270 \text{ W}}{0,8} = 338 \text{ W}$$

Toimiakseen täydellä teholla polttokenno tarvitsee siis yhteensä noin 340 W:n tehon. Muu laitteisto tarvitsee $10,32 \text{ kW:n}$ tehon, joten kokonaistehoksi tulee $10,66 \text{ kW}$, jos aputoiminnot ovat yhtäaikaaisesti maksimikuormalla. Tällainen hetkellinen tehovaje on hallittavissa toimintojen ohjauksella.

Valitaan taulukosta 4 $10,5 \text{ kW}$ tehoinen Ballardin Stack [20]. Sähköpostitse saatu tarjoushinta on **7869 €**.

Polttokennoille luvataan nykyään toiminta-ajaksi jopa kymmeniä tuhansia tunteja. Tämä edellyttää kuitenkin huoltotoimia, PEM:n kohdalla lähinnä membraanikalvojen vaihtoja.

3.8 Vety polttoaine

Vety on universumin yleisin alkuaine. Tämän lisäksi sen lämpöarvo on suuri, 119 MJ/kg, kun bensiinin vastaava on 43,0 MJ/kg. Se toimii energiantantajana, kuten sähkö ja lämpö, mutta varastojana on edullisempaa kuin sähkö. Energian siirtäminenkin vedyn muodossa voi olla edullisempaa kuin sähköllä tapahtuva siirtäminen. Vetyä tuotetaan pääasiassa maakaasua reformoimalla. Tuotantotavoista riippuen hinta vaihtelee 0,5 €/kg – 5,0 €/kg [21].

Sähkön tuotannon kannalta merkittävä kysymys on vedyn saatavuus, kuljetusmuoto ja kilohinta. Suomessa Woikoski Oy pakkaa vetyä. Woikoskeen oltiin puhelimitse yhteydessä viimeksi 16.9.2015 ja saatiin vedyn hinnaksi pakattuna 1,2 €/m³, kaasuna. Kaasukuution massa normaalipaineessa on noin 90 g, ja kuljetushinnaksi Suomessa ilmoitettiin noin 1,2 €/km/250 kg.

Vedyn kuljettaminen on avoin kysymys. Kapitaloinnissa oletetaan, että vetyä on saatavissa noin 2 500 km:n etäisyydeltä ja kuljetus tapahtuu 250 kg:n erissä.

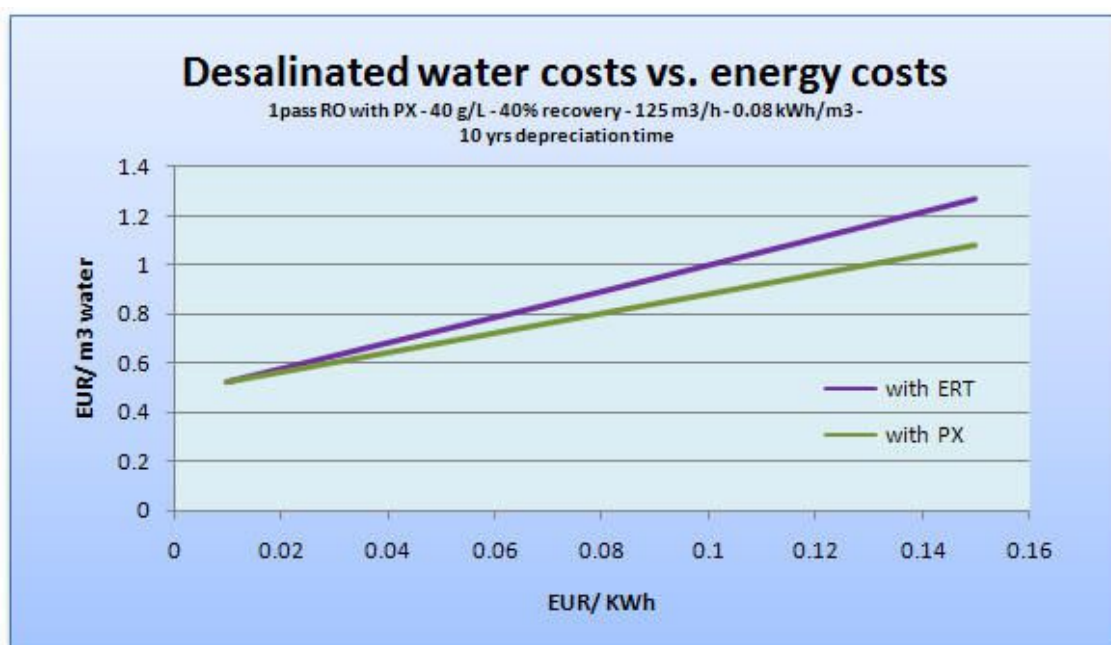
3.9 Suojaus ja mittaus, asennuslaitteisto ja asennusalusta

Kapitaloinnin ja laitteiston kannalta otsikon sisältö ei ole merkityksellinen. Suojuslaitteisto koostuu hyllyistä saatavista diodeista ja sulakkeista. Asennuslaitteisto on ruostumatonta terästä tai alumiinia. Keskuskaapit tilataan valmiina ja johdotusten kulut ovat merkityksettömät verrattuna muun laitteiston investointeihin. Asennusaluksia, teollisuuskontteja on yleisesti myynnissä. Näiden yhteishinnaksi arvioidaan **6 700 €**.

Kapitaloinnin ylläpitotoiminnot sisältävät huolto- ja laitevaihdot sekä kertymän laitteiden määräaikaishankintoihin.

Mark Wilf Ph.D. ja Kennet Klinkko [22] esittävät vesikuution hinnaksi 0,51 € ja kilowattitunnin hinnaksi 0,06 €. Tällöin tuotantomäärä Israelin Eilatissa on 20 000 m³/vrk. Tässä kapitalointi antaa vastaaviksi 8,3 €/m³ ja 0,72 €/kWh. Eilatissa tuotetun ja tässä esitetyn järjestelmän vesikuutiohinnan ero, ja etenkin kilowattitunnin hinnan suhde saavutettuun vesivirtaaman hintaan, johtuu pääosin siitä, että käytettäessä ERT- tai PX-menetelmää, joita tämän työn mallinnuksessa ei ole käytetty, saadaan pumppaustehon vaatima sähköenergia putoamaan puoleen. Tämän lisäksi suuri kustannustekijä on vedyn hinta.

Lenntechin sivustolta [23] kuvassa 16 verrataan kWh hinnan nousun aiheuttamaa muutosta vesikuution hintaan.



Kuva 16. Energian ja tuotetun vesikuution hintasuhte. Kustannussuorista nähdään, että energian hinnan noustessa 4 c nousee vesikuution hinta noin 20 c. Kuviossa ERT tarkoittaa turbiinijärjestelmää, jolla rejektin paine hyödynnetään sähkön tuotantoon ja PX järjestelmää, jossa rejektipaineella saadaan vähennettyä pumppaustehoa [23].

Kuvan 16 selitteessä esitetty suhde on Mark Wilf Ph.D. ja Kennet Klinkkon [22] selvityksen tuloksilla 18 c. Tässä työssä esitetyn laitteiston vastaava suhde ilman ERT- tai PX-järjestelmää, (kuvat 17 ja 18), on noin 45 c sekä tuotolla 22 m³/päivä, että vertailevalla kymmenkertaisella tuotannolla, (liite 1). Vähennettäessä rejektistä saatava ener-

5 Yhteenveto

Ensimmäisenä insinööriyön aiheena oli selvittää mahdollisuus tuottaa sähkö yksittäiselle omakotitalolle ja mahdollisesti kaavalliselle pienyhteisölle. Tämä osoittautui kuitenkin opinnäytetyöksi liian laaja-alaiseksi, joten lopulta päädyttiin nyt esitettyyn aiheeseen. Myös humanitaariset tekijät vaikuttivat vahvasti taustalla, mutta ennen kaikkea nyt esitetty laitteisto antaa paremmat edellytykset jatkokehittelylle aina tuotteistamiseen asti. Työn oheistuotteena voidaan todeta ensimmäiseen aiheeseen, että kuluttaja maksaa nyt kaikkineen käyttämästään kilowattitunnista noin 20 c, ja selvityksen mukaan kilowattitunti pystytään tuottamaan paikallisesti 7 sentillä.

Opinnäytetyö perustuu kaupallisesti saatavilla oleviin komponentteihin. Täsmällisen tiedon saanti laitteista osoittautui yllättävän hankalaksi ja aikaa vieväksi. Tämän johdosta kapitaloinnissa käytettiin arvoja, jotka suurella todennäköisyydellä ovat ennemmin yli – kuin alimitoitettuja. Tässä suhteessa työ on puutteellinen. Pohdintaa aiheutti myös millä perusteellisuudella yksittäiset komponentit tulisi esittää. Asennuspuoli siivutettiin tarkoituksella kokonaan sähkötekniikkaan täysin sisältymättömänä käytännön suorituksena.

Yhtenä motiivina työssä etenemiselle oli se, että etsimisestä huolimatta vastaavia järjestelmiä ei löytynyt. Yhdysvaltain armeijalla on käytössään siirrettäviä käänteisosaamoilaitteistoja, joissa sähkö tuotetaan polttokennolla, mutta ilman aurinkokennojen rinnankäyttöä. Myös mökki, veneily ja muihin moniin yksittäiskäyttöihin löytyy polttokenno sovelluksia. Mutta esitetyn kaltaista järjestelmää ei ole tullut vastaan.

Työn tavoitteena on antaa vastaus voidaanko vettä tuottaa valtamerien vedestä paikallisesti ja pienimuotoisesti nopeasti siirrettävällä laitteistolla veden, läheltäkin, kuljetuskustannuksia edullisemmalla hinnalla. Tähän saadaan selkeästi vastaus, että voidaan.

Yksittäisistä tekijöistä lopputuotteen hinnan kannalta ovat vedyn kustannus polttokennolle tuotuna ja rejektin hyödyntäminen oleellimmat. Verrattaessa kuljetetulla vedellä tuotettua vesikustannusta dieselgeneraattorilla tuotettuun tulee dieseljärjestelmä edullisemmaksi (Liite 2). Humanitaarisenkin toiminnan kannalta voidaan kuitenkin mallinnet-

tua kustannustasoa pitää varsin kohtuullisena etenkin painotettaessa järjestelmän saasteettomuutta, hiilijalanjälkeä, äänettömyyttä ja vähäistä huoltotarvetta, teoriassa vain membraanikalvojen vaihtoa. On myös huomioon ottamisen arvoista, että tämän järjestelmän komponentit ovat kuitenkin kehityskaarensa alussa ja niiden edelleen kehittäminen lisää kansallista osaamista korkean teknologian saralla. Mutta kuitenkin laajennettaessa vesituotannon tavoitetta esimerkiksi hyödyntämään maataloutta vaikkapa kasteluvetenä, kuljetetulla vedyllä tuotettu vesi lienee liian kallista.

Edellä mainitusta johtuen herääkin kysymys vedyn tuottamisesta paikallisesti aurinkopaneeleilla. Nopeita toimenpiteitä vaativissa katastrofitilanteissa oman tuotannon perustaminen voi olla hankalaa ratkaista, mutta ajatellen kuivia, kastelun varassa olevia alueita paikallisen tuotannon perustaminen voisi olla varsin mielekästä. Vedyn varastoiminen ei vaatisi kalliita pakkausjärjestelmiä sen siirtyessä tuotannosta suoraan kulu- tukseen.

Elektrolyysiin perustuvassa vedyn tuotannossa hyötysuhde on 40–80 % ja yhden vetykuutiometrin tuottamiseen kuluu energiaa noin 5 kWh. Elektrolyysillä tuotetun vedyn kustannukset ovat 4,0–15 €/kg [25, 26].

Suurennetaan järjestelmän tuotto kymmenkertaiseksi toimimaan vain polttokennolla ympärivuorokautisesti paikallisesti tuotetulla vedyllä (liite 1). Tällöin luvun 3.7.3 mukaan vetyvirtaaman tulee olla 1,55 g/s, joten vuorokaudessa tarvitaan 134 kg vetyä. Yhden vetykuution, 0,09 kg, valmistukseen kuluva 5 kWh energia kasvaa 7 440 kWh. Tämän energian tuottamiseen aurinkopaneeleilla kahdentoista tunnin aikana tarvitaan 620 kW teho. Tämä vaatii 4 900 m² aurinkopaneelipintaa, kun yhden neliön sähköteho on 0,125 kW. Vertailukenttänä on 80 m², jonka nimellisteho on 12 kWp ja pätöteho noin 10 kW [15]. 4 900 m² hankintahinta on kytkentälaitteineen yksikköhinnalla 100 €/1,6 m² [15] 306 250 €. Elektrolyysilaitteiston hinnaksi voidaan käännteisen prosessin kautta ottaa PEM – kennon hankintahinta. Tällä menetelmällä käyttäen PX – järjestelmää päästään hintoihin 0,1 €/kWh ja 0,56 €/m³ (liite 1, taulukko 1, alataulukko 7). Näitä hintoja voidaan pitää riittävän edullisina kohdennettuun kasteluun. Kymmenkertaisen tuotannon kapitaloinnissa ei PX-järjestelmää käytettäessä otettu puoleen pudonneen energiatarpeen vaikutusta laiteinvestointeihin. Kun tämä otetaan huomioon, saadaan kustannuksiksi 0,05 €/kWh ja 0,50 €/m³.

Ilman, että kapitaloinnissa suuruusluokka muuttuu, voidaan käänteisosmoosilaitteiston 60 barin paineessa olevasta rejektin massavirrasta käyttää PX-järjestelmässä 80 % syöttöveden pumppaamiseen ja loput 20 % käyttää tuotetun permeaatin (40 % syöttövedestä) pumppaamiseen. Näin voidaan permeaatin paine nostaa noin 18 barin paineeseen. Tällaisella nostokorkeudella (180 m) voidaan putkijärjestelmä ulottaa laajalle alueelle pitkälle sisämaahan, ja toteuttaa suurienkin väestömäärien täydellinen vesihuolto. Viiden miljoonan investoinnilla saadaan aikaan 2,2 miljoonan litran päivittäinen vesivirtaama, joka ei voisi olla vaikuttamatta suotuisasti alueen sosioekonomiseen kehitykseen.

Ei myöskään voida jättää huomiotta sitä, että järjestelmä koostuu pääosin korkean teknologian tuotteista, joiden kehittämistä Suomessa peräänkuulutetaan. Ja vastaavasti laitteistojen ylläpito kehittäisi kohdealueensa osaamistasoa.

Laitteisto on muokattavissa monipuoliseksi vientituotteeksi. Sen toiminnan edelleen kehittäminen vaatii uusia innovaatioita niin valmistaja- kuin kohdemaassa. Lisäksi sen käyttöön liittyy koulutusta, ja esimerkiksi kasteluvesijärjestelmän rakentaminen edellyttää monipuolista ympäristöteknologiaa sekä korkean tason teknistä osaamista. Sen ei myöskään myytäessä tarvitsisi kuin kuolettaa kustannukset, koska parantuneiden satojen ja elinolosuhteiden kautta saadaan jatkuva korkotuotto sijoitetulle vesipääomalle.

Monilla tahoilla uskotaan siirtyvän vetytalouteen [21], jossa suoralla aurinkoenergialla on merkityksellinen rooli. Ja voidaan todeta esitetyn perusteella laitteiston olevan taloudellisesti tuotantokelpoinen, joten sen tarjoamat kehittämismahdollisuudet ovat osaltaan edistämässä korkean teknologian osaamista Suomessa.

Lähteet

- 1 Ranne, Aulis. 2000. VTT:n tiedotteita. Verkkodokumentti <www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2060.pdf>. Luettu 25.11.2015.
- 2 Auvinen, Irene. Haverinen, Tapio. 18.4.2011. Ioninvaihto- ja kääteisosmoositekniikan vertailu vesilaitoksen uusimista varten. Opinnäytetyö. Verkkodokumentti. <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27138/Auvinen_%20Haverinen.pdf?sequence=1>. Luettu 6.9.2015.
- 3 Thomson, Murray. 26.9.2005. Energy Efficiency in Reverse Osmosis Systems. Centre for Renewable Energy Systems Technology Loughborough University, UK. Verkkodokumentti. <www.adu-res.org/pdf/Loughborough.pdf>. Luettu 25.11.2015.
- 4 Thomson, Murray. 2010. Loughborough University Institutional Repository. Verkkodokumentti <<https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/5963/1/bermudez.pdf>> Luettu. 25.11.2015.
- 5 Well water. EPRO-6000. RO High Flow Verkkodokumentti. <<http://www.cleanwaterstore.com/EPRO.html>>. Luettu 25.11.2015.
- 6 Ilma – Shop.fi. Verkkodokumentti. <<http://ilmashop.mycashflow.fi/product/3745/ilmanvaihtokone-enervent-pelican-eco-pro-greenair-hp>> Luettu 25.11.2015.
- 7 Hakkurit–Aalto University Wiki. Verkkodokumentti. <https://www.google.fi/search?newwindow=1&q=hakkuri+pulssisuhde&oq=hakkuri+pulssisuhde&gs_l=serp.12...487036.495843.0.499785.31.23.0.2.2.0.271.2298.9j11j1.21.0....0...1c.1.64.serp..17.14.1399.lbPvapw6MVs>. Luettu 25.11.2015.
- 8 Wikipedia. Verkkodokumentti. <Taajuusmuuttaja rakenne> → kuvat aiheesta taajuusmuuttaja. Luettu 25.11.2015.
- 9 ABB. Verkkodokumentti. <<http://new.abb.com/drives/fi/pienjannitetaajuusmuuttajat/teollisuustaajuusmuuttajat/acs880-taajuusmuuttajat/acs880-01>> → esite(7) → pientaajuusmuuttajat. Luettu 25.11.2015.
- 10 Superkondensaattori. Wikipedia. Verkkodokumentti. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Superkondensaattori>>. Luettu.25.11.2015.
- 11 Eskola, Miikka. 23.11.2010., Akkujen ja superkondensaattoreiden yhteiskäyttö energiavarastoina ja niiden verkkoon liittäminen. Kandidaatintyö. Lappeenrannan

- tekninen yliopisto. Verkkodokumentti.
<<https://www.doria.fi/bitstream/handle/.../nbnfife201011253031.pdf?...3>> Luettu 25.11.2015.
- 12 Kari, Mikko. Hakala, Arto. Pääkkönen, Elisa & Pitkänen, Markku. 2008. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025 osa 1. Ylöjärvi Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. Verkkodokumentti.
< www.puolustusvoimat.fi/wcm/.../PVTTJulkaisu14.pdf?MOD=AJPERES > Luettu 25.11.2015.
- 13 Kvick, Pasi. 02.06.2010. Verkkoon kytketty aurinkopaneelijärjestelmä. Opinnäyte-työ. Savonia ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti.
< www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20683/Kvick_Pasi.pdf?...1 >. Luettu 25.11.2015.
- 14 Finnwind verkkokauppa. Verkkodokumentti. < Aurinko E5, paneeliteho 5 kWp, Fronius 3~ > Luettu 25.11.2015.
- 15 Kristola, Ari. Oma aurinkolaitos. Tikkaron yhdystie, 133, 04660 NUMMINEN. Luettu 26.11.2015.
- 16 Polttokenno. Wikipedia. Verkkodokumentti.
< <https://fi.wikipedia.org/wiki/Polttokenno> >. Luettu 25.11.2015.
- 17 Stack. Verkkodokumentti <Kuvat aiheesta fuel cell stack> Luettu 26.11.2015.
- 18 Teräsvirta, Antti. Marraskuu 2010. Voimalaitosmittakaavan polttokennojen teknis-taloudellinenvertilu. Pizztech Oy.
<www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki3ID1440.pdf> Luettu 26.11.2015.
- 19 Lampinen, Markku J. Seppälä, Ari. Kemiallinen termodynamiikka energiateknii-kassa, Teknillinen korkeakoulu, Sovellettu termodynamiikka 2008, ISBN 978-951-22-9212-7
- 20 Ballard, Stack. <FCvelocity-9SSL fuel cell stack>
<https://www.google.fi/search?q=%3C+www.ballard.com/power.../fuel-cell-stack/liquid-cooled...+&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=tJVyVvnSFlytswG5jaiQCw> Luettu 26.11.2015.
- 21 Kauranen, Pertti. Solin, Jussi. Törrönen, Kari. Koivula, Jouko. Laurikko, Juhani. 3.4.2013. Vetytiekartta- vetyenergian mahdollisuudet Suomelle. VTT – K – 02257-13. Verkkodokumentti.
<www.tekes.fi/globalassets/global/nyt/uutiset/vetytiekartta.pdf> Luettu 26.11.2015.

- 22 Wilf, Mark Ph.D. and Klinkko, Kennet. Optimization of Seawater RO Systems Design. Verkkodokumentti.
<www.membranes.com/docs/papers/06_optimization.pdf> Luettu. 26.11.2015.
- 23 Energian ja tuotetun vesikuution hintasuhte. Verkkodokumentti.
<<http://www.lenntech.com/processes/desalination/energy/general/desalination-costs.htm>> Luettu 26.11.2015.
- 24 <Reverse Osmosis Desalination Process-Lenntech> Verkkodokumentti. Luettu 26.11.2015.
- 25 Heikkilä, Seppo. 5.5.2013. Kaupallinen elektrolyysikemio autossa, Metropolia AMK, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Insinöörityö. Verkkodokumentti.
<https://www.theseus.fi/.../Insinöörityö_elekrolyysikemio_autossa.pdf?...> Luettu 26.11.2015.
- 26 Jumppanen, Pauli. 2009. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 42, Nro 4s.218–234, Vetyenergiatuotannossa. Verkkodokumentti.
<rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf> Luettu 9.12.2015.

Kymmenkertainen vesivirtaama omalla vedyn tuotannolla

Liitteen taulukon 1 alataulukko 6 kuvaa Mark Wilf Ph.D and Kennet Klinkkon, Optimization of Seawater RO Systems Design selvityksen [12] kWh hinnan 4 c muutoksen vaikutuksen veden kuutioon hintaan, kun käytössä on paineen takaisinkytkentä ERT/PX. Alataulukko kuvaa 5 tilannetta, kun taulukon 1 järjestelmässä ei käytetä kumpaakaan järjestelmää ja alataulukosta 4 nähdään PX:n vaikutus energian ja tuotantomäärän hintojen suhteeseen. Alataulukosta 7 nähdään kuutiohintaa PX-järjestelmällä.

Taulukko 1. Kymmenkertainen vesivirtaama omalla vedyn tuotannolla.

Kymmenkertainen vesivirtaama omalla vedyn tuotannolla							
Hankintahinnat							
RO-pumppu		3.1	80 000				
Apulaitteisto		3.2	105 630				
Hakkuritehonlähde		3.3	20 000				
Taajuusmuuttajat		3.4	30 000				
Superkondensaattorit		3.5	60 000				$k=1/i[1-i/(1+i)^a]$ ja $K_{käyt,k}$
Aurinkokennot		3.6	306 250				= käyttökustannukset päivän arvoon =>
Polttokenno		3.7	156000				$(1/0,06)*[1-(1/1,06^20)]=k$
Keskukset		3.9	10 000				
Muu sähkötarpeisto		3.9	20 000				
Muu asennustarpeisto		3.9	17 000	0,7€/kg			
Asennus			147 000				
Yhteensä			971 880				
Käyttökustannukset							
Vetypolttoaine 0,155g/s		3.8			Oma tuotanto		
Muu ylläpito		3.9	75 000		Huolto/kalvovaihdot/ylläpitoinvestoinnit		
Aika			20				
Koroksi otetaan 6 %			0,06				
Kulut/20v		11,46992	860244,1				
Hankintahinta			485 940				
Päivän arvoon			1346184				
Tuotto/20v	7300	220000	1,61E+09				
€/l			0,000838	0,838221726	€/m ³		
Mark Wilf Ph.D and Kenneth Klinko Israel Eilat/20v 0,72USD/m ³ =0,51€/m ³ /0,06 €/kWh [12].							
Tässä 1,1 €/m ³ hintaan 0,096 €/kWh.							
Veden hinnan suhde energian hintaan							
Israel Eilat					Tämä järjestelmä	PX-menetelmällä	
€/m ³	0,51				€/m ³	0,83822	maksettavia kWh/m ³
€/kWh	0,06				€/kWh	0,07318	€/kWh=0,07 kWh/m ³
kWh/m ³	4,5	Maksettava energia/ERT/PX			kWh/m ³	11,49	€/m ³ =0,40 5,745
Hinnan muutos/m ³ , kun kWh/€ + 4 c					€/m ³ kWh+4c		Taul. 7
					Ei ERT/PX	PX	PX
							Ei ERT/PX
P kW	105	0,04	1,553948	0,51705	0,2298	0,45704348	
Aika vuosi	20	0,08	2,010991	0,74685	0,2298	0,45704348	
Tunteja	175200	0,12	2,468035	0,97665	0,2298	0,45704348	
Tuotettu energia	18396000	0,16	2,925078	1,20645	0,2298	0,45704348	
€/kWh		0,073178	0,2	3,382122	1,43625	Taul. 4	Taul. 5
kWh/m ³	11,45455			Israel Eilat			
18396000	0,096	1,61E+09	0,838222	0,45	0,18	0,05	5,745
18396000	0,096	1,61E+09	0,838222	0,63	0,18	0,05	5,745
18396000	0,096	1,61E+09	0,838222	0,81	0,18	0,05	5,745
18396000	0,096	1,61E+09	0,838222	0,99	0,18	0,05	5,745
18396000	0,096	1,61E+09	0,838222	1,17	Taul. 6	0,05	5,745

Dieselvoimalla tuotettu energia

Taulukko 1. Dieselillä tuotetun energia vaikutus kustannuksiin.

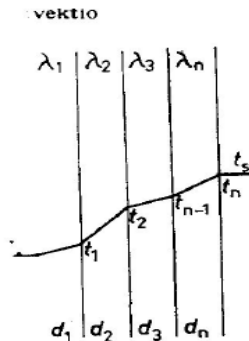
Käyttökustannukset							
Dieselpolttoaine 350g/kWh				30 904	91 980 kWh/v => 32 193 kg => 25 754 l/1,1€		
					(0,8 kg/dm ³) markkinahintaan kuten vety		
Muu ylläpito		3.9		48000	Huolto/kalvovaihdot/ylläpitoinvestoinnit		
Aika				20			
Koroksi otetaan 6 %				0,06			
Kuljetus				1 200			
Kulut/20v			11,47	905 023			
Hankintahinta				80 653			
Elinkaari kustannukset päivän arvoon				985 676			
Tuotto/20v	7300		22000	1,61E+08			
€/l				0,006137	6,1374574 €/m ³		
Mark Wilf Ph.D and Kenneth Klinko Israel Eilat/ 20v 0,72USD/m ³ =0,51€/m ³ energian hinnalla 0,06 €/kWh [12].							
Tässä 6,1 €/m ³ energian hinnalla 0,54 €/m ³							
Veden hinnan suhde energian hintaan							
Israel Eilat					Tämä järjestelmä	PX-menetelmällä	
€/m ³	0,51	Totaalikustannukset		€/m ³	6,137457	maksettava kWh/m ³	
€/kWh	0,06			€/kWh	0,53581		
kWh/m ³	4,5	Maksettava energia, kun ERT/PX		kWh/m ³	11,45455	5,727272727	
				€/m ³ kWh+4c			
Hinnan muutos/m ³ , kun kWh/€ + 4 c				Ei ERT/PX	PX	PX	Ei ERT/PX
P kW		10,5	0,04	6,58	3,30	0,23	0,46
Aika vuosi		20	0,08	7,04	3,53	0,23	0,46
Tunteja		175200	0,12	7,49	3,76	0,23	0,46
Tuotettu energia		1839600	0,16	7,95	3,99	0,23	0,46
€/kWh		0,5358098	0,2	8,41	4,21	Taul. 1	Taul. 2
					Israel Eilat		
1839600	0,52	161000000	8,223070662		0,45	0,18	
1839600	0,52	161000000	8,223070662		0,63	0,18	
1839600	0,52	161000000	8,223070662		0,81	0,18	
1839600	0,52	161000000	8,223070662		0,99	0,18	
1839600	0,52	161000000	8,223070662		1,17	Taul.3	

Janafin taulukko

Water (H ₂ O)				H ₂ O ₁ (g)			
Enthalpy Reference Temperature = T _r = 298.15 K				Standard State Pressure = p° = 0.1 MPa			
T/K	J K ⁻¹ mol ⁻¹			kJ mol ⁻¹			Log K _f
	C _p ^o	S ^o	-(G ^o -H ^o (T _r))/T	H ^o -H ^o (T _r)	Δ H ^o	Δ G ^o	
0	0.	0.	INFINITE	-9.904	-238.821	-238.821	INFINITE
100	33.299	152.388	218.534	-8.615	-240.083	-238.584	123.579
200	33.349	178.485	191.898	-3.282	-240.900	-232.766	60.792
298.15	33.590	188.834	188.834	0.	-241.826	-228.582	40.047
300	33.598	189.042	188.835	0.062	-241.844	-228.500	39.785
400	34.262	198.788	190.159	3.452	-242.846	-223.801	29.238
500	35.228	206.534	192.685	6.925	-243.826	-219.051	22.884
600	36.325	213.052	195.550	10.501	-244.758	-214.007	18.631
700	37.495	218.739	198.405	14.192	-245.632	-208.812	15.582
800	38.721	223.825	201.322	18.002	-246.443	-203.496	13.287
900	39.987	228.459	204.084	21.838	-247.185	-198.083	11.496
1000	41.268	232.738	206.738	26.000	-247.857	-192.590	10.080
1100	42.536	238.731	209.285	30.191	-248.460	-187.033	8.881
1200	43.768	240.485	211.730	34.508	-248.997	-181.425	7.897
1300	44.945	244.035	214.080	38.942	-249.473	-175.774	7.063
1400	46.054	247.407	216.341	43.493	-249.894	-170.089	6.346
1500	47.090	250.620	218.520	48.151	-250.265	-164.376	5.724
1600	48.050	253.690	220.623	52.908	-250.592	-158.639	5.179
1700	48.935	256.630	222.655	57.758	-250.881	-152.883	4.698
1800	49.749	259.451	224.621	62.693	-251.138	-147.111	4.269
1900	50.488	262.161	226.520	67.705	-251.368	-141.325	3.885
2000	51.180	264.769	228.374	72.790	-251.575	-135.528	3.540
2100	51.823	267.282	230.187	77.941	-251.762	-129.721	3.227
2200	52.408	269.706	231.909	83.153	-251.934	-123.905	2.942
2300	52.947	272.048	233.604	88.421	-252.092	-118.082	2.682
2400	53.444	274.312	235.253	93.741	-252.239	-112.252	2.443
2500	53.904	276.503	236.860	99.108	-252.379	-106.416	2.223
2600	54.329	278.625	238.425	104.520	-252.513	-100.575	2.021
2700	54.723	280.683	239.952	109.973	-252.643	-94.729	1.833
2800	55.089	282.680	241.443	115.464	-252.771	-88.878	1.658
2900	55.430	284.619	242.899	120.990	-252.897	-83.023	1.495
3000	55.748	286.504	244.321	126.549	-253.024	-77.163	1.344
3100	56.044	288.337	245.711	132.139	-253.152	-71.298	1.201
3200	56.323	290.120	247.071	137.757	-253.282	-65.430	1.068
3300	56.583	291.858	248.402	143.403	-253.416	-59.558	0.943
3400	56.828	293.550	249.705	149.073	-253.553	-53.681	0.825
3500	57.058	295.201	250.982	154.768	-253.696	-47.801	0.713
3600	57.276	296.812	252.233	160.485	-253.844	-41.916	0.608
3700	57.480	298.384	253.459	166.222	-253.997	-36.027	0.509
3800	57.675	299.919	254.661	171.980	-254.158	-30.133	0.414
3900	57.859	301.420	255.841	177.757	-254.326	-24.236	0.325
4000	58.033	302.887	256.999	183.552	-254.501	-18.334	0.239
4100	58.199	304.322	258.136	189.363	-254.684	-12.427	0.158
4200	58.357	305.726	259.252	195.191	-254.876	-6.516	0.081
4300	58.507	307.101	260.349	201.034	-255.078	-0.600	0.007
4400	58.650	308.448	261.427	206.892	-255.288	5.320	-0.063
4500	58.787	309.767	262.486	212.764	-255.508	11.245	-0.131
4600	58.918	311.061	263.528	218.650	-255.738	17.175	-0.195
4700	59.044	312.329	264.553	224.548	-255.978	23.111	-0.257
4800	59.164	313.574	265.562	230.458	-256.229	29.052	-0.318
4900	59.275	314.795	266.554	236.380	-256.491	34.998	-0.373
5000	59.390	315.993	267.531	242.313	-256.763	40.949	-0.428
5100	59.509	317.171	268.493	248.258	-257.046	46.906	-0.480
5200	59.628	318.327	269.440	254.215	-257.338	52.869	-0.531
5300	59.746	319.464	270.373	260.184	-257.639	58.838	-0.580
5400	59.864	320.582	271.293	266.164	-257.950	64.811	-0.627
5500	59.982	321.682	272.199	272.157	-258.268	70.791	-0.672
5600	60.100	322.764	273.092	278.161	-258.595	76.777	-0.716
5700	60.218	323.828	273.973	284.177	-258.930	82.769	-0.758
5800	60.335	324.877	274.841	290.204	-259.272	88.767	-0.799
5900	60.453	325.909	275.698	296.244	-259.621	94.770	-0.839
6000	60.571	326.928	276.544	302.295	-259.977	100.780	-0.877

PREVIOUS: March 1961 (1 atm)

CURRENT: March 1979 (1 bar)

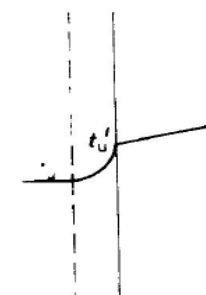


Kuva 2 Lämpötilan muutos kerroksellisessa rakenteessa

Lämpö siirtyy konvektiolla taakka- ja eteenpäin suuntaan. Lämpö siirtyy rakenteeseen kaasun tai nesteen ja kiinteän kappaleen rajapinnassa nesteen tai kaasun koskettaessa sitä. Kuvan 3 mukaan on ulkolämpötila rajavyöhykkeen ulkopinnassa t_u ja ulkoympäristön lämpötila rajavyöhykkeen sisäpinnassa t_u' . Lämpömäärä joka kulkee rajavyöhykkeen läpi voidaan esittää yhtälön (20) muotoisena käyttämällä lämmönsiirtolukua konvektiolla α_k ($\text{cal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$).

$$Q = \alpha_k A (t_u' - t_u) \quad (21)$$

Konvektion käänteisarvo m_k on taas osa kokonaislämmönvastuksesta m ja sitä kutsutaan konvektion lämmönsiirtovastukseksi



Kuva 3 Lämpötilan muutos rajavyöhykkeessä

Kerroksellisessa rakenteessa täytyy jokaisen kerroksen läpi kulkea sama lämpömäärä (kuva_2).

$$Q = \lambda_1 A (t_1 - t_u) / d_1 = \lambda_2 A (t_2 - t_1) / d_2 = \lambda_3 A (t_3 - t_2) / d_3 = \lambda_n A (t_s - t_{n-1}) / d_n \quad (19)$$

joista

$$Q = A (t_s - t_u) / (d_1 / \lambda_1 + d_2 / \lambda_2 + d_3 / \lambda_3 + \dots + d_n / \lambda_n) \quad (20)$$

Nimittäjä yhtälössä (20) ilmoittaa lämmönjohtumisvastuksen m' joka on osa rakenteen kokonaislämmönvastuksesta m .

$$m_k = 1 / \alpha_k \quad (22)$$

Lämmönsiirtoluvulle α_k on esitetty empiirisiä arvoja, joista esitetään seuraavat:

Vapaa konvektio pystysuoralla seinällä, jonka korkeus on yli 0,6 m Schack'in [1] mukaan

$$\alpha_k = 3 + 0,08 \Delta t \quad \text{kun } \Delta t < 10^\circ\text{C}$$

$$\alpha_k = 2,2 \sqrt[4]{\Delta t} \quad \text{kun } \Delta t > 10^\circ\text{C}$$

Δt on lämpötilaero rajavyöhykkeessä. *Vaakasuoran rakenteen* pinnalla Raissin [2] mukaan

$$\alpha_k = 2,3 \sqrt[4]{\Delta t} \quad \text{ylöspäin suuntautuvassa virtauksessa}$$

$$\alpha_k = 0,3 \dots 0,7 \quad \text{alaspäin suuntautuvassa virtauksessa}$$

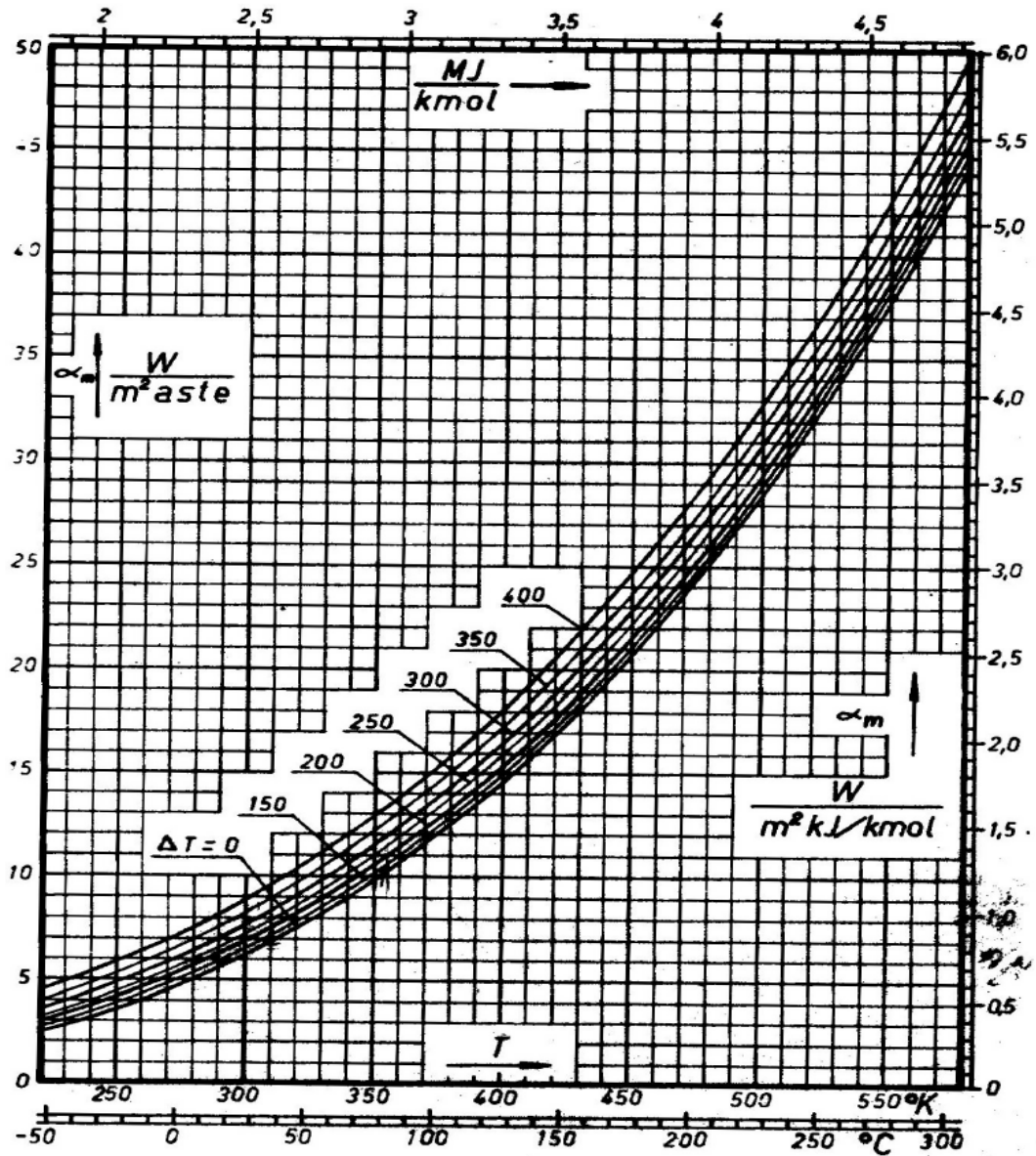
$$\alpha_k \approx 1,3 \quad \text{kun leveys} < 1 \text{ m}$$

$$\alpha_k = 5,3 + 3,6v \quad \text{kun } v < 5 \text{ m/s}$$

$$\alpha_k = 6,47 v^{0,78} \quad \text{kun } v > 5 \text{ m/s}$$

On syytä mainita se, että esimerkiksi veden lämmönsiirtoluku sen lämpötilan ja liikkeen mukaan vaihtelee $\alpha_k = 500 \dots 4000$ sisältäen silloin myös johtumisen ja säteilyn.

Lämmön säteily



Kuva 43 Mustaa säteilyä vastaava lämmönsiirtymiskerroin (kaava 208). Abskissana keskilämpötila