



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **KYSYNNÄNJOUSTON JA ENERGIAVARASTON DEMONSTROINTI SÄILIÖPAKASTIMELLA**

**Demonstrating demand flexibility and energy storage  
with a chest freezer**

Jaakko Reponen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Jaakko Reponen

### **Kysynnänjouston ja energiavaraston demonstrointi arkkupakastimella**

2018

Kandidaatintyö.

22 sivua, 11 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: TkT Tero Ahonen

Hakusanat: Kysynnänjousto, energiavarasto, Spot-hinta

Tässä kandidaatin työssä kerrotaan Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa digitaali- ja säätötekniikan laboratoriossa rakennetun älykkään arkkupakastimen suunnittelusta, rakentamisesta ja toiminnasta. Projekti toteutettiin vuonna 2015 kesätyöprojektina.

Projektin lähtökohtana oli toteuttaa arkkupakastin, jonka toimintaa voidaan ohjata tavallisten lämpötilarajojen lisäksi sähköenergian tuntitason Spot-hinnan perusteella. Näin pakastin toimisi sähköenergian hinnan suhteen kysynnänjouston välineenä. Energiavarastona pakastinta testattiin lisäämällä pakastimen sisälle 40-prosenttista glykoliseosta puskuriliuokseksi, joka sulamislämmöllään hidastaa pakastimen lämpötilan nousua.

Projektin tuloksena saatiin toteutettua tavalliselle arkkupakastimelle ohjausyksikkö, joka Internet-yhteyden avulla pystyy seuraamaan sähköenergian hinnan kehittymistä ja näiden tietojen avulla ajamaan pakastimen kompressoria kalliita sähköenergian hintoja vältellen. Lisäksi pakastimeen lisättiin puskuriliuos, jonka havaittiin vaikuttavan pakastimen toimintaan sen lämpenemistä hidastaen.

Verrattuna tavallisen arkkupakastimen toimintaan, Spot-hinnan perusteella ohjattu versio on keskikulutukseltaan muutaman prosentin kalliimpi johtuen ohjausyksikön energian kulutuksesta. Kalliimpi hinta ei ollut toivottu asia, mutta pakastimen ohjaus toimii muuten halutusti ja pakastin pyrkii välttämään kompressorin käyttöä kalliiden tuntien aikana. Vastaavaa ohjausta voitaisiin käyttää myös suuremman mittaluokan kylmälaitteissa tai esimerkiksi lämminvesivaraajissa, joissa rahallisia säästöjä voitaisiin saavuttaa. Spot-hinnan perusteella ohjattujen laitteiden yleistyminen voisi johtaa tasaisemmin jakautuneisiin sähköenergian hintoihin sekä sähköverkon tasaisempaan rasitukseen.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Jaakko Reponen

**Demonstrating demand flexibility and energy storage with a chest freezer**

2018

Bachelor's Thesis.

22 pages, 11 figures and 1 table

Examiner: D.Sc. Tero Ahonen

Keywords: Demand response, energy storage, Spot price

This bachelor's thesis is about the design, construction and operation of the intelligent chest freezer built in the laboratory of Control Engineering and Digital systems at Lappeenranta University of Technology. The project was implemented in 2015 as a summer job project.

The project was based on the implementation of a chest freezer, which operation can be controlled based on the Spot price of electricity in addition to the normal temperature limits. This way the freezer would demonstrate its capability to demand response based on the hourly Spot price of electricity. Energy storage capability of the freezer was approached by adding 40% glycol mixture within the freezer as a buffer solution. Buffer solution's melting heat would slow down the freezer's temperature rise.

As the result of the project, a standard chest freezer was equipped with a control unit, which with the help of Internet connection was able to track the development of the hourly Spot prices, and with this information to drive freezer's compressor avoiding the expensive electricity prices. In addition, a buffer solution was added to the freezer which was found to slow down the freezer's temperature rise.

When compared to the standard chest freezer, the smart version is a few percent more expensive due to the energy consumption of the control unit. The more expensive price was not a desirable outcome, but the freezer operates otherwise as planned and tries to avoid the use of the compressor during the expensive hours. Similar control could also be used in refrigerators of a larger scale or, for example, hot water heaters where savings could be achieved. The widespread use of the electricity Spot price-controlled equipment could lead to a more evenly distributed electricity prices and a more even burden on the electricity grid.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto.....	6
1.1	Työn tavoite.....	6
2.	Pakastimen ja ohjauslaitteiston esittely .....	7
2.1	Pakastimen valitseminen .....	7
2.2	Pakastimen purkaminen.....	8
2.3	Oman ohjauksen suunnittelu ja asennus.....	9
2.4	Lämpökapasiteetin kasvattaminen toisella lämpövarastolla .....	12
3.	Pakastimen ohjauslogiikka .....	13
3.1	Ohjauslogiikan suunnittelu ja toteutus .....	13
3.2	Pakastimen toiminnan visualisointi .....	15
4.	Pakastimen toiminta ja tulokset .....	17
4.1	Normaali toiminta.....	17
4.2	Toiminta hintalogiikalla .....	18
4.3	Pakastimen toiminnan analysointi .....	19
4.3.1	Glykolivaraston vaikutus pakastimen toimintaan.....	20
5.	Yhteenveto.....	21
	Lähteet .....	22

## **KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

BBB	BeagleBone Black, yhden piirilevyn tietokone.
PLC	A Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka.
Spot-hinta	Pörssisähköstä käytetty ilmaisu. Sähköenergian hinta vaihtelee vuorokaudessa tunneittain ennakoidun kysynnän ja tarjonnan mukaan.
SPST-NO	A Single-Pole, Single Throw Normally Open switch. Normaalitilassaan auki oleva perinteinen yhden kytkimen ON/OFF-rele.
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähiverkkotekniikka.

## 1. JOHDANTO

Älykkäät laitteet ja sähköverkot ovat yleistyneet viime vuosina. Yhä useampi laite on yhteydessä Internetiin, jonka kautta laitetta voidaan ohjata tai laite itse voi hakea tietoa säätääkseen toimintaansa haluttuun suuntaan esimerkiksi nykyisen sähköenergian hinnan, sähköverkon kuormituksen tai muiden ennalta määriteltyjen toimintaehtojen perusteella. Markkinoilla löytyy jo monenlaisia älykkääksi luokiteltavia kodinkoneita kuten astianpesukoneita, pyykinpesukoneita, kuivausrumpuja, uuneja, kahvinkeitinimiä ja jääpakastinkaappeja. Laitteita voi esimerkiksi ohjata puhelimen avulla etänä ja tarkistaa onko pyykinpesukone jo pysähtynyt tai uunissa oleva ruoka jo kypsää. Sovellus voi myös lähettää käyttäjälle varoituksen esimerkiksi auki jääneestä jääpakastinkaapin ovesta. (Gotech, 2016)

Vuoden 2015 kesällä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa digitaali- ja säätötekniikan laboratoriossa haluttiin kehittää tavallisen arkkupakastimen pohjalta älykäs pakastin, jonka toimintaa voitaisiin tavallisten lämpötilarajojen lisäksi ajoittaa ja säätää sähköenergian Spot-hinnan perusteella. Näin pakastimen avulla voitaisiin demonstroida tavallisen kotitalouksiin tarkoitetun arkkupakastimen soveltuvuutta kysynnän jouston välineeksi ja energiavarastoksi.

### 1.1 Työn tavoite

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on kertoa älypakastimen tekoprosessista sekä tarkastella valmiin älypakastimen toimintaa. Kysynnän jouston kannalta pakastinta lähestyttiin valitsemalla älypakastimen pohjaksi arkkupakastin, jota voidaan tarvittaessa pitää päältä pois useammankin tunnin ajan pakastettujen tuotteiden pilaantumatta. Tähän vaikuttavat pakastimen eristys sekä luonnollisesti pakastimeen säilötyn tavaran määrä. Mitä enemmän säilöttyä tavaraa pakastimessa on, sitä enemmän energiaa ja aikaa vaaditaan sisällön lämpenemiseen. Sähköenergian hinnan ollessa kallista, toimisi pakastin ehdottomalla minimikulutuksella vaaditun maksimilämpötilarajan mukaan. Vastaavasti halvoilla sähköenergian hinnoilla pakastinta voitaisiin ajaa kylmemmäksi ja varastoida halvempaa kylmäenergiaa talteen. Varastoinnin avuksi älypakastimeen suunniteltiin lisäksi faasimuunnokseen perustuva glykolipohjainen lämpötilapuskuri, jonka sulamisprosessilla pakastimen toiminta-aikaa lämpötilarajojen sisällä voidaan pidentää.

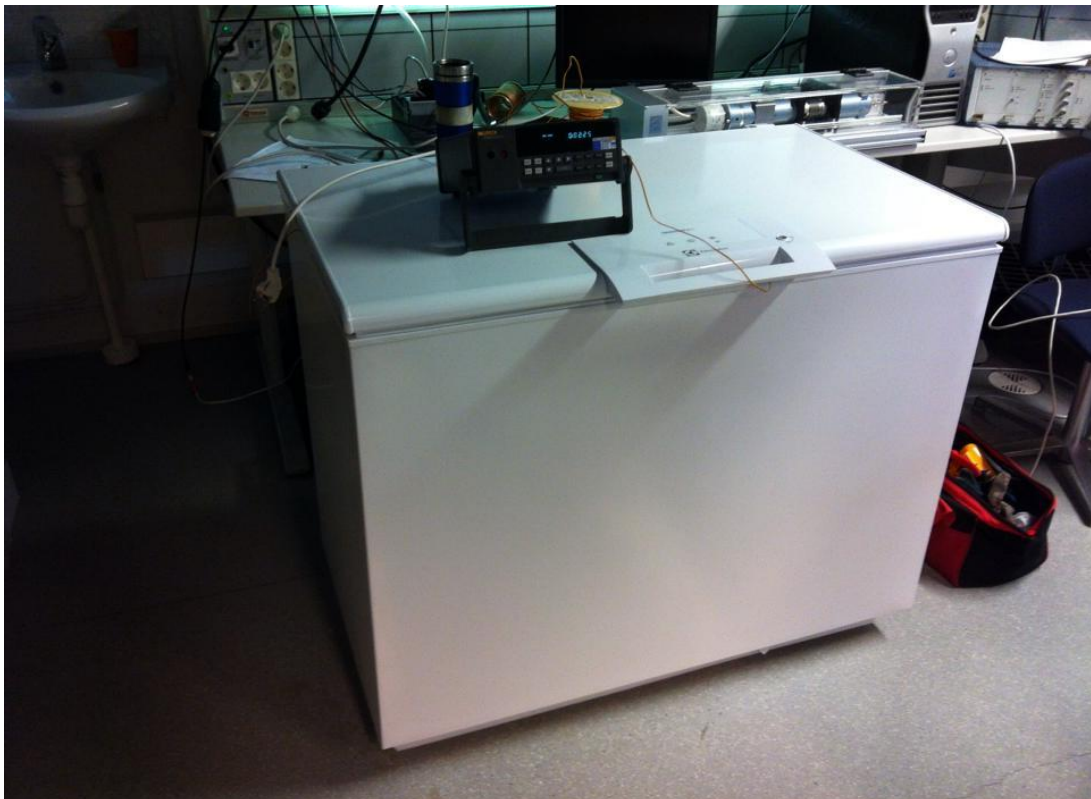
Kysynnänjoustossa on toisaalta myös halvoille sähköenergian tunneille siirtymisen lisäksi kyse verkon kuormituksen tasapainottamisesta. Älykäs laite, joka pystyy seuraamaan itsenäisesti sähköverkon kuormitusta esimerkiksi sähköverkon hetkellisen taajuuden tai sähköenergian tuntitason Spot-hinnan perusteella toimii eräänlaisena hätäreservinä. Kun sähköverkko on suuresti kuormitettuna, voi laite kytkeytyä sähköverkosta pois. Vastaavasti kun taas kuormaa tarvittaisiin lisää, laite kytkeytyisi takaisin osaksi sähköverkkoa. Yhden pakastimen kuorma on toki vähäinen, mutta monen laitteen toimiessa samoilla ehdoilla saataisiin aikaiseksi jo merkittävä kuorma, jolla voitaisiin tasapainottaa verkon kuormitusta. Tätä yksittäisten kulutuslaitteiden yhdistämistä suuremmaksi kokonaisuudeksi käytetään jo hyväksi esimerkiksi Fortumin Fiksu-järjestelmässä. Fiksu on kotiautomaatiojärjestelmä, joka ohjaa ja seuraa kodin sähkölämmitystä Spot-hinnan, sääennusteen sekä käyttäjän tarpeiden mukaisesti. (Aunio, 2018)

## 2. PAKASTIMEN JA OHJAUSLAITTEISTON ESITTELY

### 2.1 Pakastimen valitseminen

Älypakastimen pohjaksi valittiin kuvan 2.1 mukainen 216 litrainen Electroluxin EC2331AOW säiliöpakastin. Pakastimen energiatehokkuusluokka on A++ ja valmistaja arvioi sen vuosikulutustasoksi 180 kWh. Lisäksi valmistajan mukaan pakastimen turvallinen sähkökatkaisuaika on 48 tuntia. Pakastimen valinnassa tärkeätä oli ottaa kyllin korkea energiatehokkuusluokan pakastin, jotta pakastimen käyttöä voitaisiin Spot-hinnan mukaan kohdistaa enemmän halvoille sähköenergian tunneille. Vaikka valmistaja ilmoittaa turvallisiksi sähkökatkaisuajaksi edellä mainitun 48 tuntia, toteutimme ohjauksen kuitenkin siten, ettei pakastimen lämpötila pääse missään vaiheessa nousemaan yli nollan celsiusasteen.

Suosituksen mukaan kotitalouskäyttöön tarkoitetuilla pakastimilla sopiva yläraja lämpötilalle on -18 celsiusastetta. Mikäli lämpötila nousee tämän rajan yli, mutta pysyy kuitenkin pakkasen puolella, voidaan elintarvikkeet huoletta jäähdyttää takaisin normaaliin säilytyslämpötilaan. Tämä saattaa johtaa joissakin säilytettävissä tuotteissa rakenteellisiin muutoksiin, mutta hygieenistä vaaraa ei varsinaisesti aiheudu. (Evira, 2016)



Kuva 2.1 Projektia varten hankittu Electroluxin EC2331AOW säiliöpakastin.

## 2.2 Pakastimen purkaminen

Pakastimen toiminnan määrittäminen aloitettiin avaamalla pakastin ja tutkimalla sen sähköisiä kytkentöjä. Käytännössä tutkittavat osat olivat kompressorin kytkentärasia, kompressoria ohjaava termostaatti sekä ohjainkortti. Kompressorin kytkentärasiaista selvitettiin kytkentäpisteiden väliset yhteydet käyttämällä yleismittarin resistanssimittausta. Mittauksen lisäksi kytkentöjen selvittämisessä käytettiin hyväksi valmiita värikoodeja, joilla eri johtimet oli merkitty. Kompressorista löytyivät oikeat pisteet vaihe-, nolla- ja suojajohtimelle, jotta sähköt saatiin vietyä releeltä turvallisesti kompressorille. Kompressorin kytkennät ovat nähtävissä kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Arkkupakastimen kompressorin kytkentäpinnit. Ylhäällä olevaan I-osioon liitetään vaihejohdin, oikealla olevaan N-osioon nollajohdin ja suojajohdin vasemmalla olevaan maadoitusosioon.

Ohjauskortti sijaitsi pakastimen kannessa ja sen avulla käyttäjä pystyi asettamaan pakastimen erilliseen pakastustilaan. Poistimme ohjauskortin pakastimesta kokonaan ja sen toiminnollisuus siirrettiin laitteen PLC:lle.

Termostaatin toiminnasta pääteltiin eri liitäntäpisteiden väliset yhteydet. Todettiin, että yksi termostaatin pinneistä oli varattu ohjauskortilta tulevalle kytkintiedolle, jotta pakastin voidaan asettaa erilliseen pakastustilaan. Toinen pinni toimi taas normaalin termostaattikytkimen tavoin. Elektroniikkaa termostaatissa ei todettu olevan, vaan laite toimi puhtaasti mekaanisesti ylä- ja alalämpötilarajan välillä. Poistimme pakastimen alkuperäisen termostaatin kokonaan ja korvasimme sen toiminnollisuuden lämpötilamittarin ja releen yhdistelmällä, joiden toimintaa voidaan säädellä ja seurata PLC:n avulla.



### 2.3 Oman ohjauksen suunnittelu ja asennus

Oman ohjauksen suunnittelu lähti puhtaasti liikkeelle älypakastimelle asetetuista vaatimuksista. Ensiksi pakastimen kompressoria tulisi ohjata sähköenergian Spot-hinnan perusteella. Toiseksi pakastimesta haluttiin mahdollisimman normaali niin ulkoisesti kuin käyttömukavuudeltaankin. Pakastimesta ei saisi lähteä ylimääräisiä johtoja tavallisen virtajohdon lisäksi. Pakastimen uuden ohjauksen tulisi myös olla hinnaltaan edullinen käytettävien osien suhteen.

Valitsimme ohjauksen älyksi BeagleBone Blackin, joka on yhden piirilevyn tietokone. BBB oli sopiva vaihtoehto projektin älyksi sen edullisen hinnan ja monipuolisten toiminnollisuuksien takia. BBB:ssä on Linux-pohjainen käyttöjärjestelmä ja se tukee useita eri ohjelmointikieliä, kuten C:tä tai tässä projektissa käyttämäämme Pythonia.

Jotta BBB pystyisi seuraamaan sähköenergian hinnan muutoksia, tulisi sillä olla jatkuva yhteys Internetiin. Internetin viemiseksi BBB:lle valitsimme ZyXEL PLA4231 WLAN Powerline-adapterin ja tälle pariaksi ZyXEL PLA-4201 Powerline-adapterin. Powerline-adapttereilla Internet-yhteys voidaan jakaa suoraan modeemin kautta talon sisäiseen sähköverkkoon. Näin suoraan pakastimelle tulevan sähköjohdon kautta saadaan Internetyhteys BBB:lle ilman ylimääräisiä johtoja. Powerline ratkaisu myös mahdollistaa pakastimen vapaamman sijoittelun käyttökohteessa. WLAN Powerline-adapterin laitoimme pakastimen sisälle tulevaan ohjausyksikköön, sillä langattomuus pakastimen luona antaa ohjelmoijalle helpon pääsyn käsiksi BBB:n tiedostoihin ja ohjelmoituun logiikkaan.

Pakastimen termostaatin korvaajaksi valitsimme kahden lämpömittarin ja releen yhdistelmän. Lämpötilan mittausta varten valittiin Maxim Integratedin MAX31855-muunnin ja releeksi Sparkfun Electronicsin Beefcake 20A-rele. Kyseiseen lämpötilamuuntimeen päädyimme sen suhteellisen pienen koon sekä edullisuuden takia. Muuntimella lämpötilaa pystyy mittaamaan K-tyypin termoparin avulla. K-tyypin termoparilankaa löytyi yliopistolta valmiiksi, joten se oli luonnollinen valinta pakastimen termostaatin korvaajaksi. Käytimme toista lämpötilamuunninta ja termoparilankaa pakastimen sisäosan lämpötilan kehittymisen seuraamista varten. K-tyypin termoparilanka saatiin laitettua pakastimen sisälle huomaamatta sen pohjassa olevan tulpan kautta. MAX31855-muuntimille löytyy valmiit kirjastot Python-ohjelmointikielelle, joten niiden käyttöönotto ja lukeminen onnistuivat helposti. Itse rele taas on 20 ampeeriin 240 voltin vaihtovirtaa kestävä SPST NO-rele. Rele sopi käyttötarkoituksiimme hyvin edullisen hinnan ja korkean virrankestonsa ansiosta. Lisäksi releen tilan vaihtoon riittää matala viiden voltin jännite, joka on mahdollista tuottaa BBB:n jännitepinneillä.

Jotta arkkupakastimen kulutusta pystyttiin seuraamaan tarkasti testien aikana, tarvittiin myös energian- ja tehonmittausta varten oma mittarinsa. Tätä varten pakastimeen lisättiin Siemensin Sentron PAC3200 -verkkoanalysointilaite, jolla pystytään seuraamaan vaihtojännitteisen sähköverkon toimintaa. Mittarille löytyi koululta valmis kirjasto sen lukemiseen, joten se oli helppo kytkeä kiinni pakastimeen tulevaan ohjaukseen ja ottaa käyttöön. Mittarille tehtiin oma kiinnitys pakastimen kompressoriluokun ritilään. Mittari on ainoa ulkoisesti näkyvä osa pakastimeen tehdyistä lisäyksistä, eikä välttämätön lopullisessa älypakastimen toteutuksessa. Mittarin näyttö haluttiin jättää näkyviin, jotta sitä voisi tarpeen tullen käydä lukemassa myös paikallisesti.

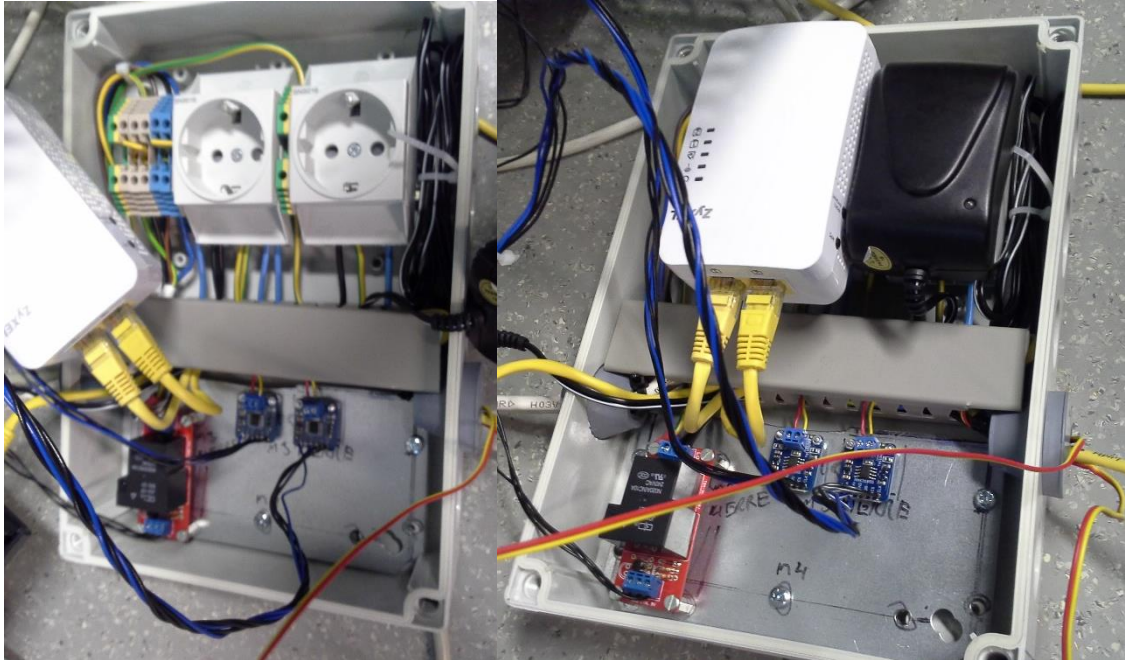


Kuva 2.3 Siemens Sentron PAC3200-verkkoanalysointilaitteeseen kytkettyä älypakastimen ohjauslaatikkoon energian- ja tehonkulutuksen seurantaan varten.

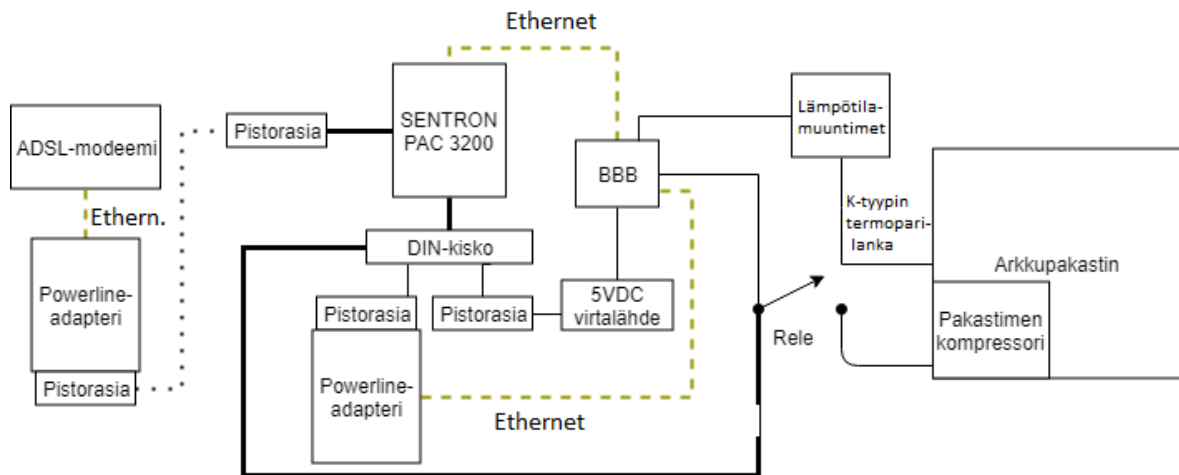
Sähköt laitettiin tulemaan mittarin kautta ohjausyksikölle, josta ne kulkevat edelleen kompressorille. Mittaria saatiin luettua BBB:n avulla liittämällä niiden välille ethernet-kaapeli. Mittarin kiinnitys on esitettyä kuvassa 2.3.

Ohjausyksikön kotelon maksimikooksi mitattiin 250mm x 150mm x 120mm. Tämä on kooltaan suurin kotelo, jonka saa vielä hyvin mahtumaan kompressorin viereen. Ohjauskotelon sisälle asennettiin Sentron PAC3200-mittaria lukuun ottamatta kaikki pakastimen hallintaan tarvittavat laitteet. Tämä osoittautui hieman haasteelliseksi komponenttien määrän takia. Lopulta päädyimme ratkaisuun, jossa kotelo on jaettu kahteen puoleen johtokourun avulla. Yläpuolella kotelossa on verkkosähkö ja alapuolella hienoelektroniikka. Johtokouru auttoi myös pitämään kotelon siistin näköisenä, sillä kourun alle saatiin piilotettua kaikki johtimet. Verkkosähköpuolelle asennettiin DIN-kiskolla riviliittimet ja pistorasiat, joihin Powerline-modeemin ja BBB:n virtalähteet saatiin kiinni. Alapuolelle hienoelektroniikalle eli lämpötilamuuntimille, releelle ja BBB:lle kiinnitettiin oma metallinen pohjalevy, johon komponentit oli helppo kiinnittää.

Ohjausyksikön kotelon sisäiset kytkennät toteutettiin riviliittinten kautta. Tärkeimmät näistä olivat jännitteenjakokiskon ja nollakiskon kytkennät, joiden kautta jännite jaettiin kaikille muille systeemissä oleville komponenteille. Kotelossa olevat metalliosat maadoitettiin maadoitusliittimiin, jotka kiinnittyivät kotelon DIN-kiskoon. Kompressorille vietiin erillisen riviliittimen ja siitä releen kautta kulkevan vaihdejohtimen lisäksi myös tarvittavat nolla- ja suojamaa-johdin. Koteloon tehtiin vielä molemmille sivuille läpiviennit tarvittaville johdoille. Kotelo on esiteltyä kuvassa 2.4. Laitteen kytkennät ovat esitettyä kokonaisuudessaan lohkoaviona kuvassa 2.5.



Kuva 2.4 Pakastimelle toteutetun ohjauslaatikon sisältö. Vasemmalla kuvassa ylhäällä DIN-kiskolle asennettut riviliittimet ja pistokkeet BBB:n virtalähteelle sekä Powerline-modeemille. Keskellä näkyvissä johtokouru. Alaosassa vasemmalla puolella punaisella levyllä rele. Kaksi sinistä levyä ovat lämpötilan mittaamista varten tarvittavat muuntimet. Tyhjiään tilaan lämpötilamuuntimien ja releen viereen asetettiin itse BBB.



Kuva 2.5 Arkkupakastimelle toteutetun ohjauksen lohko-kaavio.

## 2.4 Lämpökapasiteetin kasvattaminen toisella lämpövarastolla

Suurimman lämpövaraston pakastimeen saa hyödyntämällä jonkin nesteen faasimuutosta, jonka avulla voidaan säätää systeemin hitautta. Sopivaksi nesteeksi todettiin veden ja glykolin seos, jonka glykoli/vesi suhdetta vaihtamalla voidaan muuttaa jähmettymispistettä  $-4\text{ °C}$  ja  $-56\text{ °C}$  välillä. Tässä tapauksessa on parasta käyttää mahdollisimman suurta osaa vettä, koska sen sulamislämpö ja ominaislämpökapasiteetti ovat huomattavasti korkeammat. Samalla myös glykolin tuomia riskejä pienennetään.

Glykolin haittapuolena on sen myrkyllisyys elimistölle. Tämän takia on tärkeää varmistaa, että kylmävarasto ei missään tapauksessa pääse kosketuksiin säilytettävien elintarvikkeiden kanssa. Varsinaisesti tässä työssä glykoli ei aiheuttanut vaaraa, sillä pakastimen testaukset suoritettiin ilman elintarvikkeita.

Kylmävaraston mitoittamisessa on otettava huomioon sen kyky varastoida lämpöenergiaa ja sen fyysinen koko, sillä varasto pienentää elintarvikkeille käytettävissä olevaa tilaa ja pakastimen täyttöastetta. Tämän takia olisikin hyvä, jos varaston saisi kätevästi poistettua pakastimesta, kun tila tarvitaan kokonaan käyttöön. Myös varaston pinta-alan tulisi olla mahdollisimman suuri lämmönvaihtokyvyn maksimoimiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa ohutta suorakaiteen muotoista kappaletta, jonka saa kätevästi pakastimen seinämää vasten. Pakastimen tapauksessa voidaan seoksessa käyttää suhdetta 40 % glykolia ja 60 % vettä. Tällä seoksella saavutetaan n.  $-22\text{ °C}$  jähmettymispiste. (The Engineering ToolBox, 2018)

Glykolin ominaislämpökapasiteetti sulana on  $2,43\text{ kJ/kgK}$  ja veden  $4,19\text{ kJ/kgK}$ . Aiemmin mainitulla suhteella saavutettu lämpökapasiteetti olisi siis sulalle seokselle n.  $3,49\text{ kJ/kgK}$ . Tärkein kylmävarasto olisi kuitenkin faasimuutos, joka sitoisi tällöin likimain  $280\text{ kJ/kg}$ . Seoksen tiheys olisi noin  $1048\text{ kg/m}^3$  (Taulukot.com, 2018). Pakastimen sisälle lisättiin lopulta testausta varten puskuriksi  $16,984\text{ kg}$  painava 40%-glykoliseosta sisältävä kanisteri. Tätä määrää vastaisi noin  $4,3\text{ cm}$  paksu kerros glykoliseosta pakastimen pohjalla, joka ei käytännössä haittaisi pakastimen käyttöä. Tähän meni vain noin 7,5 % pakastimen kokonaistilavuudesta. Kanisteri oli helpoin ja turvallisin tapa testata glykoliseoksen toimivuutta pakastimen lämpöpuskurina. Toinen lämpötilamuuntimien K-parilangoista upotettiin glykolicanisteriin, jotta sen tilaa voitiin seurata tarkemmin. Toinen lämpömittari pidettiin pakastimen termostaatin putkessa.

### 3. PAKASTIMEN OHJAUSLOGIIKKA

Pakastimen normaalitoiminta perustuu lämpötilarajoihin. Suositeltava maksimilämpötilaraja pakastimelle, jossa säilytetään elintarvikkeita, on -18 astetta. Pakastin pyrkii tasaisella kompressorin ajolla pitämään lämpötilan halutun rajan tuntumassa tai sen alapuolella.

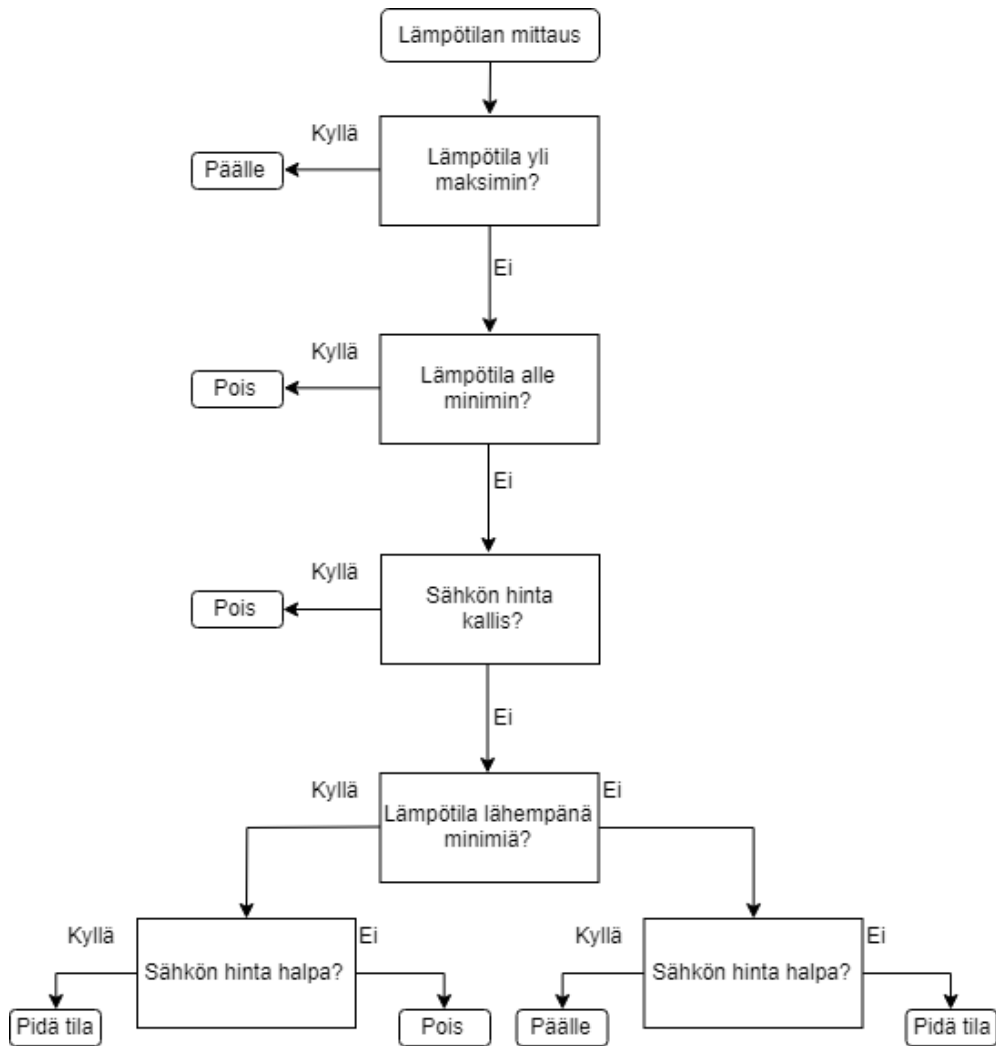
Kun pakastimen toimintaan haluttiin lisätä toimiminen sähköenergian Spot-hinnan perusteella, piti toimintalogiikkaa suunniteltaessa pitää mielessä myös pakastimen normaalitoiminta. Uudenlaisen sähköenergian hintaan perustuvan logiikan suunnittelusta ja toteutuksesta kerrotaan tässä kappaleessa.

#### 3.1 Ohjauslogiikan suunnittelu ja toteutus

Pakastimen ohjauslogiikan suunnittelu lähti liikkeelle perustoimintojen testauksen pohjalta. Ensimmäinen versio ohjauksesta perustui yksinkertaiseen termostaattiohjaukseen, jossa K-tyypin BBB:hen kytketty termopari sijoitettiin pakastimen termostaatille tarkoitettuun asennusputkeen. Lämpömittarin antamien tietojen perusteella kompressorin toimintaa säädeltiin releellä.

Kun normaalin toiminnan ohjaaminen todettiin toimivaksi, alettiin suunnitella sähköenergian hintatietojen lisäämistä pakastimen toimintaan. Pythonilla toteutetun hakufunktion avulla saatiin Internetistä haettua Suomen sähköenergian Spot-hinnat aina seuraavalle 24 tunnille. Spot-hintatiedot tallennettiin BBB:lle talteen. Hintatiedot jaoteltiin BBB:n avulla keskiarvoisesti kalliisiin ja halpoihin tunteihin. Tämän jälkeen BBB:n ohjauslogiikkaa muokattiin toimimaan lämpötilarajan lisäksi myös hintatietojen perusteella. Logiikka on esiteltynä kaaviona kuvassa 3.1

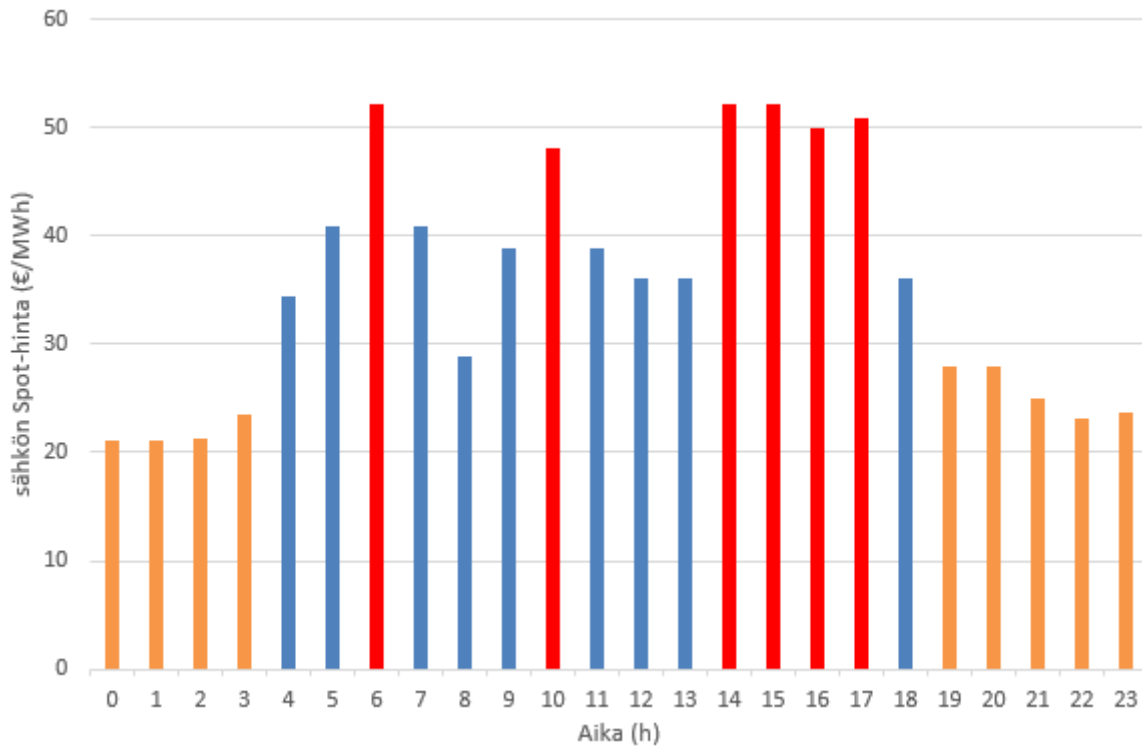
Logiikan toiminta on kaavion mukaisesti seuraavanlainen. Ensin logiikka tarkistaa onko lämpötila yli maksimirajan. Jos on, kompressori laitetaan päälle. Jos taas ei, tarkistaa logiikka onko lämpötila alle minimirajan. Jos on, kompressori laitetaan pois päältä. Jos ei, tarkistetaan seuraavaksi nykyisen tunnin sähköenergian hinta. Keskiarvoisesti hintatietoja vertailemalla tehdään päätös siitä, onko tämänhetkinen hinta kallis vai ei. Jos hinta on kallis, kompressori laitetaan pois päältä. Jos taas sähkön hinta lasketaan keskimääräisesti halvemmaksi, tarkistetaan, onko lämpötila rajojen perusteella lähempänä minimirajaa. Jos on, tarkistetaan sähköenergian hinta. Jos hinta on keskiarvoa alhaisempaa, eli energian hinta on halpaa, pitää pakastin tilansa muuttumattomana. Jos hinta on keskiarvo hinnan tuntumassa, laitetaan kompressori pois päältä. Jos lämpötila ei olekaan kaavion neljännessä haarakohdassa lähellä minimirajaa vaan lähempänä maksimirajaa, tarkistetaan jälleen sähköenergian hinta. Jos hinta on halpa, laitetaan kompressori päälle. Mikäli sähkö ei ole halpaa, pitää pakastin tilansa jälleen muuttumattomana.



Kuva 3.1

Arkkupakastimelle toteutetun ohjauslogiikan logiikkakaavio. BBB mittaa pakastimen lämpötilaa minuutin välein ja tekee mittauksen ja sen hetkisen sähköenergian hinnan perusteella muutoksia pakastimen kompressorin toimintaan.

BBB hakee hintatiedot kerran vuorokaudessa tulevalle vuorokaudelle. Hintatiedoista tehdään keskiarvoinen vertailu mittaushetkellä. Keskiarvon, minimin ja maksimin määrittämiseen hinnan suhteen käytetään sähkön hintatietoja 12 tuntia ennen ja jälkeen mittaushetkeä. Kalliit tunnit ovat tunteja, jotka ovat hinnaltaan kalliimpia kuin keskiarvo  $\pm 12$ h kalleimman tunnin ja sähkön keskiarvoisen hinnan suhteen. Halvat tunnit ovat vastaavasti tunteja, jotka ovat hinnaltaan halvempia, kuin keskiarvo  $\pm 12$ h halvimmasta tunnista ja sähkön keskiarvoisesta hinnasta. Tuntien jakautumista kalliisiin ja halpisiin tunteihin on havainnollistettu kuvassa 3.2.

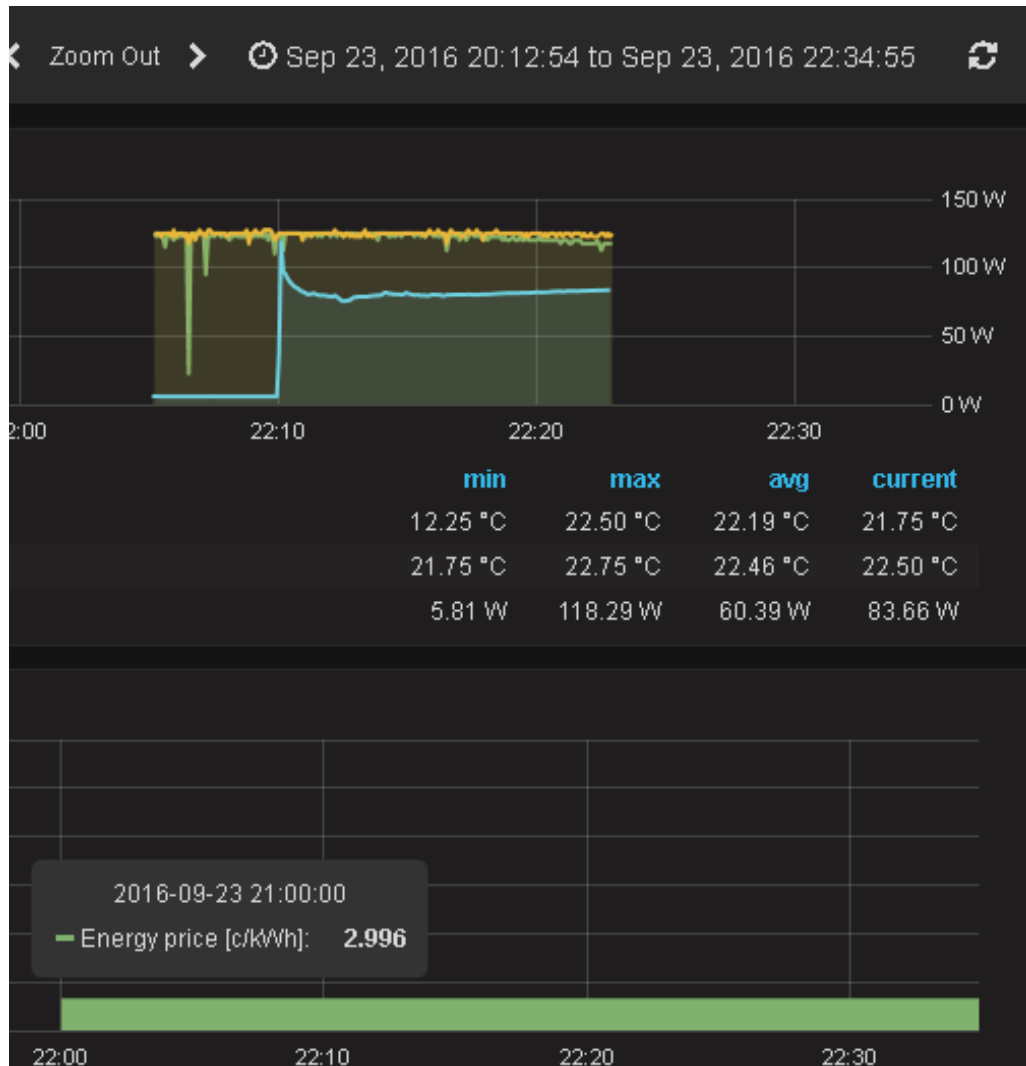


Kuva 3.2 Esimerkkikuva Spot-hintojen jakautumisesta kalliisiin ja halpuihin tunteihin yhden vuorokauden sisällä (19.11.2015). Mittaus on suoritettu kyseisen vuorokauden aikana klo 12. Kalliit tunnit ovat hinnaltaan 43,87 €/MWh tai sen yli maksavia ja halvat 28,24 €/MWh tai sen ali maksavia. Kuvassa kalliit tunnit on merkattu punaisella, neutraalit tunnit sinisellä ja halvat keltaisella. Kyseisellä hetkellä vuorokauden tunneista 25% oli kalliita, 37,5% halpoja ja 37,5% neutraaleja.

Halpojen hintojen aikoihin kompressoria pyritään ajamaan lämpötilarajojen mukaan mahdollisimman paljon, jotta kylmää saataisiin varastoitua halvalla. Vastaavasti kalliiden tuntien aikana kompressorin ajoa pyritään välttelemään parhaan mukaan. Pakastimen tilaa seurataan yhden minuutin välein, jolloin myös BBB kirjaa talteen sen hetkisen pakastimen ilman lämpötilan, glykoliseoksen lämpötilan, pakastimen ja ohjauksen yhteisen tehon kulutuksen, tarkistaa mittauksen hetkellä olevan sähkön hinnan ja tekee logiikan mukaiset päätökset kompressorin ajosta.

### 3.2 Pakastimen toiminnan visualisointi

Jotta pakastimen toimintaa voitiin seurata paremmin, haluttiin sitä visualisoida nettisivujen muodossa. BBB:lle ohjelmoitiin palvelin, jolla pidettiin ylhäällä sivua tätä tarkoitusta varten. BBB piirsi sivulle reaaliajassa tiedot mittauksista sekä päivän sähköenergian Spot-hinnoista. Tietoturvasyistä sivulle pääsi käsiksi vain LUT:n oman sisäisen verkon kautta. Kuvassa 3.3 on esiteltyä esimerkki tietojen visualisoinnin toteutuksesta.



Kuva 3.3 Esimerkkikuva pakastimen tietojen visualisoinnista.

Ylhäällä kuvassa näkyvä oranssi graafi on pakastimen termostaatin lämpötila, vihreä glykolin lämpötila ja sininen pakastimen ja ohjauksen yhteinen tehon kulutus. Alhaalla näkyy kyseisen tunnin aikana voimassa oleva sähköenergian Spot-hinta. Lämpötiloissa näkyvät piikit ovat lämpötilamittareiden mittaushäiriöitä. Kuvassa pakastin on juuri laitettu kylmenemään normaalista huonelämpötilasta.

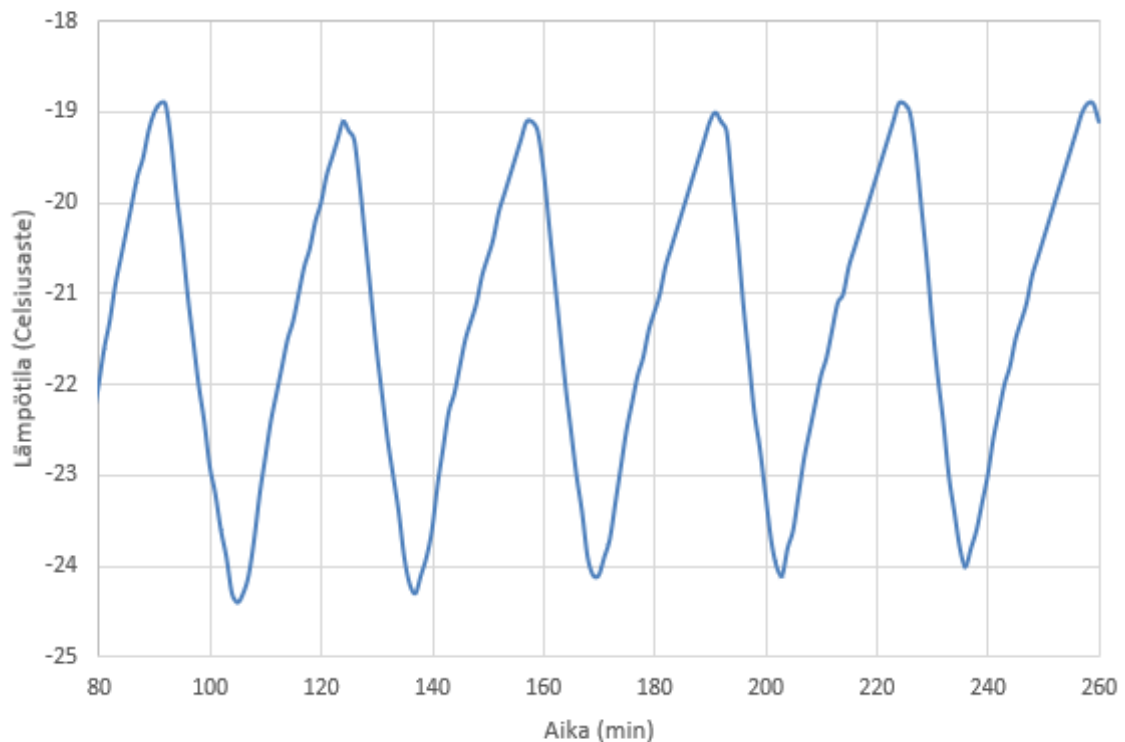


## 4. PAKASTIMEN TOIMINTA JA TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään projektissa toteutetun pakastimen toimintaa ja vertaillaan sitä normaaliin lämpötilarajojen perusteella toimivaan pakastimeen. Kappaleessa esitetyissä esimerkkikuvaajissa ja laskuissa pakastin on ollut tyhjillään tai glykolivarastolla varustettuna, eikä pakastimen kantta ole availtu kesken mittauksen. On myös huomioitava, että esitetyt arviot pakastimen kulutuksen hinnoista perustuvat kuuteen päivään marraskuulta 2015. Keskimääräisesti sähkön hinta Spot-sopimuksella on hieman kalliimpaa talviaikaan, kuin esimerkiksi kesällä.

### 4.1 Normaali toiminta

Normaalisti pakastimen toiminta noudattaa sille asetettuja lämpötilarajoja, joiden välissä pakastin pyrkii pitämään lämpötilansa. Normaalit pakastimen lämpötilarajat ovat yleensä -18 ja -25 celsiusasteen välissä. (Power, 2018) Kuvassa 4.1 on esitettyä projektia varten hankitun pakastimen toimintaa tyhjänä normaalilla lämpötilarajoihin perustuvalla ohjauksella. Lämpötila on mitattu pakastimen termostaatin paikalta.

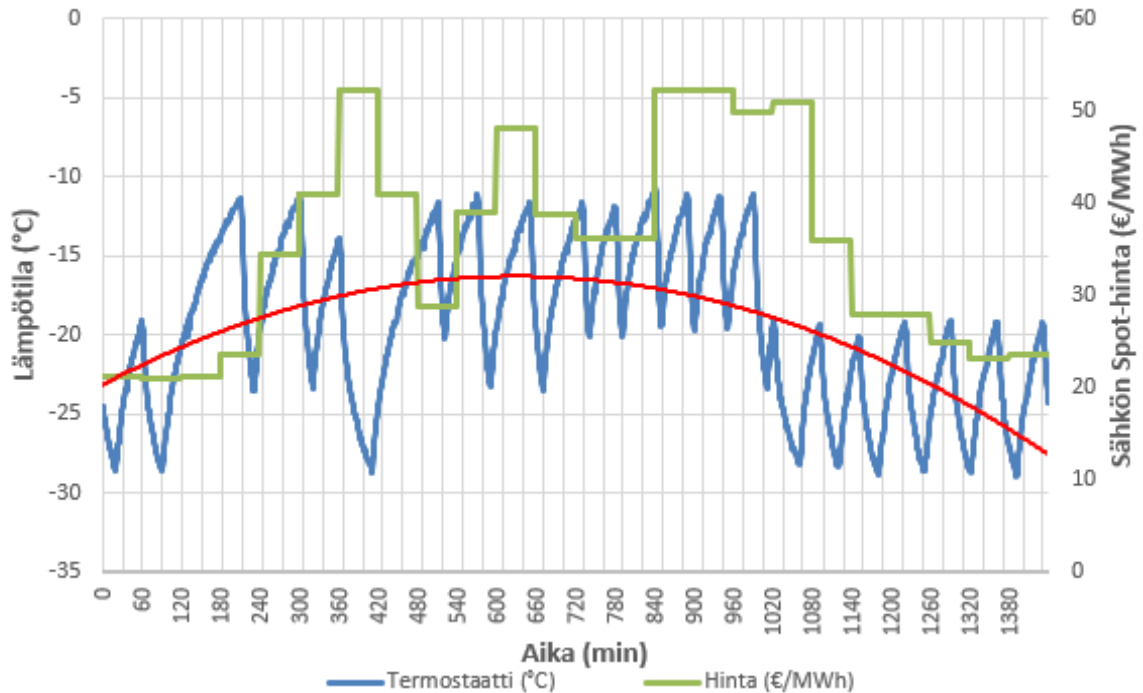


Kuva 4.1 Electrolux EC2331AOW säiliöpakastimen toiminta normaalissa jatkuvuustilassa. Sininen käyrä kuvaa pakastimen lämpötilaa.

Kuten kuvasta näkyy, pakastimen toiminta normaalitilassa on lämpötilarajojen välissä tapahtuvaa sahamaista liikettä. Testikuvassa pakastimen toimintaa on kuvattu 180 minuutin eli kolmen tunnin ajan. Pakastimen lämpötilan noustessa noin -19 celsiusasteen, kompressorin kytketään päälle ja pakastin viilennetään -24 celsiusasteeseen. Karkeasti kuvan perusteella voidaan todeta pakastimen kompressorin olevan päällä noin puolet ajasta ja pakastimen keskilämpötilan pysyvän tasaisesti noin -21-22 celsiusasteen välissä ympäri vuorokauden. Pakastimen keskimääräinen kulutus päivässä on noin 0,49 kWh, joka jakautuu suurin piirtein tasaisesti jokaiselle vuorokauden tunnille.

## 4.2 Toiminta hintalogiikalla

Hintalogiikalla toimiessaan pakastin pyrkii välttelemään kalliita sähköenergian tunteja, mutta pitää myös samalla pakastimen riittävän kylmänä lämpötilarajojen puitteissa, jotta pakastimen normaali toiminnallisuus säilyy. Kuvassa 4.2 on esitettyä pakastimen toimintaa glykolivaraston kanssa hintalogiikan ollessa käytössä. Lämpötila on mitattu pakastimen termostaatin paikalta.



Kuva 4.2 Esimerkkipäivä (19.11.2015) pakastimen toiminnasta sähkön Spot-hintoihin perustuvalla ohjauslogiikalla. Sininen viiva kuvaa pakastimen lämpötilaa termostaatista mitattuna, vihreä sähköenergian Spot-hintaa ja punainen lämpötilan keskiarvoa.

Kuvassa sininen viiva kuvaa pakastimen lämpötilaa ja vihreä sähköenergian Spot-hintaa. Punainen viiva kuvaa pakastimen keskimääräistä lämpötilaa vuorokauden aikana. Kuvasta havaitaan, että pakastimen lämpötilat vaihtelevat vuorokauden aikana -12 ja -27 celsiusasteen välillä, eli lämpötilojen vaihtelu on normaaliin tilaan verrattuna suurempaa. Lämpötila pysyy kuitenkin koko ajan selkeästi miinuksella, joten mahdollisille pakasteille ei aiheutuisi haittaa.

Verrattaessa pakastimen lämpötilan kehittymistä sähkön Spot-hintoihin, huomataan, että aamulla, aamu- ja iltapäivällä, jolloin sähkön hinta on ollut korkeimmillaan, on pakastimen keskimääräinen lämpötila liikkunut -15 ja -20 Celsiusasteen välissä. Yöaikaan, kun sähkö on ollut halvinta, siirtyy pakastimen keskimääräinen lämpötila -20 ja -27 Celsiusasteen väliin. Pakastin ajaa siis kalliiden tuntien aikana kompressoria minimillä pitäen lämpötilan kuitenkin samalla pakastukseen sopivana. Halpojen tuntien aikana pakastin ajaa kompressoria taas mahdollisimman paljon ja varastoi kylmää sisälleen. Hintalogiikkaan perustuvan ohjauksen voidaan siis todeta toimivan halutulla tavalla.

### 4.3 Pakastimen toiminnan analysointi

Vertailtaessa pakastimen normaalia ja hintalogiikkaan perustuvaa toimintaa Spot-sähkösopimuksella sekä kiinteällä sähkösopimuksella Lappeenrannan alueella vuonna 2015, saatiin taulukon 4.1 mukaiset tulokset. Testijaksona toimi kuuden päivän ajanjakso 17.11.-22.11.2015.

Taulukko 4.1 Esimerkkitaulukko pakastimen kulutuksesta testijakson ajalta (17.11-22.11.2015). Vihreällä on merkattu halvin kulutushinta ja punaisella kallein.

	Hintalogiikka, Spot-hinta	Normaali toiminta, Spot-hinta	Hintalogiikka, kiinteä hinta	Normaali toi- minta, kiinteä hinta
Kulutus (kWh)	3,756	2,959	3,756	2,969
Kulutushinta, sis. alv 24% €	0,1138	0,0950	0,1518	0,1195
Sähkövero € (2,79372 snt/kWh)	0,1049	0,0827	0,1049	0,0827
Siirron perusmaksu €	0,78	0,78	1,376	1,376
Toimitusmaksu € (0,25 snt/kWh)	0,0094	0,0074	0	0
Kokonaishinta €	1,0081	0,9650	1,6327	1,5782

Taulukosta 4.1 huomataan, että Spot-hintasopimuksen ollessa voimassa, on normaalitoimintainen pakastin halvempi vaihtoehto. Kulutushinta tavallisella pakastimella on noin 16,5 prosenttia halvempi ja testijakson kokonaishinta noin 4,3 prosenttia halvempi, kuin hintalogiikalla varustetulla. Spot-hintoihin (Nordpool, 2015) kuuluu osana myös toimitusmaksu, joka Lappeenrannan alueella oli vuonna 2015 0,25 snt/kWh sekä perusmaksu 3,90 €/kk. (Lappeenrannan Energia Oy, 2018).

Myös tavallisella kiinteällä sähkösopimuksella normaalisti toimiva pakastin on halvempi vaihtoehto. Kulutushinta on noin 21,3 prosenttia halvempi ja testijakson kokonaishinta noin 3,3 prosenttia halvempi. Kiinteä sähkön hinta Lappeenrannan alueella vuonna 2015 oli 4,04 snt/kWh ja perusmaksu 6,88 €/kk. (Silventoinen, 2015) Myös sähkövero on otettu kokonaislaskelmissa huomioon ja sen määrä veroluokassa I. oli vuonna 2015 2,79372 snt/kWh. (Silventoinen, 2015)

Tutkittaessa pakastimen kulutusta keskimäärin, voidaan siis todeta hintalogiikalla ohjattavan pakastimen olevan kalliimpi molemmilla sähkösopimuksilla. Vuosittainen sähkön kulutus normaalilla pakastimella on noin 180 kWh, kun taas hintalogiikan kanssa kulutus on noin 226 kWh. Tämä 46 kWh ero koostuu hintalogiikan vaatiman ohjausyksikön (BBB), PLAmodeemin, sekä kulutuslaskurin yhteisestä sähkön kulutuksesta, joka on jatkuvasti noin 5-6 watin välillä.

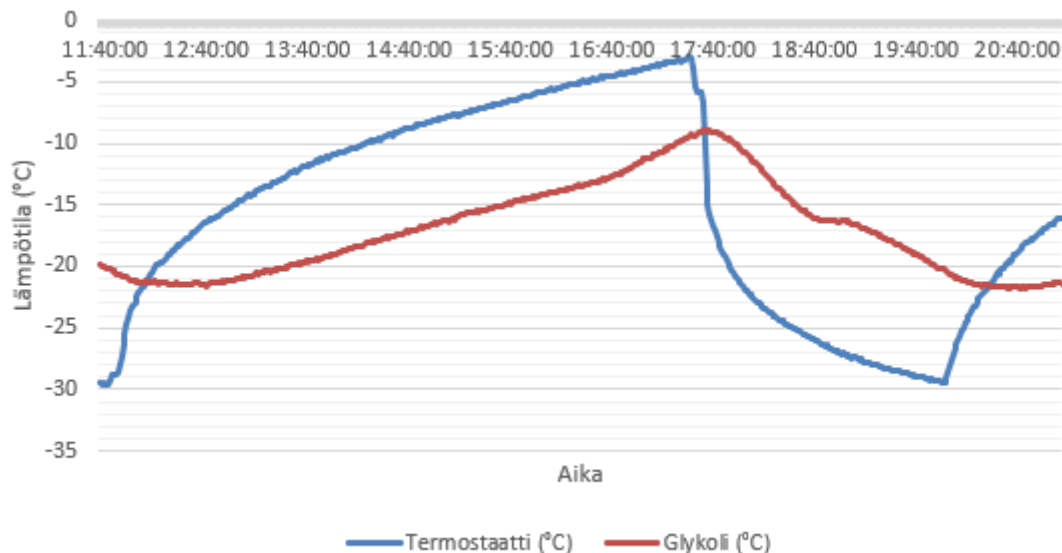
Tarkasteltaessa tuntikohtaisesti arkipäivisin kahden ohjaustavan eroja Spot-hinnalla, huomataan, että kulutushinnat vaihtelevat todella paljon. Parhaimmillaan hintalogiikalla toimiva pakastin voi olla tuntikohtaisesti 90 prosenttia tavallista pakastinta halvempi, mutta vastaa-

vasti pahimmillaan jopa 300 prosenttia kalliimpi pakotetun kompressorin ajon sattuessa kaltille tunnille. Tämä osoittaa sen, että pakastimen hintalogiikka ei toimi vielä aivan täydellisesti ja vaatisi lisää testausta ja hienosäätöä.

Keskimäärin eri logiikoilla toimivien pakastimien kulutuksen hinnoilla on kuitenkin eroa vain noin neljä prosenttia ja hintalogiikan vaatiman ylimääräisen 46 kWh:n vuosikulutuksen huomioon ottaen ero on todella pieni. Jos ohjauksen tuoman ylimääräisen kulutuksen saisi minimoitua lähes olemattomiin integroimalla ohjauksen kunnolla osaksi pakastimen toimintaa ja toteuttamalla sen mahdollisimman energiatehokkaasti, voitaisiin hintalogiikalla varustetulla pakastimella saavuttaa säästöjä vuositasolla säännöllisesti.

#### 4.3.1 Glykolivaraston vaikutus pakastimen toimintaan

23.11.2015 suoritetuilla mittauksilla havainnollistettiin glykolivaraston vaikutusta pakastimen lämpötilan nousemiseen ilman hintalogiikkaa. Pakastimen ohjaus muutettiin mittaamaan 16,984 kg:n glykoliseoksen lämpötilaa termostaatin ilman sijasta ja toimimaan -10 ja -20 celsiusasteen välillä. Tämä näkyi pakastimen toiminnassa jarruttavana vaikutuksena lämpenemisessä. Esimerkki tästä on esitettyä kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Esimerkki glykolivaraston vaikutuksesta pakastimen lämpenemiseen. Kuvassa on esitettyä yksi glykoliseoksen läpikäymä sykli. Glykolin lämpötilan noustessa yli -10 celsiusasteen, kompressori menee päälle ja kylmentää seoksen alle -20 celsiusasteeseen.

Verrattuna kuvassa 4.1 esitettyyn tyhjänä mitattuun pakastimeen on pakastimen lämpeneminen hitaampaa. Tyhjänä pakastin esimerkiksi lämpenee -24 celsiusasteesta -19 celsiusasteeseen noin 20 minuutissa. Glykolivaraston kanssa samaan lämpenemiseen kuluu aikaa noin 27 minuuttia. Kuvasta 4.3 voidaan huomata, ettei glykoliseos käyttyä kuitenkaan aivan halutunlaisesti. Sulaessaan seoksen lämpötilan tulisi pysyä tasaisesti sulamislämmössä. Näin ei glykoliseoksen tapauksessa tapahdu, vaan seoksen lämpötila muuttuu tasaisesti. Syyksi tähän epäiltiin seoksen huonoa sekoittumista. Tästä huolimatta voidaan kuitenkin todeta, että glykoliseos hidastaa pakastimen lämpenemistä merkittävästi ja toimii sen energiavarastona toivotunlaisesti.

## 5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatin työssä kerrottiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa kehitetystä sähköenergian Spot-hintojen mukaan ohjattavasta älypakastimesta, jonka avulla haluttiin tutkia ja demonstroida kysynnänjoustoa sekä energian varastoimista. Pakastin toteutettiin digitaali- ja säätötekniikan laboratoriossa kesällä 2015.

Pakastimen toteutus onnistui halutunlaisesti. Pakastin näytti ulkoisesti täysin normaalilta mutta se pystyi seuraamaan sähkön Spot-hinnan kehitystä Internetyhteyden avulla ja näin säättelemään saamiensa tietojen pohjalta toimintaansa normaalien lämpötilarajojen lisäksi. Pakastimen toimintaa pystyi myös seuraamaan Internetin välityksellä. Pakastimen toimiessa Spot-hintaan perustuvalla logiikalla, se pyrki parhaansa mukaan välttelemään kompressorin käyttöä kalliiden sähköenergian tuntien aikana ja vastaavasti ajamaan kylmää varastoon halpojen tuntien aikana. Rahallisesti hintalogiikalla ohjattu pakastin on ohjauslaitteistosta johtuen kulutukseltaan keskimääräisesti muutaman prosentin tavallista pakastinta kalliimpi.

Tutkimusta voitaisiin jatkaa testaamalla pakastinta erilaisilla lämpötilarajoilla ja hintalogiikoilla. Vaikka pakastin toimii nyt halutunlaisesti, olisi hintalogiikassa vielä kehittämisen varaa. Lisäksi olisi mielenkiintoista nähdä, miten lämpötilarajojen vapaampi tulkinta vaikuttaisi pakastimen kulutukseen sekä toisaalta sen pakasteiden säilytyskykyyn.

Sentron PAC3200-verkkoanalysointilaitteen mahdollistaman sähköverkon taajuuden mittaamisen avulla pakastinta voitaisiin myös hyödyntää sähköverkon toiminnan tasapainottamisessa. Pakastin voisi reagoida sähköverkon taajuuden muutoksiin ja ohjautua myös niiden avulla. Taajuuden laskiessa pakastin menisi automaattisesti pois päältä vähentäen verkon kuormaa. Yksittäisen pakastimen vaikutus verkkoon olisi pieni, mutta useammalla laitteella voitaisiin saavuttaa jo merkittävä kuorma, jonka avulla verkon tasapainoa voitaisiin ylläpitää. Lisäksi pakastimen voisi yhdistää mahdollisesti omaan sähkötuotantoon, kuten esimerkiksi aurinkopaneelien tuottamaan sähköenergiaan. Jos verkossa olisi tilanne, ettei tuotetulle sähkölle ole kysyntää, voisi pakastin varastoida ylimääräisen sähkön kylmyydeksi.

Pakastimelle toteutettua ohjauslaitteistoa voitaisiin soveltaa kulutukseltaan suurempiin kylmälaitteisiin, joissa olisi mahdollista saavuttaa myös rahallista säästöä. Muita tästä ohjaustavasta hyötyviä sovelluksia voisivat olla esimerkiksi lämminvesivaraajat. Lyhyesti sanottuna, mitä suurempi sovelluskohteen kulutus olisi, sitä suurempia olisivat myös saavutettavat säästöt.

## LÄHTEET

Aunio, Jari. 2018. ”Sähkön kysyntäjoustopotentialin hyödyntäminen sähkömarkkinoilla”. Viitattu 12/2018. Saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/26070/Aunio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

BeagleBone Black datalehti. Saatavilla: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB\\_SRM.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf)

Evira. ”Sähkökatkos ja pakastimen sulaminen”. 2016. Viitattu: 11/2018. Saatavilla: <https://www.evira.fi/elintarvikkeet/tietoa-elintarvikkeista/kasittely-ja-sailyttaminen/lampotila/sahkokatkos-ja-kotipakastin/>

Gotech. ”Älykkäät Bosch-kodinkoneet tottelevat Home Connect -ohjausta”. 2016. Viitattu: 11/2018. Saatavilla: <http://gotech.fi/2016/09/28/alykkaat-bosch-kodinkoneet-tottelevat-home-connect-ohjausta/>

Lappeenrannan energia. Sähkösovimusten hintatiedot. 2018. Viitattu 11/2018. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/tuotteet/sahkonmyynti/markkina/Sivut/default.aspx>

Maxim MAX31855 Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter datalehti. Saatavilla: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>

Nordpool. Sähköenergian Spot-hinnat Suomessa. 2015. Viitattu 11/2015. Saatavilla: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table>

Power. ”Onko jääkaappisi liian lämmin? Testaa helposti ja varmista elintarvikkeiden säilyvyys”. 2018. Viitattu: 11/2018. Saatavilla: <https://www.power.fi/artikkelit/onko-jaakaappisi-lampotila-oikea/>

Silventoinen, Juha. 2015. ” Sähkön siirto hinnat Suomessa 2015”. Viitattu 11/2018. Saatavilla: <http://lutpub.lut.fi/handle/10024/118716>

Taulukot.com. ”Mekaniikka”. 2018. Viitattu: 11/2018. Saatavilla: [http://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka\\_termodynamiikka/](http://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka/)

The Engineering ToolBox. ”Propylene Glycol based Heat-Transfer Fluids - Freezing points of propylene glycol based heat-transfer fluids - suitable for the food processing industry”. 2018. Viitattu: 11/2018. Saatavilla: [https://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d\\_363.html](https://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html)