



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Energiaajousto kaukolämmityksessä rakennuksissa

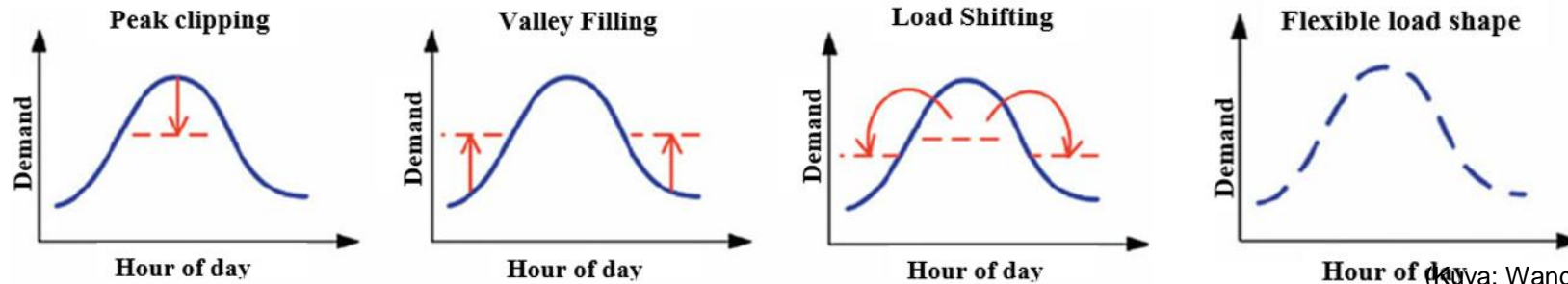
Energia-alan tutkimusseminaari, Helsinki, 30.1.2024

Juha Jokisalo

*Vanhempi tutkija, TkT
Konetekniikan laitos
juha.jokisalo@aalto.fi*

Rakennusten energiajousto

- Lämmöntarpeen tehopiikit tuovat haasteita kustannusten ja päästöjen hallintaan.
- Rakennusten energiajouston kasvattaminen tarjoaa tuotannolle menetelmän tehopiikkien hallintaan.
- Kulutusjoustotapoja esim.



(Kuva: Wang & Yan, 2014)

- **Kaukolämmön kulutusjousto on pitkälti tutkimus- ja kehitysvaiheessa, mutta sitä käytetään jo monissa kaukolämpöverkoissa.**

Simulointitukimus kaukolämmön kulutusjouston vaikutuksista toimistorakennuksessa

Tutkittavat kulutusjoustoratkaisut, kun ohjaussignaalina kaukolämmön tuntihinta:

- Tilojen lämmityksen kulutusjousto sallimalla huonelämpötiloihin joustoa.
- Kaukolämmön alakeskuksen LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto.
- Molemmat ratkaisut erikseen ja yhdessä.
- Kaukolämmön tehonleikkaus, kun käytössä LV-varaaja.

Kysymykset:

- Kuinka kiinteistön omistaja hyötyisi siitä, jos hän ohjaisi kulutustaan tunnittaisen kaukolämmön hinnan avulla?
- Voidaanko kulutusjousto ja tehonleikkaus toteuttaa huonelämpötiloja vaarantamatta?
- Mikä ratkaisusta lisäisi eniten energiajoustoja?

Tutkimusasetelma

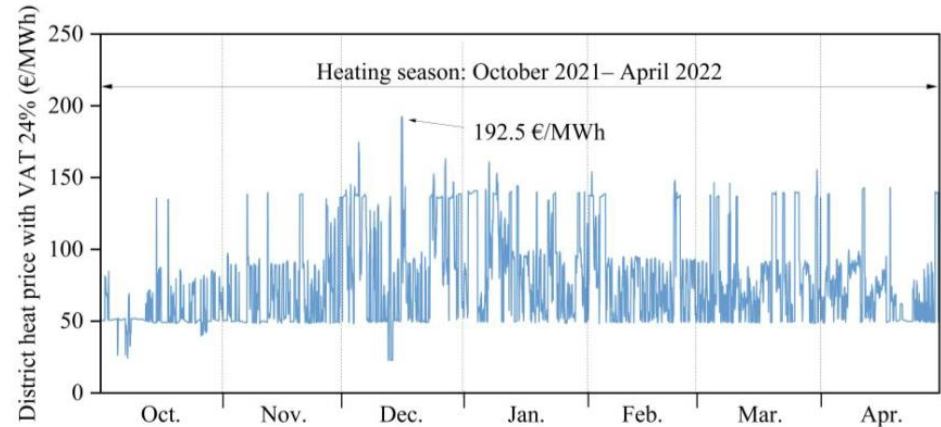
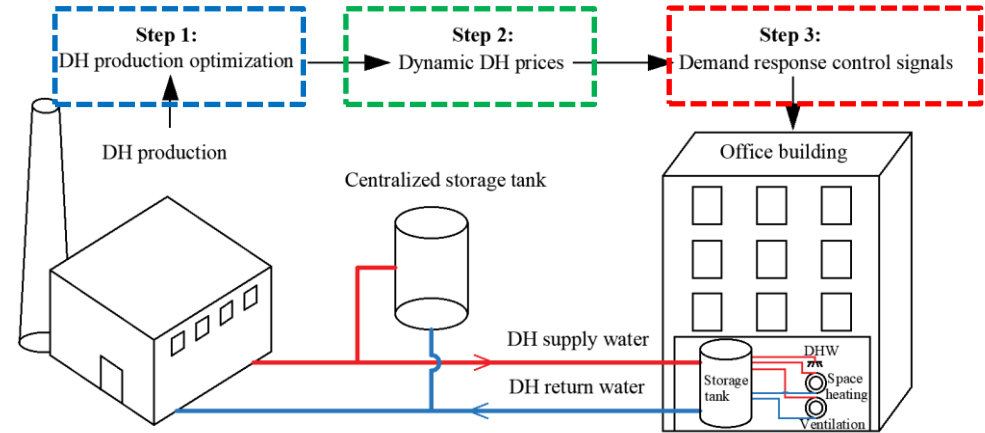
1. Mallinnetaan esimerkkitaikauksen KL-järjestelmä

2. Määritetään synteettinen KL:n tuntihinta

3. Käytetään tuntihintaa lämmityksen kulutusjousto-ohjaukseen toimistorakennuksessa

Simuloitu kaukolämmön tuotanto

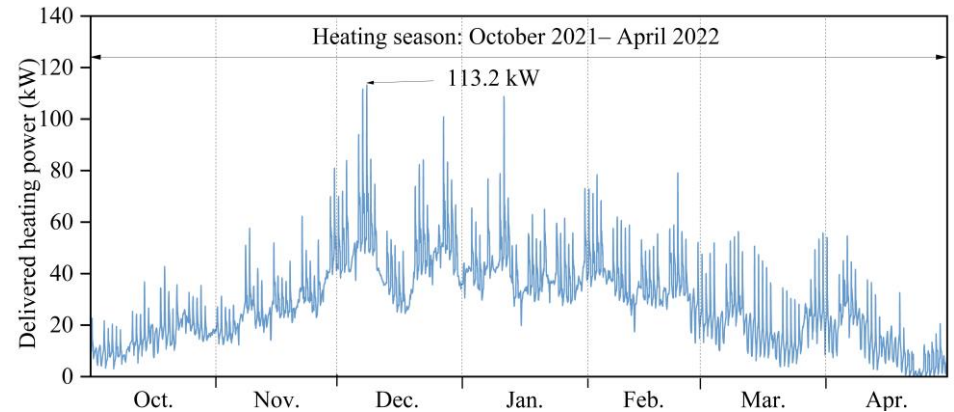
Unit	Fuel type	Fuel capacity (MW)	Generated heat (MW)	Generated electricity (MW)
CHP 1	Coal	265	160	80
CHP 2	Natural gas	498	214	234
CHP 3	Natural gas	132	75	45
Heat-only boiler (HOB) 1	Natural gas	496	446	-
Heat-only boiler (HOB) 2	Light fuel oil	94	85	-
Heat-only boiler (HOB) 3	Wood pellet	90	80	-
Heat-only boiler (HOB) 4	Bio oil	98	90	-
Heat-only boiler (HOB) 5	Wood chip	49	52	-
Heat pump (HP)	-	-	47	-



Simulointikohde:

- Toimistorakennus (2400 m²) Etelä-Suomessa
- Rakennettu 80-luvulla, mutta talotekniikka ja ikkunat uusittu 2000-luvulla
- Kantavat rakenteet betonia
→ Lämmönvarauskyky suuri
- Lämmitys: vesiradiaattorit 45/30C
- Ilmanvaihto:
 - Kon. tulo- ja poisto + LTO
 - VAV (CO₂) neuvotteluhuoneissa, muissa tiloissa CAV
 - Jälkilämmityspatteri 35/20C

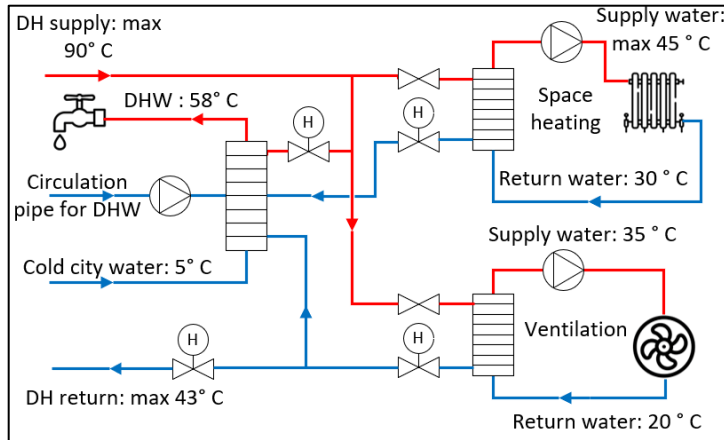
- Tilojen, ilmanvaihdon ja LKV:n KL:n tehontarve yht:



→ **Max. tehontarve simulointijaksolla (10/2021-4/2022) 113kW**

Simuloidut kaukolämmön alakeskukset

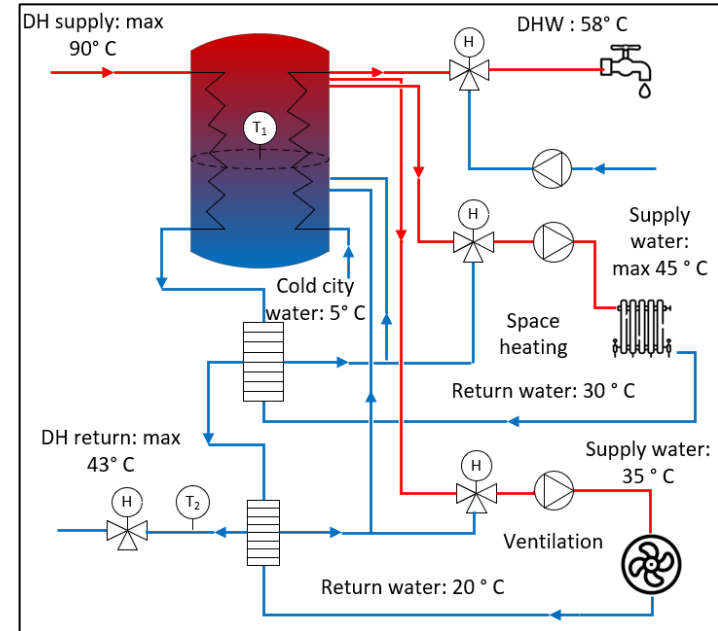
1. Alakeskus perustapauksessa:



→ Käytössä kun:

- Kulutusjousto ei käytetä
- Tilojen lämmityksen kulutusjousto käytössä

2. LV-varaaja (5m³) alakeskuksessa:

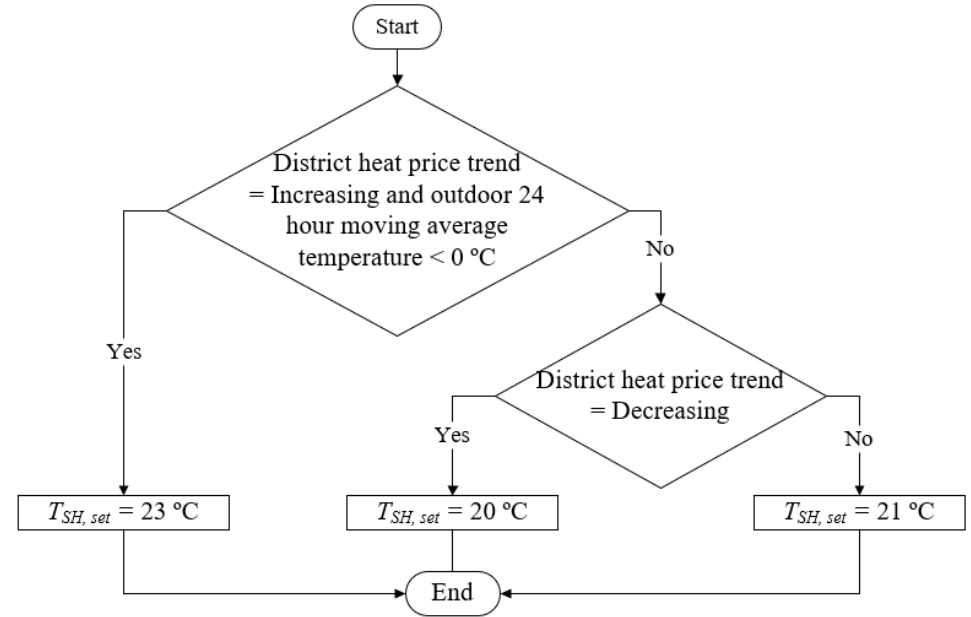


→ Kun käytetään:

- LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto
- Sekä tilojen että LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto

Tilojen lämmityksen kulutusjousto-ohjaus

- Käytössä perusalakeskus ilman LV-varaajaa
- Tilojen lämpötilan asetusarvoa ohjataan huonekohtaisesti KL:n tuntihinnan perusteella.
- Jos KL:n seuraavan 24h hintatrendi on lämmityskaudella:
 - Nouseva: → Nostetaan asetusarvoa (23 C)
 - Tasainen: → Normaali asetusarvo (21 C)
 - Laskeva: → Lasketaan asetusarvoa (20 C)



→ Lämmityksen säätöön tarvitaan elektronisia termostaatteja.



Tilojen lämmityksen kulutusjouston hyöty kiinteistön omistajalle

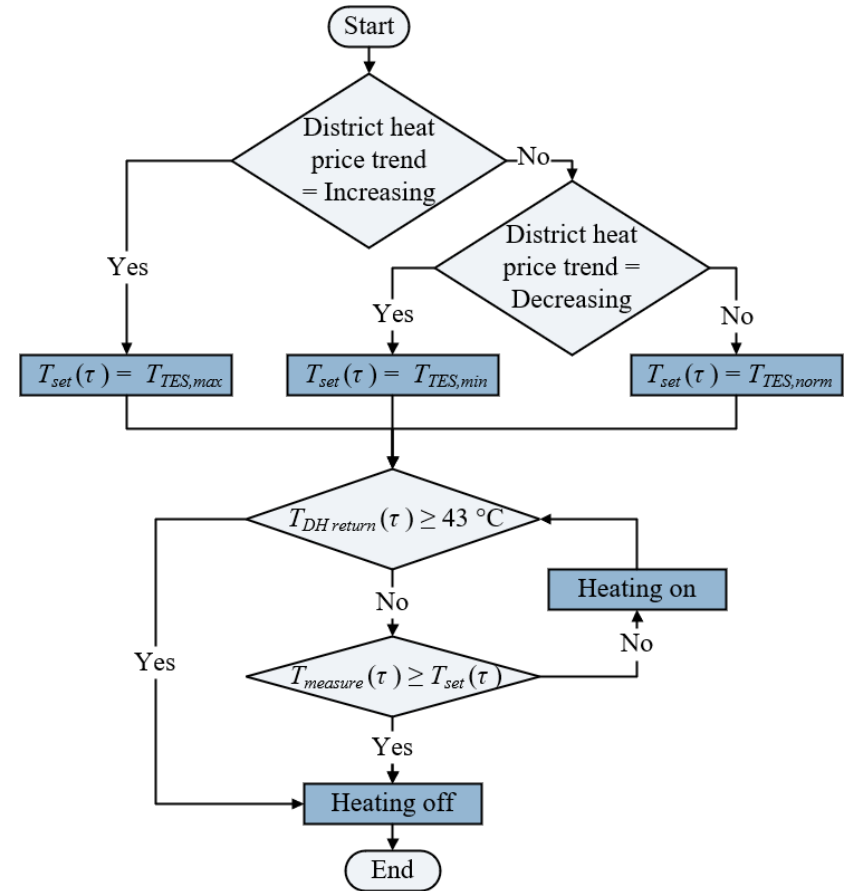
- Vaikutukset lämmityskauden 10/2021-4/2022 aikana:

Cases	Max heating power (kW)	Heat Energy consumption		District heat energy cost		Power fee		Total cost	
		kWh/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.
Ref. 21	113.2	61.5		5.00		3.47		8.47	
Ref. 20	111.8	57.6	-6.2%	4.70	-6.0%	3.43	-1.2%	8.13	-4.0%
DR-SH	112.8	60.6	-1.4%	4.52	-9.6%	3.45	-0.6%	7.97	-5.9%

- Ei kulutusjousto, lämmityksen asetusarvo vakio 21C
- Ei kulutusjousto, lämmityksen asetusarvo vakio 20C → **KL:n kok. kustannussäästö 4.0%**
- Tilojen lämmityksen kulutusjousto, asetusarvo vaihtelee 20-23C → **5.9%**

LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto-ohjaus

- Tilojen lämmityksen asetusarvo vakio 21C.
- LV-varaajan lämpötilan asetusarvoa ohjataan KL:n tuntihinnan perusteella.
- Jos KL:n seuraavan 24h hintatrendi on lämmityskaudella:
 - Nouseva: → Nostetaan asetusarvoa (max. 90C)
 - Tasainen: → Normaali asetusarvo (60C)
 - Laskeva: → Lasketaan asetusarvoa (55C)
- Algoritmi myös varmistaa, ettei KL:n paluuveden lämpötila ylitä vaadittua tasoa.
- KL:n tehonleikkausta tutkitaan myös LV-varaajan kanssa.



LV-varaajan lämmityksen kulutusjouston hyöty kiinteistön omistajalle

- Vaikutukset lämmityskauden 10/2021-4/2022 aikana:

Cases	Max heating power (kW)	Heat Energy consumption		District heat energy cost		Power fee		Total cost	
		kWh/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.
Ref. 21	113.2	61.5		5.00		3.47		8.47	
Ref. 20	111.8	57.6	-6.2%	4.70	-6.0%	3.43	-1.2%	8.13	-4.0%
Ref. ST-55	108.3	61.4	-0.2%	4.93	-1.4%	3.33	-4.0%	8.26	-2.5%
DR-ST	112.4	62.6	1.9%	4.83	-3.4%	3.44	-0.9%	8.27	-2.4%
DR-ST-PL	64.2	62.4	1.5%	4.85	-3.0%	2.04	-41.2%	6.89	-18.7%

- Ei kulutusjoustoja, KL:n alakeskuksessa 5m³ LV-varaaja → **KL:n kok. kustannussäästö 2.5%**

- LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto, asetusrarvo vaihtelee 55-90C → **2.4%**

→ **Kulutusjouston energiakustannussäästö kumoutuu tehomaksun vaikutuksesta.**

- LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto + KL:n tehonleikkaus (43%) → **18.7%**

→ **LV-varaajan käyttö mahdollistaa huomattavan tehonleikkauksen.**

Tilojen ja LV-varaajan lämmityksen kulutusjouston hyöty kiinteistön omistajalle

Vaikutukset lämmityskauden 10/2021-4/2022 aikana:

Cases	Max heating power (kW)	Heat Energy consumption		District heat energy cost		Power fee		Total cost	
		kWh/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.	€/m ²	Diff.
Ref. 21	113.2	61.5		5.00		3.47		8.47	
Ref. 20	111.8	57.6	-6.2%	4.70	-6.0%	3.43	-1.2%	8.13	-4.0%
DR-SH	112.8	60.6	-1.4%	4.52	-9.6%	3.45	-0.6%	7.97	-5.9%
DR-ST	112.4	62.6	1.9%	4.83	-3.4%	3.44	-0.9%	8.27	-2.4%
DR-ST-PL	64.2	62.4	1.5%	4.85	-3.0%	2.04	-41.2%	6.89	-18.7%
DR-SH-ST	112.4	61.7	0.4%	4.36	-12.8%	3.44	-0.9%	7.80	-7.9%
DR-SH-ST-PL	64.2	61.2	-0.4%	4.53	-9.4%	2.04	-41.2%	6.57	-22.4%

• Tilojen lämmityksen kulutusjousto → **KL:n kok. kustannussäästö 5.9%**

• Tilojen ja LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto → **KL:n kok. kustannussäästö 7.9%**

→ **LV-varaajan ohjaus lisää säästöä 2 prosenttiyksikköä.**

• Tilojen ja LV-varaajan lämmityksen kulutusjousto + KL:n tehonleikkaus (43%) → **22.4%**

→ **Tehonleikkauksella lisäsäästöä noin 15 prosenttiyksikköä.**

Kuinka huonelämpötiloille kävi?

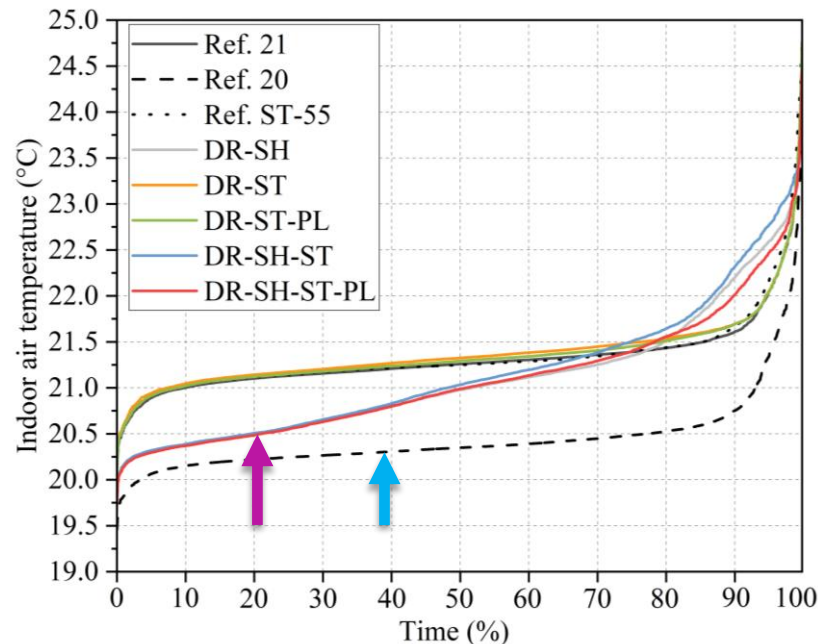
- Kylmimmän huonetilan lämpötila lämmityskauden aikana:
- YM:n asetuksen (1009/2017)* huonelämpötilan hallinnan alin suunnitteluarvo 20 C:

→ Alittuu lämmityksen vakioasetusarvoa käytettäessä 22 astetuntia.

→ Alittuu vain 1-2 astetuntia tilojen lämmityksen kulutusjoustoja käytettäessä.

→ Ei alitu LV-varaajan kulutusjouston tai teholeikkauksen seurauksena.

→ Huonelämpötilat ovat hyväksyttävällä tasolla kulutusjoustoja ja tehonleikkausta käytettäessä.



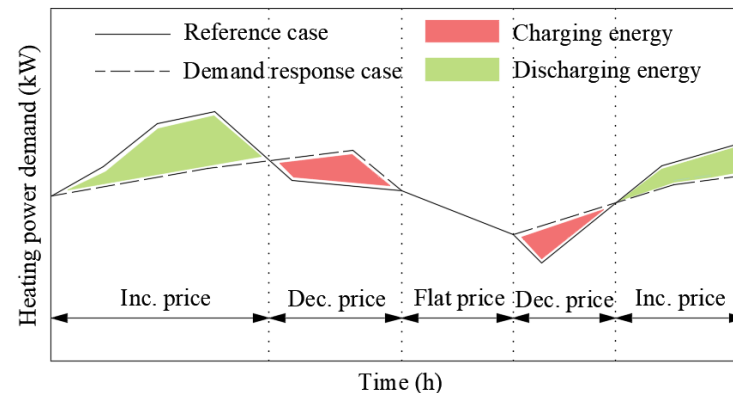
* Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta

Kuinka paljon energiajoustavuus lisääntyi?

- **Energianjouston määrää kuvaavia tunnuslukuja:**

$$FF^+ = \frac{\int_0^\tau (P_{charging} - P_{ref}) \cdot dt}{\int_0^\tau P_{ref} \cdot dt}$$

$$FF^- = \frac{\int_0^\tau (P_{ref} - P_{discharging}) \cdot dt}{\int_0^\tau P_{ref} \cdot dt}$$



→ **Ladatun** tai **varastoidun** lämpöenergian suhde perustapauksen lämmöntarpeeseen

Cases	DR-SH	DR-ST	DR-ST-PL	DR-SH-ST	DR-SH-ST-PL
FF^+	10.3%	8.4%	7.5%	19.0%	12.5%
FF^-	-14.2%	-4.6%	-4.3%	-19.3%	-15.9%

→ Energiajousto hiukan suurempi tilojen lämmityksellä kuin LV-varaajalla.

→ Suurin energiajousto molempia ratkaisuja käytettäessä.

→ Tehonleikkaus hieman vähentää energiajoustoja.





Yhteenveto

- **Lämmityksen kulutusjousto voidaan toteuttaa lämpöviihtyisyyttä vaarantamatta.**
- **Kulutusjoustoratkaisujen vaikutukset ovat tapauskohtaisia:**
 - Esimerkkitapauksessa massiivirakenteisen kohteen tilojen lämmityksen ohjauksella saadan aikaan hieman suurempi energiajousto kuin 5 m³ LV-varaajalla
→ Kevytrakenteisessa kohteessa tilanne on todennäköisesti päinvastainen.
- **Rakennuskohtaisella LV-varaajalla voitaisiin leikata kaukolämmön tehopiikkejä ja huipputehontarvetta huomattavasti.**
- **Tunnittainen kaukolämmön hinnoittelu voisi lisätä kaukolämmitetyn rakennuskannan energiajoustavuutta.**

Lisätietoja:

Article

Benefits through Space Heating and Thermal Storage with Demand Response Control for a District-Heated Office Building

Yuchen Ju ^{1,2,*} , Pauli Hiltunen ^{1,2}, Juha Jokisalo ^{1,2} , Risto Kosonen ^{1,2,3}  and Sanna Syri ^{1,2} 

- Alkuperäinen artikkeli vapaasti luettavissa ja ladattavissa:

<https://doi.org/10.3390/buildings13102670>

¹ Department of Mechanical Engineering, Aalto University, 02150 Espoo, Finland; pauli.m.hiltunen@aalto.fi (P.H.); juha.jokisalo@aalto.fi (J.J.); risto.kosonen@aalto.fi (R.K.); sanna.syri@aalto.fi (S.S.)

² Smart City Center of Excellence, TalTech, 19086 Tallinn, Estonia

³ College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 210037, China

* Correspondence: yuchen.ju@aalto.fi

Abstract: Demand response techniques can be effective at reducing heating costs for building owners. However, few studies have considered the dynamic marginal costs for district heating production and taken advantage of them for building-level demand response. In this study, a district heating network in the Finnish city of Espoo was modeled to define dynamic district heat prices. The benefits of two demand response control approaches for a Finnish office building, the demand response control of space heating and a thermal energy storage tank, were evaluated by comparing them to each other and utilizing them together. A 5 m³ storage tank was installed in a substation of a conventional high-temperature district heating network. A new demand response control strategy was designed to make the most of the storage tank capacity, considering dynamic district heat prices and the maximum allowed return water temperature. The results indicate that the demand response control of space heating and the storage tank cut district heat energy costs by 9.6% and 3.4%, respectively. When employing the two approaches simultaneously, 12.8% savings of district heat energy costs were attained. Additionally, thermal energy storage provides more potential for peak power limiting. The maximum heating power decreases by 43% and the power fee reduces by 41.2%. Therefore, the total cost, including the district heat energy cost and the power fee, can be cut up to 22.4% without compromising thermal comfort and heat supply temperatures to ventilation systems.

Keywords: thermal energy storage; district heating; demand response



Citation: Ju, Y.; Hiltunen, P.; Jokisalo, J.; Kosonen, R.; Syri, S. Benefits through Space Heating and Thermal

Kiitoksia!

Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet:
FINEST Twins (EU Horizon 2020, No. 856602)
Suomen Akatemia: ICA-ICT for Climate Action
(No. 342123)

