

Onderzoek na energiekoste van die inkorporering van 'n latentehitte-termiese-energieopbergstelsel in 'n Suid-Afrikaanse koelkamer

BT Radebe, Z Huan

Tshwane-Universiteit van Tegnologie, Suid-Afrika

Korresponderende outeur: BT Radebe **E-pos:** radebetb@tut.ac.za

Doel: Die opberging van energie is voordelig om ons lewens en die omgewing te verbeter. 'n Latentehitte-termiese-energieopbergstelsel (LHTEOS) het groot potensiaal om by te dra tot verbetering van dit wat tussen die vraag en aanbod van energie plaasvind. Dit maak stelsels doeltreffender en omgewingsvriendeliker wat energieverbruik betref.

Metodologie: Hierdie studie het die integrasie van 'n LHTEOS in 'n Suid-Afrikaanse koelkamer wat by $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ werk, ondersoek om beide energie- en bedryfskoste te bespaar terwyl goedere bewaar word. 'n Hitteladingsanalise is gedoen om die aantal eutektiese plate te bepaal wat nodig is om die verlangde temperatuur te handhaaf, en het ook die aanvanklike koste van die LHTEOS beraam. Eskom se tariefplanne is gebruik om die daaglikse bedryfskoste van 'n koelkamer met en sonder 'n LHTEOS op te teken en te vergelyk. Die tariefplanne is verder gebruik om die energiebesparingskoste van die jare 2021 tot 2022 te raam, en die terugbetalingstydperk vir die nuwe stelsel te projekteer.

Bevindinge: Deur 'n LHTEOS in te sluit wat vir 16 uur werk, sal die elektriese koste R2 260/jaar beloop, en sodoende die bedryfskoste met 50% verminder. Die studie het tot die gevolgtrekking gekom dat dit 'n goeie belegging is om 'n volopberging-LHTEOS te bedryf, aangesien hierdie stelsel R15 000 kos en die terugbetalingstydperk ongeveer 6 jaar sal wees.

Navorsingsimplikasies: Die studie beveel verder aan dat goedkoop eutektiese plate plaaslik ontwerp en vervaardig moet word vir die integrasie om 'n sukses te wees.

Oorspronklikheid: Gebaseer op die huidige ontleding word 'n gedeeltelike opbergstelsel egter aanbeveel om die spitsvraag van 'n koelkamer te verlig en goedere tydens kragonderbrekings binne 'n gespesifiseerde temperatuurbestek te bewaar.

Sleutelwoorde: termiese-energieopberging, faseveranderingsmateriaal, eutektiese plaat

Investigation of energy costs for incorporating a latent heat thermal energy storage system into a South African cold room:

Purpose: Storing energy has been beneficial in improving our life and the environment. A Latent Heat Thermal Energy Storage System (LHTESS) has great potential to contribute to ameliorating what occurs between the supply and demand of energy. It makes systems more efficient and environmentally friendly in terms of energy consumption.

Methodology: This study investigated the integration of an LHTESS into a South African cold room operating at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ to save both energy and operational cost while preserving goods. A heat load analysis was done to determine the number of eutectic plates needed to maintain the desired temperature, and also estimated the initial cost of the LHTESS. Eskom's tariff plans were used to capture and compare the daily operational costs of a cold room with and without an LHTESS. The tariff plans were further used to estimate the energy-saving costs from years 2021 to 2022, and project the payback period for the new system.

Findings: By incorporating an LHTESS operating for 16 hours, the electrical costs would amount to R2 260/year, thereby reducing the running costs by 50%. The study concluded that it is a good investment to run a full storage LHTESS as it costs R15 000 for this system and the payback period will be approximately 6 years.

Research implications: The study further recommends that inexpensive eutectic plates should be designed and manufactured locally for the integration to be a success.

Originality: However, based on the current analysis, a partial storage system is recommended to mitigate the peak demand of a cold room and preserve goods in a specified temperature range during power outages.

Keywords: thermal energy storage, phase change material, eutectic plate

Inleiding

Die opberging van energie is voordelig om ons lewens en die omgewing te verbeter. Energieopberging het 'n beduidende rol gespeel in die aanvulling van ongereelde energievoorsiening om suksesvol in die stygende vraag te voorsien. Energieopberging dra aansienlik by tot die gebruik van doeltreffende en omgewingsvriendelike energie in ons samelewings. Twee voordelige faktore ontstaan dikwels wanneer energie gestoor word – 'n vermindering in energieverbruik en verlaagde energiekoste. Hierdie voordele van doeltreffende stelsels verminder verder (a) die aanvanklike en instandhoudingskoste, (b) toerustinggrootte, en (c) besoedelstofvrystellings deur 'n vermindering in die gebruik van fossielbrandstowwe (Dincer & Rosen 2011).

Figuur 1 klassifiseer die verskillende metodes van energieopberging wat beskikbaar is. Lande soos China is van die wêreld se belangrikste landboulande en het 'n groot vraag na verkoelingstoerusting. Groot hoeveelhede elektriese energie word jaarliks deur verkoelde toerusting verbruik. Daar is deur Evans et al. (2015) opgemerk dat 60% tot 70% van elektriese energie in koelbewaringsfasiliteite vir verkoeling gebruik word. Deur latentehitte-kouebewaring by konveksieverkoelingstelsels te voeg, is die land se elektriese koste verminder. Tydens spitslading stel die latentehitte-termiese-energieopbergstelsel (LHTEOS) energie vry en gedurende normale ure word dit gelaai deur 'n verkoelingstelsel wat parallel daaraan gekoppel is (Yang et al. 2017).

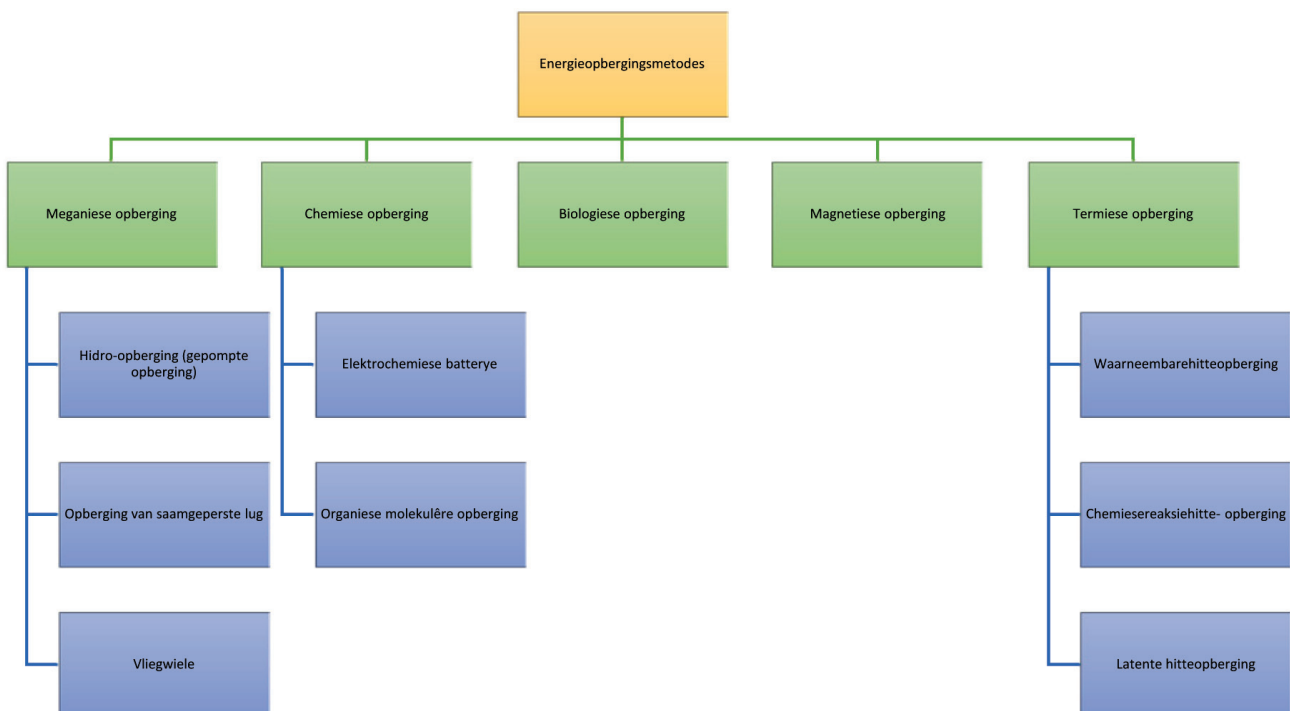
Die LHTEOS benodig gewoonlik 'n koelmiddelstelsel om die eutektiese faseveranderingsmateriaal (FVM) te vries. Ten spyte

van die beperkings daarvan speel hierdie stelsel 'n beduidende rol in die verkoelingsbedryf. Die toepassing daarvan op klein bakkies, toegewyde vrag- en ander toepassings maak dit 'n potensieële oplossing vir die uitfasering van skadelike koelmiddels uit die omgewing. LHTEOS is ook ideaal in ontwikkelende lande, waar die akkuraatheid van temperatuurbeheer minder relevant is vergeleke met die algehele brandstof- en stelselkoste (Lambert & Roberto 2014).

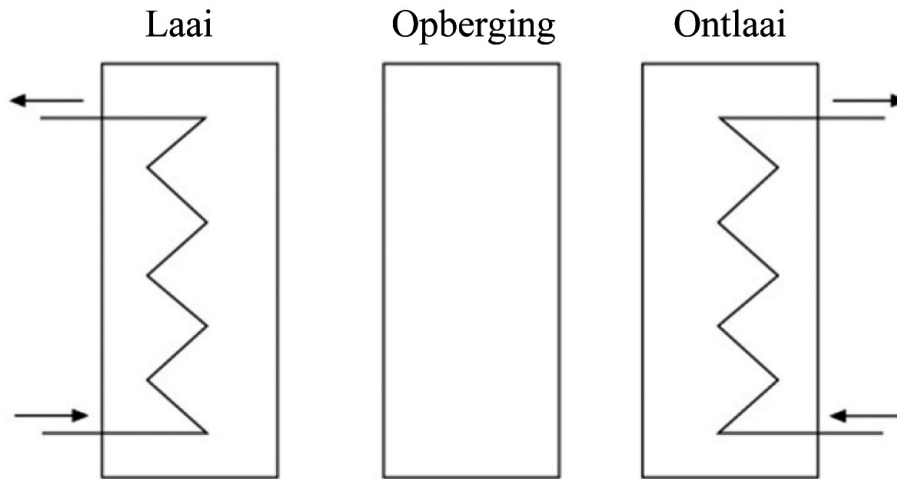
Hierdie artikel bied 'n energiekosteontleding van die integrasie van 'n LHTEOS in 'n Suid-Afrikaanse koelkamer wat by 'n temperatuur van $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ werk. Eskom se tariefplanne word gebruik om die energiebesparingskoste van 'n koelkamer wat daagliks in bedryf is te raam en die terugbetalingstydperk van die nuwe stelsel te projekteer.

Termiese-energieopberging

Termiese-energieopberging (TEO) is 'n metode wat oor groot potensiaal beskik om die wanverhouding tussen die vraag en aanbod van energie reg te stel, en ook oor groot potensiaal beskik om energiebestuur te verbeter deur as 'n periodieke energiebron op te tree. Veral vloeibare vaste FVM's word as sleutelkomponente vir die integrasie van hernubare energiebronne beskou. Hierdie FVM's is nie net tot verkoelingstelsels beperk nie, aangesien dit in hoëtemperatuurtoepassings soos kernkragentrales gebruik kan word. Hierdie veld alleen het baie navorsing gelok, aangesien dit wil voorkom of FVM's oor die vermoë beskik om stelsels wat betref energieverbruik doeltreffender en omgewingsvriendeliker te maak (Dincer & Rosen 2011; Gibb et al. 2018; Lazaro et al. 2020).



Figuur 1: Klassifikasie van energieopbergingsmetodes (Dincer & Rosen 2011; Raam Dheep en Sreekumar 2014)



Figuur 2: TEO volledige opbergingsiklus (Cabeza et al. 2011)

TEO-stelsels werk op die beginsel van laai en ontlaai. Hierdie opbergingsiklus word duidelik in Figuur 2. Hulle kan energie op verskillende plekke, kragvlakke en temperatuur opberg en vrystel (Cabeza et al. 2021).

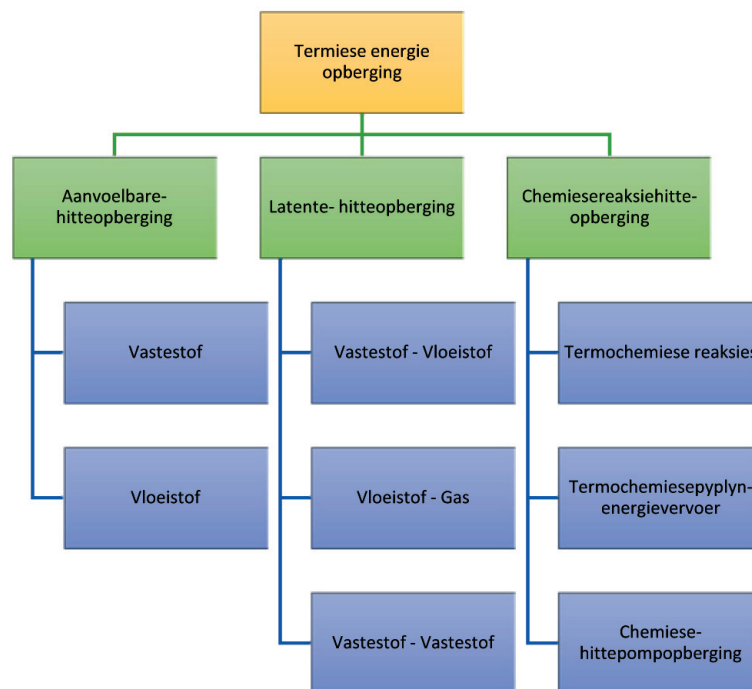
Klassifikasie van termiese-energieopberging

TEO-stelsels bestaan uit drie tipes groepe, naamlik waarneembarehitte-TEO-stelsels, chemiesereaksiehitte-TEO-stelsels en latentehitte-TEO-stelsels, soos in Figuur 3 word. TEO-stelsels behels drie prosesse, naamlik laai, opberging en ontlaai. Prosesse kan in 'n praktiese toepassing gelyktydig plaasvind, waar dit laai, opberg en ontlaai. Elke proses kan meer as een keer in elke opbergingsiklus plaasvind (Vadhera et al. 2018).

a) In waarneembarehitte-TEO-stelsels verander die temperatuur van die opbergingsmedium om energie op te berg,

gebaseer op die hittekapasiteit van die materiaal in die vorm van water, grond, rots, pekelwater of enige ander opbergingsmedium. Die temperatuur van die materiaal verander maar die materiaal ondergaan geen faseformasie tydens die laai- of ontlaaisiklusse nie (Veerakumar & Sreekumar 2016).

b) Chemiesereaksiehitte-TEO-stelsels werk deur molekulêre bindings deur omkeerbare chemiese reaksies te breek en weer te vorm. Omkeerbare reaksies, termochemiese pyplyn-energievervoer en chemiese hittepomp-opberging is die drie maniere van opberging waarop die chemiesereaksiehitte-TEO-stelsel energie opberg. Hierdie metode is voordeliger vergeleke met waarneembarehitte- en latentehittestelsels (Raam Dheep & Sreekumar 2014).



Figuur 3: Klassifikasie van termiese-energieopberging (Raam Dheep & Sreekumar 2014).

c) Latentehitte-TEO-stelsels ondergaan latentehitteversmelting. Wanneer 'n opbergingsmedium 'n fase-transformasie ondergaan, voltooi dit die proses van opberging en herwinning van die termiese energie (d.w.s. latente hitte).

Latentehitte-TEO-stelsels word in drie groepe geklassifiseer, vastestof-vastestof, vastestof-vloeistof en vloeistof-gas, soos in Figuur 3 geïllustreer word. Vastestof-vastestof is 'n fase-transformasie van 'n kristalaard. Vastestof-vloeistof en vloeistof-tot-gas maak gebruik van FVM soos koue stoorwater of ys, paraffienwasse of ander FVM wat van vastestof na vloeistof of van vloeistof na gas kan verander, en omgekeerd. Terwyl die materiaal 'n faseverandering ondergaan, breek die chemiese bindings in die materiaal op en lei tot transformasie van een fase na 'n ander met min temperatuurswaai en bly dit op 'n byna konstante temperatuur (Raam Dheep & Sreekumar 2014; Vadhera et al. 2018).

Latentehitte-TEO

Latentehitte-TEO-stelsels word verder in drie groepe verdeel, naamlik anorganies, organies en eutekties. Dit word in Figuur 4.

a) Anorganiese FVM's

Anorganiese FVM's is hoogs korroderende materiale en reageer dikwels met die konstruksiemateriaal van die omhulsel. Dit is laekostemateriale wat dit geredelik beskikbaar maak; hulle ondergaan egter superverkoeling en segregasie. Hulle het goeie termiese geleidingsvermoë, 'n skerp smeltingspunt, 'n lae volumeverandering, 'n lae spesifieke warmte en 'n hoë versmeltingshitte, wat na 'n paar siklusse afneem as gevolg van die ongelykmatige smelting. Hierdie materiale is gemaak van

metaal en gehidreerde soute (Veerakumar & Sreekumar 2016), en kan ook uit nitrate bestaan. Anorganiese FVM's is stabiel vir 'n wye verskeidenheid temperature tot 1 500 °C (Raam Dheep & Sreekumar 2014; Veerakumar & Sreekumar 2016).

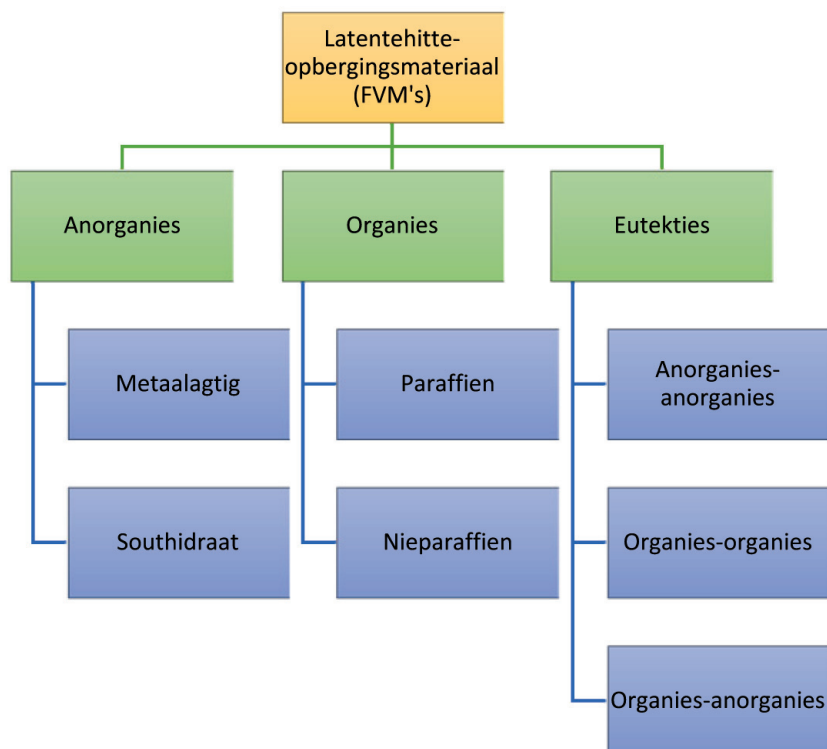
b) Organiese FVM's

Organiese FVM's word geklassifiseer as paraffien en nieparaffien. Hierdie materiale is koolstofgebaseerde verbindings, en na die getal koolstofatome toeneem, neem die latente hitte van versmelting van die materiaal en die smeltpunt toe. Organiese FVM's het 'n hoë latente versmeltingshitte en is chemies stabiel, maar het 'n lae termiese geleidingsvermoë (Veerakumar & Sreekumar 2016).

Organiese FVM's is duur en vlambaar. Organiese FVM's is ook effens korroderend, wat hulle saambruikbaar maak met alle soorte houers behalwe plastiek. Wanneer hulle by hoë temperature werk, is hulle nie geneig om te superverkoel of te skei nie. Organiese FVM's is stabiel by 'n wye verskeidenheid temperature onder 300 °C (Raam Dheep & Sreekumar 2014). Ten spyte van die nadele wat genoem is, is organiese materiale met eutektiese mengsels in die lugversorgingsbedryf reeds gebruik om voedsel te preserveer, elektronika af te koel en geboutemperature te handhaaf (Ndanduleni & Huan 2019; Xu et al. 2015). 'n Studie deur Kaygusuz et al. (2003) het getoon dat hierdie materiale ook vir sonverhitting gebruik kan word.

c) Eutektiese FVM's

Die smeltpunt van 'n FVM is 'n belangrike faktor om in ag te neem wanneer 'n FVM vir koelopbergingstoepassings gekies word. Om die gewenste smeltpunt te bereik, bestaan eutektiese FVM's



Figuur 4: Klassifikasie van FVM vir kouetermiese-energieopberging (Raam Dheep & Sreekumar 2014; Veerakumar & Sreekumar 2016)

uit twee of meer FVM's wat teen 'n spesifieke persentasie van die samestelling gemeng is. Eutektiese FVM's word gekategoriseer in organiese en anorganiese eutektiese FVM's. Dit maak dit vir hulle moontlik om bruikbaar te wees in beide hoë- en lae-temperatuurverkoelingsstelsels (Veerakumar & Sreekumar 2016). Aangesien hulle tot 'n intieme mengsel van kristalle vries, maak dit hulle minder vatbaar vir segregasie (Raam Dheep & Sreekumar 2014).

Kouetermiese-energieopberging (KTEO)

Kouetermiese-energieopberging (KTEO) verteenwoordig koel- en koue-TEO. Materiale soos glikol, eutektiese soute en suiwer water kan as verkoelingsopberging vir TEO-stelsels gebruik word (Dincer & Rosen 2011). Hierdie materiale kan in die koueketting gebruik word vir die vries van produkte of vir verkoeling.

Hoewel hierdie tegnologie al meer as 'n halfeeu bestaan, het dit eers onlangs meer aandag begin geniet weens groot veranderinge in elektrisiteitstariefstrukture, toenames in maksimum kragbehoefte en aansporingsprogramme wat deur nutsmaatskappye geborg is. Nutsmaatskappye hef hoër tariewe vir aanvraag in spitsstye om energieverbruik gedurende hierdie spitsstye te ontmoedig. KTEO-stelsels kan dan gebruik word om spitsverkoelingslading na buitespitsstye te verskuif deur gedurende die dagspitsstye van hulle opgegaarde kapasiteit af te werk en dan gedurende die nag in die buitespitsstye weer volgelaai te word (Dincer & Rosen 2011). Dit lei tot 'n besparing in elektrisiteitskoste.

Laai van KTEO in bedryf

In Figuur 5, Dincer & Rosen (2011) KTEO in drie kategorieë gekarakteriseer, volopberging, gedeeltelikeopberging-ladinggelykmaking en gedeeltelikeopberging-vraagbeperking. Hierdie strategieë word geïmplementeer om in die verkoelingsvraag gedurende spitsstye te voorsien.

a) Volopberging-KTEO

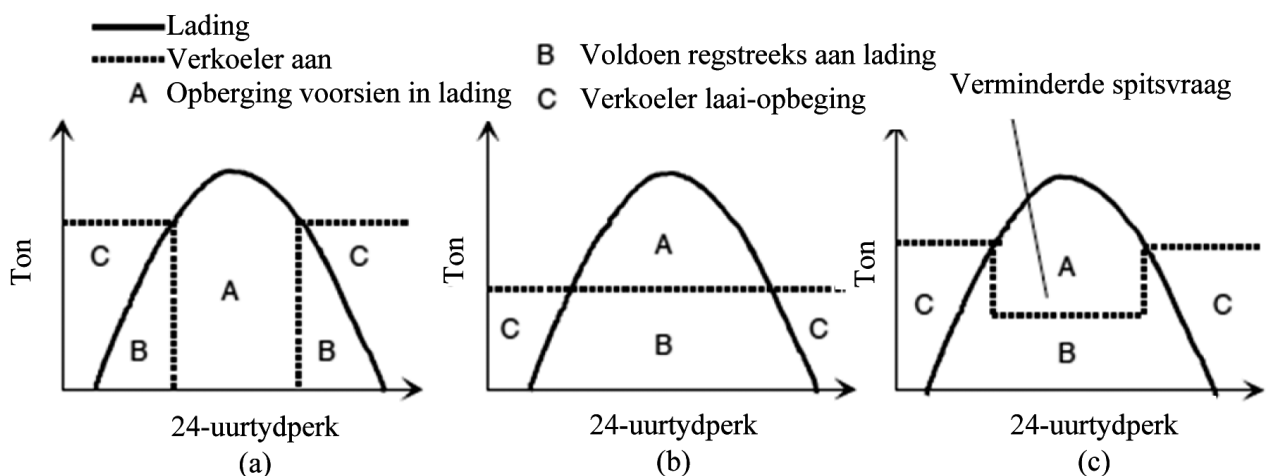
Soos in Figuur 5(a) geïllustreer word, word die KTEO-stelsel gedurende buitespitsstydure herlaai en gedurende spitsstydure is die KTEO-stelsel ten volle in werking. Dit verskuif die hele spitsverkoelingslading na buitespitsstydure deur die werking of die verkoelingsgenererende toerusting van die spitsverkoelingslading te ontkoppel. Die KTEO-stelsel ontlai die verkoelingslading terwyl die opwekkingstoerusting nie in werking is nie, wat hierdie strategie ideaal maak wanneer spitsvraagheffings hoog of die spitsstyd kort is (Dincer & Rosen 2011).

Dincer & Rosen (2011) het verder uiteengesit dat hierdie strategie ekonomies voordelig is indien:

- Spitse in die spitsladingskromme van korte duur is
- Tyd-van-gebruik-energietariewe op spitsstye van korte duur gebaseer word
- Daar kort oorvleuelings tussen spitsladinge en spitsenergietyperke is
- Groot kontantaansporings vir die gebruik van TEO aangebied word
- Hoë spitsvraagheffings van toepassing is

b) Gedeeltelikeopberging-ladinggelykmaking

Hierdie strategie is ontwerp om vir 24 uur in die bedryfsvraag te voorsien, soos in Figuur 5(b) geïllustreer word. Wanneer die spitsverkoelingslading baie hoër as die gemiddelde lading is, is die opbergingstelsel in gebruik om die spitslading te verlig. Die verkoeler het 'n kleiner kapasiteit as die ontwerplading, sodat die res van die lading uit die opgebergte kapasiteit getrek kan word. Dit is ook die goedkoopste stelsel om te gebruik vergeleke met die volopberging- en gedeeltelikeopberging-vraagbeperkingstelsel, wat dit die mees ekonomiese opsie maak (Dincer & Rosen 2011).



Figuur 5: Bedryfsstrategieë: (a) volopberging, (b) gedeeltelikeopberging-ladinggelykmaking, en (c) gedeeltelikeopberging-vraagbeperking (Dincer & Rosen 2011; Selvnies et al. 2021)

c) Gedeeltelikeopberging-vraagbeperking

Met die gedeeltelikeopberging-vraagbeperkingstrategie word die verkoeler se kapasiteit gedurende die spitsstye wanneer die energievraag hoog is, verminder, wat dit vir die opgebergde energie moontlik maak om in die ladingsvraag te voorsien. Hierdie strategie is goedkoper as dié van 'n volopbergingstelsel (Dincer & Rosen 2011).

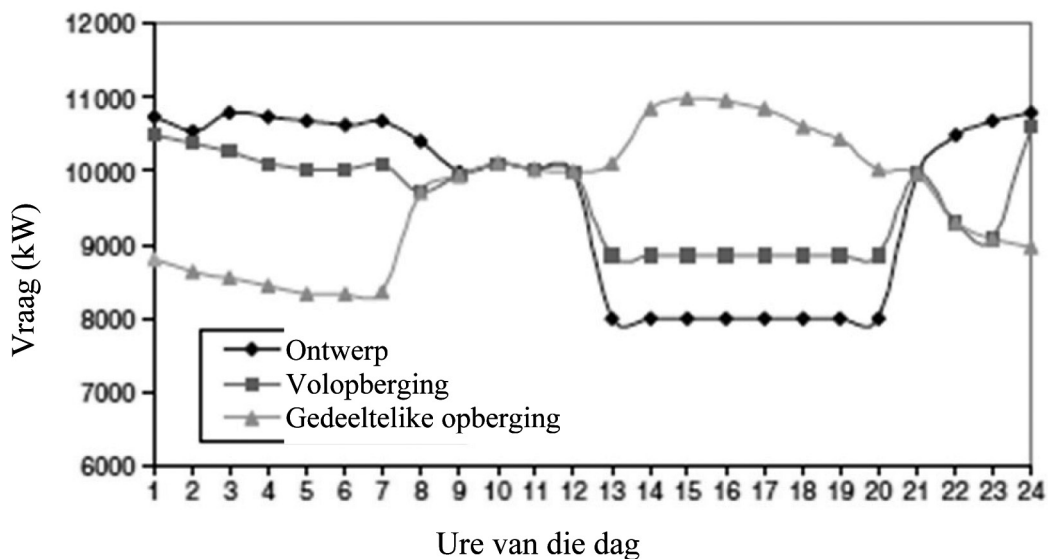
In Figuur 6 Dincer & Rosen (2011) geïllustreer dat wanneer KTEO-stelsels vir volopberging- en gedeeltelikeopberging-toepassings ontwerp word, sekere parameters in ag geneem moes word. Dincer & Rosen (2011) het verder verduidelik dat vir die ontwerp van deelladingstelsels al die komponente en pype in staat moet wees om by verskillende ladings beheer oor die stelsel te behou. In deelladingbedryf word die drukval, snelhede en vloeitempo's van die koelmiddel egter tydens die

aanvanklike stadiums verlaag of verminder. Vir temperatuurverminderingstelsels moet die komponente spesifiek ontwerp word om hoër ladings by aanvanklike aanskakeling te hanteer.

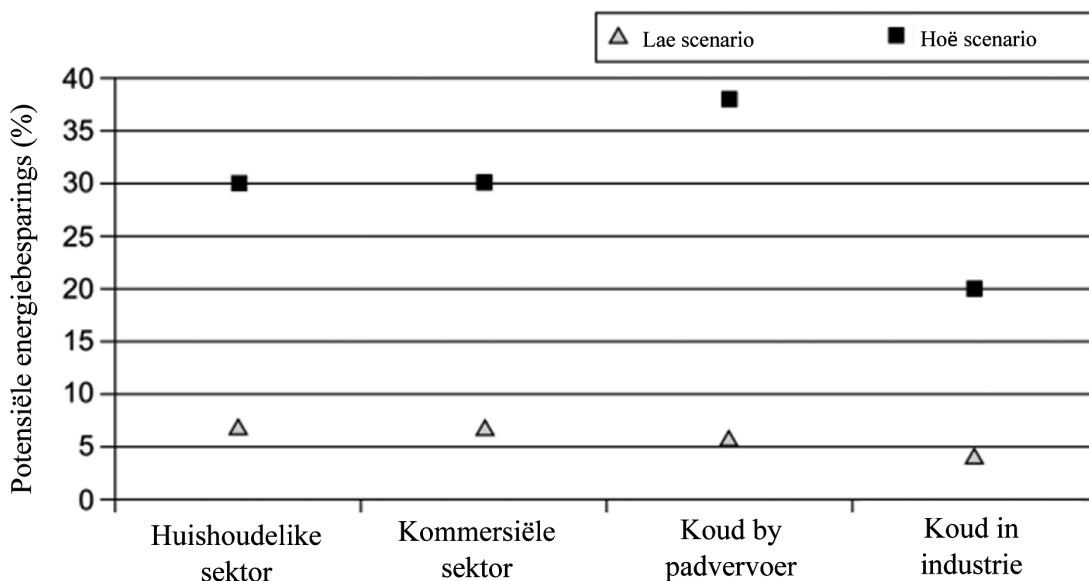
Selvnes et al. (2021) het gesê dat om 'n suksesvolle KTEO-stelsel te ontwerp en te implementeer, die spits/buitespits-vraagstruktuur geïdentifiseer moet word. Dan kan die stelsel pasgemaak word om die lading te hanteer.

Energiebesparing

Figuur 7 toon die slotresultate van 'n model wat deur Oró et al. (2014) ontwikkel is om die potensiële impak van TEO-stelsels in Spanje en Europa te raam. Die model is gebaseer op energieverbruik en die vermindering van CO₂-vrystellings. Die studie is uitgevoer om die potensiële besparing in verskillende sektore te bepaal deur volle implementering van TEO-stelsels in



Figuur 6: Voorbeeldvraagprofile vir die ontwerp-, volopberging- en gedeeltelikeopberging-stelsels (Dincer & Rosen 2011).



Figuur 7: Potensiële energievermindering in koue toepassings met gebruik van verskillende scenario's (Cabeza et al. 2021; Oró et al. 2014).

verskillende toepassingsscenario's te veronderstel. Die toepassingsscenario's was bestaande gepubliseerde navorsingswerk van ander outeurs. Oró et al. (2014) het op grond van die resultate die energiebesparingsfaktore van die laagste na die hoogste gerangskik. Die skrywers het egter aangedui dat hierdie syfers nie die koste van die implementering van TEO-stelsels in bestaande stelsels ingesluit het nie, maar hulle het steeds die energiebesparingspotensiaal vir elke bedryf beraam (Oró et al. 2014).

Eutektiese plate

In 'n vorige studie (Radebe et al. 2020) is 'n gedetailleerde beskrywing van FIC se eutektiese plate bespreek. In hierdie artikel is slegs die plate van FIC ontleed om die totale koste van 'n TEOS te raam. Eutektiese plate het 'n paar voordele bo ander verkoelingstelsels wat hulle onderskei, maar 'n paar nadele is ook met hierdie stelsels ondervind.

Voordele

Eutektiese plate bevat geen bewegende dele terwyl hulle in werking is nie; dus maak dit hulle meganies betroubaarder as ander verkoelingseenhede, wat geneig kan wees tot meganiese falings. Eutektiese plate maak geen geraas nie, wat hulle ideaal maak vir gebruik in situasies wat stilte vereis (FIC 2019).

As gevolg van die faseveranderingsmateriaal-oplossing wat binne-in die plate geplaas word, kan hulle 'n konstante temperatuur binne 'n verkoelde kompartement handhaaf. Hierdie temperatuur word gehandhaaf selfs wanneer die plate aan die omringende lug blootgestel word terwyl goedere op die vragmotor gelaai en afgelaai word. Eutektiese plate kan gebruik word op plekke waar daar geen elektriese netkrag is nie, aangesien dit vooraf gelaai kan word (FIC 2019).

In die geval van koue oppervlakke is ryp as gevolg van die humiditeit in die omliggende atmosfeer geneig om op hierdie oppervlakke op te bou, wat die hitteoordrag tussen die komponent en die atmosfeer aansienlik verminder. Met eutektiese plate beïnvloed die rypopbou nie die hitteoordrag noemenswaardig soos wat met afkoelvinne die geval is nie. Wanneer die duursaamheid van eutektiese plate oorweeg word, het hulle 'n groter duursaamheid en laer instandhoudingskoste as geventileerde stelsels (FIC 2019).

Nadele

Verskillende FVM-verbindings wat binne eutektiese plate gebruik word, kan baie korroderend wees. Om dit te vermy, moet die staal wat vir die verdampers-poele sowel as die plaat gebruik word, volgens die mengseleienskappe van die FVM geselekteer word. Korrosie wat tussen die FVM en die omhulsel voorkom, is een van die oorsake van onvoldoende langtermynstabiliteit by eutektiese plate (Zalba et al. 2003).

Wanneer die FVM van vloeistof na vaste stof verander wanneer dit vries, sit dit uit. As gevolg van uitsetting

tydens die vriesproses kan sommige van die plate lekkasies ontwikkel. Om dit te voorkom, is die spoel van die verdamper só ontwerp dat dit die oplossing toelaat om van die buiterande na die middel van die plaat te vries. Die vervaardiger maak ook al die rande rond en skakel enige skerp dele uit om 'n hoë weerstand te ontwikkel teen kragte wat tydens die uitsettingsproses ontwikkel (FIC 2019).

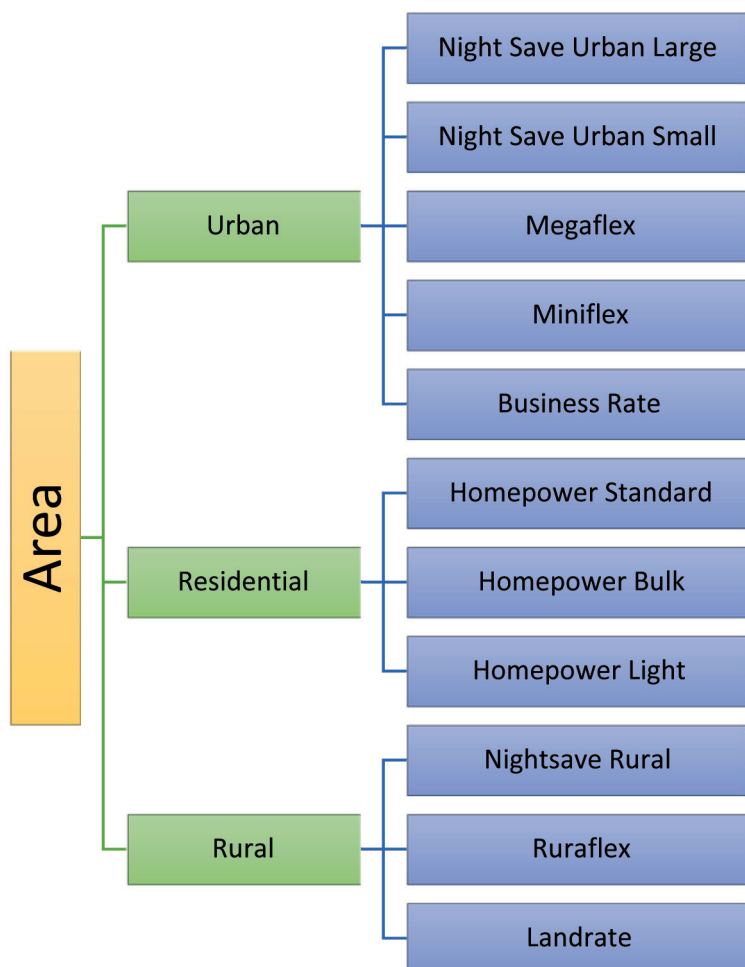
Nog 'n nadeel van FVM's is dat hul werkverrigting geneig is om te verswak, of dat hulle geneig is om af te breek ná verskeie siklusse van verandering van vastestof na vloeistof en dan weer van vloeistof na vastestof. Hierdie onstabieliteit hang daarvan af of die tipe FVM-groep wat gebruik word, organies of anorganies is (Liu et al. 2012; Zalba et al. 2003).

In die meeste studies is getoon dat die FVM-opbergingskoste hoër as die tradisionele opbergingsopsies was (Du et al. 2018).

Eskom-tariefkategorieë

Eskom het verskillende tariefplanne, wat afhanklik is van die tipe gebied, soos in Figuur 8.

- Night Save Urban Large – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte met 'n hoë ladingsfaktor en met 'n gerapporteerde



Figuur 8: Eskom-tariefplan volgens streek (Eskom Bpk. 2021; National Cleaner Production Centre gd)

maksimum vraag ("NMD" (notified maximum demand)) van > 1 MVA.

- Night Save Urban Small – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte met 'n hoë ladingsfaktor en met 'n NMD van > 25 kVA maar < 1 MVA.
- Megaflex – hierdie tarief is geskik vir kliënte wat lading kan verskuif en 'n NMD van > 1 MVA het.
- Miniflex – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte wat lading kan verskuif en 'n NMD van > 25 kVA maar < 5 MVA het.
- Business Rate – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte met kommersiële gebruik en nie-komersiële voorsiening met 'n NMD van < 100 kVA. Dit is klein ondernemings, staatsinstellings, kerke, skole, sale, klinieke, ouetehuse, openbare beligting, ens.
- Homepower Standard – hierdie tariefplan is geskik vir residensiële kliënte (kerke, skole, sale, klinieke, ouetehuse) met 'n NMD van < 100 kVA.
- Homepower Bulk – hierdie tariefplan is geskik vir deeltitel-ontwikkelings.
- Homepower Light – hierdie tariefplan is geskik vir enkelfase-residensiële gebiede wat in stedelike gebiede gesubsidieer word.
- Night Save Rural – hierdie tariefplan is geskik vir landelike kliënte met 'n hoë ladingsfaktor, 'n NMD van > 25 kVA en 'n toevoerspanning van < 22 kV.
- Ruraflex – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte met twee-driefasetoevoer, 'n NMD > 25 kVA en 'n toevoerspanning van < 22 kV.
- Landrate – hierdie tariefplan is geskik vir kliënte met twee-driefasetoevoer en 'n NMD van < 100 kVA en toevoerspanning van < 500 V.
- Land Light – hierdie tariefplan is geskik vir enkelfase-residensiële gebiede wat gesubsidieer word in landelike gebiede wat tot 20 A en 60 A beperk is.

Metodologie

Koelkamerspesifikasies

Die koelkamer wat in hierdie studie gebruik is, word in Figuur 9 geïllustreer. Tydens die werking van die koelkamer met 'n interne temperatuur van -20 °C en 'n omgewingstemperatuur

van ongeveer -24 °C was die gemete kragverbruik ongeveer 4,5 kW by 'n 3kg-koelmiddellading, by 'n gemete massavloei-tempo van 0,06 kg/s. Die verkoelingskapasiteit is toe bereken as ≈10 kW, met die laagste temperatuurlesing van -26 °C by die verdamer. Die spesifikasies word in Tabel I uiteengesit.

Vir hierdie studie is die gemiddelde koelkamerbedryfstyd van 17 uur met 'n volle lading gebruik. Die verkoelingstelsel se bedryfstye was daagliks van 06:00 tot 23:00 geskeduleer.

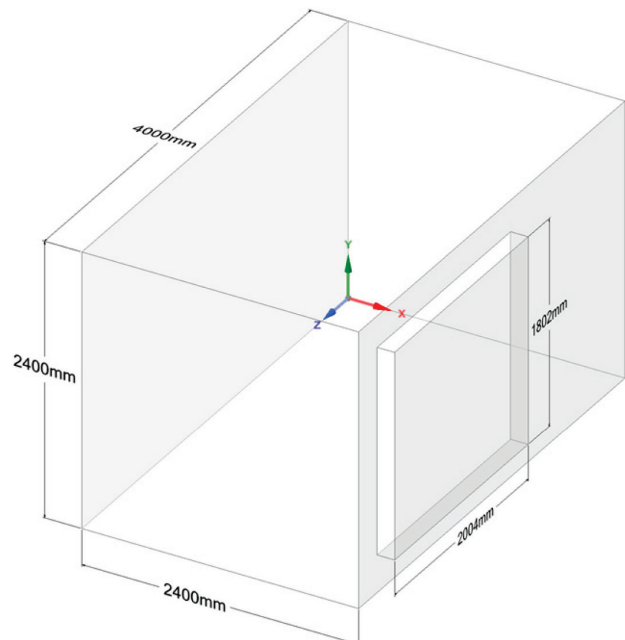
Hittelading

Transmissielading

Die aanvoelbare hittetoename deur die mure, vloer en plafon word bereken teen 'n ewewigstoestand soos uitgedruk in Vergelyking 1 (Huan 2016)

$$q = UA \cdot \Delta T$$

Vergelyking 1



Figuur 10: Afmettings van koelkamer



Figuur 9: Koelkamer

Tabel I: Tshwane-Universiteit van Tegnologie se koelkamerspesifikasies

Afmetings (m) (lxbxh)	4 x 2,4 x 2,4 met 150 mm polistireenpanele en aluminiumplate en 'n deur van 2 x 1,8
Elektriese motor	3-fase Spanning: 380 V Drywing: 5,5 kW RPM: 1 435
Kompressor	V: 20,3 m ³ /h N: 1 450 r/min Slag: 325 cm ³ Pmaks = ND(LP)/HP(HP) = 19/28 bar
Kondensator	Getal buise in die dwarsrigting: 11 Getal rye in die lengterigting: 5 Buislengte (wyd) = 0,83 m verspring Deursnee (ID/ED) 6,25 mm
Verdamper	Getal buise in die dwarsrigting: 11 Getal rye in die lengterigting: 5 Buislengte (breed) = 1,07 m verspring Deursnee (ID/ED) = 8,75 mm
Uitsettingstoestel	Model: elektriese GS 12V PQM 1000 / 140 / 14 / 2 Deursnee (ID/ED) = 3,75 mm
Koelmiddel	HFC R404A, 3 kg-lading

Waar

- U die algehele hitte-oordragkoeffisiënt is van die muur, vloer en plafon [W/m² · K]
- A die buiteoppervlakte van die gedeelte is [m²]
- ΔT die verskil is tussen die buitelugtemperatuur en lugtemperatuur van die verkoelde ruimte [K]

Infiltrasie deur lugwisseling

Die infiltrasie vind meestal plaas as gevolg van die lugdigtheidsverskille tussen kamers. Die gemiddelde hittetoe-name vir die 24 uur deur die deuropening as gevolg van luguitruiling word in Vergelyking 2 (Huan 2016)

$$q_t = qD_t D_f (1 - E) \quad \text{Vergelyking 2}$$

Waar

- q die aanvoelbare en latente verkoelingslading vir ten volle gevestigde vloei is [kW]
- D_t die deuropening-oopstaantydperk is
- D_f die deuropening-vloefaktor is, wat as 1,0 bepaal is
- E die doeltreffendheid van die deuropeningbeskermings-toestel is

$$q = 0.221A(h_i - h_r)\rho_r \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{0.5} (gH)^{0.5} F_m$$

Waar

- h_i die entalpie van infiltrasielug is [kJ/kg]
- h_r die entalpie van verkoelde lug is [kJ/kg]

- ρ_i die digtheid van infiltrasielug is [kg/m³]
- ρ_r die digtheid van verkoelde lug is [kg/m³]
- g die gravitasiekonstante is = 9,81 m/s²
- H die deurhoogte is [m]
- F_m die digtheidsfaktor is, uitgedruk in Vergelyking 3

$$F_m = \left[\frac{2}{1 + (\rho_r/\rho_i)^{1/3}} \right]^{1.5} \quad \text{Vergelyking 3}$$

Vir sikliese, onreëlmatige en konstante deurgebruik, alleen of in kombinasie, is die deuropening-oopstaantydperk bepaal as Vergelyking 4.

$$D_t = \frac{(P\theta_p + 60\theta_o)}{3600\theta_d} \quad \text{Vergelyking 4}$$

Waar

- P die getal deurgange deur die deur is
- θ_p is die deur se oop-toe-tyd is, sekondes per deurgang
- θ_o die tyd is wat die deur eenvoudig oopstaan [min]
- θ_d die daaglikse tydperk is [h]

Eutektiese plate

In 'n studie deur Yang et al. (2017) was die geraamde tyd om 'n eutektiese plaat te laai agt uur.

Elektrisiteitstariewe

Die pryse wat in hierdie studie in aanmerking geneem is, was geldende energietariewe slegs met transmissiesones oor

Tabel II: Eutektieseplaat-spesifikasies (FIC SpA 2018).

Model		Afmetings			Plaatoppervlak	Verdamper		Oplossing -23°C		Oplossing -33°C	
		A × B × S (mm)			(m ²)	Lengte (m)	Vol (dm ³)	Akkm. (Wh)	Gewig (kg)	Akkm. (Wh)	Gewig (kg)
EFR	1 757	1 740	690	53	2,73	20,7	4,14	3 510	83	3 300	88
Prys per plaat, uitgesluit BTW, versending en installeringseelde								≈ R13 250		≈ R14 217	

afstande korter as 300 km, en 'n spanning van minder as 500 V. Slegs seisoenale, TVG en behandeling van openbare vakansiedae is by die prys ingesluit. Business Rate 1 is gekies, met 'n driefasetoewoer van 25 kVA en 40 A per fase. Vir Homepower Light is die toevoer van 20 A gekies as die kragtoevoer wat voldoende is om die koelkamer van krag te voorsien. Die Land Light-tarief is uitgesluit, aangesien dit slegs enkele fase gebied het. Die tariefpryse is saamgegroeper ten einde die prysstruktuur in Eskom Bpk. (2021) te vereenvoudig. Tariefplanne is van 1 April 2021 tot 1 April 2022 bereken. Al hierdie data is beskikbaar in die Eskom Bpk. (2021)-dokument.

Resultate en bespreking

Koelkamerkonfigurasie

Die eutektiese plaat wat in hierdie studie gebruik is, was die EFR 1757 plaat van FIC SpA, waarvan die oplossing by $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'n faseverandering ondergaan. Die vervaardiger het 'n verkoelingstelsel aanbeveel wat $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ onder die faseveranderingstemperatuur werk om die FVM-oplossing ten volle te vries. Die EFR 1757 met die faseveranderingsooplossing van $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ is meer geskik vir vleisopbergingskoelkamers. Die EFR 1757 met die faseveranderingsooplossing van $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ is geskik vir die bewaring van goedere wat van $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ af wissel. Die gebruik van 'n verkoelingsaanleg met 'n laer bedryfstemperatuur sal die COP van die aanleg verlaag en sodoende die laaityd van die eutektiese plaat verminder. Die tegnikus of ontwerper vir hierdie stelsel moet dit in die ontwerp in berekening neem, aangesien die verdamperspoellengte van die eutektiese plaat 'n vaste faktor is.

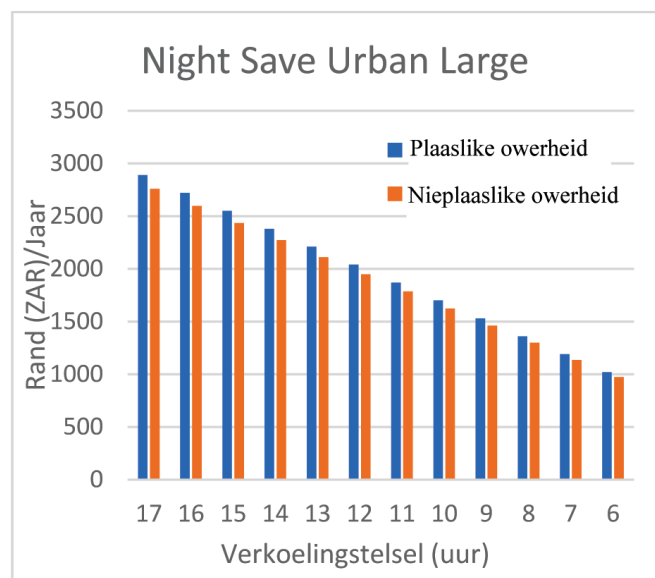
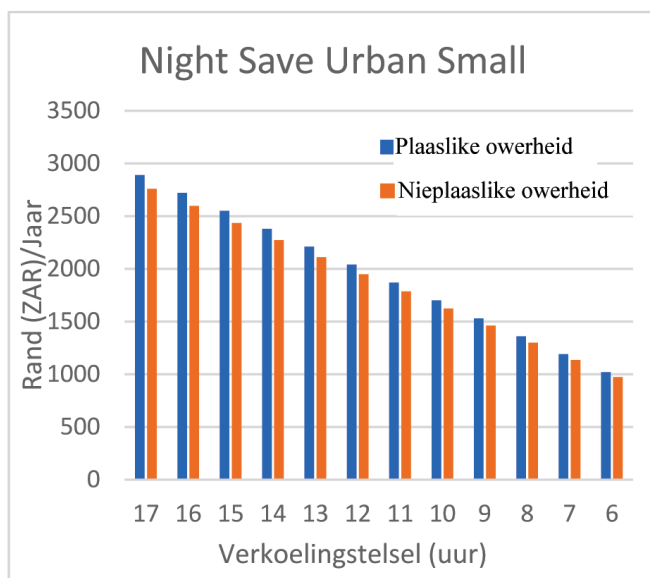
Met die huidige koelkamersskema is die werkstemperatuur van die verdamper $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, dus word die EFR 1757 met 'n faseveranderingsooplossing van $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ aanbeveel. Dit beperk die toepassing van die huidige koelkamer tot 'n yskastoepassing wat by 'n temperatuur onder $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ werk en nie meer dié van 'n vrieskas wat by $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ werk nie.

Wat die konfigurasie-opstelling betref, is daar in 'n vorige studie (Radebe et al. 2020) tot die gevolgtrekking gekom dat die plasing van die eutektiese plate aan die bokant hoë lugsirkulasie binne die kompartement bevorder het. Dit vermy temperatuur-opbou aan die bokant, wat die stapelhoogte van die goedere in die koelkamer beperk. Vir vinnige temperatuurherstel word druklugkonveksie aanbeveel. In hierdie studie is die koste vir druklugkonveksie egter nie ingesluit nie. Die waaiers wat binne die koelkamer gebruik word, dra nie net by tot die hittelading nie, maar dra ook by tot die totale energieverbruik van die verkoelingsaanleg. Die ontwerper moet die hittelading van die waaiermotor by die transmissieladings insluit, wat sodoende bydra tot die volumetoename van die eutektiese plate wat in die koelkamer benodig word. Die ontwerper moet ook die koste inreken om die waaiers te laat werk gedurende die tyd wat die kompressor af is.

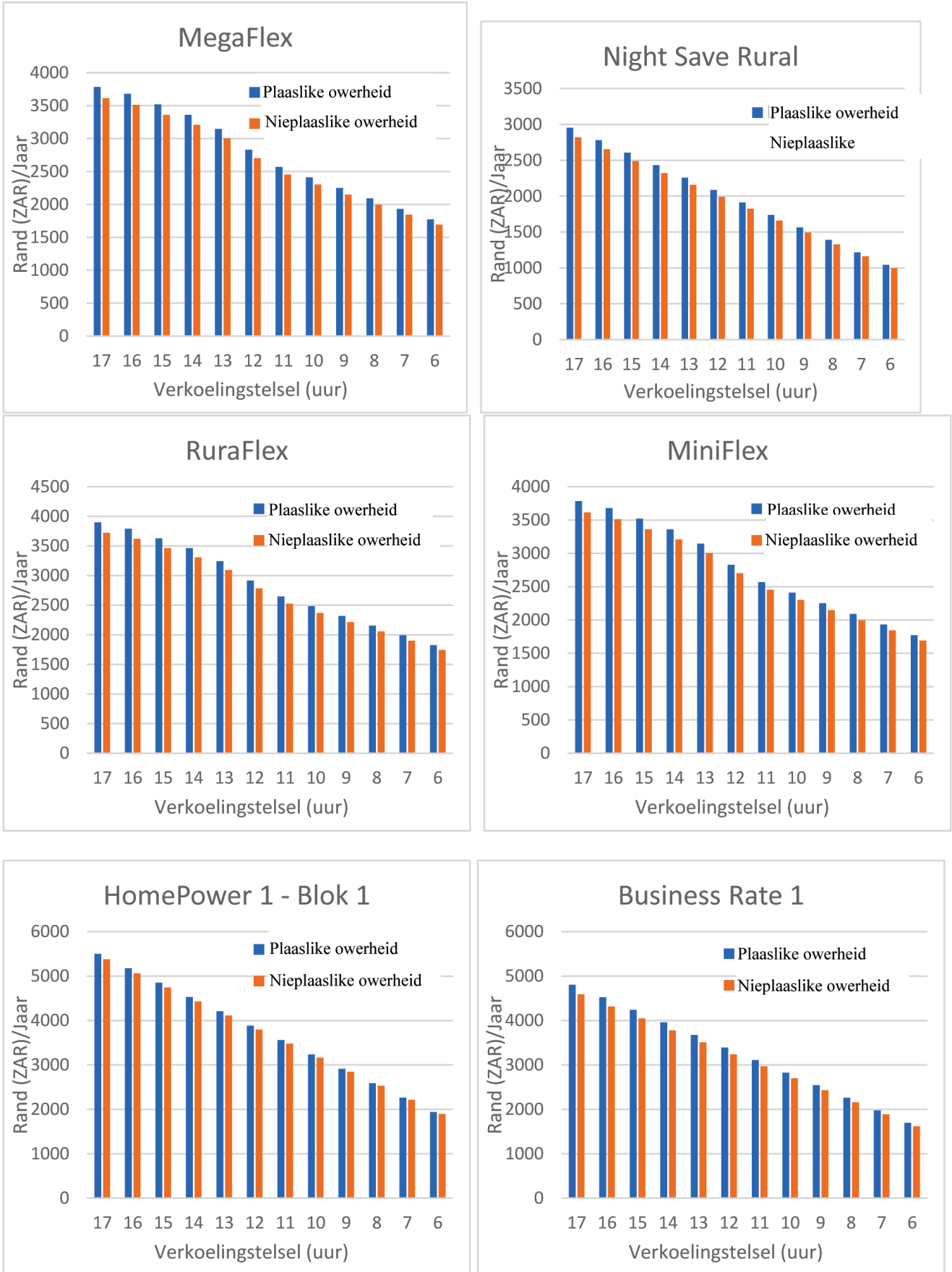
Tariefpryse

Daar is opgemerk dat vir lokaliteite met die tariefpryse in plaaslike en nieplaaslike owerhede, die pryse nie veel van mekaar verskil het nie. Wanneer pryse dus vir langer termyne bereken word, verskil die totale koste nie beduidend nie. Vir elke tariefplan word die berekende maksimum van 17 uur en die minimum van 6 uur weergegee. Dit is die gemiddelde tydsbestek per dag wat die verkoelingstelsel in werking is, soos in Figuur 11 gesien kan word.

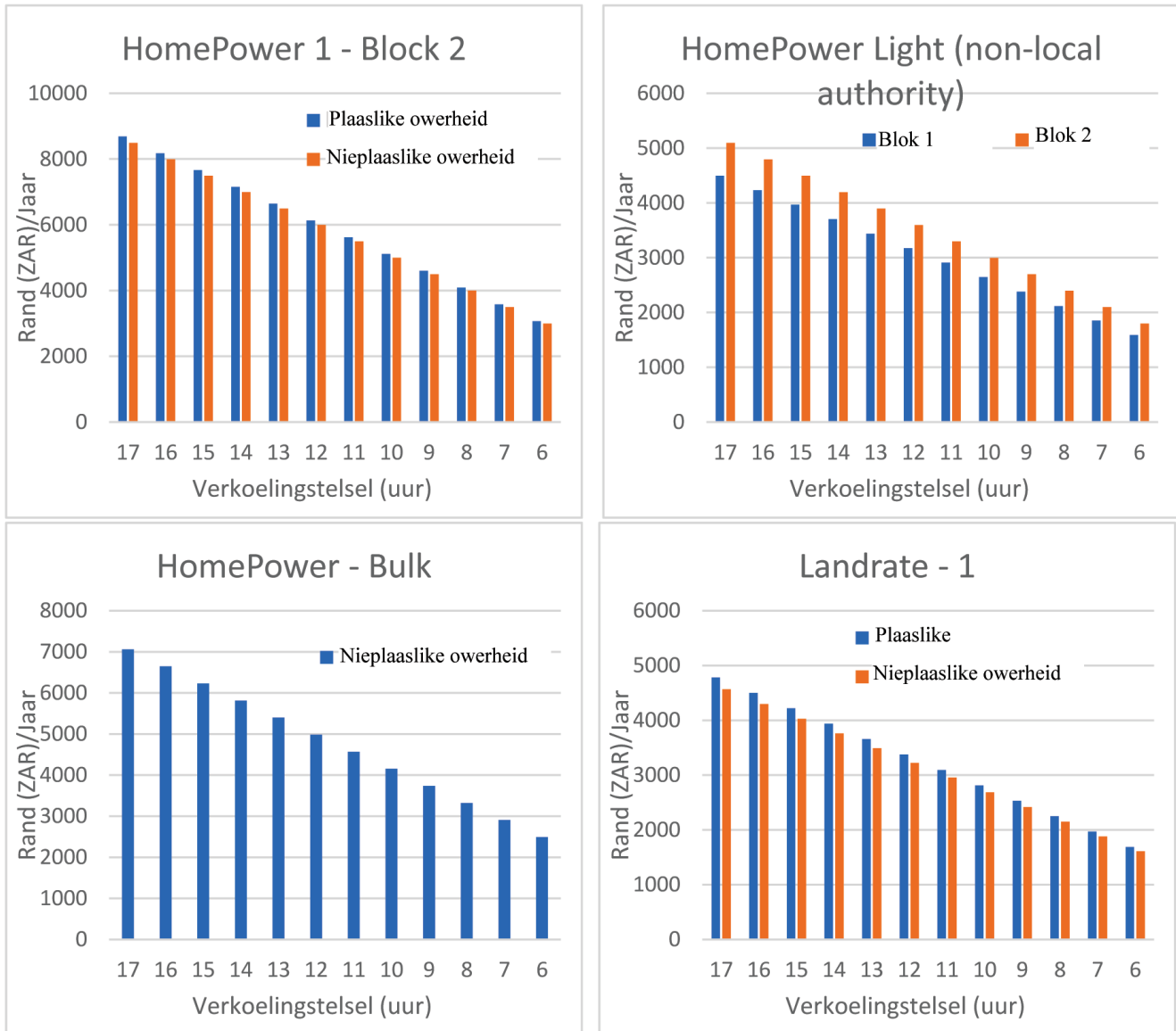
Met die huidige koelkamerkonfigurasie met die verkoelingsaanleg wat gemiddeld 17 uur per dag werk, kos dit byna ZAR3 000/jaar vir koelkamers wat in Night Save-tariefplan se streke geleë is, en byna ZAR4 000/jaar vir Megaflex, Miniflex en Ruraflex. Die koste was bykans ZAR5 000/jaar vir Business Rate, byna ZAR5 500/jaar vir Homepower 1, byna ZAR9 000/jaar vir Homepower 2, byna ZAR4 500/jaar vir Homepower Light, byna ZAR7 000/jaar vir Huispower Bulk en byna ZAR500/jaar vir Landrate.



Figuur 11: Tariefplanpryse vir koelkamerbedryf/jaar



Figuur 11: Tariefplanpryse vir koelkamerbedryf/jaar (vervolg)



Figuur 11: Tariefplanpryse vir koelkamerbedryf/jaar (vervolg)

Die grafieke in Figuur 11 beeld die pryse uit (in rand) as 'n funksie van tyd (vir die bestek van 17 tot 6 uur) – 'n lineêre afhanklikheid. Dit is ideaal om die verkoelingstelsels vir agt uur te gebruik om die helfte van die prys van 'n 17-uur-operasie te gebruik. Dit sou die tyd wees om die LHTEOS volledig te laai soos geïllustreer deur Yang et al. (2017). Die vervaardiger van die eutektiese plate het egter nie genoem hoe lank dit sal neem om die plate te laai nie. Uit bekende literatuur sal 'n groot temperatuurverskil tussen die faseveranderingspunttemperatuur van die eutektiese plate en die verdamperspoel die hitteoordragtempo verhoog, en daarmee saam ook die laaityd. Faktore soos die massa-vloeiempo van die koelmiddel sal ook 'n beduidende rol speel.

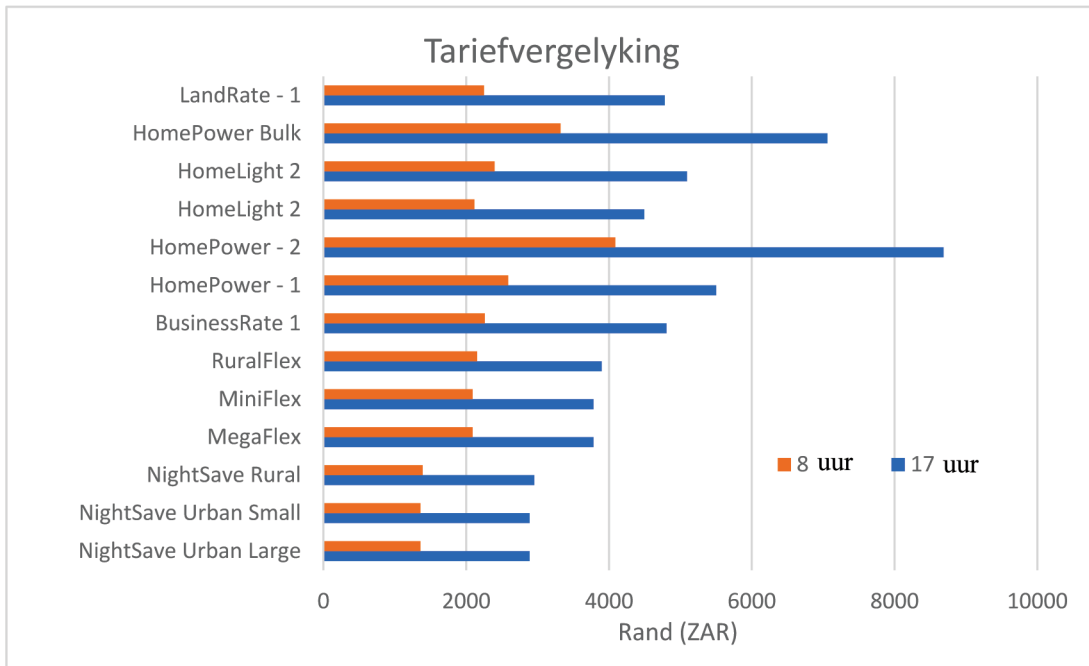
Opbergingsstelsel geïntegreer in 'n koelkamer

Dit blyk dus uit Figuur 12 dat vir 'n koelkamer waarin die verkoelingstelsel gemiddeld 17 uur per dag werk, Homelight die duurste tariefstreek is vir die koelkamer wat in dié streek geleë is. Deur 'n LHTEOS te integreer, sal die verkoeling net vir agt uur loop om die LHTEOS te laai. Dit verminder die koste met

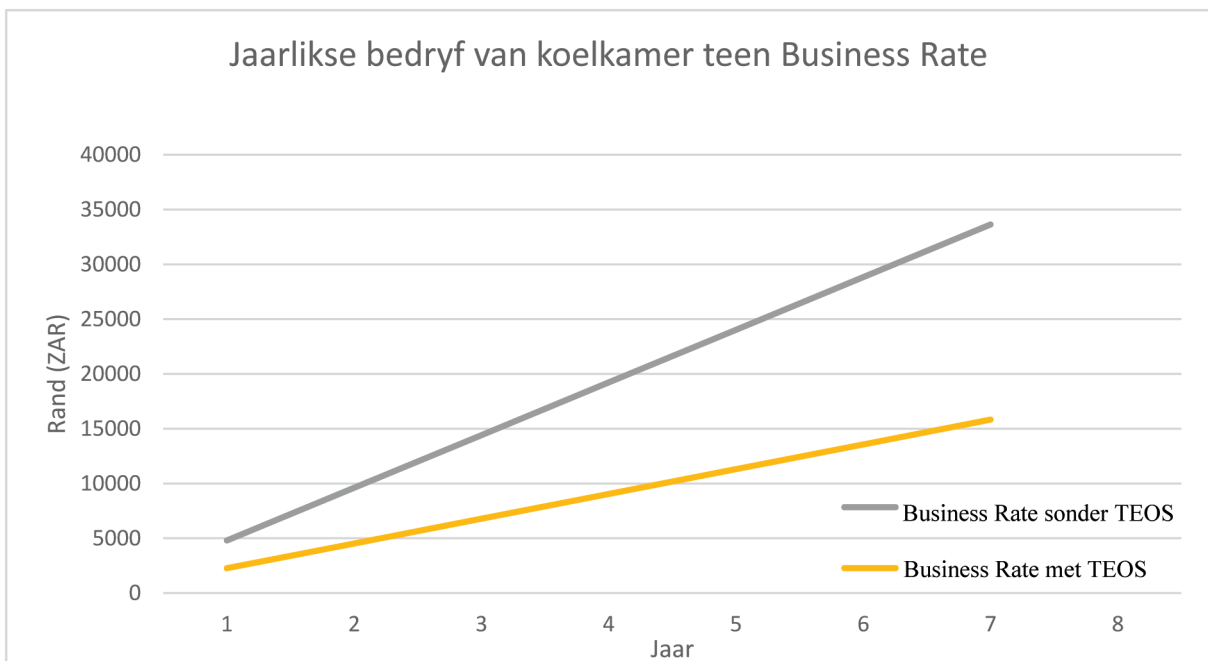
meer as 50% van die prys wat dit sou kos vir 'n verkoelingstelsel wat vir 17 uur aanmekaar werk. Sou die koelkamer in 'n Night Save Urban Large- of Urban Small-streek geleë wees, sal dit die mees koste-effektiewe tarief vir die koelkamer wees, aangesien TOU-skedules gebruik word. Dit bevoordeel dus hierdie tipe tariefplanne, aangesien die koelkamer wat in hierdie streke geleë is, snags bedryf kan word om die eutektiese plaat teen lae koste te laai, en dan gedurende die dag die koelkamer by die verlangde temperatuur te hou deur van die ontlaisiklus van die eutektiese plate gebruik te maak, soos in die studie van Yang et al. (2017). Ongelukkig, in teenstelling met China, verskaf Suid-Afrika se kragvoorsiener slegs 'n vaste tarief in die geval van Business Rate.

Kostebesparing

Die Business Rate-tarief is in 'n ontleding gebruik om die opbrengs op beleggingskapitaal, wat 16,6%/jaar beloop het, te bepaal. Die berekeninge is gebaseer op jaar 1 tot jaar 7 van die installasie. 'n Enkele plaat beloop ZAR15 000, wat as 'n konstante



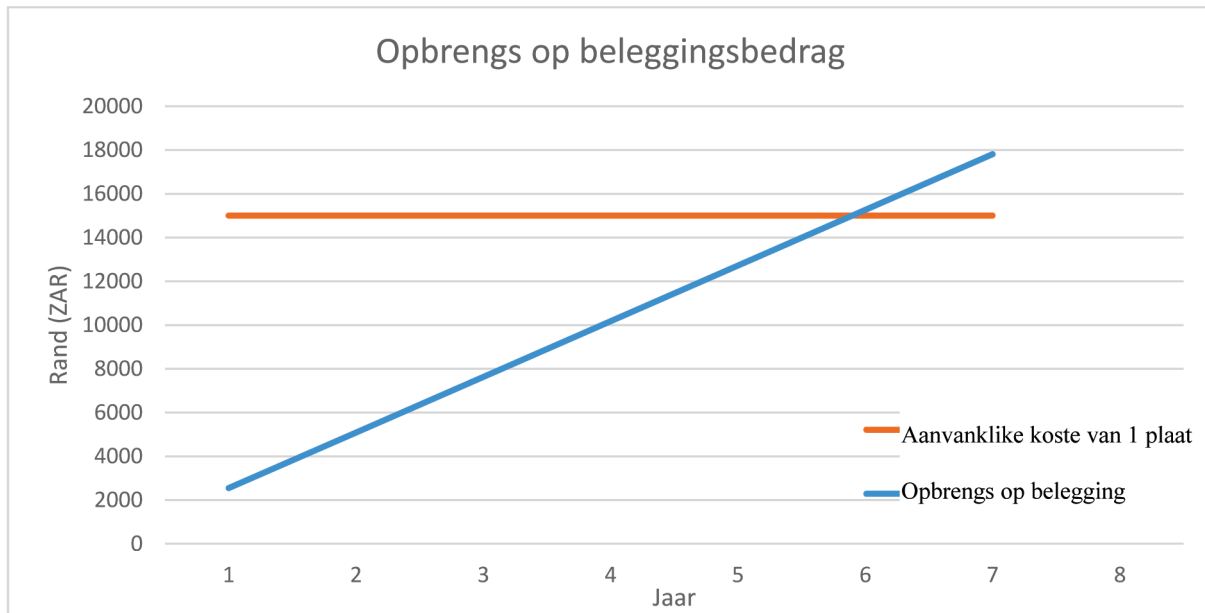
Figuur 12: Tariefvergeelyking na die integrasie van LHTEOS



Figuur 13: Jaarlikse werking van koelkamer teen Business Rate

lyn in Figuur 13 getoon word. Die koste om 'n koelkamer te bedryf teen Business Rate sonder 'n LHTEOS beloop dubbel die koste wat dit beloop om 'n koelkamer met 'n LHTEOS te bedryf. 'n Koelkamer wat sonder 'n LHTEOS werk, verbruik meer energie en kos ZAR30 000 oor ses jaar, vergeleke met een wat 'n LHTEOS gebruik wat 16 uur bedags werk, waarvan die koste ZAR15 000 beloop.

Die huidige pryse van die eutektiese plate maak dit moeilik om die aanvanklike koste van die skema te verhaal. Deur die elektrisiteitskoste van 'n koelkamer wat met 'n LHTEOS werk af te trek van die elektrisiteitskoste van 'n koelkamer wat sonder 'n LHTEOS werk, kan die kostebesparing bepaal word. Hierdie berekende pryse neem aan dat faktore soos inflasie, oliepryse, ens. konstant bly. Figuur 14 toon dat dit ses jaar sal neem om die aanvanklike koste van R15 000 te verhaal. Die kostebe-



Figuur 14: Opbrengs op beleggingsbedrag

sparingstydperk is lank, en eutektiese oplossings het 'n beperkte lewensiklus. Al is eutektiese plate dus herbruikbaar, moet hierdie bykomende instandhoudingskoste by die koste ingereken word. Die aanvanklike koste word oor ses jaar verhaal. Daar word dus tot die gevolgtrekking gekom dat die opbrengs op die beleggingskapitaal 16,6%/jaar sal wees. Hierdie koste sluit nie belasting op toegevoegde waarde (BTW), aflewering en installasie in nie. Deur die koste van die plate te verminder, sal die skema meer aantreklik vir kliënte wees, aangesien LHTEOS die potensieële negatiewe impak van beurtkrag op verkoelingsstelsels verminder, en indien veranderlike tariewe gebruik word, dit ook kostebesparings vir die gebruiker kan meebring.

Ten slotte

'n LHTSS kan bydra tot die vermindering van die potensieële negatiewe impak van beurtkrag op verkoelingsstelsels, met opberging van oortollige energie gedurende 'n tyd wanneer dit beskikbaar is, om gebruik te word wanneer 'n energietekort ervaar word; en indien veranderlike tariewe benut word, kan dit kostebesparings vir die gebruiker oplewer. LHTEOS dra daartoe by dat koelkamers doeltreffender is en sodoende voordele vir die omgewing tot gevolg het. Uit hierdie studie word die gevolgtrekking gemaak dat dit duur is om 'n LHTEOS in 'n bestaande koelkamer te integreer weens die hoë aanvanklike koste en die lang terugbetalingstydperk. As hierdie aanvanklike koste verminder sou kon word, sou die skema aantrekliker vir kliënte wees. Nuwe metodes moet gebruik word om die vervaardigingskoste van eutektiese plate te verminder ten einde die stelsel aantrekliker te maak. Hierdie studie het daarop gefokus om die hittelading wat benodig word tydens die werking van die koelkamer te oorkom. Die fokus was nie op die temperatuurverspreiding binne die koelkamer nie. Meer plate is nodig om die temperatuurskommelings binne 'n koelkamer te verminder.

Die tariefplanne van die Suid-Afrikaanse kragvoorsiener, Eskom, verskil drasties, met Night Save Urban Large en Urban Small wat die goedkoopste tariefplanne is en Homepower Light die duurste. Wanneer die LHTEOS in bestaande koelkamers geïntegreer word, moet die getal uur wat die verkoelingsstelsel loop, beraam word om koste te verminder. 'n Temperatuurverskil van tussen die verdamer en die FVM moet egter in die ontwerp ingewerk word, hoewel dit die doel en toepassing van die koelkamer beperk. Vir nuwe koelkamers met LHTEOS moet die getal plate bereken word wat benodig word om die verlangde temperatuur te handhaaf. Dit sal ook help om die aanvanklike koste van die skema te bepaal. Die ontwerper moet ook die temperatuurverlagingstyd in ag neem, aangesien dit sal bepaal of die stelsel 'n druklug- of 'n natuurlikekonveksiestelsel moet wees.

ORCID

BT Radebe <https://orcid.org/0000-0003-2796-9084>

Datums

Ontvang: 13/05/2022
 Aanvaar: 24/11/2022
 Gepubliseer: 01/06/2023

Bronnelys

- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., et al., 2011, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(3), 1675-1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- Cabeza, L.F., Martorell, I., Miró, L., et al., 2021, Introduction to thermal energy storage systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 1-33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00001-2>.
- Dincer, I. & Rosen, M.A., 2011, *Thermal Energy Storage*, John Wiley & Sons, Inc., Britain.
- Du, K., Calautit, J., Wang, Z., et al., 2018, A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges, *Applied Energy* 220, 42-273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>.

- Eskom, 2021, Eskom schedule of standard prices 2020/21, SC0207(202).
- Eskom Ltd., 2021, Tariffs & charges booklet 2021/2022, 20. Available from: [http://www.eskom.co.za/CustomerCare/TariffsAndCharges/Documents/ESKOM TC BOOKLET 2012-13 FINAL 3.pdf](http://www.eskom.co.za/CustomerCare/TariffsAndCharges/Documents/ESKOM_TC_BOOKLET_2012-13_FINAL_3.pdf).
- Evans, J., Foster, A., Huet, J.M., et al., 2014, Specific energy consumption values for various refrigerated food cold stores, *Refrigeration Science and Technology*, 74, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.075>.
- FIC. 2019, Eutectic Plates – Accumulation systems for transport refrigeration, Italy.
- FIC S.p.A. 2018, Eutectic Plates, Via Trivulzia, Available from: <https://www.fic.com/en/product/eutectic-plates>.
- Gibb, D., Seitz, A., Johnson, M., et al., 2018, Applications of thermal energy storage in the energy transition - benchmarks and developments. Available from: <https://www.eces-a30.org/publications/>.
- Huan, Z., 2016, Heat load calculation in refrigeration and air conditioning, first edit, pp. 134-152.
- Kaygusuz, K., 2003, Phase change energy storage for solar heating systems, *Energy Sources* 25(8), 791-807. <https://doi.org/10.1080/00908310390207837>.
- Lambert, K. & Roberto, P., 2014, 2014 Report of the refrigeration, air conditional and heat pumps technical options committee.
- Lazaro, A., Delgado, M., König-Haagen, A., et al., 2020, Technical performance assessment of phase change material components, *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry* 2018, 1236-1247. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.22.05>.
- Liu, M., Saman, W., Bruno, F., 2012, Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material, *Applied Energy* 92, 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.015>.
- Maphatsoe, K., 2021, Solar viable amid power outages, *Creamer Media - Engineering News* 78.
- National Cleaner Production Centre n.d., Resource efficiency and cleaner production: A guide to understanding your industrial electricity bill, Available from: <http://ncpc.co.za/files/Guides/How to Read Your Electricity guide Book.pdf>.
- Ndanduleni, A.U.C. & Huan, Z., 2019, Review on phase change materials for sub-zero temperature application in transport refrigeration, 1-10.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., et al., 2014, Energy management and CO2 mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport, *International Journal of Refrigeration* 42, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.03.002>.
- Raam Dheep, G. & Sreekumar, A., 2014, Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials - A review, *Energy Conversion and Management* 83, 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.058>.
- Radebe, T.B., Huan, Z., Baloyi, J., 2020, A simulation study of natural convection airflow pattern for a phase change material chamber, *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3637981>.
- Radebe, T.B., Huan, Z., Baloyi, J., 2020, Simulation of eutectic plates in medium refrigerated transport, *Journal of Engineering, Design and Technology*. <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2020-0065>.
- Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R.I., et al., 2021, Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials, *Thermal Science and Engineering Progress* 22, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100807>.
- Vadhra, J., Sura, A., Nandan, G., et al., 2018, Study of phase change materials and its domestic application, *Materials Today: Proceeding* 5(2), 3411-3417. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.586>.
- Veerakumar, C. & Sreekumar, A., 2016, Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications - A review, *International Journal of Refrigeration* 67, 271-289. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005>.
- Xu, B., Li, P., Chan, C., 2015, Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments, *Applied Energy* 160, 286-307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.016>.
- Yang, T., Wang, C., Sun, Q., et al., 2017, Study on the application of latent heat cold storage in a refrigerated warehouse, *Energy Procedia* 142, 3546-3552. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.243>.
- Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., et al., 2003, Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23(3), 251-283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8).