



66 De toename van de bevolking, hoge levensstandaard en snelle verstedelijking heeft geleid tot een toenemende vraag naar voedsel over de hele wereld. De wereldhandel heeft het mogelijk gemaakt deze vraag te vervullen door het vervoer van verschillende voedingsproducten van het ene deel van de wereld naar het andere toe te laten.

Slimme strategieën voor het reduceren van pieken in de energievraag van reefer

Ron van Duin, KennisDC Logistiek Zuid Holland (Hogeschool Rotterdam/
Technische Universiteit Delft)
Harry Geerlings, ErasmusSmartport, (Erasmus Universiteit Rotterdam)

SAMENVATTING

67 De toename van de bevolking, hoge levensstandaard en snelle verstedelijking heeft geleid tot een toenemende vraag naar voedsel over de hele wereld. De wereldhandel heeft het mogelijk gemaakt deze vraag te vervullen door het vervoer van verschillende voedingsproducten van het ene deel van de wereld naar het andere toe te laten. In deze handel spelen gekoelde containers (reefers) een belangrijke rol wegens hun vermogen om de kwaliteit van het product tijdens de reis te handhaven. Het transport en de exploitatie van reefer vereisen echter een constante energievoorziening in de hele logistieke keten. Als er grote hoeveelheden reefer betrokken zijn, resulteert dit in een groot energieverbruik bij terminals. Vanuit het terminal perspectief blijkt de maandelijkse doorvoer van reefer veel variatie te hebben Deze variatie is het gevolg van de groei van de reefermarkt, de seizoen gebondenheid van de levensmiddelenhandel en de speciale eisen van reefer en leidt tot een toename van de piekvermogensvraag bij terminals. Omdat de nutsbedrijven extra kosten toepassen op de hoogst waargenomen piekvraag, is het gunstig voor terminals om deze vraag zo laag mogelijk te houden om de energiekosten te verminderen.

Om de kansen voor containerterminals te onderzoeken om hun piekvraag te verminderen, is een simulatiemodel voor energieverbruik ontwikkeld. Met het model worden twee energiereductie-strategieën getest om hun impact op de piekvraag te analyseren: gedeelde spreiding van de energie over de reefer racks en het beperken van piekvermogen door instelling van maximale limiet. Beide strategieën tonen mogelijkheden voor interessante kostenbesparingen zonder daarbij de temperaturen binnen de reefer te schaden. Ondanks reële besparingsmogelijkheden is het wel noodzakelijk dat de huidige businessmodellen op de schop gaan, want momenteel zijn er vanuit financieel oogpunt geen incentives om dit te veranderen omdat men reeds winst maakt op de energielevering aan de reefer en deze doorbelast naar de uiteindelijke klant

Het KennisDC Logistiek-onderzoek naar duurzame oplossingen in koelvers-transporten richt zich op het inzichtelijk maken welke (reefer)-logistieke concepten levensvatbaar en duurzaam zijn op het gebied van geconditioneerde ketens. Deze onderzoeksambitie valt onder de verantwoordelijkheid van het lectoraat Haven- en stadslogistiek. Na brainstormsessies met studenten en docenten van de opleiding Logistics Engineering (Hogeschool Rotterdam) zijn nieuwe concepten ingebracht in het gerelateerde promotieonderzoek (EURECA) van drs. Bob Castelein dat wordt uitgevoerd onder begeleiding van de professor dr. Harry Geerlings en lector dr. Ron van Duin. Door de koppeling met het promotietraject zijn de volgende partijen betrokken bij dit onderzoek: Smartport (prof. Harry Geerlings), Seamark, ABB, het Groenten-Fruit Huis, Havenbedrijf Rotterdam, ECT en FloraHolland. Ook met enkele terminals in het havengebied zijn de bevindingen gedeeld.

Introductie & Motivatie

vervoer speelt een cruciale rol in onze moderne samenleving. Veel van het welzijn van de wereld is vandaag geproduceerd of gefaciliteerd door havens waar samenhangende activiteiten: zoals handel, logistiek en productie convergeren. Het zeevervoer vergemakkelijkt het proces van globalisering en doorlopende economische groei. Deze groei van het zeevervoer zien we vooral in een toename van het containervervoer over de laatste decennia. Wanneer we deze groei nader bekijken, zien een paar belangrijke ontwikkelingen. Ten eerste is er een toenemende vraag naar 'geconditioneerd transport' met een temperatuur die varieert van -30 oC tot 14 oC. Het aandeel van de reefer-marktaandeel in het zeevaarttransport steeg van 47% in 1990 tot 75% in 2014 en men verwacht dat de wereldwijde groei voor de komende 5-10 jaar ongeveer 8% per jaar zal zijn (Rodrique & Notteboom, 2014). Dit is mede te danken aan het feit dat de handelsstromen niet meer alleen traditionele handelsstromen uit het Verre Oosten zijn, maar de verslogistieke ketens steeds meer worden vorgebracht door productie in Afrika en Midden- en Zuid-Amerika. De reefer bevatten een breed scala aan producten, waaronder bederfelijke goederen, zoals bloemen, fruit en groenten, maar ook medicijnen en muziekinstrumenten. Nieuwe ontwikkelingen in conditioneringstechnieken (zoals waargenomen in de bloemindustrie) maakt een modal shift mogelijk vanaf snel luchtvervoer naar diepzeevaart.

De groei in geconditioneerd vervoer over de hele wereld heeft geleid tot een enorme toename van de reefer vloot. Deze vloot steeg van 294.000 TEU's in 1990 tot 1.215.000 TEU's in 2005, wat een groei van 313% betekent in deze periode. In Januari 2012 bereikte de vloot 2,1 miljoen TEU's. Deze snelle groei van de reefer verhoogde het marktaandeel van de reefer ten opzichte van de totale containervloot van 7% in 2005 tot 11% in 2012 (WORLD SHIPPING COUNCIL, 2011). De seizoensgebondenheid van voedingsmiddelen heeft een grote invloed op de verplaatsing van de reefer. Veel van deze producten hebben verschillende temperatuurbehoeften die leiden tot variatie in vermogensbehoeften van reefer. Bovendien zijn ze ook zeer gevoelig voor temperatuurvariaties, waardoor de kleine bandbreedte tijd is om ze uit te schakelen. De combinatie van bovenstaande heeft geleid tot grote hoeveelheden energieverbruik op terminals. In het algemeen zijn reefer verantwoordelijk voor ongeveer 30-35% van het energieverbruik bij terminals (Green Cranes, 2013a).

Op de terminals is elektriciteit de belangrijkste bron van energie die wordt gebruikt voor reefer operaties. Deze elektriciteit wordt geleverd door een energiebedrijf. Vanwege de seizoensgebondenheid van reefer is hun vraag naar energie over terminals zeer volatiel. Deze volatiliteit in het energie vraagpatroon leidt regelmatig tot een piekvermogensvraag. Dit is een periode waarin de vraag naar elektriciteit op een aanzienlijk hoger leveringsniveau zit dan het gemiddelde leveringsniveau. De piekvermogensvragen kunnen leiden tot overmatige energiekosten door extra piekheffingen die door nutsbedrijven worden toegepast.

Ondanks deze overmatige energiekosten, zien dat gerichte strategieën op de piekvragen te beheersen zelden aanwezig zijn in havens en terminals (Wilmsmeier & Zotz, 2014). De stringente normen op productkwaliteit (zie Tabel 1) en de beperkte visie van de terminal-operators op het energieverbruik van reefer zijn redenen geweest om dit vraagstuk verder niet op te pakken.

Tabel 1 Temperatuur classificatie van producten en hun temperatuur gevoeligheid (Rodrigue, 2014).

Product	Temperatuur range (°C)	Temperatuur gevoeligheid (°C)
Diepvries: Vis, IJs	-30 to -28	Laag (± 2)
Bevroren vis & vlees	-20 to -16	Laag (± 2)
Gekoeld: Fruit en Groenten	-5 to 5	Hoog (± 0.5)
Pharmaceutische producten	2 to 8	Hoog (± 0.5)
Bananen	12 - 14	Erg hoog (± 0.2)
Muziek instrumenten, schilderijen	18 - 21	Laag (± 2)

Vanuit dit oogpunt leek het ons juist een uitdaging om te zien wat de mogelijkheden zijn om 'peakshaving'- strategieën toe te passen voor de reefer logistiek op een terminal. Dit leidt tot de volgende onderzoeksdoelstelling:

'Onderzoek de mogelijkheden voor peakshaving voor de vraag naar elektriciteit bij reefer stacks door toepassing van nieuwe regels voor modus operandi van reefer, terwijl de impact ervan op de reefer temperatuur wordt gecontroleerd.'

Gebaseerd op de onderzoeksmethodologie van Sargent (2013) is dit artikel gestructureerd in vijf paragrafen. Na deze introductie geeft paragraaf 2 een literatuuroverzicht van de huidige energiebesparende modellen, gevolgd door een beschrijving van de kennislacune. Paragraaf 3 geeft een omschrijving van de reefer operaties en beschrijft daarna de modelontwikkeling voor energieverbruik van reefer, waarbij aandacht wordt besteed aan conceptualisatie. In paragraaf 4 worden de 'peakshave'-mogelijkheden besproken, gevolgd door hun analyse en implicaties. In paragraaf 5 eindigen we met conclusies van dit onderzoek.

Literatuuroverzicht over methoden voor energiebeheer van reefer

Een reefer eenheid bestaat uit hardware onderdelen zoals thermische isolatie en een software component die gebruikt wordt voor de controle van de koeling. Derhalve zijn de twee ontwikkelingen die betrekking hebben op het verbeteren van de energie-efficiëntie van reefer-eenheden: hardwareverbeteringen en softwareoplossingen.

Qua hardware verbetering is het onderzoek beperkt. Zsembinszki et al. (2014) heeft een numerieke model evaluatie uitgevoerd van een reefer waarin die fase veranderingsmateriaal is gebruikt als een koelelement in de compressor. De belangrijkste invoervariabele die naast de containergrootte wordt beschouwd, is de thermische geleiding van het materiaal van de container. Ander onderzoek richt zich op het gebruik van koolstof nanobuizen als isolatie voor reefer. Momenteel kunnen we stellen dat de hardware oplossingen hebben hun potentiële limiet bereikt, tenzij er een belangrijke doorbraak plaatsvindt in de materiaalkunde.

Een meerderheid van de energiebesparende modellen in reefer gaan over optimalisatie van de software die de koelinstallatie uitvoert. Sorenson (2013) heeft het potentieel voor vermindering van het energieverbruik op een demonstratie Star Cool reefer onderzocht door de invoering van moderne controlemethoden zonder daarbij de kwaliteit van de vervoerde goederen in gevaar te brengen. Hij ontwikkelde een niet-lineaire dynamische simulatie van een geïmplementeerde controller unit, die de thermische traagheid van het lading- en ventilatiepercentage combineert om de daadwerkelijke vraag naar mogelijke reductie van het energieverbruik van de reefer te bepalen. Een ander succesvol energiebesparingsmodel voor reefer is 'QUEST' (Quality and Energy efficiency in Storage and Transport of agro materials), dat een software oplossing is om de controle van koel-zeecontainers (reefer) te verbeteren, met als doel het maximaliseren van de energie-efficiëntie in de koelmoduswerking door de ventilatorsnelheid van de verdampers optimaal af te stemmen op de lading zonder de kwaliteit van de producten te beperken (Lukasse et al., 2011; Kramer-Cuppen, 2015). De twee genoemde modellen zijn gericht op het individuele gedrag van reefer. Zij houden geen rekening met een systeem van reefer die op terminals werken. Hiervoor is een systeem genaamd Reefer Monitoring and Control System (REFCON) ontwikkeld. Het is het geautomatiseerde controlesysteem dat de condities van reefer containers op afstand bewaakt zowel tijdens het transport aan boord van het containerschip als tijdens de opslag op de containerterminal. Een reefer met een modem communiceert zijn status naar controller die het signaal via de transmissiekabel (Emerson Climate Technologies, 2015) naar het scherm stuurt. De informatie die op het scherm wordt weergegeven, zijn de temperatuurindicatoren, met name de retourlucht-temperatuur en de ingestelde temperatuur. Wanneer een grote afwijking van de retourlucht-temperatuur ten opzicht van het instelpunt wordt waargenomen, zal de aanwezige reeferhandler de reefer inspecteren.

Op deze manier wordt de veiligheid van de lading gewaarborgd door een continu tweerichtingscommunicatie tussen de operator en elke reefer (Emerson Climate Technologies, 2015).

'Peak Shaving' is de techniek om het stroomverbruik te verminderen tijdens perioden van maximale vraag op het stroomtoestel. De gebruikelijke netto-energiebesparing dat men kan bereiken met 'Peak Shaving' varieert van 10% tot 30% van hun elektriciteitsrekening (Baldor Electric Company, 2005).

Modellering wordt gebruikt om het ontwerp en optimalisatie van koelinstallaties te ondersteunen. In de loop der jaren zijn veel modellen ontwikkeld om het werk van een reefer te begrijpen en daardoor energiebesparende oplossingen te ontwikkelen. Het fundamentele concept van deze modellen is de basis energiebalansvergelijking. Hierbij zijn verschillende benaderingen zoals ruimtelijke temperatuurverschilmodellen en warmtemodelmodellen ontwikkeld om diepgaand inzicht te krijgen in het reefer systeem (James et al., 2006). Hoewel er verschillende technieken beschikbaar zijn om energieverbruik te bepalen, is de methodologie die in dit onderzoek wordt aangenomen simulatiemodellering.

72 Bij simulatiemodellering is de Computational Fluid Dynamics (CFD) de meest gebruikte techniek voor het modelleren van energieverbruik van reefer (James et al., 2006). Jedermann et al. (2013) volgen een andere aanpak. Zij ontwikkelden lineaire dynamische differentiaalvergelijkingen in Matlab software om het energieverbruik van reefer te bestuderen. Sorenson (2013) heeft simulatieomgeving zoals TRNSYS, Matlab en Simulink gebruikt om het complexe koelsysteem van reefer te modelleren. Deze modellen kunnen echter niet de impact van het energieverbruik bepalen. Verscheidene simulatiemodellen zijn ontwikkeld om de complexe terminals te begrijpen. Lutjen et al. (2012) heeft een netwerkmodel gebruikt om de interacties tussen verschillende agenten van logistiek zoals verkopers, distributeurs en warehouses te bestuderen. Het model bestaat uit knooppunten en transportrelaties tussen deze agenten. Hartmann (2013) heeft discrete-event simulatie gebruikt om de containerlogistiek voor de gehele terminal te begrijpen. Het model is gebouwd in de emPlant-simulatiesoftware. Het model legt de logistieke dynamiek van de containers vast tussen verschillende fysieke bronnen. Deze simulatiemodellen omvatten de frequentie- en transportgerelateerde parameters en specifieke reeferparameters. Operations Research (OR) modellen worden gebruikt om de optimale vlootgrootte en optimale bewerkingsschema's te bepalen. De focus van deze modellen ligt echter op de logistieke kant en negeren het energieverbruik van reefer.

Simulatiemodellen zijn ook ontwikkeld om het energieverbruik bij terminals te bestuderen. Saanen et al. (2015) hebben warmte mapping techniek gebruikt om de CO₂-uitstoot RTG-

terminal te simuleren. Dit is vooral handig om de energie- en milieueffecten van verschillende terminale operaties in detail te begrijpen. Dit model is uiterst handig, maar richt zich alleen op de grote terminalobjecten met bij behorende CO₂-uitstoot. Abadi et al. (2009) maken gebruik van een objectgeoriënteerde taal om een macroscopisch model van terminal te ontwikkelen. Het bestaat uit voorwerpen zoals de terminal zelf, vrachtwagens, treinen en schepen. Andere objecten zijn bijvoorbeeld verschillende type kades en verschillende kraantypen. Dit model volgt echter niet de beweging van de reefer op de terminals.

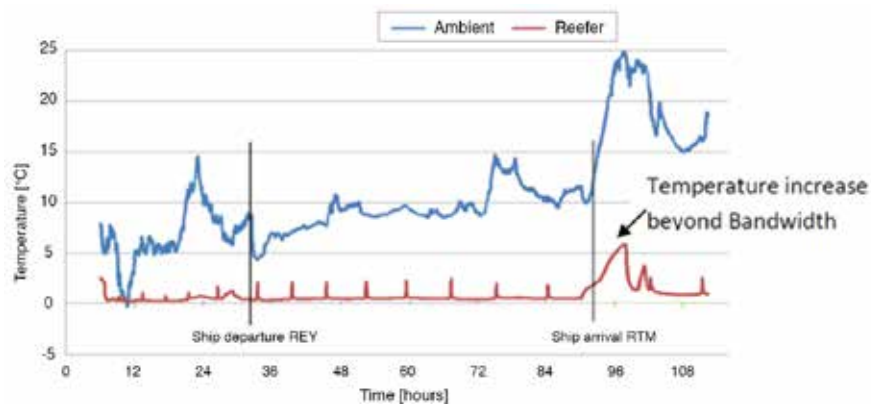
Op basis van de literatuuroverzicht hebben we de kennislacune geïdentificeerd die betrekking heeft op de dynamische visualisatie van het energieverbruik door een systeem van reefer die op terminals werken, waarbij 'Peak Shaving' technieken worden toegepast om de energiekosten te sparen. Eerdere studies benadrukken de energiebesparende modellen voor slechts enkele reefer en een temperatuurregelaar. Volgens ons ontbreken de volgende elementen in de kennislacune:

- De meeste modellen hanteren individueel het energieverbruik van reefer. Reefer Monitoring en Control Systems verstrekken voornamelijk informatie over de temperatuur van het systeem van reefer. Vandaar dat er een gedetailleerd onderzoek ontbreekt over het energieverbruik van een systeem van reefer op terminals. Dit omvat de interconnectie tussen de terminal bewerkingen en de inwendige temperatuurverhoging/verlaging van de reefer en het gerelateerde het energieverbruik.
- Bestaande modellen houden geen rekening met de gevoeligheid van verschillende factoren op het energieverbruik van reefer. Daarom wordt in ons model een gevoeligheidsanalyse voor een enkele reefer en voor een systeem van reefer uitgevoerd. Dit geeft inzicht in de belangrijkste beslissingsvariabelen voor het bepalen van het energieverbruik van een reefer;
- Veel studies bevestigen het optreden van piekstroombelasting op terminals als gevolg van reefer operaties. In de literatuur zijn wel verschillende 'Peak Shaving'-technieken beschikbaar, maar er is gebrek aan inzicht hoe deze uitwerken voor de terminal als geheel.
- Grid operators berekenen een elektriciteitsprijs voor containerterminals, deels gebaseerd op het piek-energieverbruik van de terminals. Hoe groter de waargenomen pieken, hoe hoger de energiekosten. De uitdaging voor containerterminals is daarom de piekvraag na verloop van tijd te beheersen zodat het verdwijnen van hoge pieken leidt tot een kostenreductie in de energierekening. De financiële besparingen als gevolg van piekreductie zijn echter niet bekend. Dit onderzoek geeft inzicht in de mogelijke besparingen als gevolg van verschillende piekvermogen reductie strategieën voor reefer.

Conceptualisatie, specificatie en validatie van het reefer energieverbruiksmodel

Om alle logistieke relaties goed te kunnen definiëren is het belangrijk om alle terminale processen te identificeren: inkomende reefer, verblijf van de reefer en de uitgaande reefer. In het inkomende proces arriveert het schip aan de kade. De reefer worden dan losgekoppeld op schepen en via de kranen en multitrailers (of AGVs) naar de reefer racks vervoerd. Tijdens het verblijfproces worden de containers in reefer racks gestapeld, de contactstekkers aangesloten en worden de temperatuurinstellingen gecontroleerd volgens de laadlijst verstrekt door de rederij (Radu & Kruse, 2009). Het uitgaande proces koppelt de stekkers los van de reefer, waarna zij verder op vrachtwagens, treinen of binnenvaartschepen worden geladen en naar het achterland vervoerd.

Al deze processen veroorzaken uiteindelijk temperatuurschommelingen in de reefer. Figuur 1 geeft een voorbeeld van een temperatuur profiel voor het vervoer van vis uit IJsland naar Frankrijk. Zoals gezien, als het schip aankomt op de terminal en de ruiten zijn aangesloten, is er een snelle toename van hun temperatuur. Dit komt omdat er een bepaalde periode is waar een reefer zonder stroomtoevoer (Unplugged time) is die de temperatuur beïnvloedt. In dit geval is de temperatuur van de reefer verhoogd van 0,5 °C tot 6 °C gedurende een periode van acht uur zonder elektrische voeding.



Figuur 1 Voorbeeld van een temperatuur profiel van een reefer (Eliasson et al., 2013)

Op basis van de literatuurstudie is de volgende vergelijking om de temperatuurverhoging te modelleren, als volgt gedefinieerd:

$$\Delta T(t) = \Delta T - \Delta T * \exp(-(A * k * t * (1 + S)) / (m * C_p)) \tag{1}$$

Temperatuurstijging in een reefer (Tran, 2012)

Met

$\Delta T(t)$ = *Temperatuur Effect per tijdseenheid (°C)*

ΔT = *Omgevings Temperatuur – Retour Lucht Temperatuur (°C)*

A = *Oppervlakte van een Reefer (m²)*

K = *Thermische Isolatie van een Reefer (W/m².°C)*

t = *Tijd voordat wordt ingeplugd in een reefer stack (seconds)*

S = *Blootgestelde zon intensiteit (geen dimensie)*

M = *Massa van de Lading (kg)*

C_p = *Warmtegeleiding van het product (kJ/kg.°C)*

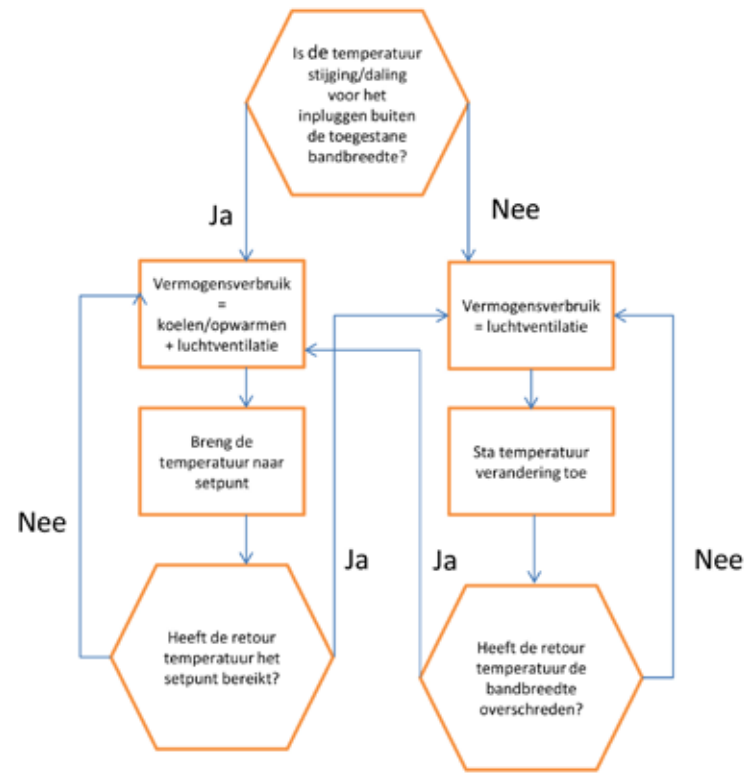
Zoals men kan zien bevat vergelijking (1) verschillende typen variabelen die het energieverbruik van reefer beïnvloeden. Daarom is deze vergelijking in lijn met variabelen die de koelkracht van reefer beïnvloeden (zie Formule 2). Formule (1) geeft de temperatuurstijging van reefer tijdens de niet aangesloten/koelwerkende tijd. Zodra de reefer in reefer stack wordt geplaatst, wordt deze aangesloten en worden de temperatuur instellingen gecontroleerd.

Zoals formule (1) ook duidelijk maakt, is de temperatuurverhoging afhankelijk van de thermische isolatie van de reefer. Hoe lager de waarde van de thermische isolatie van een reefer, hoe beter de weerstand tegen temperatuurverhoging (Geysen & Verbeeck, 2011). Deze waarde hangen voornamelijk af van de leeftijd van een reefer. De gemiddelde levensduurverwachting voor een reefer is 12 jaar (Sorensen, 2015). Naarmate de reefer ouder is, zal de thermische isolatie waarde hoger zijn (zie Tabel 2).

Tabel 2 Variatie in de thermische isolatie van reefer gerelateerd aan leeftijd (Geysen & Verbeeck, 2011)

Leeftijd (jaren)	Thermische Isolatie Waarde (W/m ² .°C)
0 - 4	0.5
5 - 8	0.6 – 0.7
9-12	0.8
>12	0.9

In het model zijn de thermische waarden uniform verdeeld over de reefer. Wel is een separate gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op het gebruik van alleen maar hele nieuwe/oude reefer om zo de grenzen van de energieconsumptie te kennen.



Figuur 2 Conceptueel model voor de energievraag van een individuele reefer (Nafde, 2015).

De werking van het model wordt geïllustreerd aan de hand van het conceptuele model in Figuur 2. Eerst wordt gecontroleerd of de temperatuur van de retourlucht door de temperatuurschommeling buiten de toegestane bandbreedte (zie Tabel 1) ligt. Hierbij zijn drie voorwaarden mogelijk (zie Figuur 2):

De temperatuur van de retourlucht ligt boven de bovengrens van de toegestane bandbreedte

In dit geval bestaat een groot risico op schade aan lading door oververhitting (Miller, 2012). Zo is het dringend gewenst om de reefer terug te brengen naar de ingestelde temperatuur. Vandaar dat er snel koeling plaatsvindt om de reefer naar deze temperatuur te brengen. Tijdens dit proces wordt, naast het vermogen van de ventilatie, het vermogen voor de koeling maximaal toegepast. Het maximale koelvermogen wordt als volgt berekend:

$$Q = M \cdot C_p \cdot \Delta T / T \quad (2)$$

Koelvermogen van een reefer (TRAN, 2012)

Waarbij

Q = Koel/verwarming vermogen (kW)

M = Massa van de vracht (kg)

C_p = Specifieke warmtecapaciteit van de lading (kJ/kg.°C)

ΔT = Temperatuur verschil (°C)

T = Koel tijd (Seconds)

De retourluchttemperatuur ligt beneden de limiet van de toegestane bandbreedte.

In dit scenario bestaat er een groot risico op kristalvorming, vooral in de vleesproducten (Frozen Food Handling and Merchandising Alliance, 2009). Ook hier moet de temperatuur dringend terug gebracht worden naar het ingestelde punt. Hierdoor start de verwarming in reefers tot het ingestelde punt is bereikt. Net als in het vorige scenario is er een eerste vermogenspuls totdat de ingestelde temperatuur is bereikt. Daarna werkt de reefer weer in de gebruikelijke aan / uit modus.

De retourluchttemperatuur is binnen de toegelaten bandbreedte.

In dit geval is de retourluchttemperatuur de toegestane bandbreedte. Vandaar dat de reefer in de gebruikelijke aan / uit modus werkt. Alleen het ventilatievermogen wordt gebruikt tot de temperatuur de bovenste limiet / ondergrens heeft bereikt. power. Circa 2.5 kW vermogen is benodigd om de ventilatie te laten draaien (Tran, 2012). Daarna wordt de koel- / verwarmingsvermogen extra gebruikt om de reefer naar het ingestelde punt te brengen (zie Figuur 2).

De data omvat de aankomst- en vertrektijden van de reefers op een terminal in Rotterdam. De periode van meting was van 1 Januari 2014 tot 29 Januari 2015. Hierdoor zijn de seizoensinvloeden van de bederfelijke producten ook voldoende meegenomen. De data bevat ook lading specifieke kenmerken zoals type lading, de massa van de lading, het temperatuur set point en het aantal beschikbare reefer plaatsen. De energie consumptie is berekend voor 61.321 reefers gedurende deze periode. De ladingen hebben verschillend gewicht en kennen ook verschillende verblijftijden op de terminal. De terminal heeft 1700 reeferplaatsen tot haar beschikking.

De looptijd van de simulatieperiode is een jaar en een maand, hetgeen 9480 uur bedraagt. De langste cyclustijd binnen het simulatiemodel is de reefer met de langste verblijftijd. Deze waarde uit data analyse is 12 dagen inclusief de laad-/ lostijd. Een vuistregel is dat de looptijd van het model minstens drie keer de langste cyclustijd moet zijn (Kelton, 2000).

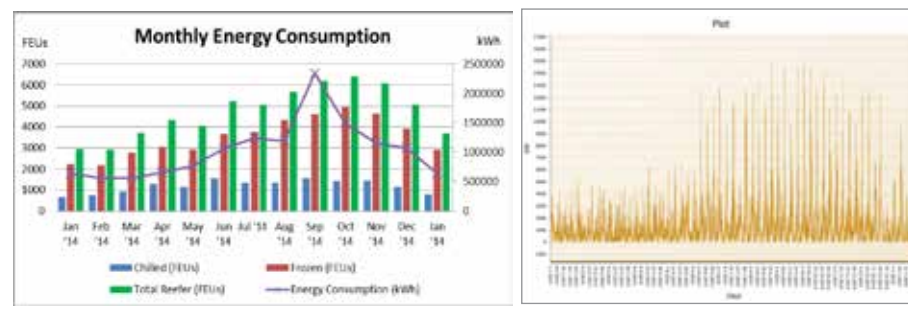
Deze voorwaarde is tevreden in het simulatiemodel, aangezien de looptijd 33 keer de langste cyclustijd is. Een tijdstap van 1 minuut wordt gebruikt om de temperatuurverhoging/afname te simuleren. Voor piekvermogen berekeningen wordt een 15 minuten tijdstap gebruikt. Er wordt geen opwarmtijd toegepast.

Simulatie experimenten

de volgende simulatie-experimenten zijn uitgevoerd: basecase situatie peakshave-experimenten.

Basecase situatie

De basecase situatie is feitelijk de huidige situatie, waarbij we deze situatie vooral gebruiken als basis referentie om de resultaten van de peakshaving-experimenten te kunnen vergelijken.



Figuur 3a Aankomst patroon reefern en de gecumuleerde maandelijkse energievraag Basecase (Nafde, 2015)

Figuur 3b Energie Consumptie Basecase (Nafde, 2015)

De Figuren 3a/ 3b representeren het aantal tegelijkertijd verbonden reefern op de terminal voor de gehele simulatieperiode (= 9480 uur = 1 jaar + 1 maand). De doorvoer van het aantal reefern bedroeg 61321, waarvan 45923 gedroogde producten bevatten en de overige gekoelde producten. In het eerste kwartaal van 2014 kwamen veel minder gekoelde en bevroren reefern op de terminal. Dit komt door de seizoensgebondenheid van reeferhandel naar West-Europese landen. Vandaar dat een deze relatief kleine hoeveelheid reefern leidt tot minimale pieken in de vermogensvraag.

In april komen grote hoeveelheden gekoelde producten bij de terminal. Dit kan worden toegeschreven aan het seizoensgebonden aankomstpatroon van bladwisselende vruchten uit Zuid-Afrika. De hoeveelheid bevroren reefern die in dezelfde periode aankomen is echter nog steeds klein door het gebrek aan voldoende vrachtverkeer tussen Zuid-Amerika en West-Europa. Alhoewel de komst van een groot aantal gekoelde reefern de hoogte van de pieken enigszins verhoogd, blijven de vermogensvraagpieken nog relatief klein door het gebrek aan veel reefern met bevroren producten.

De grootste verzending gekoelde en bevroren producten komt binnen in de periode van juni tot november. Voor gekoelde producten is dit het gevolg van seizoensgebonden exportpatroon van citrusvruchten uit Zuid-Afrika. Voor bevroren producten is het de seizoensgebondenheid van vleeshandel tussen Zuid-Amerika en West-Europa. Hun gecombineerde werking leidt ertoe dat een groot aantal reefern gelijktijdig stroom vragen. Dit veroorzaakt een groot aantal zeer hoge pieken zoals getoond (zie Figuur 3b). Vanaf augustus wordt gedurende drie maanden de grens van 14.000 kW zes keer overschreden.

Peakshaving-experimenten

De experimenten zijn erop gericht om reducties in het piekvermogen te realiseren. Twee eenvoudige besturingsregimes worden getest waarbij de effecten worden geanalyseerd voor de gevolgen op het piekvermogen en de gevolgen voor mogelijke temperatuurafwijkingen ten opzichte van de toegestane bandbreedtes (zie Tabel 1).

Tijdverdeelde distributie van vermogen over de reefer in de reefer racks

De reefern op terminals worden opgeslagen in afzonderlijke reefer racks. Elk rack (rek) bestaat uit 4 rijen en elke rij heeft verder meerdere slots om de reefer containers in op te slaan. Elk van deze rijen is voorzien van een stopcontact voor het operationele functioneren van reefern. Hierdoor koelen een groot aantal reefern tegelijkertijd leidt dit juist tot een enorme vraag naar energie uit het elektrische netwerk. Dit is de voornaamste reden waarom de drempel van de toegelaten piekvermogen wordt overschreden. Als we nu de stroomtoevoer naar deze reefer racks verdelen in tijdsintervallen, kan de gelijktijdige overlapping van de vraag naar koelvermogen vermeden worden. Daarom wordt in dit experiment elk paar containerracks wisselend van stroom voorzien met tijdsintervallen van 5 en 15 minuten.

Limitering van het piekvermogen over de operationele reefern

In dit geval is de stroomvoorziening beperkt tot een maximale drempelwaarde. Dit heeft gevolgen voor de individuele reefern. Elke reefer maakt gebruik van zijn volledige bandbreedte van de toegestane temperatuur. Dit houdt in dat na het bereiken van de maximale temperatuurlimiet het koelvermogen wordt aangewend om deze tot de laagste tempe-

ratuurlimiet terug te brengen. In principe wordt in het basismodel maximaal vermogen gevraagd. In dit scenario wordt vermogen toegekend dat de pieklimiet van de vermogensvraag niet overschrijft. In principe leidt dit tot langere koeltijden, maar de piekvraagoverschrijding treedt niet meer op.

Tabel 3 Samenvatting van de modelresultaten (jaarbasis)

	Vermogensvraag			Energie kosten			Kwaliteit	
	Piek Vraag (kW)	Gemiddelde (kW)	Totale Vermogensvraag (kW)	Piek Vraag Kosten (€)	Totale Vermogens Kosten (€)	Total Energie Besparing (€)	Invloed Temperatuur	Product Schade
Basecase	14,831	1.275 +/- 0,17	12,1 Miljoen	250.000 -	1,09 Miljoen	nvt	nvt	nvt
Tijd-verdeelde distributie 15 minuten Interval	8266 +/- 201,5	544 +/- 0,5	6 Miljoen	0	40.000 - 500.000	600.000 - 700.000	Diepvries: Max 0,5 Gekoeld: Max 0,12 Max -0,18	Extreme ambient Temperatuur, hoog risico
Tijd-verdeelde distributie 5 minutes Interval	2.763 +/- 80,3	186 +/- 0,2	2 Miljoen	0	100,000 - 150,000	1 Miljoen	Diepvries: Max 0,18	Weinig product risico
Maximale Limiet 14000KW	13,760 +/- 18,5	1340 +/- 0,3	12,7 Miljoen	0	850.000 - 900.000	200.000 - 250.000	Geen effect	Geen risico

Opgemerkt moet worden dat reefer verantwoordelijk zijn voor ongeveer 45% van het totale energieverbruik op terminals (GreenCranes, 2013b). Twee experimenten met tijdverdeelde distributie van vermogen zijn hier beschouwd. In het eerste geval wordt de stroom geleverd in tijdsintervallen van 15 minuten. Dit vermindert de piekvraag naar 8266 kW. In het tweede geval wordt de voeding geleverd in tijdsintervallen van 5 minuten. Dit leidt tot nog meer reductie van de piekvermogen naar 2763 kW. In beide gevallen wordt het totale energieverbruik en daarmee ook de energiekosten gereduceerd. Zo resulteert deze oplossing in jaarlijkse besparingen van maximaal € 1 miljoen. Echter, het nadeel is dat het leidt tot een verhoging van de reefer temperatuur tijdens de uitschakelmodus. Deze temperatuurstijging is kleiner als er kortere tijdsintervallen (5 minuten) worden gebruikt. Alleen voor diepvries treedt een maximale overschrijding van 0.18 °C op.

Het derde experiment met een maximale vermogensgrens van 14.000 kW vermindert het piekvermogen naar 13.760 kW. Dit resulteert in jaarlijkse besparingen van meer dan een kwart miljoen euro. Bovendien heeft het minimale invloed op de temperatuur in de reefer. Vandaar dat deze oplossing, hoewel minder effectief, zeer betrouwbaar is.

Conclusies

Dit artikel beschrijft de ontwikkeling van een simulatiemodel om het piekenergieverbruik op containerterminals te verminderen. Met dit model worden twee eenvoudige peakshavings besturingregimes geëvalueerd met echte reefer data (van 1 jaar en 1 maand) in termen van energiebesparingen, piekbesparingen en de interne reefer temperaturen. Het experiment van tijdverdeelde vermogenstoevoer levert grote energiebesparingen op maar bij toepassing van dit regime dient men voorzorgsmaatregelen te nemen tegen mogelijke temperatuurstijgingen en daarmee verlies aan kwaliteit van de producten in reefer. Dit kan leiden tot extra verzekeringskosten, en kan, belangrijker, de reputatie van de terminal beïnvloeden. In het algemeen geldt hoe korter de tijdsintervallen worden gekozen, hoe lager het risico op productschade in reefer. Daarom is het belangrijk om een geschikt tijdsinterval te kiezen om minimale temperatuurschommelingen te hebben in de reefer en daardoor schade aan producten te vermijden. Een robuuste oplossing vormt een limitering van het piekvermogen, wat leidt tot kleinere energiebesparingen, maar laat geen gevolgen zien voor de interne temperaturen.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de belangrijkste variabelen die de temperatuurveranderingen beïnvloeden in reefer massa- en thermische geleidbaarheid zijn. Daarom wordt aanbevolen regelgeving toe te passen om de ladingmassa in reefer te controleren en de kwaliteit van reefer die op terminals werken. Onze volgende onderzoekstap is dat we de reefer intelligenter maken (slim) door interne communicatie tussen de reefer over hun vereiste te laten energie vraag.

Verantwoording

we bedanken Tushar Nafde die onze ideeën over energie-reefermodellering in zijn master scriptie heeft uitgewerkt (Nafde, 2015). Wij bedanken ook ABB, dat wil zeggen Patrick Vloemans, die zeer behulpzaam was om realistische data van reefer logistiek te leveren voor een sample terminal. Daarnaast bedanken wij collega's Michel Oey en Alexander Verbraeck voor de mede supervisie in het afstudeertraject.

Referenties

- Abadi, A., Baphana, M., and Ioannou, P. (2009). *Simulation Models for Evaluation of Terminal Operations and Traffic Flow on Adjacent Road Network*. Symposium on Transportation Systems. Redondo Beach, California, IFAC: 129-134.
- Baldor Electric Company (2005). Energy Management Best Practices. Retrieved July 21, 2015, from <http://www.sustainableplant.com/assets/WP00010.pdf>.
- Elíasson, S., Margeirsson, B., & Arason, S. (2013, January). Improved reefer container for fresh fish [electronic version] (pp. 27). Reykjavík, Iceland: University of Iceland.
- Emerson Climate Technologies. (2015). Reefer Monitoring System. Retrieved July 21, 2015, from http://www.emersonclimate.com/en-us/Products/container_monitoring/Documents/Product_Leaflets/REFCON6_WEB.pdf
- Frozen Food Handling and Merchandising Alliance (Producer). (2009). Frozen Food Handling and Merchandising [electronic article]. Retrieved from <http://www.affi.org/assets/resources/public/frozen-food-handling-and-merchandising-2009-f.pdf>
- Geysen, D., & Verbeeck, J. (2011). Application of Smart Energy Networks. Retrieved July 21, 2015, from <http://eharbours.eu/wp-content/uploads/WP-3.5-Application-of-Smart-Energy-Networks-Potential-flexibility-of-reefers.pdf>.
- Green Cranes, (2013a). *Report on Port Container Terminals Energy Profile, Version 14*, 14/02/2013, GREENCRANES Consortium and TEN: Brussels.
- GreenCranes, (2013b). *Green technologies and eco-efficient alternatives for cranes and operations at port container terminals*. GreenCranes Consortium and TEN-TEA.
- Hartmann, S. (2013). Scheduling reefer mechanics at container terminal. *Transportation Research Part E*, 51, 17-27.
- Kelton, W. (2000). *Simulation, modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill.
- James, S.J., James, C., Evans, J.A. (2006). Modelling of Food Transportation Systems- A review. *International Journal of Refrigeration* 29, 947-957.
- Jedermann, R., Geyer, M., Praeger, U., Lang, W. (2013). Sea transport of bananas in containers - Parameter identification for a temperature model. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 330-338
- Kramer-Cuppen, J. E. D. (2015). Quest: 50% power savings for reefer containers. In Wageningen University (Ed.). Wageningen: Agrotechnology & Food Sciences Group.
- Lukasse, L. J. S., Baerentz, M. B., & Kramer-Cuppen, J. E. D. (2011). *Quest II - Reduction of CO₂ emissions of reefer containers* (pp. 8). Wageningen, The Netherlands: Wageningen University.
- Lutjen, M., Dittmer, P., Veigt, M. (2012). Quality driven distribution of intelligent containers in cold chain logistics networks. *German Academic Society for Production Engineering*, 7(2-3), 291-297.
- Miller, T. (2012). *Reefer Matters: A focus on some of the issues surrounding the carriage of refrigerated cargoes* (pp. 32). London: UK P&I CLUB.
- Nafde, T., (2015). Smart reefer system Modeling Energy Peaks of Reefers connected at terminals and suggesting peak shaving solutions to reduce cost. Master thesis, Delft University of Technology, Delft
- Radu, G., & Kruse, B. (2009). *Reefer claims loss prevention* (pp. 1-3). London: Thomas Miller Insurance Services.
- Rodrigue, J.P. (2014). *Reefers in North American Cold Chain Logistics: Evidence from Western Canadian Supply Chains*. The Van Horne Institute
- Rodrigue, J-P., Notteboom, T., (2014) *Reefers in North American Cold Chain Logistics: Evidence from Western Canadian Supply Chains*, The Van Horne Institute, University of Calgary.
- Saenen, Y., Johnson, D., de Waal, A. (2015). How simulation modeling can support environmental initiatives at container terminals. *Port Technology International*. The Netherlands, TBA: 66-69.
- Sargent, R. G., (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of simulation* 7.1: 12-24.
- Sorensen, K. K. (2013). *Model based control of reefer container systems*. PhD, Aalborg University, Denmark.
- Tran, T. K. (2012). *Study of electrical usage and demand at the container terminal*. PhD, Deakin University, Deakin, Victoria.
- Wilmsmeier, G., & Zotz, A. K. (2014). Emerging reefer challenges in Latin America. *Environment and Sustainability* 63, 146-150.
- World Shipping Council (2011). *Container Supply Review*.
- Zsembinszki, G., Moreno, P., Sole, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2014). Numerical model evaluation of a PCM cold storage tank and uncertainty analysis of the parameters. *Applied Thermal Engineering*, 67(1-2), 16-23.