



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Slutrapport

Fremtidens køleborde

Titel:

Fremtidens køleborde – Slutrapport

Udarbejdet for:

Projektet har fået økonomisk støtte af EUDP

J.nr.: 64015-0064

Udarbejdet af:

Gram Commercial

EBM Papst

SECOP

DTU MEK

Teknologisk Institut

Forfattere:

Per Henrik Pedersen, Teknologisk Institut

Christopher William Murphy, Teknologisk Institut

Anders Sjøgaard, Gram Commercial

Flemming Velling Breer Tind, Gram Commercial

Babette Peulicke Slott, Teknologisk Institut

Nis Peter Reinholdt, Teknologisk Institut

Jonas Kjær Jensen, DTU MEK

Wiebke Brix Markussen, DTU MEK

Juni 2019

Indhold

1. Projektdetaljer	4
2. Kort beskrivelse af projektets mål og resultater.....	6
3. Projektresumé.....	7
4. Indledning	8
5. Målsætning	11
6. Projektbeskrivelse.....	12
7. Projektdeltagere	15
8. Test af eksisterende kabinet.....	17
9. Matematisk model.....	20
Statisk matematisk model.....	20
Dynamisk matematisk model	30
10. Koncept for nye prototyper	42
11. Bygning og test af prototyper	45
12. Fieldtest.....	48
Antropologisk analyse af brugeroplevelsen.....	58
13. Formidling af resultater	61
14. Anvendelse af projektets resultater	62
15. Sammendrag og konklusion.....	63
Appendiks A: Paper:.....	65
Appendiks B: Paper:.....	73

Bilag:

Notat om statisk beregningsmodel

Notat om CFD-beregninger af luftstrøm i kølebord

Testrapport: Eksisterende model

Testrapport: Eksisterende model (med skuffer)

Testrapport: Ny model

Notat: Fieldtest-måleudstyr

Antropologisk analyse

Fieldtest-rapport

1. Projektdetaljer

Projekttitle	Fremtidens køleborde
Projekt-ID	J.nr.: 64015-0064
Støtteprogram	EUDP
Projektleder (firma/institution)	Teknologisk Institut Gregersensvej 2630 Taastrup CVR 56976116 Kontakt: Per Henrik Pedersen, prp@teknologisk.dk
Projektpartnere	Gram Commercial Aage Grams Vej 1 6500 Vojens CVR.nr. 12006632 Kontakt: Anders Sjøgaard, ANSJ@Gram-Commercial.com Flemming Velling Breer Tind, fltv@Gram-Commercial.com EBM Papst Vallensbæksvej 21 2605 Brøndby CVR nr. 11964893 Kontakt: Henrik Dahl Thomsen, henrik.thomsen@dk.ebmpapst.com SECOP Mads Claussensstrasse D-24939 Flensburg Kontakt: Morten Lund, Morten.Lund@mail.nidec.com

	DTU Mekanik, Institut for Mekanisk Teknologi Nils Koppels Allé Bygning 403 2800 Kgs. Lyngby Nils Koppels Allé 110 CVR 30060946 Kontakt: Wiebke Brix Marcussen, wb@mek.dtu.dk
Dato for indlevering af ansøgning	3/3-2015

2. Kort beskrivelse af projektets mål og resultater

Dansk

I dette projekt er målsætningen at udvikle og teste et nyt kølebord, som er mere energieffektivt, og som kommer til at ligge i en bedre energiklasse.

Projektet er udført af Gram Commercial, SECOP, EBM Papst, DTU MEK og Teknologisk Institut som projektleder.

Det eksisterende kølebord – Gram Gastro K1807 CSG A med tre døre – er det mest solgte i Danmark. Det forbruger 3,358 kWh/døgn, har et nettovolumen på 290 liter, et energieffektivitetsindeks på 48,43 % og ligger i energiklasse C (tæt på energiklasse D).

Det nye kølebord – Model Gram Gastro K1807 FT med tre døre – forbruger 1,407 kWh/døgn, har et nettovolumen på 306 liter og et energieffektivitetsindeks på 20,0 %, hvilket er energiklasse A.

Denne signifikante energibesparelse på 58,7 % er opnået ved, at alle projektpartnere har bidraget med hvert deres speciale.

English

The aim of this project is to develop and test a new professional refrigerated counter which is more energy efficient and achieves a better energy class.

The project is conducted by Gram Commercial, SECOP, EBM Papst, DTU MEK and Danish Technological Institute as project manager.

The existing refrigerated counter Gram Gastro K1807 CSG A with three doors is the most sold in Denmark. It consumes 3.358 kWh/day, has a net volume of 290 liters, an energy efficiency index of 48.43 and this classifies to the energy label C (close to D).

The new refrigerated counter Gram Gastro K1807 FT with three doors consumes 1.407 kWh/day, has a net volume of 306 liters, an energy efficiency index of 20.0 % and this classifies to energy label A.

This significant reduction in energy consumption (58.7 %) is achieved by the fact that all project partners have contributed with their special knowledge.

3. Projektresumé

Nærværende projekt – Fremtidens køleborde – har fået økonomisk støtte fra EUDP, og der er udviklet og testet et nyt kølebord, som forbruger mindre end halvdelen af den energi, som det eksisterende kølebord forbruger.

Den signifikante energibesparelse på 58,7 % er opnået ved, at alle projektpartnere har bidraget med hvert deres speciale i konstruktionsteknik, opstilling af beregningsmodeller og analyser af simuleringresultater samt ved at tilbyde nye prototyper af komponenter.

Energibesparelsen er også opnået ved at udvikle et helt nyt kabinet med meget mindre kuldebroer og en lidt tykkere isolering. Desuden er der benyttet en ny og mere energieffektiv kompressor til det naturlige kølemiddel (R290, propan): DLE4CN fra SECOP. Endvidere er der benyttet en meget mere energieffektiv elmotor fra EBM Papst til kondensatorventilatoren. Endelig er kølesystemet placeret på en bedre måde, således at kondensatorvarmen bortledes på en mere optimal måde.

Der blev fremstillet 10 stk. af det nye kølebord. Det ene blev benyttet til laboratorietest hos først Gram Commercial og dernæst hos Teknologisk Institut. Et af kølebordene blev skadet under transport. De resterende otte nye køleborde blev opstillet til fieldtest i professionelle køkkener.

Samtidig blev der opstillet fem referencekøleborde i andre professionelle køkkener.

Fieldtesten bekræfter, at den besparelse, som blev opnået i laboratoriet, også sker i ”rigtige” professionelle køkkener. I fieldtesten forbrugte de gamle køleborde i gennemsnit : 2,07 kWh/døgn, mens de nye køleborde forbrugte 0,96 kWh/døgn. Dette er en besparelse på 53,7 %.

Det nye kølebord skal nu klargøres til egentlig produktion og markedsføring. Det forventes, at det nye kølebord vil blive billigere at fremstille, idet det passer bedre til de moderniserede produktionsforhold hos Gram Commercial med automatiske pladebearbejdningsmaskiner. Dette reducerer behovet for manuelle samlinger. Herved vil Gram Commercial i fremtiden komme til at stå i en stærk konkurrencemæssig situation for køleborde.

4. Indledning

Der findes i EU ca. 600.000 køleborde (data fra 2008), og salget i EU er ca. 80.000 enheder om året (data fra EU Ecodesign-studie Entr. lot 1). I Danmark er salget af køleborde stærkt stigende. Salget er ca. 2000 stk./år i Danmark.

Køleborde benyttes i stigende grad af professionelle kokke, idet produktet gør køkkenet mere effektivt. Kokken kan producere maden på bordpladen, mens råvarer og pynt er inden for rækkevidde i skuffer og skabe under bordpladen.

Køleborde er ret dyre produkter, som er produceret af rustfrit stål (ca. 25.000 – 50.000 kr. installeret hos brugeren), og elforbruget er ret højt. Gram Commercial's nuværende trefags kølebord forbruger 3,358 kWh/døgn efter EN16825 (med døråbninger og +30 °C i omgivelsestemperatur). Dette svarer til energieffektivitetsindex (EEI) = 48,43 %, Energiklasse "C" i den EU-energimærkningsordning, som blev vedtaget kort tid efter, at ansøgningen blev skrevet, og kort tid før projektets start (Commission delegated regulation (EU) 2015/1094 of 5 May 2015).

I ansøgningen var målet for projektet, at Gram Commercial i fremtiden skal kunne markedsføre et produkt i energiklasse A, og det betød, at energiforbruget skal være $\leq 2,2$ kWh/døgn. Energiforbruget skulle med andre ord reduceres med mindst 32 %. Der var (på ansøgningstidspunktet) formentlig ikke apparater, der kunne komme i energiklasse A og sandsynligvis heller ikke i B.

I forbindelse med afstemningen om Ecodesign-krav i EU's Regulerende Komité og den parallelle vedtagelse af EU-energimærkningsordningen, blev kravene skærpet i forhold til udkast til forordninger. Derfor blev det vanskeligere at komme i energiklasse A, og det betyder, at der skal ske en reduktion af energiforbruget på mere end 48 %.

Baggrund

Køleborde og fryseborde er over de seneste år blevet mere og mere populære, og det er et marked i klar vækst. Dette skyldes ikke mindst den forøgede arbejds effektivitet, der er forbundet med at benytte køleborde.

Før hentede man sine varer fra et lagerkøleskab, når man skulle bruge dem, og tog dem tilbage til lagerskabet, når man var færdig med tilberedningen. Nu bruger man i stedet kølebordet som et fremskudt lagerskab. Det betyder, at man placerer sine råvarer i kølebordet, hvor de så er direkte tilgængelige fra kokkens arbejdsplads/bordplade. Man henter kun nye forsyninger fra lagerskabet, når man løber tør.



Figur 4.1: Gram Kølebord.

Et kølebord består af et horisontalt kabinet, der er udstyret med låger, skuffer eller en kombination af disse. Derudover er der en køleenhed og endelig en bordplade, hvorpå kokken kan arbejde.

Køleborde kan tilpasses til kundens behov, hvor man frit kan vælge mellem antal af fag (antal låger) fra 2 til 4 fag, og derudover kan man frit vælge konfiguration af låger/skuffer alt efter behov. Det er disse egenskaber, der gør køleborde populære.

Gram Commercial's salg af køleborde i Danmark er steget med 22 % de seneste to år, så salget i dag udgør ca. 350 stk. ud af et estimeret årligt totalsalg af køleborde på 2000 stk. om året. Gram Commercial producerer og sælger 1600 enheder om året, hvoraf de 1250 går til eksport.

Der er ingen tvivl om, at potentialet både på det danske marked og i Europa er væsentligt højere end de 1600 enheder, som produceres i dag.

Rent køleteknisk er køleborde en meget større udfordring end et traditionelt storkøkken-køleskab. Der er store problemer med at kontrollere temperaturen i de forskellige fag, hvilket er en udfordring i forhold til fødevarerikkerhed, men i høj grad også i forhold til energiforbrug. Når Gram Commercial tester konkurrerende produkter, kan man se, at konkurrenterne har samme eller større problemer med temperaturstyring. Dette skyldes, at udviklingen af nye lavenergiprodukter til storkøkkener udelukkende har koncentreret sig om vertikale skabe og dermed har ladet kølebordene tilbage, eftersom man ikke umiddelbart kan overføre principperne.

Gram Commercial er markedsledende inden for energieffektive køleprodukter til det professionelle køkken – en position som Gram Commercial meget gerne vil fastholde og udbygge.

Man kan sige, at ingen af udbyderne af køleborde havde løst problematikken omkring energieffektiv og stabil køling i køleborde. Og man måtte derfor antage, at ingen var i stand til at leve op til A og måske ikke engang til B. Vi ved fra husholdningsprodukter, at denne A, B, C-skala har haft stor betydning for markedsudviklingen. Kunderne går efter A- og A+-produkter.

Hvis man sammenholder nedenstående faktorer, så ville man have ingredienserne til en potentiel succes, som vil medføre øget eksport og fastholdelse af arbejdspladser på fabrikken i Vojens.:

- Stigende efterspørgsel efter køleborde
- Stort markedspotentiale i Danmark samt i EU
- Ingen producent havde et optimeret produkt
- EU Ecodesign- og energimærkningsordning var på vej.

5. Målsætning

Visionen har været at udvikle en ny generation af køleborde, der i højere grad er fleksibel i forhold til kundens behov. Produktet skal være det mest energieffektive på markedet (A) og skal kunne leveres til en konkurrencedygtig pris.

Gram Commercials nuværende trefags kølebord forbruger 3,358 kWh/døgn efter EN16825 (med døråbninger og +30 °C i omgivelsestemperatur). Dette svarer til energieffektivitetsindex (EEI) = 48,43 %, Energiklasse "C" i den EU-energimærkningsordning, som blev vedtaget kort tid efter, at ansøgningen blev skrevet, og kort tid før projektets start (Commission delegated regulation (EU) 2015/1094 of 5 May 2015). Målet i ansøgningen var, at energiforbruget skulle være $\leq 2,2$ kWh/døgn. Energiforbruget skulle reduceres med mindst 32 %.

Samtidig skulle temperaturstyringen være meget mere præcis, således at temperaturen alle steder skal være mellem -1 °C og +5 °C (ifølge standarden), og endvidere havde Gram Commercial (og projektdeltagerne) en målsætning om at kunne holde temperaturerne alle steder i møblet inden for et vindue på 3K.

Det var en målsætning, at der skulle benyttes naturligt kølemiddel. Mange apparater på markedet benytter stadig HFC, som er en kraftig drivhusgas. Gram Commercial har dog skiftet til naturligt kølemiddel.

Endelig skulle produktet være fleksibelt og nemt at producere, således at det kan være konkurrencedygtigt og medvirke til at fastholde og forhåbentligt udvide antallet af arbejdspladser på fabrikken i Vojens.

Som nævnt i indledningen blev EU's forordninger skærpet i sidste øjeblik (og lige før projektstart), så der skal ske en reduktion af energiforbruget på 48,4 % for at komme i energiklasse A.

Det blev en uofficiel målsætning for projektgruppen at opnå dette mål.

6. Projektbeskrivelse

Projektet indeholder til start en analyse af det eksisterende produkt samt en analyse af, hvordan målsætningen kan opfyldes. Dette udføres i et samarbejde i projektgruppen.

Der udarbejdes en matematisk beregningsmodel for køleborde – herunder med CFD-beregning af luftstrømme og temperaturfordeling i bordet med forskellige konstellationer og med forskellige placeringer af ventilatorer, luftkanaler, luftspjælde og fordamperpositioner:

- I første omgang skal modellen sammenlignes med testresultater fra test i klimakammer med den nye teststandard for professionelle kabinetter (EN16825), og modellen tunes eventuelt til at passe med testresultaterne.
- Derefter kan modellen benyttes til at simulere forbedringer ved ændring af ydre design, ændringer i indre design med alternative udformninger af luftkanaler, ventilatorplaceringer, ventilator karakteristisk m.v. Brug af nye omdrejningshastighedsregulerede ventilatorer (eventuelt flere stk. mindre ventilatorer) med permanentmagnetmotorer er en oplagt mulighed for at sikre forbedret luftflow og energieffektivitet.

Gram Commercial havde nogle foreløbige ideer til, hvordan man kan bygge køleborde, som virker på en hel anden måde, end det sker i dag:

- I arbejdet skal der udvikles en generel CFD-model, hvor man kan ændre udformning og placering af luftkanaler og spjæld samt indbygge ventilatorer med kapacitetsregulering. Denne model skal benyttes til at undersøge alternative design af køleborde og vurdere effekten af ændringerne. Modellen skal ligeledes medvirke til at skabe grundlaget for en ny styringsstrategi, som skal hjælpe til at sikre ensartet temperatur i hele møblet. Dette arbejde er en meget væsentlig del af projektet.

Det tilstræbes at gøre modellen så generel, at den med mindre ændringer af bl.a. geometri kan benyttes til at foretage tilsvarende optimeringer for andre kølemøbler:

- Der skal ydermere ses på selve kølesystemet og regnes på, hvordan brug af nye kompressorer påvirker effektforbruget. En af mulighederne er at bruge kommende generationer af SECOP-kompressorer med VSD og permanentmagneter. Denne teknologi vil sikre, at kølesystemet altid leverer netop den nødvendige kølekapacitet, og vil være signifikant mere energieffektiv sammenlignet med den nuværende teknologi.
- Man kan også forestille sig andre tiltag – som f.eks. ændringer i isoleringstykkelser på udvalgte steder eller reduktion af kuldebro ved låge/skuffeåbninger.
- Projektet er et forskningssamarbejde mellem Gram Commercial, DTU, Teknologisk Institut og de andre industrielle partnere i projektet. I forskningssamarbejdet indgår et 20-måneders PostDoc-forløb på DTU MEK, hvor der udvikles fordampermodeller for ikke-ideelle luftflow, og der vil blive publiceret papers og artikler til internationale konferencer og tidsskrifter. Der vil blive udarbejdet guidelines for design og styring af kompakte fordampere til køling af ikke-ideelle luftstrømninger. I slutningen af dette notat er denne aktivitet beskrevet i flere detaljer.

I forbindelse med analysearbejdet (og tilgængelighed af nye komponenter) beslutter projektgruppen, hvordan den første prototype skal se ud, og hvilke komponenter som skal benyttes. Derefter bygges en første prototype, som testes i klimakammer og af professionelle kokke, og måleresultatet og erfaringer analyseres. De professionelle kokke analyserer effektiviteten og funktionen af prototypen. På et projektmøde tages der stilling til, hvordan den næste prototype skal se ud, og hvilke komponenter der skal benyttes.

En ny prototype bygges, testes og afprøves, og resultatet analyseres. Når resultatet er tilfredsstillende, vil der blive foretaget feltafprøvninger af 10 nye kølere og af 5 af de ”gamle” kølere, og resultatet vil blive analyseret og rapporteret. I fieldtesten måles et antal parametre, som kan benyttes til at analysere forbrugernes adfærd – herunder antallet og længde af låge-/skuffeåbninger, produkternes og omgivelsernes temperaturer samt elforbruget.

Resultaterne vil først blive rapporteret over for projektgruppen og senere til Energistyrelsen/EUDP-sekretariatet.

Der vil blive udarbejdet og præsenteret et ”paper” til en international IIR-konference (det mest oplagte er IIR Gustav Lorentzen-konferencen om naturlige kølemidler) samt endnu en konference, og der vil blive udarbejdet to artikler til International Journal of Refrigeration.

Gram Commercial vil i forlængelse af projektet kommercialisere og markedsføre de nye køleborde.

I den oprindelige ansøgning fremgår det, at ”Kokkelandsholdet” skulle medvirke. Men da Gram Commercial undervejs i projektet mistede sponsoratet for Kokkelandsholdet, valgte projektpartnerne i stedet at inddrage andre højt profilerede kokke i projektet.

Projektindhold

Projektet er opdelt i 12 faser:

1. Kortlægning af den benyttede teknologi i køleborde. Der tages udgangspunkt i eksisterende køleborde fra Gram Commercial og i konkurrerende produkter. Der foretages kortlægning af ny teknologi, som er fremkommet eller er på vej – herunder nye optimerede kompressorer (f.eks. SECOP’s fremtidige generation af VSD-kompressorer og naturlige kølemidler), nye elektronisk styrede ventilatorer, nye fordampere og fordamperprincipper, ”microcell”-isoleringsskum, vakuum-isoleringspaneler, adaptiv styring m.m.
2. Der udarbejdes beregningsværktøjer til brug for analyser af optimeringsmuligheder. Der tages først udgangspunkt i de beregningsværktøjer, som blev udviklet i tidligere projekter, og disse tilpasses. Dette beregningsværktøj ”tunes”, således at modellen passer til testdata og andre data fra den funktionelle analyse. På DTU udarbejdes sideløbende en model for kompakte fordampere med ikke-ideel luftstrømning til analyser og beregninger. Denne model er essentiel for design af nye løsninger for kompakte fordampere og luftflow i køleborde. Analyse af forskellige optimeringsmuligheder.
3. Design af første prototype af optimeret kølebord. Dette sker på baggrund af analyser fra fase 1 og 2 samt tilgængeligheden af nye komponenter.

4. Bygning af de første prototyper, som bliver designet i henhold til punkt 3.
5. Test af de første prototyper efter EN16825 i klimakammer på Teknologisk Institut og hos Gram Commercial. Prototypen testes ligeledes af køkkelandsholdet under træning på Hotel Legoland. Udarbejdelse af testrapporter og analyser af resultatet. I den forbindelse skal der anskaffes (og indkøres) ekstra døråbningsrobotter til alle låger og skuffer.
6. Design af og bygning af anden generation af prototyper.
7. Test af anden generation af prototyper af køkkelandsholdet og efter EN16825 i klimakamre på Teknologisk Institut. Udarbejdelse af testrapporter og analyse af resultatet.
8. Bygning af "0-serier" af 10 nye køleborde til fieldtest.
9. Indkøb af instrumenter og klargøring og kalibrering af måleudstyr til fieldtest. Udpegning af værter til fieldtest af 10 nye og 5 "gamle" køleborde.
10. Opstilling af enheder til fieldtest og opstart af instrumenter.
11. Indsamling af måledata og udarbejdelse af testrapporter efter 1 måned, 3 måneder, 6 måneder, 9 måneder og 12 måneder. Analyse af brugernes adfærd sammenlignes med energiforbruget.
12. Indsamling af testudstyr. Udarbejdelse af samlet rapport for projektet. Afholdelse af workshop, hvor projektets resultater præsenteres og diskuteres. Udarbejdelse af "papers" til bl.a. international kølekonference samt udarbejdelse af to artikler til internationalt tidsskrift. Der udarbejdes guideline for design og styring af kompakte fordampere til afkøling af ikke-ideelle luftflow i kompakte kølesystemer.

7. Projektdeltagere

Projektdeltagere er Gram Commercial, SECOP, EBM Papst, DTU MEK og Teknologisk Institut. Teknologisk Institut er projektleder og har den direkte kontakt til EUDP-sekretariatet.

Professionelle kokke deltager undervejs som brugere af kølebordene. De medvirker til at bedømme de første prototyper og komme med ønsker og gode råd til funktion og indretning af køleborde.

Gram Commercial

Gram Commercial har produktion i Vojens og producerer storkøkkenkøleskabe og -frysere samt køleskabe og frysere til kantiner. Der produceres endvidere enheder til laboratorier på hospitaler og hos biotekvirksomheder. Der er omkring 220 ansatte i Gram Commercial, og en stor del af produktionen eksporteres til Skandinavien, UK, Holland og andre europæiske lande. Gram Commercial ejes af det store japanske selskab Hoshisaki, som bl.a. er verdens største producent af ismaskiner.

Et af de vigtigste produkter for Gram Commercial er storkøkkenkøleskabe, og i et udviklingsprojekt, som i 2000-2002 blev støttet af Energistyrelsen, blev der udviklet og testet en ny generation af storkøkkenkøleskabe og -frysere med naturlige kølemidler. Disse har siden 2003 været produceret i Vojens og har været en stor succes. Gram Commercial har omkring 50 % af markedet i Danmark, og virksomhedens produkter toppede Elsparefondens (og senere Go' Energis) lister for energieffektive professionelle kølemøbler.

I et EUDP-projekt i 2011-2013 blev en ny generation af storkøkkenkøleskabe fra Gram Commercial udviklet og testet. De forbruger ca. 28 % mindre strøm. De nye køleskabe blev primo 2014 klargjort til produktion, og denne startede i april 2014. Det nyudviklede køleskab vandt i 2017 prisen som Europas mest energieffektive professionelle køleskab (ProCold/EU). Gram Commercial har ligeledes udviklet et nyt design til den nye generation og har modtaget flere designpriser for dette.



Figur 7.1: Et af Gram Commercial's nye storkøkkenkøleskabe under test i klimakammer på Teknologisk Institut. Under den akkrediterede test åbnes døren 72 gange i døgnet med en robot.

Besparselsen i strømforbruget er hovedsageligt opnået ved at bruge en ny (og mere effektiv) kompressortype fra SECOP (tidligere Danfoss Compressors), ved at reducere varmeindfaldet ved døren og ved at bruge en lidt kraftigere isolering. Fra Gram Commercial har følgende medvirket til projektet: Flemming Velling Breer Tind, Anders Sjøgaard, Anders W. Hundevadt, Christine Juul Sjøgaard, Jesper Huldgaard Christensen, John Lund, Henrik Skov Andersen, Allan Quist Nielsen og Sune Skousen.

SECOP

Det har haft stor betydning, at Danfoss og Danfoss Compressors (nu SECOP) ligger i landet (SECOP har dog hovedkvarter i Flensborg). Der er i udviklingsarbejdet ofte benyttet prototyper og nyudviklede kompressorer og kontroludstyr herfra. Derfor er de danske producenter ofte kommet først på markedet med energieffektive og miljøvenlige produkter. Omvendt har komponentleverandører som SECOP kunnet benytte Danmark som laboratorium til test af nye produkter. SECOP's hovedkvarter ligger som nævnt i Flensborg, og produktionen finder sted i Østrig, i Slovenien, i Slovakiet og i Kina. Fra SECOP har Morten Henrik lund og Lars Overgaard medvirket.

EBM Papst

EBM Papst er en af verdens førende producenter af energieffektive ventilatorer. EBM Papst har hovedkvarter i Tyskland og har også en stor afdeling i Danmark. EBM Papst har tidligere deltaget i F&U-projekter sammen med danske producenter og Teknologisk Institut og har stor erfaring med at beregne mulige løsninger og forbedringer, som derefter kan afprøves i praksis. Fra EBM Papst har Henrik Dahl Thomsen medvirket i projektet.

DTU MEK

DTU MEK udfører undervisning og forskning i kølesystemer. Der har i mange år været et godt og solidt forskningsmiljø i køleteknik på DTU – lige fra det tidligere Laboratorie for Køleteknik til det nuværende Institut for Mekanisk Teknologi (MEK).

Lektor Wiebke Brix Markussen underviser og forsker i køleteknik og har været DTU's ansvarlige i projektet. Hovedparten af DTU's indsats er leveret af en postdoc, Jonas Kjær Jensen, som har været ansat i 20 måneder i projektet. Derudover har seniorforsker Martin Ryhl Kærn også deltaget i arbejdet fra DTU's side.

Teknologisk Institut

Teknologisk Institut har igennem de seneste 20 år været en af de ledende kræfter i forskning i kølemøblers energieffektivitet på både nationalt og internationalt plan. Endvidere er Instituttet førende inden for forskning i brugen af naturlige kølemidler i stedet for brugen af F-gasser. Der er afviklet en lang række forskningsprojekter, som har fået økonomisk støtte fra EFP, Energistyrelsens CO₂-pulje, Elforsk og EUDP-programmet.

Af projekter kan nævnes udviklingen af en ny generation af storkøkkenkøleskabe og -frysere, og Gram Commercial har i 2014 sat den nye generation af produkter i produktion.

Fra Teknologisk Institut har følgende medvirket: Christopher Murphy, Hans Walløe, Nis Peter Reinholdt, Babette Peuliche Slott og Per Henrik Pedersen (projektleder).

Projektpartnerne ønsker at takke Bent Brandt A/S for det store arbejde med at finde placeringer til fieldtest.

8. Test af eksisterende kabinet

I løbet af efteråret 2015 og i starten af 2016 arbejdede Teknologisk Institut med at bygge testfacilitet til test af kølebord. Udgangspunktet er et klimakammer, hvor der foretages akkrediterede test af professionelle køleskabe og fryser. Hidtil var der kun testet opretstående enheder.

Det nye var, at der skulle udvikles og bygges en døråbningsrobot, som kan åbne (mindst) tre døre eller tre sæt af skuffer i bestemte sekvenser efter forskrifterne i EN16825. Disse døråbninger simulerer ”rigtig” brug af kølebordet. Testene foregår i klimaklasse 4 (+30 °C, 55 % RH) og skal efterligne klimaet i et storkøkken. Gram Commercial arbejdede parallelt med dette med at bygge en tilsvarende døråbningsrobot til deres eget laboratorium.

Der blev valgt et koncept med sugekopper, hvilket med succes var blevet brugt til test af træmøbler på Teknologisk Institut, og dette koncept giver en vis fleksibilitet i konstruktionen. Hidtil var der benyttet en mere rigid sammenføjning mellem robotarm og køleskabsdør. Dette kunne sommetider medføre, at køleskabskabinettet blev flyttet, og at testen blev ødelagt.

Det nye princip (med sugekopper) viste sig at fungere godt.

Gram Commercial sendte allerede i efteråret 2015 et standardkølebord til Teknologisk Institut og et tilsvarende kølebord til DTU.

Test efter EN16825 startede i marts 2016 i klimakammer på Teknologisk Institut. Der blev foretaget to test af kølebordet:

- Test af kølebordet som leveret (med 3 døre)
- Test af ombygget kølebord med skuffer.

Endvidere blev der foretaget ekstra målinger på kølesystemet og luftflow for at give input til arbejdet på DTU MEK med at udvikle et avanceret simuleringsprogram:

- Resultatet af testen med døre.
- Energiforbruget blev målt til 3,358 kWh/døgn
- Nettovolumen blev målt til 290 liter
- EEI (Energieffektivitetsindex) blev bestemt til: 48,43 %
- Varmeste testpakke: +5,0 °C
- Koldeste testpakke: +2,6 °C.

Flere detaljer kan læses i testrapport 300 KLAB-16-113 (Teknologisk Institut, 25. maj 2016), der er vedlagt som bilag til denne slutrapport.

Gram Commercial foretog tilsvarende test af tilsvarende kølebord (uafhængig af test på Teknologisk Institut) og fik et resultat, som ligger inden for samme resultat. Dette blev betragtet som tilfredsstillende og var med til at validere testmetode og testudstyr.



Figur 8.1: Test af det eksisterende kølebord med døråbningsrobotter i klimakammer på Teknologisk Institut efter EN16825.

Resultatet af test med skuffer:

- Energiforbruget blev målt til 3,9875 kWh/døgn
- Nettovolumen blev målt til 235 liter
- EEI (Energieffektivitetsindex) blev bestemt til: 60,88 %
- Varmeste testpakke: +4,95 °C
- Koldeste testpakke: -0,57 °C.

Man ser, at energiforbruget er større med test af skuffer. Nettovolumenet er mindre – sammenlignet med døre – og EEI er væsentligt større. Temperaturforskellen mellem koldeste og varmeste målepakke er væsentligt større sammenlignet med kølebordet med døre. Det større energiforbrug skyldes først og fremmest større kuldebroer rundt om skufferne, og at der sandsynligvis er større varmeindtrængning i testpakker og luftskifte i forbindelse med åbningerne af skufferne – sammenlignet med åbning af døre.



Figur 8.2: Test af kølebord med ni skuffer i klimakammer på Teknologisk Institut. Testen foretages efter EN16825. Under testen åbnes øverste og nederste skuffe simultant i sekvenser mellem de tre sektioner i kølebordet.

Testen er rapporteret i 300 KLAB-16-113_2 (Teknologisk Institut, 21. juni 2016), der er vedlagt som bilag til denne slutrapport.

9. Matematisk model

I projektet er der arbejdet med to niveauer af matematiske modeller.

Det ene niveau er en **statisk model**, som er opstillet for at vurdere, hvilke betydninger ændringer i kølebordets isoleringsevne og ændringer i komponentvalg vil medføre. I dette arbejde blev der også benyttet forholdsvist avancerede FEM-modeller (Finite Element Models) til at beregne varmetransmission igennem kuldebroer. Endelig blev der udviklet en CFD-model til at vurdere luftstrømme inde i kølebordet.

Det andet niveau er en **dynamisk model**, som benyttes til at vurdere dynamikken ved anbefalede ændringer og til at vurdere effekten af at benytte VSD-kompressorer (variable speed drive). Modellen er også benyttet til at vurdere forskellige styringsstrategier for VSD-kompressorer.

Statisk matematisk model

Modellen er bygget op med et antal delelementer, der koncentrerer sig om hver sin del af varmetransmissionsberegningerne for kølebordet:

- **Energiforbrug** – inkl. fordamperbelastning samt energiforbrug til kompressoren og øvrige energiforbrugende komponenter.
- **Geometri** – Mellemlregninger på kølebordets geometriske udformning til brug i andre beregninger.
- **Luftskifte** – Beregning af kuldatabet relateret til udskiftning af luft ved døråbninger.
- **Kuldatab** – Generelt kuldatab som følge af varmetransport igennem kølebordets overflader.
- **Kuldebroer** – Beregning af kuldatab ved kuldebroer i form af tætningslister ved skuffer og døre, der har en markant lavere isoleringsevne end kølebordets øvrige flader.

Da modellen er opbygget i MS Excel, er hvert af delresultaterne opdelt i kategorier fordelt på hvert sit ark. Kategorierne er, som følger:

Energiforbrug – original

Præsentation af kølebordets nuværende kuldebelastning og energiforbrug er samlet i en tabeloversigt, hvor det samlede resultat står fremhævet, se tabel 9.1. Kuldebelastningen kortlægges for at kunne beregne, hvor hårdt kompressoren er belastet. Kølesystemet skal fjerne en varmeeffekt, der udgøres af effekt fra indvendige ventilatorer samt kuldatab fra vægge, døre/skuffer, kuldebroer og luftskifte, hvilket samlet benævnes ”den totale fordamperbelastning”. Dette indsættes i et funktionsudtryk for kompressorens energiforbrug, hvor sidstnævnte er en funktion af fordamperbelastningen. Disse funktionsudtryk – eller kompressorpolynomier – er stillet til rådighed af kompressorfabrikanten SECOP.

Energiforbrug – optimeret

Her regnes der – foruden på kølebordet i sit udgangspunkt – også på alternativer hertil med andre komponenter og driftstider samt anden geometri. Delresultaterne er præsenteret sammen med det samlede resultat mht. reduceret energiforbrug ift. udgangspunktet. Kølebordets nuværende kompressor er af typen TL5CN, men et mindre antal forskellige SECOP-kompressorer er kandidater til den fremtidige energivenlige kompressor til det

energioptimerede kølebord. Derfor er energiforbruget for disse beregnet side om side for at danne et sammenligningsgrundlag. Samtlige øvrige parametre holdes fast, hvorved man får en overblik over effekten af at udskifte kompressoren i kølebordet. Kandidaterne er: DLE4CN, DLE4CN RC, DLE4.8CN og DLE4.8CN RC.

Kuldetab

Kuldetabet henvender sig til varmeledningen igennem bund, top, sider og front samt bagvæg på kølebordet. Ud fra informationen omkring arealerne for disse flader, antaget varmeovergangstal på udvendig og indvendig side samt et varmeledningstal for det isolerende skum i væggene er der anvendt varmeledningstiligninger for den termiske modstand til bestemmelse af kuldetabet. Gram Commercial har tilvejebragt værdier for varmeovergangstallene, der varierer alt efter, om kølebordets overflader støder op til en væg eller ud til fri luft.

Kuldebroer

Foruden kuldetabet igennem kølebordets store flader finder der også et kuldetab sted fra kuldebroer, hvilket i praksis udgøres af mange meter kant rundt langs skuffer og døre. Disse er tætnet med en magnetliste i plastic, men denne yder ikke samme termiske modstand som væggene og vil derfor virke som en kuldebro.

Kuldetabet associeret med kuldebroerne beregnes via steady state-simuleringer i multifysikværktøjet COMSOL. Der laves to geometrier: En reference og én, hvor skummet i lågen (en skuffe eller en dør) er ført helt igennem til skummet i væggen, som lågen er placeret i. Det svarer i praksis til, at væg og låge er helt sammenhængende, og lågen derfor ikke vil kunne åbnes. Referencen er modsvarende – blot en tro kopi af lågens virkelige opbygning med en tætningsliste. Herefter specificeres de pågældende materialeværdier samt initialværdier og randbetingelser. Forskellen på de to scenarier er dermed kun, at listen og pladsen, den optager, erstattes af en gennemgående samling med skum – lågens og væggen geometri er uændret. Derfor må forskellen på resultaterne referere til kuldebroen i forbindelse med listen. Det samlede kuldetab fra kuldebroer opnås da ved at sammenholde simuleringens resultater med det antal meter af tætningsliste, der findes i kølebordet.

Der er lavet simuleringer tre steder på kølebordet: Én, der repræsenterer kuldebroerne ved åbningerne internt i bordet (sprosser og dørstolper), én for åbningerne langs bunden og én for åbningerne langs bordets yderste sider. Til repræsentation af de interne kanter i kølebordet anvendes geometrien af toppen af en skuffe, en tætningsliste og halvdelen af en sprosse, mens sprossen – for sidevægge og bund – er skiftet ud med geometrien af netop sidevæg eller bundkant. Åbningerne mod toppen af bordet er ikke selvstændigt simuleret, men repræsenteres ved simuleringen af kuldebroen imod bunden af bordet. Ydersider og bunden er derimod netop udvalgt til simulering, da varmeindfaldet vil være større her. Geometrien beror på tegningsmateriale fra Gram Commercial med tegningsnumrene: 762117383_001, 3945_007 og 3653_005. Simuleringerne viser blandt andet, at der netop er forskel på kuldetabet for åbningerne internt i bordet og åbningerne placeret ved bunden og de yderste sider, hvor de to sidstnævnte har et større kuldetab.

Herudover er der foretaget simuleringer af to alternative designs af overgangen mellem skuffe og sprosse. Disse designforslag har til formål at reducere kuldebroen fra det kølede rum til omgivelserne.

Resultater - udgangspunkt

Kuldebelastning		TL5CN (udgangspunkt)
Indv. ventilator	W	9,5
Varmelegeme	W	3,9
Kuldetab gennem overflader	W	57,3
Kuldebroer	W	37,5
Luftskifte	W	31,8
Total fordamperbelastning	W	140,1
Effektforbrug		TL5CN (udgangspunkt)
Kompressor	W	108,9
Udv. ventilator	W	27,3
Indv. ventilator	W	9,5
Varmelegeme	W	3,9
Styring	W	4,9
Totalforbrug	W	154,5
	kWh/24h	3,71
Besparelse	%	

Tabel 9.1: Samlet energiforbrug over 24 timer samt kuldebelastning og effektforbrug i kølebordet beregnet via beregningsmodellen.

Overordnet set skal en energioptimering enten komme fra at reducere kuldebelastningen, så kølesystemet skal fjerne mindre varme, eller der kan reduceres på effektforbruget i kølebordets komponenter.

Kuldebelastning

Betragtes først kuldebelastningen, så ses de største bidrag fra kuldetab igennem bordets flader. Ses hele kølebordets geometriske udformning under ét – dvs. vægge, døre og kuldebroer – udgør dette omtrent 68 % af det samlede bidrag. Infiltrationen af varmere luft uden for bordet via de mange døråbninger står desuden for en andel af kuldebelastningen på ca. 23 %.

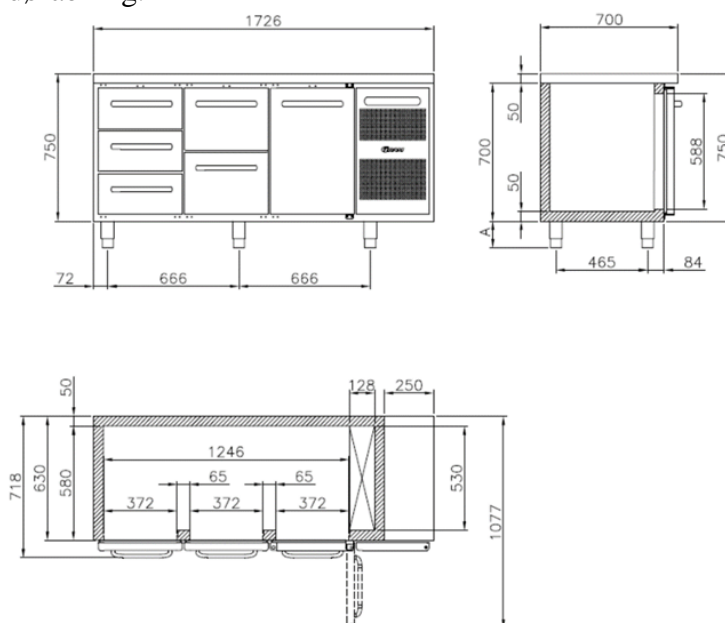
Effekten for de indvendige ventilatorer er bestemt ud fra testdata af effektforbruget af kølebordets enkelte komponenter. Effekten af førstnævnte ændres med modtrykket, som ventilatorerne møder. Værdien er derfor fastsat som en middelværdi mellem måledata for ventilatorerne med hhv. fuld og ingen belastning. Ventilatorer kører konstant bortset fra under afrimningsforløbene.

Varmelegemet til afrimning af fordamperen er testet til at have en effekt på 283 W. Til gengæld tændes varmelegemet kun ved afrimninger, hvilket maksimalt kan være fire gange i døgnet med maks. 30 min. varighed pr. afrimning. Ud fra testdata på kølebordet er det

estimeret, at der typisk er fire afrimninger pr. døgn á ca. 5 minutters varighed pr. afrimning. Varmelegemets effekt er delt ud til en konstant afsat effekt ved at udregne et forholdstal imellem de samlede 20 minutter til afrimning ud af døgnets 1.440 minutter.

Gram Commercial har leveret data for varmeovergangstallene på indvendig og udvendig side af kølebordet. Disse er lidt større end ved tidligere beregninger, hvilket derfor giver et lidt større bidrag til kuldebelastningen. Hertil kommer, at beregningsmodellen er blevet mere detaljeret angående typer af isoleringsmateriale samt opbygning af bordpladen. Gram Commercial har leveret mere præcis information om varmeledningsevnen for både det vandbaserede skum til bordpladen samt cyclopentan-skummet, der anvendes alle andre steder. Desuden er varmeledningsevnen medtaget for de to 6 mm tykke MDF-træplader, der ligeledes er indlejret i skummet i bordpladen.

Luftskiftet er også øget i forhold til hidtidige beregninger fra 72 til 216, hvilket giver et markant større bidrag til kuldebelastningen. Det antages, at al luften i volumenet for ét fag udskiftes ved hver døråbning.



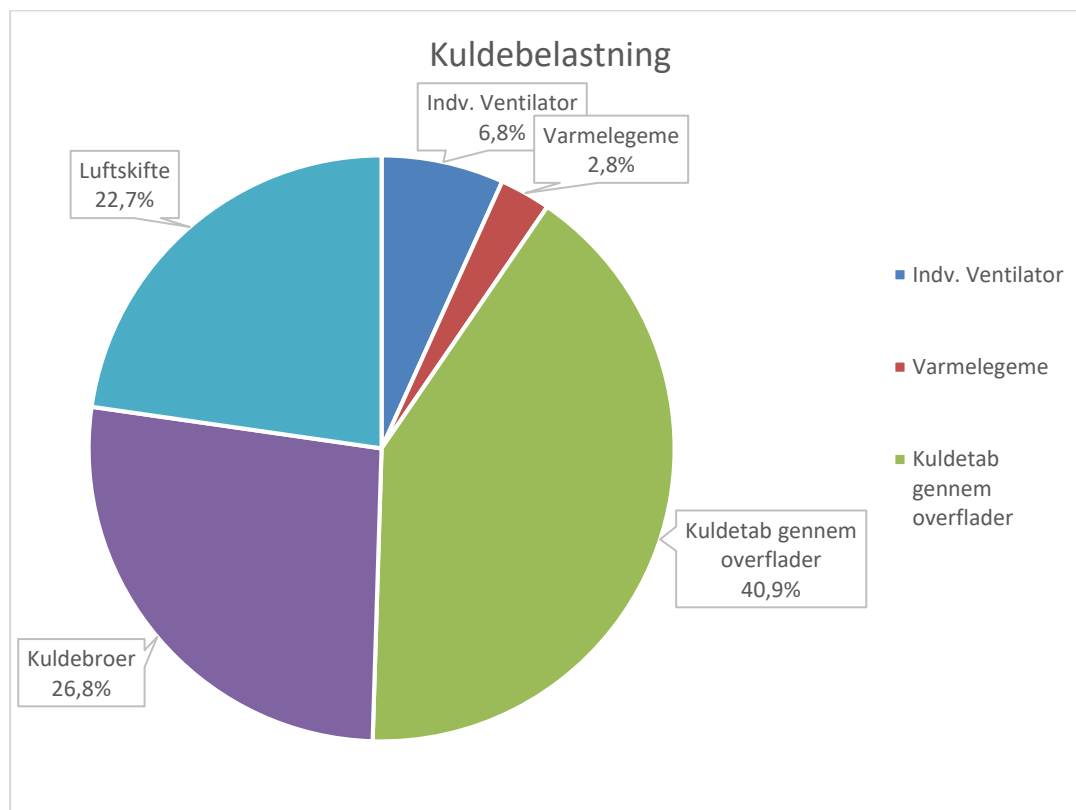
Figur 9.1: Teknisk tegning af det eksisterende kølebord.

Effektforbrug

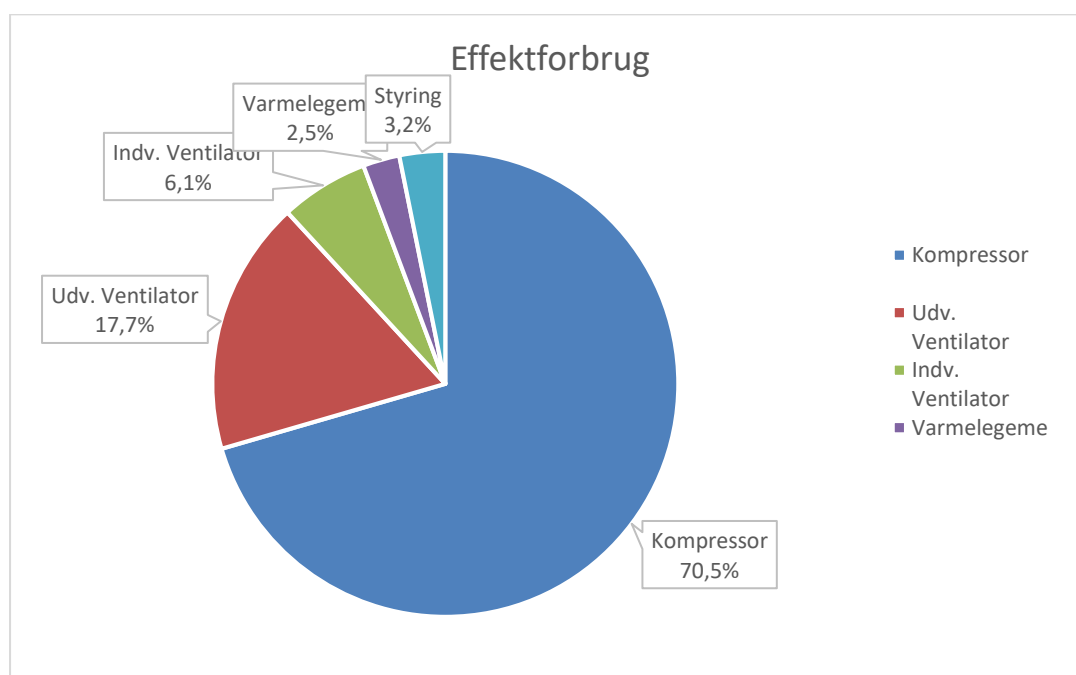
På effektforbruget er den overvejende andel placeret i forbindelse med kompressoren, hvilket udgør omtrent 70 %. Det er dog helt forventeligt, at kompressoren vil stå for klart det største bidrag, da den skal yde det største arbejde i forhold til de øvrige komponenter. Det er desuden en vigtig pointe, at kompressoreffekten vil falde, såfremt kølebordet optimeres på kuldebelastningen, da dette mindsker den varme, som kølesystemet skal lede bort. Ligesom ved de øvrige komponenter er værdierne for effektforbruget til udvendig ventilator og styring angivet ud fra testresultater for målinger på kølebordets komponenter. Effekten til den udvendige ventilator har vist sig at være langt højere end hidtil antaget, og denne udgør alene næsten 18 % af effektforbruget i kølebordet. Ventilatoren kører sammen med kompressoren, men er desuden termostatstyret til at tænde ved +30 °C, hvilket ofte kan forekomme her tæt på kondensatoren. Dens driftstid er derfor antaget til at være det samme som de indvendige ventilatorer – dvs. hele tiden bortset fra under afrimning.

Afvigelse ift. test

Beregningsmodellens effektforbrug på 3,71 kWh/24h ligger nu lidt over på det målte 3,358 kWh/24h i ”Test 3” fra laboratorietests af kølebordet iht. EN 16825:2015. Hertil bør det dog nævnes, at initialåbningerne endnu ikke er medtaget i beregningerne.



Figur 9.2: Kuldebelastningen for kølebordet i sit udgangspunkt som angivet i tabel 9.1.



Figur 9.3: Effektforbrug for kølebordet i sit udgangspunkt som angivet i tabel 9.1.

Optimeringspotentiale

Kompressorproducenten SECOP har en række nye kompressorer, der kunne afløse kølebordets nuværende kompressortype: DLE4CN, DLE4CN RC, DLE4.8CN og DLE4.8CN RC. Energibesparelsen ved at implementere disse er derfor undersøgt. Der er ligeledes betydelige potentialer for at nedbringe effektforbruget på andre af kølebordets komponenter – f.eks. den udvendige ventilator – men dette er ikke på nuværende tidspunkt inddraget i undersøgelsen.

Med hensyn til kølebordets geometri undersøges effekten af at hæve isoleringstykkelsen, da tabellen ovenfor viste, at et stort bidrag til kuldetabet er forbundet med geometrien. Isoleringstykkelsen er derfor ændret til 60 og 70 mm i stedet for de nuværende 50 mm i kølebordets vægge. I forbindelse hermed er de indvendige mål bibeholdt på kølebordet, mens de ydre dimensioner er forøget. Desuden er der regnet på Gram Commercial's første prototype på et nyt kølebord med eksempelvis individuelt specificerede isoleringstykkelser for kølebordets flader samt et nyt design af kuldebroen ved overgangen mellem kabinet og døre/skuffer. Et udsnit af tegninger over prototypen kan ses i figur 2 i bilag 4.

Kuldebroerne ved kølebordets åbninger i fronten er forsøgt reduceret via to alternative udformninger af overgangen mellem skuffe og sprosse, hvilket er implementeret i beregningseksemplerne ved 60 mm og 70 mm isoleringstykkelse.

Resultater – optimeret kølebord

Tabellen herunder viser beregningsmodellens resultater ved brug af de fire kompressoralternativer. Øvrige forudsætninger er de samme som ved udgangspunktet – nemlig kompressortypen TL5CN.

Kuldebelastning		TL5CN (udgangspunkt)	DLE4C N	DLE4C N RC	DLE4.8C N	DLE4.8C N RC
Indv. ventilator	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Varmelegeme	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Kuldetab gennem overflader	W	57,3	57,3	57,3	57,3	57,3
Kuldebroer	W	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Luftskifte	W	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
Total fordampbelastning	W	140,1	140,1	140,1	140,1	140,1
Effektforbrug		TL5CN (udgangspunkt)	DLE4C N	DLE4C N RC	DLE4.8C N	DLE4.8C N RC
Kompressor	W	108,9	85,2	78,5	85,1	78,2
Udv. ventilator	W	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Indv. ventilator	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Varmelegeme	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Styring	W	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Totalforbrug	W	154,5	130,8	124,1	130,6	123,8
	kWh/24h	3,71	3,14	2,98	3,14	2,97
Besparelse	%		15,3	19,7	15,4	19,9

Tabel 9.2: Energiforbrug over 24 timer samt kuldebelastning og effektforbrug i kølebordet med den nuværende kompressor, TL5CN, samt med de fire alternative kompressorer.

Den procentvise besparelse ved alene at udskifte kompressoren ligger i intervallet ca. 15-20 %, hvor den største energibesparelse opnås ved DLE4CN RC og DLE4.8CN RC. Parvis har kompressorerne næsten det samme energiforbrug, men 4.8-modellerne har dog det mindste, hvorfor den største besparelse kan findes her. DLE4.8CN og DLE4.8CN RC anvendes derfor også til at evaluere effekten af at forøge isoleringstykkelsen samt andre forbedringer på kølebordet. Tabellen herunder viser beregningsmodellens resultater for disse beregninger.

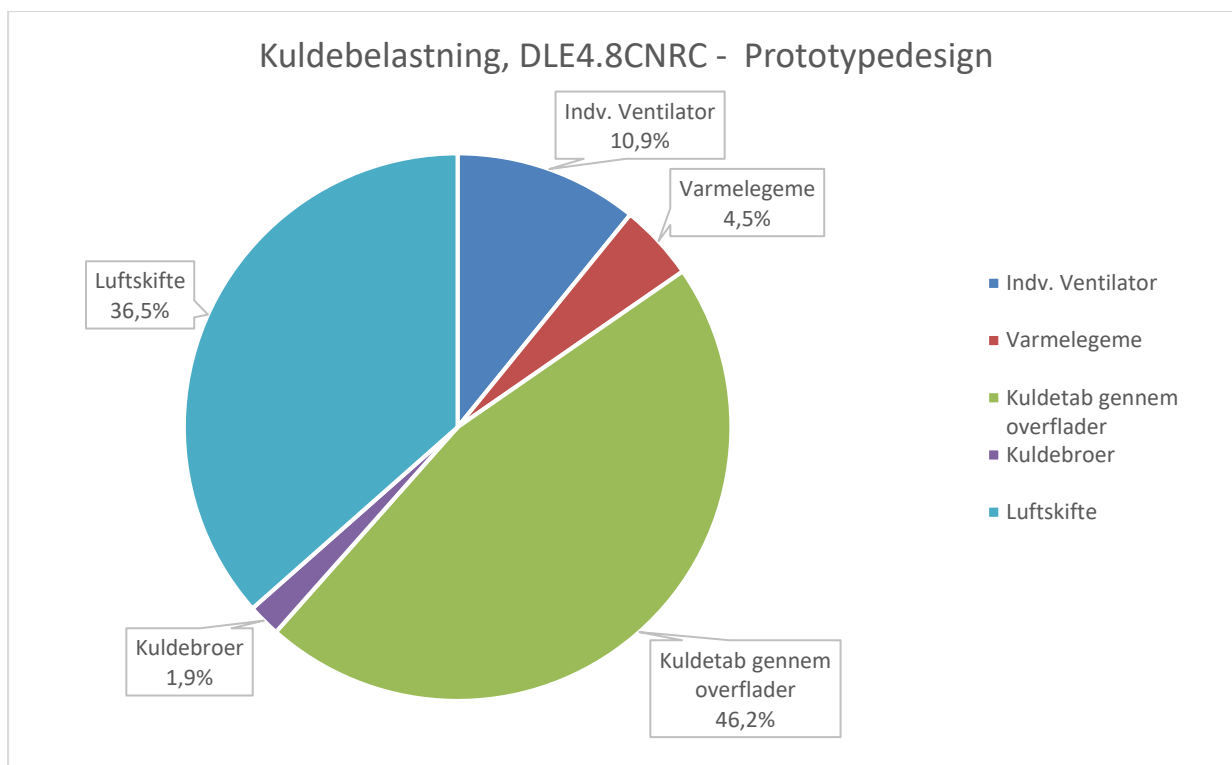
Kuldebelastning		60mm isolering		70 mm isolering		Prototype		
		TL5CN (udgangspunkt)	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC
Indv. ventilator	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Varmelegeme	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Kuldetab gennem overflader	W	57,3	53,0	53,0	46,7	46,7	40,3	40,3
Kuldebroer	W	37,5	12,2	12,2	12,2	12,2	1,7	1,7
Luftskifte	W	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
Total fordamperbelastning	W	140,1	110,4	110,4	104,1	104,1	87,2	87,2
Effektforbrug		TL5CN (udgangspunkt)	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC	DLE4.8 CN	DLE4.8 CN RC
Kompressor	W	108,9	67,1	61,7	63,2	58,2	48,7	48,7
Udv. ventilator	W	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Indv. ventilator	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Varmelegeme	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Styring	W	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Totalforbrug	W	154,5	112,7	107,3	108,8	103,7	94,3	94,3
	kW h/24 h	3,71	2,70	2,57	2,61	2,49	2,26	2,26
Besparelse	%		27,1	30,6	29,6	32,9	39,0	39,0

Tabel 9.3: Energiforbrug over 24 timer med den nuværende kompressor, TL5CN, samt med DLE4.8CN-kompressortyperne. Herudover er der regnet med forhøjede isoleringstykkelser på 60 og 70 mm frem for de nuværende 50 mm samt Gram Commercials prototypedesign. Endelig er kuldebroerne reduceret via et ændret design af overgangen fra kanten af skuffer/døre og kabinettet.

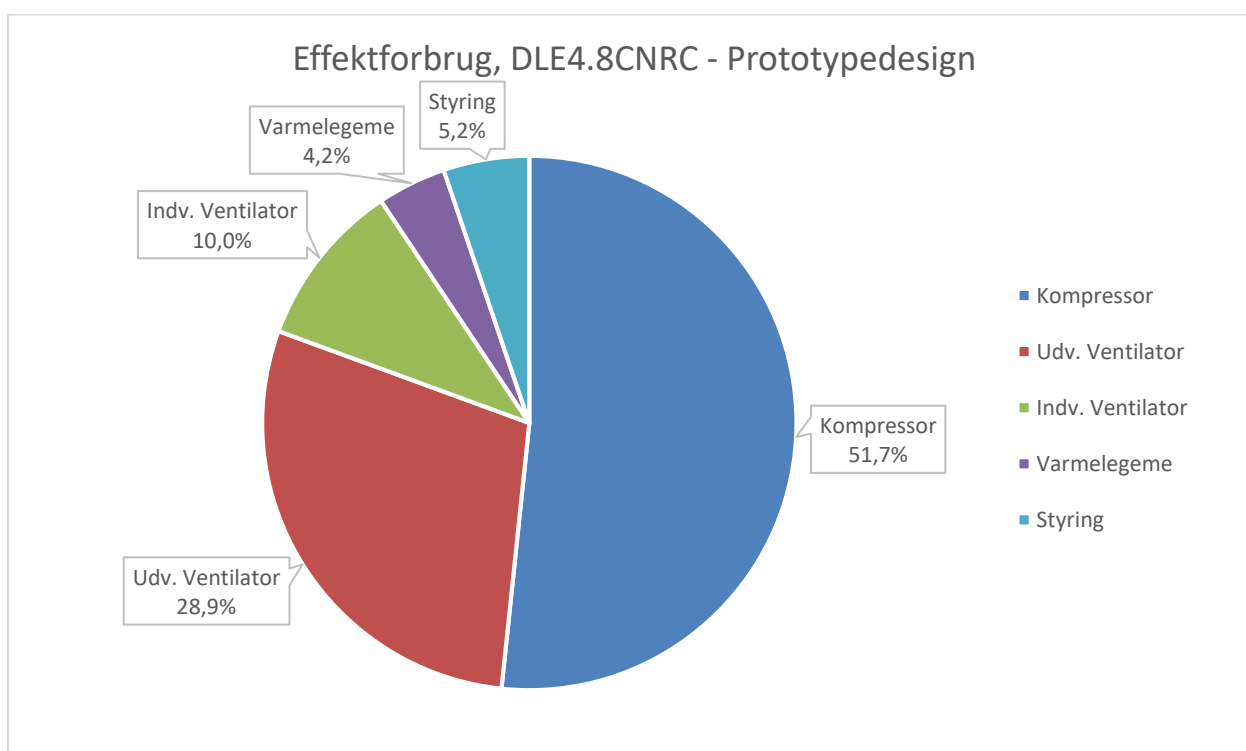
Ved udelukkende at hæve isoleringstykkelsen 10 mm til samlet 60 mm opnås en yderligere energibesparelse på ca. 1,6 %. Hæves isoleringstykkelsen til 70 mm, opnås en besparelse på ca. 4 %.

Kuldebroerne ved kølebordets åbninger i fronten kan reduceres markant ved at ændre geometrien omkring disse åbninger. Dette tiltag kan bidrage med yderligere 9-10 % til energibesparelsen, så den samlet set kan blive op til 33 %. Det noteres, at sidstnævnte er et meget lavt kuldetab, som muligvis er svært at realisere i den virkelige verden. Men tallet kan ses som en indikation på, at der er et yderligere potentiale for at reducere kuldetabet fra 12,2 W.

Tages der udgangspunkt i det bedste tilfælde, dvs. implementering af DLE4.8CN RC-kompressoren prototypedesignet med dennes reduktion af kuldebroer, kan ca. 80 % af det samlede mål for energibesparelse opnås. Kuldebelastning og effektforbrug for DLE4.8 CN RC med prototypedesignet er angivet i diagrammerne nedenunder.



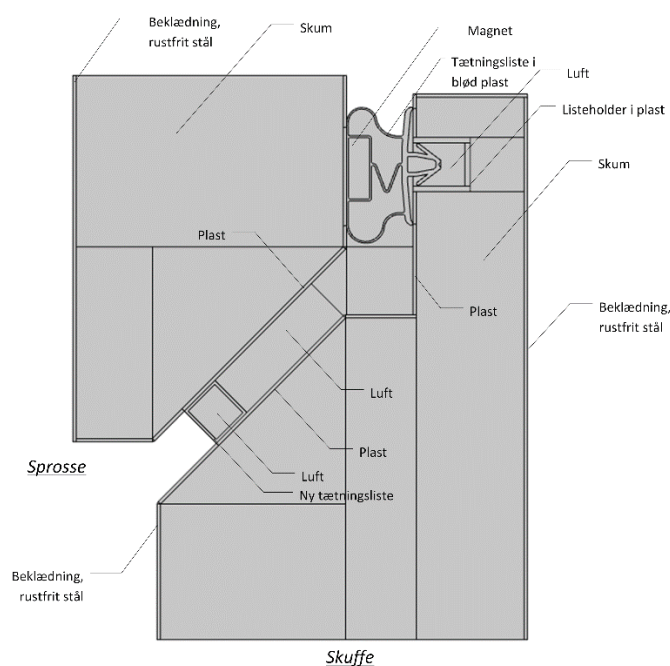
Figur 9.4: Kuldebelastning for det optimerede kølebord.



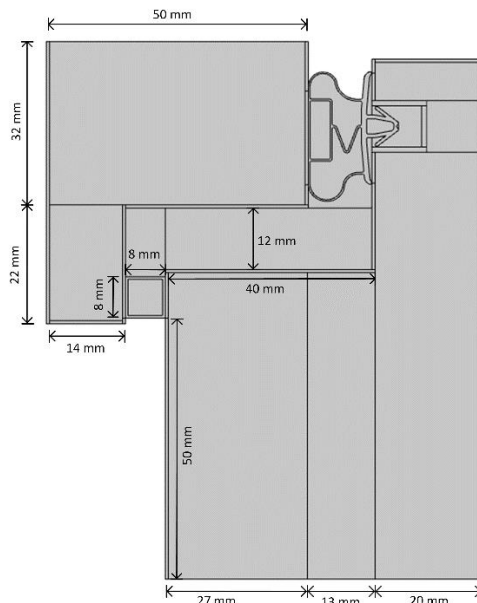
Figur 9.5: Effektforbrug for det optimerede kølebord. Læg mærke til, at den udvendige ventilator repræsenterer op mod 30 % af det totale energiforbrug. Projektgruppen noterede dette, og EBM Papst startede arbejdet med at finde en anden løsning på dette (se senere i rapporten).

Reducering af kuldetab igennem kuldebroer

For at reducere kuldetabet igennem kuldebroerne er der opstillet to alternative designs til overgangen mellem skuffe/døre og kølebordet. I det nuværende design er det kun tætningslisten, der adskiller det kølede rum fra omgivelserne. Det første alternativ er udformet som en konisk samling, hvor der er indlagt en ekstra tætningsliste for at skabe et rum med stillestående luft. Ved det andet design er sprossen og skuffen passet sammen i en form for trapez med en ekstra tætningsliste monteret. Det koniske design er vist nedenunder. Isoleringstykkelsen ved sprossen er bibeholdt i forhold til kølebordets nuværende geometri. Skuffen har hidtil haft en isoleringstykkelse på 37 mm. Ved de alternative design er isoleringstykkelsen på det tyndeste sted reduceret til 20 mm, men på det tykkeste sted hævet til hhv. 67 og 60 mm for det koniske design og trappedesignet. De to alternativer giver stort set samme reduktion af kuldebroer. I tabellen ovenfor er tallene for det koniske design anvendt.

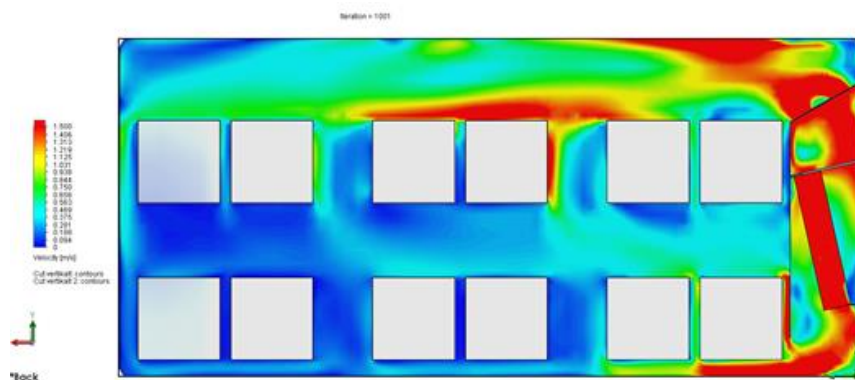


Figur 9.6: Alternativt design med konisk samling mellem skuffe og bord. Der er indlagt en ny tætningsliste længere nede i samlingen.



Figur 9.7: Andet alternative design til samling mellem skuffe og bord. Dette design har en trappe ind mod bordet samt en ekstra tætningsliste.

Der blev også udarbejdet en CFD-model af kølebordet til analyse af luftstrømningen internt i kølebordet. Denne model blev benyttet til adskillige beregninger af luftflowet i tomt og fyldt kølebord. Der blev også foretaget beregninger for ændrede geometrier af ventilatorplaceringer og af ændringer på den afskærmningsplade, som er mellem kølerummet og fordampere. Formålet hermed var at se, om der kunne opnås bedre luftfordeling ved ændringer. Resultatet viste, at den oprindelige geometri er fin. Der er udarbejdet et notat om modellen og beregningerne, og dette findes som bilag.



Figur 9.8: Et eksempel på lufthastighed, beregnet af CFD-modellen af kølebordet.

Dynamisk matematisk model

Temperaturen i kabinettet på det eksisterende kølebord styres ved en termostat, og temperaturerne i kabinettet svinger mellem en given minimums- og maksimumstemperatur, mens kompressoren kører ON-OFF, hvilket betyder, at kølesystemet arbejder under varierende temperaturforhold. Det er derfor væsentligt at tage hensyn til dynamikken, når kompressorstyringen modelleres. Der er blevet udarbejdet en dynamisk numerisk model af kølebordet for at undersøge effekten af forskellige mulige tiltag, der kan nedbringe energiforbruget af kølebordet, og for at undersøge forskellige styringsstrategier for kompressoren. Ved hjælp af simuleringresultaterne kunne mange forskellige tiltag

undersøges og dermed understøtte valget af, hvilke tiltag der skulle implementeres i prototyperne til test.

Nogle af resultaterne samt beskrivelserne i dette afsnit er desuden beskrevet i Jensen et al. (2018) vedhæftet i Appendiks B.

Simuleringsformål og parametervalg

For at kunne nedbringe kølebordets energiforbrug samtidig med at det sikres, at produkttemperaturen ikke svinger for meget, blev effekten af følgende tiltag simuleret:

- Ændret kompressortype og reguleringsstrategi for kompressoren.
- Ændringer af kabinetvæggens isoleringstykkelse og reduktion af kuldebroer. Den statiske model og COMSOL-undersøgelser omkring kuldebroer beskrevet ovenfor viste, at det var muligt at tilføje 20 mm ekstra PU-skum til isoleringen, og at varmetabet gennem kuldebroerne med et ændret design kunne reduceres med 95 %.
- Forøgelse af varmegennemgangstallet (UA-værdien) for fordamper og kondensator. Effekten af at fordoble UA-værdierne for de to varmevekslere blev undersøgt. Dette kan opnås ved enten af forøge varmeovergangskoefficienterne eller ved at øge overfladearealet eller ved en kombination af disse.
- Udskiftning af blæsere med mere energieffektive blæsere samt ændring af blæserstyringen. I udgangspunktet var kondensatorblæseren for kølebordet tændt, når kondensatortemperaturen var over 30 °C. Det betød, at blæseren altid var tændt under testbetingelserne for EN16825, idet omgivelsestemperaturen i disse test er mindst 30 °C. Ved at styre blæseren, således at denne kun er tændt samtidig med kompressoren, kan energiforbruget sænkes. Det blev antaget, at blæsereffekten kan reduceres til 10 W for kondensatoren og 6,2 W for fordamperen.

Syv forskellige kompressorer blev udvalgt. Disse er vist i tabel 9.4. Som det kan ses af tabellen, har de forskellige kompressorer forskellige reguleringsmuligheder. Fem forskellige propan-kompressorer med ON-OFF-styring blev undersøgt, og derudover blev to frekvensstyrede kompressorer – en til propan og en til isobutan – undersøgt.

Alle ON-OFF-styrede kompressorer blev reguleret med en termostat inde i kabinettet og fastsatte minimums- og maksimumstemperaturer for lufttemperaturen. De frekvensstyrede kompressorer kunne reguleres efter to forskellige strategier: VSD-styring, hvor kompressorhastigheden via frekvensregulering blev styret således, at luften i kabinettet opnår en given fastsat temperatur, og AEO-styring, hvor kompressoren kører ON-OFF baseret på fastsatte minimums- og maksimumstemperaturer for luften styret af termostaten i kabinettet, mens kompressorhastigheden blev reguleret efter at opnå en given kompressor ON-tid. Ved VSD-styring overgik kompressoren til ON-OFF-drift, hvis den fastsatte temperatur ikke kunne opnås ved minimumshastigheden for kompressoren.

I simuleringerne blev minimums- og maksimumstemperaturer for termostaten fastsat til hhv. -2 °C og 6 °C, medmindre andet er angivet. For AEO-styringen blev tre forskellige parametre for kompressor ON-tid undersøgt: 1 time, 2 timer og 4 timer. For VSD-styringen blev setpunktet for lufttemperaturen sat til 2 °C.

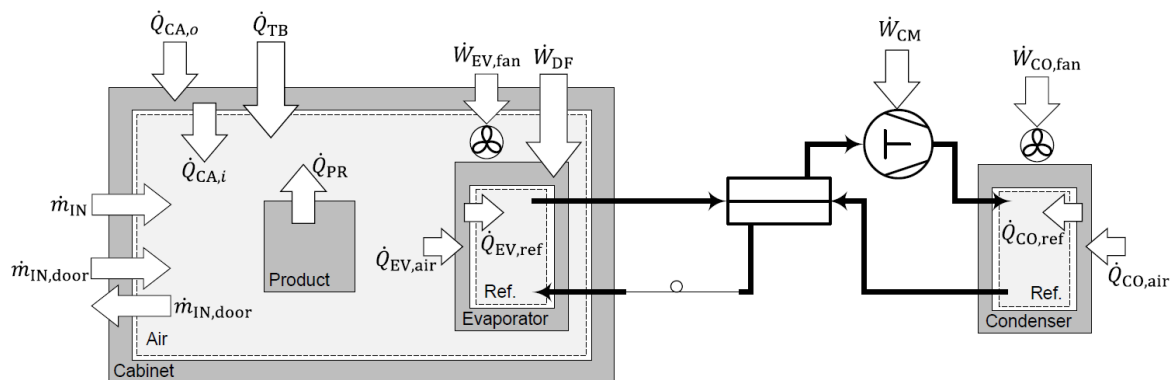
Kompressormodel	Kølemiddel	Slagvolumen cm ³	Styring	Nominel hast. RPM	Hastighed RPM
TL5CN	R290	5,08	ON-OFF	2900	-
DLE48CN	R290	4,80	ON-OFF	2900	-
DLE48CNRC	R290	4,80	ON-OFF	2900	-
DLE4CN	R290	4,00	ON-OFF	2900	-
DLE4CNRC	R290	4,00	ON-OFF	2900	-
DLV57CN	R290	5,70	VSD/AEO	2900	1000–4000
XV5KX	R600a	5,00	VSD/AEO	2900	1000–4000

Tabel 9.4: Data for de undersøgte kompressorer.

For at undersøge effekten af de forskellige tiltag blev tiltagene simuleret både enkeltvis og i kombination. Effekten blev vurderet med henblik på energiforbrug samt minimums-, maksimums- og gennemsnitstemperaturen for produkterne.

Modelopbygning

Modellen er opbygget i softwaren Engineering Equation Solver (EES) (Klein, 2017). Modelstrukturen for simuleringmodellen ses i Figur 9.9. Modellen bestod af en kabinetmodel og en model af kølesystemet. De to modeller var forbundne via fordampers køleydelse. Kabinettet blev modelleret som et kontrolvolumen af luft, som var omgivet af et kontrolvolumen af isoleret væg. I luftvolumenet var der placeret et kontrolvolumen af produktet, således at produkterne kun udvekslede varme med luftvolumenet og ikke med væggen. Både væg, luft og produkt blev modelleret som dynamiske kontrolvolumener, og de transiente temperaturer blev beregnet ved at anvende masse- og energibalancer for alle volumenerne. Det blev antaget, at luft og produkt kunne modelleres som ”lumped capacitance” – dvs. uden interne temperaturgradienter. Den transiente varmeledning gennem væggen blev derimod beregnet ud fra en diskretiseret væg. Væggen blev diskretiseret i et antal lag i bredden, og temperaturer blev beregnet for hvert lag.



Figur 9.9: Principskitse af modelstrukturen for kabinettet og kølesystemet. De grå områder blev modelleret som dynamiske kontrolvolumener (Jensen et al., 2018).

Ud over varmebelastningen gennem væggene modtog luften en varmebelastning fra fordamperblæseren $\dot{W}_{EV,fan}$ igennem kuldebroer og via infiltration af luft fra omgivelserne. Varmebelastningen pga. kuldebroer blev beregnet ud fra en kvasistatisk tilgang ved at fastsætte et varmegennemgangstal (UA-værdi) og beregne balastningen ud fra $\dot{Q}_{TB} =$

$UA_{TB}(T_{amb} - T_{air})$, hvor T_{amb} er temperaturen af omgivelsesluften, og T_{air} er temperaturen af luften i kabinettet.

Med hensyn til infiltration af luft blev to bidrag inkluderet. Et bidrag, der kommer pga. trykudligning med omgivelserne, og et bidrag pga. døråbninger. Massestrømmen af infiltreret luft blev beregnet ud fra et fastsat antal luftskifter.

Kølesystemet var opbygget af to dynamiske kontrolvolumener: fordamperen og kondensatoren samt to kvasistatiske komponenter: kompressoren og kapillarrør med sugegasveksler. Fordamperen og kondensatoren blev modelleret som to kontrolvolumener: et kontrolvolumen af kølemiddel omsluttet af et kontrolvolumen af varmeveksler/metal med en fastsat varmekapacitet.

Kompressorens drift blev beregnet ud fra polynomier fra producenten, og for de VSD-styrede kompressorer blev hastighedsafhængige polynomier implementeret. Varmetab fra kompressoren blev negligeret.

For at simulere kølebordet under de testforhold, der er specificeret i EN 16825, er forskellige parametre blevet tilpasset, så modellen bedst muligt stemmer overens med måledata. De tilpassede parametre var:

- det konvektive varmeovergangstal mellem luft og hhv. produkt og væg (antaget ens), α_{air}
- varmegennemgangstal af fordamperen, UA_{EV}
- varmegennemgangstal af kondensatoren, UA_{CO}
- varmegennemgangstal for kuldebroer, UA_{TB}
- antal luftskifter pga. døråbninger, $N_{air,inf}$.

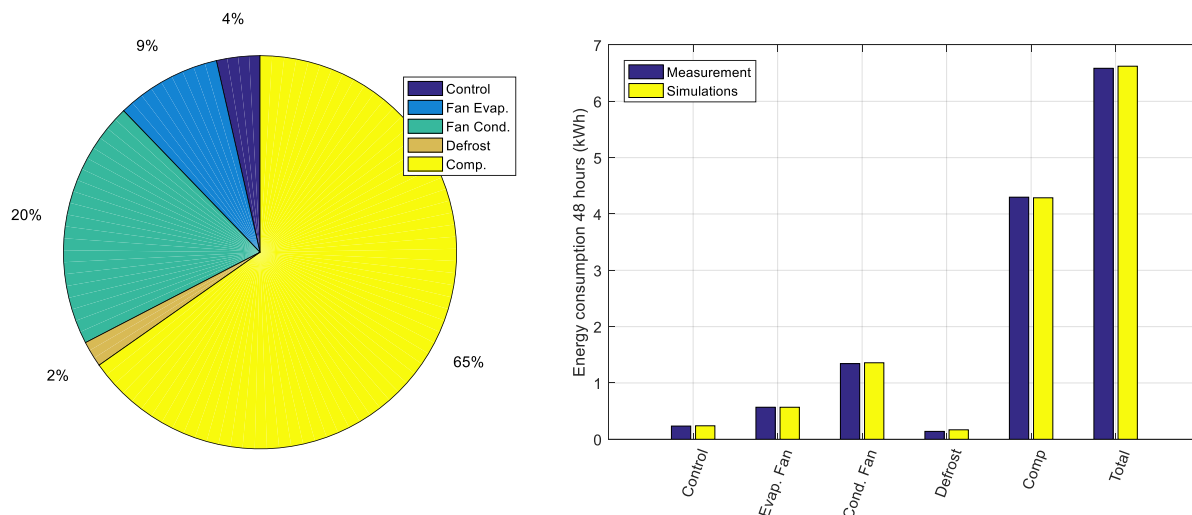
Modelvalidering

Modellen blev valideret ved sammenligning med måledata. Måledata kommer fra test af det eksisterende kølebord testet efter EN16825-testproceduren. De viste målinger svarer til de sidste 48 timer af den 72 timer lange måleperiode. Målingerne blev brugt til at tilpasse de ovennævnte parametre. De tilpassede parametre, som blev anvendt til de efterfølgende simuleringer, kan ses i tabel 9.5.

Modelparameter	Tilpasset værdi
α_{air}	6,52 $Wm^{-2}K^{-1}$
UA_{EV}	67,7 WK^{-1}
UA_{CO}	49,1 WK^{-1}
UA_{TB}	2,45 WK^{-1}
$N_{air,inf}$	4,6 -

Tabel 9.5: Tilpassede parameterværdier anvendt i modellen.

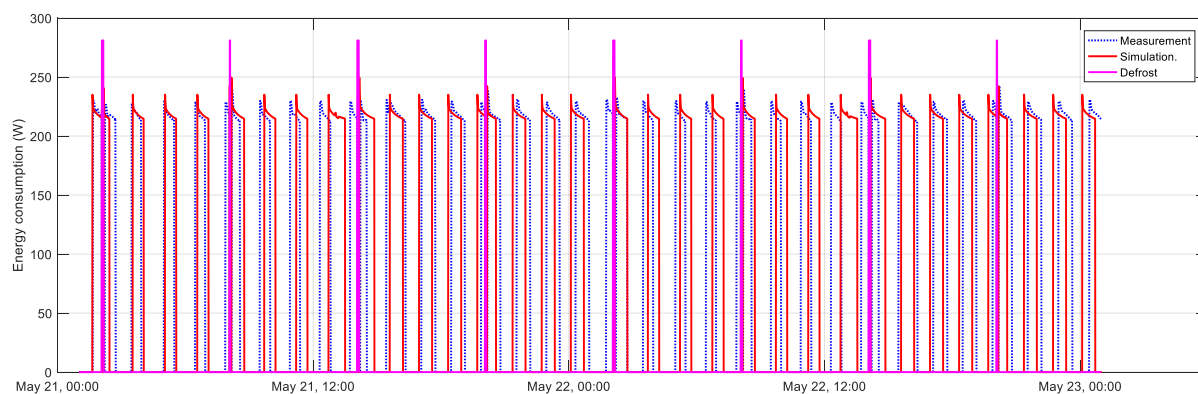
Figur 9.10 viser den simulerede fordeling af det samlede elforbrug for de forskellige komponenter samt en sammenligning af det målte og simulerede elforbrug for de forskellige komponenter. Det ses, at simuleringens resultater stemmer meget fint overens med de målte værdier. Det målte totale elforbrug over et døgn var 3,31 kWh, og det simulerede elforbrug afveg med 1,34 % fra de målte data.



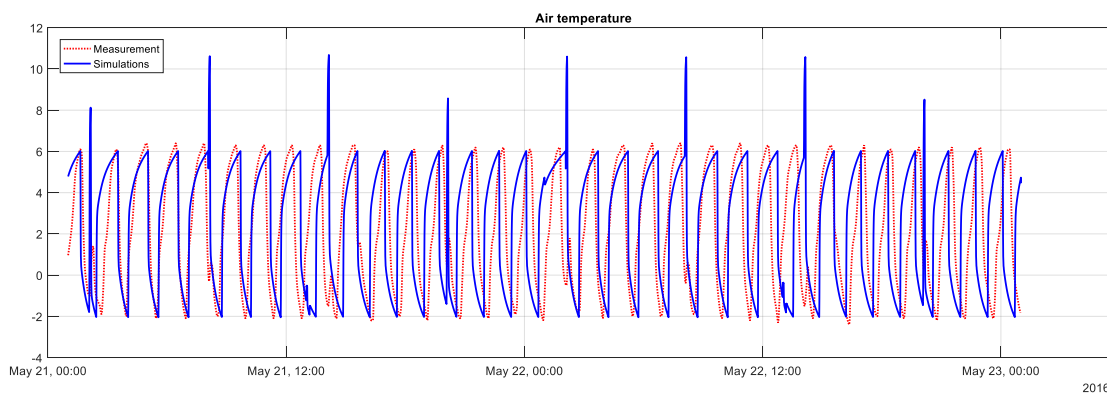
Figur 9.10: Til venstre: Fordeling af de enkelte bidrag til det samlede elforbrug af kølebordet (simuleringsresultater). Til højre: Sammenligning af de målte og simulerede elforbrug i løbet af 48 timer for de forskellige komponenter.

I figur 9.11 ses en sammenligning af simuleret og målt elforbrug som funktion af tiden. Det ses, at simuleringsmodellen kan efterligne de faktiske start-stop-forløb af kompressoren med høj nøjagtighed. Både perioderne for kompressorens ON-tid og antallet af kompressorstart stemmer godt overens med målingerne. De målte data repræsenterer to perioder af 12 timer med lukkede døre og to perioder af 12 timer, hvor dørene åbner og lukker efter teststandarten. Simuleringsresultaterne stemmer godt overens for begge perioder.

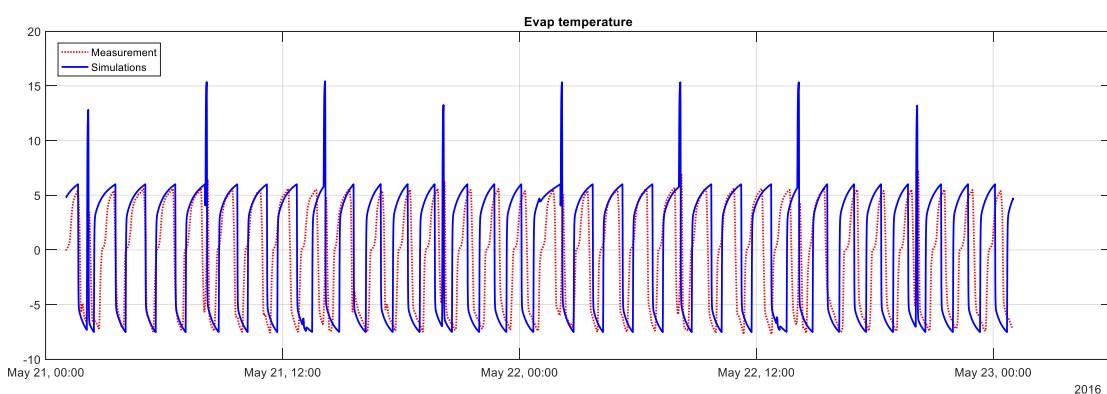
Figur 9.12-9.14 viser en sammenligning af de målte og simulerede værdier for henholdsvis lufttemperatur i kabinettet, fordampningstemperatur og kondenseringstemperatur for kølesystemet. Det ses, at også disse stemmer godt overens. Det bemærkes dog i figur 9.14, at den simulerede kondenseringstemperatur falder hurtigt ned til omgivelsestemperatur, når kompressoren slukker, mens den målte kondenseringstemperatur først falder kraftigt og derefter falder langsomt, således at der ses en afvigelse mellem de to kurver. Denne afvigelse skyldes detaljeringsgraden af modellen omkring ekspansionen. I det eksisterende kølebord sidder et kappilarrør, hvor der vil ske en trykudligning under kompressorstilstand, mens simuleringsmodellen simulerer en ekspansionsventil, som lukker for strømmingen, når kompressoren slukker.



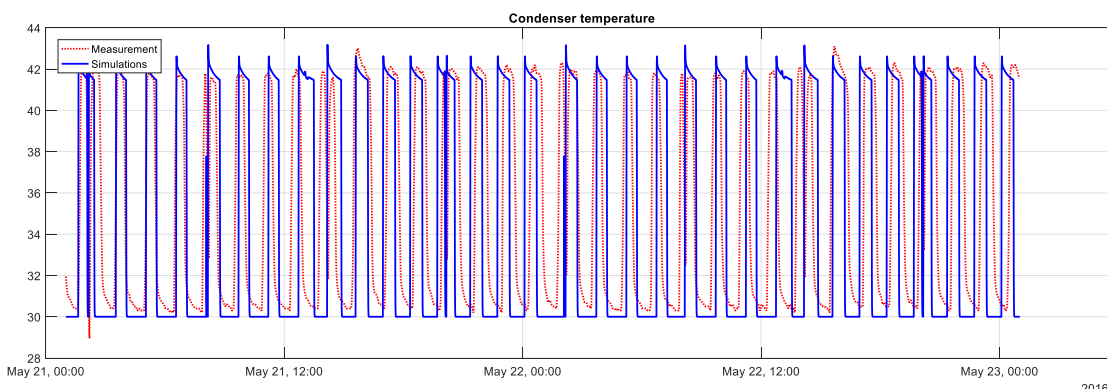
Figur 9.11: Sammenligning af simuleret og målt elforbrug for kompressoren som funktion af tid.



Figur 9.12: Målt og simuleret lufttemperatur i kabinettet.



Figur 9.13: Sammenligning af målt og simuleret fordampningstemperatur for kølesystemet.

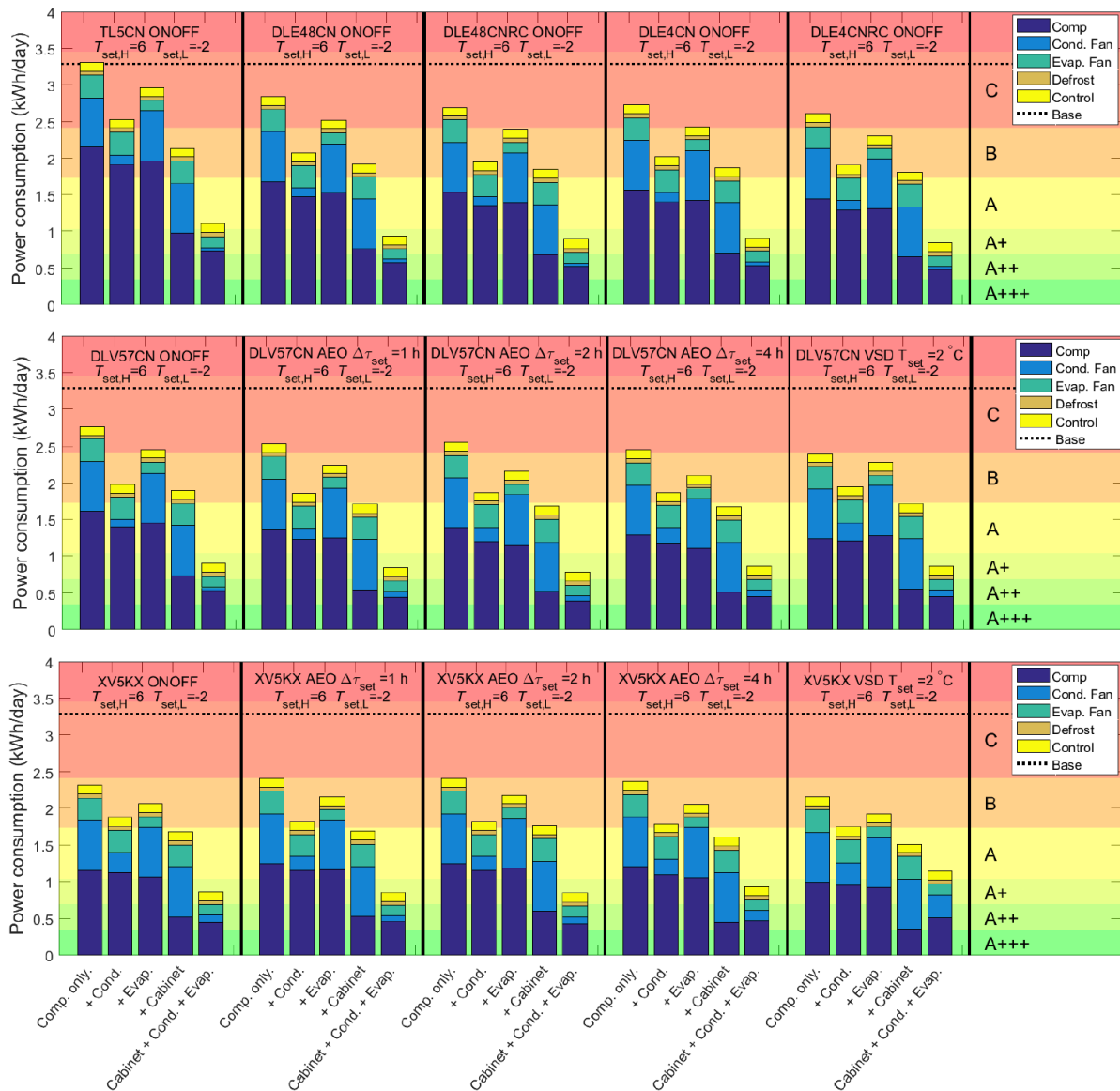


Figur 9.14: Sammenligning af målt og simuleret kondenseringstemperatur for kølesystemet.

Ud fra de viste sammenligninger vurderes modellen at være valideret og kunne dermed benyttes til at foretage de ønskede undersøgelser.

Simuleringsresultater

Figur 9.15 viser det simulerede elforbrug per dag for de forskellige undersøgte kompressorer, styringsstrategier og energibesparende tiltag, og i figur 9.16 ses de tilhørende minimums-, maksimums- og gennemsnitstemperaturer for produkterne i kølebordet. Der er vist 15 forskellige kombinationer, der hver repræsenterer en kombination af kompressor og

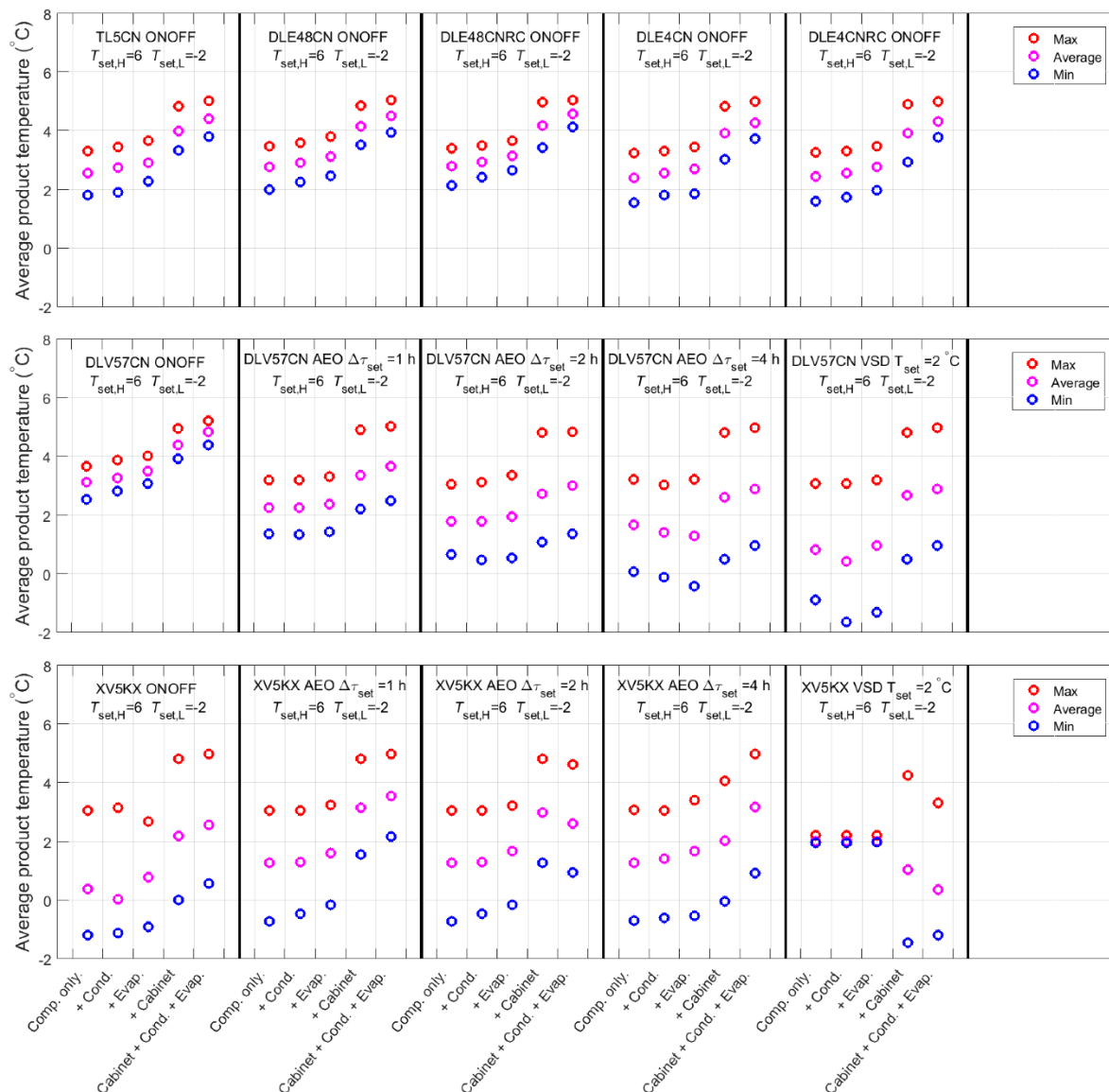


Figur 9.15: Energiforbrug for kompressorløsninger og forskellige energibesparende tiltag på systemet (Jensen et al. 2018).

kompressorstyringsstrategi. For hver kombination af kompressor og kompressorstyring vises effekten af at skifte kompressor og kompressorstyring alene i den første af søjlerne. De efterfølgende fire søjler viser elforbruget ved implementering af den valgte kompressor og kompressorstyring sammen med forbedringer på hhv. kondensator, fordampner eller kabinettet alene – eller alle tiltagene i kombination.

I øverste venstre hjørne i figur 9.15 ses resultaterne for den kompressor, TL5CN, som sidder i det eksisterende kølebord. Det ses, at de to største besparelspotentialer ligger i at forbedre kondensatoren og kabinettet. Det ses ydermere, at besparelspotentialet relateret til forbedringerne i kondensatoren stammer fra redueringen af blæseffekt og i mindre grad fra forbedringen af varmegennemgangstallet. Det ses, at målsætningen om et energiklasse A-kølebord kan opnås, hvis alle forbedringer implementeres med den aktuelle kompressor og ON-OFF-styring.

Ved at se på de andre kombinationer ses, at yderligere besparelser kan opnås ved at skifte til en anden kompressor. DLE48CN/RC og DLE4CN/RC er begge kompressorer til propan ligesom TL5CN, men med et mindre volumen og en forbedret effektivitet.



Figur 9.16: Minimums-, maksimums- og gennemsnitstemperatur for produkterne i kølebordet (Jensen et al. 2018).

Det ses, at den mindste af kompressorerne i RC-versionen giver det største besparelspotentiale. Derudover kan det observeres, at jo mindre kompressoren er, jo mindre besparelser opnås der ved at øge UA-værdien for fordampner og kondensator. Dette kan forklares ved, at ydelsen i fordampner og kondensator bliver mindre for en mindre kompressor, hvilket i sig selv øgede fordampningstemperaturen og reducerede kondenseringstemperaturen, således at der er mindre potentiale for, at en øget UA-værdi vil gøre det samme. Simuleringsresultaterne viser, at et kølebord i energiklasse A+ kan opnås, hvis alle forbedringerne implementeres sammen med kompressorerne DLE48CN/RC eller DLE4CN/RC.

I figur 9.16 ses, at alle forbedringerne påvirker produkttemperaturen. For ON-OFF-kompressorerne kan det generelt ses, at forbedringer på fordamper, kondensator og kabinet resulterer i en øget gennemsnitstemperatur for produkterne. Forbedringerne på kabinettet ses at have størst påvirkning, hvilket skyldes, at et forbedret kabinet – uden at ændre på kompressorstørrelse – resulterer i en mindre kølebelastning og dermed i overskydende kølekapacitet for kompressoren. Som konsekvens af dette vil kompressorens ON-tid reduceres og OFF-tiden forlænges, hvilket betyder, at produktet i gennemsnit er udsat for varmere luft med en forøget produkttemperatur til følge.

På figur 9.16 ses ydermere, at hvis kompressorens størrelse reduceres til en DLE4CN/RC, så falder produkttemperaturen lidt igen. Ikke desto mindre bør det forventes, at produkttemperaturen vil stige, hvis kabinettet forbedres som antaget i simuleringerne. Denne stigning kan modvirkes ved at ændre på setpunktstemperaturerne for termostaten.

Ud over de forskellige ON-OFF-kompressorer blev en frekvensreguleret propankompressor, DLV57CN, undersøgt, og resultaterne ses præsenteret i den anden række i figur 9.15. Kompressoren blev undersøgt med ON-OFF-styring, AEO-styring med tre forskellige ON-tids-setpunkter og til sidst som ren frekvensreguleret (VSD) kompressor. Det ses, at DLV57CN med ON-OFF har et resulterende elforbrug, der er sammenligneligt med DLE48CNRC. Det kan dog observeres, at en yderligere besparelse kan opnås ved at benytte AEO-styringen. Det ses, at jo længere tidsinterval, der er indstillet som ON-tids-setpunkt, jo lavere er elforbruget. Dette er den samme effekt, der kunne observeres, når ON-OFF-kompressorernes størrelse blev reduceret, idet et øget setpunkt for AEO ON-tid tvinger kompressoren til at køre med lavere hastighed og derved ligner en mindre kompressor. Dette kan også ses i figur 9.16, hvor det ses, at jo højere AEO ON-tids-setpunktet var, jo lavere er produkttemperaturerne, og jo højere var udsvingene i produkttemperaturen. Dette kunne blive kritisk for produkterne, hvis temperaturen bliver lavere end frysepunktet. Det ses, at dette sker, hvis AEO-setpunktet er fire timer, og hvis VSD-styringen benyttes. Ved at se på produkttemperaturerne for VSD-styringen med DLV57CN er det tydeligt, at en egentlig VSD-styring ikke kunne opnås, da denne styring burde resultere i minimums-, maksimums- og gennemsnitstemperaturer meget tæt på setpunktstemperaturen for VSD-styringen. Grunden til dette var, at DLV57CN var for stor til at kunne køre VSD ved de givne belastninger. Resultaterne svarer derfor til, at DLV57CN kører ON-OFF ved minimumshastigheden på 1000 RPM.

Den sidste kompressor, som blev undersøgt, var XV5KX-kompressoren. Denne kompressor er en VSD-isobutankompressor. Resultaterne for denne kompressor er struktureret tilsvarende DLV57CN-kompressoren. Det ses, at elforbruget ved ON-OFF-styring var reduceret i sammenligning med alle andre ON-OFF-kompressorer. Observeres produkttemperaturerne for denne kompressor, ses det, at temperaturer under frysepunktet optræder, selv når kabinettet ikke er forbedret. Dette indikerer, at kompressorens kølekapacitet er for lav til at benytte ON-OFF-styring. ON-OFF-styring resulterede i for lange ON-tider og dermed i, at produktet blev udsat for lave lufttemperaturer i længere tid. Dette bekræftes af, at elforbruget for AEO-styringen er højere end ON-OFF – dvs. den gennemsnitlige ON-tid var mere end fire timer. Det ses, at elforbruget kan reduceres yderligere ved at anvende VSD-styring. Ved at se på produkttemperaturerne ses, at kompressoren kørte frekvensreguleret i de tilfælde, hvor kabinettet ikke var forbedret. Det ses, at dette resulterer i minimums-, maksimums- og gennemsnitstemperaturer meget tæt på setpunktstemperaturen på 2 °C. Det ses, at hvis

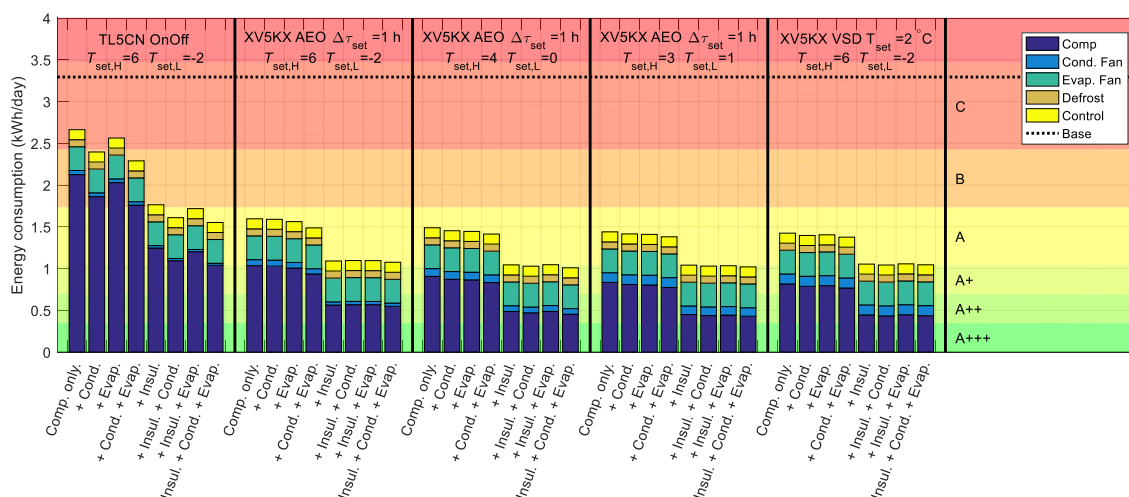
forbedringer i kabinettet medtages, var XV5KX også for stor til at køre efter VSD-styringen, så for at kunne køre egentligt VSD med et fuldt forbedret kølebord skulle der bruges en mindre kompressor.

Undersøgelse af setpunkter for maksimums- og minimumstemperaturer for XV5KX

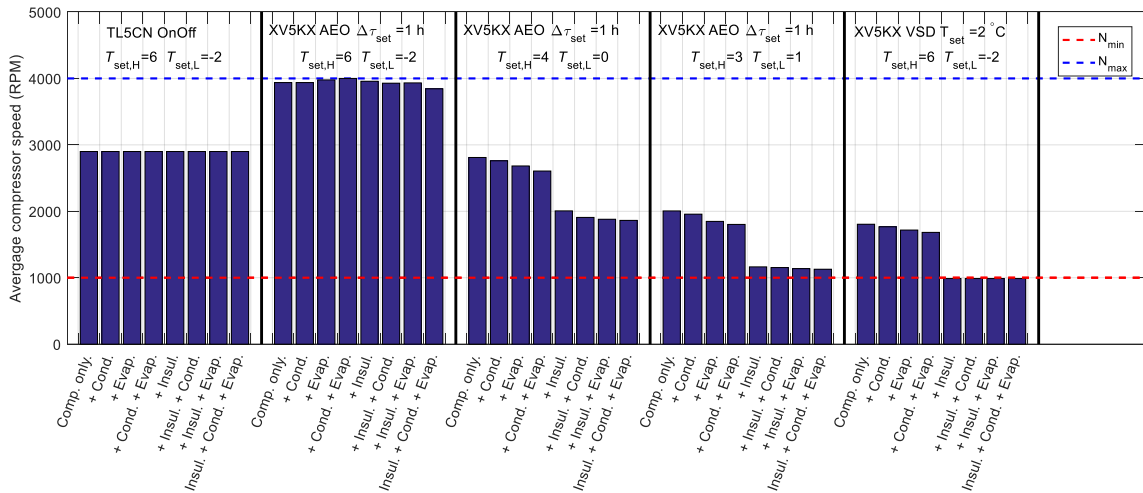
Figur 9.17-9.19 viser en undersøgelse af effekten af setpunkterne for minimums- og maksimumstemperaturerne på termostaten under AEO-styring med en ON-tid sat til 1 time. Resultaterne er vist sammen med den oprindelige kompressor TL5CN og XV5KX-kompressoren med VSD-styring.

I forhold til resultaterne ovenfor er alle resultaterne vist med en forbedret kondensatorblæser og blæserstyring. Derudover er der vist lidt flere kombinationer af forskellige forbedringer. I figur 9.17 vises det daglige elforbrug for tre forskellige kombinationer af minimums- og maksimumstemperaturer, hhv. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ samt $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, og det ses, at jo smallere båndet mellem minimums- og maksimumstemperatur er, jo tættere kommer elforbruget på elforbruget for kompressoren med VSD-styring. Ydermere ses det af figur 9.18, at jo mindre forskel der er mellem det høje og lave termostatsetpunkt, jo mindre udsving er der i produkttemperaturen, hvorved VSD-drift tilnærmelsesvis opnås ved at indsnævre båndet.

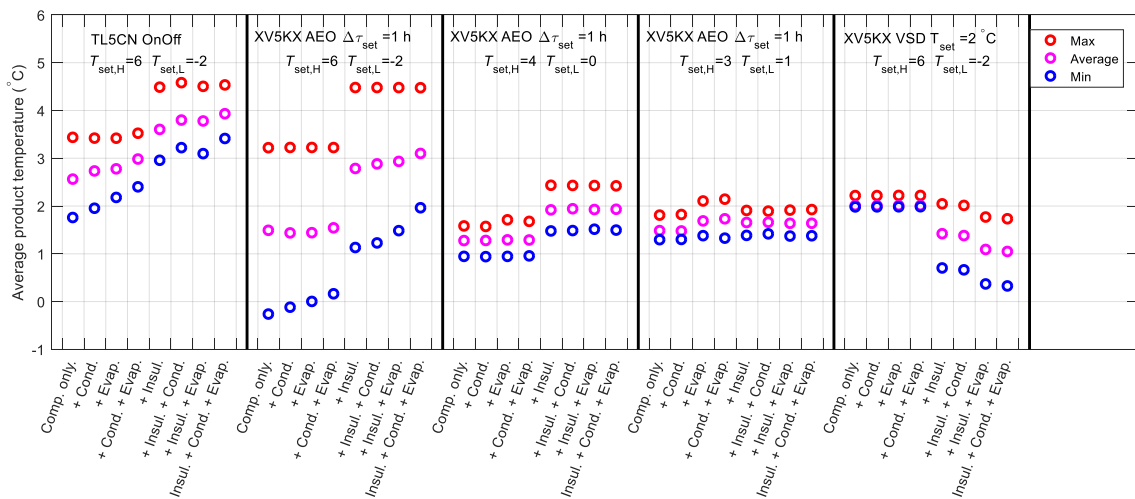
Figur 9.19 viser den gennemsnitlige kompressorhastighed, og her er det tydeligt, at XV5KX-kompressoren kører med minimumshastighed ved VSD-drift og et forbedret kabinet. For AEO-styringen kører kompressoren tæt på den maksimale hastighed, når temperaturintervallet sættes til $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ved mindre temperaturintervaller sænkes kompressorhastigheden.



Figur 9.17: Elforbrug for forskellige setpunkter for maksimums- og minimumstemperaturer under AEO-styring for XV5KX. Alle resultaterne er vist med forbedret kondensatorblæser og blæserstyring.



Figur 9.18: Produkttemperaturer for forskellige setpunkter for maksimums- og minimumstemperaturer under AEO-styring for XV5KX.



Figur 9.19: Gennemsnitlig kompressorhastighed for forskellige setpunkter for maksimums- og minimumstemperaturer under AEO-styring for XV5KX.

Opsummering af resultaterne for de dynamiske simuleringer

En række forskellige potentielle forbedringer og kompressorer samt kompressorstyringer er blevet undersøgt med en valideret termodynamisk model. Modellen viste god overensstemmelse med måledata – både for det totale energiforbrug og for driftstiden for kompressoren. Herefter blev syv forskellige kompressorer undersøgt med ON-OFF-, AEO- og VSD-styring.

Ydermere blev effekten af forbedringer i forhold til kabinet, fordamper og kondensator simuleret. Den største forbedring kunne opnås ved at forbedre kondensatoren. For kondensatoren blev den største forbedring opnået ved at reducere blæseeffekten. Ved at forbedre både kondensator, fordamper og kabinet blev den gennemsnitlige produkttemperatur øget. Ved at reducere kompressorstørrelsen kunne det daglige elforbrug sænkes, samtidig

med at den gennemsnitlige produkttemperatur blev sænket lidt. Det vurderes at være vigtigt at finde en god middelvej mellem kompressorstørrelse og forskellige setpunkter i forhold til styringen. At benytte AEO-styringen svarer til at reducere kompressorstørrelsen. Et setpunkt for længere ON-tid reducerer elforbruget og sænker produkttemperaturen, mens et smallere temperaturbånd for termostaten under AEO-styring får driften til at nærme sig resultaterne for VSD-styring.

Det anbefales at finde et kompromis imellem AEO ON-tids-setpunkt og termostatsetpunkter – f.eks. AEO-setpunktstid på 1 time og termostatsetpunkter 0 °C til 4 °C. Med dette vil man komme meget tæt på elforbruget med VSD-drift. Regulær VSD-drift af de undersøgte kompressorer var kun muligt for få af de undersøgte tilfælde. DLV57CN var for stor til at kunne køre VSD for alle undersøgte forbedringer, mens XV5KX kunne køre frekvensreguleret, hvis belastningen ikke var sænket grundet et forbedret kabinet. Alt i alt blev en del forskellige muligheder identificeret for at konstruere et kølebord i energiklasse A eller derover.

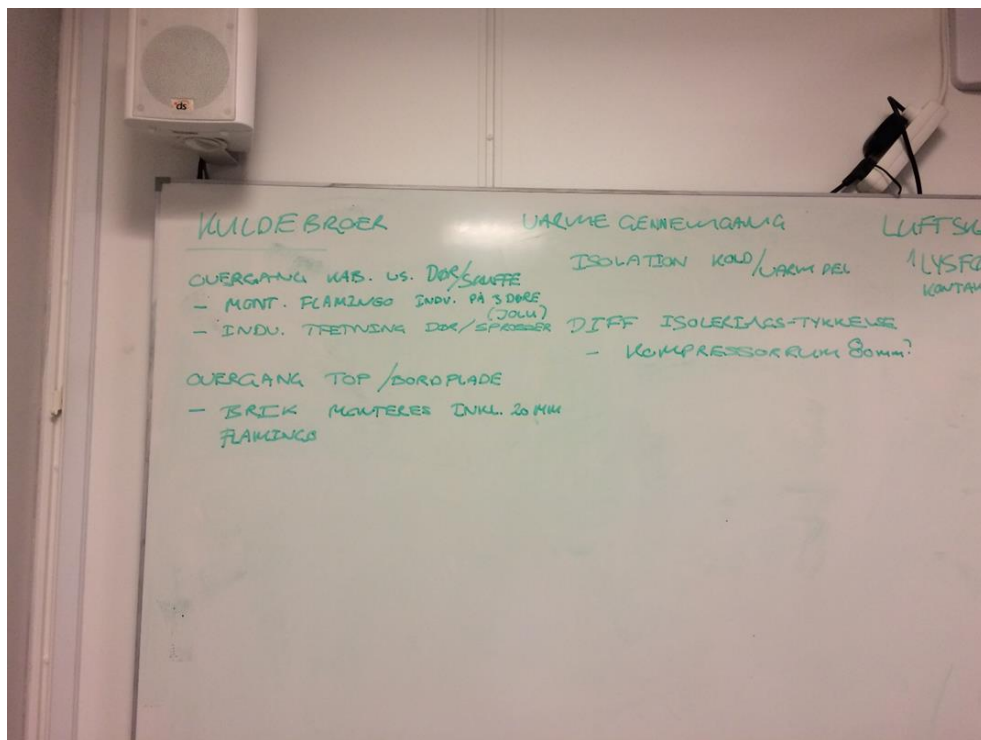
10. Koncept for nye prototyper

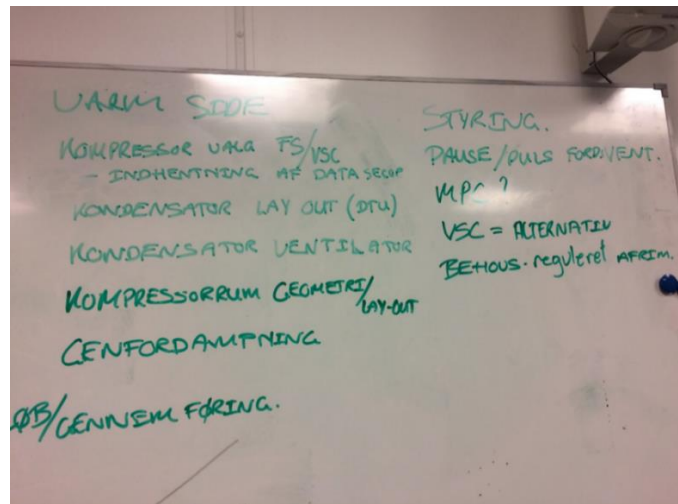
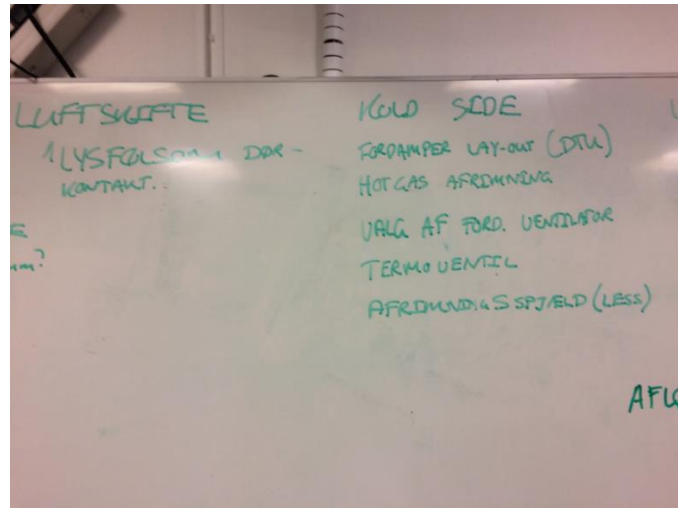
Teknikere hos Gram Commercial og Teknologisk Institut mødtes flere gange for at diskutere konceptet for prototyper. Dette skete samtidig med udviklingen af beregningsprogram (se kapitel 6) og analyser af beregningsresultater.

På et arbejds møde den 16. november 2016 blev følgende konkluderet:

- Den første prototype vil blive en mock-up-prototype fremstillet ud fra et standardkølebord. Der vil blive limet ekstra isolering på døre og kanter samt en ekstra tætningsliste.
- Herefter vil den blive testet i klimakammer hos Gram Commercial.
- Den vil blive fremstillet inden jul.
- Gram Commercial organiserer selv dette efter input fra Teknologisk Institut med nye beregninger.

Gram Commercial (Flemming) skrev resultatet fra en lille brainstorm ned på "white board". Resultatet af dette kan ses på fotos nedenunder. Der er tale om både ideer og ting, som vi skulle huske på. Dette var til videre bearbejdning hos Gram Commercial og i projektgruppen.





Figur 10.1: Resultater fra brainstorm.

Som det fremgår af ovenstående tre fotos var der mange gode forslag til, hvilke tiltag der kunne udfordres i forbindelse med udviklingen af de nye køleborde.

På projektmøde den 30. januar 2017 blev der holdt denne status fra Gram Commercial:

- Der har været stor aktivitet hos Gram Commercial. Sune fremviste præsentation.
- Gram Commercial har fremstillet og testet en række mock-up-prototyper, hvor der er limet ekstra isolering på kabinettet på udvalgte steder.
- Med en ekstra liste på døren (og en lukket luftspalte) er der sparet 2,8 % i energiforbrug. Det er lidt mindre end beregnet.
- Med en fuldisoleret bordplade ("brik", som svarer til 50 mm PU-isolering opblæst med cyclopentan) er der sparet 5,7 %.
- Med montage af ekstra isoleringsskum (som svarer til 70 mm PU-isolering, opblæst med cyclopentan) plus lidt ekstra mellem kompressorrum og kølebord er der sparet 17,4 %, som er lidt mere end beregnet.
- Der er foretaget en test med dørkontakter, som stopper kølesystemet og de indre ventilatorer ved døråbning. Dette gav overraskende 2 % mere energiforbrug. Dette kan måske forklares ved, at det medfører stop af kompressor og en hurtig genstart af

kølesystemet kort efter døråbningen – og dermed genererer et ekstra tab i kølesystemet.

Desuden fremførte EBM Papst følgende:

- Der er et stort besparelspotentiale for den udvendige ventilator. Henrik havde medbragt en ny motor, som vil nedbringe ventilatorens effektforbrug fra 27 W til 7,5 W. Hvis der gøres brug af en alternativ ventilator med både alternativ motor og propelblade, kan der opnås en yderligere besparelse.
- Henrik opfordrede til at nedbringe tryktabet ved luftens passage i kompressorrummet. Der er f.eks. ingen grund til, at der er et luftfilter ved afgang fra kompressorrummet. Måske kan man endda undvære det ved indsugningen, hvis der benyttes en anden type kondensator.

Efterfølgende arbejdede Gram Commercial sammen med deres kondensatorleverandør om at udforme en ny type kondensator, som skulle være vedligeholdelsesfri og ikke samle støv. Dette arbejde løb dog ud i sandet, da leverandøren ikke kunne levere noget, som kom til at virke i praksis.

På et teknisk møde den 10. maj diskuteredes isoleringstykkelser på de kommende prototyper/0-serie køleborde:

- Der var diskussion om de ydre parametre på kølebordet. Denne diskussion lå stadig mest internt hos Gram Commercial. Dog ligger det nogenlunde fast, at isoleringstykkelsen skal stige til 60 mm (nu 50 mm) og nogle steder måske til 70 mm.

På et teknisk møde den 6. september 2017 blev følgende noteret:

- Gram Commercial er næsten færdig med at lave konstruktionstegninger til et helt nyt kabinet med meget mindre kuldebroer. Der er mange hensyn at tage undervejs – f.eks. at både døre og skuffer kan monteres og åbnes uden komplikationer. Der skal endvidere tages hensyn til de ydre mål, således at kølebordene kan indpasses i storkøkkener. Tegningerne skal være endeligt færdige meget snart, således at der kan igangsættes arbejde med at fremstille forme, som kan benyttes i forbindelse med opskumning af de nye kabinetter.
- Trefags kølebordet bliver ca. 1800 mm i længden udvendigt.
- Gram Commercial har modtaget nye ventilatorer/ventilatormotorer fra EBM Papst.
- Kompressorer: SECOP har stillet flere muligheder i udsigt: Gram Commercial vil først teste med fix-speed-kompressoren DLE4.

Herefter var der tæt kontakt mellem konstruktørerne fra Gram Commercial og Teknologisk Instituts ekspert på beregninger – især med det formål at skabe nye konstruktioner med mindre kuldebroer. Da de overordnede konstruktionstegninger var færdige, og dimensionerne var fastlagte, begyndte arbejdet med at fremstille støtteforme til opskumning af isoleringsskum. Herefter begyndte arbejdet med at fremstille de nye kabinetter af køleborde til test.

11. Bygning og test af prototyper

På et teknisk møde den 23. maj 2018 blev følgende konstateret:

- Gram Commercial har bygget den første prototype, som nu er klar til test i klimakammer.
- Gram Commercial er ved at bygge yderligere 10 køleborde til fieldtest.



Figur 11.1: Første prototype klar til test.



Figur 11.2: Bygning af køleborde til fieldtest.

- Det første bord er udstyret med døre med huller til termoelementer. Det vil nu blive testet i klimakammer hos Gram Commercial. Herefter vil det blive sendt til Teknologisk Institut, som vil teste det i klimakammer.

De 10 køleborde til fieldtest blev færdige ret snart, og projektgruppen kunne begynde at placere instrumenter. Teknologisk Institut står for instrumenter, og de blev monteret på fabrikken i Vojens før udplacering af de 10 + 5 køleborde.

Test af prototype

Prototypen med det nye kabinet blev leveret til Teknologisk Institut i juli 2018 og testet samme måned. Testen foregik på samme måde, ved samme tilstande og med samme døråbningsrobot, som blev benyttet for referencekølebordet.

Nettovolumen blev målt til 306 liter, og det er lidt større end for referencebordet (290 liter).

Energiforbruget blev målt til 1,407 kWh/døgn, hvilket er 58,1 % mindre end referencebordet (3,358 kWh/døgn).

Energieffektivitetsindex blev bestemt til at være: $EEI = 20,0 \%$, hvilket er energiklasse A.

Varmeste målepakke: $4,97 \text{ }^\circ\text{C}$.

Koldeste pakke: $3,26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dette er meget tilfredsstillende, og målsætningen for projektet er opfyldt med dette testresultat. Gram Commercial har i eget laboratorium målt tilsvarende værdier.



Figur 11.3: Foto af prototype på Teknologisk Institut inden montage af døråbningsrobotter.



Figur 11.4: Foto af prototype med dørene åbne. Man kan se testpakker og målepakker.

Man kan fra testresultaterne se, at temperaturen er blevet mere jævn i hele kølebordet. I standardkølebordet er differencen mellem varmeste og koldeste testpakke på 2,4 °K, og dette er reduceret til 1,71 °K. Dette er også tilfredsstillende.

Hele testrapporten kan læses i testrapporten: "300-KLAB-18-146" (Teknologisk Institut, den 1. august 2018), som er bilag til denne slutrapport.

Hermed besluttede Gram Commercial og Teknologisk Institut at gå videre med planlægning og gennemførelse af fieldtesten.

12. Fieldtest

Formålet med denne fieldtest har været at eftervise resultaterne fra laboratoriet samt at undersøge forbrugeradfærd og dennes indvirkning på temperatur og energiforbrug. Fieldtesten har forløbet siden juli 2018, hvor der i den sidste periode var i alt 13 borde – 8 var den nye generation af testborde, og 5 var referenceborde. Nedenstående billeder viser udsigten fra Dansk Byggeri, Årøsund Badehotel, Bar Plata og Henne Mølle Å Badehotel. Samtlige notater fra fieldtesten kan læses i bilag.



Figur 12.1: Udsigten fra Dansk Byggeri.



Figur 12.2: Årøsund Badehotel.



Figur 12.3: Bar Plata.



Figur 12.4: Henne Mølle Å Badehotel.

På figur 12.5 og figur 12.6 ses bordene fra Dansac & Hollister og Bar Plata.



Figur 12.5: Dansac og Hollister – kantinekøkken.



Figur 12.6: Bar Plata – køkken.

Tabel 12.1 viser bordenes placering, type, antal og modeltype. To placeringer har haft mere end et bord i test – det er Årøsund og Alchemist – og derudover har bordene været placeret på meget forskellige typer af restauranter og kantiner, hvilket også har været afspejlet i forbruget. I en fieldtest vil der altid forekomme variationer i målingerne grundet de forskelle, der er i bordenes anvendelsesgrad, omgivelsestemperatur, varefyldning m.m. Dette medfører visse usikkerheder omkring, hvad der er et retvisende billede af kølebordenes forbrug. Dertil bør det bemærkes, at referencebordene hovedsageligt er kantiner, og at testbordene hovedsageligt har været anvendt på restauranter.

Placering af kølebord	Type	Antal	Modeltype
Årøsund Badehotel	Restaurant	2	Test
Dansac & Hollister	Kantine	1	Test
Bar Plata	Restaurant	1	Test
Aagaard Kro	Restaurant	1	Test
Henne Mølle Å Badehotel	Restaurant	1	Test
Alchemist	Restaurant	2	Test
Århus Arkitektskole	Kantine	1	Reference
Hahnemanns Køkken	Spisested	1	Reference
Nærheden	Kantine	1	Reference
Biogen	Kantine	1	Reference
Dansk Byggeri	Kantine	1	Reference

Tabel 12.1: Kølebordenes placering, type, antal og modeltype.

Logningsudstyr

Til denne fieldtest har der været anvendt to typer af logningsudstyr. Hvert kølebord er udstyret med en ”måleboks” og to temperaturlogger. Disse har logget følgende parametre for testbordene (det var ikke muligt at logge døråbning og dennes tid på referencebordene).

- Energiforbrug.
- Antal timer, kompressoren har været i drift.
- Antal gange, kompressoren er startet.
- Antal timer, en eller flere døre i kølebordet har stået åben.
- Antal gange, en af dørene er blevet åbnet.
- Temperaturen i kompressorhuset.
- Temperaturen i kølebordet.

På figur 12.7 og figur 12.8 kan man se billeder af målekassen og en temperaturlogger. Målekassen er ca. 20x16x9 cm og har i videst muligt omfang været placeret højt, tørt og uden at være i vejen. Temperaturloggerne er ca. 10 cm med en diameter på 2 cm og har været placeret i kompressorhuset og på indersiden af en af dørstolperne. En mere detaljeret beskrivelse af udstyret og montering kan læses i bilag (Måleudstyr).



Figur 12.7: Målekasse, Energi, kompressor drift og døråbninger.



Figur 12.8: Lascar temperature logger.

Målinger

Tabel 12.2 herunder viser samtlige af de 22 aflæsninger, der har været foretaget i fieldtesten. Foruden placering, aflæsningsnummer og type kan fem parametre aflæses. Kaster man et blik ned over tabellen, kan man se, at der er en vis variation bordene imellem, og at især referencebordene lader til at bruge mere energi. Den efterfølgende tabel 12.3 viser min.-/maks.-målingerne for hele fieldtesten. Kompressorerne er i drift imellem 16 og 23 % af tiden med 30-60 start/døgn. Dørene bliver åbnet imellem 15 og 90 gange i døgnet med en resulterende samlet åbningstid, der er fra 3 til +10 minutter.

Placering	Afl. Nr	Type	Komp [t]	Komp [-]	Dør [m]	Dør [-]	Energi [kwh]
Alchemist bord2	1	Test	4,54	58,93	3,64	29,41	0,93
Alchemist bord2	1	Test	4,01	56,34	5,14	35,15	1,01
Bar Plata	1	Test	3,93	32,59	3,02	14,45	0,93
Dansac	1	Test	3,91	35,29	4,24	21,65	0,93
Dansac	2	Test	4,00	41,79	3,25	20,60	0,94
Dansac	3	Test	4,04	43,74	3,45	27,93	0,95
Dansac	4	Test	4,05	43,79	3,41	21,32	0,96
Henne Mølle Å Badehotel	1	Test	4,60	37,97	10,27	46,02	1,08
Aagaard Kro	1	Test	3,85	33,63	7,89	53,51	0,95
Årøsund bord1	1	Test	5,57	52,68	9,91	90,51	0,38
Årøsund bord1	2	Test	5,50	51,59	9,42	78,06	1,09
Årøsund bord1	3	Test	5,17	49,95	8,86	71,57	1,07
Årøsund bord1	4	Test	5,03	48,52	8,68	69,46	1,05
Årøsund bord1	5	Test	4,04	42,32	6,08	49,86	0,91
Årøsund bord1	6	Test	3,92	42,07	6,22	50,27	0,90
Årøsund bord1	7	Test	3,99	42,02	6,51	82,18	0,92
Årøsund bord2	1	Test	4,97	41,29	8,38	60,52	1,10
Årøsund bord2	2	Test	4,81	37,21	7,55	51,47	1,07
Årøsund bord2	3	Test	4,89	36,40	7,91	50,39	1,07
Årøsund bord2	4	Test	3,98	30,33	5,31	35,25	0,91
Årøsund bord2	5	Test	4,13	31,17	5,74	40,63	0,94
Årøsund bord2	6	Test	4,31	31,34	6,12	42,15	0,97
Arkitektskolen Århus	1	Ref	-	-	-	-	1,35
Arkitektskolen Århus	2	Ref	-	-	-	-	1,42
Biogen Hillerød	1	Ref	-	-	-	-	2,07
Biogen Hillerød	2	Ref	-	-	-	-	2,09
Dansk Byggeri	1	Ref	-	-	-	-	1,86
Dansk Byggeri	2	Ref	-	-	-	-	1,89
Dansk Byggeri	3	Ref	-	-	-	-	1,91
Grenå Aktivitetscenter	1	Ref	-	-	-	-	3,38
Grenå Aktivitetscenter	2	Ref	-	-	-	-	2,20
Hahnemann	1	Ref	-	-	-	-	2,29
Hahnemann	2	Ref	-	-	-	-	2,18
Hahnemann	3	Ref	-	-	-	-	2,17

Tabel 12.2: Energiforbrug som funktion af døråbningstiden.

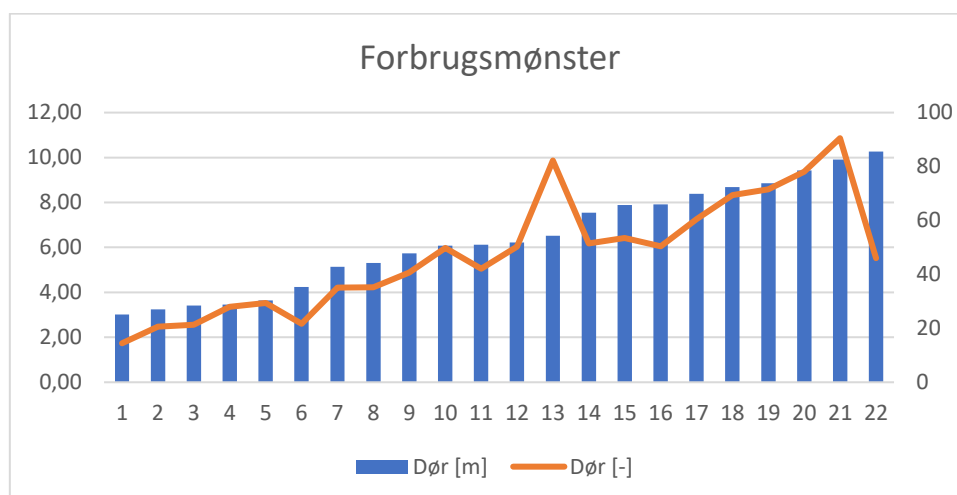
	Komp [t]	Komp [-]	Dør [m]	Dør [-]	Energi [kwh]
Min.	3,85	30,33	3,02	14,45	0,38
Maks.	5,57	58,93	10,27	90,51	1,10

Tabel 12.3: Maks.- og min.-værdier for hele måleperioden.

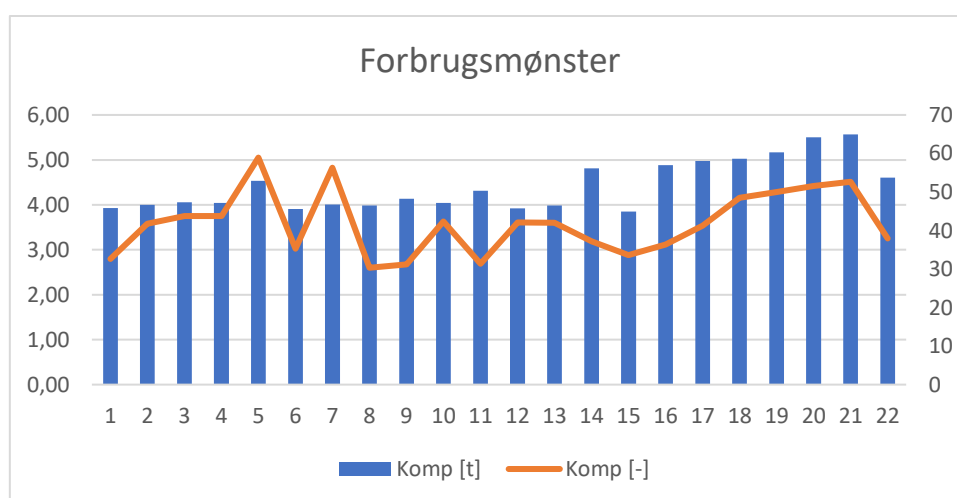
Forbrugeradfærd og energiforbrug

Forbrugeradfærd vil uundgåeligt have en indvirkning på energiforbruget, og derfor er det relevant at undersøge indvirkningen af det varierende forbrug.

I grafen forneden kan man se den akkumulerede døråbningstid og antallet af døråbninger for de 22 observationer. Det er tydeligt, at der er en rimelig korrelation imellem de to parametre, hvilket indikerer, at de gennemsnitlige døråbninger i et vist omfang er ens. Undersøger man derimod de korresponderende observationer, antallet af kompressorstart og timer i drift (efterfølgende graf), er tendensen mindre tydelig. Der er dog en svag resulterende stigning i den samlede driftstid af kompressoren. Antallet af kompressorstart er derimod tættere korreleret med antallet af døråbninger. Forklaringen ligger i, at kompressoren startes, når temperaturen overskrider setpunktet, men kompressorens driftstid afhænger derimod af den termiske belastning, som følger varigheden. Det vil formentlig heller ikke være utænkeligt, at der under længere døråbninger også sker større udskiftning/tilførsel af varer, hvilket øger belastningen yderligere. Korrelationen imellem de målte parametre kan findes i bilagene for fieldtest-notaterne.

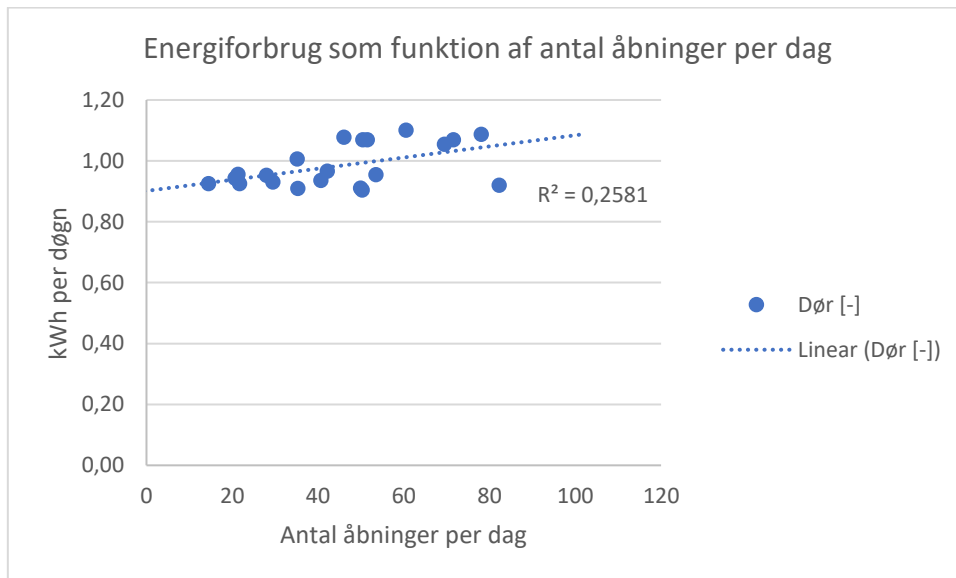


Figur 12.9: Antal døråbninger og den akkumulerede døråbningstid.

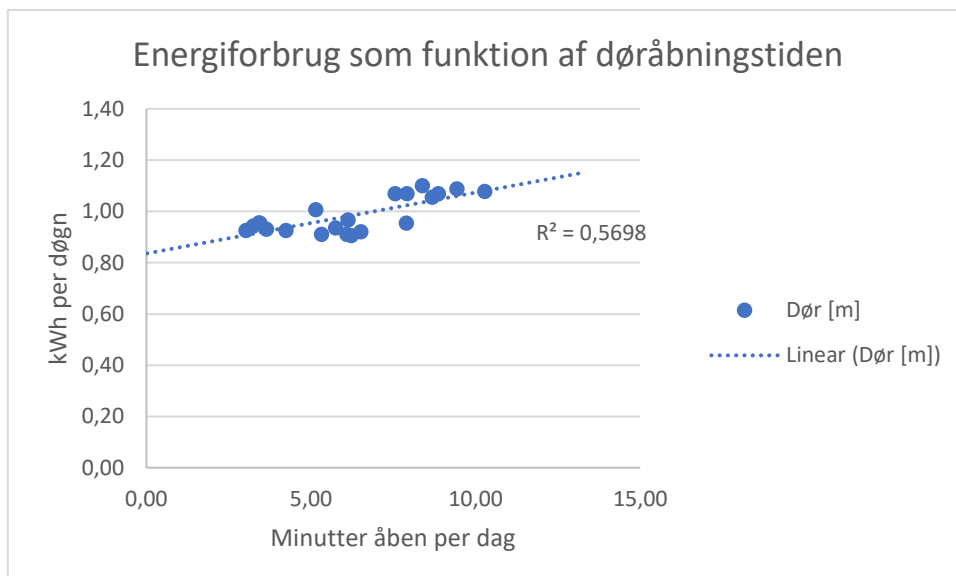


Figur 12.10: Antal kompressorstart og driftstiden.

På de to nedenstående grafer i figur 12.11 og figur 12.12 kan man se energiforbruget som funktion af antallet af døråbninger samt den samlede døråbningsvarighed. Dertil er der plottet trendlinjer og den kvadrerede korrelationsfaktor R^2 . Graferne viser, at der er næsten 26 % sammenhæng imellem antallet af døråbninger og energiforbruget, men derimod er der ca. 57 % korrelation imellem den samlede døråbningstid og det daglige energiforbrug. Det vil sige, at over halvdelen af den variation i energiforbruget, vi ser på testmøblerne, kan forklares med variationer i døråbningstider.

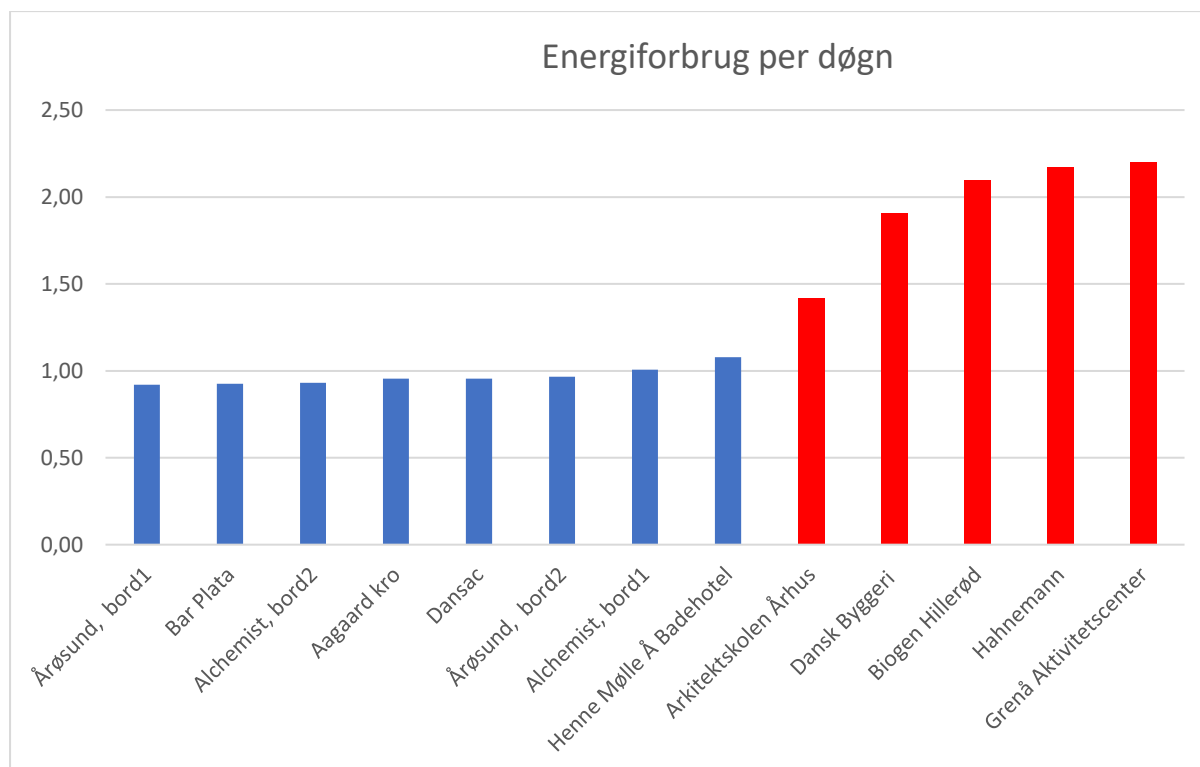


Figur 12.11: Energiforbrug som funktion af antal døråbninger.



Figur 12.12: Energiforbrug som funktion af døråbningstiden.

På figur 12.13 kan det gennemsnitlige energiforbrug for samtlige borde ses for hele fieldtestperioden. Det er tydeligt, at samtlige testborde forbruger mindre end referencemodellerne. Ydermere er disse referenceborde placeret i kantiner, der forventeligt vil have en mindre belastning sammenlignet med restauranterne, der både serverer morgenmad, frokost og aftensmad.



Figur 12.13: Energiforbrug per døgn for hele testperioden.

I tabel 12.4 er det gennemsnitlige energiforbrug for test- og referencebordene vist samt den relative forskel imellem de to grupper. Fieldtesten viser, at det gennemsnitlige energiforbrug for testbordene er 0,96 kWh per døgn, hvorimod referencebordene bruger 2,07 kWh. Dette er en reduktion på 53,7 %, hvilket er lig målingerne i laboratoriet.

Test [kWh/døgn]	Reference [kWh/døgn]	Rel. Forskel [%]
0,96	2,07	53,7%

Tabel 12.4: Gennemsnitlige energiforbrug for test- og referenceborde.

Temperaturmålinger

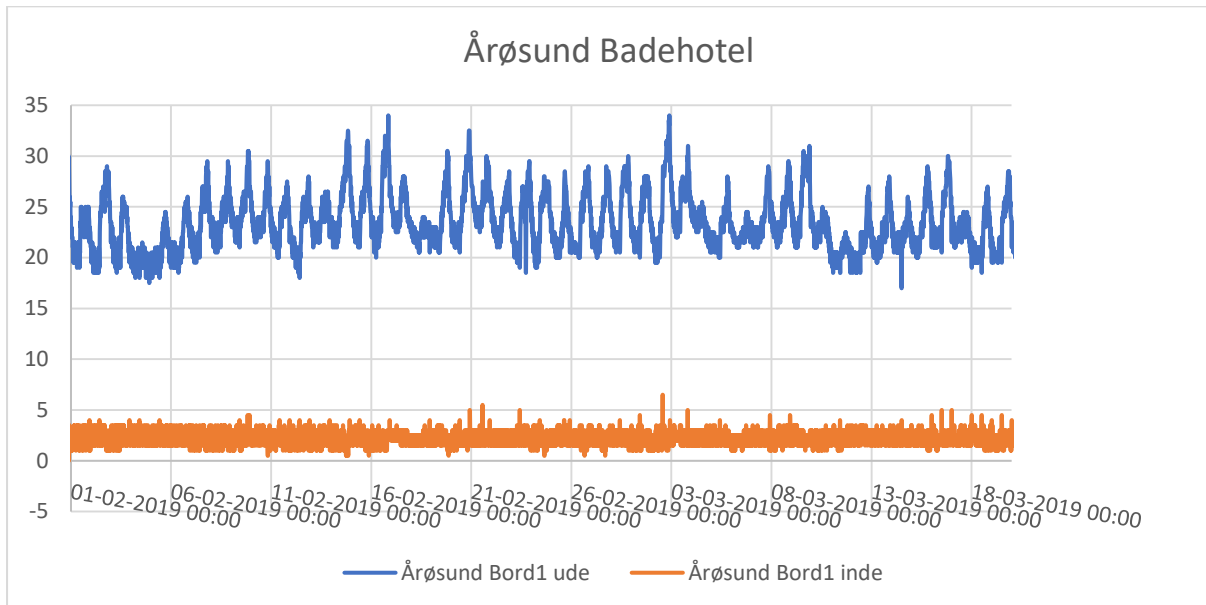
I denne fieldtest er der målt to temperaturer for hvert bord – den indre temperatur omkring varmeste punkt samt temperaturen i kompressorrummet tæt ved kondensatoren. Den indre temperatur vil give indblik i, hvorvidt kølebordene kan opretholde setpunkt og dermed sikre, at fødevarerne har den rette temperatur. Omgivelsestemperaturen påvirker energiforbruget, da jo højere temperaturforskel et kølemøbel skal operere under, desto mere energi vil det bruge.

Tabel 12.5 viser den gennemsnitlige temperatur for hele måleperioden eksklusive perioder, hvor bordet ikke har været i drift. Måleperioden har vist, at kølebordene holder en gennemsnitstemperatur tæt på deres setpunkt, hvilket vel og mærke er i det varmeste punkt. Der er nogle af referencebordene, hvis gennemsnit er over de 5 °C, som er det maksimalt tilladelige. Fælles for disse borde er, at de har et setpunkt på 5 °C, hvilket er en anelse højt. Det skal pointeres, at af hensyn til brugernes mulighed for at anvende bordet, har der været målt på en dørstolpe, hvor der ikke forekommer fødevarer, og derfor vil temperaturen være lidt lavere på hylderne. Den omkringliggende temperatur varierer fra 25-31 grader, om end lufttemperaturen hen over kondensoren er lavere, da varmen fra kompressoren også influerer den målte temperatur. Overordnet set holder kølebordene temperaturen hele vejen igennem med meget få og kortvarige overskridelser, som skyldes brugeradfærd.

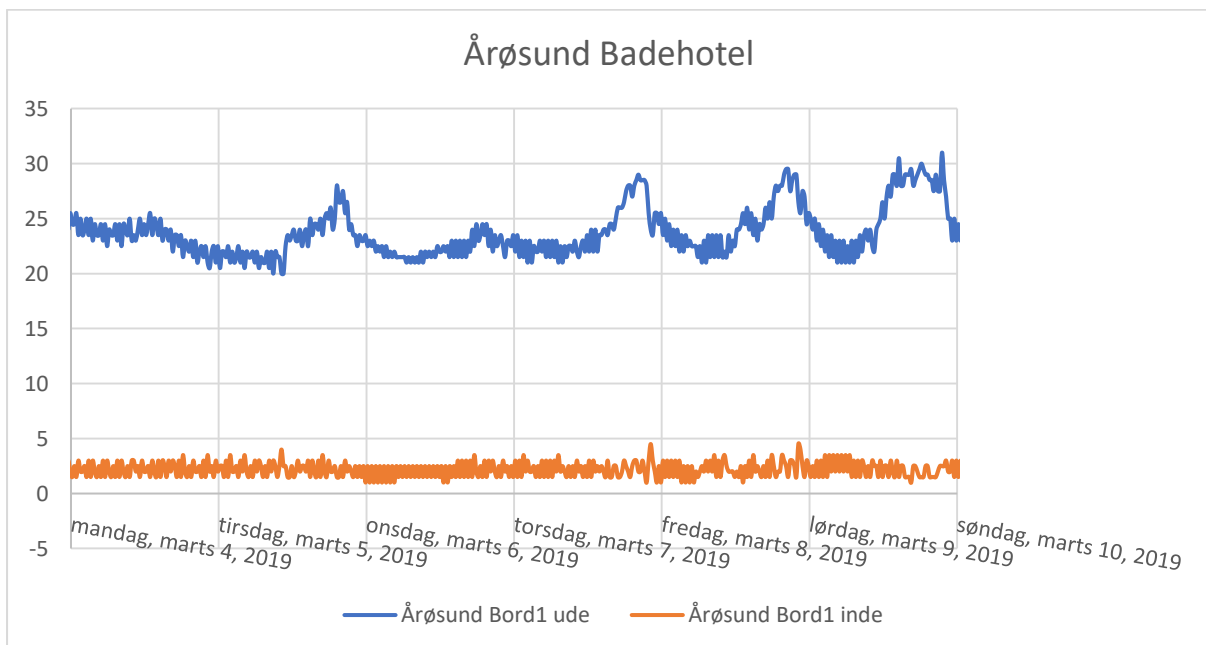
Sted	Inde [C]	Ude [C]	dT
Årø Sund Bord1	2,2	26,3	24,1
Årø Sund Bord2	2,7	26,5	23,9
Alchemist Bord1	1,7	25,5	23,8
Alchemist Bord2	2,4	25,4	23,0
Biogen	4,0	30,3	26,3
Dansac	2,2	28,5	26,3
Dansk Byggeri	5,6	30,3	24,6
Grenå Nærheden	6,0	28,6	22,6
Hahnemanns Køkken	4,6	31,2	26,6
Henne Mølle Å Badehotel	2,7	28,7	26,0
Aagaard Kro	4,2	25,8	21,6
Århus Arkitektskole	5,6	25,3	19,7

Tabel 12.5: Gennemsnitstemperatur inde, ude og temperaturforskellen.

Figur 12.14 viser temperaturerne fra Årø Sund Badehotel bord 1 – både inde og ude. Kondenseringstemperaturen varierer +10 grader på nogle tidspunkter, hvilket skyldes den øgede aktivitet i køkkenet og dermed også kompressoraktiviteten. Dette bliver tydeligere, når man ser den efterfølgende graf i figur 12.15, hvor en enkelt uge er afbilledet. Til trods for den øgede belastning af køleanlægget er der meget få målinger over 5 °C, og disse korresponderer med øget kompressoraktivitet. Det lader derfor til, at brugerne har belastet møblet i særlig grad med lange døråbningsperioder.



Figur 12.14: Temperaturforløb for bord1 Årø Sund hele testperioden.



Figur 12.15: Energiforbrug per døgn for en uge i marts.

Opsummering

I en fieldtest vil der altid forekomme variationer imellem stort set identiske testemner, da omgivelserne og forbrugernes interaktioner med emner vil variere. En stor del af variationerne har kunnet forklares alene ud fra forbruget, forskelle i setpunkt og omgivelsestemperatur.

Kølebordene driftede forholdsvis ens med en driftsprocent på 17-23 % med 30-60 kompressorstart i døgnet, hvilket i nogen grad kunne forklares ud fra forbrugsmønsteret.

Fieldtesten har vist en energibesparelse meget lig de akkrediterede test i laboratoriet. Dermed må det konkluderes, at selv med varierende brugeradfærd har testbordene opnået en reduktion af elforbruget på 53,7 % sammenlignet med referencemodellen.

Kølebordene formår med få undtagelser at holde en temperatur under 5 °C, og de få undtagelser skyldes ekstraordinær belastning. Enkelte referenceborde havde et setpunkt på 5 °C og havde derfor en gennemsnitstemperatur over 5 °C på det varmeste punkt.

Alt i alt har denne fieldtest vist, at testbordene er driftssikre, temperaturstabile og energibesparende.

Antropologisk analyse af brugeroplevelsen

Udvikling og senere udbredelse af et nyt produkt kræver et indgående kendskab til den relevante målgruppe – herunder hvilke muligheder og barrierer der er til stede. Som en del af projektet er der derfor foretaget en antropologisk analyse af brugeroplevelsen ved det nye kølebord.

Gennem en række interview med kokke, der i projektperioden har anvendt kølebordet, afdækkes praktiske erfaringer og brugeroplevelsen. Resultatet er et overblik over, hvordan teknologien benyttes og opleves i forskellige køkkener.

Projektets anvendelse af kvalitative metoder

I den antropologiske del af projektet anvendes kvalitative metoder som grundlag for dataindsamling og analyse. Hvor kvantitative metoder baserer sig på tal, tager kvalitative metoder udgangspunkt i menneskers adfærd og erfaringer. Kvalitative data indhentes derfor via interview, observation og dokumenter. Den kvalitative undersøgelse er blevet udført af Teknologisk Instituts energiantropolog, som er specialiseret i energiadfærd og menneskers brug af teknologi.

I projektet er der foretaget interview og indhentet observationer i fire forskellige køkkener på henholdsvis to badehoteller, en kro og en restaurant/bar. Disse er udvalgt efter geografisk placering samt typen af restauration for at sikre en bredere analyse med variation inden for begge kategorier. Besøgene er desuden aflagt på forskellige tidspunkter på dagen for at afdække, hvordan adfærdsmønstre varierer, alt efter om der forberedes eller køres service.

Alle interview blev foretaget ved placeringer af den nye type kølebord, og de er foretaget med køkkenchefen som primær informant, men involverede også andet køkkenpersonale. Hvert interview havde en varighed af ca. 1 time og suppleredes med observationer af op til 2,5 times varighed. Interview og observationer blev dokumenteret med feltnoter og billeder. Besøgene blev aflagt 18.06.2019 og 19.06.2019.

Hele rapporten fra undersøgelsen findes i bilag. Her er nogle udpluk:



Figur 12.16: Placering af det nye kølebord i professionelt køkken.

Det er i ovenfor beskrevne kontekst, at et nyt produkt skal give mening og skabe værdi for brugeren. Alle interviewede har i projektperioden anvendt det nye produkt fra Gram og har samtidig tidligere erfaring med andre mærker og modeller.

Generelt udtrykkes der stor tilfredshed med kølebordet, der opleves som funktionelt og anvendeligt. Flere emner går igen på tværs af de forskellige interview:

Gram som brand

Gram opfattes som et troværdigt brand med produkter af høj kvalitet. Der er en forventning om funktionalitet og holdbarhed. Selvom der findes billigere alternativer på markedet, betragter de interviewede det som en fornuftig investering at indkøbe produkter fra Gram.

Skuffer vs. låge

De udleverede køleborde er alle med låger, hvilket giver anledning til en diskussion af fordele og ulemper ved disse frem for skuffer. De fleste udtrykker begejstring for løsningen med låger. Rengøringen er betydeligt lettere, da skufferne kan være svære at få ud, der kan falde råvarer ned bagved, og listerne kan være udfordrende. Lågen giver desuden mulighed for at sætte hele bakker ind. Præference varierer dog fra kok til kok og kan også afhænge af typen af anretninger.



Figur 12.17: Til venstre ses detalje af et kølebord med skuffer. Til højre ses detalje af det nye kølebord med dør.

Magnetisk bordplade

At bordpladen på det nye kølebord er magnetisk, blev fremhævet positivt. Stopure, som anvendes under service, bliver dermed liggende og bliver ikke ved en fejl flyttet eller skubbet på gulvet, når der arbejdes.



Figur 12.18: Magnetisk bordplade.

Konklusion af undersøgelsen

Kølebordet tilfører værdi for brugerne i en kontekst, der kræver struktur, effektivitet og overblik. Produktet er på nuværende stadie tilfredsstillende, men der er mulighed for videreudvikling – eksempelvis med differentiering af temperaturen. Det vurderes at være en fordel at tilbyde visse valgmuligheder vedrørende skuffer, låger eller en kombination. Energibesparelse taler ind i en diskurs af bæredygtighed og fornuftig økonomi, som er udbredt i restaurationsbranchen. Det økonomiske perspektiv varierer i relevans og kan være særligt relevant, jo tættere relationen er til ejeren. Et nyt og energieffektivt kølebord vil derfor med fordel kunne målrettes denne målgruppe.

13. Formidling af resultater

Projektets resultater er blevet beskrevet i to papers, som blev præsenteret på ”13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Valencia, Spain, 2018”. De to papers er gengivet i appendiks A og B i slutrapporten.

Der er skrevet en artikel: ”professionelle kølemøbler til storkøkkener”, som er udsendt i november. Den er trykt i Alt om Teknik:

<http://woview.infomedia.dk/?url=https://www.altomteknik.dk/nyheder/2018/11/21/professionelle-koelemoebler-til-storkoekkener-maalrettede-satsninger-paa-energieffektivitet-betaler-sig/&OpointData=c156cf850b82655a92e090d4fe69cb01JmlkX3NpdGU9MTAzODE1JmlkX2FydGljbGU9OTM3NiZpZF91c2VyPTI4NDAmawRfYXBwbGljYXRpb249MTAwMDM1OSZsYW5nPWVU>

Den er endvidere trykt i papirudgave i tidsskriftet ”Plus Proces”, januar 2019.

Artiklen handler om, at det godt kan betale sig at være godt forberedt, når der indføres EU-Ecodesign- og energimærkningsordninger. Man kan forberede sig ved at have udviklet energieffektive produkter – herunder professionelle køleborde.

Endelig har projektets parter med DTU MEK og Teknologisk institut i spidsen planlagt at beskrive alle projektets resultater i en artikel til International Journal of Refrigeration.

14. Anvendelse af projektets resultater

Gram Commercial er gået i gang med at klargøre det nye kølebord til produktion og markedsføring. På det afsluttende projektmøde i juni 2019 fremlagde Gram Commercial en plan for dette. Ifølge denne plan vil produkterne kunne markedsføres på et tidspunkt i 2020.

Den nye kompressor DLE4CN bliver allerede markedsført af SECOP.

15. Sammendrag og konklusion

Nærværende projekt – Fremtidens køleborde – har fået økonomisk støtte fra EUDP, og der er udviklet og testet et nyt kølebord, som forbruger mindre end halvdelen af den energi, som det eksisterende kølebord forbruger.

Projektet er udført af Gram Commercial, SECOP, EBM Papst, DTU MEK og Teknologisk Institut som projektleder.

Det eksisterende kølebord – Gram Gastro K1807 CSG A med tre døre – er det mest solgte kølebord i Danmark. Dette kølebord forbruger 3,358 kWh/døgn, har et nettovolumen på 290 liter, et energieffektivitetsindeks på 48,43 % og ligger i energiklasse C (tæt på energiklasse D). Test er foregået i kalibreret klimakammer på Teknologisk Institut, og teststandarden er EN16825.

Det nye kølebord – Model Gram Gastro K1807 FT med tre døre – forbruger 1,407 kWh/døgn, har et nettovolumen på 306 liter og et energieffektivitetsindeks på 20,0 %, hvilket er energiklasse A.

Denne signifikante energibesparelse på 58,7 % er opnået ved, at alle projektpartnere har bidraget med hver deres speciale i konstruktionsteknik, opstilling af beregningsmodeller og analyser af simuleringresultater samt ved at tilbyde nye prototyper af komponenter.

Energieffektiviteten er også opnået ved at udvikle et helt nyt kabinet med meget mindre kuldebroer og en lidt tykkere isolering. Desuden er der benyttet en ny og mere energieffektiv kompressor til det naturlige kølemiddel (R290, propan): DLE4CN fra SECOP. Endvidere er der benyttet en meget mere energieffektiv elmotor fra EBM Papst til kondensatorventilatoren. Endelig er kølesystemet placeret på en bedre måde, således at kondensatorvarmen bortledes på en mere optimal måde.

Der blev fremstillet 10 stk. af det nye kølebord. Det ene blev benyttet til laboratorietest hos først Gram Commercial og dernæst hos Teknologisk Institut. Et af kølebordene blev skadet under transport. De resterende otte nye køleborde blev opstillet til fieldtest i professionelle køkkener.

Samtidig blev der opstillet fem referencekøleborde i andre professionelle køkkener.

Fieldtesten bekræfter, at den besparelse, som blev opnået i laboratoriet, også sker i ”rigtige” professionelle køkkener. I fieldtesten forbrugte de gamle køleborde i gennemsnit : 2,07 kWh/døgn, mens de nye køleborde forbrugte 0,96 kWh/døgn. Dette er en besparelse på 53,7 %.

Det nye kølebord skal nu klargøres til egentlig produktion og markedsføring. Det forventes, at det nye kølebord vil blive billigere at fremstille, idet det passer bedre til de moderniserede produktionsforhold hos Gram Commercial med automatiske pladebearbejdningsmaskiner. Dette reducerer behovet for manuelle samlinger. Herved vil Gram Commercial i fremtiden komme til at stå i en stærk konkurrencemæssig situation for køleborde.

Perspektiver for yderligere energieffektivisering

Selvom der er opnået denne signifikante energibesparelse, så står tiden ikke stille. Konkurrenter er formentlig også på vej med mere energieffektive produkter, som er drevet frem af EU's Ecodesign-krav og energimærkningsordning.

Derfor må man formode, at Gram Commercial også i fremtiden vil forsætte arbejdet med energieffektivisering.

I dette projekt er det anvist, hvorledes man kan opnå yderligere energibesparelser ved at benytte variable speed-kompressorer og passende styring af disse.

ENERGY EFFICIENT PROFESSIONAL COUNTER CABINET

Per Henrik Pedersen^(a), Jonas Kjær Jensen^(b), Nis Peter Reinholdt^(a), Wiebke Brix Markussen^(b), Anders Sjoegaard^(c)

^(a) Danish Technological Institute
Gregersensvej 2, DK-2630 Taastrup

^(b) Technical University of Denmark
DK-2800 Lyngby

^(c) Gram Commercial A/S
DK-6500 Vojens

ABSTRACT

A Danish manufacturer of professional food service cabinets is involved in an R&D project with the aim of developing a new generation of professional food service refrigerated counters. The project also involves Danish Technological Institute (DTI), the Technical University of Denmark (DTU), a global manufacturer of compressors and a global manufacturer of fans. The aim of the project is to reach energy class “A” of the EU energy labelling scheme for professional service cabinets. The present generation of cabinets is classified in energy class “C”. Thus, it requires a reduction of almost 50% energy consumption to reach energy class “A”. The testing is carried out according to EN16825. During the project, it became clear that the goal can be reached by reducing the “cold bridges” around the doors, by increasing the insulation thickness, and improving the refrigeration system by using a new compressor technology as well as a better condenser fan motor. R290 is used as the refrigerant.

Key words: Propane, plug-in, cabinets, compressor, condenser, test

1. INTRODUCTION

Refrigerated counters are becoming more popular in professional kitchens as the labor efficiency in the kitchen increases when chefs use the counters. The counters use much electricity; and the experience shows that there is usually air maldistribution within the counter, especially in the parts far from the refrigeration system.

There are 600.000 refrigerated counters in the EU, and the yearly sale is about 80.000 units (Bio Intelligence Service, 2011). In Denmark, the sale is about 2.000 units per year and increasing. Refrigerated counters are quite expensive products (3,400 – 6,700 Euros when installed in the kitchen).

Chefs use refrigerated counters, because they increase the labor efficiency. The stainless steel table is a solid working place, and the raw products placed in the cabinet and shelves under the counter are within reachable distance from the chef.

In a similar project, a new concept for upright professional kitchen refrigerators and freezers was developed. This new concept reduced energy consumption by 28 %. The concept has been commercialized, and it is now marketed and put into production (Pedersen, 2016).

The EU process of developing and implementing ecodesign criteria and an energy labelling system for professional cabinets started in 2008/2009. When the Commission decides to start the mentioned

process for a product group, a consultant is hired to conduct a preparatory study to analyze the products, including market analysis, lift cycles, energy consumption, and other environmental impacts, standard and legislation, improvement potentials, and costs, etc.

For refrigeration products, the life cycle analysis often concludes that the energy consumption during the lifetime of a given product is the most important environmental impact, in some cases followed by the emission of refrigerants with significant GWP value. This is the reason why the draft regulation, which follows the preparatory study, mostly concentrates on improving the energy efficiency of the products.

The ecodesign regulation bans the most inefficient products and makes it mandatory to inform about the energy efficiency of the products available on various webpages. This information must be based on testing of the products.

Based on this, the EU published two regulations, COMMISSION REGULATIONS (EU) (2015/1095) and (2015/1094), regarding ecodesign requirements and energy labelling for professional refrigerated storage cabinets, respectively.

The regulation went into force on the 1st of July 2016. Since then, most manufacturers of professional kitchen refrigerators and freezers have been starting to improve their products. This includes the documentation of energy efficiency to comply with the ecodesign criteria, as well as to achieve as good an energy label as possible.

2. AIM OF PROJECT

The project team consists of a Danish manufacturer of professional food service cabinets, the Danish Technological Institute, the Technical University of Denmark, a global manufacturer of compressors, and a global manufacturer of fans.

The project group applied for economic funding from the Danish Energy Agency, and this funding was granted in 2015.

The goal of the project is to design a new generation of refrigerated counters for professional kitchens. The design must be flexible and fulfil the needs of the chef. The coming design is going to fulfil the criteria for the energy class A in the EU energy labelling scheme as well as fulfil the ecodesign criteria.

The existing refrigerated counters are labelled with energy label class “C” according to the EU energy labelling scheme, and the goal is to improve their efficiency, so that the coming product can be labelled with energy class “A”, which requires savings of at least 48 % of the consumed energy.

The control of the temperature must be more precise compared to present products. A team of chefs will ensure that the design fulfils the need for future professional kitchens.

Finally, the product must be flexible and easy to manufacture in order to be competitive and contribute to ensuring the continued business for the company and the employment of the staff at the factory in Denmark.

3. CONTENT OF PROJECT

The project started with an analysis of an existing product and of how to fulfil the goals of the project. This was carried out in cooperation between the project partners. A mathematical model for refrigerated counters was developed, including CFD calculation models for the airflow and

temperature distribution. Furthermore, a dynamic simulation model was developed with the aim of investigating the dynamics of the refrigeration system and the product, as well as different compressor control strategies. The results of the dynamic model are presented in Jensen et al. (2018).

Using the mathematical model presented in this paper, each of the following improvements have been simulated, and the results have been analyzed:

- The models are compared to real test results from the reference counter in the current study, which was tested with opening doors and shelves based on the recommendations of EN16825. After that, the models are adapted to fit the test results.
- The models have been used for simulating several improvements in design and components.
- The refrigeration system has been evaluated, and calculations of new compressors with variable speed drive (VSD) have been simulated.
- A new design for preliminary prototype has been developed. Then, it will be constructed and tested in order to start commercializing it to the consumers.

Based on the test results of the preliminary prototype, if they are satisfying, ten new appliances (a 0-serie) will be built. These new units, besides five conventional units, will be placed in professional kitchens for a field test. The field test units will be equipped with different sensors and data acquisition systems to collect and analyze the real-time measurements. Based on the collected data the use pattern, sales, and energy consumption will be evaluated. The final results, conclusions, and recommendations will be presented to the project group and later to the Danish Energy Agency. The final step is to commercialize this new model of refrigerated counters.

4. TEST FACILITY SETUP

A new test facility for testing of refrigerated counters according to EN16825 has been built in a climate chamber at Danish Technological Institute.

To control the opening and closing of refrigerated counters doors, a pneumatic robot was adopted. The tests are carried out at climate class 4, as recommended by EN16825 (2016), where the dry-bulb temperature is +30 C and relative humidity (RH) equals 55 %.

The Energy Efficiency Index (EEI) for a refrigerated counter is calculated in this way (COMMISSION REGULATIONS (EU) (2015/1095) and (2015/1094)):

$$EEI = (AEC/SAEC)*100\%$$

$$AEC = E_{24h} * 365 \text{ (yearly energy consumption according to test)}$$

$$SAEC = 2.555 * V_n + 1790 \text{ (yearly standard energy consumption in kWh)}$$

V_n is the net volume in liters.

Testing of the basis model took place in the spring of 2016, and the results were:

- Net volume, V_n : 290 liters
- Energy consumption, E_{24h} : 3.358 kWh/Day
- $EEI = 48.43\%$
- Energy class C

To achieve energy class A, the EEI must be below or equal to 25 %. To achieve this task, an energy reduction of 48.4% must be achieved.



Figure 1: Photo of the test facility for the refrigerated counters under study. The basis of the project is a three-door counter. The three robot arms are opening the doors according to EN16825 (2016).

Additional measurements were done on the refrigeration system with the purpose of given inputs to calculation programs at DTI and simulation programs at DTU.

Thermographic analysis showed that the outer surface of the cabinet was cold around the doors and the upper table connection to the cabinet. Some potential energy savings were present. Testing of the main components were also done at DTI, especially the condenser fan where the test results predicted a potential for energy savings.

5. BASIC CALCULATIONS

A mathematical model (in Excel) of the refrigerated counter has been constructed in order to estimate the effect of changes and improvements made in the design - and development phase of a new energy optimized counter. The model comprises data and calculations within six distinct areas. Results from calculations regarding specific parts of the counter are gathered and converted to a final result for the energy consumption of both the existing and the optimized counter. The six areas, in which the model is organized, are:

- Input data and energy consumption of existing counter

- Alternative compressor selection and energy consumption of optimized counter
- Geometry of counter
- Infiltration rate for air
- Heat transfer through surfaces
- Cold bridges

For the model to calculate the energy consumption correctly, the basis properties for the calculation needs to be as accurate as possible. In the first section of the model, data for components, operation time, temperatures, ambient humidity, infiltration rate for air and material properties as well as the existing compressor is entered. The energy consumption of the existing refrigerated counter is calculated in two steps: First, the heat input to the cabinet is calculated, and second, a sum of the energy consumed by each component within the counter is done. Load dependent data for the compressor is implemented as VBA (Visual Basic for Applications) code in a calculation routine running behind the main program. This provides the user with fast and easy results concerning the energy consumption of the compressor under the given conditions. When the heat input to the refrigeration system has been calculated, the compressor routine provides a result for the energy consumption of the compressor. Next, results for the remaining energy consuming components are compiled and summarized to the final result for the energy consumption of the existing counter, as shown in Table 1.

Table 1: Heat transfer rate and power consumption of the existing refrigerated counter based on tests of components and heat transfer calculations.

Heat load		Existing compressor
Evaporator fans	W	9,5
De-icing heating coil	W	3,9
Heat transfer through surfaces	W	57,0
Cold bridges	W	31,4
Air change	W	31,8
Total heat load	W	133,7
Energy consumption		Existing compressor
Compressor	W	103,9
Condenser fans	W	27,3
Evaporator fans	W	9,5
De-icing heating coil	W	3,9
Control panel	W	4,9
Total energy consumption	W	149,5
	kWh/24h	3,59

The heat transfer through surfaces represents a significant part of the heat load, which the refrigeration system has to remove. This is calculated as a thermal resistance network with data for temperature, geometry, and material properties. For the heat transfer coefficients along the inner and outer surfaces, estimated values from manufacturers of refrigerated counters have been applied.

When doors or drawers are opened, cold air will be lost from the counter and replaced by ambient air. This body of air is warmer and more humid than refrigerated air, and ultimately this heat input needs to be removed by the refrigeration system. The amount of heat represented by the air infiltration is calculated according to the ASHRAE Handbook 2006 concerning door openings in storage buildings and cold stores. The net volume of refrigerated counters is of course smaller than cold stores, which causes the results from this part of the heat input to be associated with some uncertainty. An assumption is applied regarding the total volume of air being able to escape from the refrigerated counter. This value can vary due to the layout of the actual counter, e.g. a three-section counter could vary from three doors to nine drawers. In order to decide upon an acceptable mean, the volume assumption is defined as the internal volume of a single section of the counter. This could

underestimate the exchanged air volume in a counter with doors, but also overestimate it in case of a counter with many drawers. The calculation basis combines temperatures, humidity, density, and gravity with data regarding door openings and the duration of the door openings to a result for the air infiltration heat input.

Specific parts of the counter geometry cannot be represented by heat transfer through large regular surfaces. These parts, e.g. around door openings, are studied as cold bridges in the simulation software COMSOL Multiphysics. The geometry near a door or drawer opening, i.e. the crossbar, door sealing, and door/drawer geometry, is simulated as a steady state situation with internal and external temperatures and heat transfer coefficients (Figure 2). Evaluation of the heat flux through the construction yields a measure of the heat transfer per meter of door opening perimeter. By optimizing the geometry around door openings and by increasing the insulation thickness in this area of the construction, the heat transfer related to cold bridges can be greatly reduced (see Table 2).

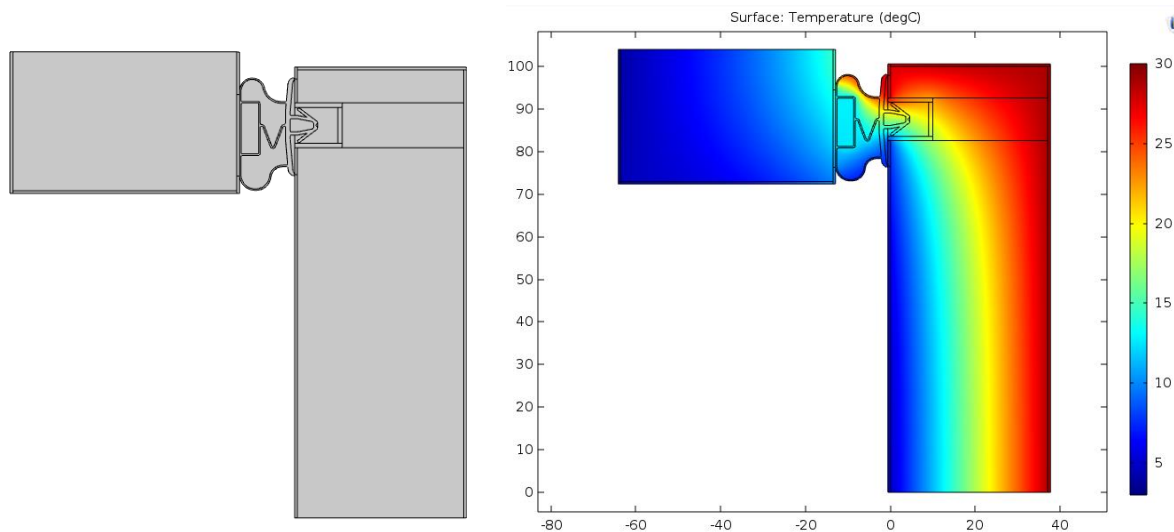


Figure 2: Left – geometry of crossbar, door sealing, and top of door (existing refrigerated counter). Right – steady state simulation result of temperature distribution in the geometry.

The 5 cm³ propane compressor in the reference refrigerated counter is responsible for almost 70% of the total energy consumption. Accordingly, four more efficient compressors have been implemented and analysed. The energy savings of these alone correspond to ~15-20%. Two promising compressor models are selected for the calculations of the optimized counter (Table 2). The reference counter with the reference compressor model is also included in Table 2 to emphasize the energy saving. Along with the alternative compressors, three proposals for the optimum refrigerated counter design are included. The first one, termed “+10mm insulation”, represents the existing counter geometry, but with 10 mm extra insulation in all the large surfaces and an improved cold bridge design applied to most of the accumulated length of the door opening perimeter. The same goes for the second proposal “+20mm insulation”, except the insulation thickness which is improved by 20 mm. Finally, the “Prototype design” is a completely re-designed counter geometry with generally increased insulation thickness, variable insulation thickness around “hot spots”, and an improved cold bridge design applied to the entire accumulated length of the door opening perimeter.

The “Prototype design” shows the greatest reduction in energy consumption, which amounts to 37.3% compared to the existing refrigerated counter model. This saving is 77% of the energy saving goal of the project. However, the above result is without engaging the very energy consuming condenser fan with shaded-pole motor. A reduction of at least 50% is realistic in connection with this component alone. If the consumption of this component is halved, the total energy savings of the counter would be 46.4% corresponding to almost 96% of the energy saving goals.

The accuracy of the mathematical model was evaluated by applying conditions identical to those of a climate chamber test of the existing refrigerated counter carried out according to EN 16825:2016. The climate chamber test showed a total energy consumption of 3.358 kWh/24h, which is 6.4% less than the result from the calculation model of 3.59 kWh/24h. This accuracy is acceptable taking the level of uncertainty of the assumptions made in the model into account.

Table 2: Calculated energy consumption and energy savings of proposed improvements with alternative compressors.

Heat load		Existing compressor	+10mm insulation		+20mm insulation		Prototype design	
			Comp. 3	Comp 4.	Comp. 3	Comp 4.	Comp. 3	Comp 4.
Evaporator fans	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
De-icing heating coil	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Heat transfer through surfaces	W	57,0	52,6	52,6	46,2	46,2	39,8	39,8
Cold bridges	W	31,4	11,7	11,7	11,7	11,7	1,2	1,2
Air change	W	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
Total heat load	W	133,7	109,6	109,6	103,1	103,1	86,3	86,3
Energy consumption		Existing compressor	Comp. 3	Comp 4.	Comp. 3	Comp 4.	Comp. 3	Comp 4.
Compressor	W	103,9	66,6	61,2	62,7	57,6	52,4	48,2
Condenser fans	W	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Evaporator fans	W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
De-icing heating coil	W	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Control panel	W	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Total energy consumption	W	149,5	112,1	106,8	108,2	103,2	98,0	93,7
	kWh/24h	3,59	2,69	2,56	2,60	2,48	2,35	2,25
Energy saving	%		25,0	28,6	27,6	31,0	34,5	37,3

A model of the new refrigerated counter prototype is constructed in the CAD and CFD software SolidWorks Flow Simulation.

The purpose of the simulation is to evaluate the air velocity and temperature distribution in the final stages of the design phase of the new and optimized refrigerated counter.

6. BUILDING AND TESTING PROTOTYPE

During 2017, several tests were conducted on mockup prototypes constructed on the basis of an existing counter cabinet. Additional insulation was glued on the cabinet surface in specific areas. The construction of the compressor compartment has been changed, and the condenser fan motor has been replaced by an efficient motor. Moreover, the compressor has been replaced by one of the new compressors from the calculations in table 2, and the defrost method has been changed from electrical heating to natural defrost by air flow. The results indicate that the goal has been reached with an approximation of 50 % saving in energy consumption, compared to the reference counter. The new compressor is a 4 cm³ compressor (R290).

The first “real” new counter cabinet prototype will be constructed and tested in the Spring of 2018. After successful tests of this prototype in a climate chamber according to EN16825, 10 new cabinets will be built for a field test in professional kitchens along with five “old” cabinets.

CONCLUSION

An ambitious cooperation between a cabinet manufacturer, global manufacturers of compressors and fans, The Danish Technical University, and Danish Technological Institute has succeeded in designing and testing mockup prototypes of professional refrigerated counters with 50 % reduced energy consumption compared to existing counter, -without compromising the service of the cabinet. The first “real” new counter cabinet will be built in April 2018 and after successful testing an additional 10 new cabinets will be built for field test in professional kitchens later in 2018. After this, the new cabinets will be commercialized and marketed. The new counters will be only marginally more expensive compared to the existing counters, and the new products are expected to be competitive on the market due to low energy consumption and good energy labelling.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank the project team from Gram Commercial for their cooperation in the project.

The author would also like to thank the Nidec (former SECOP) Company for helping with new compressor prototypes and for a productive cooperation.

Moreover, the authors would like to thank EBM Papst for their support and samples of fans and motors.

Finally, the author would like to thank the Danish Energy Agency and the EUDP (Danish energy research program) for funding the project described in this paper.

REFERENCES

ASHRAE Handbook of Refrigeration, 2006. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineering

Bio Intelligence Service, 2011. Preparatory Study for Eco-design Requirements of EuPs [Contract N° S12.515749] Lot 1

COMMISSION REGULATION (EU) 2015/1095 of 5 May 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for professional refrigerated storage cabinets, blast cabinets, condensing units and process chillers.

COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2015/1094 of 5 May 2015 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labelling of professional refrigerated storage cabinets.

EN16825. Refrigerated storage cabinets and counters for professional use, - classification, requirement and test conditions. CEN August 2016.

Jensen J.K, Kærn M.R, Pedersen P.H, Markussen W.B, Influence of compressor control strategy on energy efficiency and product temperature for professional counter cabinets, 13th IIR Gustav Lorentzen Conference, Valencia, Spain, 2018

Pedersen P. H. A new race for improving energy efficiency for professional refrigerators and freezers, 12th IIR Gustav Lorentzen Conference, Edinburg, 2016

INFLUENCE OF COMPRESSOR CONTROL STRATEGY ON ENERGY EFFICIENCY AND PRODUCT TEMPERATURE FOR PROFESSIONAL COUNTER CABINETS

**Jonas K. Jensen^(a), Martin R. Kærn^(a),
Per Henrik Pedersen^(b), Wiebke B. Markussen^(a)**

^(a) Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

Kgs. Lyngby, 2800, Denmark, e-mail

^(b) Danish Technological Institute,

Gregersensvej 2, DK-2630 Taastrup, e-mail

ABSTRACT

EU regulations 2015/1095 and 2015/1094 of 5 May 2015 have been implemented for professional refrigerated counters along with the test standard EN 16825. These regulations rate most current counters as class C or D and consequently there is an ongoing development to construct top level counters (A or above). Apart from improving the cabinet construction and improving the condenser and evaporator design, advanced compressor control strategies could be part of the solution. This could be either variable speed drive (VSD) or adaptive energy optimization (AEO). Both control strategies may improve the energy efficiency but may also affect the temperature fluctuations of the stored goods. The influence of VSD and AEO was investigated using a validated dynamic model of a professional refrigerated counter using R290 and R600a. The influence was investigated according to the EN 16825 test conditions. Both VSD and AEO yield significant energy savings compared to ON-OFF control. A more constant product temperature was achieved by VSD control, while the product temperature fluctuates slightly more when applying AEO control.

Keywords: Hydrocarbon, Compressor control, Variable Speed Drive, Product temperature, Eco-design

1. INTRODUCTION

In May 2015 the European Union passed regulation 2015/1094 (Council of European Union, 2015a) and 2015/1095 (Council of European Union, 2015b) and thereby implemented eco-design and energy-labelling requirements to professional refrigerated storage cabinets, such as professional counter cabinets. These regulations have been enforced since July 1st 2016 and require all professional refrigerated storage cabinets to be tested and classified in accordance with EN 16825 (BSI, 2016). Based on the test procedure described in EN 16825 the daily power consumption of the storage cabinet is measured from which the cabinet can be classified on a scale ranging from D to A⁺⁺⁺. Storage cabinets with a power consumption in excess of what corresponds to class D can no longer be sold within the European Union.

As this type of refrigeration equipment has not previously been subjected to eco-design and energy-labelling requirements, the development of this type of equipment has to some extent been focused on other measures, such as durability and cost reduction rather than a reduction of the power consumption. Hence, most current storage cabinets are assumed to be in the lower end of the scale. This is exemplified in Pedersen et al. (2018), where it was found that a current professional counter cabinet was classified in class C.

Consequently, there is an ongoing development task in designing professional storage cabinets capable of being classified in the top range of the scale (A - A⁺⁺⁺). For the professional counter cabinet investigated by Pedersen et al. (2018) reaching class A requires a reduction of the daily power consumption of more than 50 %.

The objective of the present study was to investigate the influence of a range of improvement measures on

Table 1. Auxiliary power consumers

Condenser fan	$\dot{W}_{CO, fan}$	28.3 W	on if: $T_{cond} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Evaporator fan	$\dot{W}_{EV, fan}$	13.0 W	on unless: defrost on
Defrost	\dot{W}_{DF}	281 W	On for 5 min every 6 h
Control panel	$\dot{W}_{control}$	4.90 W	Always on

the power consumption and product temperatures of the professional counter cabinet described in (Pedersen et al., 2018). The investigated measures include both improvement of the cabinet envelope by increasing insulation thickness and reducing thermal bridges as well as improvements to the condenser, evaporator and compressor. For the compressor a range of fixed speed and variable speed drive (VSD) compressors, for both R290 and R600a, have been identified and investigated. The alternative compressors were investigated under three compressor control strategies: ON-OFF, Adaptive Energy Optimization (AEO) and VSD.

2. METHODS

2.1. Current counter cabinet

The counter cabinet investigated in the present study was installed with three doors, however the cabinet may also be installed with up to six drawers or with any combination of these. The cabinet had a net volume of 290 L and was insulated by a layer of Polyurethane (PU) foam with a thickness of 50 mm in the side and bottom walls and 38 mm in the top desk. The top desk additionally included a wooden-fibreboard with a thickness of 12 mm. Further, the inner and outer walls were lined with a thin sheet of stainless steel.

The cabinet was cooled by a R290 refrigeration system. The refrigeration system was comprised of a fin-tube condenser with a condenser fan, and fin-tube evaporator with an evaporator fan, a capillary tube - suction line heat exchanger and a compressor. The applied compressor in the current counter cabinet was a SECOP TL5CN. The currently applied compressor control strategy was ON-OFF based on a high/low temperature switch placed in the evaporator outlet air stream. Further, the evaporator was equipped with an electric heating element used to defrost the evaporator with six hour intervals.

Apart from the compressor, the counter cabinet consumes power for several auxiliary equipment. The auxiliary equipment power consumption was used for condenser and evaporator fans, defrost heating element and the control panel. The power consumption and control of the auxiliary equipment was stated in Table 1.

2.2. Suggested improvements

In order to reduce the power consumption of the counter cabinet a number of measures have been investigated. These consist of:

- Change of compressor type and compressor control strategy
- Improvements of the cabinet envelope i.e. increasing insulation thickness and reducing thermal bridges. According to Pedersen et al. (2018), 2 cm of additional PU-foam is possible and further the heat load due to thermal bridges can be reduced by 95 %.
- Increase heat transfer performance of the evaporator and condenser i.e increase the UA-value. For the simulations a doubling of the UA-value was investigated. This can be attained either by improving the heat transfer coefficient or increasing the area, or a combination.
- Replace fans with more energy efficient fans and improve condenser fan control. In the current cabinet the condenser fan was on when the condenser temperature was above 30 °C, which means that under the EN 16825 test conditions the condenser fan was always on. This could be improved by letting the fan turn ON-OFF with the compressor. It was further assumed that the fan power could be reduced to 10 W for the condenser and to 6.2 W for the evaporator

A number of relevant compressor types have been identified and are listed in Table 2. As seen, the identified compressors consist of a number of ON-OFF controlled R290 compressor, one VSD R290 compressor and a

Table 2. Compressor data for the investigated compressor types

Compressor model	Refrigerant	Displacement Volume	Control	Nominal speed	Speed range
TL5CN	R290	5.08 cm ³	ON-OFF	2900 RPM	-
DLE48CN	R290	4.80 cm ³	ON-OFF	2900 RPM	-
DLE48CNRC	R290	4.80 cm ³	ON-OFF	2900 RPM	-
DLE4CN	R290	4.00 cm ³	ON-OFF	2900 RPM	-
DLE4CNRC	R290	4.00 cm ³	ON-OFF	2900 RPM	-
DLV57CN	R290	5.70 cm ³	VSD/AEO	2900 RPM	1000–4000 RPM
XV5KX	R600a	5.00 cm ³	VSD/AEO	2900 RPM	1000–4000 RPM

VSD R600a compressor. The ON-OFF compressors were all assumed to be controlled by a high/low temperature switch measuring the air temperature in refrigerated space. The VSD compressors all incorporate two modes of control: VSD control in which the compressor speed was controlled to attain a given set-point temperature of the air in the refrigerated space and AEO control in which the compressor runs ON-OFF based on high/low temperature switch while the compressor speed was controlled to attain a given set-point for the compressor on-time. For VSD control, the compressor would return to ON-OFF operation based on the high/low temperature switch in case the set-point temperature cannot be met at the minimum compressor speed.

In the present study the set point for the high/low temperature switch was set to 6 °C and -2 °C, respectively. For the AEO control three set-points for the compressor on-time, $\Delta\tau_{on}$, were investigated: 1, 2 and 4 hours. For the VSD control the set-point for the air temperature was set to 2 °C.

In order to determine the most beneficial improvements, the potential improvements of the counter cabinet were investigated individually and in combination. The improvements were evaluated based on both the power consumption as well as on the minimum, maximum and average product temperature.

2.3. Model

A thermodynamic model of the refrigerated counter has been build in the simulation software Engineering Equation Solver (Klein, 2017). The model structure can be seen in Fig. 1. The model was comprised of a cabinet model and a refrigeration system model. The two models interact through the heat load in the evaporator.

The cabinet was modelled as an air control volume enclosed by an insulated wall control volume, i.e the cabinet. Inside the air volume a product control volume was placed, such that the stored product only exchanged heat directly with the air volume. The wall, air and product control volumes were all modelled as dynamic control volumes and the transient temperatures were determined. The air and product volumes were modelled as lumped capacitances while transient conduction through the walls was calculated based on a discretization along the width of the wall.

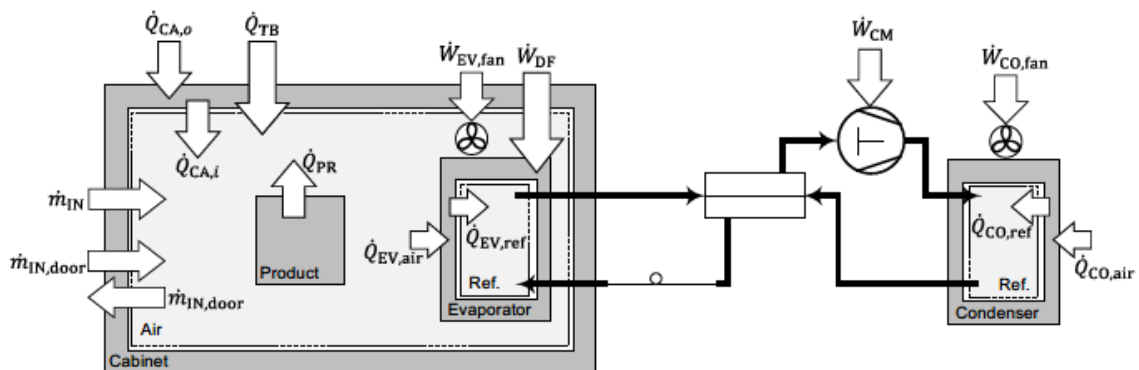


Figure 1. Principal sketch of the model structure of the cabinet and refrigeration system. The grey areas all model as dynamic control volumes.

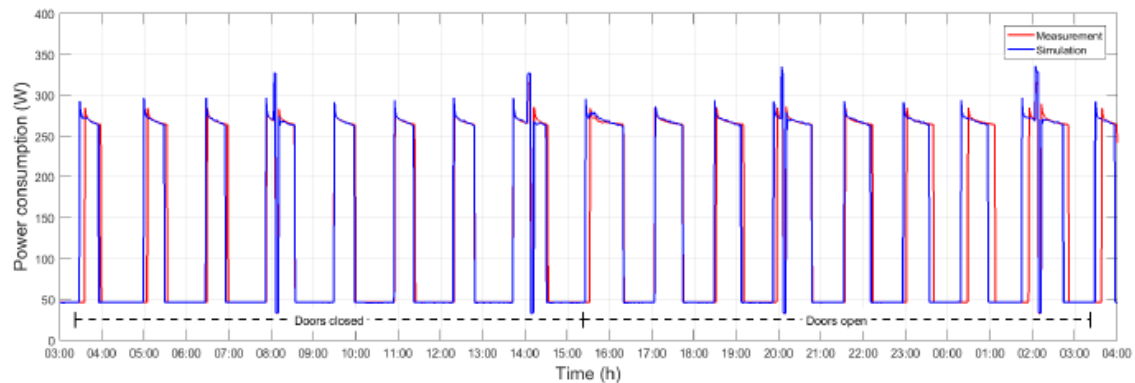


Figure 2. Simulated and measured energy consumption during a 24 hours sequence of the EN 16825 test

Apart from the heat load through the walls the air experienced a heat load due to the evaporator fan, $\dot{W}_{EV, fan}$, due to thermal bridges, \dot{Q}_{TB} , and due to air infiltration. The heat load due to thermal bridges was determined based on a quasi static approach by assigning a fixed UA-value and thus finding $\dot{Q}_{TB} = UA_{TB} (T_{amb} - T_{air})$. Two sources of air infiltration was accounted for. One due to pressure equalization with the ambient and one due to door openings. The mass flow rate of infiltrated air due to door openings was determined based a fixed number of air exchanges.

The refrigeration system model was comprised of two dynamic components: the evaporator and the condenser, and two quasi static components: the compressor and the capillary tube - suction line heat exchanger. Both the condenser and evaporator were modelled as a refrigerant control volume enclosed in a heat exchanger volume with a given capacitance. The operation of the compressor was determined based on polynomials supplied by the manufacturer, for the VSD compressors speed specific polynomials were applied. Compressor heat loss was neglected.

To simulate the operation of the refrigerated counter under the EN 16825 test procedure several model parameters were fitted to match the experimental data supplied. These parameters were: the convective heat transfer coefficient on the walls and product (assumed to be the same), convective heat transfer coefficient on the evaporator and condenser (separate values), the UA-value for the thermal bridges and the number of air exchanges due to door openings.

2.4. Measurements according to EN 16825

The current counter cabinet has been tested in accordance with EN 16825. The results of these test are presented in detail by Pedersen et al. (2018). The test was conducted with test packages stored in the cabinet. The test packages were of made of Tylose gel and the amount and placement were dictated by the EN 16825 test procedure.

The EN 16825 test procedure is comprised of three days run time. The first 24 hours are to allow the system to reach stable operation. For the second 24 hours the temperatures are measured in the test packages. For the last 24 hours, both the power consumption and test package temperatures are measured. Each 24 hour interval are divided into two periods: the first 12 hours all doors are closed, the second 12 hours all three doors are open and closed in a scheme dictated by EN 16825.

The results of the measurements have been used to fit several unknown coefficients in the thermodynamic model, as described in section 2.3. Further, the results of the measurements have been used to validate the developed thermodynamic model under the EN 16825 test procedure.

2.5. Validation

The values of the fitted model parameters can be seen in Table 3. Further, the total power consumption of the measured and simulated system can be seen in Fig. 2. The model captures both the overall power consumption

Table 3. Values of the fitted model parameters

Model parameter	Fitted Value
UA_{TB}	2.45 WK^{-1}
UA_{EV}	67.7 WK^{-1}
UA_{CO}	49.1 WK^{-1}
α_{air}	$6.52 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
$N_{air,inf}$	4.6 -

but also the duration and number of the ON-OFF cycles during both the closed door part of the test and the door opening part of the test. The simulated daily power consumption was found to be 3.31 kWh per days which differs 1.34 % from the measured value. The developed thermodynamic model thus presents a reasonable representation of the system and can thus be used to further investigate the improvement potentials.

3. RESULTS

3.1. Power consumption and product temperature

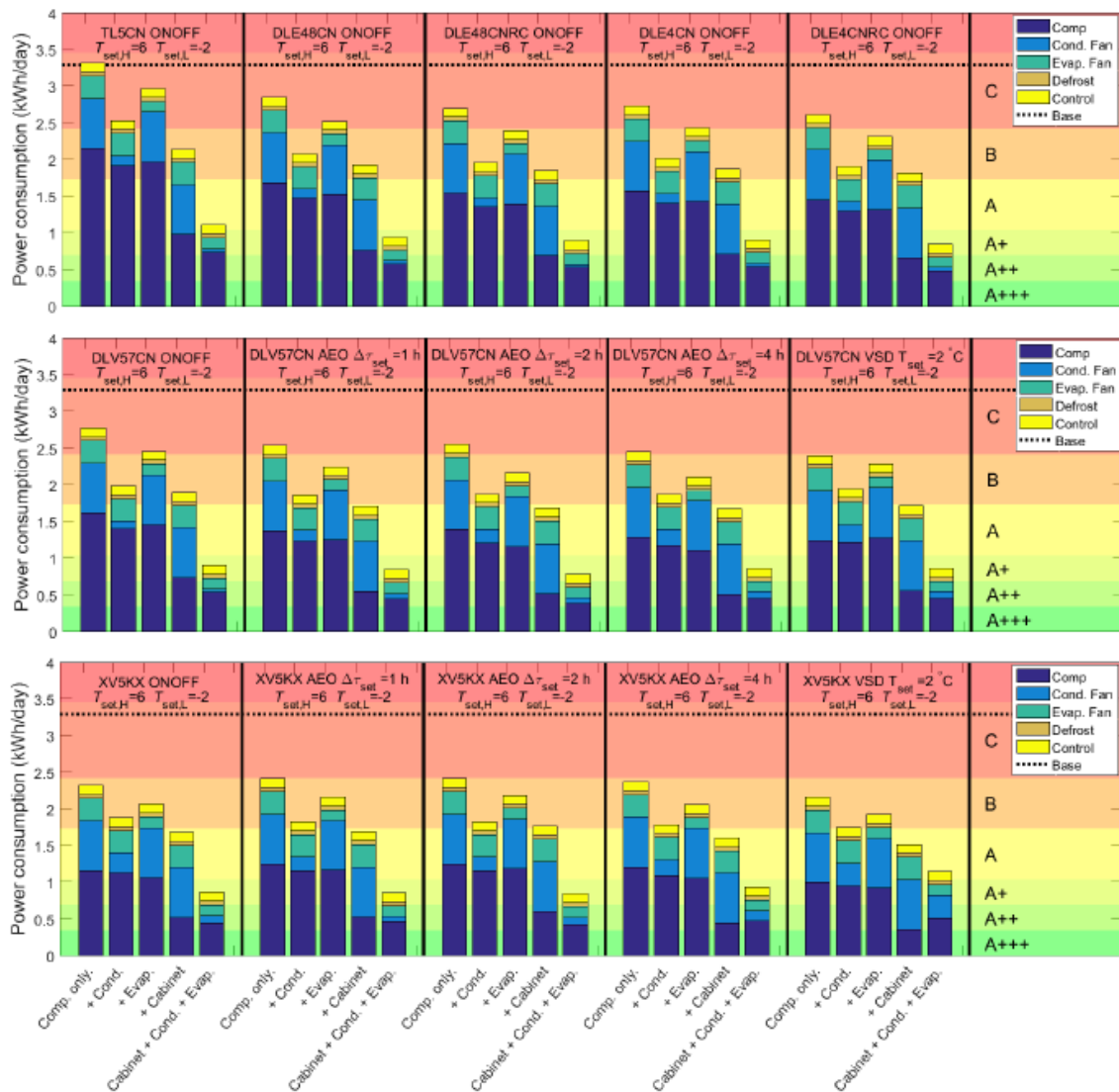


Figure 3. Power consumption for different design improvements and compressor types

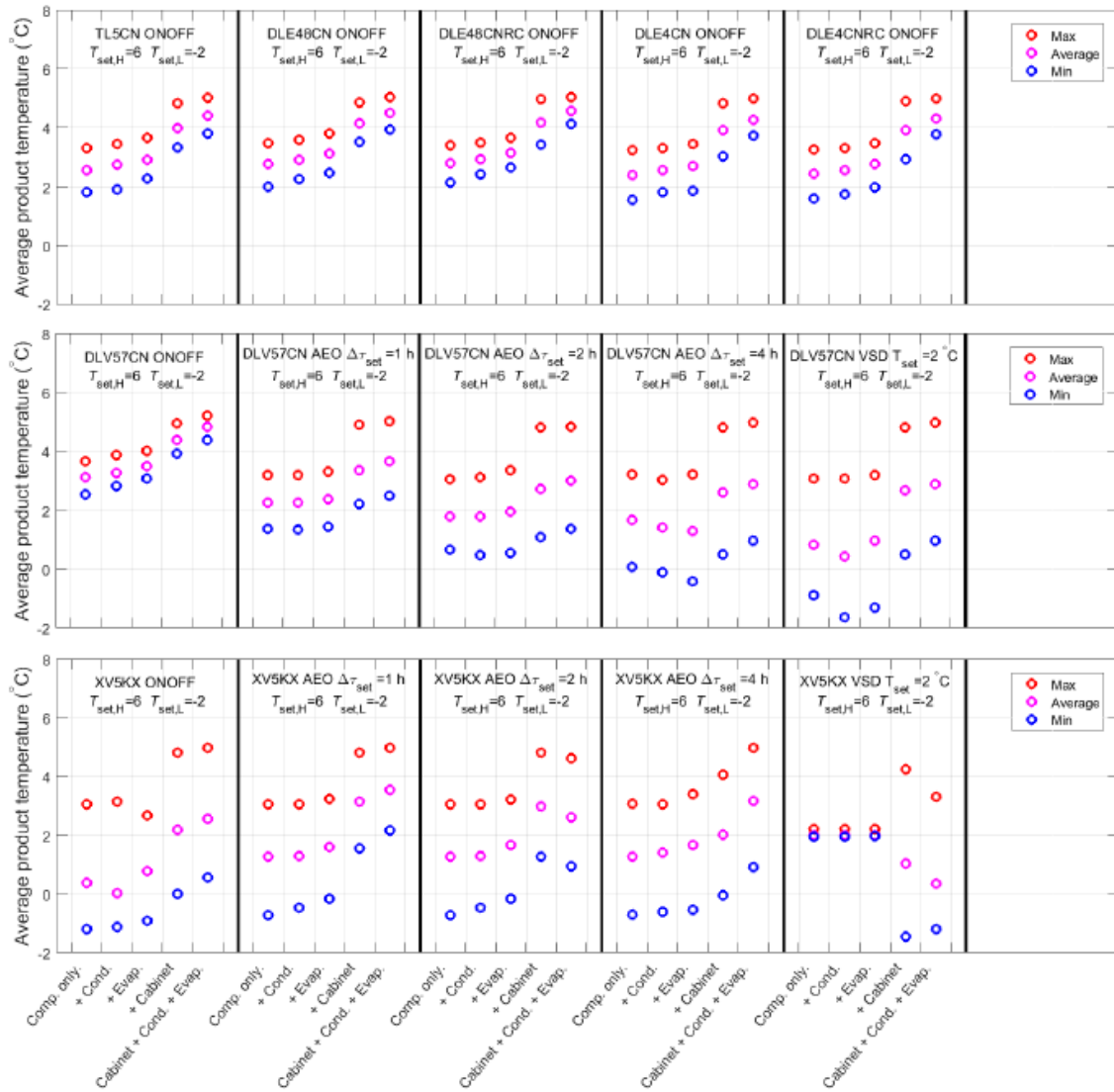


Figure 4. Minimum, maximum and average product temperature for different design improvements and compressor types

The power consumption of the simulated improvements can be seen in Fig. 3. Here the results are presented for both the ON-OFF, AEO and VSD control. The results are presented for changing the compressor only and for adding each of the additional improvements, presented in section 2.2, individually and all together. Further, the corresponding minimum, maximum and average product temperatures are seen in Fig. 4.

Starting from the base case, the TL5CN compressor, it can be seen that the two largest potentials for power consumption reduction stem from the condenser and cabinet improvement. It can further be seen that the improvements due to the condenser was mainly related to the reduction of fan power rather than the improved UA-value. It can be seen that the target of a class A counter can be meet if all improvements are implemented in the system with the current compressor.

Going further it can be seen that additional reduction can be attained by also implementing new compressors. The DLE48CN/RC and DLE4CN/RC are both R290 compressor like TL5CN but with smaller displacement volumes and improved performance. It can be seen that the smallest compressor in the RC version has the biggest potential to reduce the power consumption. Further, it can be seen that the smaller the compressor size

was: the less improvement was attained by increasing the UA-value of the evaporator and condenser. This was due to the fact that by reducing the compressor size the heat load in the evaporator and condenser was reduced, which in it self increased the evaporation and reduced the condensation temperature, leaving less potential to do so by the increasing UA. An A⁺ rated counter can be attained if all improvements are implemented together with either the DLE48CN/RC or DLE4CN/RC.

Looking at Fig. 4 it can be seen that all suggested improvements have a significant influence on the temperature of the stored goods. For the ON-OFF compressors it can generally be seen that improving the evaporator, condenser or cabinet will result in an increase in the average product temperature. The highest influence on this was related to the improved cabinet. This was due to the fact that improving the cabinet without changing the compressor results in reduced cooling demand and thus in excess cooling capacity. Consequently, the compressor on-time will be reduced and the off-time will be increased. This means that the product on average will be exposed to hotter air resulting in an increase in product temperature. It can further be seen in Fig. 4 that reducing the compressor size to the DLE4CN/RC slightly reduces the product temperature again. However, an increase in product temperature should be expected when implementing the cabinet improvements. This could be counter-acted by changing the set-point temperatures of the temperature switches.

Apart for the ON-OFF controlled R290 compressor a VSD R290, DLV57CN, compressor has also been investigated and the results are presented in Fig. 3. As seen the DLV57CN has been simulated first with ON-OFF control, then with the AEO control with three different on-time set-points and finally as VSD controlled. As seen, the DLV57CN in ON-OFF results in a power consumption comparable to the DLE48CNRC. However, it may be seen that additional reduction can be attained by running the AEO control. It can be seen that, the longer the on-time set-point was: the lower the power consumption. This is the same effect as seen for downsizing the ON-OFF compressors, as increasing the AEO on-time set-point forces the compressor to run at reduced speed thus mimicking a smaller compressor. This was also apparent when examining Fig. 4 where it can be seen that the higher the AEO on-time set-point was, the lower the product temperatures were and the higher the product temperature spans were. This may be critical for the product quality if sub-zero temperatures are attained. As seen, this occurred for the 4 hour AEO set-point and the VSD control. Looking at the temperature results for the VSD control of the DLV57CN it was evident that actual VSD control has not been attained as this should result in minimum, maximum and average temperature very close to the VSD temperature set-point. The reason for this was that the DLV57CN compressor was too large to run full VSD under the load conditions in the refrigerated counter. The results seen here, therefore represent the DLV57CN compressor running ON-OFF at its minimum speed of 1000 RPM.

The final compressor investigated was the XV5KX compressor. The XV5KX is a VSD R600a compressor, the results for this compressor was structured similarly to those of the DLV57CN. As seen the power consumption for ON-OFF drive was reduced compared to all other ON-OFF compressor. However, when looking at the product temperatures it may also be seen that freezing of the product occurred when the cabinet was not improved. This indicates that the cooling capacity was too low for ON-OFF control, resulting in too long on-time and thus a longer exposure time to sub-zero. This was further justified by looking at the power consumption for the AEO and identifying that these are higher than for ON-OFF control. Hence, the average on-time of the ON-OFF control was greater than 4 hours. Finally, it may be seen that the power consumption can be further reduced by applying VSD control. Looking at the product temperatures it can be seen that actual VSD control was attained if the cabinet was not improved. As seen this results in minimum, maximum and average temperatures close to the 2 °C temperature set-point. However, when the cabinet was improved the XV5KX was also too large for VSD control and thus to run the completely improved system with VSD a smaller compressor would be needed.

4. CONCLUSIONS

A number of potential improvements to the design of a refrigerated counter cabinet have been investigated using a validated thermodynamic model. The model was found to give a good representation of both the overall power consumption and the on and off time of the compressor. Seven compressor types were simulated under both ON-OFF, AEO and VSD control. Further, improvements to the cabinet, evaporator and condenser

were simulated. The biggest improvement was attained by improving the cabinet followed by improving the condenser. For the condenser the biggest improvement was attained by reducing the fan power. Improving both condenser, evaporator and cabinet resulted in an increase in the product temperature. Reducing the compressor size would reduce the average power consumption and reduce the average product temperature, which to some extent can counter act the increase from the other improvements. It is therefore important to determine a good trade off. The AEO control method generally mimics the operation of a smaller compressor and thus increasing the on-time set-point reduces power consumption and reduces product temperature. VSD control was only possible for a small number of investigated solutions. The DLV57CN was too large to run VSD for all investigated cases, while XV5KX could run VSD if the cabinet was not improved. All in all several possibilities were identified to construct a counter cabinet capable of being rated as class A or above.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research project is financially funded by EUDP (Energy Technology Development and Demonstration). Project title: "Refrigerated counters of the future", project number: 64015-0064

NOMENCLATURE

<i>Abbreviations</i>	\dot{m} mass flow rate (kg s^{-1})
EES Engineering Equation Solver	<i>Greek letters</i>
AEO Adaptive Energy Optimization	α convective heat transfer coefficient ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
VSD Variable Speed Drive	$\Delta\tau$ time difference (s)
PU Polyurethane	<i>Sub- & super scripts</i>
<i>Symbols</i>	CM compressor
p pressure (bar)	CO condenser
T temperature (K)	EV evaporator
V volume (m^3)	DF defrost
\dot{Q} heat flow rate (W)	IN infiltration
\dot{W} work rate (W)	TB thermal Bridges
UA Over all heat transfer coefficient (WK^{-1})	PR product

REFERENCES

- BSI, 2016. EN 16825 - Refrigerated storage cabinets and counters for professional use. Classification, requirements and test conditions.
- Council of European Union, 2015a. Commission delegated regulation (eu) 2015/1094 of 5 may 2015 supplementing directive 2010/30/eu of the european parliament and of the council with regard to the energy labelling of professional refrigerated storage cabinets (text with eea relevance). URL: http://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2015/1094/oj.
- Council of European Union, 2015b. Commission regulation (eu) 2015/1095 of 5 may 2015 implementing directive 2009/125/ec of the european parliament and of the council with regard to ecodesign requirements for professional refrigerated storage cabinets, blast cabinets, condensing units and process chillers (text with eea relevance). URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/1095/oj>.
- Klein, S., 2017. Engineering equation solver academic professional v10.273-3d.
- Pedersen, P.H., Jensen, J.K., Reinholdt, N.P., Markussen, W.B., Hansen, M.L., 2018. Energy efficient professional counter cabinet. Proceedings of the 13th Gustav Lorentzen Conference, Valencia, Spain .

13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Valencia, Spain, 2018