

Optimaliseren koel- en stooklijnen van luchtbehandelingssysteem voor reductie energieverbruik en CO₂ uitstoot in het Valerio gebouw

Daniel KONE

SCRIPTIE

Optimaliseren koel- en stooklijnen van luchtbehandelingssysteem voor reductie energieverbruik en CO₂ uitstoot in het Valerio gebouw

Student:	Daniel Kone
Studentennummer:	13059726
Opleiding:	Werktuigbouwkunde
Docent begeleider:	Gerard van Gils
Assessor :	Baldiri Salcedo
Werkgever:	Janssen Vaccine & Prevention B.V.
Adres werkgever:	Newtonweg 1, 2333CP, Leiden
Bedrijfsmentor:	Eddy Wagner
Datum:	19 December 2016

Voorwoord

Ter afsluiting van mijn vierjarige opleiding tot engineer werktuigbouwkunde ben ik van september 2016 tot en met november 2016 bezig geweest met het onderzoek naar optimalisatie mogelijkheden van het energieverbruik door het luchtbehandelingssysteem AHU3 in het Valerio gebouw te Leiden.

Het onderzoek maakt deel uit van het algemene plan van het bedrijf van mijn werkgever, Janssen Vaccine & Prevention, afgekort als Janssen V&P, om het energieverbruik en de CO₂-emissie afkomstig uit onze activiteiten in 2020 met 20% te verminderen.

In deze onderzoeksperiode heb ik soms tegenslagen moeten verwerken. Het combineren van een afstudeeronderzoek met andere bindende bedrijfsdoelstellingen bleek een moeilijke opgave.

Ik bedank mijn bedrijfsbegeleider, Dhr. Eddy Wagner, voor zijn begrip en ondersteuning tijdens dit traject. Mijn dank ook voor de manager van de Engineering, Validatie en Maintenance (EVM) afdeling van Janssen V&P, Dhr. E. Van Veldhoven, voor zijn getoonde vertrouwen door het aan mij toevertrouwen van deze opdracht.

In het bijzonder bedank ik mijn echtgenote Elleke voor haar steun, begrip en geduld tijdens de opleidingsjaren, in het bijzonder tijdens de onderzoeksfase. Ook dank aan mijn lieve kinderen Audrey en Mozes, mijn andere familieleden en vrienden die altijd met mij mee dachten en mij in deze drukke periode motiveerden.

Ik wens jullie veel leesplezier toe.

Daniel KONE, Den Haag, 19 December 2016

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Inhoudsopgave	4
Samenvatting	6
Symbolenlijst	7
Inleiding	8
1. ORIËNTATIE FASE	9
1.1. Scope definitie	9
1.2. Eisen en wensen	9
1.3. Onderzoeksdoelen	10
1.4. Onderzoek aanpak	10
1.5. Demarcatie	11
2. Analysefase	12
2.1. Probleemstelling en hypothesen	12
2.2. Definitie van de variabele en constanten	15
2.3. Literatuur onderzoek	20
2.4. Analyse van de huidige situatie	23
2.5. Oplossingsrichtingen	25
3. ONTWERP FASE	29
3.1. Over Matlab/Simulink	29
3.2. Algemene modelbeschrijving	29
3.3. Model resultaten	34
3.4. Toetsen van de hypothesen	44
3.5. Voorlopige pakket van eisen	45
4. DETAILLERING	46
4.1. Klimaatregeling	46
4.2. Benutten van zonne-energie	47
4.3. Elektrische zonne-energie	48
4.4. Het benutten van thermische zonne-energie in combinatie met adsorptie koeling	48

4.5. Definitieve pakket van eisen	50
CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	51
LITTERATUUR	53
COMPETENTIEVERSLAG	55

Samenvatting

De koeling, verwarming, bevochtiging of ontvochtiging van de lucht kost energie. Het luchtbehandelingssysteem van het Valerio gebouw is verantwoordelijk voor bijna 50% van het totale energieverbruik en de CO₂ uitstoot van dit gebouw.

Janssen Vaccine & Prevention heeft in het kader van het Energy Efficiency Program (EEP) als doel het energieverbruik en de CO₂ uitstoot met 20% te verminderen. Het onderzoek heeft als uitgangspunt optimalisatie-maatregelen in kaart te brengen voor het luchtbehandelingssysteem, de grootste energieafnemer van het gebouw. Een efficiënter luchtbehandelingssysteem kan leiden tot een vermindering van de impact op het milieu.

In het kader van dit onderzoek wordt de focus op luchtbehandelingssysteem AHU3 gelegd. Er is gekozen voor een twee-stappen onderzoek:

- Het herontwerp van de klimaatregeling gebaseerd op de Trias Energetica methodiek, rekening houdend met de vastgestelde eisen en wensen. Doel een significante en meetbare vermindering van de energievraag en CO₂ uitstoot uit het systeem.
- Naast het optimaliseren van de regeling, het in kaart brengen van de mogelijkheden om de installatie verder te verduurzamen door benutting van duurzame energiebronnen in combinatie met efficiëntere technieken.

Literatuur onderzoek heeft het mogelijk gemaakt oplossingsrichtingen vast te stellen. Om de onderzoeksresultaten te kunnen toetsen, is er gebruik gemaakt van Matlab/Simulink, een software programma dat het mogelijk maakt om regelingen en werktuigbouwkundige systemen te simuleren.

Op basis van de simulatieresultaten kan naar aanleiding van de twee onderzoeksniveaus het volgende worden vastgesteld:

- Het toepassen van een her-ontworpen temperatuur- en vochtregeling gebaseerd op een bepaalde range, vastgesteld op basis van thermische comfort eisen en toelaatbare grenzen leidt tot een afname van het energieverbruik (-17,46%) en CO₂ uitstoot (-20,55%).
- Naast het herontwerp van de klimaatregeling leidt het benutten van zonne-energie tot verdere verduurzaming van de installatie:
 - 13% van het elektriciteitsverbruik door de ventilatoren zou uit duurzame bronnen kunnen komen als er gekozen wordt om elektriciteit op te wekken uit zonne-energie.
 - 23,27% van de koel-energievraag zou uit zonne-energie kunnen komen als er gekozen wordt om zonne-thermische energie te benutten in combinatie met adsorptiekoeling technologie.

Op basis van bovenstaande onderzoeksresultaten kan geconcludeerd worden dat het aanpassen van de klimaatregelingen kan leiden tot grotere energie-efficiëntie. Tevens laten deze resultaten zien dat het opwekken en benutten van duurzame zonenergie bij kan dragen aan de verduurzaming van de installatie en het behalen van de milieudoelen van Janssen Vaccine & Prevention.

Symbolenlijst

Φ_m	=	Massastroom	[kg/s]
Φ_v	=	Volumestroom	[m ³ /h]
T	=	Temperatuur	[°C]
T	=	Temperatuur	[K]
ΔT	=	Temperatuurverschil	[°C]
Δx	=	verschil absolute vochtigheid	[kg/kg]
Δh	=	enthalpieverandering	[kJ/kg]
C_p	=	Specifieke energie	[J/kg*K]
Q	=	Energie	[J]
P	=	Vermogen	[W]
$\dot{Q}_{koel}$	=	voelbare koellast	[W]
$\dot{Q}_{lat}$	=	latente koellast	[W]

Inleiding

Het onderzoek maakt deel uit van mijn afstudeer periode bij de Haagse Hogeschool.

Doel is het herontwerpen van het luchtbehandelingssysteem om structureel bij te dragen aan de vermindering van het energieverbruik en de CO₂ uitstoot afkomstig uit de activiteiten in het Valerio gebouw, een van de locaties van mijn werkgever, Janssen Vaccines & Prevention B.V. In dit gebouw worden processen en testen voor het maken van geneesmiddelen ontwikkelt.

Als onderdeel van het Energie-efficiëntie Programma (EEP) kan dit onderzoek bijdragen aan het algemene bedrijfsdoel om in 2020 20% energieverbruik en CO₂ reductie te behalen.

De onderzoeksvraag is hoe de stook-en koel lijnen geoptimaliseerd kunnen worden in combinatie met duurzame energie en efficiëntere technologieën zodat er sprake kan zijn van een lager energieverbruik en een lagere CO₂ uitstoot.

De vraag is ook of dit bereikt kan worden in combinatie met de geldende binnenklimaatseisen in de farmaceutische sector voor clean rooms en andere gekwalificeerde omgevingen.

1. ORIËNTATIE FASE

In de oriëntatiefase worden het probleem, het plan van aanpak van het onderzoek en de algemene eisen en wensen gedefinieerd.

1.1. Scope definitie

In 2015 heeft ons bedrijf een energieaudit uit laten voeren om aan de EED-richtlijnen te kunnen voldoen. EED staat voor Energie-Efficiency Directive, een Europese richtlijn die grote bedrijven dwingt een energie audit uit te voeren.

De resultaten van de energieaudit bij Janssen Vaccine & Prevention lieten een jaarlijkse energiekostenpost van 1,1 miljoen euro zien. Dit verbruik veroorzaakt een jaarlijkse CO₂ uitstoot van 4760 ton. Deze energiekosten bestaan uit € 200.000, - vaste en € 900 000, - variabele kosten. De audit resultaten in termen van energieverbruik en CO₂ uitstoot worden in bijlage1 weergegeven.

De energieaudit werd uitgevoerd in vier gebouwen waar onze activiteiten plaatsvinden, het Valerio-gebouw, het Hoofdgebouw, het Ypsilon-gebouw en de Cube. Het is uit de audit gebleken dat het Valerio gebouw de grootste afnemer van energie is. In dit gebouw zorgt de luchtbehandelingsinstallatie voor circa 50% van het energieverbruik en CO₂ uitstoot.

Het onderzoek richt zich op de luchtbehandelingsinstallatie van het Valerio gebouw. Er zal gekeken worden naar optimalisatiemaatregelen om het energieverbruik en CO₂ uitstoot afkomstig van het luchtbehandelingssysteem te kunnen verminderen, rekening houdend met de vereiste ruimtecondities.

De luchtbehandelingsinstallatie bestaat uit zeven onafhankelijke luchtbehandelingssystemen. De klimaatregeling is in essentie voor al deze systemen hetzelfde. Het onderzoek zal zich daarom richten op één van de luchtbehandelingssystemen, met name op het luchtbehandeling systeem AHU3. De onderzoeksresultaten kunnen na goedkeuring ook toegepast gaan worden op de andere systemen.

1.2. Eisen en wensen

De eisen en wensen zijn de eerste uitgangspunten van het onderzoek. Voor wat betreft de eisen voor de ruimtetemperaturen en luchtvochtigheid is er in dit stadium van het onderzoek uitgegaan van de afgesproken alarm grenzen in de "room parameter list", het referentie-document omtrent de ruimte condities in het Valerio gebouw, zie bijlage 2. Het document geeft een overzicht van alle meetbare ruimteparameters zoals de ruimtedruk, de ruimtetemperatuur en luchtvochtigheid. De eisen voor ruimte temperatuur en relatieve vochtigheid, gebaseerd op de minimum en maximum waarden uit de room parameter list worden weergegeven in tabel 1.

Parameters	Ruimte temperatuur (°C)	Ruimte relatieve vochtigheid(%)
Vaste setpoint in ruimte	19°C	50%
Minimum alarm waarde	16°C	30%
Maximum alarm waarde	25°C	90%

Tabel1: eisen voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid zoals vermeld gebaseerd op room parameter lijst

In een volgend stadium van dit onderzoek wordt er naast de room parameter list ook gekeken naar normen en standaarden op het gebied van het binnenklimaat. Naar aanleiding van literatuur onderzoek en simulatieresultaten in de analyse en ontwerp fases zal een pakket van eisen (PvE) samengesteld worden.

De wensen zijn gebaseerd op de algemene milieu doelen van het bedrijf:

- 20% minder energieverbruik in 2020
- 20% minder CO₂ uitstoot afkomstig uit onze activiteiten in 2020.

1.3. Onderzoeksdoelen

De belangrijkste doelstellingen van het onderzoek zijn :

- In kaart brengen van de verschillende energiestromen van de voorbehandeling van de buitenlucht in de gekozen luchtbehandelingskast (LBK).
- In kaart brengen van optimalisatiemogelijkheden van de klimaatregeling, rekening houdend met de eisen en wensen.
- Vaststellen van mogelijkheden om duurzame energiebronnen en technieken te benutten middels literatuur onderzoek.
- Modelleren en simuleren van het energieverbruik en CO₂ uitstoot in de bestaand situatie en met de bestaande regeling.
- Modelleren en simuleren van het energieverbruik en CO₂ uitstoot na het toepassen van een verbeterde regeling voor de behandeling van de buitenlucht.
- Modelleren en simuleren van het energieverbruik en CO₂ uitstoot bij het benutten van duurzame energiebronnen en technieken voor de voorbehandeling van de buitenlucht.

1.4. Onderzoek aanpak

Om de vastgestelde doelstellingen te kunnen bereiken wordt het onderzoek verdeeld in twee fasen:

- Fase 1 : de klimaatregeling wordt geoptimaliseerd.
- Fase 2: de mogelijkheden om duurzame energiebronnen en technieken te benutten worden in kaart gebracht.

De onderzoeksstrategie zal zich baseren op het trias energetica model, een aanpak dat uit drie stappen bestaat:

1. het beperken van de energievraag.
2. het benutten van duurzame energiebronnen.
3. het efficiëntere gebruik van fossiele energiebronnen.

In eerste instantie wordt gezocht naar mogelijkheden om de huidige regeling te kunnen optimaliseren om de energievraag naar de verschillende bronnen te doen afnemen en het systeem op een efficiëntere manier te laten functioneren. Doel is vermindering van het energieverbruik en CO₂ uitstoot.

Voor een verdere verduurzaming van de installatie wordt er in het tweede onderzoek-niveau gekeken naar duurzame energiebronnen, die in combinatie met efficiëntere technieken benut kunnen worden.

De huidige situatie en de bijhorende energiestromen, verbruik en CO₂ uitstoot worden gesimuleerd in Matlab/Simulink. Vervolgens worden de verbeteringen naar aanleiding van de onderzoeksresultaten in het model geïntegreerd zodat het percentage vermindering van de uitstoot inzichtelijk gemaakt kan worden.

1.5. Demarcatie

Het onderzoek naar concrete oplossingen om het energieverbruik en CO₂ uitstoot te kunnen verminderen richt zich met name op een efficiëntere klimaatregeling en het toepassen van efficiëntere technieken. Doel is, via een simulatiemodel in Matlab/simulink, het inzichtelijk maken van de afname van het energieverbruik en CO₂ uitstoot na het toepassen van een verbeterde regeling en duurzame technieken en energiebronnen.

In de huidige situatie, wordt luchtrecirculatie toegepast wanneer de conditie van de retour lucht in term van temperatuur en vochtigheid beter is dan de aangezogen buitenlucht. De recirculatie klep wordt dan open gestuurd zodat er maximaal tot 55% lucht recirculatie plaats vindt. Deze regeling leidt tot significante energiebesparing. De ruimtecondities en het aandeel van luchtrecirculatie maken echter geen deel uit van de onderzoek scope en zullen niet worden gesimuleerd. Het doel van het simulatiemodel is het aantonen van het verschil in verbruiksgedrag tussen de huidige regeling en een her-ontworpen regeling. De focus wordt hier gelegd op de voordelen van een betere regeling en het inzetten van duurzame energiebronnen en technieken.

Het wel of niet meenemen van het recirculatie-aandeel in het model zal echter geen invloed hebben op het percentage afname van energieverbruik en CO₂ emissie omdat de invloed van luchtrecirculatie naar verwachting onveranderd zal blijven.

De binnenklimaatcondities in de laboratoria in de farmaceutische sector hebben betrekking op het thermische comfort van het werkend personeel maar ook op de bewaarcondities van de verschillende materialen en processen. Er geldt echter meestal "ruimte conditie" als enige voorwaarde. De verschillende materialen en processen en de daarbij horende bewaarcondities zullen hier niet geïnventariseerd en bestudeerd worden. De thermische comfort eisen, zoals gedefinieerd in de normen, zullen hier worden behandeld.

De financiële voor en nadelen van de gekozen methodes en/of technieken worden in het kader van dit onderzoek niet behandeld.

In het kader van deze studie is ervoor gekozen de voordelen van het benutten van zonne-energie te onderzoeken:

- Het mogelijke aandeel van elektriciteit uit zonne-energie in het totale elektriciteitsverbruik door het systeem;
- Het benutten van zonne-thermische energie voor het koelen of verwarmen van de buitenlucht.

Andere duurzame energie bronnen zoals wind, biomassa, geothermie, kernfusie en waterkracht worden omwille van praktische redenen niet onderzocht. De beperkte onderzoeksperiode van 17 weken laat het niet toe alle mogelijke duurzame bronnen te onderzoeken. Daarnaast worden bronnen zoals wind, geothermie, en kernfusie om financiële redenen vaak grootschalig toegepast.

2. Analysefase

De analyse fase bestaat uit het definiëren van het probleem, de onderzoeksvragen, de hypothesen en de te gebruiken variabele en constanten.

Literatuuronderzoek, gevolgd door een analyse van de huidige situatie maakt deel uit van deze onderzoeksfase. Naast de interne specificaties, zoals vermeld op de room parameter list, wordt er onderzoek gedaan naar de geldende normen op het gebied van thermische behaaglijkheid. (bijlage2).

De analysefase wordt afgesloten met het vaststellen van oplossingsrichtingen.

2.1. Probleemstelling en hypothesen

De eerste stap van de analyse fase is het duidelijk definiëren van het probleem en de belangrijke onderzoeksvragen vragen die dit oproept. Doel is te komen tot een antwoord.

2.1.1. Definitie van het probleem en onderzoeksvragen

In de cleanrooms en andere schone geclassificeerde omgevingen, dienen de specifieke ruimteparameters zoals ruimedruk, luchttemperatuur, relatieve vochtigheid altijd binnen de afgesproken limieten te blijven. De vastgestelde ruimtecondities in de laboratoria en andere schone omgevingen van het Valerio gebouw worden in de “room parameter list” verzameld (bijlage2).

De luchtbehandelingskasten van het Valerio gebouw zijn continu in bedrijf zodat de ruimtespecificaties bereikt kunnen worden. De huidige klimaatregeling is gebaseerd op vaste settings. Dit leidt tot situaties waarbij onnodig veel energie verbruikt wordt door de luchtbehandelingssystemen.

- Hoe kan de huidige klimaatregeling geoptimaliseerd worden, rekening houdend met de eisen en wensen met oog op energie-efficiëntie. In welke mate zal zo'n herontwerp tot energiebesparing leiden?
- Hoe kan de installatie verduurzaamd worden met gebruik van efficiëntere technieken en in welke mate kunnen duurzame energiebronnen benut worden?

In deze twee hoofdvragen zit de essentie van het onderzoek.

2.1.2. Opstellen van de hypothesen:

Om de twee hoofd –onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende hypothesen opgesteld:

Hypothese 1: een seizoen afhankelijke regeling, die rekening houdt met de buitenlucht condities en de toelaatbare waarden voor temperatuur en luchtvochtigheid. Deze regeling kan leiden tot een substantiële vermindering van het energieverbruik en CO₂ uitstoot.

Hypothese 2: het opwekken en benutten van duurzame energie in combinatie met moderne technieken kan het systeem verder verduurzamen en de CO₂ uitstoot uit de werking van de gekozen LBK verder verminderen.

De verkregen resultaten uit het op te bouwen simulatiemodel zullen worden gebruikt om deze twee hypothesen te toetsen.

2.1.3. Validatie van de hypotheses

Om de twee oorspronkelijke hypotheses te kunnen toetsen worden de verschillen in het verbruiksgedrag van het systemen met de bijhorende CO₂ emissie in de volgende drie scenario's gesimuleerd:

- Huidige situatie gebaseerd op vaste setpoints voor luchttemperatuur en absolute vochtigheid van 17°C respectievelijk 7,5g/kg voor de (voor)behandelde lucht in de LBK.
- Herontwerp van de klimaatregeling gebaseerd op vast gestelde ranges voor luchttemperatuur en absolute vochtigheid op basis van de bevindingen in de analyse fase.
- De invloed, in term van CO₂ uitstoot, van het benutten van duurzame energiebronnen en technieken voor een verdere verduurzaming van de installatie na het herontwerp.

2.1.4. Beschrijving van de energiestromen behorend bij het gekozen systeem

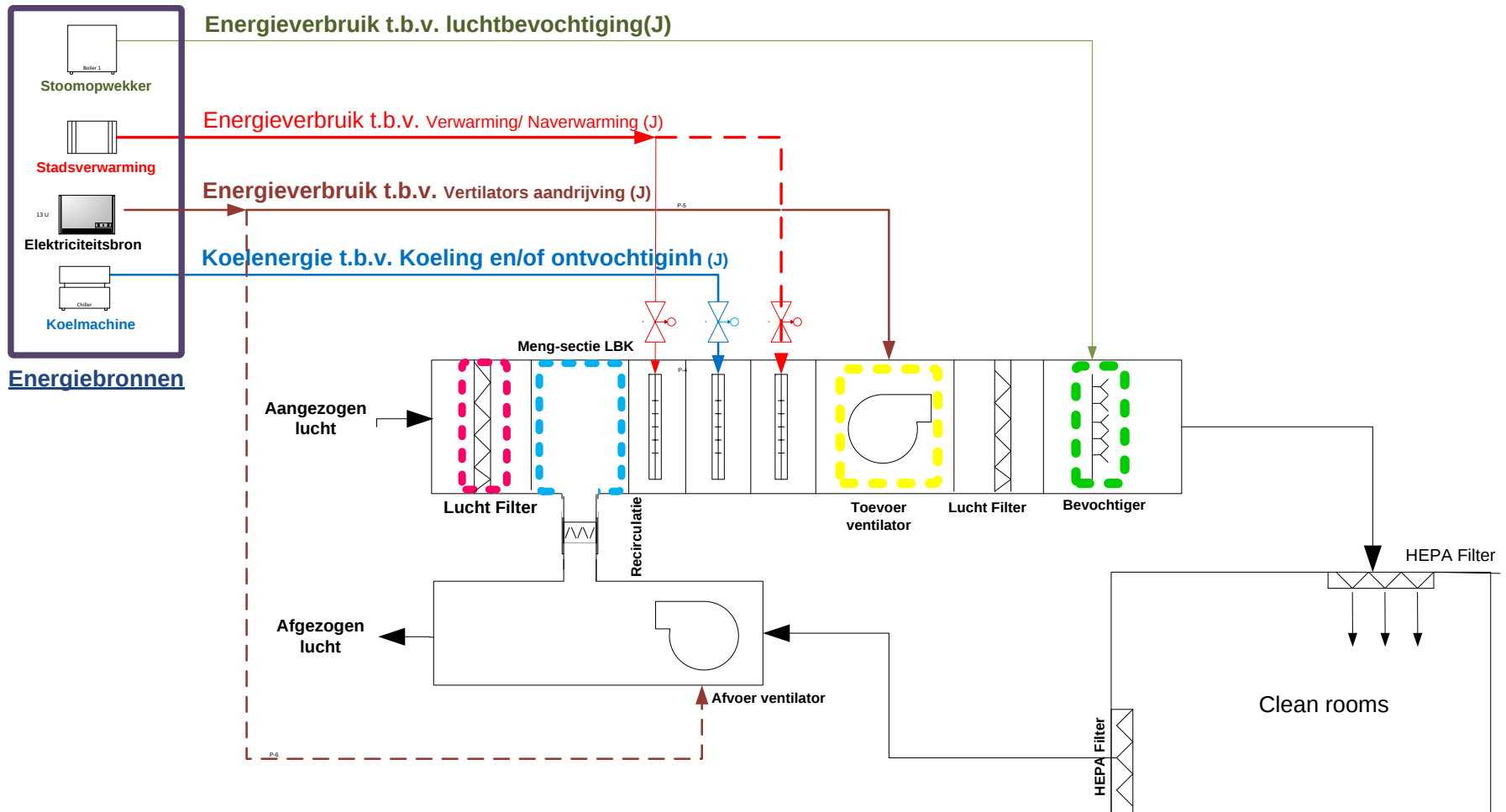
Luchtbehandelingssysteem AHU3 is ontworpen om een constant luchtdebiet van 29000 m³/h te verplaatsen zodat de afgesproken ruimte drukken en ventilatievouden behaald kunnen worden. Voor het continu leveren van dezelfde luchtkwaliteit maakt het systeem gebruik van vaste setpoints voor de luchttemperatuur en absolute vochtigheid van 17°C en respectievelijk 7,5g/kg.

De volgende energiestromen en bronnen maken deel uit van het systeem:

- Stadsverwarming voor het verwarmen en/of na-verwarmen van de buitenlucht.
- Stoomgenerator voor de bevochtiging van de buitenlucht.
- Gekoeld water uit koelmachine voor het koelen en/of ontvochtigen van de buitenlucht naar de vast gestelde setpoints.
- Elektrische energie voor het aandrijven van de ventilatoren.

Afbeelding1 geeft een overzicht van deze vier belangrijkste energiestromen.

OVERZICHT VAN DE ENERGIESTROMEN LUCHTBEHANDELINGSSYSTEEM 3 (Valerio)



Afbeelding 1 principeschema van de energiestromen t.b.v. luchtbehandelingssysteem (Valerio)

2.2. Definitie van de variabele en constanten

De te gebruiken variabelen en constanten hebben betrekking op de energieverbruiks-berekeningen op basis van de verschillende energiestromen.

2.2.1. Uitgangspunten en toelichting van de gebruikte rekenmethodes

Om de onderzoeksresultaten te kunnen evalueren zullen het huidige en het te verwachten energieverbruik en CO₂ emissie voor het gekozen systeem berekend worden. Doel is het verkrijgen van concrete en meetbare onderzoeksresultaten.

Berekening van het totale energieverbruik

Het energieverbruik van het gekozen systeem wordt zoals aangegeven, gemoduleerd op basis van de verschillende energiestromen. Het totale energieverbruik, uitgedrukt in de SI-eenheid Joule, is gebaseerd op de verbruikte vermogens uit de vier verschillende energiestromen.

Voor de relatie tussen energie-en vermogensverbruik, geldt de vergelijking:

$$E = P \times t \text{ [J] waarbij:}$$

E = energieverbruik

P = verbruikte vermogen

t = tijd.

Energieverbruik en vermogen zijn variabele terwijl de gekozen simulatie tijd (t) een constante is. Het totale energieverbruik (E_{totaal}) wordt automatisch door het simulatiemodel berekent als de som van de verbruiken uit de verschillende energiestromen, zodat:

$$E_{\text{totaal}} = \sum E$$

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{koeling}} + E_{\text{verwarming}} + E_{\text{elektrisch}} + E_{\text{stoomgenerator}} \text{ waarin,}$$

E_{totaal} = het totaal energieverbruik door het gekozen systeem in het gekozen jaar

E_{koeling} = het totaal energieverbruik voor het koelen en/of ontvochtigen van de lucht

$E_{\text{verwarming}}$ = het totale energieverbruik uit stadsverwarming in het gekozen jaar

$E_{\text{elektrisch}}$ = het totale verbruikte elektrisch energie door de ventilatoren (toevoer + afvoer) van het gekozen systeem. Het elektrische verbruik van regelcomponenten zoals PLC, frequentieregelaars en regelkleppen wordt hier verwaarloosd.

$E_{\text{stoomgenerator}}$ = het totale energieverbruik uit de stoominstallatie voor t.b.v. van luchtbevochtiging.

Berekening van de totale CO₂ uitstoot

De totale CO₂ uitstoot is ook gebaseerd op de emissie afkomstig van de werking van de verschillende deelsystemen en de bijhorende energiebronnen.

De CO₂ uitstoot uit elektriciteitsverbruik wordt in het kader van dit onderzoek berekent volgens de “Integrale methode”, zoals beschreven in de publicatie “Berekening van CO₂ emissie, het primaire fossiel energieverbruik en het rendement van elektriciteit in Nederland” [20]. In deze publicatie van het Centrale Bureau voor Statistiek (CBS) in samenwerkingsverband met Harmelink Consulting, het Ministerie van Economische Zaken, Energieonderzoek Centrale Nederland (ECN) en Plan Bureau voor Leefomgeving (PBL), wordt het verschil tussen de “integrale methode” en de referentiepark methode aangekaart. Bij elke methode horen kengetallen voor het berekenen van de CO₂ uitstoot. In principe wordt de gehele bestaande mix van elektriciteitsproductiemiddelen van een groep van landen meegenomen bij het berekenen van de kengetallen bij de integrale methode. De referentiepark methode houdt rekening met veranderingen in de vraag van elektriciteit als gevolg van energiebesparing of de inzet van duurzame energie[20]. Voor de CO₂ emissie (CO₂) geldt:

$$CO_2 = f \cdot E \text{ waarin}$$

CO₂= Koolstofdioxide emissie [kg]

E= energieverbruik [Joule]

f= emissiefactor per energie-eenheid

De totale CO₂ emissie ($CO_{2\text{totaal}}$) in de gekozen periode is de som van de emissies afkomstig uit de werking van de verschillende deelsystemen, zodat:

$$CO_{2\text{totaal}} = \sum CO_2$$

$$CO_{2\text{totaal}} = CO_{2\text{koeling}} + CO_{2\text{verwarming}} + CO_{2\text{elek}} + CO_{2\text{stoom}} \text{ waarbij:}$$

$CO_{2\text{koeling}}$ = totale uitstoot als gevolg van de koeling en/of ontvochtiging in de gekozen periode

$CO_{2\text{verwarming}}$ = totale uitstoot als gevolg van verwarmingsvermogen in de gekozen periode

$CO_{2\text{elek}}$ = totale uitstoot door elektriciteit verbruik door het systeem in de gekozen periode

$CO_{2\text{stoom}}$ = totale uitstoot als gevolg van luchtbevochtiging

De CO₂ uitstoot is afhankelijk van het energieverbruik maar ook van de energiebron. Het simulink model genereert de totale uitstoot op basis van de CO₂ emissie-factor (kg/kWh) per energiebron. De volgende emissiefactoren worden gebruikt per energiebron

Soort energie	Energiebron	CO ₂ emissie factor	Bron uit literatuur lijst
Gekoeld water uit koelmachine	Elektriciteit	0,47 kg/kWh	4
Elektrische energie (t.b.v. aandrijving ventilatoren)	Elektriciteit	0,47 kg/kWh	4
Stadsverwarming uit stoom-en gas (STEG) centrales	Aardgas, steenkool en/of biomassa	35,97 kg/GJ	5
Stoom uit stoomgenerator	aardgas	56,5kg/GJ	19

Tabel 2: gebruikte emissie factoren en bronvermelding

2.2.2. Vaststellen van de variabelen en constanten

Zoals hierboven aangegeven wordt het totale energieverbruik vastgesteld op basis van de gebruikte vermogens door de verschillende subsystemen. Het verbruikte vermogen uit elke energiebron wordt hier vastgesteld in combinatie met de bijhorende variabele en constante.

2.2.2.1. Koellast vermogen uit luchtkoeling en/of ontvochtiging

Om ervoor te zorgen dat het binnenklimaat aan de afgesproken specificaties voldoet wordt de vochtigheid in de buitenlucht gemeten door middel van sensoren. Wanneer de buitenlucht warmer is dan de toegestane maximum temperatuur, wordt deze afgekoeld in de luchtbehandelingskast. Bij te vochtige buitenlucht moet het vochtgehalte gereduceerd worden. Door de lucht snel af te koelen vindt er een faseverandering plaats in de vorm van condensatie.

Het koellast vermogen ($P_{koeling}$) is het totale vermogen dat per gekozen periode nodig is om de buitenluchttemperatuur en/of absolute vochtigheid te laten dalen. We maken hier het verschil tussen voelbare en latente koellast.

Voelbare en latente koellast

De warmte-inhoud van een lucht-waterdampmengsel is opgebouwd uit latente en voelbare warmte. De *voelbare warmte* is de warmte die nodig is, of vrijkomt bij het verwarmen en koelen van lucht en waterdamp.

De *latente warmte* vertegenwoordigt de verdampingswarmte van waterdamp, of de opslag van warmte of koude.

Voelbare koellast ($\dot{Q}_{voel}$)

$$\dot{Q}_{voel} = \phi_m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [W] \quad \text{waarin:}$$

ϕ_m : de massastroom

C_p : soortelijke warmte van lucht

ΔT : het verschil tussen de buitenluchttemperatuur en de vastgestelde dauwpunttemperatuur.

Latente koellast ($\dot{Q}_{lat}$)

$$\dot{Q}_{lat} = \phi_m \cdot \Delta x \cdot \Delta h \quad [W] \quad \text{waarbij}$$

ϕ_m = massastroom (kg/s)

Δx = afname van de vochtgehalte (kg/kg) na ontvochtiging.

Δh = 2477, 9 kJ/kg: Enthalpie verandering.

Voor het totale koellast vermogen ($P_{koeling}$) geldt:

$$P_{koeling} = \dot{Q}_{voel} + \dot{Q}_{lat} \quad [W]$$

Het betreft hier een elektrische aangedreven koelmachine. Het is daarom van belang om rekening te houden met de systeem-efficiëntie. Voor koelsystemen gebruikt men echter de term COP om de efficiëntie aan te duiden. De COP-waarde geeft de verhouding aan tussen de verkregen bruikbare koeling en de opgenomen elektrische energie of vermogen door de koelmachine.

$$COP = \frac{E_{net}}{E_{verbr.}} \quad \text{Waarin}$$

E_{net} = geleverde koelenergie tijdens het koelen en/of ontvochtigen van de buitenlucht

$E_{verbr.}$ = verbruikte elektrische energie

Voor het verbruikte energie door het koelsysteem geldt dus:

$$E_{verbr.} = \frac{E_{net}}{COP} = \frac{P_{koeling} \cdot t}{COP} \text{ waarin}$$

$t = \text{tijdsperiode}$

$P_{koeling}$ = Verbruikte koelvermogen

De variabele en constanten horend bij de koellastberekeningen worden in tabel 3 in kaart gebracht.

Parameter	Beschrijving/toelichting	Eenheid	Constant of variable?
$\dot{Q}_{voel}$	Voelbare koellast	W	variabel
Φ_m	Massa stroom vastgesteld op basis van de vaste volumestroom	Kg/s	Constant
C_p	De hoeveelheid energie aan die nodig is om 1 kg lucht met 1 graad in temperatuur te laten stijgen	J/kgK	Constant
ΔT	Verschil tussen buitenluchttemperatuur en de gewenste minimaal dauwpunttemperatuur Op basis van de gewenste minimum vochtgehalte van 6.5 g/kg is de dauwpunttemperatuur vastgesteld op 8 graden ° dp	°	variabel
$\dot{Q}_{lat}$	latent koellast	W	variable
Δx	Het verschil in vochtgehalte (waterdamp) na het ontvochtigen (reduceren van waterdamp in de lucht)	J/kgK	Variabel
Δh	Enthalpie verandering tijdens de overgang van vloeistof (water) naar gas (stoom) bij stoomproductie	°	variabel
COP	Coëfficiënt of Performance koelmachine. (de koelmachine horend bij dit systeem heeft COP van 3,5)	Geen	Constant
E_{net}	Geleverde energie door de koelmachine tijdens het koelen en/of ontvochtigen van de buitenlucht	J	variabel
$E_{verbr.}$	Totale verbruikte energie door de koelmachine	J	variabel
$E_{koeling}$	Totale energieverbruik als gevolg van koeling en/of ontvochtiging	Joule	variabel
$P_{koeling}$	Verbruikte koelvermogen door het systeem	W	variabel

Tabel 3: toelichting van de gebruikte variabelen en constanten voor de koellastberekeningen

2.2.2.2. Verbruikte vermogen ten behoeve van verwarming en/of na verwarming

Het verbruikte vermogen uit stadsverwarming wordt berekend op basis van:

$$P_{\text{verwarming}} = \phi_m \times \Delta h \quad [\text{W}] \text{ waarbij:}$$

$P_{\text{verwarming}}$ = verbruikte vermogen uit stadsverwarming ten behoeve van luchtverwarming.

ϕ_m = massastroom (kg/s)

Δh : enthalpie verandering tijdens het opwarmen van de lucht (kJ/kg)

$$\Delta h = C_p \times \Delta T \quad [\text{kJ/kgK}]$$

Parameter	Beschrijving/toelichting	Eenheid	Constant of variable?
$P_{\text{verwarming}}$	Verbruikte vermogen t.b.v. luchtverwarming	W	variabel
ϕ_m	Massa stroom vastgesteld op basis van de vaste volumestroom van 29000 m ³ /h voor het gekozen systeem	Kg/s	Constant
Δh	Enthalpie verandering tijdens het verwarmen van de buitenlucht.	° kJ/kgK	variabel

Tabel 4: toelichting van de gebruikte variabelen en constanten voor het verbruikte vermogen uit stadsverwarming

2.2.2.3. Verbruikte elektrische vermogen door de ventilators

$$P_{\text{fan}} = \frac{\Delta p \times \phi_v}{\eta} \text{ waarbij}$$

P_{fan} = ventilator vermogen

Δp = drukverschil

ϕ_v = volumestroom lucht

η = rendement ventilator

Parameter	Beschrijving/toelichting	Eenheid	Constant of variable?
P_{fan}	Vermogen ventilator	W	variabel
Δp	Drukverschil over de toevoer en afvoer ventilators $\Delta p = 1379 \text{ Pa}$	Pa	variabel
ϕ_v	Vastgestelde luchtdebiet voor het gekozen systeem rekening houden met de gewenste ruimte drukken	m ³ /h	Constant
η	Rendement ventilator = 0.60 ¹	Dimensieloos	constant

Tabel5: toelichting van de gebruikte variabelen en constanten voor het berekenen van het ventilatievermogen

¹ Uit ontwerpdocumentatie van het systeem

2.2.2.4. Vermogen uit stoomgenerator

In de wintermaanden zorgt de lage buitentemperatuur voor een relatief droge lucht. Er moet daarom bevochtiging plaats vinden in de LBK om waterdamp toe te voegen aan de aangezogen buitenlucht zodat deze aan de ruimte specificaties kan voldoen.

Het gebruikte ketelvermogen ($P_{stoomgenerator}$) wordt berekend op basis van de massastroom van de lucht, de massa van de toevoegde waterdamp (Δx) en de enthalpie verandering (Δh) bij bevochtiging :

$$P_{stoomgenerator} = \frac{(\phi_m \times \Delta x \times \Delta h)}{\eta} \quad [W] \text{ met}$$

ϕ_m = massastroom. (kg/s)

Δx = toename van de vochtgehalte (kg/kg) als gevolg van bevochtiging.

Δh = enthalpie verandering tijdens de stoomproductie (= 2739 kJ/kg). Dit enthalpie verschil is vastgesteld met behulp van tabellen uit "Toegepaste energieleer: warmte en stromingsleer" (Taal, 2012) [1].

η = Rendement

Parameter	Beschrijving/toelichting	Eenheid	Constant of variable?
$P_{stoomgenerator}$	Verbruikte vermogen door stoom generator t.b.v. luchtbevochtiging	W	variabel
ϕ_m	Massastroom aangezogen lucht	Pa	constant
Δx	Toename van vochtgehalte als gevolg van luchtbevochtiging met stoom	m ³ /h	variabel
Δh	Enthalpieverandering tijdens de productie van stoom	kJ/kg	constant
η	Rendement van de stoomketel=90% op basis van beschikbare ontwerp documenten		

Tabel 6: toelichting van de gebruikte variabelen en constant voor het berekenen van het ventilatorvermogen

2.3. Literatuur onderzoek

Naast de interne referentie-documenten, met name de room parameter list en de "Memo Temperature policy Crucell" (bijlage 3), wordt er in het kader van deze studie ook onderzoek gedaan naar de geldende normen op het gebied van thermische behaaglijkheid. Tevens zal deze onderzoeksfase veel optimalisatiemogelijkheden vaststellen op basis van vakliteratuur.

De "room parameter list" biedt een overzicht van de ruimte specifieke parameters zoals luchttemperatuur en vochtigheid, inclusief de relevante alarm-grenzen. Het document refereert echter niet aan normen en/of voorschriften die als basis werden gebruikt voor het vaststellen van de vermelde ruimte parameters.

De "Memo Temperature Policy Crucell" is een referentie document van de "Environment Health and Safety" (EHS) afdeling van Janssen Vaccine & Prevention waarin de gewenste temperatuur

in de laboratoria vermeld wordt. In het document wordt gebruik gemaakt van de beschreven methodiek in NEN-EN-ISO 7730 om drie comfort-gebieden vast te stellen, rekening houdend met de kleding:

- 16°C - 22°C: optimaal
- 22°C - 25°C: "attention level" (aandachtsgebied)
- > 25°C : : threshold (kritische grens)

2.3.1. Thermische behaaglijkheid

In het algemeen geldt dat de mate waarin mensen het binnenklimaat als wel of niet comfortabel ervaren afhankelijk is van de warmte-isolatie van de kleding en de ontwikkelde interne lichaamswarmte, die op zijn beurt weer afhankelijk is van de lichamelijke activiteit.

Twee belangrijke indicatoren worden gebruikt om het comfort-niveau te categoriseren[15]:

- Predicted Mean Vote(PMV) of voorspelde gemiddelde waarneming is een index die in de jaren 60 door de Deense professor Ole Franger werd geïntroduceerd naar aanleiding van onderzoeken naar thermische behaaglijkheid. Het is een rekengrootheid die de gemiddelde waardering voorspelt van een groep personen over de thermische gewaarwording aan de hand van de volgende zevenpuntenschaal:
 - o +3 heet,
 - o +2 warm
 - o +1 enigszins warm
 - o 0 neutraal
 - o -1 enigszins koel
 - o -2 koel
 - o -3 koud
- Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) is het voorspelde percentage ontevredenheid dat berekend wordt op basis van de PMV.

Op basis van deze twee indexen worden de binnenklimaat- eisen in drie categorieën verdeeld:

Categorie A is de strengste klasse. De PPD bedraagt hier maximaal 6%.

De ISO/TS 14415:2005 (ergonomics of the thermal environment – application of international standards of people with special requirements) voorziet deze categorie voor een aantal doelgroepen zoals ouderen, kinderen, zwangere vrouwen, etc.

Categorie B : de PPD-max is hier 10%. Dit is de standaardcategorie. In de categorie vallen alle nieuwe gebouwen bestemd voor gezonde mensen.

Categorie C: de PPD-max is 15%. De kans op ernstige hinder is wel nog beperkt, maar er is geen garantie voor algemene tevredenheid of een comfortabele werkomgeving. Deze categorie mag enkel toegepast worden op bestaande gebouwen of tijdelijk bij renovatie.

2.3.2. Standaardisatie, en normalisatie

De meeste gebruikte internationale standaard is de “NEN-EN-ISO 7730” getiteld: *‘Klimaatomstandigheden – Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV- en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid’*. De comfort indexen PMV en PPD van Fanger zijn vanaf 1984 in deze norm opgenomen. Volgens de NEN-EN-ISO 7730 2005 is het belangrijk voor het evalueren en bepalen van thermische behaaglijkheid om de comfortcategorie van de werksituatie vast te stellen.

Naast de “NEN-EN-ISO 7730: 2005” gelden de volgende normen ook als referentie op het gebied van thermisch behaaglijkheid [22]:

- NEN-EN 15251: 2007 „Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek”.
- NEN-ISO 9920:2009 en: Klimaatomstandigheden - Bepaling van de thermische isolatie en verdampingsweerstand van kleding (corrected and reprinted). Deze vervangt de NEN-ISO 9920:2007-06 en . deze internationale standard beschrijft methodes om de thermische eigenschappen in kunnen schatten die gerelateerd zijn aan het dragen van bepaalde kleding ensemble (zoals in laboratoria). Het document kaart de invloed van bewegingen van het lichaam en de lucht penetratie op de thermische isolatie en waterdamp weerstand.
- NEN-EN-ISO-11079:2008 en : Klimaatomstandigheden - Bepaling en interpretatie van het uitoefenen van koude belasting gebruikt bij isolatie van kleding (IREQ) en plaatselijk koelvermogen (NEN, 2016) [22].

Normen en standaarden zijn echter richtlijnen die de kaders definiëren van een aanvaardbaar binnenklimaat. Voor praktisch toepasbare methodes moet de engineer daarom vaak, naast de geldende normen, vakliteratuur raadplegen.

2.3.3. ISSO 68

ISSO is een onafhankelijk kennis instituut dat zich bezig houdt met onderzoeksactiviteiten, advisering en ontwerpen in de installatietechniek. Het instituut is opgericht in 1974 en bestaat uit deskundigen uit de installatiesector. De ISSO publicaties worden vaak gebruikt door ingenieurs voor praktisch uitvoeringsdetails.

In de ISSO publicatie 68, getiteld: ‘Energetisch optimale stook-en koellijnen: stook-en koellijnen met betrekking tot de centrale luchtbehandeling van klimaatinstallaties van kantoorgebouwen’, wordt beschreven hoe significante energiebesparingen bereikt kunnen worden door middel van een praktische afstemming tussen de werkelijke warmte-/koude vraag van het gebouw en het warmte-/koude-aanbod van de klimaatinstallatie[16].

In veel gebouwen maakt de klimaatregeling gebruik van vaste inblaastemperaturen op basis van een setpoint. Dit leidt tot:

- verspilling van energie door in het voor- en najaar gelijktijdig te koelen en verwarmen;
- langdurig te warm/te koud bij ongebruikelijke temperaturen (ten opzichte van het seizoen).

Dit soort energieverpilling kan zonder hoge kosten voorkomen worden als de klimaatregeling zodanig wordt ingesteld dat het warmte of koude aanbod afhankelijk is van de vraag vanuit het gebouw. Volgens deze ISSO publicatie leidt deze methode tot comfort verbetering.

2.3.4. De wetgeving

In Nederland bestaat een wettelijke kader omtrent het thermische comfort in gebouwen.

Arbo beleid

Op het gebied van het binnenklimaat worden door de arbeidsomstandighedenwet, de Arbowet, geen meetbare eisen gesteld. Wel staat er, in artikel 1, lid 1 een algemene eis die aangeeft dat de werkgever voor de veiligheid en de gezondheid van de werknemers moet zorgen wat betreft alle met de arbeid verbonden aspecten, dus ook het thermische comfort van de werknemer [10].

Het Arbeidsomstandighedenbesluit, het Arbo besluit, stelt verder minimum eisen omtrent de luchttemperatuur in een werkplek. Artikel 6.1 lid 1 luidt: “Rekening houdend met de aard van de werkzaamheden die door de werknemers worden verricht en de fysieke belasting die daar het gevolg van is, veroorzaakt de temperatuur op de arbeidsplaats geen schade aan de gezondheid van de werknemers.”.

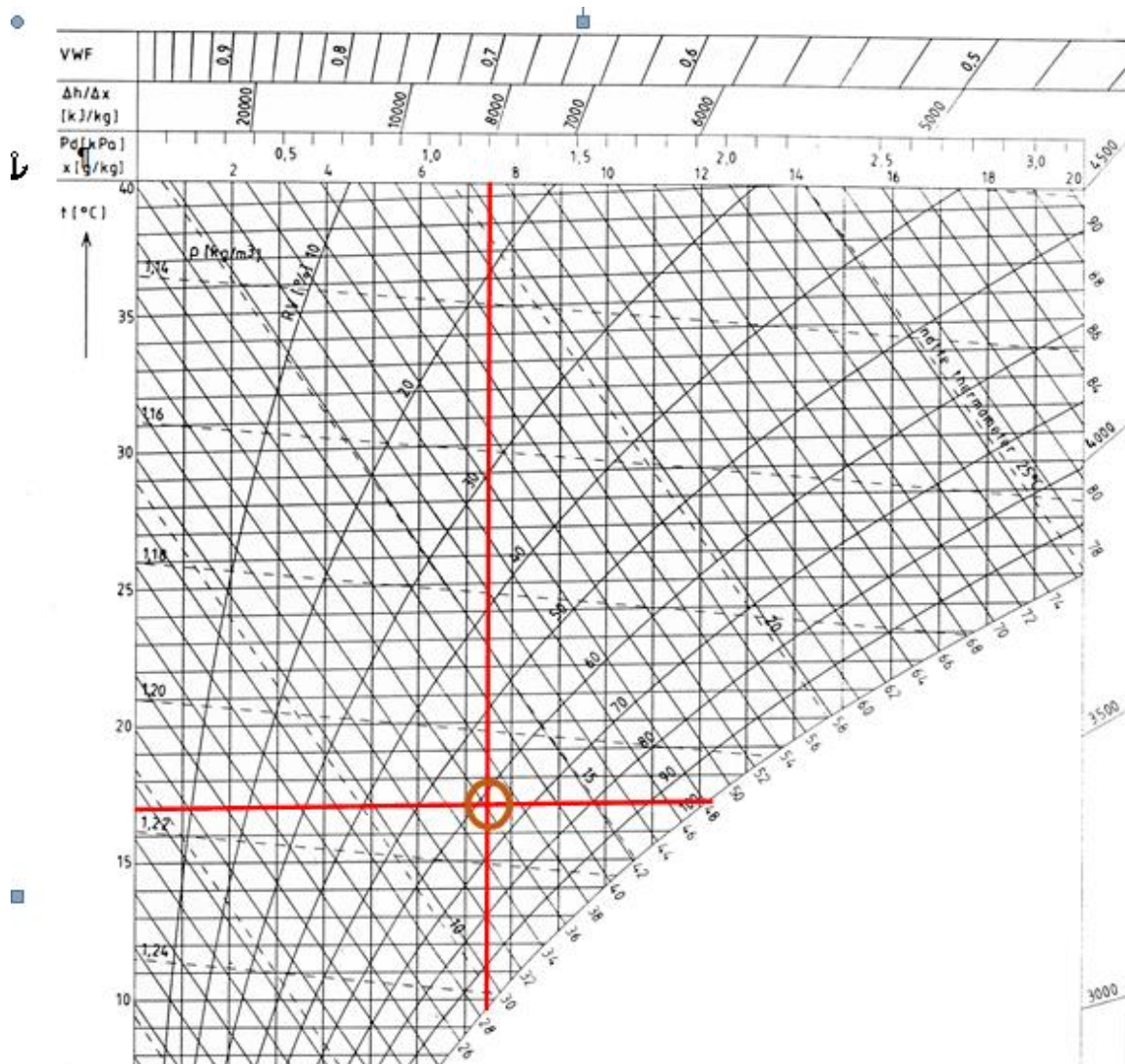
Het is hier op te merken dat de Arbowetgeving geen specifieke eisen stelt voor laboratoria en andere “schone omgevingen”.

Bouwbesluit

In het Bouwbesluit worden de minimale eisen verzameld waaraan alle bouwwerken in Nederland moeten voldoen. Het document bevat daarom ook eisen voor wat betreft het thermische binnenklimaat. Het bouwbesluit stelt geen specifieke eisen voor bestaande gebouwen. Voor nieuwbouw zijn er ten aanzien van de thermische isolatie wel eisen opgesteld. In Artikel 5.3 lid 1 van het Bouwbesluit uit 2012 wordt gesteld dat een uitwendige scheidingsconstructie van een nieuw gebouw een volgens NEN 1068 bepaalde warmteweerstand moet voldoen aan ten minste 4,5 m² K/W [11].

2.4. Analyse van de huidige situatie

Op de ruimteparameterlijst is de afgesproken luchtkwaliteit in de ruimtes gekenmerkt door vaste setpoints voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid van 19°C respectievelijk 50%. De klimaatregeling voor de voorbehandeling in de LBK is om die reden ook gebaseerd op 17°C voor de luchttemperatuur en 7,5g/kg voor de absolute vochtigheid. Deze gewenste conditie van de (voor) behandelde lucht wordt in onderstaande afbeelding aangegeven met behulp van een Mollier diagram.



Afbeelding2: mollier diagram met in rood aangemerkt de gewenste condities op basis van de huidige regeling

De buitenlucht wordt bevochtigd of ontvochtigd tot het 7,5 g/kg vochtgehalte bevat, de luchttemperatuur wordt naar 17°C opgewarmd of afgekoeld.

De eerste indruk tijdens de analyse van de huidige situatie is de vrij grote kloof tussen de afgesproken alarm-grenzen op de room parameter lijst, 16°C- 25°C en de vast gestelde setpoints voor de ruimte temperatuur en de relatieve vochtigheid 19°C en 50%. Dit toont de gebreken van het huidige regelsysteem aan. De afgesproken alarm grens ligt tussen de 16 en 25°C, er wordt gestreefd naar vaste luchttemperatuur en relatieve vochtigheid van 19°C en 50%.

Het lijkt duidelijk dat de regeling aangepast kan worden onder handhaving van thermische comforteisen en binnen de limieten van de room parameter list.

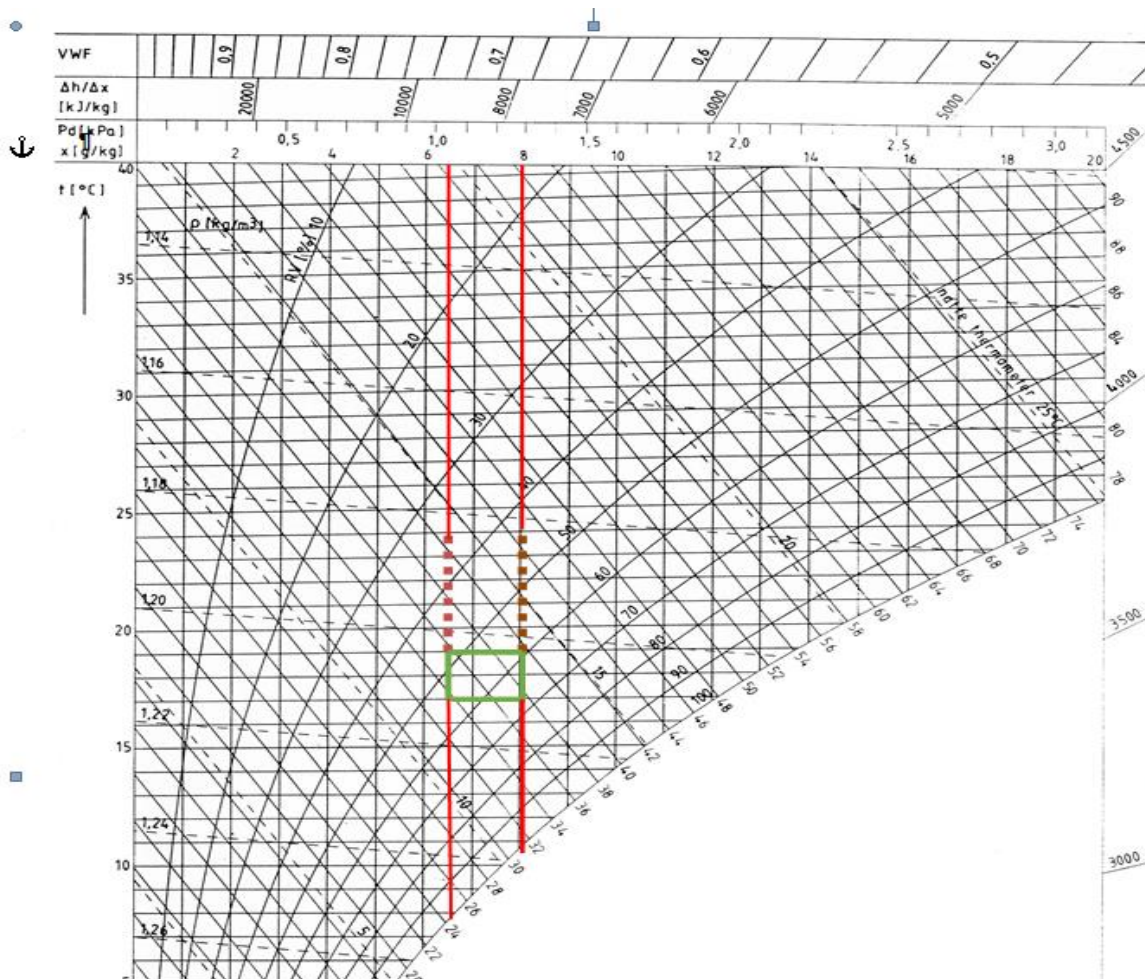
2.5. Oplossingsrichtingen

Op basis van de bestudeerde vakliteratuur en de analyse van de interne referentie-documenten bij Janssen Vaccines & Prevention, kunnen oplossingsrichtingen vastgesteld worden voor het gedefinieerde onderzoeksprobleem.

2.5.1. Verbetering van de klimaatregeling

Geïnspireerd door de beschreven methodiek in de ISSO publicatie 68 [16] en de afgesproken grens- waarden voor de ruimtetemperatuur en relatieve vochtigheid op de room parameter list, wordt hier een regeling ontworpen.

Uit de analyse van de gemeten ruimtetemperaturen data in 2014 en 2015 blijkt dat de luchttemperatuur stijgt tussen 2°C tot 3°C na de voorbehandeling in de LBK. Deze stijging is afhankelijk van de interne warmtelasten per ruimte. Rekening houdend met deze waargenomen temperatuur stijging kan er een regeling ontworpen worden gebaseerd op de in het groen geschetste regelgebied op de Mollier diagram in afbeelding 3.



Afbeelding3: Mollier diagram met een schetst van het geoptimaliseerde regelgebied

Deze geoptimaliseerde regeling is gebaseerd op een range van [17°C - 19°C] voor de behandelde luchttemperatuur en 6,5g/kg – 8g/kg voor de absolute vochtigheid na behandeling. Hiermee kan de volgende conditie behaald worden:

- In de winter een luchttemperatuur van 17°C aangeboden vanuit de LBK met een vochtgehalte van 6,5g/kg.
- In de zomer een luchttemperatuur van 19°C vanuit de LBK met een absolute vochtigheid van 8g/kg.

Als er uitgegaan wordt van de waargenomen stijging van de luchttemperatuur tussen de LBK en de verschillende ruimtes, kan met deze regeling de volgende ruimtecondities verwacht worden:

- Luchttemperatuur variërend van 19°C tot 22 °C afhankelijk van het seizoen en de interne warmtelast.
- Een relatieve vochtigheid variërend van 40% tot 60% afhankelijk van de interne warmtelasten en het seizoen.

2.5.2. Benutten van duurzame energiebronnen

Elektrische en thermische energie kunnen op basis van de beschikbare oppervlakte opgewekt worden uit zonne-energie. Het simulatiemodel zal het aandeel van elektrische en thermische energie voor een verduurzaming van de installatie automatisch berekenen.

2.5.2.1. Koelen met zonne-energie

Zoals algemeen bekend, is zonne-energie afhankelijk van de weersomstandigheden en de locatie. Om “ongunstige” periodes te kunnen overbruggen zijn luchtbehandelingssystemen, gebaseerd op zonne-thermische energie, vaak gekoppeld aan stoominstallaties, stadsverwarming of warmte van een WKK-installatie. Wereldwijd zijn er steeds meer installaties die gebruik maken van zonne-thermische energie voor de luchtbehandeling [3].

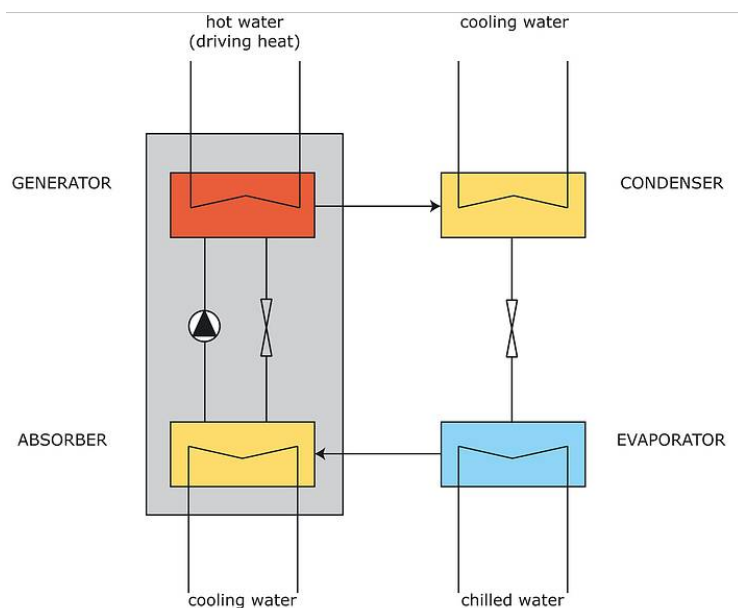
Voor het koelen en/of ontvochtigen van de buitenlucht worden de volgende technieken het meest toegepast:

- Absorptie koelmachines
- Adsorptie koelmachines
- Desiccant Evaporative Cooling (DEC).

Absorptie koelsystemen

De belangrijkste onderdelen van een absorptiekoelsysteem zijn de energiebron en de absorptiekoelmachine. De prestatie van het systeem is erg afhankelijk van deze twee componenten. De koelmachine bestaat uit een generator, een verdamper, een condensor en een absorber. Het gebruikte koudemiddel is meestal water. Nadat het water, in de verdamper, op lage druk gasvormig wordt, wordt het opgenomen (geabsorbeerd) door het absorptiemiddel (H₂O/LiBr). Een circulatie- pomp verplaatst constant het “absorptiemix” naar de generator waar het koudemiddel, op hoge druk en temperatuur, weer gescheiden wordt van het absorptiemateriaal. Het koudemiddel wordt vervolgens gecondenseerd door toepassing van gekoeld water en via een expansieventiel opnieuw naar de verdamper verplaatst [12].

Absorptiekoelmachines kunnen met warmwater of stoom als energiebron voor de generator werken. De met warmwater gevoede koelmachines zijn het meest geschikt voor het benutten van zonne-thermische energie.



Afbeelding4: absorptie koeling principe (bron: <http://www.solair-project.eu/142.0.html>)

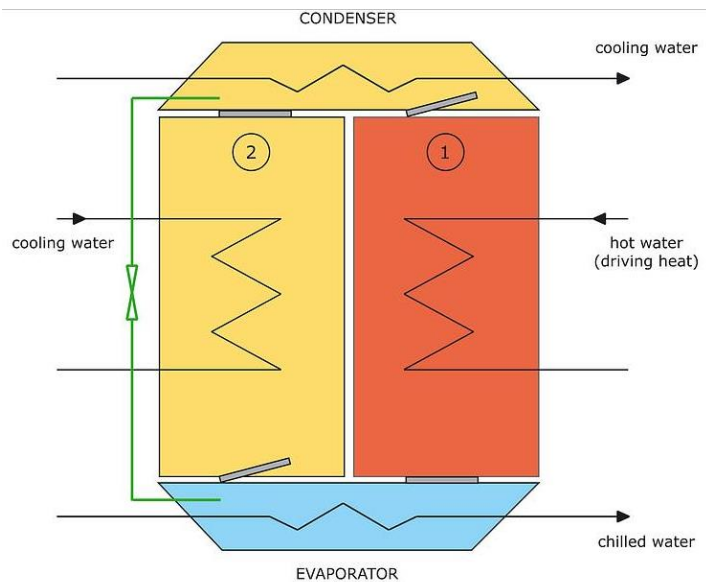
Adsorptie koelmachines

Het grootste verschil tussen adsorptie-en absorptiekoelmachines is dat er bij adsorptie-koeling gebruikt wordt gemaakt van vaste droogmiddel in plaats van vloeistoffen. Het gebruikte koude middel is water en het absorptiemiddel, droogmiddel, is een hygroscopische stof zoals silicagel of zeolieten. [12]

Zoals weergegeven in bovenstaande afbeelding bestaat een adsorptiekoelsysteem uit twee sorptiecompartimenten: een condensor en een verdamper. In de verdamper worden de water moleculen bij lage druk “gebonden” aan het sorptiemiddel. De warmte in het water wordt in deze fase afgevoerd waardoor het temperatuur daalt. Vervolgens wordt het koudemiddel het water, dat gebonden is aan het sorptiemateriaal bij hoge druk en temperatuur weer “losgemaakt” (gecondenseerd) in het eerste compartiment, de condensor, gebruik makend van bijvoorbeeld zonne-thermische energie. Dit noemt men desorptie-proces.

Koelen met adsorptiekoelmachines wordt al toegepast in Europa, bijvoorbeeld Duitsland) en in Azië, zoals in Japan. Deze koeltechniek heeft echter een nadeel: het proces kan niet continu lopen doordat er gewerkt wordt met een vaste stof in plaats van een vloeistof. Het kan verzadigd raken. Om toch continu koude te kunnen leveren, koppelt men twee systemen in één

machine. De systemen wisselen steeds van functie. Het ene systeem levert koude terwijl de ander geregenereerd wordt. Adsorptiemachines lijken daarom duurder in aanschaf dan absorptiemachines. Ze hebben echter een belangrijk voordeel waardoor zij van een toenemende populariteit genieten. Deze koelmachines kunnen met lage temperaturen, 60°C redelijk goed presteren. [10]. Dat maakt ze erg interessant voor toepassingen in combinatie met zonne-energie.



Afbeelding5: principe werking adsorptiekoeling(bron: <http://www.solair-project.eu/142.0.html>)

DEC systemen

Desiccant Evaporative Cooling (DEC) systemen maken gebruik van het adsorptieve gedrag van de gebruikte materialen, meestal silicagel, om de waterdamp uit de buitenlucht te halen [3]. De lucht wordt gedroogd met een sorptiewiel, een langzaam draaiend wiel waarin adsorptie-materiaal zit dat vocht uit de lucht kan opnemen, zodat de luchtvochtigheid omlaag gaat.

Deze systemen maken ,in direct contact met de lucht, gebruik van water als koelmiddel.

3. ONTWERP FASE

Op basis van de vastgestelde rekenmethodes en de uitkomsten van de analysefase worden in de ontwerpfase door middel van een simulatie programma de mogelijkheden getoetst. Op basis van de simulatieresultaten wordt er een voorlopig pakket van eisen opgesteld.

3.1. Over Matlab/Simulink

Simulink is een generieke simulatieomgeving, geïntegreerd met MATLAB, zodat MATLAB-algoritmen, in modellen gebruikt kunnen worden. In de Simulink omgeving, kunnen externe data geïmporteerd worden zoals het Matlab bestand om vervolgens te worden gebruikt voor simulatiedoeleinden. Tevens kunnen simulatieresultaten uit Matlab geëxporteerd worden voor verdere analyse.

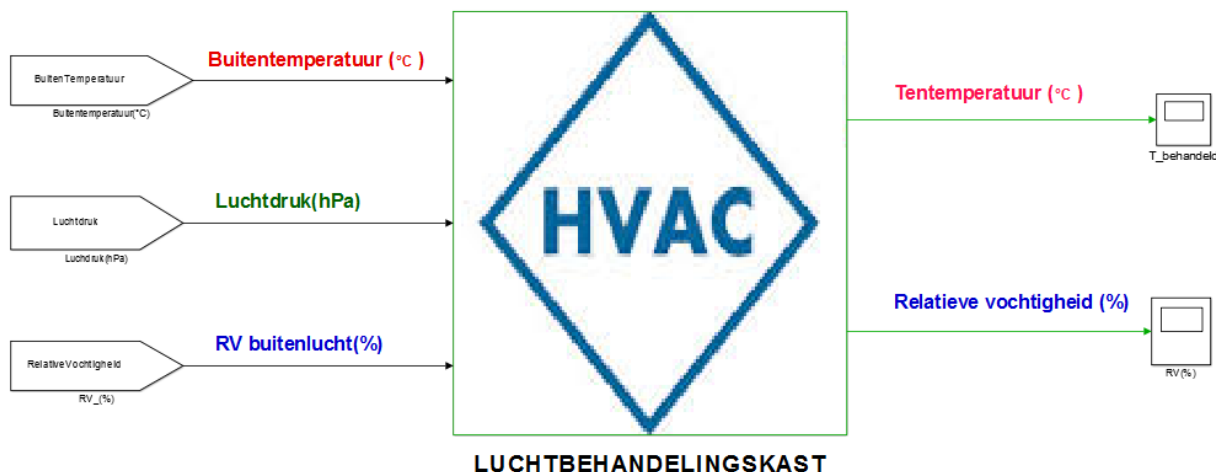
Matlab/Simulink maakt het, op basis van een bepaald ontwerp, mogelijk om een regelsysteem op te bouwen en te simuleren. Simulink biedt een grafische editor, block bibliotheken en “solvers” voor het modelleren en simuleren van dynamische systemen [17].

3.2. Algemene modelbeschrijving

Het ontworpen simulatiemodel bestaat uit input klimaatdata, verkregen uit de website van het Koninklijke Nederlandse Meteorologische Instituut, het KNMI en berekeningen op basis van de vastgestelde variabele en constanten en output, de resultaten uit de simulatie.

3.2.1. Model structuur

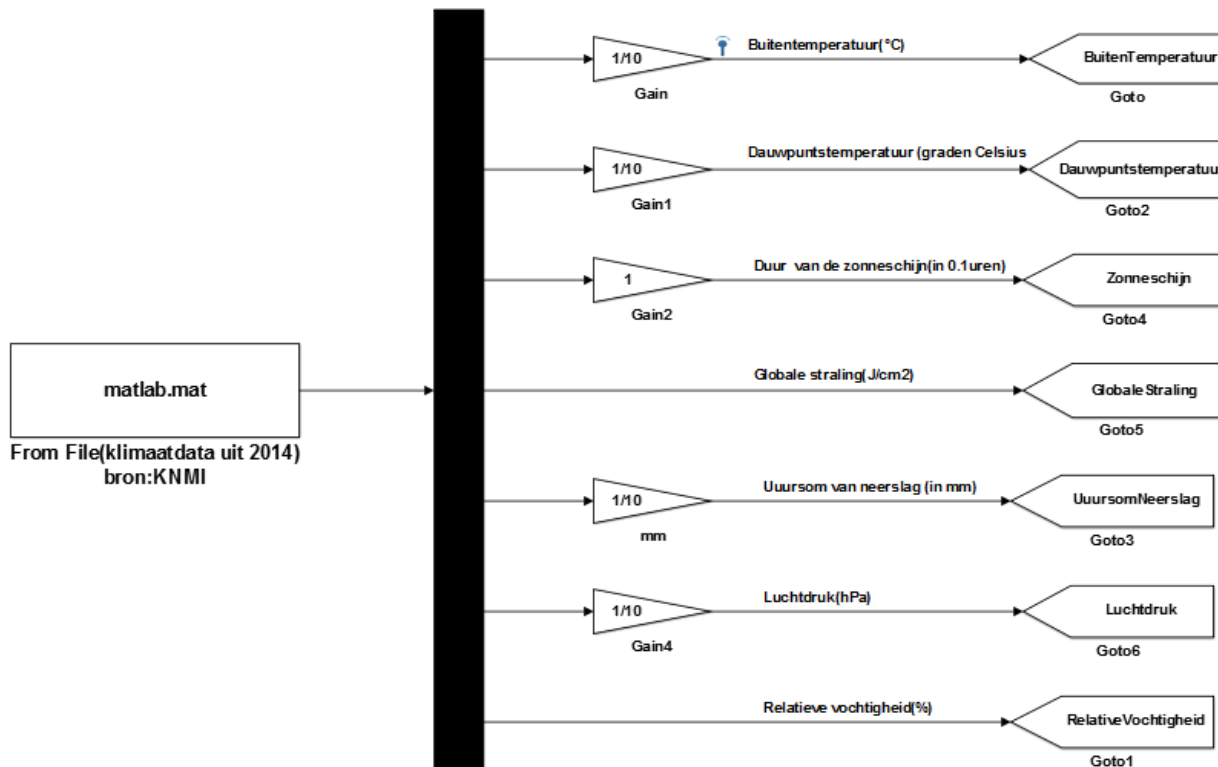
De behandeling van de luchttemperatuur en relatieve vochtigheid in de luchtbehandelingskast AU3 wordt gesimuleerd. Het simulatieprogramma maakt automatische berekeningen aan luchttemperatuur en vochtigheid op basis van vergelijkingen uit het artikel van J. Veerman in de TVVL Magazine getiteld: ‘Rekenen aan vochtige lucht: kan het zonder Mollier diagram?’ [2]. Afbeelding 6 geeft een overzicht van de algemene modelstructuur.



Afbeelding6: algemeen modelstructuur temperatuur- en vochtregeling

3.2.2. Model inputs

De inputs hebben betrekking op de luchtconditie in Valkenburg/Leiden in 2014. Deze data zijn afkomstig van de website van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. Deze ruwe data zijn in een Excel bestand gezet en vervolgens als matrix in Matlab/Simulink geïmporteerd.



Afbeelding 7: model inputs

Beschrijving van de regeling

Het simulatiemodel maakt gebruik van de input-data uit de website van de KNMI. De regeling is gebaseerd op vaste waarde voor luchttemperatuur en absolute vochtigheid. De huidige klimaatregeling en de daar bijhorende energiestromen, verbruiken en CO₂ emissie wordt gesimuleerd met als uitgangspunt de “Mollier” diagram in Afbeelding3.

Luchtvochtigheid

Er wordt onderscheid gemaakt tussen relatieve vochtigheid en absolute vochtigheid. De absolute vochtigheid is het werkelijke aantal grammen vocht dat zich in een kg lucht bevindt. De relatieve vochtigheid is de verhouding tussen de dampspanning van water en de verzadigde dampspanning.

Voor de behandeling van de luchtvochtigheid wordt in eerste instantie de absolute vochtigheid van de buitenlucht door het Simulink model automatisch berekend. Daarvoor worden de temperatuur, de relatieve luchtvochtigheid en de luchtdruk van de buitenlucht door Matlab/Simulink als input gebruikt om de verzadigde en partiële dampspanning op basis van vergelijkingen uit referentie te berekenen [2].

De partiële dampspanning maakt deel uit van de totale luchtdruk. Het is de druk die door de in de atmosfeer aanwezige water-dampmoleculen wordt uitgeoefend.

De verzadigingsdampspanning is de maximaal mogelijke dampspanning, bij de heersende temperatuur.

De verzadigd dampspanning (P_{dv}) wordt in Matlab/Simulink berekend op basis van formule 25 uit referentie [2]:

$$\log P_{dv} = 10,79574 \left(1 - \frac{273,16}{T} \right) - 5,028 \log \left(\frac{T}{273,16} \right) + 1,505475 \cdot 10^{-4} \left[1 - 10^{-8,2969 \left(\frac{T}{271,18} - 1 \right)} \right] + 4,2873 \cdot 10^{-4} \left[10^{4,76955 \left(1 - \frac{273,16}{T} \right)} - 1 \right] - 0,213856$$

kPa Waarbij T= droge boltemperatuur in Kelvin

Formule 25 is echter alleen geldig bij $0^\circ\text{C} \leq \theta_l < 100^\circ\text{C}$ (met θ_l de droge boltemperatuur in $^\circ\text{C}$).

Bij $-40^\circ\text{C} \leq \theta_l \leq 0^\circ\text{C}$ wordt de partiële dampspanning door het programma berekend op basis van formule 26 uit [2]: $\log P_{dv} = 9,09685 \left(\frac{273,16}{T} - 1 \right) - 3,56654 \log \left(\frac{273,16}{T} \right) + 0,87682 \left(1 - \frac{T}{273,16} \right) - 0,213856$ [kPa]. Hierbij, geldt:

$\log P_{dv}$ = logaritme van P_{dv}

θ_l = drogeboltemperatuur in $^\circ\text{C}$

T= droge boltemperatuur in Kelvin.

Na de verzadigde dampspanning wordt de partiële dampspanning (P_d) berekent op basis van formule 21 uit [2]:

$$P_d = \frac{\varphi}{100} \times P_{dv} \quad [\text{kPa}]$$

Hierbij geldt:

φ = relatieve vochtigheid

P_d = (partële) dampspanning

P_{dv} = verzadigd dampspanning.

Vervolgens wordt de absolute luchtvochtigheid (x) bepaald op basis van formule 15 uit [2].

$$x = \frac{M_w}{M_l} \times \frac{P_d}{P_b - P_d} \quad [\text{kg/kg}]$$

Hierbij geldt

x = vochtgehalte (absolute vochtigheid) kg/kg

M_w = molaire massa van waterdamp = 18,016 kg/kmol

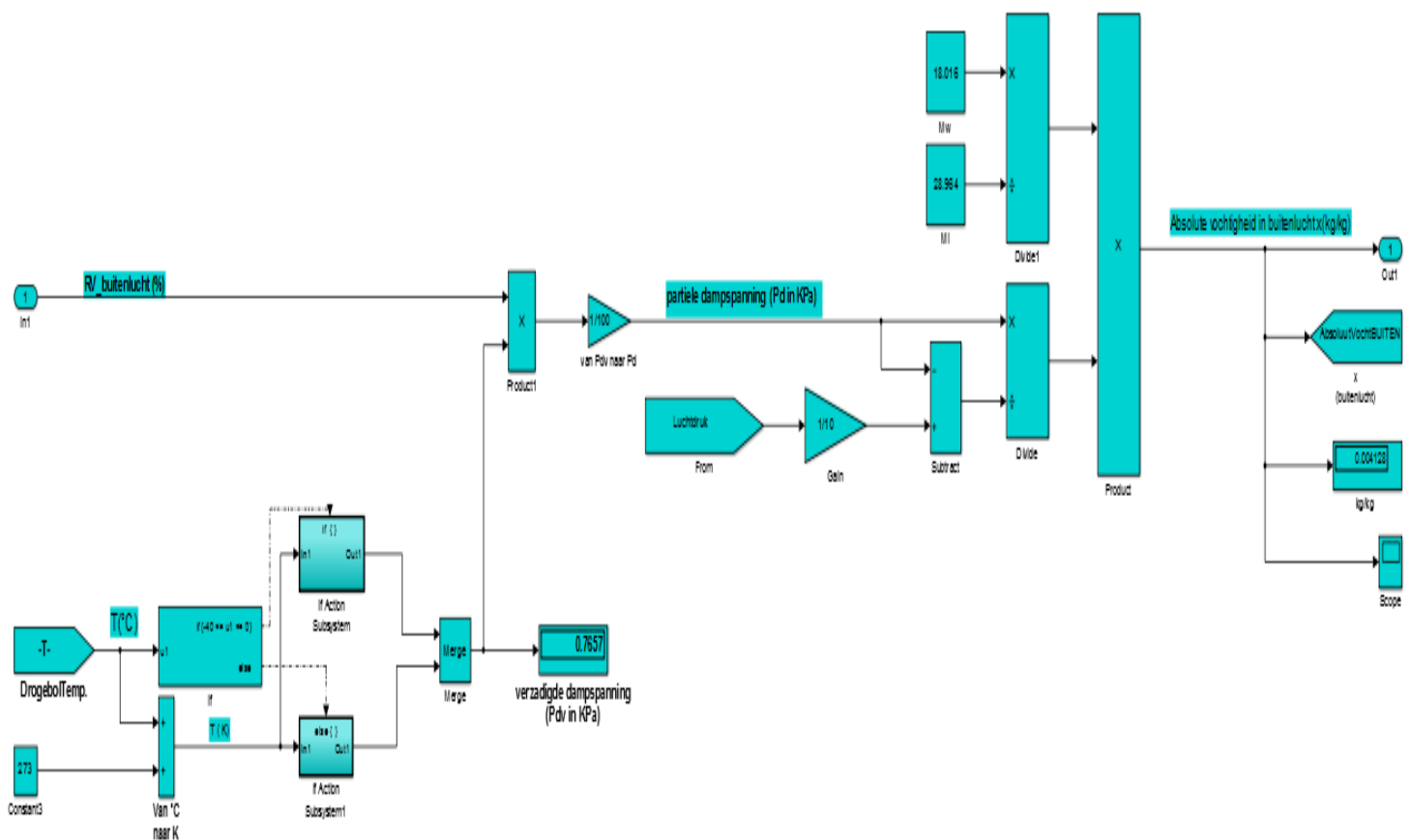
M_l = molaire massa van lucht = 28,964 kg/kmol

P_d = (partiële) dampspanning kPa

P_b = barometerdruk kPa

Met molaire massa wordt er bedoeld de massa (kg) van een bepaalde stof per hoeveelheid stof (mol).

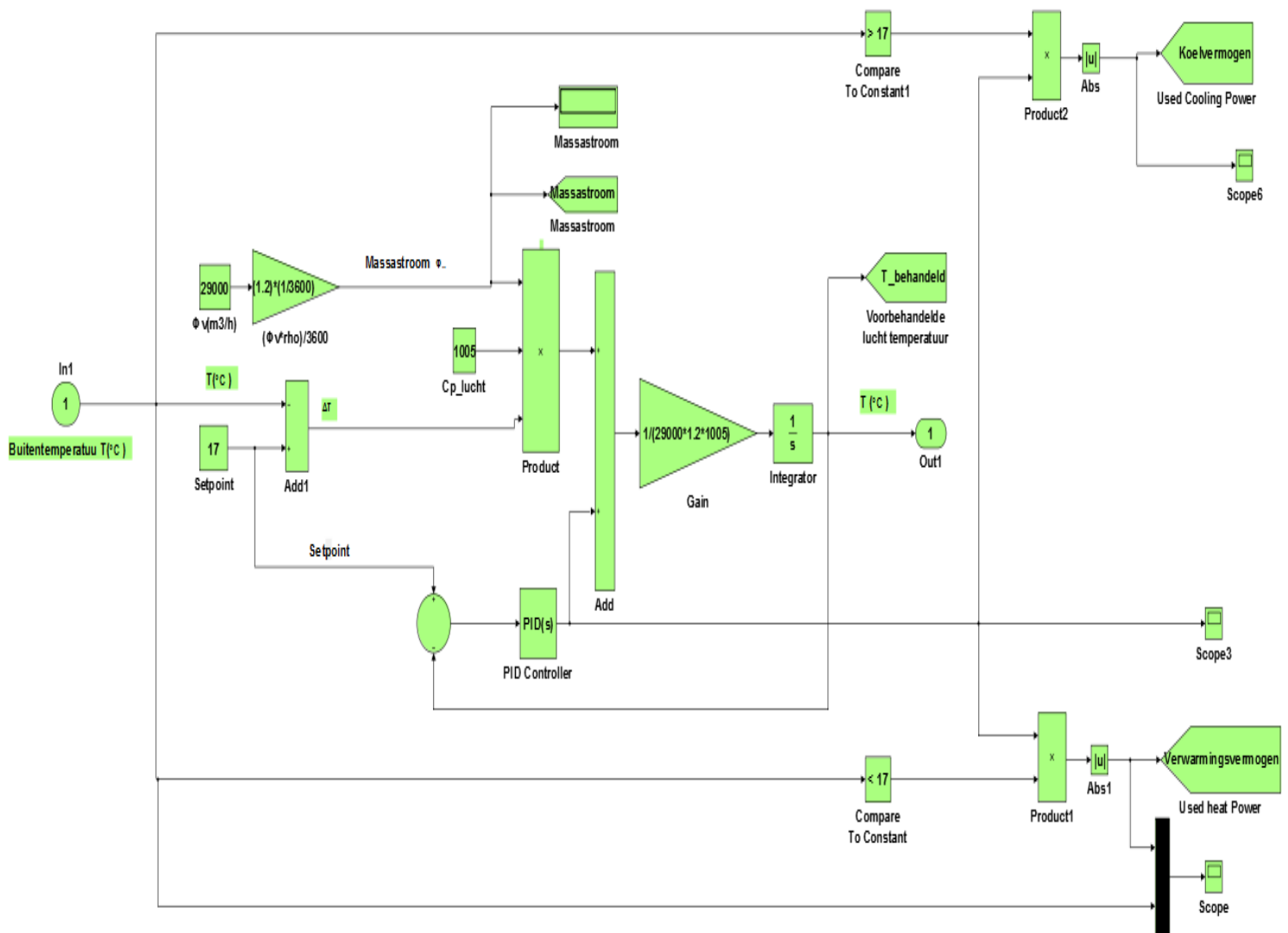
Na de berekening van de absolute vochtigheid in de buitenlucht, wordt deze vergeleken met de vastgestelde setpoint. De lucht wordt bevochtigd of ontvochtigd door middel van een regeling, gebruik makend van een PID regelaar. Het energieverbruik afkomstig van luchtbevochtiging via stoom uit stoomgenerator of luchtontvochtiging via koeling, (gekoeld water uit koelmachine) wordt automatisch berekend door het simulatie model.



Afbeelding8: berekening van absolute vochtigheid in Matlab/simulink

Luchttemperatuur

De luchttemperatuur wordt geregeld op basis van de vastgestelde grenswaarden, gebruik makend van een PID regelaar in Simulink. De input, de buitentemperatuur, wordt vergeleken met de setpoint. De PID regelaar zorgt vervolgens voor “gedoseerde” luchtkoeling of verwarming. Het energieverbruik afkomstig van het koelen of verwarmen wordt automatisch berekend door het simulatiemodel.



Afbeelding9: overzicht temperatuur regeling

De relatieve luchtvochtigheid na behandeling wordt automatisch berekend op basis van:

- de luchttemperatuur na behandeling,
- de partiële en verzadigde dampspanningen na behandeling
- de absolute vochtigheid na behandeling

Voor de berekening wordt er gebruik gemaakt van vergelijkingen uit 'Rekenen aan vochtige lucht: kan het zonder Mollier diagram?' [2].

3.2.3. Model outputs

Het simulatiemodel genereert de volgende outputs:

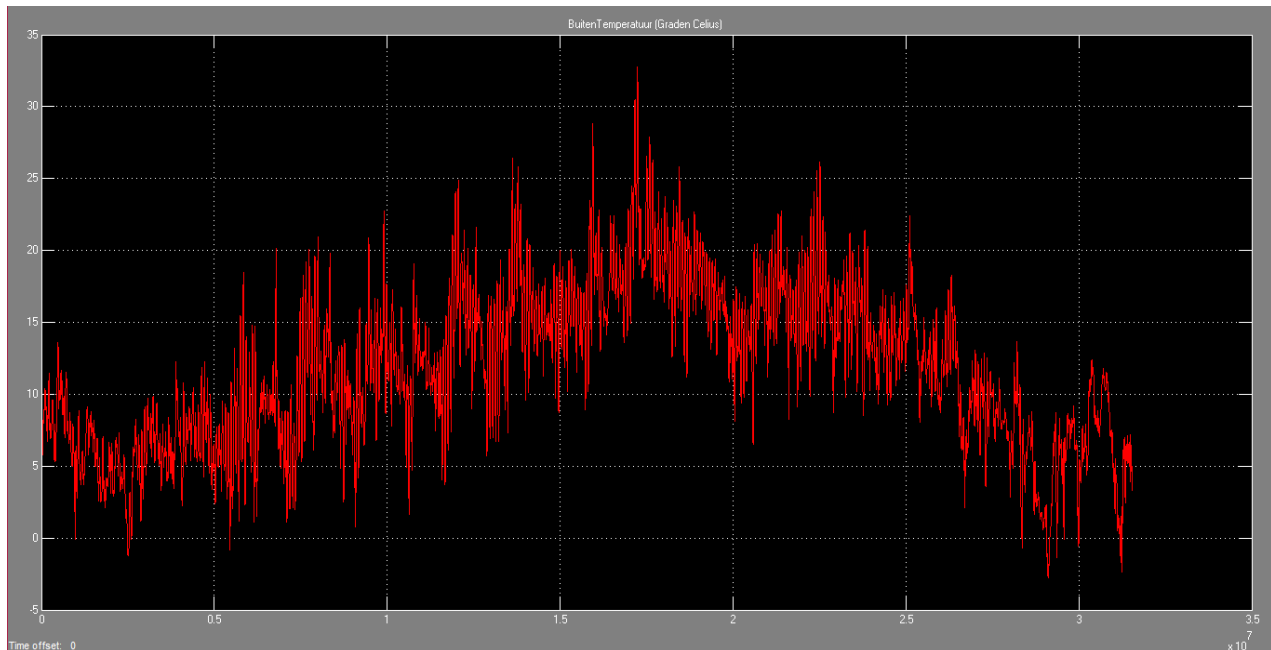
- Luchtconditie na behandeling: temperatuur, absolute en relatieve vochtigheden.
- Energiemonitoring: energieverbruik uit de verschillende energiestromen en het totale verbruik door het systeem in de gekozen simulatie periode. Het berekenen van het energieverbruik en CO₂ uitstoot loopt op basis van de gedefinieerde variabele en constanten tijdens de analyse fase van het onderzoek. (hoofdstuk 2)
- CO₂ uitstoot afkomstig van de werking van de LBK in de gekozen Simulatie periode.

3.3. Model resultaten

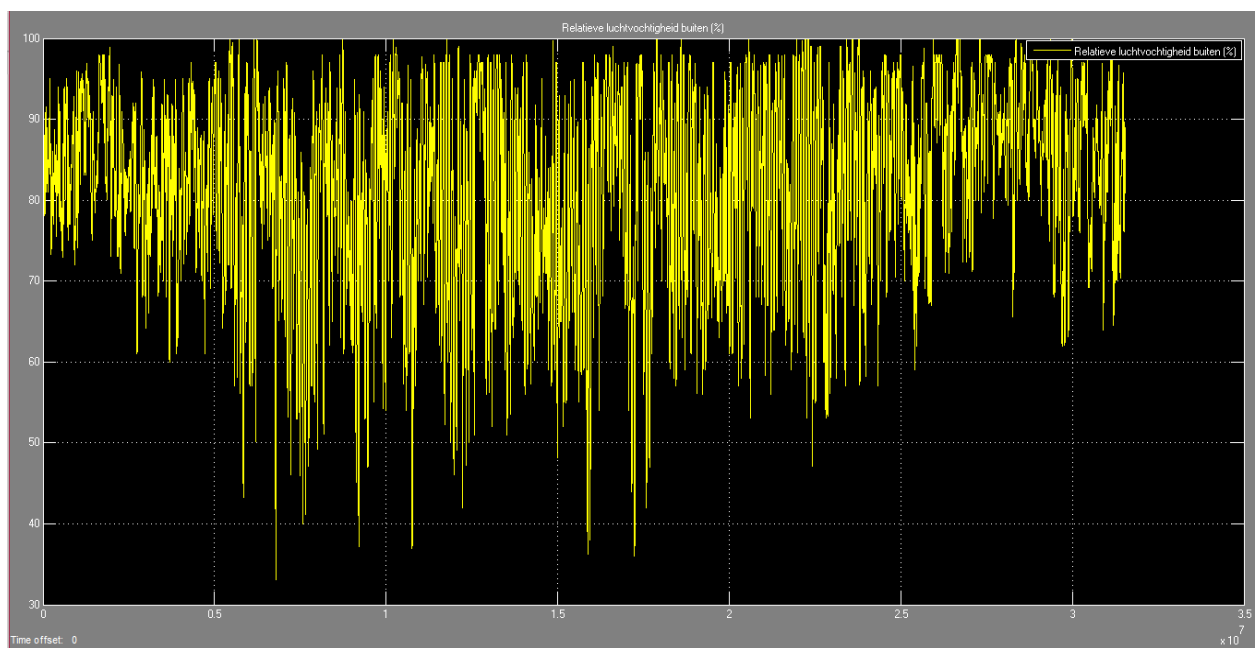
Voor de modelvalidatie worden de resultaten voor de behandelde luchttemperatuur en relatieve vochtigheid vergeleken met de uitgangspunten zoals weergegeven in de Mollier diagrammen in hoofdstuk “2.4”.voor de huidige klimaatregeling.

3.3.1. Model validatie

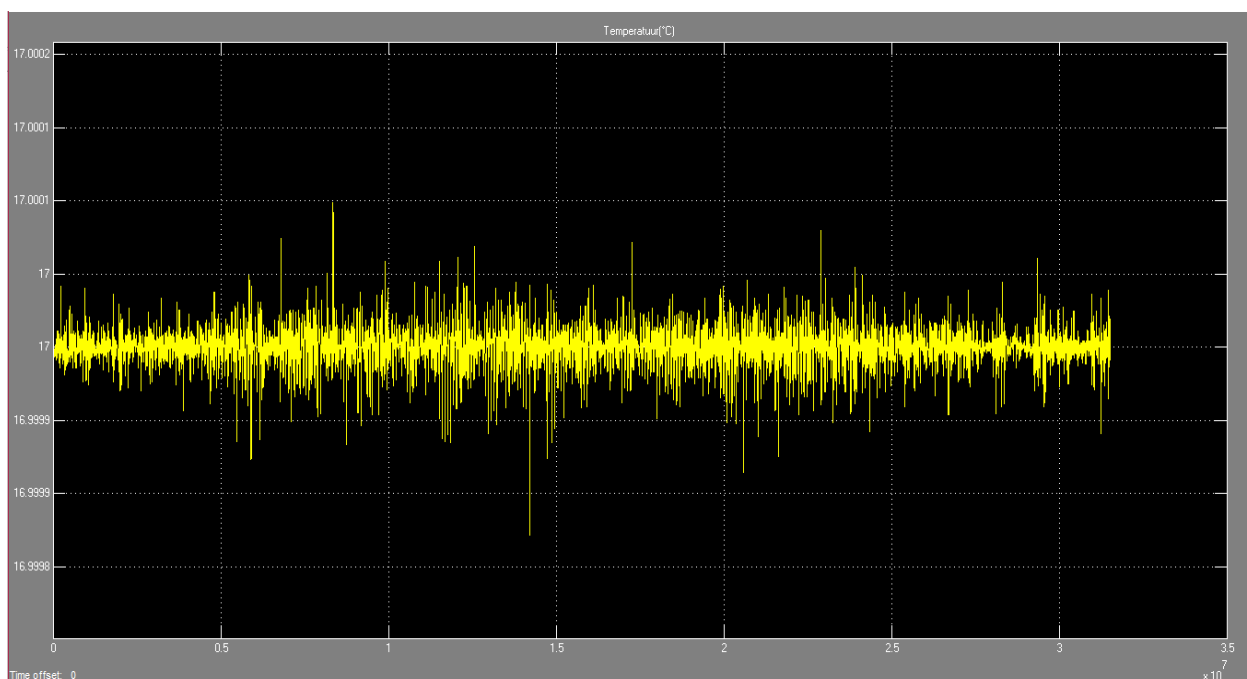
Met de buitenluchtcondities in Valkenburg/Leiden in 2014 zoals weergegeven op de website van het KNMI [20] worden de buitentemperatuur en relatieve vochtigheid gesimuleerd in combinatie met de behandelde luchttemperatuur en vochtigheid door middel van de ontworpen Matlab/Simulink regeling.



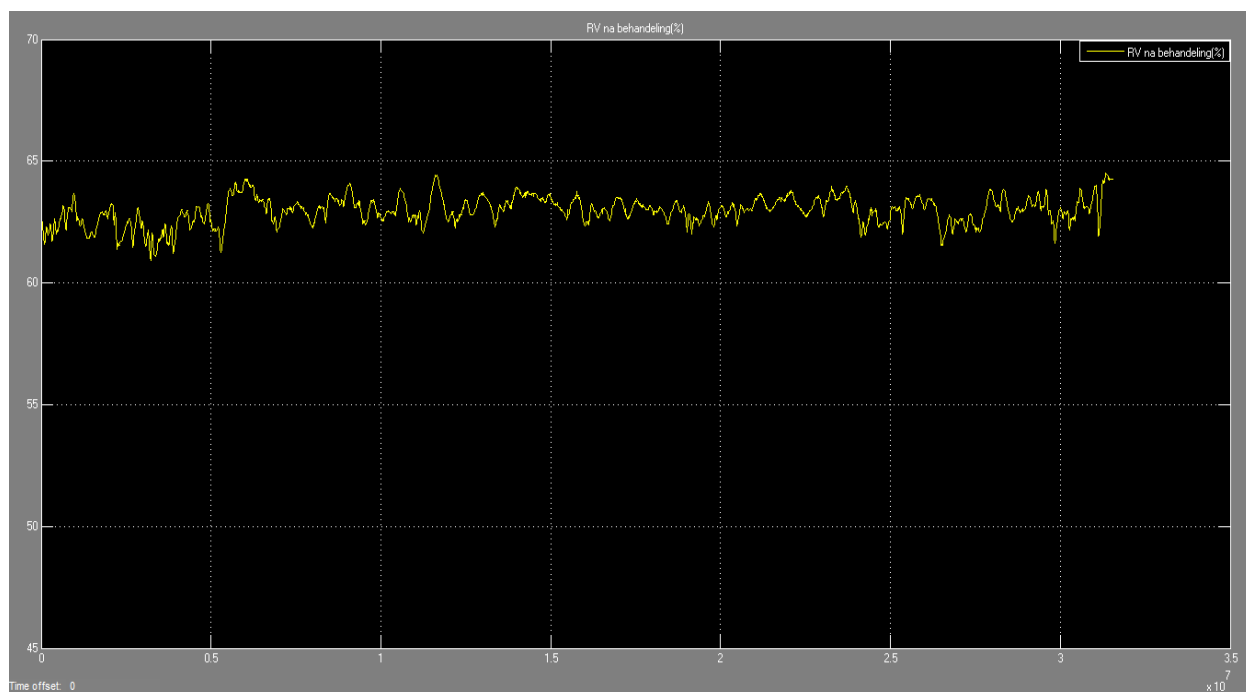
Afbeelding10: verloop buitentemperatuur



Afbeelding11: verloop relatieve vochtigheid buitenlucht



Afbeelding12: temperatuur verloop na behandeling met de huidige regeling



Afbeelding13: verloop relatieve vochtigheid na behandeling met de huidige regeling

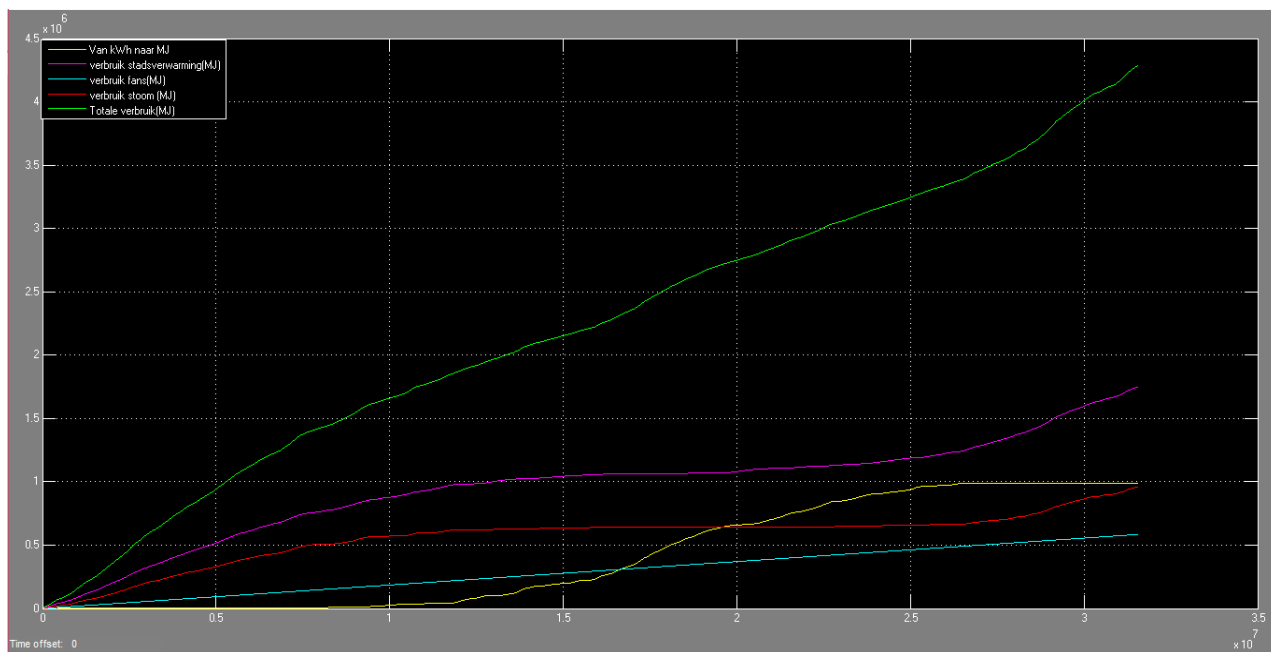
De temperatuur-en vochtregeling met een PID regelaar zorgt voor behandelde lucht met de conditie zoals bepaald door de vaste setpoints:

- Behandelde luchttemperatuur van 17°C
- Relatieve luchtvochtigheid tussen 60% en 70%

Het verloop van de luchttemperatuur en relatieve vochtigheid na de geoptimaliseerde regeling worden weergegeven in bijlage.

3.3.2. Simulatie van de huidige energiestromen en bijhorende CO₂ emissie

Het cumulatieve energieverbruik over het simulatiejaar bedraagt 4283,3GJ en de bijhorende CO₂ uitstoot 322,74 ton. De verschillende energiestromen en hun aandelen in het totale verbruik worden weergegeven in afbeeldingen 14 en 15. Deze simulatieresultaten geven een beeld van het huidige energieverbruik.

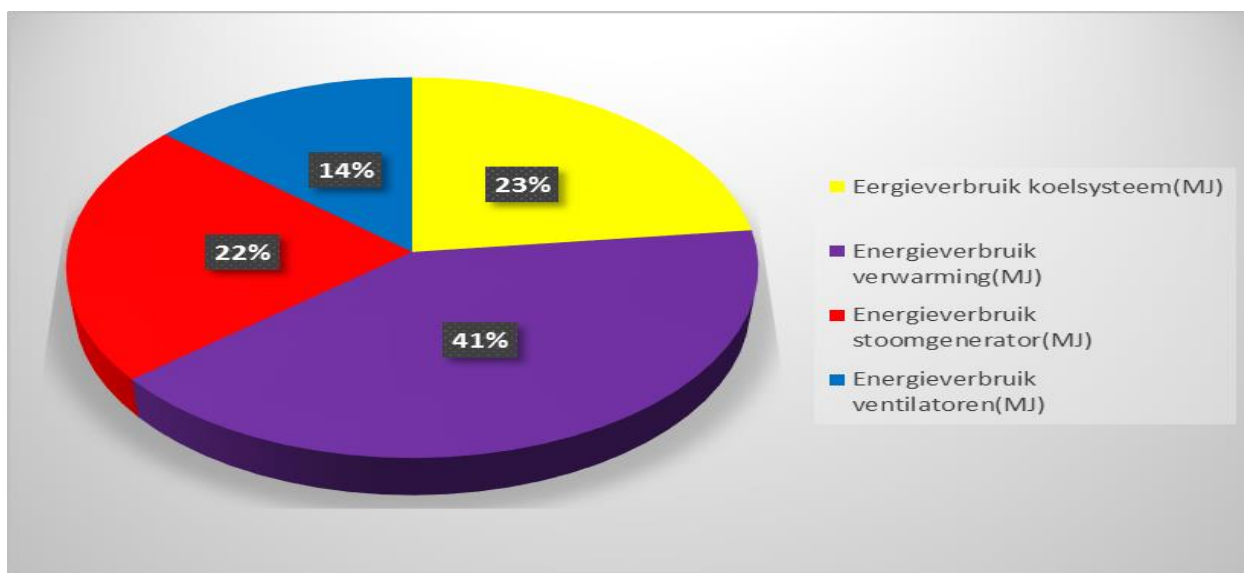


Afbeelding 14: verloop van het totale energieverbruik en de verschillende energiestromen

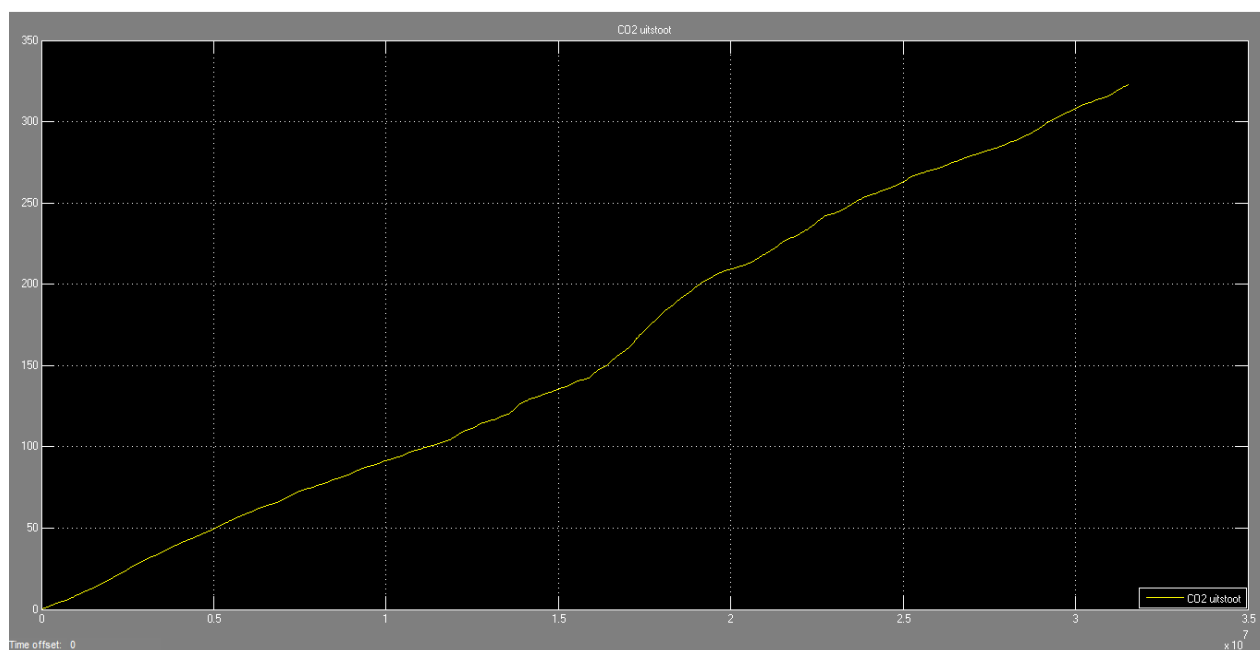
Het totale energieverbruik, (groene lijn) als gevolg van de huidige klimaatregeling wordt in afbeelding 14 uitgezet tegen de verbruiken uit de verschillende deelsystemen:

- Verbruik uit stadsverwarming (paarse lijn)
- Verbruik uit koelsysteem (gele lijn)
- Verbruik uit stoomgenerator (rode lijn)
- Elektriciteitsverbruik door de ventilatoren (blauwe lijn).

In afbeelding 15 worden de modelresultaten uit afbeelding 14 naar Excel geëxporteerd zodat het aandeel van elke energiestroom in het totale verbruik beter weergegeven kan worden. In afbeelding 16 wordt de verloop van de CO₂ emissie in het simulatiejaar weergegeven.



Afbeelding 15: aandeel van elke energiestroom in het totale energieverbruik



Afbeelding16: verloop van de CO₂ met de huidige klimaatregeling.

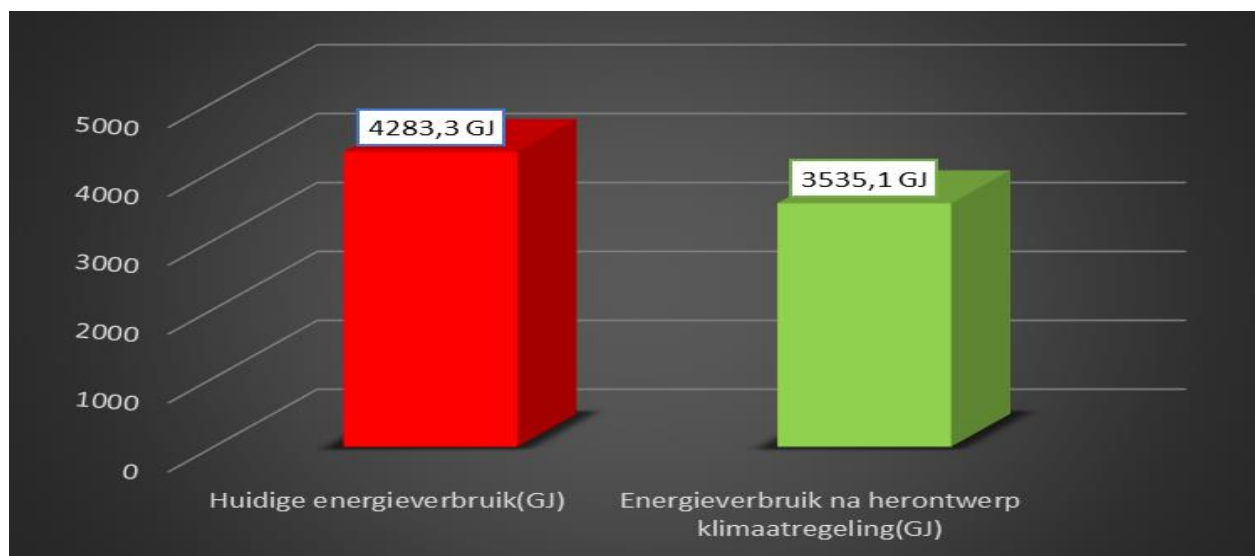
De totale uitstoot in het simulatiejaar bedraagt 322,74 ton

3.3.3. Simulatie van het verbruiksgedrag naar aanleiding van het optimaliseren van de klimaatregeling

Naar aanleiding van de optimalisatie van de klimaatregeling bedraagt het totale energieverbruik in de simulatieperiode 3535,10GJ. Dat is 17,46% minder verbruik in vergelijking met de huidige situatie.



Afbeelding17: verloop energieverbruik voor(rode lijn) en na herontwerp(groene lijn) van de klimaatregeling



Afbeelding18: verbruiksniveau voor en na het herontwerp van de klimaatregeling

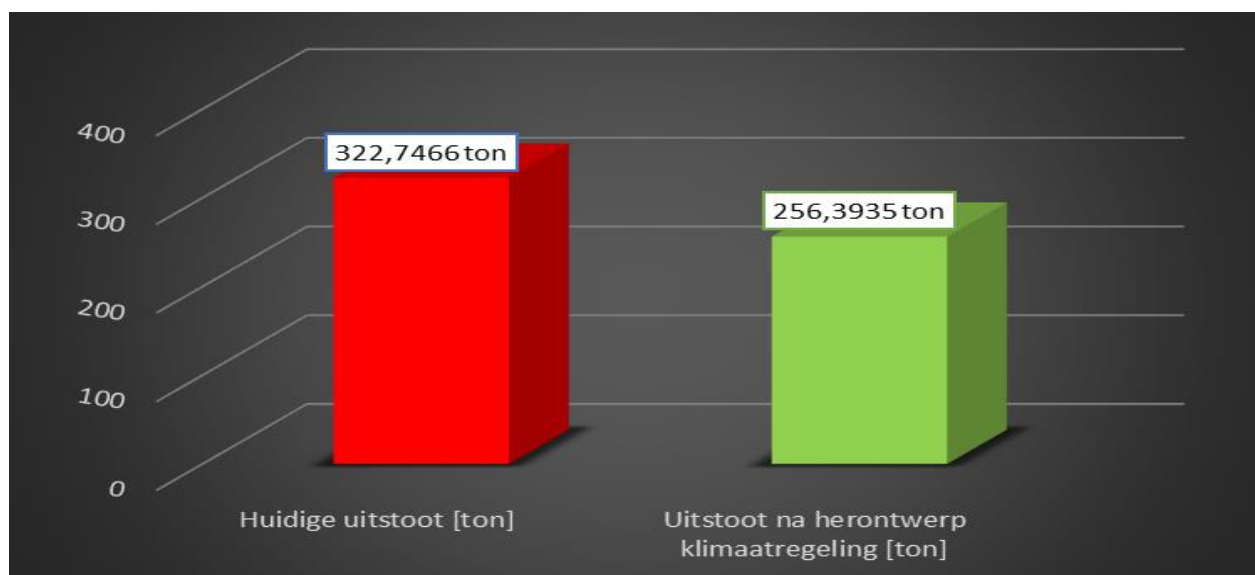
Deze afname van het totale energieverbruik is mede mogelijk gemaakt door:

- Een aanzienlijke vermindering van het stoomverbruik -44,20% .
- Een duidelijke vermindering van de koel-energie vraag -32,78%

Het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren blijft naar verwachting gelijk, gezien deze ventilatoren in continu bedrijf blijven.

Het energieverbruik uit stadsverwarming blijft ook gelijk. Het herontwerp is gebaseerd op een range van [17°C-19°C] voor de behandelde lucht. In deze range is de ondergrens gelijk aan de huidige vaste setpoint voor luchttemperatuur: 17°C. Hierdoor blijft de warmtevraag over het algemeen ook onveranderd in het simulatiejaar.

De CO₂ uitstoot gaat als gevolg van de nieuwe regeling van 322,74 ton naar 256,39 ton. Dit komt overeen met een reductie van 20,55%.



Afbeelding19: CO₂ emissie voor en na het herontwerp van de klimaatregeling

3.3.4. Simulatieresultaten voor het mogelijke aandeel van duurzame energiebronnen in een verdere verduurzaming van de installatie

Het mogelijk op te wekken elektrische en thermische vermogen uit zonne-energie wordt in Matlab/Simulink berekent op basis van de jaarlijkse zonnestralingen en de efficiëntie van de verschillende componenten.

Voor het mogelijk op te wekken elektrische vermogen geldt:

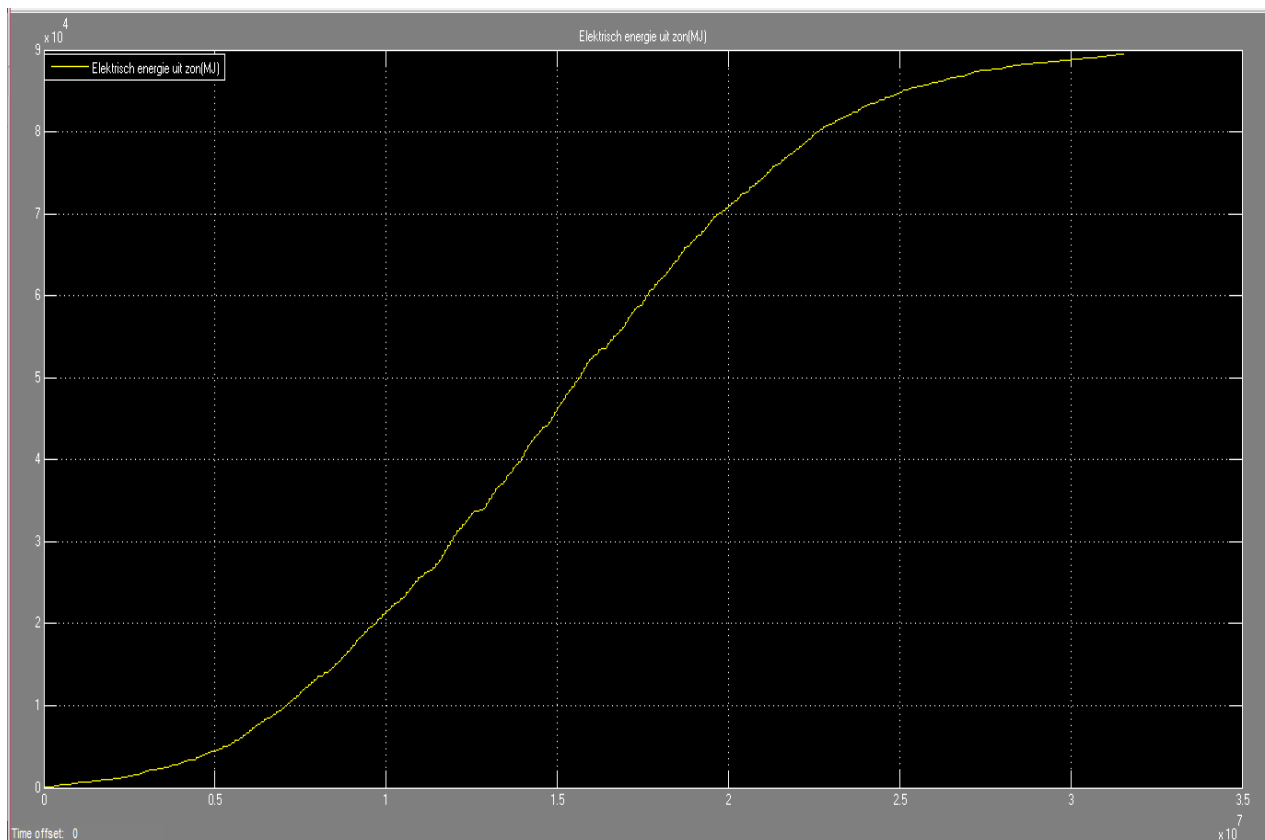
$$P_{elektrisch} = G_T \times A \times \eta_{pv} \quad . \text{ Hierbij}$$

$P_{elektrisch}$ = mogelijke op te wekken elektrische vermogen[W]

G_T = globale zonnestraling [W/m²]

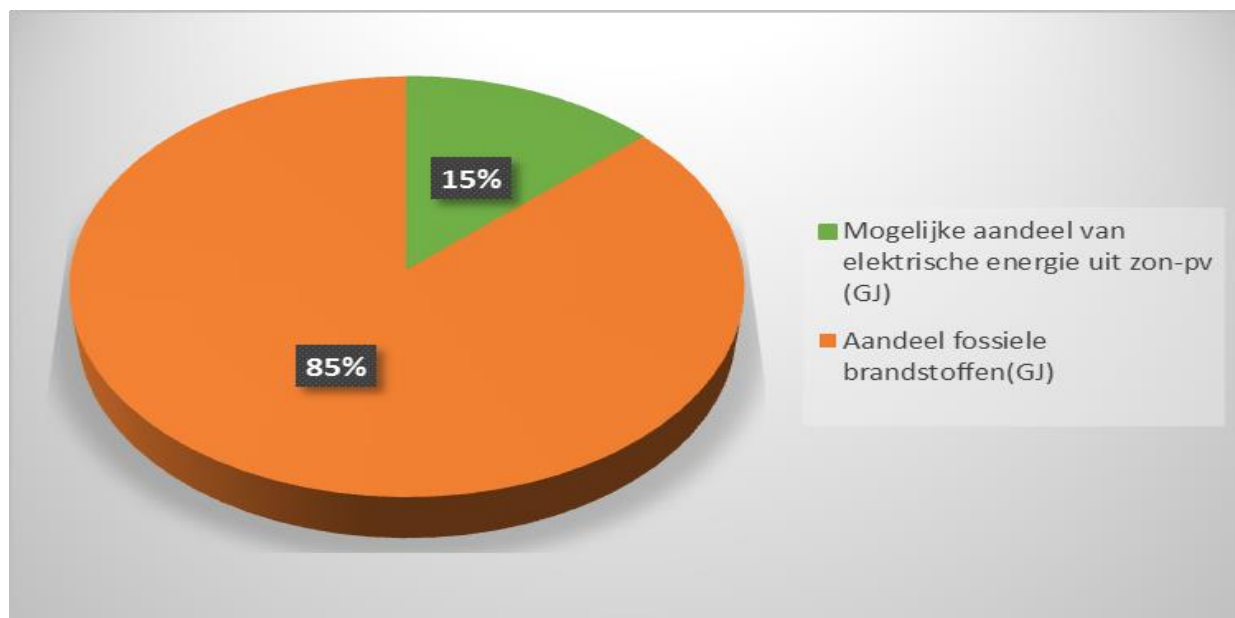
A = beschikbaar oppervlakte [m²]. de beschikbaar dakoppervlakte bedraagt 150m².

η_{pv} = rendement van de zonnepaneel. Er is hier uitgegaan van panelen met een rendement van 0,15%.



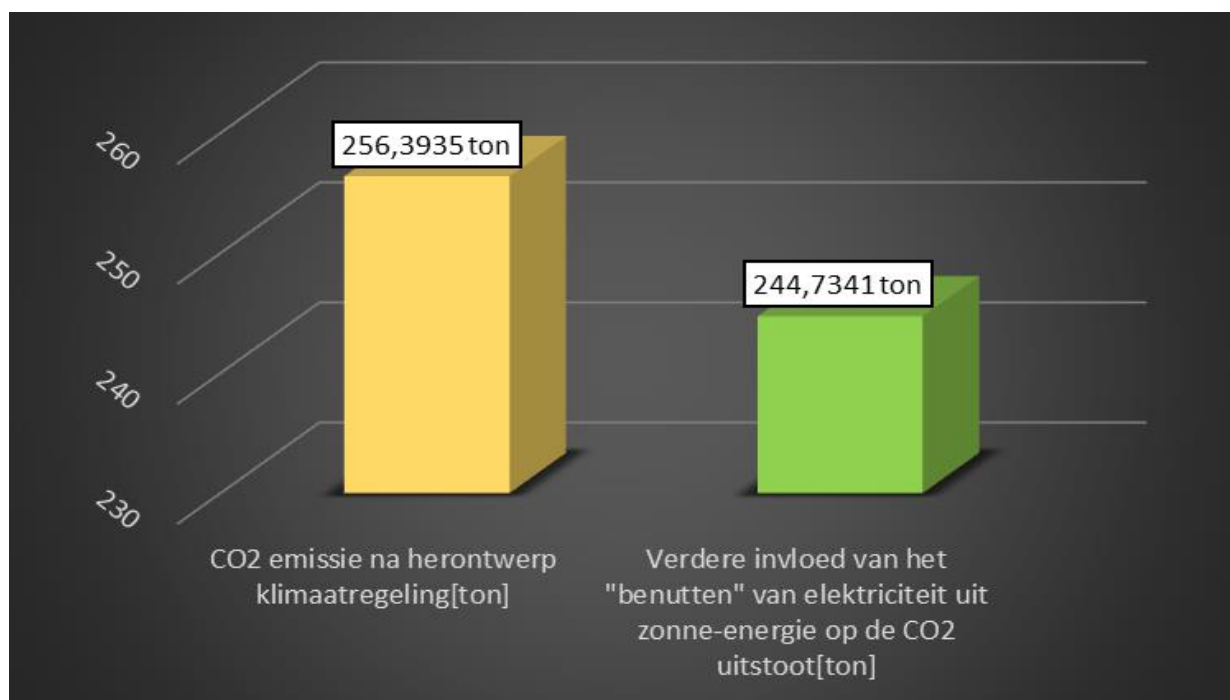
Afbeelding20: verloop van het mogelijke op te wekken elektrische energie

Het mogelijk op te wekken elektrisch vermogen uit zon bedraagt 89,515GJ. Dit komt overeen met 15% van het totale energieverbruik door de ventilatoren (583,87.GJ) zoals weergegeven in Afbeelding 21



Afbeelding21: aandeel van het mogelijke op te wekken elektrische energie uit zon pv in het energieverbruik van de ventilatoren

Met de invloed van dit aandeel van elektrische energie uit zon voor de aandrijving van de ventilatoren, zou de totale CO₂ emissie dalen van 256,39ton naar 244,73 ton. Dit komt overeen met 4,54% minder uitstoot.



Afbeelding22: invloed van elektriciteit uit zonne- energie op de CO₂ emissie

3.3.5. Geoptimaliseerde regeling in combinatie met zonne-thermische koeling

Voor het bepalen van het totale bruikbare koelvermogen uit zonne- energie wordt rekening gehouden met de efficiëntie van de zonnecollector en de COP van de adsorptie koelmachine. Er geldt:

$$COP_{totaal} = \eta_{collector} \times COP \text{ Hierbij:}$$

COP_{totaal} = totaal efficiëntie adsorptie-koelsysteem

COP = COP adsorptiekoelmachine.

De COP is afhankelijk van de temperatuur van de energiedrager (water), zoals beschreven in “Duurzame energietechniek” (Ouwehand, 2014). Hoe hoger de watertemperatuur des beter de efficiëntie (COP). Een belangrijke kenmerk bij adsorptiekoelmachine is dat deze al bij relatieve lage temperaturen een gunstig efficiëntie hebben. Bij een watertemperatuur rond 60°C is de efficiëntie al 0,40 of hoger (Ouwehand, 2014). Voor het simulatiemodel wordt er een COP van 0,40 aangenomen voor de adsorptiekoelmachine.

$\eta_{collector}$ = rendement zonnecollector.

Het simulatiemodel maakt gebruik van een collector-rendement van 0,65 bepaald op basis van grafiek 4.8 uit “Duurzame energietechniek” (Ouwehand, 2014) [3].

Voor het potentieel op te wekken koelvermogen ($\dot{Q}_{koel}$) geldt:

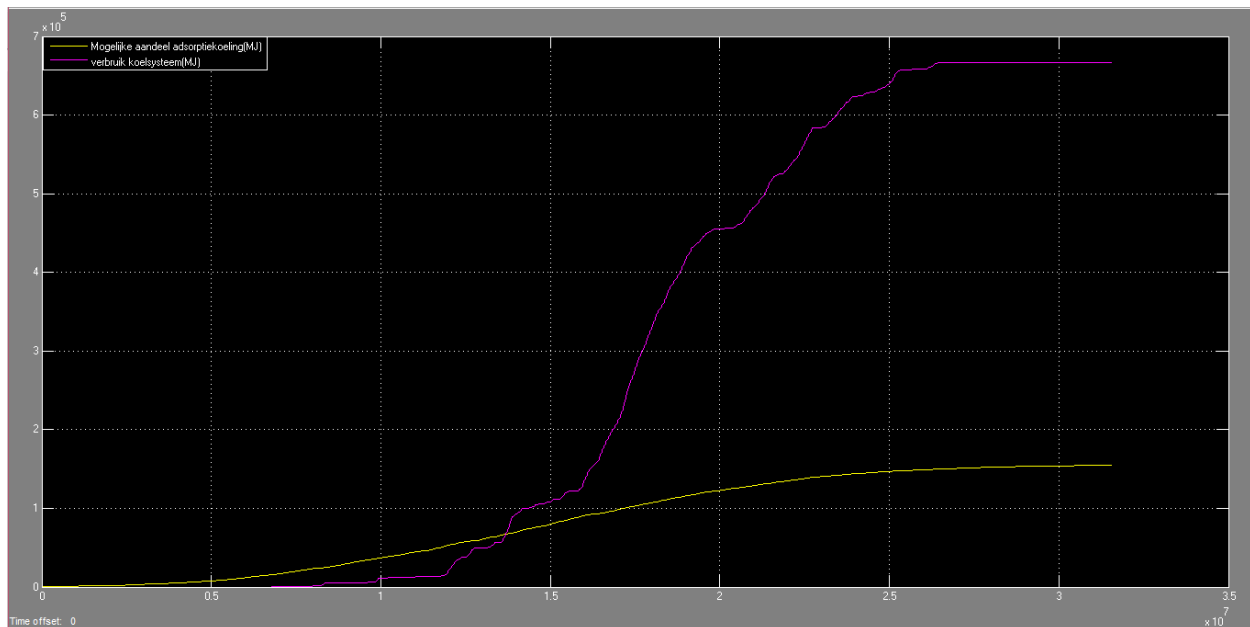
$$\dot{Q}_{koel} = \eta_{collector} \times A_{collector} \times G_T \times COP_{totaal} \text{ [W] waarbij}$$

$\dot{Q}_{koel}$ = opgewekte koelvermogen [W]

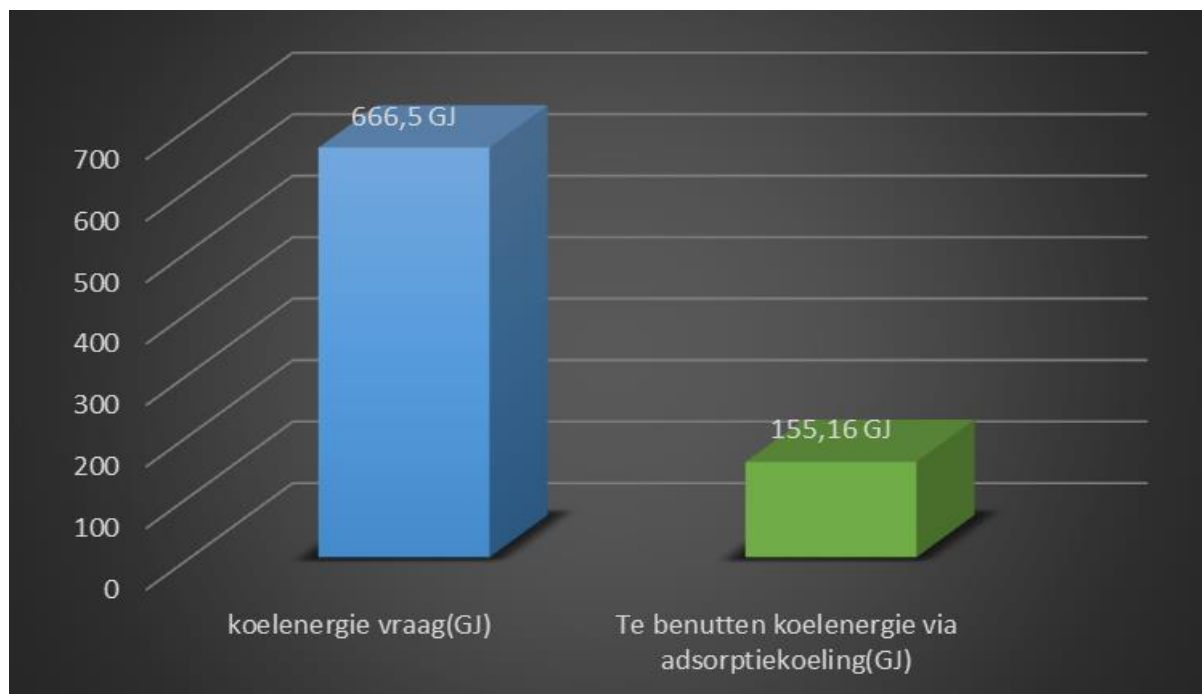
$A_{collector}$ = 150 m² = beschikbare oppervlakte voor het installeren van collectoren

G_T = globale zonestraling uit de klimaatdata van het KNMI [W/m²]

Het gesimuleerde koelenergie uit zonne-thermisch bron door middel van adsorptiekoeling bedraagt 155,16GJ. Dat is 23,27% van de koelenergievraag (666,5GJ).

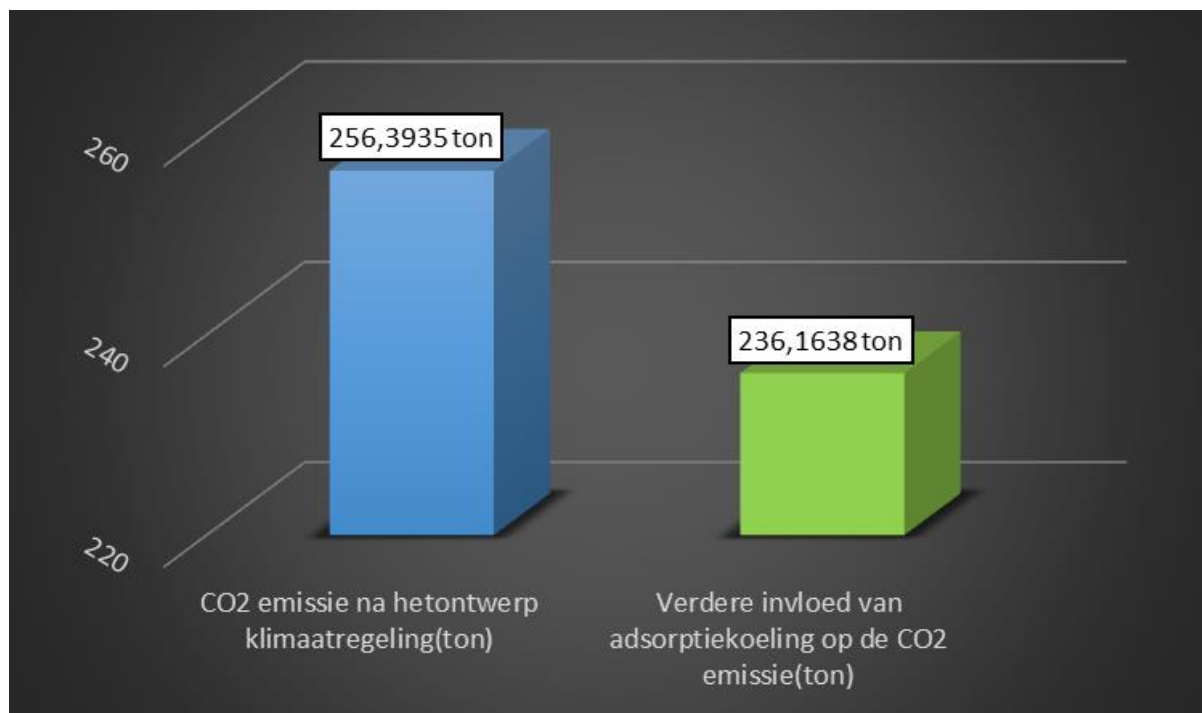


Afbeelding 23: verloop koelenergievraag(paarse lijn) en de potentieel op te wekken thermische-koelenergie uit zon(gele lijn)



Afbeelding 24: koel-energievraag uitgezet tegen de mogelijke op te wekken koelenergie uit zonne-thermische energie

Deze daling van de koel-energievraag door het systeem gaat gepaard met een vermindering van de CO₂-uitstoot. Deze worden verminderd met 7, 89% (van 256,3935 naar 236,1638).



Afbeelding25: invloed van het benutten van thermische zonne-energie voor koeling op de CO₂ emissie

3.4. Toetsen van de hypotheses

Hypothese 1: een seizoen afhankelijke regeling, die rekening houdt met de buitenlucht condities en de toelaatbare waarden voor temperatuur en luchtvochtigheid, zal leiden tot een substantiële vermindering van het energieverbruik en CO₂ uitstoot.

Op deze eerste hypothese-stelling luidt het antwoord, op basis van de simulatieresultaten, als volgt:

- Een herontwerp van de klimaatregeling, rekening houdend met de vastgestelde eisen en wensen, leidt tot een vermindering van 17,46% van het energieverbruik.
- De CO₂ emissie afkomstig uit de werking van dit systeem neemt met 20,55% af.

Hypothese 2: het opwekken en benutten van duurzame energie in combinatie met moderne technieken zal het systeem verder verduurzamen en de CO₂ uitstoot uit de werking van de gekozen LBK verder verminderen.

De simulatieresultaten lijken deze hypothese te bevestigen:

- Het benutten van de beschikbare dakoppervlakte voor het opwekken van elektriciteit uit zonne-energie kan een potentieel van $2,4865 \cdot 10^4$ kWh (89,51GJ) leveren. Dit aandeel kan 13% van de elektriciteitsvraag (583,87GJ) voor de aandrijving van de ventilatoren dekken. Dit zou op basis van de simulatieresultaten tot 4,54% minder CO₂ uitstoot afkomstig uit de werking van het gekozen systeem.
- Wanneer er wordt gekozen voor thermisch benutting van zonne-energie voor koelingsdoeleinden door middel van een adsorptiekoelmachine kan een percentage van 23,27% van de koel-energievraag (666,5GJ) gedekt worden met duurzame energie. (155GJ). De simulatie resultaten laten verder zien dat het benutten van zonne-thermische energie de CO₂ emissie zou doen terugdringen met 7,89% zoals beschreven in hoofdstuk 3.5.5.

3.5. Voorlopige pakket van eisen

Gebaseerd op de bevindingen uit de analyse fase en de simulatieresultaten wordt er in tabel 6 een voorlopig pakket van eisen (PvE) opgesteld. Deze geeft overzicht van de belangrijkste eisen waar de optimalisatiemogelijkheden rekening mee moet houden. Deze eisen hebben betrekking op:

- De klimaatregeling om de gewenste luchtcondities te kunnen verkrijgen.
- De luchtconditie na behandeling als resultaat van de regeling.
- De betrouwbaarheid van het systeem.

Nummer	Eisen
1	De klimaatregeling moet zodanig worden ontworpen dat afgesproken ranges voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid toegepast en/of aangepast kunnen worden
2	De regeling moet rekening houden met de interne warmte lasten en de gewenste ruimte condities : • Luchttemperatuur range : [19°C - 22°C] • Relatieve vochtigheid: [40% - 60%]
3	Na uitschakeling (voor onderhoud), spanningsuitval of andere storingen, moet het systeem de gewenste instellingen automatisch herstellen
4	De regeling voor de (voor) behandeling in deze luchtbehandelingskast moet rekening houden met de conditie van de retour (afgezogen lucht vanuit de ruimte) om de toevoerlucht conditie aan te passen indien nodig
5	De regeling moet leiden tot een stabiele luchtconditie na behandeling.

Tabel6: lijst met eisen m.b.t. de conditie van de lucht na behandeling in de LBK

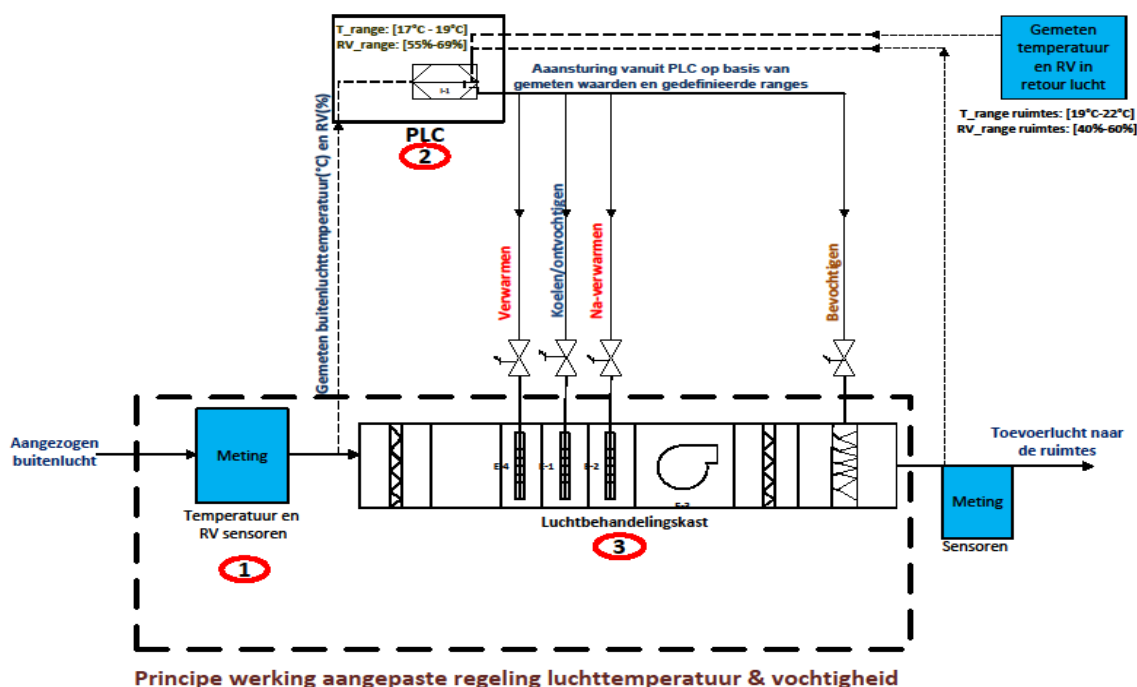
4. DETAILLERING

Als aanvulling op de ontwerp fase wordt in de detailleringfase naar details gekeken en naar de mogelijkheden om op de beschikbare dakoppervlakte panelen te installeren voor het opwekken van elektrische of thermische energie.

4.1. Klimaatregeling

Het herontwerp zal het mogelijk maken om de luchtkwaliteit, zoals beschreven in 2.5.1, in de gewenste ruimte condities te kunnen bereiken.

Afbeelding 26 geeft een overzicht van de her-ontworpen regeling.



Afbeelding 26: overzicht van de herontworpen klimaatregeling

De aangebrachte nummers komen overeen met de belangrijkste processtappen:

1. De conditie van de buitenlucht wordt vastgelegd door temperatuur en relatieve vochtigheid sensoren.
2. Het regelsysteem vergelijkt de gemeten luchttemperatuur (°C) en relatieve vochtigheid (%) met de gewenste waarde zoals vastgesteld in de ontwerp fase. Het systeem stuurt de juiste regelkleppen aan voor verwarmen, koelen, ontvochtigen of bevochtigen van de aangezogen buitenlucht. Een en ander afhankelijk van de gemeten waarden.

Het eerste regelniveau zorgt ervoor dat de gewenste luchtcondities, zoals vastgesteld in hoofdstuk 2.5.1, bereikt worden.

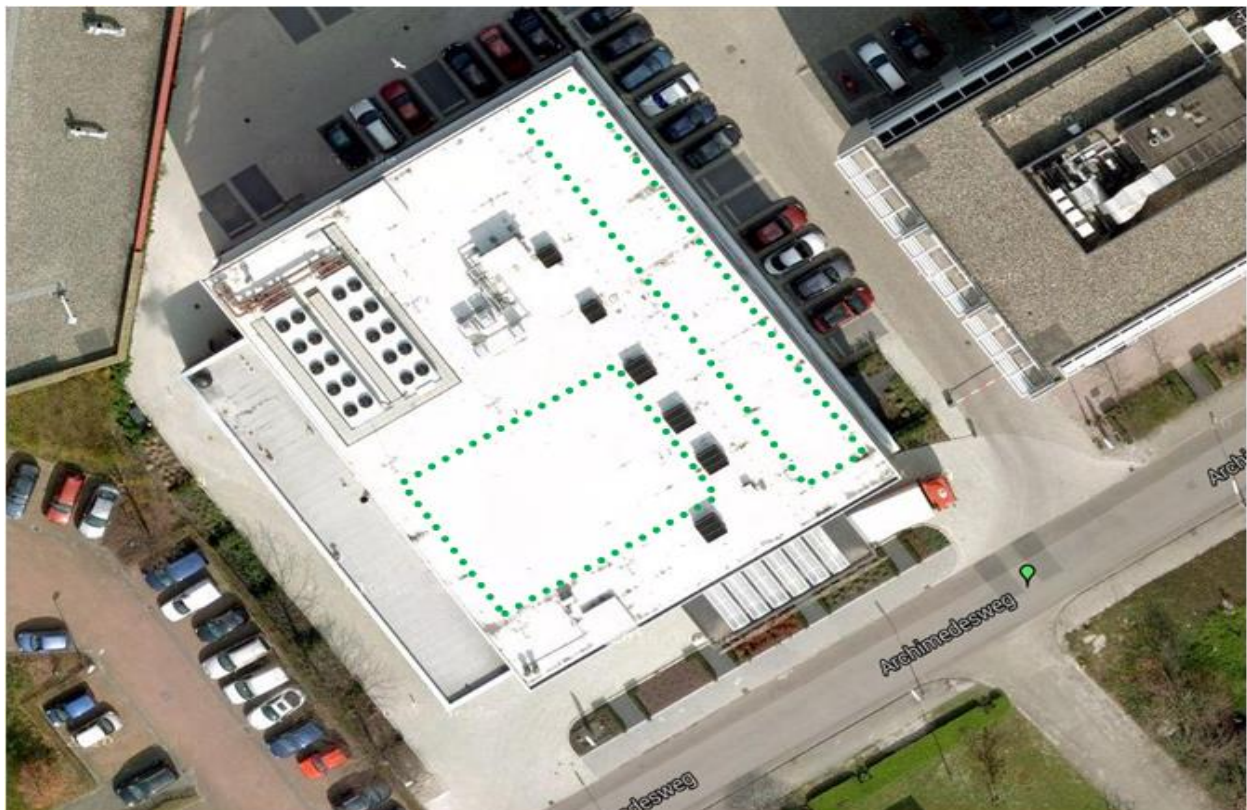
“Feedback metingen” vanuit sensoren in toevoer-en afvoer luchtkanalen zorgen ervoor dat het systeem, indien nodig, kleppen bijstuurt.

3. Het luchtbehandelingsproces vindt plaats in de LBK.

4.2. Benutten van zonne-energie

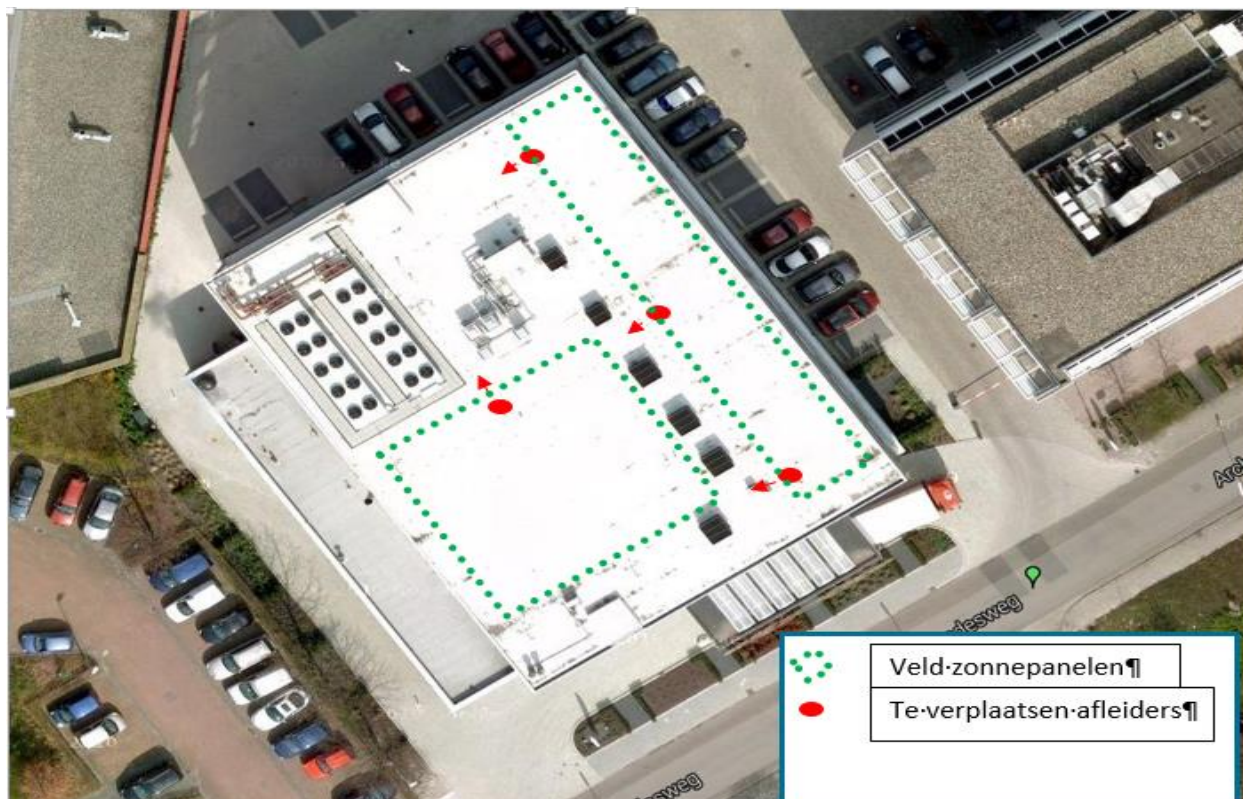
Afbeelding 27 geeft een overzicht van de beschikbaar dakoppervlakte die benut kan worden voor het opwekken van elektrische of thermische energie uit zon. In verband met de aanwezigheid van andere apparatuur, zoals koelmachine en losse dak ventilatoren, is de netto beschikbare oppervlakte:

$$A = (18,5m \times 1,6m) + (12,5m \times 10m) = 154,6 m^2$$



Afbeelding 27: overzicht van de beschikbaar dakoppervlakte

Voor meer oppervlakte kan er gekozen worden om een aantal bliksem afleiders, zoals weergegeven in Afbeelding 28, te verplaatsen. De mogelijkheid om deze te verplaatsen zal uiteraard afhangen van het oordeel van deskundigen op dit gebied.



Afbeelding 28: schetst van de te verplaatsen bliksemafleiders voor maximale benutting van de dakoppervlakte

4.3. Elektrische zonne-energie

Uit de simulatieresultaten blijkt dat er circa 13% van het energieverbruik door de luchttoevoer en afvoer ventilatoren gedekt kan worden door elektrische zonne-energie. Gezien de systemen in continu bedrijf blijven zal de opgewekte energie direct gebruikt worden en er zal geen stroom geleverd worden aan het net.

De installatie van zonnepanelen is een bekende techniek, veel Nederlandse bedrijven zijn deskundig op dit gebied.

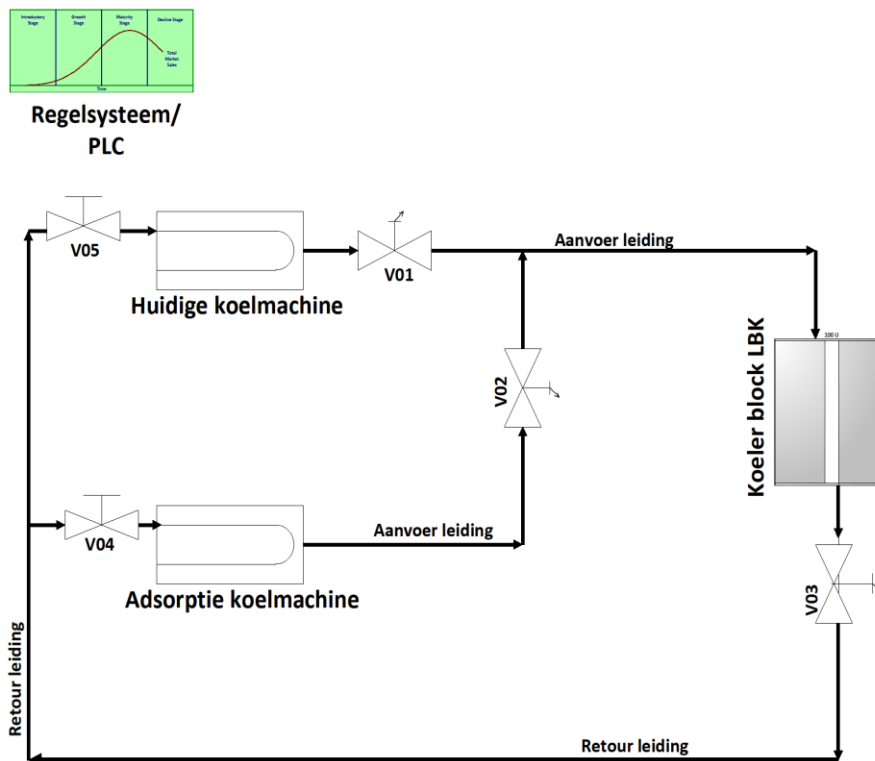
4.4. Het benutten van thermische zonne-energie in combinatie met adsorptie koeling

Uit de simulatieresultaten blijkt dat adsorptiekoeling tot 7,89% minder CO₂ uitstoot zal leiden. De potentieel op te wekken koel-energie komt overeen met 23,27% van de koel-energievraag van het systeem.

Wanneer er gekozen zou worden voor het benutten van zonne-thermische energie door middel van adsorptiekoeling, zal het systeem, gezien het beperkte aantal zonne-uren in Nederland, parallel aan het huidige koelsysteem moeten werken.

Afbeelding 29 geeft een algemeen overzicht van dit principe:

- Bij een gunstige watertemperatuur zal de adsorptiekoelmachine een deel van de koelvraag dekken met duurzame energie; een regelsysteem zal ervoor zorgen dat de regel-toevoer klep (V02) maximaal open gaat.
- Wanneer de koude productie, in verband met de buitentemperatuur van de adsorptiemachine minder wordt, zorgt het regelsysteem ervoor dat de huidige koelmachine weer 100% van de koelvraag dekt door meer compressoren aan te sturen.



Afbeelding29: principe schema van een adsorptie koelsysteem parallel aan een traditionele compressie koelmachine

4.5. Definitieve pakket van eisen

Het definitieve pakket van eisen houdt rekening met de resultaten uit de detailleringsfase. Tabel 7 is een beknopte versie van het definitieve pakket van eisen (bijlage 4). Het heeft betrekking op:

- De luchtkwaliteit vanuit de LBK.
- De klimaatregeling van de LBK.
- Normen en eisen in de elektro-en installatie techniek omtrent het aanpassen van het systeem.
- Aan te leveren documentatie.

Nummer	Eisen
1	De klimaatregeling moet zodanig worden ontworpen dat afgesproken ranges voor luchttemperatuur en relatieve vochtigheid toegepast en aangepast kunnen worden
2	De regeling moet rekening houden met de interne warmte lasten en de gewenste ruimte condities : • Luchttemperatuur range : [19°C - 22°C] • Relatieve vochtigheid: [40% - 60%]
3	De regeling voor de (voor) behandeling in deze luchtbehandelingskast moet rekening houden met de conditie van de retour (afgezogen lucht vanuit de ruimte) om de toevoerlucht conditie aan te passen indien nodig
4	De regeling moet leiden tot een stabiele luchtconditie na behandeling.
5	Na uitschakeling (voor onderhoud), spanningsuitval of andere storingen, moet het systeem de gewenste instellingen automatisch herstellen
6	Het ontwerp moet maximal gebruik maken van de beschikbaar ruimte om duurzame energie-opwekkers te kunnen installeren
7	De installatie en de te installeren componenten moeten rekening houden met de geldende Nederlandse en Europese normen : • NEN 3140 voor elektrotechnische werkzaamheden • EN 60204-1 Machine safety, Electric equipment of machines • Electromagnetic Compatibility Directive 89/336/EC • Low Voltage Directive 73/23/EEC • CE markering voor alle gebruikte regeltechnische en elektrische componenten • Een "declaration of conformity" voor het geïnstalleerde systeem
8	Leveren van relevante documentatie: • Elektrotechnische en installatie tekeningen • Functionele beschrijving van het systeem • Materialenlijst • Onderhoudsprotocol

Tabel7: definitieve pakket van eisen

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Doel van het onderzoek was toepasbare oplossingen in kaart te brengen voor een substantiële vermindering van het energieverbruik en CO₂ uitstoot afkomstig van de werking van het luchtbehandelingssysteem AHU3 van het Valerio gebouw. Twee onderzoekshypothesen werden gedefinieerd:

Hypothese 1: een seizoen afhankelijke regeling, die rekening houdt met de buitenlucht condities en de toelaatbare waarden voor temperatuur en luchtvochtigheid. Dit kan leiden tot een substantiële vermindering van het energieverbruik en CO₂ uitstoot.

Hypothese 2: het opwekken en benutten van duurzame energie in combinatie met moderne technieken kan het systeem verder verduurzamen en de CO₂ uitstoot uit de werking van de gekozen LBK verder verminderen.

Met de onderzoeksresultaten kan het volgende vastgesteld worden:

- Het energieverbruik afkomstig van de werking van het gekozen systeem bedraagt met de huidige klimaat regeling 4383, 3 GJ en de daarbij horend CO₂ emissie 322,74 ton.
- Na het optimaliseren van de klimaatregeling rekening houdend met de afgesproken grenzen, wordt het totale verbruik 3535,1 GJ. Dat is 17,46% minder verbruik dan met de huidige regeling;
- De CO₂ emissie na het optimaliseren van de klimaatregeling bedraagt 256,39 ton, ofwel 20,55% minder uitstoot dan in de huidige situatie.
- Met het benutten van de dakoppervlakte en de jaarlijkse globale zonnestraling kan er 89,51 GJ aan elektrische energie opgewekt worden. Dat komt overeen met 13% van de elektrische-energievraag voor de aandrijving van de ventilatoren. Gezien het systeem continu in bedrijf blijft zal al de opgewekte elektrische energie direct gebruikt worden.
- Er kan ook besloten worden om de beschikbaar dakoppervlakte en de globale zonnestraling te benutten om thermische zonne-energie op te wekken en deze gebruiken in combinatie met adsorptie koeling techniek. Met deze benutting van zonne-thermische energie kan er 155,16 GJ aan koelenergie op een duurzame manier opgewekt worden. Dit zou een aandeel van 23,27% van het koel-energievraag dekken.

Uit de twee onderzoekshypothesen en op basis van de simulatie resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het toepassen van een her-ontworpen temperatuur- en vochtregeling gebaseerd op een bepaalde range, vastgesteld op basis van thermische comfort eisen en toelaatbare grenzen leidt tot een afname van het energieverbruik (-17,46%) en CO₂ uitstoot (-20,55%).
- Naast het herontwerp van de klimaatregeling leidt het benutten van zonne-energie tot verdere verduurzaming van de installatie:
 - 13% van het elektriciteitsverbruik door de ventilatoren als er gekozen wordt om elektriciteit op te wekken uit zonne-energie.

- 23,27% van de koel-energievraag als er gekozen wordt om zonne-thermische energie op te wekken in plaats van elektriciteit, en deze benutten in combinatie met adsorptiekoeling technologie.

Voor het vaststellen van de regelingsparameters in de ontwerpfase is rekening gehouden met de luchtkwaliteitseisen zoals beschreven in de interne referentie-documenten, met name de room parameter list en de "Memo Temperature Policy"(bijlage 2 en 3), maar ook met de huidige interne warmte lasten. Normen en voorschriften omtrent thermische behaaglijkheid werden onderzocht.

De onderzoeksresultaten laten zien dat op het gebied van het binnenklimaat substantiële energiebesparingen bereikt kunnen worden zonder de luchtkwaliteit te benadelen.

Aanbevelingen:

De onderzoeksresultaten suggereren het volgende:

- In het kader van dit onderzoek, herontwerp van de klimaatregeling op basis van de gedefinieerde parameters en pakket van eisen (PvE)
- Benutten van de dakoppervlakte om duurzame energie op te wekken.

Een vervolgonderzoek naar de financiële gevolgen van de geïdentificeerde optimalisatiemaatregelen lijkt een toegevoegde waarde om de return of investment (ROI) van elke maatregel in kaart te brengen.

LITTERATUUR

[1] Taal, Arie (2012). *Toegepaste energieleer: warmte en stromingsleer*, Den Haag, Academic Service.

[2] Veerman, J. (2012). *Rekenen aan vochtige lucht: kan het zonder Mollier diagram?*
In: TVVL Magazine 03 2012.

[3] Ouwehand, Joop(2014). *Duurzame energietechniek*, Den Haag, Academic Service

[4] Reinoud, Segers (2014). *Rendement en CO₂ emissie van elektriciteitsproductie in Nederland*, update 2012.
Centraal Bureau voor de Statistiek. Webartikel 2014. Gepubliceerd op cbs.nl

[5] <http://co2emissiefactoren.nl/gebruik/>
Geraadpleegd op 22 Oktober 2016

[6] Agentschap NL (2010). *De stooklijn onder het mes: optimalisering van installaties in de gezondheidszorg*
In: Agentschap NL, oktober 2010, publicatie-nr. 2EGOU1020

[7] : <http://www.inj.com/about-inj/company-structure>
Geraadpleegd op 5-6-2016

[8] <http://www.inj.com/about-inj/company-structure/pharmaceutical-companies>
Geraadpleegd op 5-6-2016

[9]<http://vereniging-ion.nl/samenhang-eeep-mja3-2017-2020-energieakkoord-activiteitenbesluit-en-eeed-0>
Geraadpleegd op 7-10-2016 op

[10] <http://wetten.overheid.nl/BWBR0010346/2016-01-01>: Arbeidsomstandighedenwet, geldend van 01-01-2016 t/m heden
Geraadpleegd op 22-Sep-16.

[11] <http://wetten.overheid.nl/BWBR0027869/2014-11-29>
Geraadpleegd op 1-9-2016

[12] <http://www.solair-project.eu/142.0.html>
Geraadpleegd september 2016 op:

[12]: D. La, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge. (2010) Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: a review.

In: Renewable and Sustainable Energy Review 14 (2010) 130-147

[13] [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/12/Nederlandse%20energiedragerlijst%20versie%](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/12/Nederlandse%20energiedragerlijst%20versie%202015.pdf)
Geraadpleegd op 20 Oktober 2016

[14]
[https://www.researchgate.net/publication/24213427_Classification_of_Thermal_Environments_f](https://www.researchgate.net/publication/24213427_Classification_of_Thermal_Environments_for_Comfort_Assessment)
[or Comfort Assessment](https://www.researchgate.net/publication/24213427_Classification_of_Thermal_Environments_for_Comfort_Assessment)
Geraadpleegd op 20 oktober 2016

[15] <https://www.deltaohm.nl/home/comfortindex-pmv-en-ppd>
Geraadpleegd op 12 November 2016

[16] ISSO 68 (2002). Energetische optimale stook-en koellijnen: stook en keeling met betrekking tot de centrale luchtbehandeling en klimaatinstallaties in kantoorgebouwen
ISBN: 978-90-5044-089-9

[17] <https://nl.mathworks.com/products/simulink/>
Geraadpleegd op 22 September 2016 op

[18] <http://www.knmi.nl/home>
Geraadpleegd op 20 September 2016

[19][https://www.emissieautoriteit.nl/documenten/publicatie/2016/01/15/publicatie-standaard-](https://www.emissieautoriteit.nl/documenten/publicatie/2016/01/15/publicatie-standaard-emissiefactor-aardgas-2016)
[emissiefactor-aardgas-2016](https://www.emissieautoriteit.nl/documenten/publicatie/2016/01/15/publicatie-standaard-emissiefactor-aardgas-2016)
Geraadpleegd op 12 Oktober 2016

[20] Harmelink, Mirjam. Bosselaar, Lex. (2012). Berekening van CO₂ emissie, het primaire fossiel energieverbruik en het rendement van elektriciteit in Nederland.
Ministerie van Economische Zaken, Centraal Bureau voor Statistiek, Planbureau van Leefomgeving, Energieonderzoek Centrum Nederland.

[21][http://www.arbovakbase.nl/artikel/richtlijnen-algemene-thermische-behaaglijkheid-](http://www.arbovakbase.nl/artikel/richtlijnen-algemene-thermische-behaaglijkheid-11238.html)
[11238.html](http://www.arbovakbase.nl/artikel/richtlijnen-algemene-thermische-behaaglijkheid-11238.html)
Geraadpleegd op 22 Oktober 2016

[22] www.nen.nl
Geraadpleegd op 22 oktober 2016

COMPETENTIEVERSLAG

Inleiding

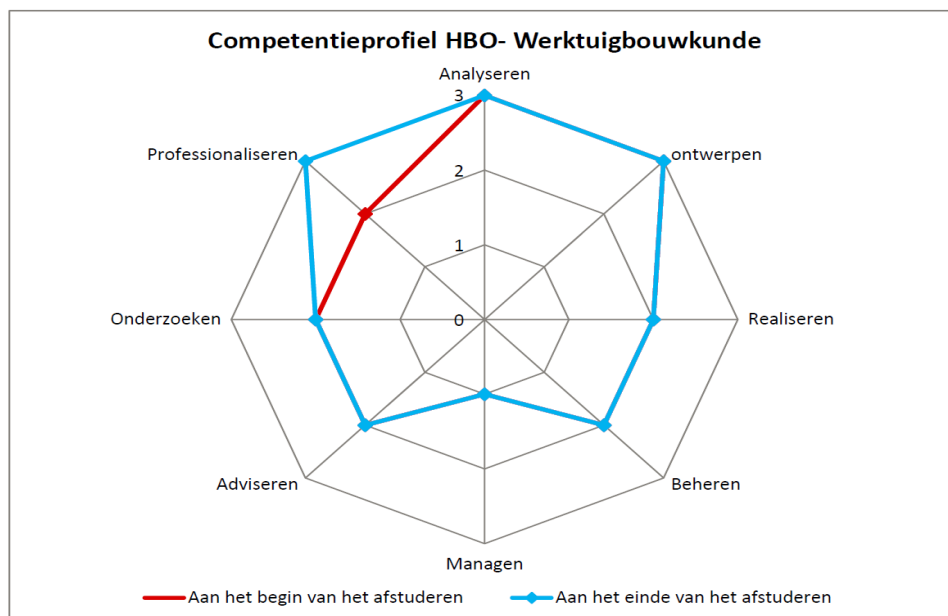
Doel van het competentieverslag is het geven van een retrospectieve blik op de door mij ontwikkelde competenties tijdens de afstudeerperiode. De onderzoeksoopdracht, om optimalisatiemaatregelen in kaart te brengen, was een mooie gelegenheid om een aantal competenties te kunnen ontwikkelen. Dit verslag zal elke ontwikkelde competentie apart beschrijven en toetsen aan de afgesproken doelen voorafgaand aan de afstudeerperiode.

Terugblik op de afgesproken doelstellingen

Onderstaande afbeelding geeft een overzicht van de verplichte competentie-niveaus aan het begin en aan het einde van de afstudeerperiode.

1. Ontwerpen
2. Analyseren
3. Professionaliseren
4. Onderzoeken
5. Adviseren
6. Managen
7. Beheren
8. Realiseren

Met de blauwe lijn wordt weergegeven dat de eerste drie benoemde competenties op niveau 3 aan het einde van de afstudeerperiode behaald zijn.



Afbeelding 1: minimale competentie doelstellingen voor de afstudeerperiode

Naar aanleiding van het werkend-leren traject zijn de verschillende competentie-niveaus voorafgaand aan de onderzoeksperiode weergegeven in Tabel 1.

Mijn doelstelling aan het begin van deze afstudeerperiode was om competentie 2: ontwerpen, competentie 8: professionaliseren, competentie 3: realiseren en competentie 6: adviseren naar het vereiste niveau te brengen zoals weergegeven in Afbeelding 1.

Tabel 1 geeft een overzicht van de competentie-niveaus en doelstellingen voorafgaand aan de afstudeerperiode.

Te verwerven competenties	Niveau			Beoordeling ****				
	Aanvang*	Doelstelling**	Gerealiseerd**	Onvoldoende	Matig	Voldoende	Goed	Uitmuntend
1. Analyseren	3	3						
2. Ontwerpen	2,5	3						
3. Realiseren	2	3						
4. Beheren	3	3						
5. Managen	3	3						
6. Adviseren	2	2,5						
7. Onderzoeken	3	2						
8. Professionaliseren	2,5	3						

Tabel 1: competentieniveau voorafgaand de afstudeerperiode en bijhorende doelstellingen

Ontwikkelde competenties

Elke ontwikkelde competentie zal afzonderlijk worden beschreven zodat het algemene overzicht van de huidige competentie-niveaus inzichtelijk wordt.

Competentie 2: ontwerpen

Hoofddoel van het onderzoek is het ontwikkelen van een herontwerp van het regelsysteem van de luchtbehandelingsinstallatie om energieverbruik en CO₂ uitstoot te kunnen verminderen.

Het volgen van de opleiding, de bestudering van lesstof en vakliteratuur heeft het voor mij mogelijk gemaakt een plan voor een efficiëntere regeling te kunnen ontwerpen.

Om het herontwerp te kunnen toetsen aan de vastgestelde eisen en wensen heb ik een simulatiemodel opgezet met Matlab/Simulink. Aan de hand van deze resultaten heb ik vastgesteld dat het ontwerp aan de eisen en wensen voldoet.

Met deze onderzoeksopdracht heb ik competentie 2: het ontwerpen, van niveau 2 naar niveau 3 op te kunnen werken.

Competentie 3: Realiseren

Het onderzoek maakt deel uit van een meerjarige project van mijn werkgever, Janssen V&P, om het energieverbruik en CO₂ uitstoot te kunnen verminderen. De onderzoeksresultaten kunnen, na goedkeuring, in de praktijk toegepast worden en bijdragen aan de milieudoelinden van mijn werkgever, Janssen Vaccines&Prevention.

In het verduurzamingstraject van onze installaties wijzen de onderzoeksresultaten naar optimalisatiemogelijkheden van het energieverbruik afkomstig uit onze verschillende activiteiten.

Het werken aan toepasbare onderzoeksresultaten heeft mij geholpen om competentie 3: het realiseren, van niveau 2 naar niveau 2,5 op te kunnen werken.

Competentie 6: Adviseren

De conclusies van het onderzoek zijn in eerste instantie bedoeld als advies om met het optimaliseren van de klimaat regeling energie reductie te kunnen bereiken.

Het toepassen van het onderzoeksresultaat zal op lange termijn naar verwachting onze impact op het milieu doen reduceren.

Ik heb tijdens dit onderzoekstraject competentie 6: adviseren, van niveau 2 naar niveau 2,5 op kunnen werken.

Competentie 8: professionaliseren

Met de uitvoering van de onderzoeksresultaten kan er bijgedragen worden aan het behalen van de bedrijfsdoelstellingen voor een betere milieu. Het is voor mij de een gelegenheid geweest expertise te ontwikkelen op het gebied van duurzaamheid en energie efficiëntie.

Aan het einde van de afstudeerperiode kan ik vaststellen dat dit onderzoek heeft bijgedragen aan mijn professionele ontwikkeling. Competentie 8 is hierdoor gestegen van niveau 2,5 naar niveau 3.

Tabel 2 geeft een het algemene overzicht van de ontwikkelde competenties tijdens mijn afstudeertraject.

Te verwerven competenties	Niveau			Beoordeling ****				
	Aanvang*	Doelstelling **	Gerealiseerd* **	Onvoldoende	Matig	Voldoende	Goed	Uitmuntend
9. Analyseren	3	3	3					
10. Ontwerpen	2,5	3	3					
11. Realiseren	2	3	2,5					
12. Beheren	3	3	3					
13. Managen	3	3	3					
14. Adviseren	2	2,5	2,5					
15. Onderzoeken	3	2	3					
16. Professionaliseren	2,5	3	3					

Tabel 2 : overzicht van de competentie doelstellingen in het kader van de afstudeerperiode.