

Phase Change Material

Toepasbaarheid van PCM technologie in de klimaattechniek

Sven Arkesteijn
Haagse Hogeschool Delft
Verkade Klimaat B.V.

Hieronder is de originele opdrachtomschrijving te vinden, zoals hij door de opdrachtgever werd omschreven:

Onderzoek of het interessant is PCM technologie toe te passen in de klimaattechniek.

Phase Change Material



Auteur: S. Arkesteijn

Studentnummer: 11112395

Academie: TIS Delft

Faculteit: Werktuigbouwkunde

Afstudeercoördinator: Ir. A. van der Vlugt

Afstudeerbegeleider: Ing. F.C.M. Zoller

Adres: Rotterdamseweg 137, 2628 AL Delft



Bedrijfsbegeleider: Ing. T. Collignon

Functie: Directeur Utiliteit

Bedrijf: Verkade Klimaat B.V.

Afdeling: Utiliteit

Telefoon: +31 (0) 610 907 238

Website: www.verkadeklimaat.nl

Adres: Turfschipper 2, 2292 JA Wateringen

Versie: 2.0

Datum: 14-12-2015

VOORWOORD

Deze afstudeerscriptie is geschreven in het kader van de afstudeerstage van Sven Arkesteijn, student aan de Haagse Hogeschool te Delft bij de opleiding Werktuigbouwkunde. De afstudeerstage vindt plaats op de afdeling utiliteit van het bedrijf Verkade Klimaat B.V. in Wateringen.

Binnen de Haagse Hogeschool is deze afstudeerscriptie bedoeld voor de afstudeerbegeleider vanuit school, de afstudeercoördinator en de stageadministratie. Binnen Verkade Klimaat B.V. is deze afstudeerscriptie gericht aan de bedrijfsbegeleider en eventuele andere geïnteresseerde binnen het bedrijf.

Tenslotte wil ik dhr. Ing. F.C.M. Zoller en dhr. Ir. A. van der Vlugt vanuit de Haagse Hogeschool bedanken voor de begeleiding en het geven van opbouwende kritiek om dit rapport mogelijk te maken. Verder wil ik dhr. Ing. T. Collignon bedanken voor het beschikbaar stellen van de bedrijfsopdracht en het geven van feedback. Daarnaast wil ik ook de andere medewerkers van Verkade Klimaat B.V. bedanken voor het verstrekken van de benodigde uitleg en informatie.

Wateringen, December 2015

SAMENVATTING

Om de concurrentiepositie in de installatietechniek te versterken, is Verkade Klimaat B.V. op zoek naar innovatieve oplossingen. Het gebruik van PCM technologie in de huidige klimaattechniek zou één van deze innovatieve oplossingen kunnen zijn. De opdracht in dit onderzoek is daarom:

“Onderzoek of het interessant is PCM technologie toe te passen in de klimaattechniek. Hierbij wordt uit meerdere toepassingen één toepassing gekozen. Van deze toepassing wordt bepaald of het rendabeler is om toe te passen dan een vergelijkbaar systeem zonder PCM.”

Met behulp van een pakket van eisen en wensen zijn verschillende PCM toepassingen getoetst.

Na toetsing van de toepassingen is er in overleg met de opdrachtgever bepaald dat er behoefte is aan een lokale, compacte PCM toepassing in de vorm van een Fan Coil Unit. Deze toepassing zal in staat moeten zijn een gehele kamer te kunnen verwarmen en koelen.

Deze PCM toepassing is vervolgens gedeeltelijk uitgewerkt aan de hand van een bepaald kamermodel, om te analyseren hoeveel besparing het PCM in de toepassing oplevert. De Fan Coil Unit is voorzien van een warmtewisselaar die kan koelen en verwarmen. PCM zal in het geval van koelen een gedeelte van de energie van de lucht opnemen, waardoor er in theorie een energiebesparing op koeling optreedt. In de toepassing zijn 10 PCM panelen (13 [kg] PCM) toegepast.

Met behulp van het computerprogramma ‘Simulink’ is er een simulatie gemaakt aan de hand van het kamermodel, waarin wordt gekeken hoeveel koelenergie de toepassing met en zonder PCM verbruikt. Er is een heel jaar doorgerekend, waarbij de toepassing met PCM inderdaad energie bespaarde op koeling. Bij nieuwbouw ligt deze energiebesparing voor koeling per jaar tussen de € 0,27 en € 0,63, bij bestaande bouw ligt dit tussen de € 0,84 en € 1,38.

Één van de eisen is dat de investering van het PCM binnen 5 jaar moet zijn terugverdiend. Omdat 10 PCM panelen €110,- kosten, zal de bovenstaande besparing niet genoeg zijn om een rendabele oplossing te vormen. Om wel een rendabele PCM oplossing te verkrijgen zullen er meer PCM panelen moeten worden toegepast, omdat er dan naast energiebesparing ook wordt bespaard op geïnstalleerd koelvermogen. Bij 100 PCM panelen (130 [kg] PCM) wordt er wel op geïnstalleerd koelvermogen bespaard. Echter zal de toepassing dan veel groter en zwaarder worden, waardoor een compacte toepassing niet meer reëel is.

PCM is dus wel interessant om toe te passen in de klimaattechniek, echter moet in een dergelijke toepassing wel meer PCM worden geïmplementeerd.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	
Samenvatting.....	
Inhoudsopgave	
Verklarende woordenlijst.....	1
Symbolenlijst	2
1 Inleiding	3
2 Analyse	4
2.1 Phase Change Material.....	4
2.1.1 Werking Phase Change Material	4
2.1.2 Waarom PCM	5
2.1.3 Zouthydraat	6
2.2 Autarkis PCM toepassingen.....	8
2.2.1 Toepassing 1: Crystal Beam Module (inductie convector met PCM)	8
2.2.2 Toepassing 2: Crystal Climate Ceiling (PCM klimaatplafond).....	10
2.2.3 Toepassing 3: Crystal Climate Wall (PCM klimaatwand).....	11
2.2.4 Toepassing 4: Crystal Climate Floor (PCM Klimaatvloer)	12
2.2.5 Toepassing 5: Crystal Fan Coil Unit	13
2.3 Pakket van eisen en wensen	14
3 Keuzeverantwoording	16
3.1 Weegfactoren.....	17
3.2 Toetsing aan eisen	17
3.3 Toetsing aan succescriteria	18
3.4 Beschrijving uiteindelijke toepassing	19
4 Dimensioneren uiteindelijke toepassing.....	21
4.1 Vermogen warmtewisselaar	23
4.1.1 Koellastberekeningen.....	23

4.1.2	Warmteverliesberekeningen.....	24
4.1.3	Conclusie warmtewisselaar	25
4.2	Afmetingen luchtkanaal	27
4.3	Aanvoer- en afvoergat.....	28
4.4	Hoeveelheid PCM	29
4.5	Kiezen luchtfilter.....	30
4.6	Vermogen ventilator	31
4.7	Uiteindelijke dimensionering toepassing	32
5	Dynamisch model met Simulink	35
5.1	Φ netto component	35
5.2	Temperatuurverandering kamer.....	38
5.3	Menging lucht.....	39
5.4	PCM component.....	40
5.5	Verwarming en koeling met schakelaar	42
5.5.1	Schakelaar.....	42
5.5.2	Verwarming	43
5.5.3	Koeling.....	44
5.6	Totale model en resultaat	45
6	Testopstelling	48
7	Conclusie en aanbevelingen	51
	Bronnen.....	53
	Bijlagen	55
	I Inductieprincipe.....	55
	II. Samenvatting gesprek 'OC Autarkis' (27-08-2015)	55
	III. Thermische behaaglijkheid.....	61
	IV. Uitleg score succescriteria.....	63
	V. Koellastberekeningen uitleg.....	65

VI. Warmteverliesberekeningen.....	76
VII. Drukverliesberekeningen	82
VIII. Φ netto component in dynamisch model.....	86
IX. Kamer component in dynamisch model	91
X. Menging lucht in dynamisch model	92
XI. PCM in dynamisch model	93
XII. Verwarming en koeling in dynamisch model	98
XIII. Grafieken dynamisch model.....	101
XIV. Testopstelling	103
XV. Reflectieverslag	105

VERKLARENDE WOORDENLIJST

PCM	Phase Change Material, materiaal met een hoge latente smeltwarmte waarbij de fase overgang wordt gebruikt om energie op te slaan of af te staan.
HDPE	Hoge dichtheid polyetheen, een thermoplastische kunststof
LBK	Luchtbehandelingskast, hierin wordt de lucht voorbehandeld voordat het naar ruimtes wordt getransporteerd.
RV	Relatieve luchtvochtigheid, de verhouding [%] tussen wat er aan waterdamp in lucht aanwezig is en wat er maximaal in zou kunnen.
Fan Coil Unit	Een toepassing die door middel van een ventilator en koelbatterij en/of verwarmingsbatterij de lucht koelt of verwarmt
Simulink	Een grafische programmeer omgeving voor het modelleren, simuleren en analyseren van dynamische systemen

SYMBOLENLIJST

Symbool	Betekenis	Eenheid
Q	Warmte	J
m	Massa	kg
c	Soortelijke warmte	J/kgK
T	Temperatuur	°C
t	Tijd	s
A	Oppervlakte	m ²
v	Luchtsnelheid	m/s
Φ_m	Massastroom	kg/s
Φ_w	Warmtestroom	W
q	Luchtdebiet	m ³ /s
RV	Relatieve vochtigheid	%
b	Breedte	m
h	Hoogte	m
d	Diameter	m
P	Druk	Pa
ρ	Dichtheid	kg/m ³
ζ	Weerstandscoefficiënt	-
α	Warmteoverdrachtscoëfficiënt	W/m ² ·K

Om gebouwen energiezuinig te maken, kunnen er verschillende maatregelen worden getroffen. De bekendste maatregel is het isoleren van gebouwen. Moderne constructies worden steeds beter geïsoleerd en zijn met veelal lichtgewicht materialen gebouwd. Deze constructies zijn minder goed in staat om warmte te accumuleren. Een andere manier om deze gebouwen nog energiezuiniger te maken, is door het verhogen van de thermische massa. Wanneer de thermische massa toeneemt zal de thermische traagheid van het gebouw toenemen en zal het energieverbruik afnemen. Phase Change Material is een oplossing om deze thermische massa te verhogen.

Verkade Klimaat B.V. is continu bezig met het verbeteren van haar concurrentiepositie. Een manier om deze positie te verbeteren is door te innoveren. In dit rapport wordt er uitgezocht of het gebruik van deze PCM technologie in de klimaattechniek een rendabele innovatieve oplossing is.

Het doel is om uiteindelijk een nieuwe innovatieve compacte PCM toepassing te verkrijgen, die in kantoren kan worden toegepast. Op deze manier kan Verkade Klimaat B.V. haar concurrentiepositie in de installatiesector verbeteren.

De projectopdracht van dit onderzoek is:

“Onderzoek of het interessant is PCM technologie toe te passen in de klimaattechniek. Hierbij wordt uit meerdere toepassingen één toepassing gekozen. Van deze toepassing wordt bepaald of het rendabeler is om toe te passen dan een vergelijkbaar systeem zonder PCM.”

De PCM technologie zal worden onderzocht door middel van analyse. Hierin wordt eerst de werking van PCM onderzocht, om vervolgens verschillende PCM toepassingen van het bedrijf ‘OC Autarkis’ te onderzoeken. Aan de hand van deze analyse zal in overleg met het bedrijf een pakket van eisen en wensen worden opgesteld.

Er zal vervolgens een keuze worden gemaakt over welke PCM toepassing van ‘OC Autarkis’ het beste kan worden geïmplementeerd bij Verkade Klimaat B.V. Deze keuze wordt gemaakt door de PCM toepassingen te toetsen aan het pakket van eisen en wensen. Deze gekozen toepassing, die waar nodig wordt aangepast, zal gedetailleerder worden onderzocht.

Na de keuze zal er worden onderzocht of de gekozen toepassing ook daadwerkelijk rendabel is. Aan de hand van een vooraf bepaald kamermodel worden, met behulp van ‘ISSO publicaties’, de hoofdonderdelen van de uiteindelijke toepassing gedimensioneerd.

Daarna wordt het door middel van een dynamisch model in Simulink gesimuleerd, om te kijken hoeveel energie het PCM kan besparen. Er zal worden berekend of met alleen deze energiebesparing de investering van het PCM in 5 jaar kan worden terugverdiend.

Ook zal, doormiddel van een testopstelling, worden gekeken of PCM ook daadwerkelijk werkt en hoeveel energie het kan opnemen.

Uiteindelijk kan aan de hand van deze resultaten een antwoord worden gegeven op de vraag of PCM technologie interessant is om toe te passen in de klimaattechniek.

2 ANALYSE

2.1 PHASE CHANGE MATERIAL

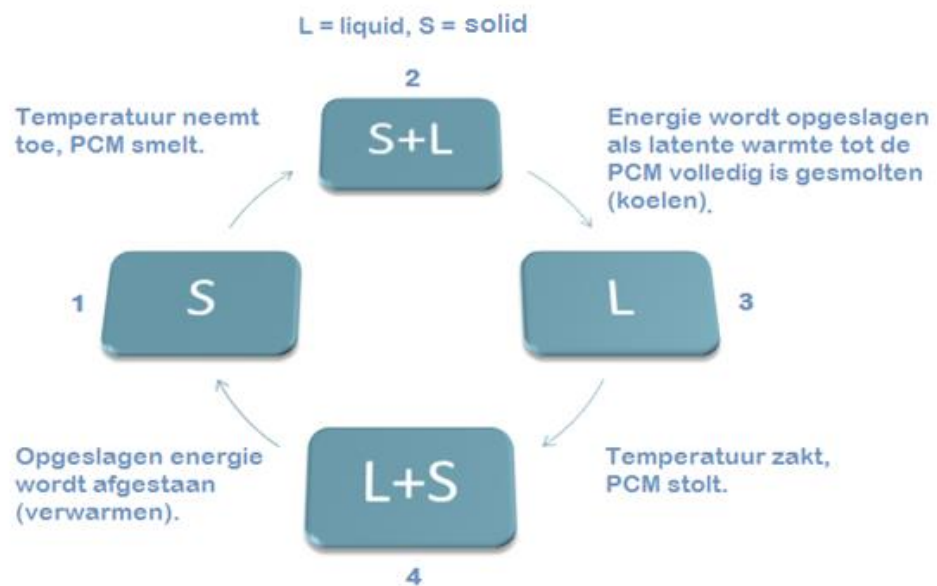
2.1.1 WERKING PHASE CHANGE MATERIAL

PCM's zijn materialen met een hoge latente smeltwarmte [kJ/kg], waarbij de faseovergang van vast naar vloeibaar en andersom wordt gebruikt om warmte op te slaan en af te staan. In deze materialen wordt de latente warmte dus opgeslagen voor het gebruik op een later moment.

Het principe van deze materialen als warmte accumulerend materiaal staat hieronder beschreven:

1. De omgevingstemperatuur stijgt, het materiaal neemt warmte op en zal smelten (bij de smelt temperatuur).
2. Wanneer het materiaal smelt, absorbeert het een grote hoeveelheid warmte uit de omgeving totdat het materiaal volledig gesmolten is. Hierdoor zal de omgeving koeler worden.
3. De omgevingstemperatuur zakt, het materiaal zal warmte afstaan en stolt.
4. Wanneer het materiaal stolt, staat het de opgenomen warmte weer af waardoor de omgeving warmer wordt.

In *figuur 2.1* is de werking van PCM weergegeven:

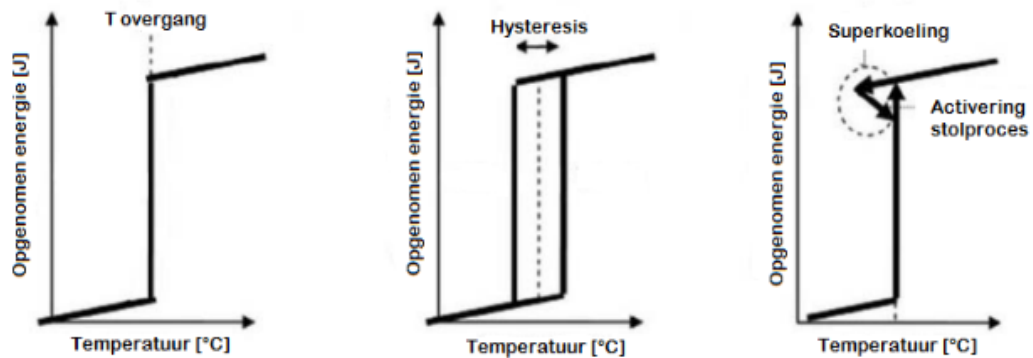


Figuur 2-1 Werking PCM

Problemen die zich voordoen bij PCM's zijn:

- De segregatie van het materiaal (na verloop van tijd kunnen bestanddelen in het materiaal van elkaar scheiden, waardoor de gunstige werking aanzienlijk afneemt)
- Het optreden van onderkoeling is weergegeven in *figuur 2.2* (de temperatuur daalt onder het overgangspunt, maar de stof gaat pas over in de vaste fase als er voldoende kristallisatiekernen zijn). Door het verlaagde smeltpunt is het nuttige effect van de PCM sterk verminderd.

- Smeltpunt van het materiaal, PCM bestaat uit een mengsel van verschillende stoffen waardoor er geen constante smeltemperatuur is. Dit wordt ook veroorzaakt door verontreinigingen. Hierdoor is er een smeltraject in plaats van een smeltemperatuur.
- Volumeverandering kan bij temperatuurverandering groot zijn, hier moet rekening mee worden gehouden.
- Bij sommige materialen kan er hysteresis voorkomen. Dit betekent dat het smeltpunt en stolpunt niet overeenkomen, zie *figuur 2.2.[1]*

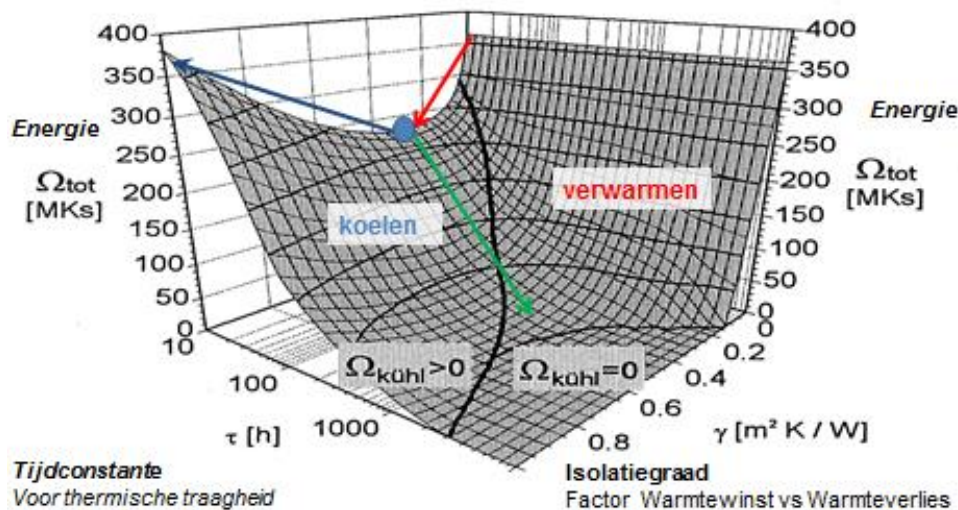


Figuur 2-2 Hysteresis en onderkoeling

2.1.2 WAAROM PCM

Om gebouwen energiezuinig te maken kunnen er verschillende maatregelen worden getroffen. De bekendste maatregel is het isoleren van gebouwen. Ten gevolge van de Nederlandse en Europese wetgeving, worden moderne constructies steeds beter geïsoleerd en zijn met veelal lichtgewicht materialen gebouwd. Deze constructies zijn minder goed in staat om warmte te accumuleren en daarmee wordt er een tijdsvertraging opgebouwd tegen wisselende buitentemperatuur. In 2020 willen Nederland en Europa energie neutraal bouwen, waardoor de isolatie trend zal doorzetten.

Bruno Keller, voormalig professor Building Physics bij het instituut van Building Technology in Zurich, heeft echter aangetoond dat het meer en meer isoleren van een woning geen zin heeft. In zijn 3D model heeft hij aangetoond dat er een optimale isolatiegraad is. Wordt hierna nog meer geïsoleerd dan vindt er een verschuiving plaats van minder verwarmen naar meer koelen. In *figuur 2.3* is dit 3D model weergegeven.

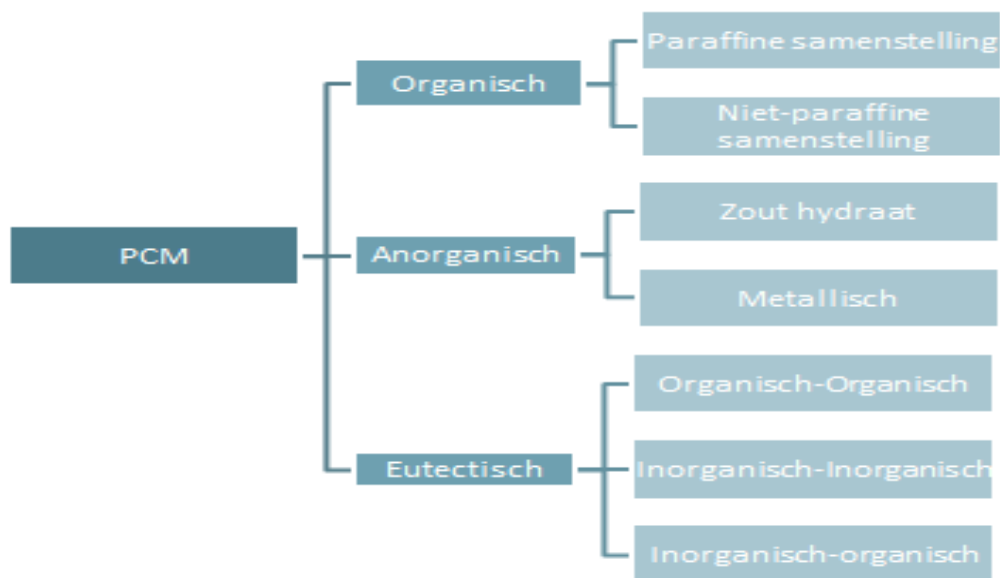


Figuur 2-3 Model Bruno Keller [5]

In dit model zijn de tijdsconstante voor thermische traagheid, isolatiegraad en de energie weergegeven. Het begin van de rode pijl is de situatie van een gebouw zonder isolatie of iets anders. Wanneer isolatie wordt toegepast gaat het energieverbruik omlaag (rode pijl). Op een bepaald moment (blauwe punt), is er bij meer isoleren geen energiebesparing meer. Het energieverbruik neemt juist toe doordat er meer gekoeld moet worden (blauwe pijl). Om na het bereiken van de ideale isolatiegraad nog meer energie te besparen, moet de thermische massa van het gebouw toenemen. Wanneer de thermische massa toeneemt zal de tijdsconstante voor de thermische traagheid ook toenemen en zal het energieverbruik verder afnemen (groene pijl). Sterker nog, de energiebesparing door het toevoegen van thermische massa is veel groter dan de energiebesparing bij isolatie. PCM is een ideaal materiaal om de thermische massa van het gebouw te verhogen door de hoge thermische massa van het materiaal.

2.1.3 ZOUTHYDRAAT

Er zijn verschillende PCM soorten verkrijgbaar, in *figuur 2.4* is in een schema weergegeven welke soorten er zijn:



Figuur 2-4 Soorten PCM

Hieronder worden de zouthydraten gedetailleerder behandeld, omdat in de te onderzoeken toepassingen (*hoofdstuk 2.2*) gebruik wordt gemaakt van deze PCM soort. Bij alle toepassingen van dit bedrijf wordt er gebruik gemaakt van zouthydraat als PCM. In dit hoofdstuk is kort beschreven waarom er voor zout hydraat is gekozen.

Zouthydraten bestaan uit zout en water gehydrateerd in een kristalrooster. De faseovergang van vast naar vloeibaar is eigenlijk een dehydratatie van het zouthydraat.

Zouthydraat heeft een hoop voordelen. Zo is het een goedkoop materiaal, heeft het een hoge smeltwarmte en geleidingscoëfficiënt. Daarnaast treedt er bijna geen volumeverandering op tijdens de faseovergang en is het niet brandbaar.

Er zijn echter ook bepaalde problemen die voorkomen moeten worden.

Het eerste probleem is dat het water dat vrijkomt bij de dehydratatie niet genoeg is om alle vaste stof op te lossen. Dit zorgt voor oververzadiging en er ontstaat een neerslag, waardoor het materiaal incongruent zal smelten. Dit probleem kan op de volgende manieren worden voorkomen:

- PCM verpakken en te verdelen in verschillende compartimenten waardoor scheiding gereduceerd wordt, hierdoor wordt mede segregatie van het materiaal voorkomen.
- Mechanisch roeren van de oplossing.
- Toevoegen van verdikkingsmiddel, hierdoor blijft het zout in de suspensie en kan het niet neerslaan.
- Toevoegen van water, zodat er geen neerslag ontstaat.
- Chemische samenstelling veranderen waardoor het materiaal congruent wordt.

Ook ontstaat er vaak onderkoeling waardoor het materiaal op een lagere temperatuur gaat stollen. Een manier om dit te voorkomen is het behouden van een aantal kristallen, waardoor kristallisering gemakkelijker kan plaatsvinden. [2]

Verpakking PCM

PCM wordt vaak verpakt omdat dit lekkages voorkomt en de hanteerbaarheid, corrosiebestendigheid en stabiliteit verbetert. Vaak wordt het in dunne matten of panelen verpakt om het warmteoverdrachtsoppervlakte te vergroten. Ook reduceert het de invloed van segregatie en onderkoeling. Waar rekening mee moet worden gehouden, is dat de verpakking de volumeverandering van het materiaal aan moet kunnen. [3]

Het PCM in de te onderzoeken PCM toepassingen van 'OC Autarkis' zijn verpakt in dunne panelen van HDPE. Het is verdeeld in compartimenten om segregatie te voorkomen. In *figuur 2.5* is te zien hoe zo een paneel eruit ziet.



Figuur 2-5 PCM paneel OC Autarkis

2.2 AUTARKIS PCM TOEPASSINGEN

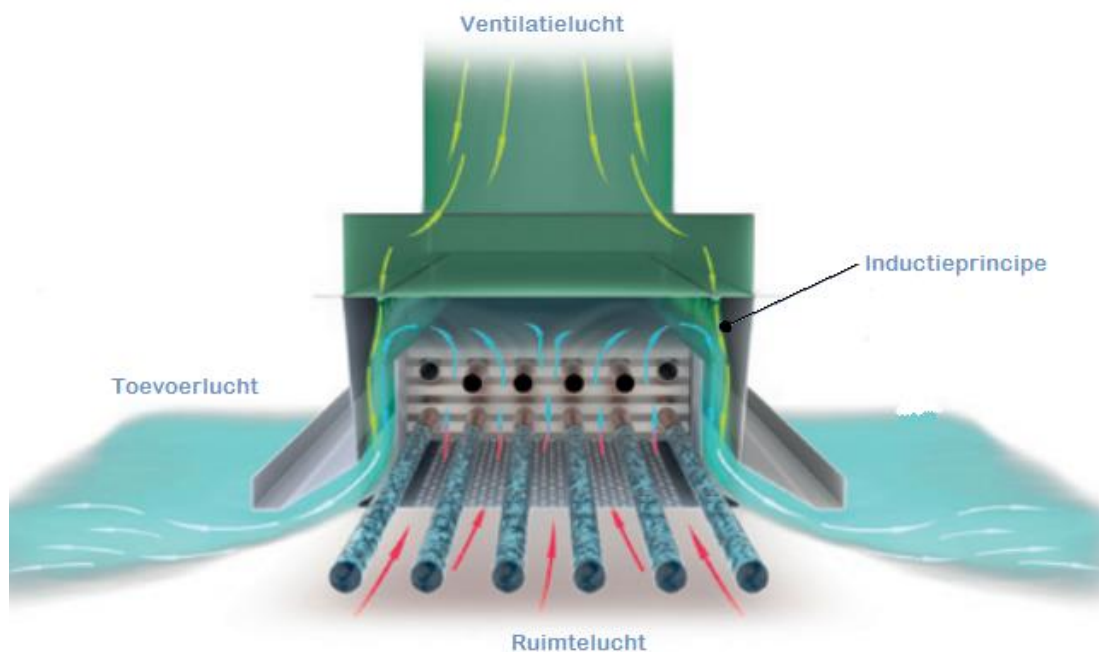
Hieronder worden de toepassingen van 'OC Autarkis' behandeld. In het vervolg van deze afstudeeropdracht zullen de PCM toepassingen van dit bedrijf worden onderzocht om te bepalen welke toepassing voor Verkade Klimaat het interessant is.

Bij alle toepassingen van dit bedrijf wordt er gebruik gemaakt van zouthydraat als PCM.

2.2.1 TOEPASSING 1: CRYSTAL BEAM MODULE (INDUCTIE CONVECTOR MET PCM)

De Crystal Beam Module, CBM, is een product dat de traditionele inductie convector vervangt. Hierbij wordt een huidige secundaire lucht-water-warmtewisselaar vervangen door een lucht-PCM-warmtewisselaar om de lucht in een ruimte te koelen. Hierbij zal het PCM de warmtewisselaar vervangen, waardoor er bespaard wordt op geïnstalleerd koelvermogen aangezien een traditionele warmtewisselaar wel koelvermogen nodig heeft en PCM niet. Dit product is goed toepasbaar in utiliteitsgebouwen, waar meer koeling dan verwarming nodig is zoals: ziekenhuizen, kantoren, scholen en verzorgingstehuizen.

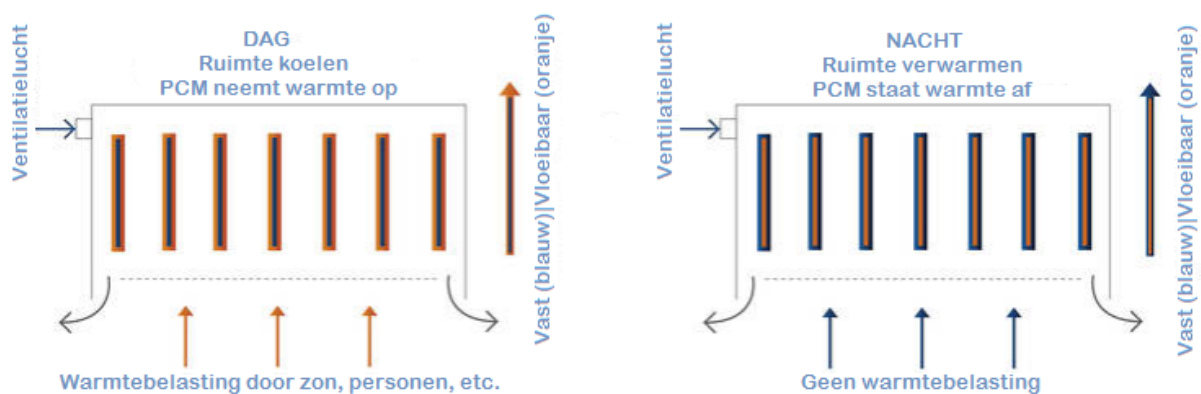
In *figuur 2.6* wordt de werking van een inductie convector uitgelegd. Dit is een afbeelding van een traditionele inductie convector, maar het principe is hetzelfde.



Figuur 2-6 Werking inductie convector [14]

De ventilatielucht van de luchtbehandelingskast, LBK, komt in een kamer waar het gelijkmatig verdeeld wordt. Via kleine openingen, nozzle openingen, wordt de ventilatielucht met een verhoogde snelheid in de uitblaaskanalen geblazen. Door het inductieprincipe (*bijlage 1*) wordt de lucht boven de warmtewisselaar meegezogen en ontstaat er een onderdruk waardoor de ruimtelucht door de warmtewisselaar wordt getransporteerd. Via de uitblaaskanalen wordt uiteindelijk de toevoerlucht (ventilatielucht + ruimtelucht) de ruimte in geblazen. De lucht zal in de ruimte circuleren waarna het weer in de inductie convector belandt. [14]

Bij de Crystal Beam Module zal het PCM als warmtewisselaar fungeren. Tijdens de zomer zal het PCM overdag de warmte van de ruimte opnemen, in de nacht zal de ventilatie een bepaalde tijd moeten worden ingeschakeld om alle opgenomen warmte van het PCM weer af te staan. Op deze manier kan het PCM elke dag zijn werk doen. In *figuur 2.7* is het verschil in dag en nacht schematisch weergegeven.



Figuur 2-7 Werking PCM inductie convector [13]

In de winter zal de inductie convector ook warmte opnemen, die in de avond weer de ruimte in kan worden gevoerd. Echter zal de besparing aan verwarmingskosten verwaarloosbaar zijn.

Voordelen van dit systeem volgens OC Autarkis:

- Gezond ventileren en thermische comfort dragen bij optimale prestaties
- Besparing in koelvermogen van maximaal 50%
- Energiebesparing van $\pm 20\%$ voor koeling
- Geen bewegende of slijtende onderdelen, besparing op onderhoudskosten $\pm 50\%$
- Eenvoudig toepasbaar in elke ruimte
- CBM is volledig recyclebaar

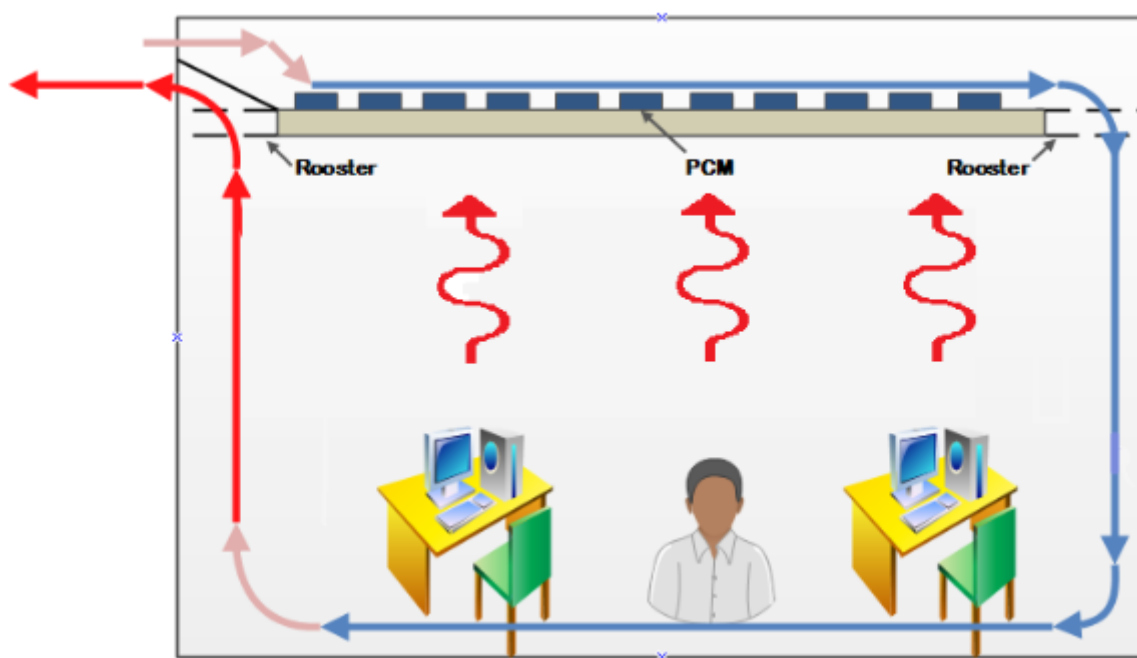
Nadelen van dit systeem:

- Hogere geluidsproductie, omdat lucht met hogere snelheid wordt ingeblazen

2.2.2 TOEPASSING 2: CRYSTAL CLIMATE CEILING (PCM KLIMAATPLAFOND)

De Crystal Climate Ceiling, CCC, is een modulair plafond systeem dat volgens OC Autarkis zorgt voor een optimaal thermisch comfort in elke ruimte. Het klimaatplafond bestaat uit plafondtegels belegd met PCM panelen de tegels zijn van staal om de geleidbaarheid te verhogen. Dit klimaatplafond is goed toepasbaar in utiliteitsgebouwen, waar meer koeling dan verwarming nodig is, zoals: ziekenhuizen, kantoren, scholen en verzorgingstehuizen.

In *figuur 2.8* is de werking van het klimaatplafond te zien. Voorbehandelde lucht van de LBK komt aan één kant van het plafond binnen en wordt over de PCM panelen geleid, waarna het de ruimte in wordt geblazen. De lucht circuleert en zal aan de andere kant van de kamer worden afgezogen. Alle interne warmte veroorzaakt door straling van personen/apparatuur en natuurlijke convectie, wordt opgenomen door de PCM panelen. Hierdoor zal de temperatuur in de ruimte aangenaam blijven.



Figuur 2-8 Werking PCM klimaatplafond

In tegenstelling tot een traditioneel klimaatplafond, zal een klimaatplafond met PCM panelen geen koelvermogen nodig hebben om de warmte af te voeren. Om warmte van de PCM panelen af te voeren zal in de nacht koele buitenlucht over de PCM panelen worden geleid, waardoor het PCM warmte afgeeft en stolt. De volgende dag kan dezelfde cyclus worden uitgevoerd.

In de winter zal het klimaatplafond ook interne warmte opnemen, die in de avond weer de ruimte in kan worden gevoerd. Hierdoor zal ook in de winter worden bespaard op energiekosten.

Voordelen van dit systeem volgens OC Autarkis:

- Besparing tot 50% aan koelvermogen in vergelijking met traditioneel koelvermogen
- Energiebesparing van 20% voor koeling
- Energiebesparing van 25% voor verwarming
- Volledig recyclebaar
- Gemakkelijk toepasbaar op bestaande plafondsysteem

Nadelen van dit systeem:

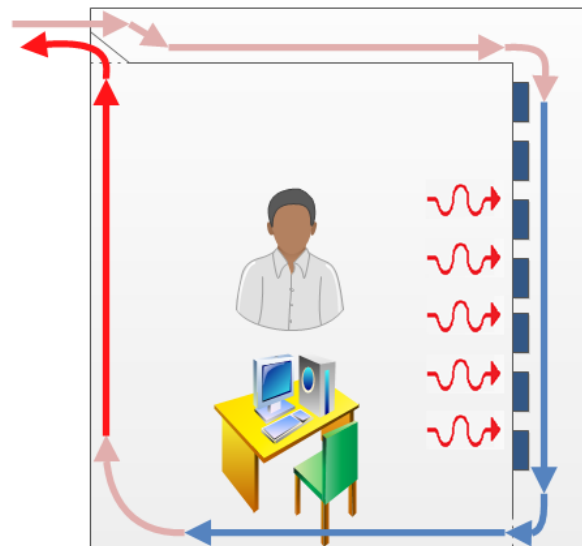
- Hoge investering

2.2.3 TOEPASSING 3: CRYSTAL CLIMATE WALL (PCM KLIMAATWAND)

De Crystal Climate Wall is een metalen klimaatwand die gebruik maakt van PCM om thermische energie op te slaan. De klimaatwand bestaat uit een wand waarin PCM panelen zijn toegepast. Deze klimaatwand is net zoals de klimaatplafond goed toepasbaar in utiliteitsgebouwen waar meer koeling dan verwarming nodig is, zoals: ziekenhuizen, kantoren, scholen en verzorgingstehuizen.

De klimaatwand werkt als volgt (figuur 2.9). Voorbehandelde lucht van de LBK wordt langs de PCM geleid en de ruimte ingeblazen, circuleert door de ruimte en zal worden afgezogen. Alle interne warmte, veroorzaakt door straling van personen/apparatuur en natuurlijke convectie, wordt opgenomen door de PCM panelen. Hierdoor zal de temperatuur in de ruimte aangenaam blijven.

In tegenstelling tot een traditionele klimaatwand, zal een klimaatwand met PCM panelen geen koelvermogen nodig hebben om de warmte af te voeren. Om de warmte van de PCM panelen af te voeren zal in de nacht koele buitenlucht over de PCM panelen worden geleid, waardoor het PCM warmte afgeeft en stolt. De volgende dag kan dezelfde cyclus worden uitgevoerd.



Figuur 2-9 Werking PCM klimaatwand

Voordelen van dit systeem volgens OC Autarkis:

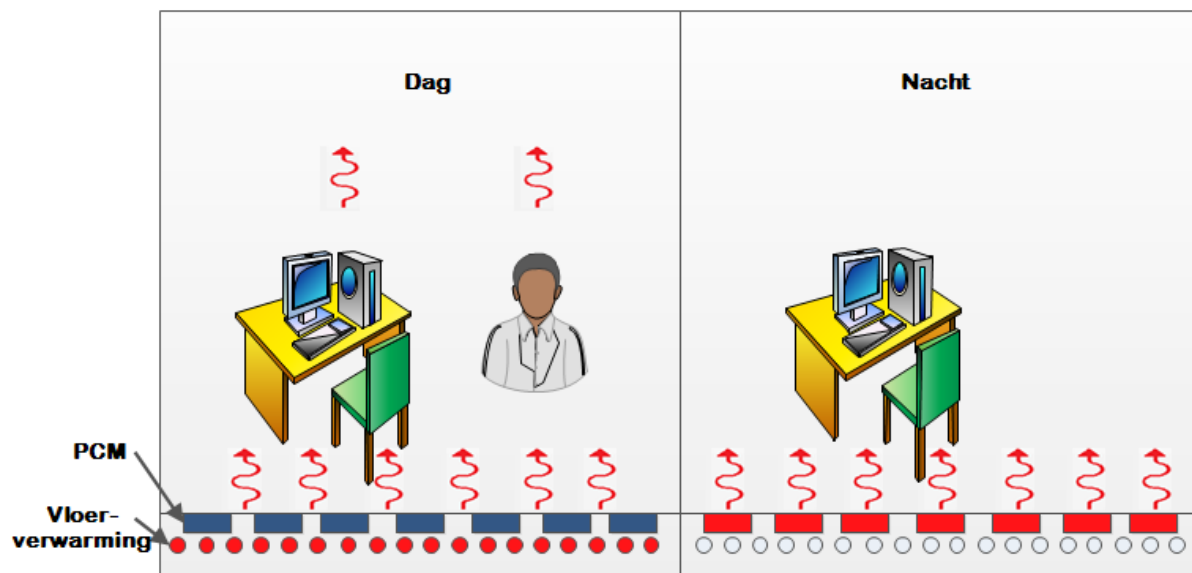
- Besparing tot 50% aan geïnstalleerd koelvermogen in vergelijking met traditioneel koelvermogen
- Energiebesparing van 20% voor koeling
- Energiebesparing van 25% voor verwarming
- Volledig recyclebaar

Nadelen van dit systeem:

- Hoge investering
- Ingrijpende werkzaamheden bij bestaande bouw

2.2.4 TOEPASSING 4: CRYSTAL CLIMATE FLOOR (PCM KLIMAATVLOER)

De Crystal Climate Floor, CCF, is een klimaatvloer met PCM. Deze toepassing is goed toepasbaar in woningen waar vraag naar verwarming hoger is dan bij bijvoorbeeld kantoren of ziekenhuizen. De werking is weergegeven in *figuur 2.10*.



Figuur 2-10 Werking PCM klimaatvloer

De werking van de klimaatvloer is als volgt. In de vloer van de ruimte is vloerverwarming aangebracht. Bovenop de vloerverwarming zijn PCM panelen gelegd. Overdag staat de vloerverwarming aan, waardoor de PCM panelen en de ruimte worden verwarmd. Het PCM zal warmte opnemen en smelten. Wanneer in de avond de vloerverwarming uit staat, zal het PCM warmte afgeven waardoor de ruimte niet afkoelt. Op deze manier is er in de ochtend geen extra vermogen nodig om de ruimte op te warmen.

Omdat het PCM in de klimaatvloer warmte buffert, zal de temperatuur stabiel blijven waardoor de verwarmingsinstallatie minder hoeft aan- en uit te schakelen.

Voordelen van dit systeem volgens OC Autarkis:

- Besparing tot 50% aan verwarmingsvermogen
- Energiebesparing van 20% voor verwarming
- Volledig recyclebaar

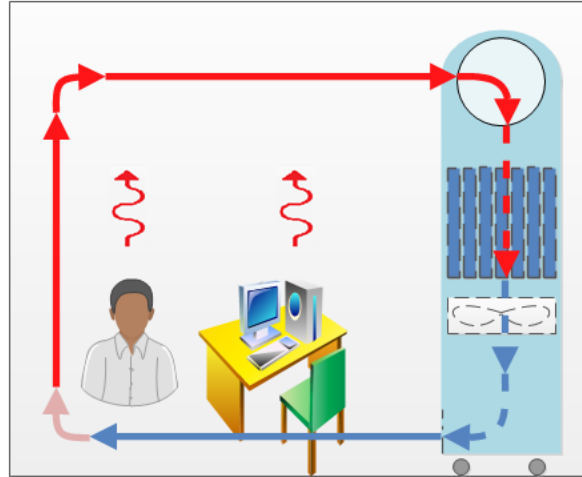
Nadelen van dit systeem:

- Ingrijpende werkzaamheden bij bestaande bouw
- Systeem reageert traag

2.2.5 TOEPASSING 5: CRYSTAL FAN COIL UNIT

De Crystal Fan Coil Unit, FCU, is een mobiele downflow PCM ventilator convector voorzien van PCM om energie op te slaan. In tegenstelling tot de traditionele ventilator convector fungeert de PCM hier als koelbatterij. Dit systeem is voornamelijk bedoeld voor aanvullende koeling, wanneer de al aanwezige koeling niet genoeg is. Het systeem kan worden toegepast in utiliteitsgebouwen waar meer koeling dan verwarming nodig is, bijvoorbeeld: ziekenhuizen, kantoren, scholen en verzorgingstehuizen. De FCU is een verrijdbare plug & play unit waarbij alleen de stekker in het stopcontact gestoken hoeft te worden om in een ruimte te gebruiken.

De toepassing werkt als volgt (figuur 2.11). Overdag zal de ventilator convector de ruimte koelen. Warme lucht gaat aan de bovenkant van de unit erin waarna het, doormiddel van een ventilator, door het PCM wordt geleid. Het PCM onttrekt de warmte uit de lucht, waardoor onderin koele lucht de unit uit wordt geblazen. Om het PCM te ontladen, wordt het systeem in de avond op een plek gezet met koele buitenlucht.



Figuur 2-11 Werking PCM Fan Coil Unit

Omdat dit product nog een prototype is zijn de besparingen van dit product nog niet bekend.

Voordelen van dit systeem:

- Systeem is flexibel (verrijdbaar)
- Geen installatiekosten

Nadelen van dit systeem:

- Esthetisch niet verantwoord
- Bevat bewegende delen
- Bedoelt voor aanvullende koeling, geen systeem voor totale koeling van een ruimte

2.3 PAKKET VAN EISEN EN WENSEN

Aan de hand van voorgaande analyse is er een pakket van eisen en wensen gemaakt. Dit is samen met de opdrachtgever overlegd, waaruit het onderstaande pakket van eisen is gekomen. In dit hoofdstuk zal het pakket van eisen worden gemaakt.

De opbouw van dit pakket van eisen is gebaseerd op het boek 'Ontwerpen van technische innovaties'[4]. De eisen zijn bedoeld voor PCM toepassingen voor nieuwe en bestaande kantoorgebouwen. Om alle eisen op te stellen wordt de product levenscyclus doorgenomen. De productie wordt hierin niet meegenomen, omdat de productie niet door Verkade Klimaat wordt gedaan. De fases: aanschaf, installatie, gebruik en verwijdering worden doorgenomen.

Het pakket van eisen bestaat uit twee delen. Eerst worden de eisen weergegeven, daarna de succescriteria (wensen). Als een toepassing niet aan de eisen voldoet, wordt de toepassing gelijk afgekeurd. Succescriteria zijn er om de toepassingen te rangschikken en de beste toepassing te bepalen. In *tabel 2.1* is het pakket van eisen weergegeven.

Tabel 2-1 Eisen

Nr.	Eis	Eenheid	Meetmethode	Bron
1	Aanschaf			
1.1	De maximale terugverdientijd van het PCM is 5 jaar	Jaren	Kosten-calculatie	Opdrachtgever
1.2*	Zonder subsidies moeten de totale kosten van de toepassing met PCM lager uitvallen dan die van de vergelijkbare toepassing zonder PCM	€	Kosten-calculatie	Opdrachtgever
1.3	Toepassing moet koelen als hoofdfunctie hebben	n.v.t.	Analyse toepassing	Conclusie onderzoek
2	Installatie			
	--			
3	Gebruik			
3.1	De temperatuur en RV moeten zich binnen de comfortzone van de behaaglijkheids grafiek bevinden (bijlage III)	°C & %	Proef-opstelling	Opdrachtgever
3.2	De toepassing moet zich tenminste in comfortklasse B bevinden (bijlage III)	°C	Proef-opstelling	Opdrachtgever
3.3	De geluidoverlast van de installatie mag niet meer dan 30 [dB] zijn bij nieuwbouw en niet meer dan 40 [dB] bij bestaande bouw	dB	Proef-opstelling	Bouwbesluit [16]
3.4	De luchtverversing voor een kantoorfunctie moet 6.5 [dm ³ /s] per persoon zijn bij nieuwbouw en 3.44 [dm ³ /s] per persoon bij bestaande bouw	dm ³ /s	Dynamisch model	Bouwbesluit [16]
3.5	De CO ₂ concentratie in de ruimte mag de 1000 ppm niet overschrijden	ppm	Proef-opstelling	Opdrachtgever
4	Verwijderen			
4.1	PCM moet volledig recyclebaar zijn	n.v.t.	Leverancier	Opdrachtgever
* De totale kosten bestaan uit aanschafkosten, installatiekosten, energiekosten en onderhoudskosten				

Om vervolgens uit de overgebleven toepassingen de beste te kiezen, wordt er gebruik gemaakt van de volgende succescriteria (tabel 2.2).

Tabel 2-2 Succescriteria

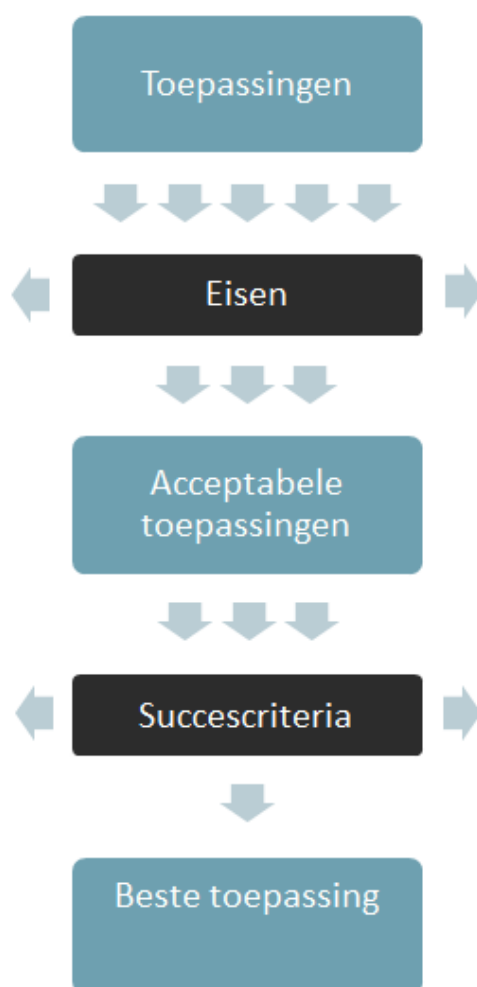
Nr.	Succescriteria	Eenheid	Meet- methode	Bron
1	Aanschaf			
1.1	Zo min mogelijk bewegende delen	n.v.t.	Analyse toepassing	Opdracht gever
2	Installatie			
2.1	Bij huidige gebouwen zo min mogelijk aanpassingen aan huidig systeem	n.v.t.	Schatting	Conclusie onderzoek
2.2	Zo min mogelijk tijd om de toepassing te installeren	uur	Schatting	Conclusie onderzoek
2.3	Toepassing neemt zo min mogelijk ruimte in beslag	m ²	Schatting	Conclusie onderzoek
3	Gebruik			
3.1	Onderhoudskosten zijn zo min mogelijk	€	Schatting	Conclusie onderzoek
3.2	Bespaart zo veel mogelijk energie	% t.o.v. huidig systeem	Analyse toepassing	Opdracht gever
3.3	Zo gemakkelijk mogelijk te demonteren voor reparatie	uur	Analyse toepassing	Conclusie onderzoek
4	Verwijderen			
	--			

3 KEUZEVERANTWOORDING

In de keuzeverantwoording wordt duidelijk welke toepassing er gekozen gaat worden om verder uit te werken. In overleg met de opdrachtgever worden keuzes gemaakt waaruit één toepassing als beste uit de bus komt. Deze keuze wordt gemaakt met behulp van het pakket van eisen en wensen. Eerst worden er aan de succescriteria van het pakket van eisen en wensen, weegfactoren gehangen.

Nadat de weegfactoren zijn bepaald, zullen de toepassingen aan de eisen worden getoetst. De toepassingen die niet aan de eisen voldoen zullen afvallen.

De acceptabele toepassingen zullen daarna worden getoetst aan de succescriteria. In combinatie met de weegfactoren zal uiteindelijk duidelijk worden welke toepassing wordt gekozen. In *figuur 3.1* is in schemavorm de volgorde van de keuzeverantwoording aangegeven.



Figuur 3-1 Verloop keuzeverantwoording

3.1 WEEGFACTOREN

Om een verschil aan te brengen in de belangrijkheid van elk succescriterium wordt er gebruik gemaakt van weegfactoren. Deze weegfactoren worden bepaald in overleg met de opdrachtgever met behulp van *tabel 3.1*. In deze tabel worden alle criteria met elkaar vergeleken. Is het ene criterium belangrijker dan het ander, dan krijgt het een '1' anders krijgt het een '0'. Het criterium met de hoogste eindscore krijgt een hoge weegfactor en andersom. Hieronder is de ingevulde tabel weergegeven.

Tabel 3-1 Weegfactoren tabel

	Bewegende delen	Aanpassing huidig systeem	Installatietijd	Compactheid	Onderhoudskosten	Energiebesparing	Demontieren voor reparatie	Weegfactor
Bewegende delen	x	0	0	1	0	0	0	1
Aanpassing huidig systeem	1	x	1	1	1	0	1	5
Installatietijd	1	0	x	1	0	0	1	3
Compactheid	0	0	0	x	0	0	1	1
Onderhoudskosten	1	0	1	1	x	0	1	3
Energiebesparing	1	1	1	1	1	x	1	6
Demontieren voor reparatie	1	0	0	0	0	1	x	2

In de laatste kolom van de tabel is te zien welke weegfactor elk criterium heeft gekregen.

3.2 TOETSING AAN EISEN

Omdat veel eisen pas in een later stadium kunnen worden getoetst, is het nu nog niet mogelijk om de toepassingen aan de eisen te toetsen. Echter kan er al van één toepassing worden geconcludeerd dat het niet voldoet. Toepassing 4, de PCM klimaatvloer, voldoet niet aan eis 1.3: 'Toepassing heeft koelen als hoofdfunctie'. Deze toepassing heeft namelijk verwarmen als hoofdfunctie en is daarom geen acceptabele toepassing.

3.3 TOETSING AAN SUCCESCRITERIA

Om uit de overgebleven acceptabele toepassingen te bepalen welke toepassing het beste is, worden de acceptabele toepassingen getoetst aan de succescriteria. In overleg met de opdrachtgever wordt bepaald hoeveel punten elke toepassing krijgt per criterium. Voor vele succescriteria zal samen met de opdrachtgever een inschatting worden gemaakt, welke toepassing het beste aan deze criteria voldoet. Dit wordt vermenigvuldigd met de weegfactor, om uiteindelijk de beste toepassing uit de bus te krijgen. In *tabel 3.2* is de ingevulde tabel te zien. De uitleg van de scores is te zien in *bijlage IV*.

Tabel 3-2 Toetsing aan succescriteria

Nr.	Succes criteria	Score: 1 t/m 5	Weegfactor	Toepassing 1	Met weegfactor	Toepassing 2	Met weegfactor	Toepassing 3	Met weegfactor	Toepassing 4	Met weegfactor	Toepassing 5	Met weegfactor
1.1	Zo min mogelijk bewegende delen	1	5	5	5	5	5	5	5			3	3
2.1	Zo min mogelijk aanpassingen aan huidig systeem	5	1	5	3	15	2	10				5	25
2.2	Zo min mogelijk tijd om te installeren	3	1	3	3	9	2	6				5	15
2.3	Neemt zo min mogelijk ruimte in beslag	1	2	2	2	2	2	2				1	1
3.1	Onderhoudskosten zo min mogelijk	3	3	9	4	12	4	12				2	6
3.2	Bespaart zoveel mogelijk energie	6	4	24	5	30	5	30				3	18
3.3	Zo gemakkelijk mogelijk te demonteren voor reparatie	2	3	6	2	4	2	4				5	10
Totaalscore					54		77		69				78

In de tabel is te zien dat toepassing 2 en 5 het hoogste scores, waarbij toepassing 5 net iets hoger scoort.

Na overleg met de opdrachtgever is er besloten om toepassing 5, de PCM Fan Coil Unit, te kiezen. Deze keuze is gemaakt, omdat de voorkeur ligt bij een koeling die lokaal werkt en compact is. De PCM Fan Coil Unit maakt, in tegenstelling tot toepassing 2 (PCM koelplafond), geen gebruik van een centrale LBK die de lucht aanvoert. Hierdoor is de gekozen toepassing veel beter toepasbaar tijdens de renovatie van bestaande gebouwen, omdat veel minder aanpassingen nodig zijn.

Echter moeten er wel een paar dingen aan de toepassing worden aangepast. De huidig ontworpen PCM Fan Coil Unit wordt gebruikt voor additioneel koelvermogen. Dit moet worden aangepast, waardoor de nieuwe toepassing een gehele ruimte kan koelen. Omdat alleen PCM niet in staat is een gehele ruimte te koelen, zal er in het ontwerp een warmtewisselaar worden toegevoegd die naast koeling tevens voor verwarming zal zorgen. De warmtewisselaar zal worden ontworpen op 100% koelvermogen, omdat naar verwachting het PCM in deze toepassing niet in staat is de gehele werkdag een koelvermogen te genereren. Het PCM zit dus geïmplementeerd in de toepassing puur voor energiebesparing en niet voor besparing op geïnstalleerd koelvermogen.

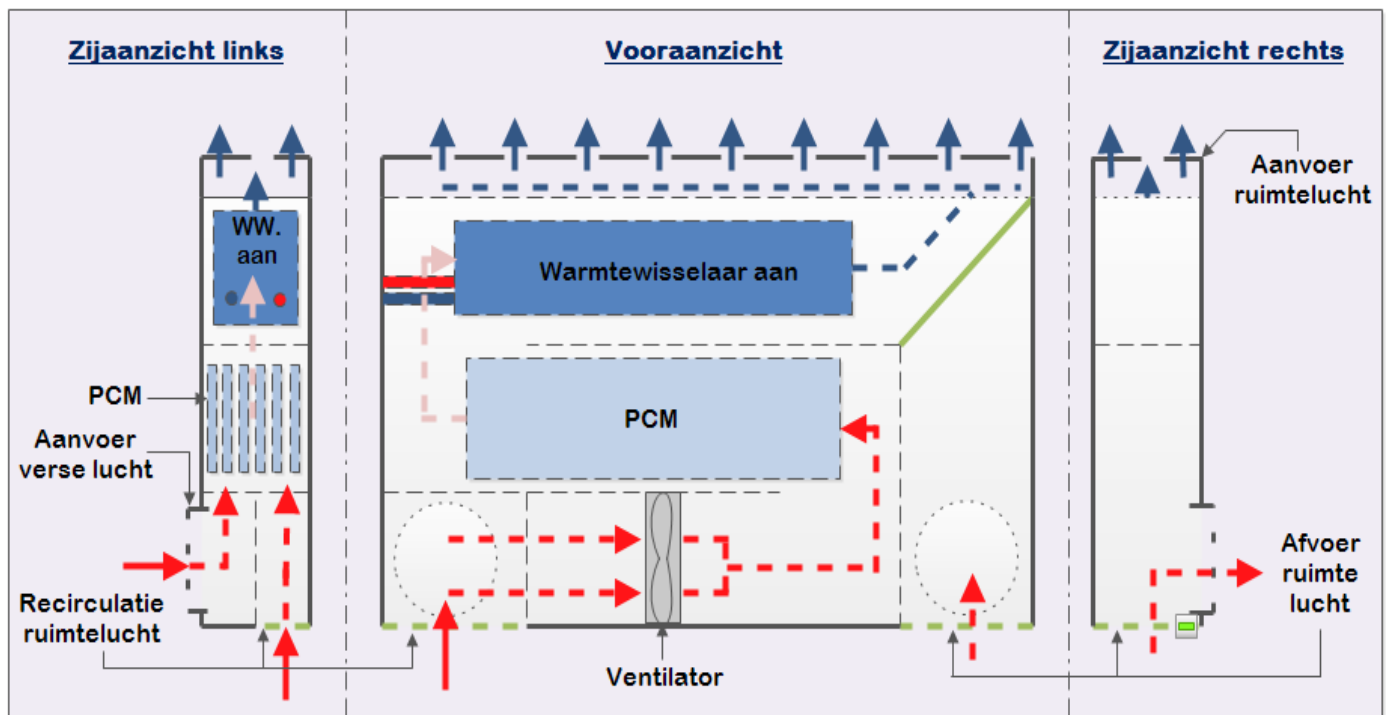
Ook zal de toepassing verse lucht moeten aanzuigen en afvoeren om aan de minimale luchtverversing volgens het bouwbesluit te voldoen.

Een gedetailleerdere beschrijving van de nieuwe toepassing is te vinden in *hoofdstuk 3.4*.

3.4 BESCHRIJVING UITEINDELIJKE TOEPASSING

Hieronder is beschreven hoe de uiteindelijk gekozen toepassing er uit gaat zien. Met behulp van afbeeldingen wordt de werking van deze toepassing uitgelegd. Hierbij moet niet worden gelet op de dimensionering, aangezien dit pas in de detailleringsfase wordt uitgewerkt.

De nieuw ontworpen unit wordt tegen de gevel geplaatst, waarin twee gaten worden gemaakt om verse lucht van buiten aan te voeren en lucht uit de kamer af te voeren. Het is de bedoeling dat de unit gaat ventileren, koelen en verwarmen. Eerst wordt de situatie voor het koelen overdag uitgelegd aan de hand van *figuur 3.2*.



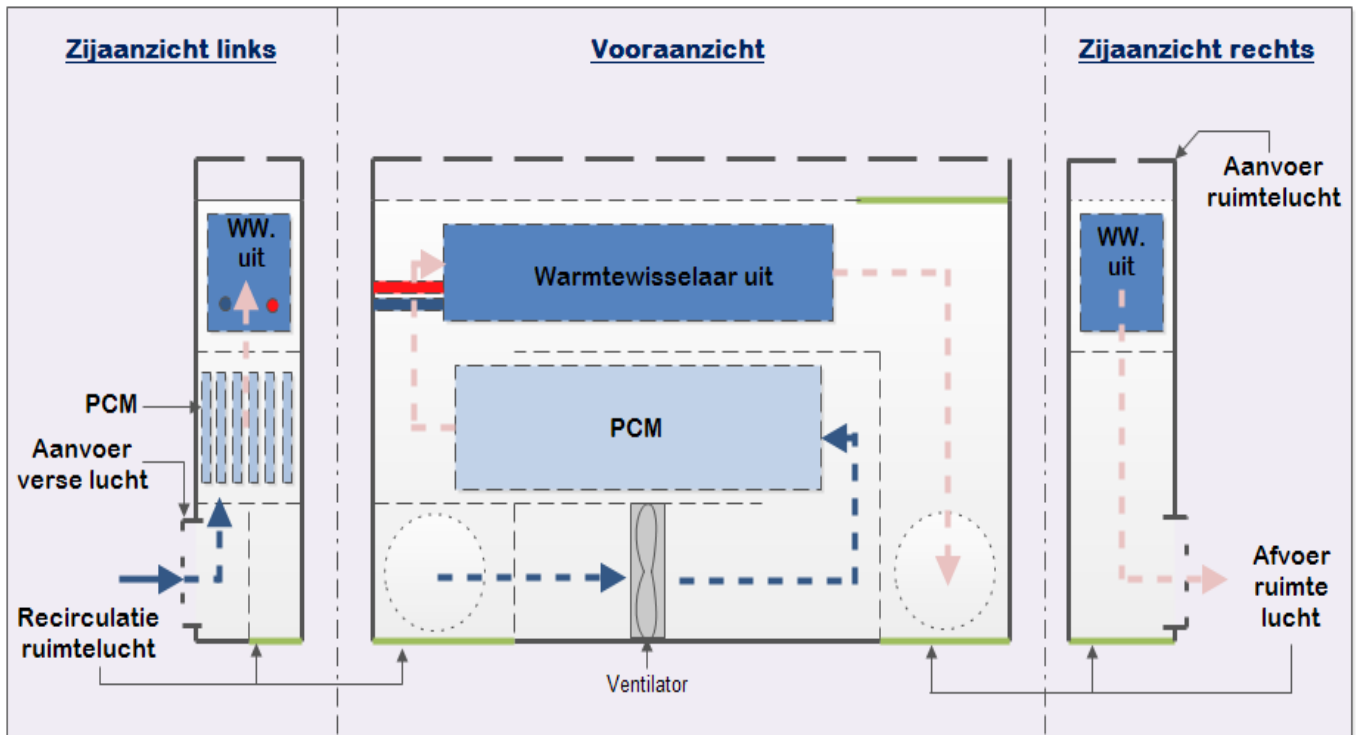
Figuur 3-2 Werking toepassing overdag

In het figuur hierboven is achtereenvolgens het linker zijaanzicht, het vooraanzicht en het rechter zijaanzicht te zien. Het principe van de unit wordt aan de hand van het vooraanzicht uitgelegd.

De aanvoer van verse lucht, aan de achterkant van de unit, wordt samen met de recirculatielucht uit de ruimte aangezogen door een ventilator. De lucht wordt via de ventilator door het PCM getransporteerd, waardoor de lucht voor een deel wordt gekoeld. Deze lucht wordt daarna nog door een warmtewisselaar geleid. Door de warmtewisselaar loopt koud water, waardoor het de lucht naar de gewenste temperatuur wordt afgekoeld. De groene diagonale lijn stelt een schot voor die overdag gesloten is, waardoor de lucht naar boven wordt geleid. Bovenin de unit bevindt zich een kamer die met een geperforeerde plaat aan de bovenkant is afgesloten. Dit zorgt ervoor dat de koele lucht gelijkmatig de ruimte in wordt geblazen. De lucht circuleert door de ruimte en wordt deels aangezogen als recirculatielucht en deels afgezogen en naar buiten getransporteerd.

Het PCM onttrekt overdag dus een deel van de warmte uit de lucht waardoor het smelt.

Om ervoor te zorgen dat het PCM de volgende dag weer warmte kan onttrekken uit de lucht, moet het PCM in de nacht zijn warmte afstaan. In *figuur 3.3* is weergegeven hoe dit gebeurt.

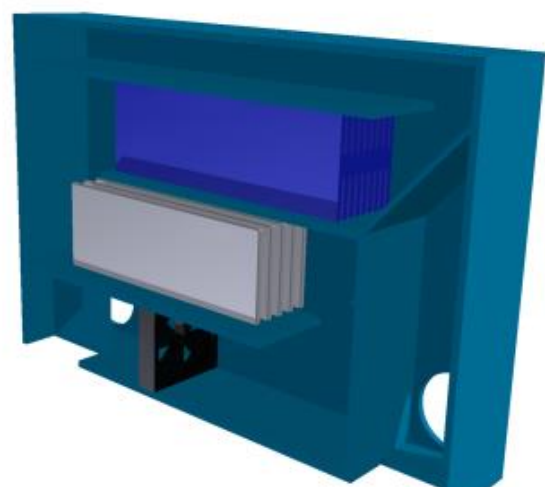


Figuur 3-3 Werking toepassing in de nacht

In de nacht zijn de ingangen van de recirculatielucht en de afvoerlucht uit de ruimte afgesloten. Ook is het schot omgezet zodat het nu de weg naar de aanvoer van de ruimtelucht afsluit en de lucht direct naar de afvoer wordt geleid. Er is nu een kort circuit ontstaan waardoor de lucht niet de kamer in wordt geblazen, maar gelijk weer wordt afgevoerd. De koele buitenlucht wordt aangezogen door de ventilator en door het PCM geleid. Hierdoor zal het PCM zijn warmte afstaan aan de koelere buitenlucht. De lucht gaat via de warmtewisselaar, die in de nacht uitstaat en geen functie heeft, naar buiten via de afvoer. Op deze manier kan het PCM zo snel mogelijk worden ontladen, om de volgende dag weer warmte op te nemen.

In de winter wanneer er verwarming nodig is, zal de functie van de warmtewisselaar worden omgedraaid waardoor het als verwarming zal fungeren. Het PCM heeft in de winter geen functie, omdat de temperatuur van de aangevoerde lucht kouder is dan de smelttemperatuur van het PCM.

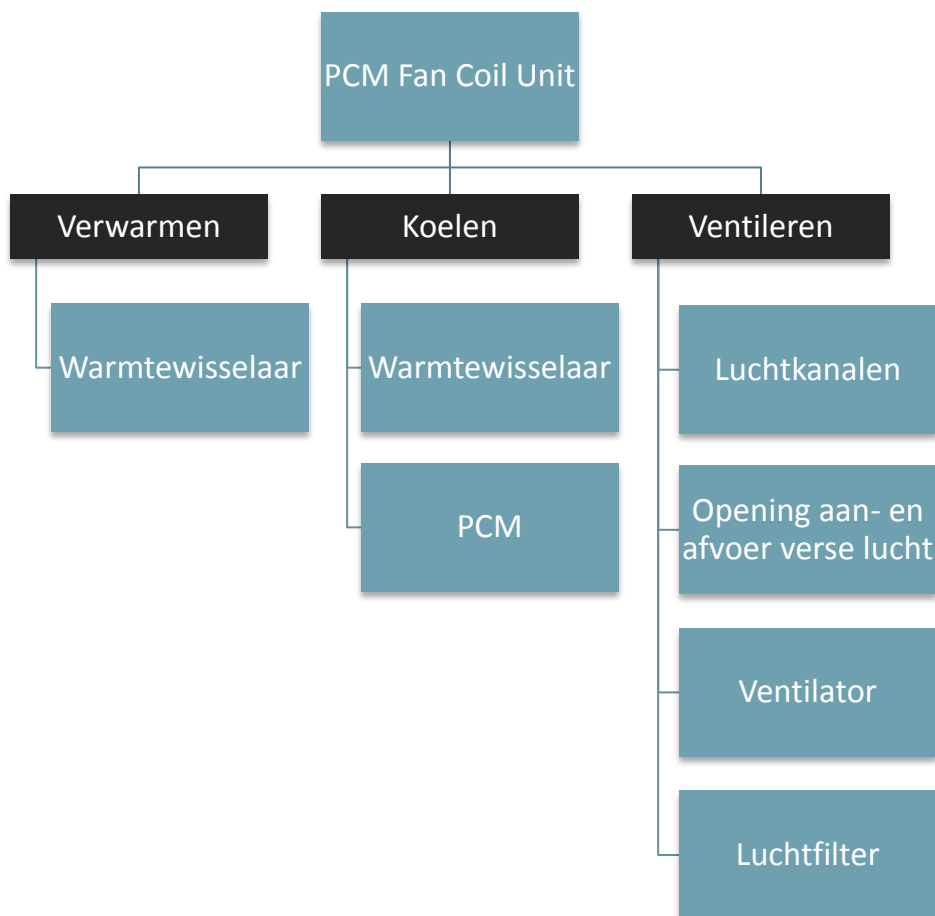
In *figuur 3.4* is weergegeven hoe de toepassing er ongeveer uit gaat zien. Dit is nogmaals een figuur om het principe duidelijk te maken en grofweg aan te geven hoe de toepassing eruit komt te zien. In de detailleringfase worden alle hoofdonderdelen pas gedimensioneerd. Deze beschrijving zal de basis vormen voor *hoofdstuk 4*.



Figuur 3-4 Overzicht toepassing

4 DIMENSIONEREN UITEINDELIJKE TOEPASSING

Na het bepalen van de uiteindelijke toepassing is het de bedoeling deze toepassing goed te dimensioneren. Deze toepassing zal onderdeel voor onderdeel worden gedimensioneerd. Alle gegevens en berekeningen worden gedaan aan de hand van 'ISSO publicaties' [19], het bouwbesluit [16] en het arbobesluit [18]. Er wordt hieronder alleen ingegaan op de hoofdonderdelen van de toepassing, omdat het in dit tijdsbestek niet mogelijk is om met alle onderdelen rekening te houden. Deze hoofdonderdelen vormen genoeg informatie om de toepassing vervolgens te simuleren. In *figuur 4.1* is te zien welke hoofdonderdelen worden behandeld.



Figuur 4-1 Hoofdonderdelen toepassing

De onderdelen weergegeven in het bovenstaande overzicht zullen hieronder worden behandeld om elk onderdeel juist te dimensioneren.

Het dimensioneren van alle onderdelen gebeurt aan de hand van een vooraf bepaald kantoormodel. Hierin zijn bepaalde afmetingen, ontwerptemperaturen en oriëntaties in overleg met de opdrachtgever vastgesteld. In *figuur 4.2* is te zien hoe dit model eruit ziet.

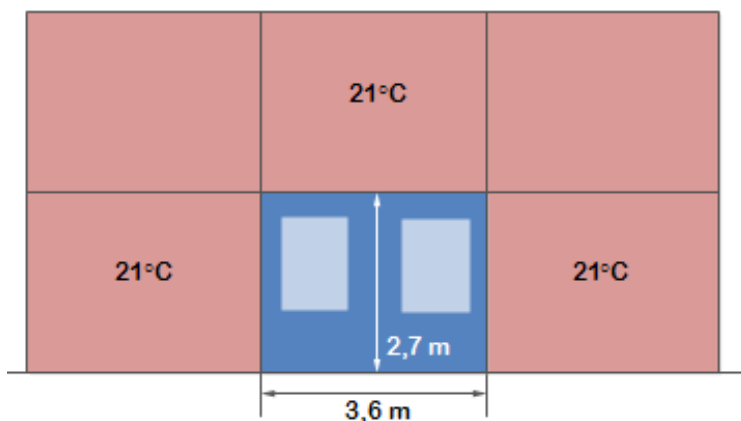
Vooraanzicht

Zomer: Temp. binnen: 24 °C
Temp. buiten: 30 °C
Ramen: Lengte = 1,15 m
Hoogte = 1,30 m

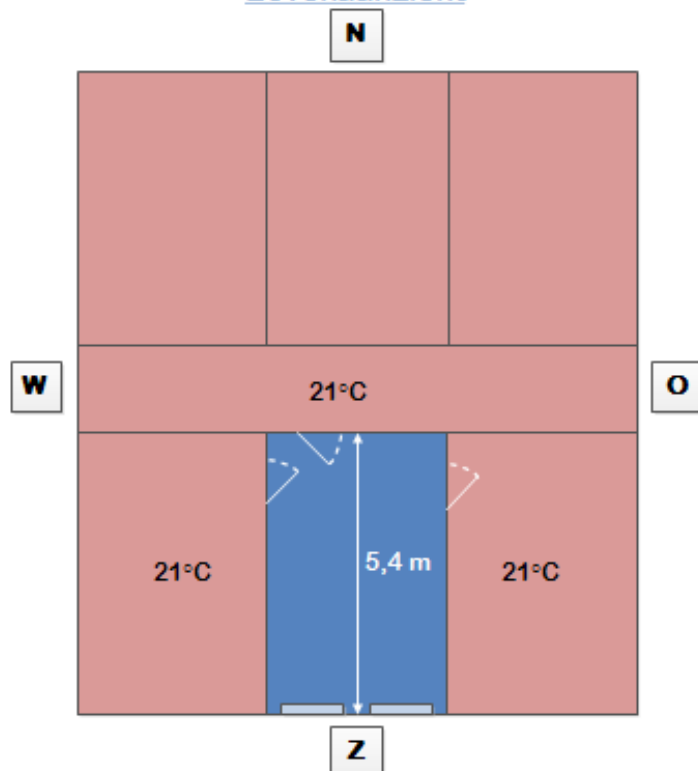
Winter: Temp. binnen: 22 °C
Temp. buiten: -10 °C
Deuren: Breedte = 0,93 m
Hoogte = 2,315 m

Werktijden: 8.00 - 18.00
Aantal personen: 2

Nachtverlaging: 18 °C
Aantal computers: 2



Bovenaanzicht



Figuur 4-2 Overzicht kantoormodel

Hierboven is in het voor- en bovenaanzicht het volgende te zien: De binnen- en buitentemperatuur; werktijden; nachtverlagingstemperatuur; de afmetingen van de ruimte, deuren, en ramen; het aantal personen + computers in het kantoor en de oriëntatie van het kantoor.

Voor de afmetingen van de kantoorruimte en de deur is gekozen voor standaard maten, de afmetingen van het raam zijn bepaald aan de hand van een meting. Er is gekozen voor een oriëntatie op het zuiden, omdat dit de meeste koellast oplevert.

Om het luchtdebiet voor ventilatie uit te rekenen wordt de volgende formules gebruikt:

$$qv = l \cdot b \cdot h \cdot vv \quad (1)$$

Waarin:	qv =	luchtdebiet voor ventilatie	[m ³ /h]
	l =	lengte	[m]
	b =	breedte	[m]
	h =	hoogte	[m]
	vv =	ventilatievoud [18]	[1/h]

Bij een aangenomen ventilatievoud van 6 [1/h], is het luchtdebiet van de ventilatie:

$$(5,4 \cdot 3,6 \cdot 2,7) \cdot 6 = 314,93 = 315 \text{ [m}^3/\text{h]} = 0,087 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

De minimale hoeveelheid verse lucht die vanuit buiten moet worden aangezogen, wordt voorgeschreven door het bouwbesluit en is 0,0065 [m³/s] per persoon. Voor twee personen is dit dus 0,013 [m³/s], wat ongeveer 1/7^{de} van het totale luchtdebiet is.

Aan de hand van dit model en de aangenomen gegevens worden alle bovengenoemde onderdelen gedimensioneerd.

4.1 VERMOGEN WARMTEWISSELAAR

Om de ruimte te verwarmen en te koelen zal een warmtewisselaar worden gebruikt. Om te bepalen wat het vermogen van deze warmtewisselaar is, zullen koellast- en warmteverliesberekeningen worden gemaakt. Aan de hand van deze berekeningen zullen het vermogen en uiteindelijk de afmetingen van de warmtewisselaar worden bepaald. Het uiteindelijke vermogen en de afmetingen worden in *hoofdstuk 4.1.3* behandeld.

4.1.1 KOELLASTBEREKENINGEN

Om het benodigde vermogen voor koelen te berekenen, worden er koellastberekeningen uitgevoerd. De vertrektemperatuur in de zomer is op 24 [°C] gesteld en voor de maximale buitentemperatuur is gekozen voor 30 [°C].

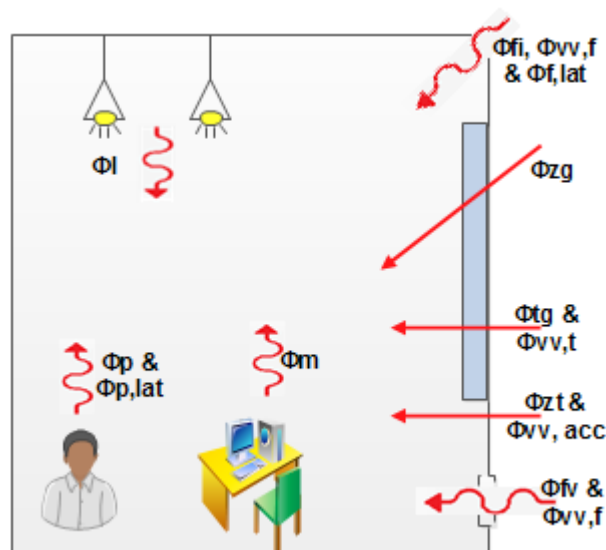
De koellast bestaat uit de volgende componenten:

- Externe voelbare componenten
 - Φ_{zg} = koellastbijdrage door zonnewarmte via ramen
 - Φ_{zt} = zonnewarmte en transmissie via ondoorzichtige buitenwanden en daken
 - Φ_{tg} = transmissie door glasvlakken
 - Φ_{fi} = infiltratie van buitenlucht
 - Φ_{fv} = ventilatie van buitenlucht
- Interne voelbare componenten
 - Φ_l = verlichtingswarmte
 - Φ_p = warmteafgifte personen
 - Φ_m = warmteafgifte machines
- Latente koellast
 - $\Phi_{f,lat}$ = Latente koellast door infiltratie
 - $\Phi_{p,lat}$ = Latente koellast door personen
- Vermindering koellast door toegelaten stijging luchttemperatuur
 - $\Phi_{vv,acc}$ = extra warmteaccumulatie in wanden
 - $\Phi_{vv,t}$ = geringere warmtetransmissie door ramen
 - $\Phi_{vv,f}$ = geringere warmtetoevoer door infiltratie en ventilatie

In *figuur 4.3* is te zien waar de verschillende componenten optreden.

Voor de formules van de verschillende componenten, de uiteindelijke berekening en de benodigde tabellen wordt verwezen naar *bijlage V*.

Als al deze posten worden samengenomen komt de totale koellast eruit, wat gelijkstaat aan het benodigde vermogen van de warmtewisselaar voor koelen. In *hoofdstuk 4.1.3* zal dit totaal te zien zijn.



Figuur 4-3 Overzicht Koellast componenten

4.1.2 WARMTEVERLIESBEREKENINGEN

Om het benodigde vermogen voor verwarmen te berekenen, worden er warmteverliesberekeningen uitgevoerd. De vertrektemperatuur in de zomer is op 22 [°C] gesteld en voor de minimale buitentemperatuur is gekozen voor -10 [°C].

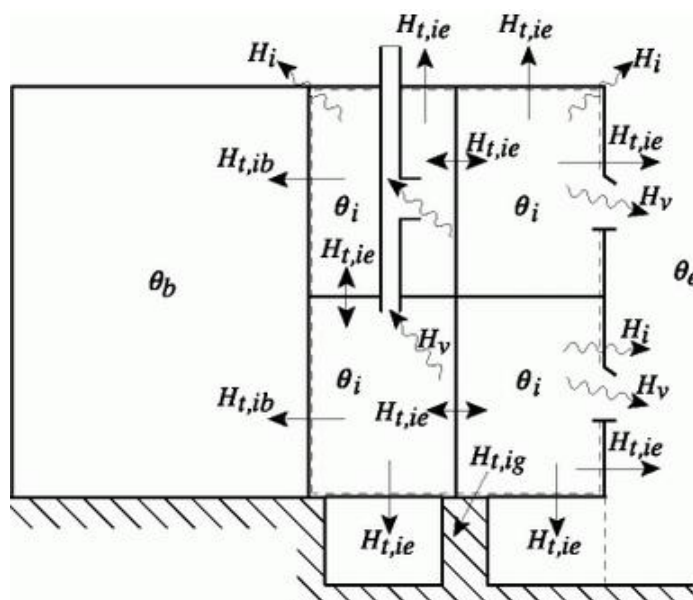
Het warmteverlies bestaat uit de volgende componenten:

- $\Phi_t =$ warmteverlies door transmissie
 - $H_{t,ie}$ = specifiek warmteverlies naar de buitenlucht
 - $H_{t,ia}$ = specifiek warmteverlies naar andere verwarmde ruimten
 - $H_{t,io}$ = specifiek warmteverlies naar aangrenzende onverwarmde ruimten
 - $H_{t,ib}$ = specifiek warmteverlies naar een aangrenzend gebouw
 - $H_{t,ig}$ = specifiek warmteverlies naar de grond
- $\Phi_v =$ warmteverlies door buitenluchttoetreding
 - Φ_{vent} = warmteverlies door ventilatie
 - Φ_i = warmteverlies door infiltratie
- $\Phi_{op} =$ in rekening te brengen warmtoeslag voor bedrijfsbeperking

In *figuur 4.4* is te zien waar de verschillende componenten optreden.

Voor de formules van de verschillende componenten, de uiteindelijke berekening en de benodigde tabellen wordt verwezen naar *bijlage VI*.

Als al deze posten worden samengenomen komt het totale warmteverlies eruit, wat gelijkstaat aan het benodigde vermogen van de warmtewisselaar voor verwarmen. In *hoofdstuk 4.1.3* zal dit totaal te zien zijn.



Figuur 4-4 Overzicht verschillende warmteverliezen [19]

4.1.3 CONCLUSIE WARMTEWISSELAAR

Met behulp van de koellast- en warmteverliesberekeningen is berekend hoeveel vermogen de warmtewisselaar moet kunnen leveren. Hieronder zijn de resultaten van deze berekening weergegeven voor bestaande en nieuwe gebouwen. Voor de gedetailleerde berekening wordt er verwezen naar *bijlage V en VI*.

De maximale koellast bij een buitentemperatuur van 30 [°C] en een binnentemperatuur van 24 [°C] is in *tabel 4.1* en *tabel 4.2* weergegeven voor bestaande kantoorgebouwen en nieuwe kantoorgebouwen.

Tabel 4-1 Maximale koellast bestaand gebouw

	Aantal Watt
Qextern (externe koellast)	877,59
Qintern (interne koellast)	580,50
Qlatent (latente koellast)	109,77
Qvv (vermindering koellast)	175,72
Totale koellast	1392,13

Tabel 4-2 Maximale koellast nieuw gebouw

	Aantal Watt
Qextern (externe koellast)	593,29
Qintern (interne koellast)	582,51
Qlatent (latente koellast)	109,77
Qvv (vermindering koellast)	168,05
Totale koellast	1117,52

De maximale koellast voor bestaande kantoorgebouwen is 1392 [W] en voor nieuwe kantoorgebouwen 1118 [W].

Het maximale warmteverlies bij een buitentemperatuur van -10 [°C] en een binnentemperatuur van 22 [°C] is in *tabel 4.3* en *tabel 4.4* weergegeven voor bestaande kantoorgebouwen en nieuwe kantoorgebouwen.

Tabel 4-3 Maximaal warmteverlies bestaand gebouw

	Aantal Watt
Φ_t (transmissiewarmteverlies)	729,80
Φ_i (infiltratiewarmteverlies)	0,00
Φ_v (ventilatiewarmteverlies)	499,20
Φ_o (toeslag voor bedrijfsbeperking)	354,29
Totale warmteverlies	1583,30

Tabel 4-4 Maximaal warmteverlies nieuw gebouw

	Aantal Watt
Φ_t (transmissiewarmteverlies)	638,91
Φ_i (infiltratiewarmteverlies)	0,00
Φ_v (ventilatiewarmteverlies)	499,20
Φ_o (toeslag voor bedrijfsbeperking)	259,82
Totale warmteverlies	1397,92

Het maximale warmteverlies voor bestaande kantoorgebouwen is 1583 [W] en voor nieuwe kantoorgebouwen is 1398 [W].

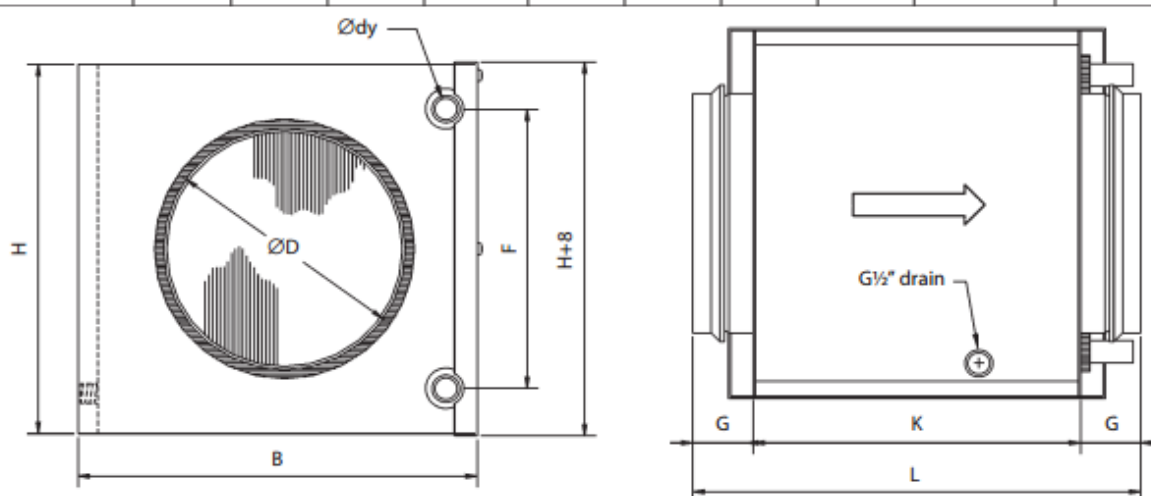
De warmtewisselaar moet worden ontworpen voor maximale omstandigheden, daarom moet de warmtewisselaar minstens 1583 [W] kunnen leveren om te kunnen koelen en verwarmen. Bij dit vermogen kan de toepassing in bestaande en nieuwe gebouwen worden geïmplementeerd.

Aan de hand van dit maximale verwarmingsvermogen en maximale koelvermogen is er een warmtewisselaar gekozen van het merk 'VEAB'. In *figuur 4.5* zijn de specificaties weergegeven van deze warmtewisselaar.

Capacity CWK 160-3-2,5 Water temperature 6/12°C

Air flow	Press. drop	Inlet air temp.	Inlet air humidity	Outlet air temp.	Output	Water flow	Water press. drop
m ³ /h	Pa	°C	% RH	°C	kW	l/s	kPa
145	8	25	50	14.7	0.5	0.02	1.9
145	9	30	45	14.9	1.0	0.04	7.7
355	38	25	50	16.4	1.1	0.05	9.6
355	42	30	45	18.1	1.9	0.07	23.4

Type	Ø D mm	B mm	H mm	Ødy mm	F mm	G mm	K mm	L mm	Coil inside volume l	Weight kg
CWK 100-3-2.5	100	251	180	10	100	40	276	356	0.20	4.4
CWK 125-3-2.5	125	326	255	10	175	40	276	356	0.42	6.5
CWK 160-3-2.5	160	326	255	10	175	40	276	356	0.42	6.7



Figuur 4-5 Specificaties warmtewisselaar [20]

Gekozen is voor de 'CWK 160-3-2,5', met een koelvermogen van 1,9 [kW] bij een luchtdebiet van 355 [m³/h]. Deze warmtewisselaar gaat uit van een toevoertemperatuur voor lucht van 30 [°C] en een afvoertemperatuur van 18 [°C], wat genoeg moet zijn om de lucht voldoende te koelen.

Deze warmtewisselaar zal ook genoeg zijn voor het verwarmen van de ruimte, als er wordt gekeken naar een vergelijkbaar type voor verwarmen. In tabel 4.5 zijn deze specificaties weergegeven. Hierin is te zien dat bij een toevoertemperatuur voor lucht van -7,5 [°C] de afvoertemperatuur en het verwarmingsvermogen meer dan genoeg zijn.

Tabel 4-5 Specificaties verwarmingsvermogen [20]

Capacity of CWW 160-3-2,5

Water temp.			in/out 55°C/45°C			
Air flow	Air press. drop	Inlet air temp.	Outlet air temp.	Output	Water flow	Water press. drop
m ³ /h	Pa	°C	°C	kW	l/s	kPa
355	43	-15	26.7	5.7	0.14	68.5
355	42	-7.5	29.8	4.9	0.12	52.5
355	41	0	32.7	4.2	0.10	39.0

4.2 AFMETINGEN LUCHTKANAAL

Om het luchtkanaal te berekenen moet de volgende formule worden gebruikt:

$$A = \frac{q \cdot v}{v} \quad (2)$$

Waarin:

A	=	Oppervlakte doorsnede luchtkanaal	[m ²]
q v	=	Luchtdebiet door het luchtkanaal	[m ³ /s]
v	=	Luchtsnelheid in het luchtkanaal	[m/s]

De luchtsnelheid in het kanaal mag volgens 'ISSO publicatie 17' [19] niet meer dan 3 [m/s] zijn in aftakkingen van ventilatiesystemen. Aangezien het hele systeem zich hier in de leefomgeving bevindt, geldt dit ook voor dit systeem.

Het luchtdebiet door het kanaal is 315 [m³/h] = 0,087 [m³/s] (zie uitleg kantoormodel).

Voor de afmetingen van de luchtkanalen in de toepassing worden er twee verschillende maten gebruikt. Voor de breedte van de luchtkanalen wordt uitgegaan van de buitenmaat van de warmtewisselaar. De hoogte van het luchtkanaal bij het PCM zal anders zijn dan de hoogte van het luchtkanaal bij de warmtewisselaar, om zo de hoogte van de toepassing te reduceren.

Het oppervlakte (A) van het luchtkanaal bij het PCM is:

$$b \cdot h = 255 \cdot 220 = 56100 [mm^2] = 0,056 [m^2]$$

Als deze gegevens in formule (2) worden ingevuld verkrijg je:

$$0,056 = \frac{0,087}{v} \Rightarrow v = \frac{0,087}{0,056} = 1,55 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Het oppervlakte (A) van het luchtkanaal bij de warmtewisselaar is:

$$255 \cdot 326 = 83130 [mm^2] = 0,083 [m^2]$$

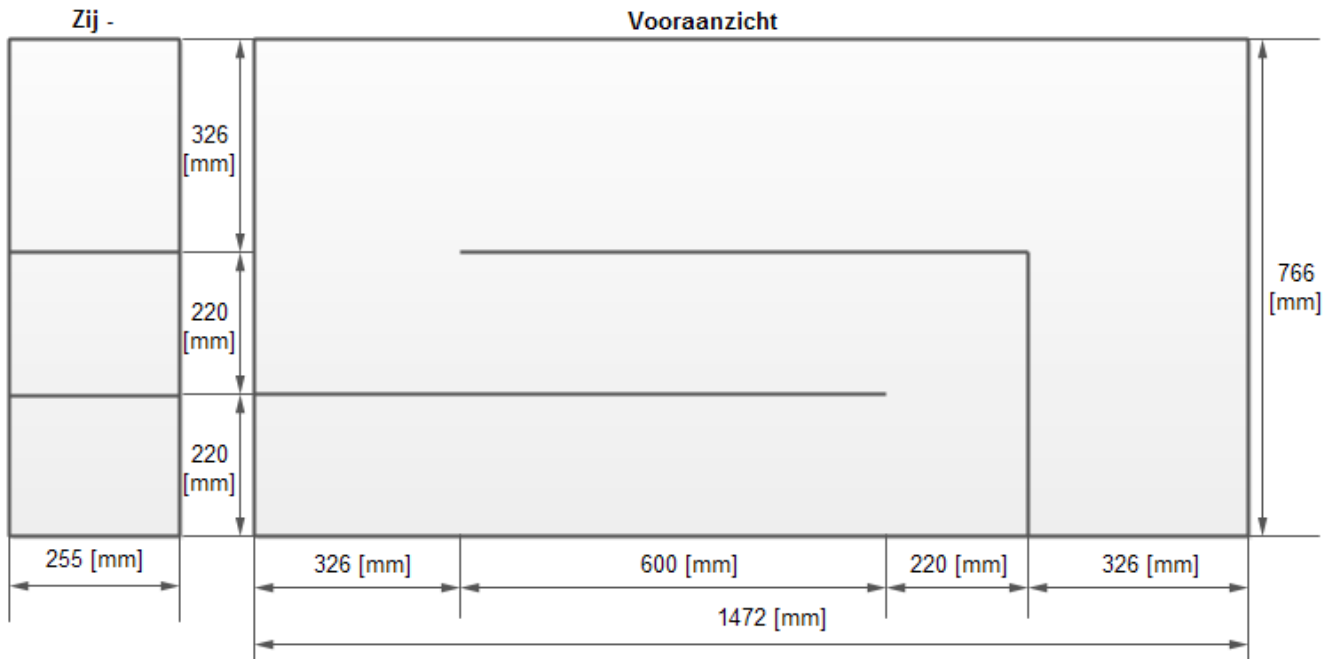
Als deze gegevens in formule (2) worden ingevuld verkrijg je:

$$0,083 = \frac{0,087}{v} \Rightarrow v = \frac{0,087}{0,083} = 1,05 \left[\frac{m}{s} \right]$$

De snelheid door de luchtkanalen wordt 1,05 [m/s] en 1,55 [m/s], dit is lager dan 3 [m/s] en dus toelaatbaar.

Om te zorgen dat alle onderdelen in de toepassing passen, gaan de luchtkanalen qua lengte en breedte er in de toepassing als volgt uit zien (figuur 4.6).

Aan de hand van dit figuur zal later ook het drukverlies in de kanalen worden uitgerekend.



Figuur 4-6 Afmetingen luchtkanaal

4.3 AANVOER- EN AFVOERGAT

De doorsnede van het aan- en afvoergat kan met dezelfde formule worden berekend als de berekening van het luchtkanaal. De lichtsnelheid in aftakkingen mag volgens 'ISSO publicatie 17'[19] niet meer dan 3 [m/s] zijn bij toevoer en 3,5 [m/s] bij afvoer. Om vervolgens de diameter uit te rekenen wordt de volgende formule gebruikt:

$$A = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \quad (3)$$

Waarin:

A = Oppervlakte doorsnede luchtkanaal [m²]
d = diameter aan- en afvoer [m]

De minimale diameter van de aan- en afvoer moet dan zijn:

$$A_{aanvoer} = \frac{0,087}{3} = 0,029 \text{ [m}^2\text{]} \Rightarrow d_{aanvoer} = \sqrt{\frac{0,029}{\left(\frac{1}{4}\right)\pi}} = 0,192 \text{ [m]} = 192 \text{ [mm]}$$

$$A_{afvoer} = \frac{0,087}{3,5} = 0,0249 \text{ [m}^2\text{]} \Rightarrow d_{afvoer} = \sqrt{\frac{0,0249}{\left(\frac{1}{4}\right)\pi}} = 0,178 \text{ [m]} = 178 \text{ [mm]}$$

Voor het gemak worden beide gaten op 200 [mm] gedimensioneerd.

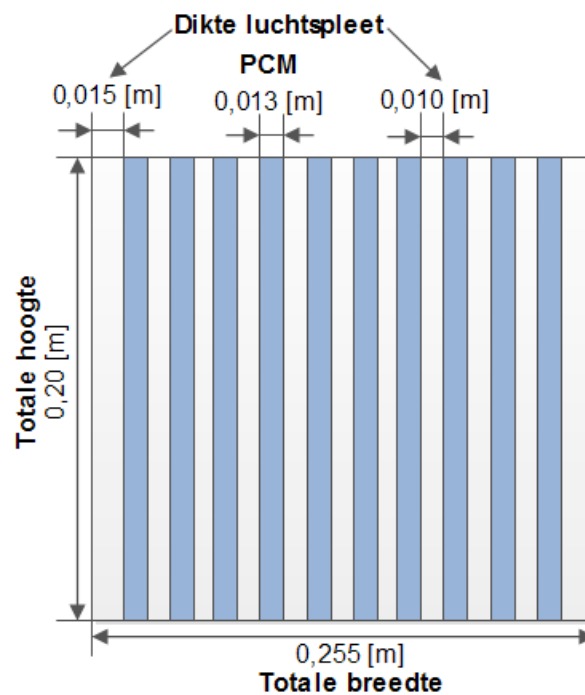
4.4 HOEVEELHEID PCM

Om ook daadwerkelijk energie te besparen met deze toepassing moet er PCM worden toegepast.

Er wordt een bepaalde hoeveelheid PCM in de toepassing geïmplementeerd, echter is dit niet gebaseerd op berekeningen. Het aantal PCM panelen is gebaseerd op de ruimte die aanwezig is in het gedimensioneerde luchtkanaal, *hoofdstuk 4.2*, van de toepassing. Er kunnen dus maar een beperkt aantal PCM panelen worden geïnstalleerd. De ruimte voor het aantal PCM panelen is niet groter gemaakt, omdat de toepassing anders niet meer compact is.

In het dynamische model dat gemaakt gaat worden, aan de hand van Simulink (*Hoofdstuk 5*), zal worden gekeken hoeveel energie deze hoeveelheid PCM zal besparen. Uiteindelijk kan dan worden bepaald of deze hoeveelheid PCM rendabel is om toe te passen.

In *figuur 4.7* is te zien dat er 10 PCM panelen (13 [kg] PCM) in de toepassing worden geïmplementeerd, met 0,01 [m] tussen elk PCM paneel en 0,015 [m] tussen de wand en het PCM paneel.



Figuur 4-7 Doorsnede luchtkanaal met PCM

4.5 KIEZEN LUCHTFILTER

Om ervoor te zorgen dat de luchtkwaliteit voldoende is, moet er een luchtfilter in de toepassing komen. Deze luchtfilter wordt gekozen aan de hand van de norm: NEN-EN 13779 [9].

Om de filterklasse te selecteren moet eerst de kwaliteit van de binnen- en buitenlucht (IDA & ODA) worden bepaald. In *tabel 4.6* en *tabel 4.7* is weergegeven welke kwaliteitsklassen van lucht er zijn.

Tabel 4-6 Kwaliteit binnenlucht [9]

Category	Description
IDA 1	High indoor air quality
IDA 2	Medium indoor air quality
IDA 3	Moderate indoor air quality
IDA 4	Low indoor air quality

Tabel 4-7 Kwaliteit buitenlucht [9]

Category	Description
ODA 1	Pure air which may be only temporarily dusty (e.g. pollen)
ODA 2	Outdoor air with high concentrations of particulate matter and/or gaseous pollutants
ODA 3	Outdoor air with very high concentrations of gaseous pollutants and/or particulate

In overleg met de opdrachtgever is er voor deze toepassing uitgegaan van binnenluchtklasse 'IDA 3' en buitenluchtklasse 'ODA 1'.

Met deze twee klassen kan aan de hand van *tabel 4.8* het soort filter worden bepaald.

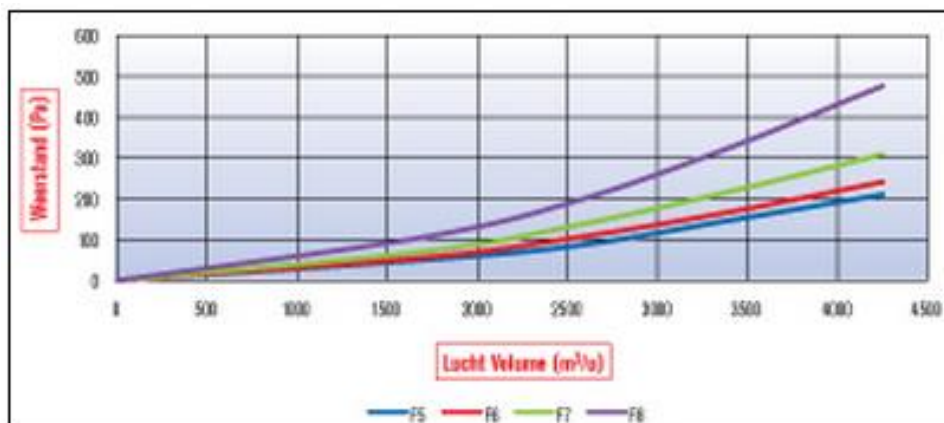
Tabel 4-8 Benodigde filter [9]

Outdoor Air Quality (see 6.2.3)	Indoor Air Quality (see 6.2.5)			
	IDA 1 (High)	IDA 2 (Medium)	IDA 3 (Moderate)	IDA 4 (Low)
ODA 1 (pure air)	F9	F8	F7	F5
ODA 2 (dust)	F7+F9	F6+F8	F5+F7	F5+F6
ODA 3 (very high concentrations of dust or gases)	F7+GF+F9 ^a	F7+GF+F9 ^a	F5+F7	F5+F6

^a GF = Gas filter (carbon filter) and/or chemical filter.

Het soort filter dat in deze toepassing moet worden gebruikt is filterklasse F7.

Een filter van deze klasse kan bij 'ACS filters' worden verkregen. Een voorbeeld van een F7 filter is een 'MP paneel-filter', waarbij de weerstand van de filter met behulp van *figuur 4.8* kan worden bepaald. De weerstand van deze filter zal bij 315 [m³/h] ongeveer 40 [Pa] zijn.



Figuur 4-8 Bepalen weerstand filter [21]

4.6 VERMOGEN VENTILATOR

Om het vermogen van de ventilator te bepalen, moet er eerst worden berekend hoeveel drukverlies er in de toepassing optreedt. Het totale drukverlies in de toepassing is te berekenen met de volgende formule:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_k + \Delta P_b + \Delta P_o \quad (4)$$

Waarin:

ΔP_k	=	Weerstand luchtkanalen	[Pa]
ΔP_b	=	Weerstand van de bochten in luchtkanalen	[Pa]
ΔP_o	=	Weerstand van overige componenten	[Pa]

Deze drukverliezen kunnen berekenen met de volgende formule:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

Waarin:

ζ	=	Weerstandscoefficiënt zeta	[-]
ρ	=	Dichtheid van het medium	[kg/m ³]
v	=	Lichtsnelheid	[m/s]

Alle drukverlies berekeningen zijn te vinden in *bijlage VII*. Bij de uiteindelijke toepassing als eindproduct zal meer drukverlies optreden, omdat er waarschijnlijk nog een paar extra componenten worden toegevoegd. De componenten hieronder zorgen echter voor het grootste drukverlies. Om rekening te houden met dit extra drukverlies zal de ventilator iets worden overgedimensioneerd.

Het totale drukverlies is te vinden in *tabel 4.9*:

Tabel 4-9 Totale drukverlies

ΔP_{totaal} (totale drukverlies)	$\Delta P_k + \Delta P_b + \Delta P_o$
ΔP_k (kanaalweerstand)	0,246
ΔP_b (weerstand in bochten)	3,05
ΔP_o (weerstand overige componenten)	126,6
dPo Warmtewisselaar	129,896

Aan de hand van het drukverlies dat hier optreedt kan er een ventilator worden gedimensioneerd. De belangrijkste eigenschappen van de ventilator is dat het in ieder geval 130 [Pa] en 315 [m³/h] moet kunnen leveren. Ook moet het qua dimensies in de toepassing passen. De ventilator is gekozen aan de hand van een selectieprogramma van Soler & Palau [22].

De ventilator die aan deze eisen voldoet is een cilindrische axiale buisventilator. Deze ventilator levert een debiet van 348 [m³/h] en een statische druk van 183 [Pa]. Dit is meer dan de berekende 130 [Pa], maar zoals al gezegd is zou de ventilator iets worden overgedimensioneerd in verband met drukverliezen die nog niet zijn meegenomen. De technische gegevens over deze ventilator zijn in *figuur 4.9* te vinden.

WERKPUNT



Debiet	348 m ³ /h	CONSTRUCTIE	
Statische druk	183 Pa		
Dynamische druk	2.33 Pa		Diameter 250
Totaaldruk	186 Pa		Ventilatorgrootte 250
Uitlaatsnelheid	2 m/s		Bladen 5
Ventilatorsnelh	2685 rpm		Gewicht 4.70 kg
Specific Fan Power	1.65 W/l/s		

Figuur 4-9 Technische gegevens ventilator

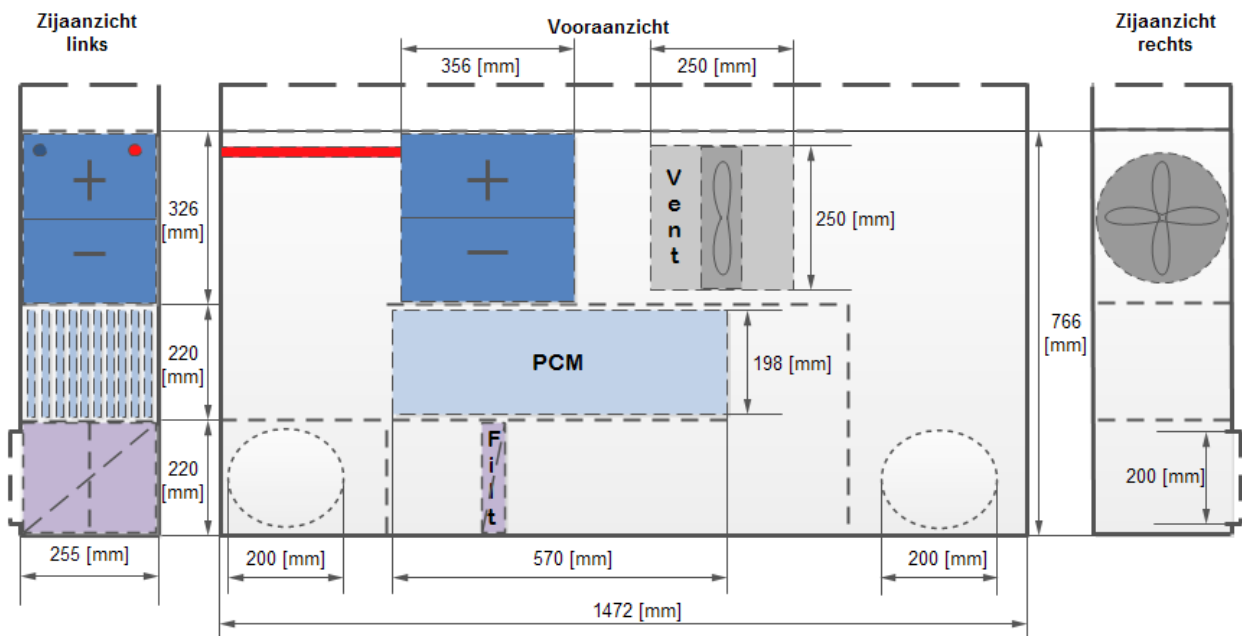
4.7 UITEINDELIJKE DIMENSIONERING TOEPASSING

Hier wordt de toepassing nog eens weergegeven met alle gedimensioneerde componenten, om weer te geven hoe het er precies uit komt te zien.

Nog niet alle componenten zijn hierin qua dimensionering meegenomen. De aansluiting van de warmtewisselaar, verschillende kleppen, bevestigingen van onderdelen en bepaalde regelingen zijn nog niet meegenomen in dit ontwerp.

Omdat het voor dit onderzoek belangrijker is om uit te zoeken of het toepassen van PCM rendabel is, wordt er nog niet gedetailleerder ingegaan op het ontwerp van deze toepassing. Nadat er duidelijk is of het toepassen van PCM rendabel is voor een toepassing als deze, kan er nog gedetailleerder worden ingegaan op het ontwerp.

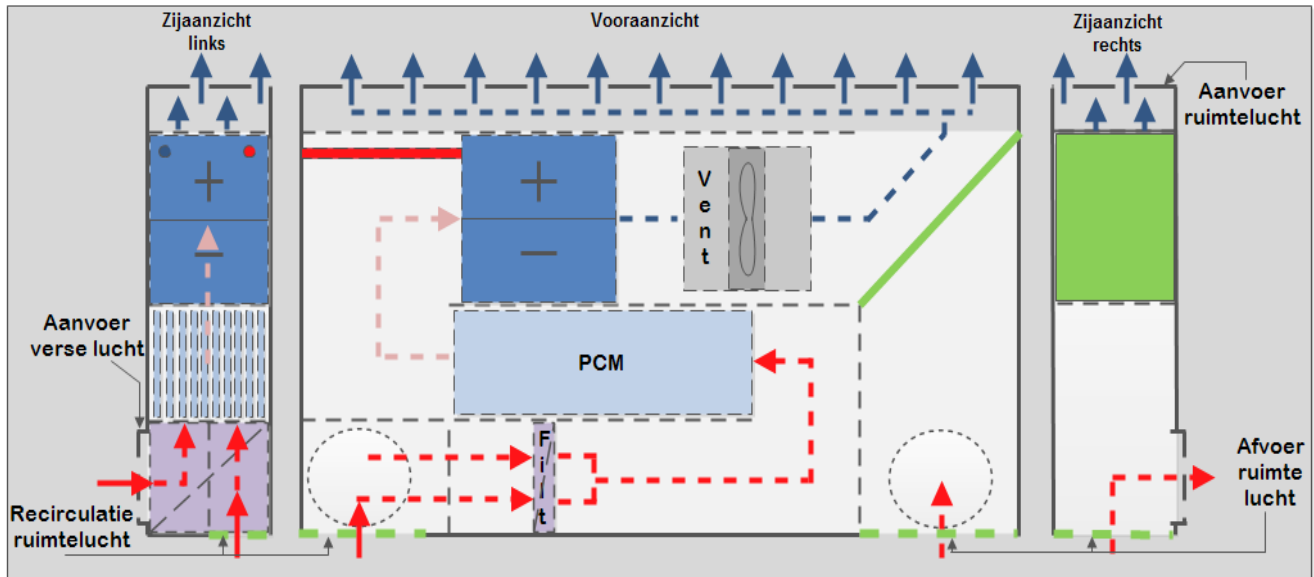
Of het PCM daadwerkelijk rendabel is, wordt uitgezocht in het volgende hoofdstuk waarin een dynamisch model van deze toepassing wordt gerealiseerd. In *figuur 5.10* is te zien wat de afmetingen worden.



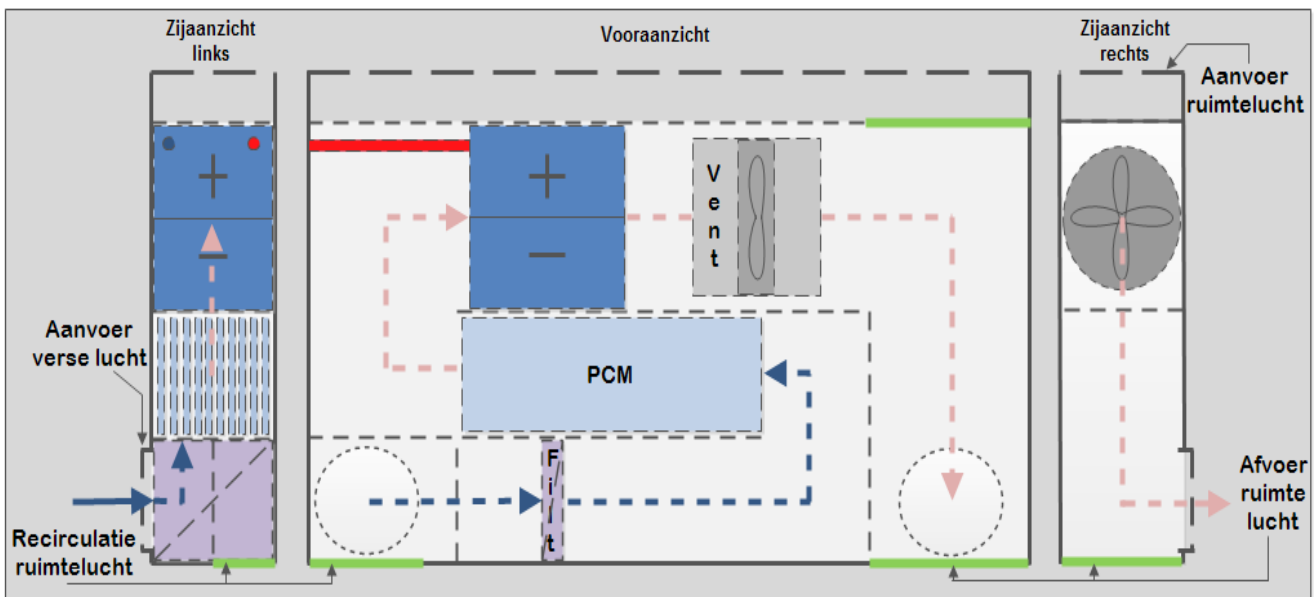
Figuur 4-10 Afmetingen toepassing

De afmetingen van de filter is hier niet weergegeven, omdat die nog niet duidelijk is. Alleen het type filter is bepaald.

In *figuur 4.12* en *figuur 4.11* is nogmaals in schemavorm het werkingsprincipe van de toepassing overdag en 's nachts weergegeven. Voor een gedetailleerdere beschrijving van de werking wordt verwezen naar *hoofdstuk 3.4 'Beschrijving uiteindelijke toepassing'(keuzeverantwoording)*, omdat er aan de werking van de toepassing niks veranderd is.

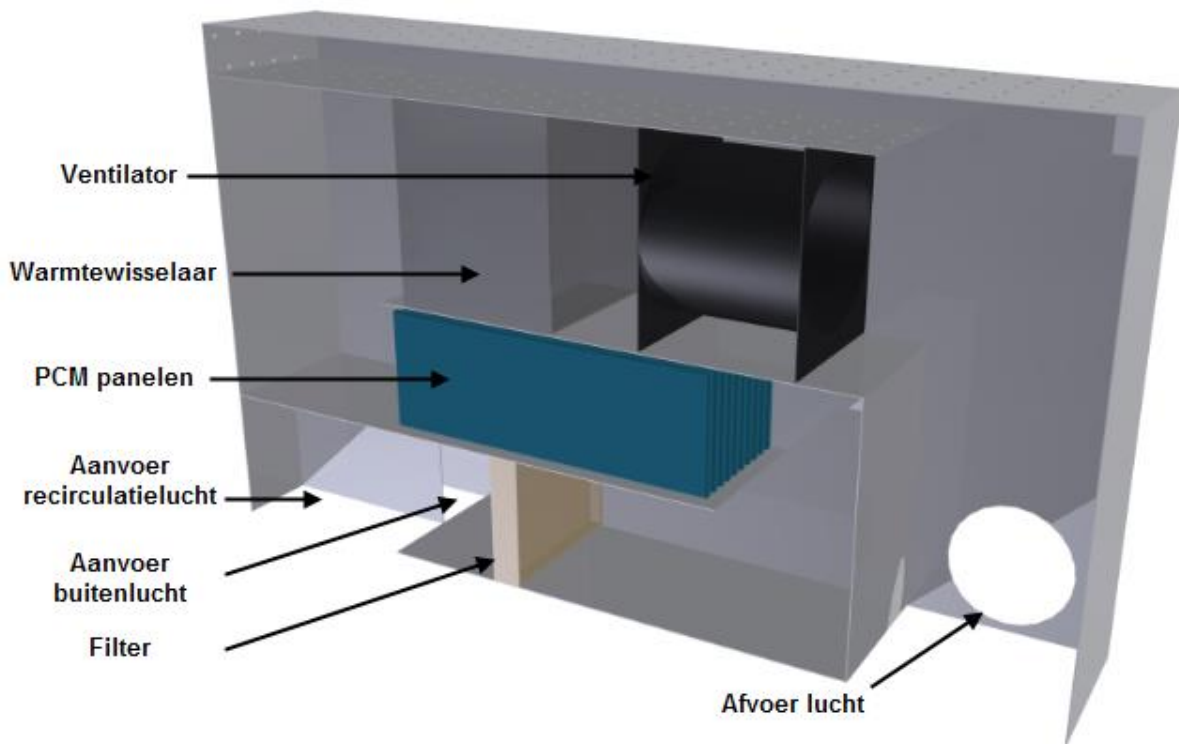


Figuur 4-12 Werking overdag



Figuur 4-11 Werking 's nachts

In *figuur 4.13* is een 3D model met alle hoofdonderdelen weergegeven, om te laten zien hoe de toepassing er tot dusver precies uit gaat zien.



Figuur 4-13 3D model toepassing met hoofdonderdelen

Dit is het 3D model van de tot zover gedimensioneerde hoofdonderdelen. De Fan Coil Unit kan doormiddel van de warmtewisselaar en ventilator koelen en verwarmen. Hierdoor kan het lokaal worden toegepast. In dit ontwerp is de toepassing compact gehouden, zodat het niet te veel ruimte in beslag neemt. Op deze manier is het ook gemakkelijk toe te passen in bestaande gebouwen, waar zo min mogelijk aanpassingen gewenst zijn.

Het PCM zal een deel van de koeling op zich nemen, waardoor er energie wordt bespaard.

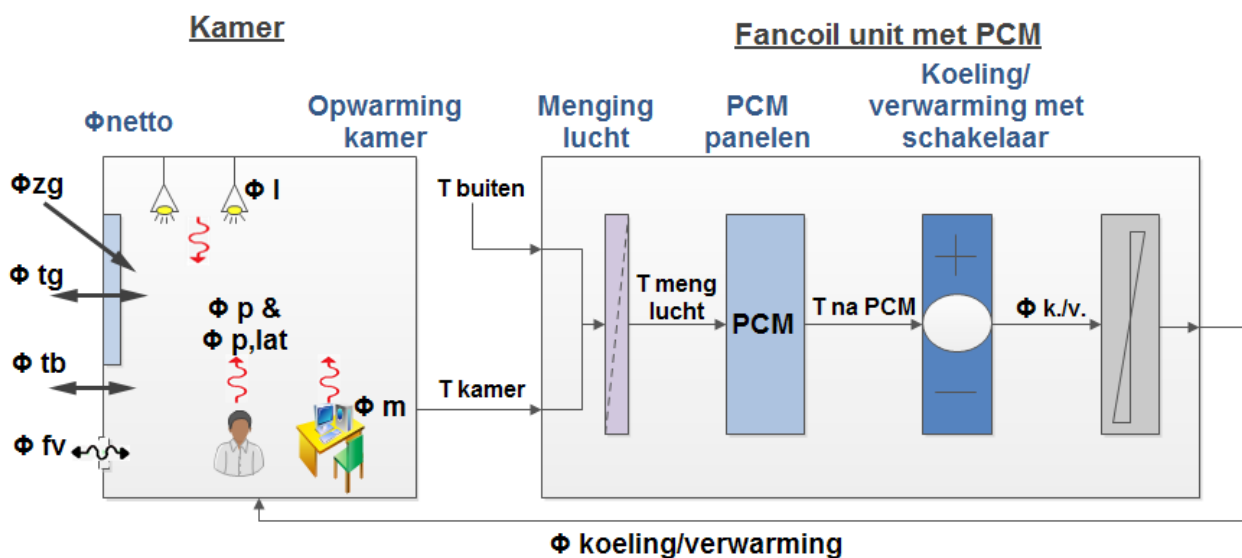
In *hoofdstuk 5* zal er duidelijk worden hoeveel energiebesparing het PCM in deze compacte toepassing oplevert en of het dan ook daadwerkelijk rendabel is om PCM toe te passen in deze toepassing.

5 DYNAMISCH MODEL MET SIMULINK

Om te berekenen of het gebruik van PCM in deze compacte toepassing ook daadwerkelijk rendabel is, wordt er een dynamisch model gemaakt met het programma Simulink. In dit model wordt er een jaar gesimuleerd en wordt er gekeken hoeveel energie er wordt verbruikt met PCM en zonder PCM. Als deze energiebesparing wordt omgerekend naar kostenbesparing op energie, kan er worden benaderd hoeveel energie het PCM bespaard. Als dit bekend is, kan er een betere uitspraak worden gedaan over de rendabiliteit van de PCM panelen in deze toepassing.

In het volgende schema in *figuur 5.1* is het prinsipschema weergegeven en is weergegeven uit welke hoofdonderdelen het model bestaat.

Het dynamische model bestaat uit de volgende onderdelen:



Figuur 5-1 Prinsipschema dynamisch model

- 5.1 Φ netto, het totaal aan warmtestroom [W] veroorzaakt door externe en interne belastingen
- 5.2 Temperatuurverandering kamer, de temperatuurstijging of -daling in de kamer veroorzaakt door Φ netto
- 5.3 Menging lucht, de menging van de lucht door ingaande luchtstroom in de toepassing van de kamer en van buiten
- 5.4 PCM panelen, verandering van de luchttemperatuur door energieoverdracht met de PCM panelen
- 5.5 Koeling/verwarming met schakelaar, verwarming of koeling die energie toevoegt of onttrekt aan de lucht. Deze energie wordt toegevoegd aan Φ netto

Hieronder wordt per hoofdonderdeel beschreven hoe het in Simulink gemodelleerd is en welke aannames er zijn gedaan.

5.1 Φ NETTO COMPONENT

Door Φ netto te modelleren kan er worden gesimuleerd of het totaal aan interne en externe belastingen resulteert in een negatieve- of een positieve energiestroom naar de kamer toe. In de zomer zal Φ netto vaak positief zijn, waardoor de kamertemperatuur stijgt. In de winter is Φ netto vaak negatief, waardoor de kamertemperatuur daalt.

- Φ_{intern} (interne warmteafgifte door personen, verlichting en machines)
- $\Phi_{\text{koeling/verwarming}}$ (toename of afname energie door koeling of verwarming)
- $\Phi_{\text{p,lat}}$ (latente koellast door personen)
- Φ_{tb} (transmissie door buitenwanden)
- Φ_{fv} (energiestroom door ventilatie van buitenlucht)
- Φ_{tg} (transmissie door glasvlakken)
- Φ_{zg} (belasting door zonnewarmte via ramen)



In *figuur 5.2* is te zien waar de verschillende componenten optreden. De pijlen duiden aan welke kant de warmtestroom op kan gaan. In dit geval kan bij sommige componenten de warmtestroom twee kanten op, afhankelijk van de buitentemperatuur.

Φ netto

The diagram illustrates the energy flows for a building's net heat flux (Φ netto). It shows the following components and connections:

- Internal Heat Gains:** Two sine wave sources represent internal heat gains. One is labeled "Tijd interne en latente belasting werkdag: 8.00-18.00" and the other "Tijd interne en latente belasting Werkweek: 5 dagen". These are multiplied ("Product") and then split into "Latente belasting" (latent load) and "Interne warmtebelasting (Φ intern)" (internal sensible heat load).
- External Heat Gains:** A "Climate" data source (1971-2000) provides outdoor temperature (T_{buiten}) and solar radiation (Q_{zon}).
 - T_{buiten} is used to calculate heat transfer through the building envelope (Φ_{tb} , Φ_{fv} , Φ_{tg}) and is also the input to a "Tbinnen" (indoor temperature) control loop.
 - Q_{zon} is used to calculate solar heat gain through the envelope (Φ_{zg}).
- Heat Transfer and Balance:** The building envelope is modeled with heat transfer coefficients and areas for different parts (Tbuiten, Out1, Tbinnen, Out1, Tbinnen). The net heat flux (Φ netto) is the sum of all these flows, including the internal and external loads, and is output to a "Scope" for monitoring.
- Control and Setpoints:** A "Tbinnen" setpoint is used to control the indoor temperature. A "Scope" is used to monitor the net heat flux.



In het Simulink model is de interne belasting en latente belasting voorzien van een tijdspanne, waardoor het alleen tijdens kantoortijden een belasting vormt.

De externe belasting is afhankelijk van de binnen- en buitentemperatuur en de inkomende zonnewarmte. De binnentemperatuur is de kamertemperatuur, die uit het temperatuurverandering van de kamer komt (*hoofdstuk 5.2*). De buitentemperatuur en de zonnewarmte worden gesimuleerd door een klimaatbestand. Het uitgangssignaal is de netto warmtestroom [W], dit is het ingangssignaal voor de opwarming van de kamer.

Voor het referentiejaar is 1995 gekozen, omdat dit jaar een goede winter en een paar hittegolven bevat.

Een gedetailleerdere weergave van elk component apart in Simulink is weergegeven in *bijlage VIII*.

5.2 TEMPERATUURVERANDERING KAMER

Door de kamer te modelleren kan worden gesimuleerd hoe de kamertemperatuur verandert ten gevolge van Φ netto. De mate waarin de kamertemperatuur verandert, hangt af van de warmte accumulerende massa. Het ingaande signaal van de kamer component is de warmtestroom in [W], het uitgaande signaal is T in [°C].

Voor de verandering van de temperatuur in de kamer wordt de volgende formule gebruikt:

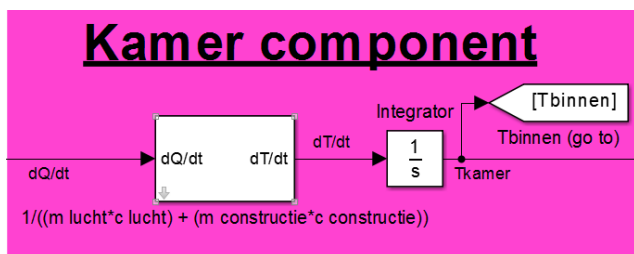
$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) = (m_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} + m_{\text{constructie}} \cdot c_{\text{constructie}}) \cdot \left(\frac{dT}{dt}\right)$$

Om de temperatuurverandering te weten, moet de volgende berekening worden uitgevoerd:

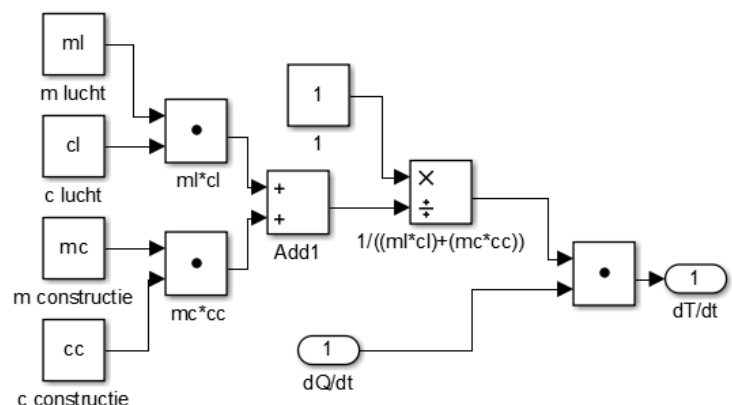
$$\left(\frac{dT}{dt}\right) = \left(\frac{dQ}{dt}\right) \cdot \frac{1}{(m_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} + m_{\text{constructie}} \cdot c_{\text{constructie}})}$$

Het ingaande signaal wordt eerst vermenigvuldigd met $\left(\frac{1}{(m \cdot c) + (m \cdot c)}\right)$, waarbij de massa [kg] en de soortelijke warmte [J/kg·K] van de lucht en de constructie worden gebruikt. Hierbij wordt aangenomen dat de temperatuur van de lucht en de wand hetzelfde zijn, waardoor de warmtestroom van lucht naar wand en andersom te verwaarlozen is. Daarna wordt het signaal geïntegreerd om het uitgangssignaal te verkrijgen.

In *figuur 5.5* en *figuur 5.4* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.



Figuur 5-5 Overzicht kamer component



Figuur 5-4 Overzicht modellering '1/((mc)+(mc))'

De kamertemperatuur zal hetingangssignaal zijn voor 'de menging van de lucht' en 'de verwarming en koeling met schakelaar'. Ook zal de kamertemperatuur terug gelinkt worden naar Φ netto en daar fungeren als binnentemperatuur.

Welke waarden er zijn genomen voor de massa en soortelijke warmte is weergegeven in *bijlage IX*.

5.3 MENGING LUCHT

Door de menging van de lucht te modelleren, kan er worden gesimuleerd welke temperatuur de lucht heeft nadat de recirculatielucht en de lucht van buiten zich hebben gemengd.

Hoe de lucht gemengd wordt, wordt bepaald door het tijdstip van de dag. Tijdens werktijden zal er een combinatie zijn van recirculatielucht en lucht van buiten. In de nacht wordt de toevoer recirculatielucht afgesloten en zal er alleen buitenlucht aanwezig zijn.

De temperatuur van de menglucht wordt als volgt berekend:

$$(c \cdot \rho \cdot q_{bu} \cdot T_{bu}) + (c \cdot \rho \cdot q_{re} \cdot T_{re}) = (c \cdot \rho \cdot q_{meng} \cdot T_{meng}) \quad (6)$$

Als wordt aangenomen dat de soortelijke warmte en dichtheid van de recirculatielucht en de lucht van buiten gelijk zijn, wordt de temperatuur van de menglucht overdag als volgt berekend:

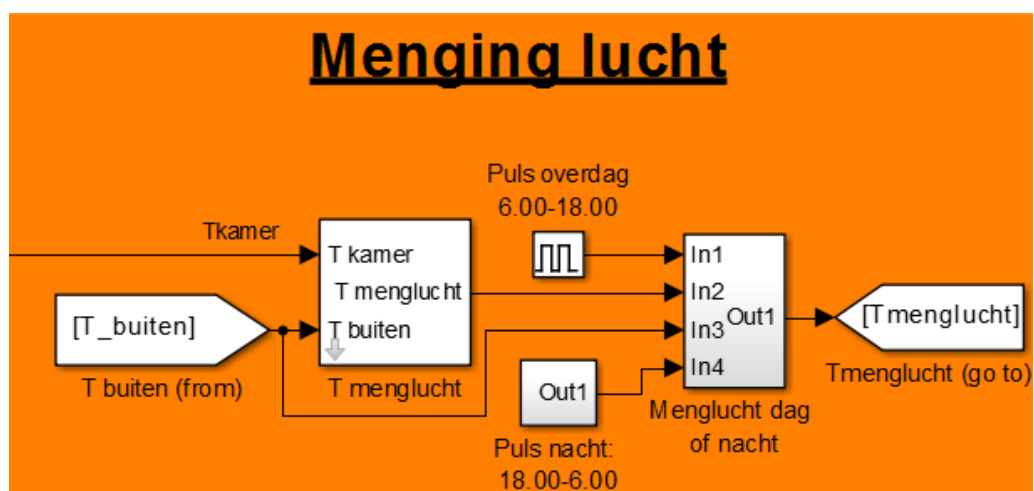
$$T_{meng} = \frac{q_{bu} \cdot T_{bu} + q_{re} \cdot T_{re}}{q_{meng}}$$

Voor het lucht debiet van de recirculatie- en de buitenlucht wordt aangenomen dat in een volledig ontworpen toepassing er regelkleppen aanwezig zijn die het luchtdebiet regelen. De ventilator zuigt 348 [m³/h] = 0,0967 [m³/s] aan, bij een minimale vereiste toevoer van buitenlucht (0,013 [m³/s]) zal de toevoer van recirculatielucht overdag 0,0837 [m³/s] zijn.

In de nacht wordt er 0,0967 [m³/s] aan buitenlucht toegevoerd om het PCM te ontladen.

Voor de recirculatietemperatuur is de kamertemperatuur genomen, voor de buitentemperatuur de temperatuur uit het klimaatbestand.

In *figuur 5.6* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.



Figuur 5-6 Menging van de lucht in Simulink

Er is hier te zien dat de menging van de lucht wordt bepaald door een pulsgenerator. Overdag is het een combinatie van de buitenlucht en de recirculatielucht, 's nachts alleen de buitenlucht.

Hoe de berekening van de menglucht in Simulink is gemodelleerd, is te zien in *bijlage X*.

5.4 PCM COMPONENT

Door het PCM te modelleren kan er worden gesimuleerd in welke mate het PCM de lucht afkoelt. Hetingangssignaal is de temperatuur van de menging van de lucht, het uitgangssignaal is de temperatuur van de lucht na PCM en de temperatuur van het PCM zelf. Voor dit model is de mogelijke onderkoeling en hysteresis van het PCM niet meegenomen, omdat dit het model te gecompliceerd maakt. In de toepassing zijn 10 PCM panelen geïmplementeerd, wat gelijk staat aan 13 [kg] PCM.

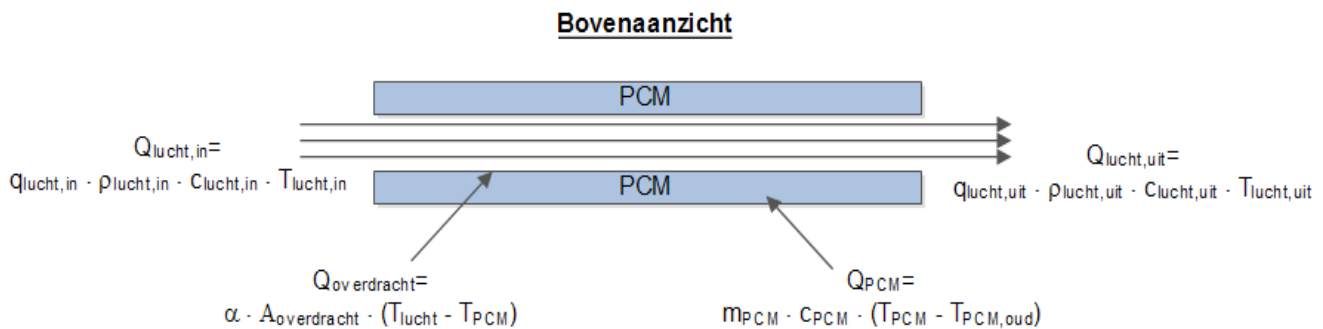
Hoe de luchttemperatuur reageert op het PCM, wordt bepaald door de volgende drie formules:

$$\text{Energie lucht: } Q = q_{\text{lucht}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}}) \quad (7)$$

$$\text{Energie PCM: } Q = m \cdot c_{\text{PCM}} \cdot (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM oud}}) \quad (8)$$

$$\text{Energie overdracht: } Q = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{lucht}} - T_{\text{PCM}}) \quad (9)$$

In *figuur 5.7* is schematisch weergegeven hoe de energie wordt overgedragen.



Figuur 5-7 Energie-overdracht bij PCM

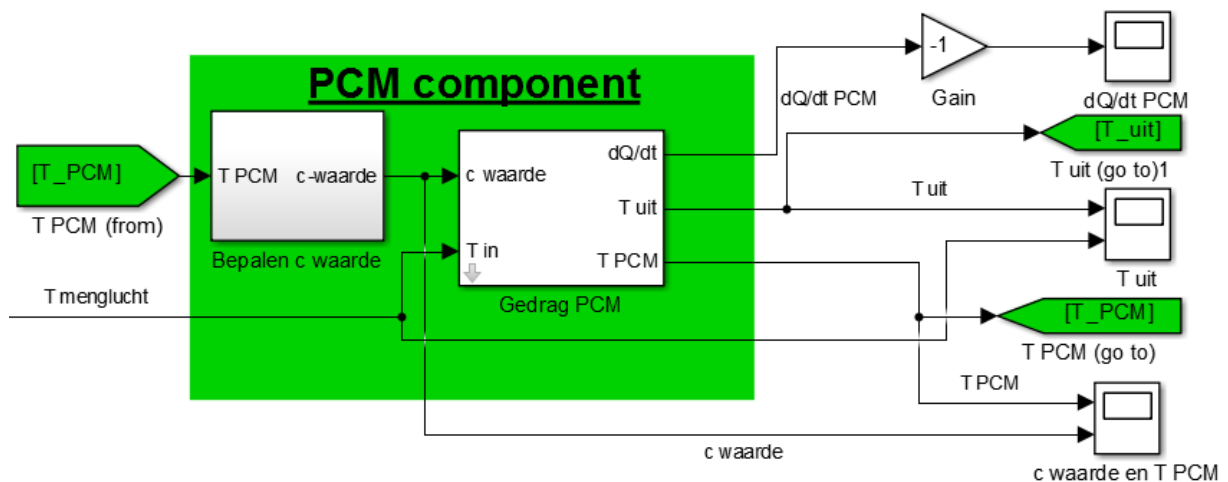
Hoeveel energie het PCM kan opnemen hangt sterk af van de soortelijke warmte. De soortelijke warmte is verdeeld in drie delen:

- Soortelijke warmte vast PCM, voor de soortelijke warmte van vast PCM is 2 [kJ/kg·K] aangenomen. [23]
- Soortelijke warmte smelt-/stolproces PCM, het gekozen PCM heeft een enthalpie van 162 [kJ/kg]. PCM heeft een smelt-/stoltraject in plaats van een smeltpunt. Het PCM dat hier wordt gebruikt heeft een smelt-/stoltraject van 4 [°C]. Voor de soortelijke warmte van het smelt-/stolproces is daarom 40,5 [kJ/kg·K] aangenomen. Bij een gemiddeld smeltpunt van bijvoorbeeld 23 [°C] zal het smelt-/stolproces dus tussen 21 en 25 [°C] plaatsvinden. [11]
- Soortelijke warmte vloeibaar PCM, voor de soortelijke warmte van vloeibaar PCM is 2 [kJ/kg·K] aangenomen. [23]

Met welke soortelijke warmte wordt gewerkt hangt dus af van de temperatuur van het PCM.

De uitgangstemperatuur van de lucht gaat naar de verwarming en koeling. De temperatuur van het PCM wordt teruggekoppeld om te bepalen welke c-waarde aangehouden moet worden.

In *figuur 5.8* is weergegeven hoe dit in Simulink eruit ziet.

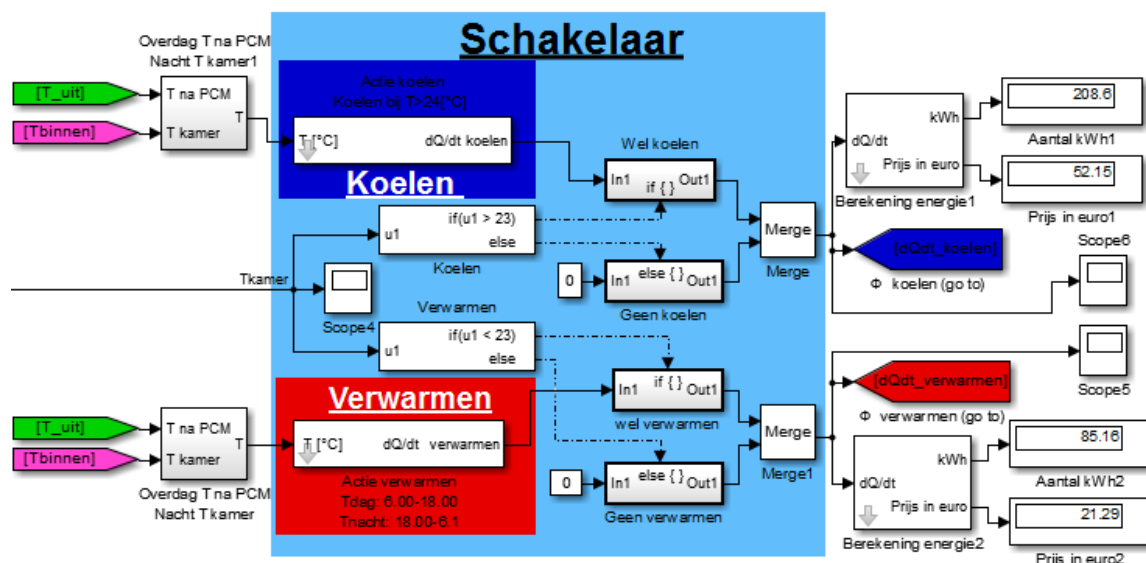


Figuur 5-8 PCM component in Simulink

Er is hier te zien dat het bepalen van de c-waarde afhankelijk is van de temperatuur van het PCM. Deze c-waarde wordt gebruikt voor de soortelijke warmte van het PCM. Het uitgangssignaal van het PCM is de energieopname in [J/s], de temperatuur van de uitgaande lucht en de temperatuur van het PCM. Voor een gedetailleerdere beschrijving over hoe dit gemodelleerd is en welke waarden zijn gebruikt, wordt verwezen naar *bijlage XI*.

5.5 VERWARMING EN KOELING MET SCHAKELAAR

In dit gedeelte van het dynamische model wordt er bepaald of er behoefte is aan verwarming of koeling. Het bestaat uit de volgende onderdelen: schakelaar, verwarming en koeling.



Figuur 5-9 Schakelaar in Simulink

Door de schakelaar te modelleren kan er in de simulatie worden bepaald of er vraag is naar koeling of verwarming. De schakelaar zal of de koel- of de verwarmingscomponent inschakelen.

In *figuur 5.9* is er weergegeven hoe de verwarming en koeling met schakelaar in Simulink is gemodelleerd. Aan de hand van dit figuur wordt de werking van de schakelaar uitgelegd.

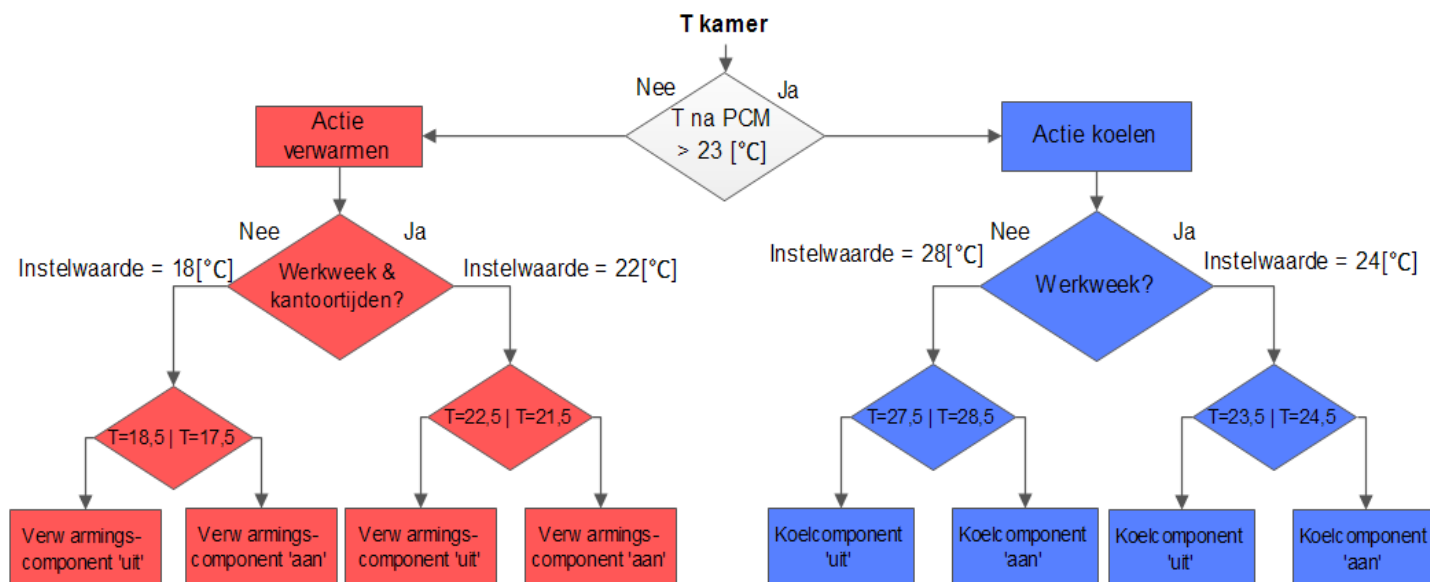
5.5.1 SCHAKELAAR

Het ingangssignaal van de schakelaar is de kamertemperatuur. Dit signaal gaat eerst in een 'IF-blok'. Als de temperatuur boven de 23 [°C] is, zal het 'IF-blok' voor de actie koelen kiezen. Onder de 23 [°C] kiest het 'IF-blok' voor de actie verwarmen.

Voor koelen is er tijdens kantoortijden een instelwaarde van 24 [°C] en in het weekend een instelwaarde van 28 [°C] gekozen met een deviatie van 0,5 [°C]. Als de temperatuur 24,5 [°C] is, zal het uitgangssignaal van de actie koelen '1' worden, waardoor de koelenergie van de koelcomponent wordt toegevoegd aan Φ netto. Als de temperatuur 23,5 [°C] is, zal het uitgangssignaal van de actie koelen weer '0' worden, waardoor de koelenergie van de koelcomponent niet wordt toegevoegd aan Φ netto. Om energie te besparen zal dit tijdens weekenden gebeuren bij 28,5 [°C] en 27,5 [°C].

Voor verwarmen werkt dit hetzelfde. Er is een instelwaarde van 22 [°C] gekozen tijdens kantoortijden en een instelwaarde van 18 [°C] in de nacht en in het weekend om zo energie te besparen.

Is de temperatuur 21,5 [°C] zal het uitgangssignaal '1' zijn, bij 22,5 [°C] wordt het signaal weer '0', waardoor de verwarmingsenergie wel of niet aan Φ netto wordt toegevoegd. Tijdens weekenden en in de nacht zal dit gebeuren bij 17,5 [°C] en 18,5 [°C]. Hoe de actie koelen en de actie verwarmen zijn gemodelleerd staat beschreven in *bijlage XII*. Ook wordt de energiekosten voor verwarmen en koelen uitgerekend, hoe dit gesimuleerd is staat ook in *bijlage XII* beschreven.



Figuur 5-10 Stroomdiagram schakelaar

Ter verduidelijking wordt in *figuur 5.10* het stroomdiagram weergegeven van de schakelaar. Hierin is duidelijk te zien welke keuzes en acties er plaatsvinden in de schakelaar.

5.5.2 VERWARMING

Door de verwarmingscomponent te modelleren, kan worden gesimuleerd hoeveel energie wordt toegevoegd aan de lucht. Het ingaande signaal is overdag de temperatuur na het PCM [°C] en in de nacht de kamertemperatuur. Het uitgaande signaal van de verwarming is $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ in [J/s]. De mate waarin de verwarming energie zal toevoegen hangt af van de massastroom (Φ_m) van de lucht in [kg/s], de soortelijke warmte (c) van de lucht in [J/kg·K] en het temperatuurverschil tussen de verwarming en de lucht. Om dit te modelleren in Simulink wordt de volgende formule gebruikt.

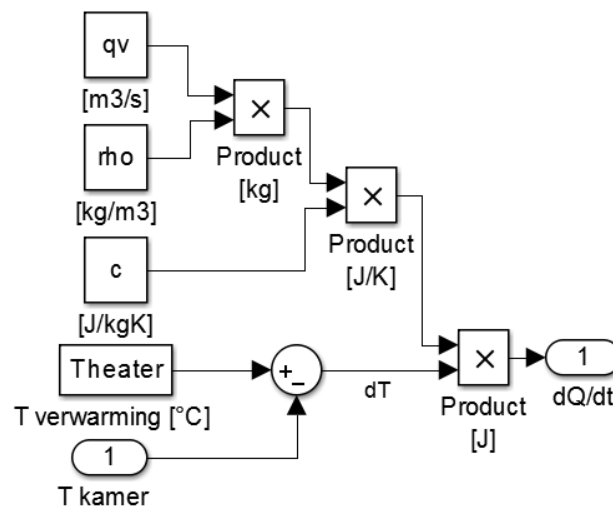
$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \Phi_m \cdot c \cdot (T_{\text{verwarming}} - T_{\text{lucht}}) \quad (10)$$

Om de massastroom te verkrijgen moet het luchtdebiet [m³/s] vermenigvuldigd worden met de dichtheid van de lucht [kg/m³]. Voor het luchtdebiet wordt het luchtdebiet gekozen die de ventilator levert, wat 348 [m³/h] is (zie hoofdstuk 4.6). Voor de temperatuur van de verwarming is de ingaande temperatuur gebruikt bij verwarmen (zie hoofdstuk 4.1.3).

De volgende gegevens zijn gebruikt:

qv =	348/3600 =	0,967	[m ³ /s]
ρ =		1,20	[kg/m ³]
c =		1,007·10 ³	[J/kg·K]
T verw. =		55	[°C]

In *figuur 5.11* is weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.



Figuur 5-11 Verwarmingscomponent in Simulink

Ook is er voor gekozen om de verwarming alleen actief te maken als de buitentemperatuur lager is dan 16 [°C], zodat het alleen gebruikt wordt tijdens koude dagen en het niet de koeling in de weg zit. Het uitgangssignaal van het verwarmingscomponent geldt alleen als er door de schakelaar is gekozen voor verwarming. De uitkomst van de verwarmingscomponent wordt dan toegevoegd aan Φ netto waardoor de temperatuur in de kamer zal toenemen. Bij het modelleren van de verwarming wordt aangenomen dat er geen energieverlies optreedt bij het overdrachtsproces, waardoor alle opgewekte energie wordt overgedragen. Dit wordt ook bij de koeling aangenomen.

5.5.3 KOELING

De koeling is op dezelfde manier gemodelleerd als de verwarming. Het enige verschil is dat hier een andere temperatuur voor het medium is gekozen, omdat in dit geval koud water aangevoerd wordt. De ingaande temperatuur is 6 [°C] (zie hoofdstuk 4.1.3).

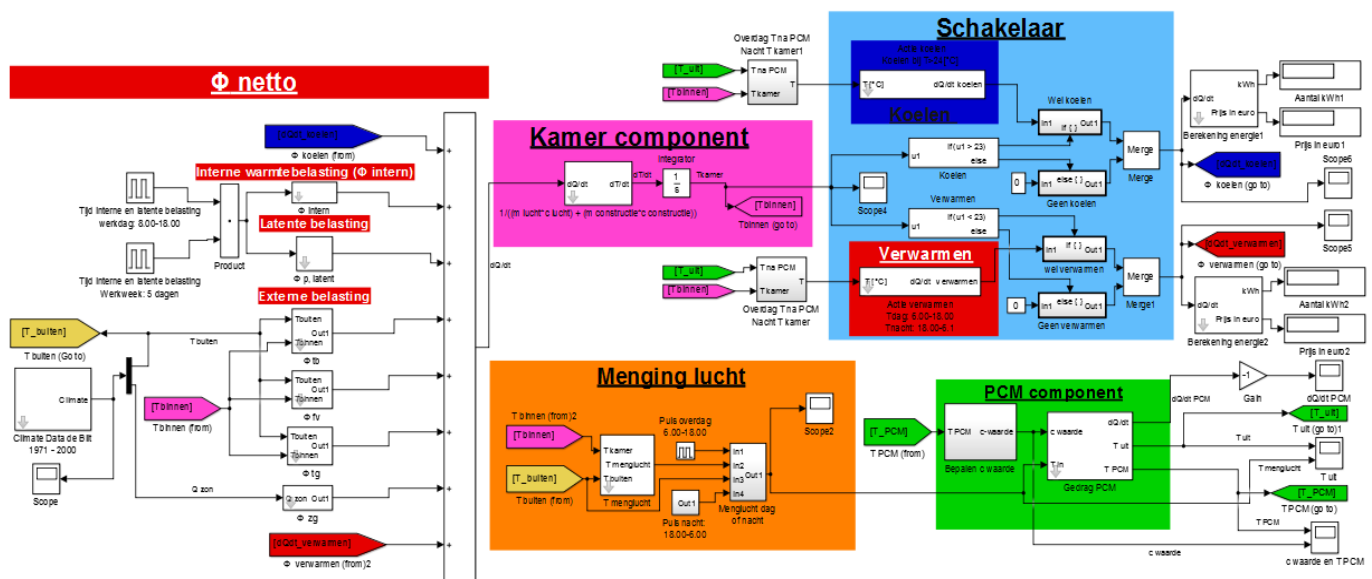
Hier is er gekozen om de koeling alleen actief te maken als de buitentemperatuur hoger is dan 16 [°C]. Op deze manier zal de koeling alleen actief worden tijdens warme dagen.

De rest van de waarden zijn hetzelfde als bij de verwarmingscomponent (zie hoofdstuk 5.5.2). Als de schakelaar kiest voor koelen, betekent het dat er koeling nodig is en wordt de uitkomst van de koelcomponent toegevoegd aan Φ netto waardoor de temperatuur in de kamer zal afnemen.

5.6 TOTALE MODEL EN RESULTAAT

Nadat alle aparte stukje zijn gemodelleerd, moeten ze worden samengevoegd om het gehele model te kunnen simuleren. Aan de hand van deze simulatie kan worden berekend hoeveel energie er wordt bespaard met de toepassing van PCM.

Voordat alle componenten zijn samengevoegd zijn ze eerst allemaal apart getest met behulp van handberekeningen om te kijken of de uitkomst van elk gemodelleerd component wel klopt. In *figuur 5.12* is te zien hoe het gehele model eruit ziet in Simulink.



Figuur 5-12 Gehele model in Simulink

Alle verschillende componenten zijn hierin te zien. Eerst wordt de netto warmtestroom uitgerekend door Φ_{netto} , dit zorgt voor een opwarming van de kamer. Hierna wordt de lucht gemengd, die vervolgens over het PCM geleid wordt. Na het PCM gaat de behandelde lucht naar de schakelaar met verwarming en koeling, die koude of warmte toevoegt aan Φ_{netto} om de kamer op temperatuur te houden.

Om de kostenbesparing op energie uit te rekenen, is aangenomen dat de energie voor de verwarming en koeling wordt opgewekt door een warmtepomp met een COP van 3, en dat de prijs van één kilowattuur [kWh] € 0,25 is. De kostenbesparing op energie wordt uitgerekend aan de hand van het kostenverschil tussen de toepassing met PCM en de toepassing zonder PCM.

Na de eerste simulatie is er gebleken dat het PCM helemaal geen besparing oplevert en dat de toepassing met PCM zelfs meer energie kost.

Bij verwarmen komt dit omdat 's winters in de ochtend het PCM nog koud is. Als de verwarming dan aan gaat en de lucht ook over het PCM gaat, zal de verwarming ook het PCM opwarmen, wat meer energie kost.

Bij koeling zal, als de menglucht warmer is, het PCM inderdaad energie opnemen waardoor er minder hoeft worden gekoeld. Echter zal in sommige situatie het PCM nog warmer zijn dan de menglucht waardoor het PCM energie toevoegt aan de lucht. Hierdoor zal er alleen maar meer moeten worden gekoeld.

De toepassing is dus nog niet goed ontworpen. Er zal in de toepassing een bypass moeten worden gemaakt voor het PCM, waarbij de menglucht alleen over het PCM gaat als de menglucht warmer is dan het PCM en de buitentemperatuur hoger is dan 16 [°C].

Als de menglucht in de zomer koeler is en wanneer het winter is, zal deze bypass worden afgesloten. Hierdoor heeft het PCM geen invloed op de verwarming en heeft het PCM alleen een positieve invloed op de koeling.

Nadat deze aanpassing is doorgevoerd in het dynamisch model, heeft dit de volgende kostenbesparing op koelenergie opgeleverd voor 1 jaar. In *tabel 5.1 en tabel 5.2* is de kostenbesparing te zien voor bestaande bouw en nieuwbouw voor 10 PCM panelen (13 [kg] PCM) met verschillende smelttemperaturen.

Tabel 5-2 Jaarlijkse kostenbesparing nieuwbouw

Nieuw- bouw	Kosten koeling	Koeling besparing	Koeling % besparing
Zonder PCM	€ 49,17	-	-
PCM 22	€ 48,90	€ 0,27	0,55%
PCM 23	€ 48,47	€ 0,70	1,42%
PCM 24	€ 48,54	€ 0,63	1,28%

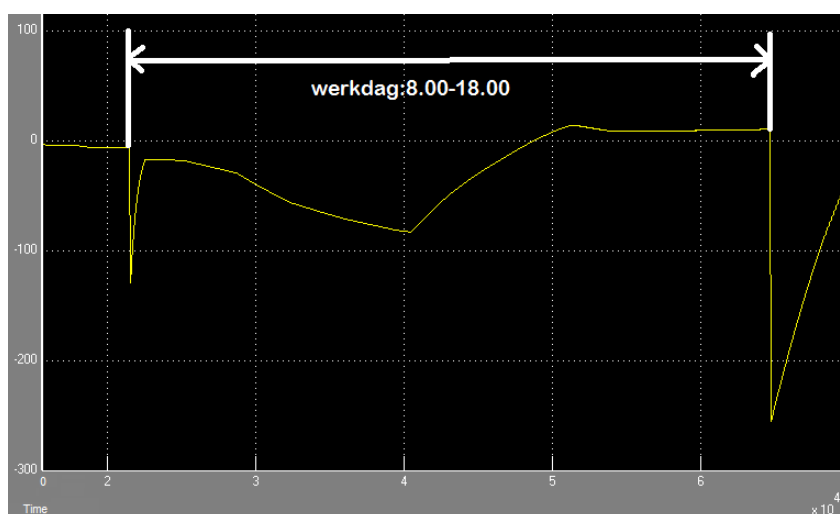
Tabel 5-1 Jaarlijkse kostenbesparing bestaande bouw

Bestaande bouw	Kosten koeling	Koeling besparing	Koeling % besparing
Zonder PCM	€ 46,96	-	-
PCM 22	€ 46,12	€ 0,84	1,79%
PCM 23	€ 45,58	€ 1,38	2,94%
PCM 24	€ 45,61	€ 1,35	2,87%

In de bovenstaande tabellen is te zien dat er na implementatie van PCM er inderdaad een kostenbesparing is op koelen. Er is te zien dat er bij bestaande bouw meer besparing optreedt. Dit komt doordat in dit model bestaande gebouwen meer warmte accumulerende massa bevatten. Hierdoor zal het meer warmte kunnen opnemen, waardoor er minder koeling nodig is.

Voor meer grafieken over het temperatuurverloop van het kantoor en het energieverbruik van de koeling en de verwarming wordt er verwezen naar *bijlage XIII*.

Naast kostenbesparing op energie kan er ook bespaard worden op geïnstalleerd koelvermogen. Om op geïnstalleerd koelvermogen te besparen zal het PCM gedurende een werkdag met de maximale ontwerptemperatuur een constant vermogen op moeten nemen. Deze hoeveelheid hoeft dan niet geïnstalleerd te worden. Op 30 Juli 1995 is de maximale ontwerptemperatuur, 30 [°C], bereikt. In *figuur 5.13* is het opgenomen vermogen bij deze dag te zien voor de huidige toepassing.

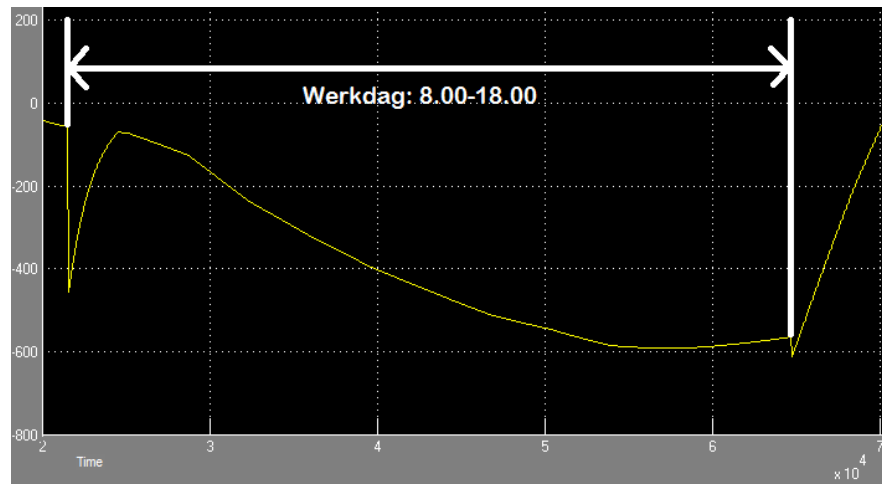


Figuur 5-13 Opgenomen vermogen [W] bij warme dag

Er is hier te zien dat de huidige toepassing met deze hoeveelheid PCM niet in staat is een constant vermogen op te nemen gedurende de gehele werkdag. In deze toepassing zal er dus niet op geïnstalleerd koelvermogen bespaard kunnen worden.

Bij grotere hoeveelheden PCM panelen zal de opslagcapaciteit vergroot worden, waardoor er wel gedurende de gehele dag een constant vermogen op kan worden genomen.

In *figuur 5.14* is te zien dat als er 100 PCM panelen (130 [kg] PCM) worden geïmplementeerd, er wel een constant vermogen kan worden opgenomen. Bij deze grotere hoeveelheid PCM zal er dus wel op geïnstalleerd koelvermogen kunnen worden bespaard.



Figuur 5-14 Opgenomen vermogen [W] bij 100 PCM panelen

Ook zal bij grotere hoeveelheden PCM de overdrachtsoppervlakte (A) vergroot worden.

$$\text{Energie overdracht: } Q = \alpha \cdot A \cdot (T_{lucht} - T_{PCM}) \quad (8)$$

Als het overdrachtsoppervlakte wordt vergroot zal de overdrachtsenergie groter worden, waardoor het PCM meer energie zal opnemen.

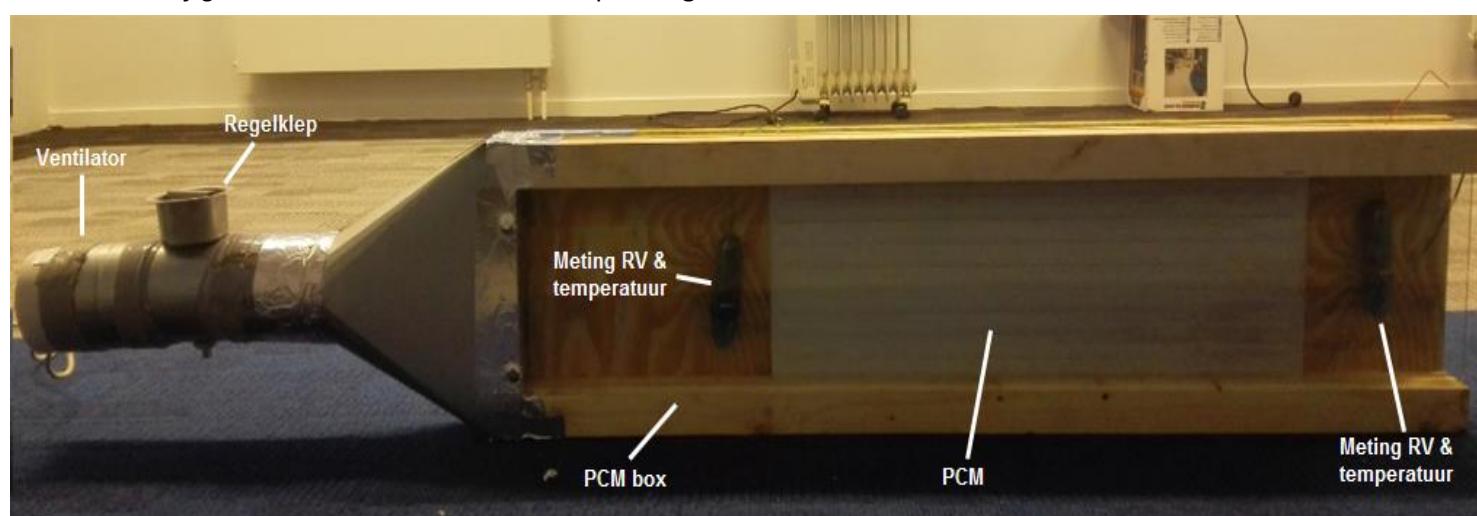
6 TESTOPSTELLING

Naast een computersimulatie is er ook gekeken hoe het PCM in de praktijk reageert. Hiervoor is er een test gedaan met één PCM paneel. Van dit PCM paneel is bepaald hoeveel energie het opneemt tijdens smelten en hoeveel energie het afstaat tijdens stollen.

Hoeveel energie het PCM paneel opneemt/afstaat wordt berekend door de RV [%] en de temperatuur [°C] te meten voor en na het PCM paneel. Hiermee kan, met behulp van het Mollier diagram, de enthalpie [kJ/kg] voor en na het PCM paneel worden bepaald. Ook zal vooraf het debiet [m³/h] worden bepaald.

Als het debiet, het verschil aan enthalpie voor en na het PCM paneel, en de dichtheid van de lucht worden vermenigvuldigd; kan worden berekend hoeveel energie het PCM heeft opgenomen.

In *figuur 6.1* is te zien hoe deze testopstelling eruitziet.



Figuur 6-1 Testopstelling

Aan de hand van bovenstaand figuur wordt de werking van het testmodel uitgelegd.

- Aan de linkerkant van het figuur wordt de lucht aangezogen door een ventilator, met de regelklep kan het luchtdebiet worden aangepast. Tijdens de test is hij ingesteld op 24 [m³/h].
- Door middel van een verloop gaat de lucht naar de PCM box. De PCM box wordt afgesloten door hout aan de ene kant en een glasplaat aan de andere kant om het smeltproces van het PCM paneel zichtbaar te maken.
- De lucht wordt over het PCM paneel geleid. De RV en de temperatuur worden voor en na het PCM paneel gemeten.

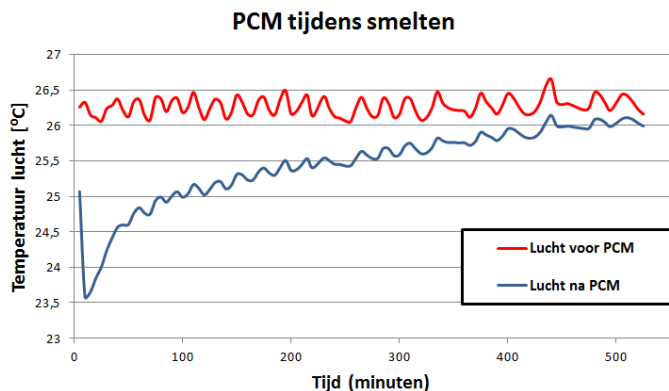
De luchttemperatuur wordt gegenereerd door een ruimte op te warmen/af te koelen tot een bepaalde temperatuur.

Voordat de daadwerkelijke test is uitgevoerd, zijn er nog wat andere testen uitgevoerd om de metingen accurater te maken. Meer informatie daarover staat in *bijlage XIV*.

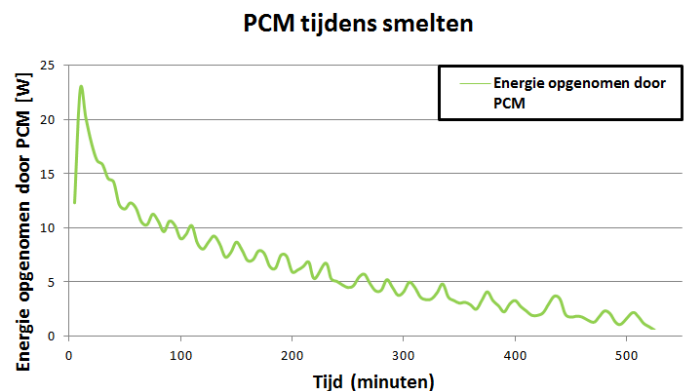
Hieronder is het resultaat te zien van de daadwerkelijke test. Voor de uitwerkingen van deze resultaten wordt verwezen naar *bijlage XIV*. Voor de proef werd een PCM paneel met een smelttemperatuur van 23 [°C] gebruikt. Hieronder worden eerst de resultaten voor het smelten gegeven en daarna voor het stollen.

Smelten

Voor het meten van het smeltproces is de inblaastemperatuur op ongeveer 26 [°C] gehouden, 3 [°C] boven de smelt-/stol temperatuur. In *figuur 6.3* en *figuur 6.2* is het temperatuurverloop en de energieopname van het PCM tijdens smelten te zien.



Figuur 6-3 Temperatuurmetingen smeltproces



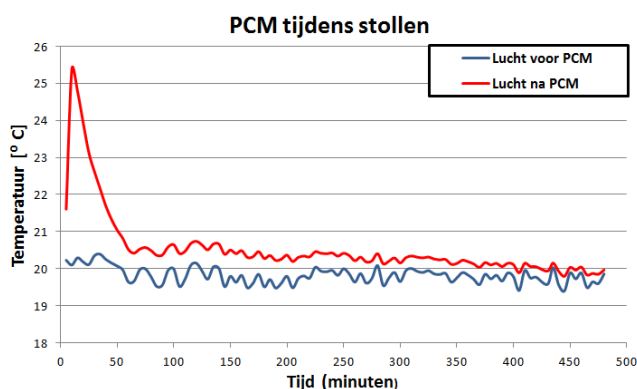
Figuur 6-2 Energieopname PCM tijdens smeltproces

In *figuur 6.3* is te zien dat het temperatuur verschil in het begin groot is en geleidelijk steeds kleiner wordt. Het grote verschil in het begin komt doordat het PCM paneel buiten stond om te stollen, waardoor de temperatuur van het paneel veel lager was dan de kamertemperatuur. Daarna wordt het temperatuur verschil geleidelijk minder, omdat er steeds meer materiaal de fase overgang al heeft doorstaan. Ook kun je zien dat het PCM een dempende werking heeft op de temperatuurfluctuatie.

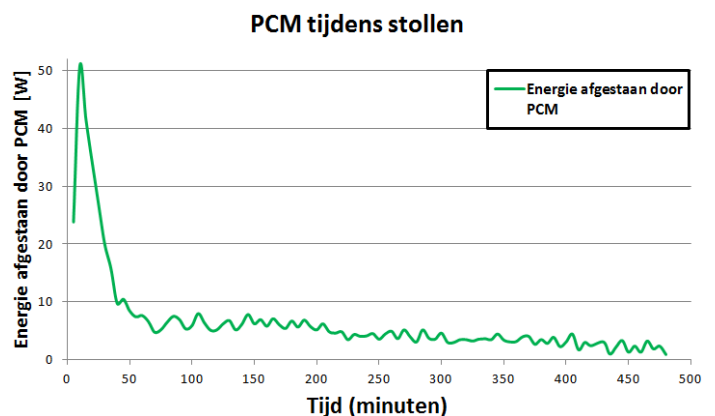
In *figuur 6.2* is te zien dat de energieopname in het begin heel hoog is en geleidelijk lager wordt. Ook hier is de hoge energieopname in het begin veroorzaakt door het feit dat het paneel eerst buiten stond. Gemiddeld gezien nam het PCM in deze periode 5,45 [W] aan energie op. De totale energieopname in deze periode was 163,4 [kJ], van de 210,6 [kJ] aan beschikbare opslagcapaciteit.

Stollen

Voor het meten van het stolproces is de inblaastemperatuur op ongeveer 20 [°C] gehouden, 3 [°C] boven de smelt-/stol temperatuur. In *figuur 6.4* en *figuur 6.5* is het temperatuurverloop en de energieafgifte van het PCM tijdens stollen te zien.



Figuur 6-4 Temperatuurmetingen stolproces



Figuur 6-5 Energieafgifte PCM tijdens stolproces

In *figuur 6.4* is wederom te zien dat het temperatuur verschil in het begin groot is en geleidelijk steeds kleiner wordt. Het grote verschil in het begin komt doordat het PCM in een bak met warm water lag om te smelten, waardoor de temperatuur van het paneel veel hoger was dan de kamertemperatuur. Daarna wordt het temperatuur verschil geleidelijk minder, omdat er steeds meer materiaal de fase overgang al heeft doorstaan. Ook hier kun je de dempende werking van het PCM zien.

In *figuur 6.5* is te zien dat de energieafgifte in het begin heel hoog is en geleidelijk lager wordt. Ook hier is de hoge energieafgifte in het begin veroorzaakt door het feit dat het paneel in een bak met warm water lag. Gemiddeld gezien was de energieafgifte van het PCM in deze periode 4,83 [W]. De totale energieafgifte in deze periode was 131,7 [kJ], van de 210,6 [kJ] aan beschikbare opslagcapaciteit.

Wanneer inblaastemperatuur dichterbij de smelttemperatuur ligt, zal het PCM een constantere energieopname/-afgifte krijgen (lijn in grafiek meer horizontaal). Hierdoor zal het PCM minder snel smelten.

Wanneer inblaastemperatuur verder van de smelttemperatuur ligt, zal het PCM juist een minder constante energieopname/-afgifte krijgen (lijn in grafiek stijler). Hierdoor zal het PCM sneller smelten.

Wel zijn er een paar aspecten van invloed geweest op de resultaten.

Het smeltproces was lastiger, omdat een gedeelte van de warmte verloren ging via de glasplaat. Dit kon je zien aan het feit dat het PCM paneel aan glasplaatkant minder gesmolten was. Het heeft dus niet alle warmte opgenomen, want een deel van de energie ging verloren. Hierdoor lijkt het alsof het PCM meer energie heeft opgenomen, terwijl een deel te wijten is aan de glasplaat. De gemiddelde energieopname [W] zal dus eigenlijk minder zijn dan berekend is.

Voor het stolproces is dit andersom. Naast de koele inblaaslucht kwam er ook nog koude van de glasplaat naar binnen. Hierdoor werd dus niet alleen de inblaaslucht verwarmd, waardoor het lijkt dat het PCM paneel minder van de ingeblazen lucht heeft verwarmd. De gemiddelde energieafgifte [W] zal dus eigenlijk meer zijn dan berekend is.

Gemiddeld gezien zal de energieopname/-afgifte dus iets dichterbij de 5 [W] liggen.

Hieronder zijn de conclusies en aanbevelingen aan de hand van dit onderzoek weergegeven.

Conclusie

Uit voorgaand onderzoek kan worden geconcludeerd dat PCM weldegelijk een interessante technologie is. Aan de hand van de testopstelling en het dynamische model is te zien dat PCM werkt en energie bespaart.

Aan de hand van een keuzeverantwoording is er gekozen om meer onderzoek te doen naar een compacte en lokale oplossing in de vorm van een Fan Coil Unit. Dit omdat er binnen het bedrijf behoefte was aan een lokale, compacte oplossing die gemakkelijk is toe te passen in de renovatie van gebouwen. In het ontwerp is de toepassing aangepast zodat het een gehele ruimte kan koelen. Echter kan op basis van het dynamische model in dit rapport worden geconcludeerd; dat de ontworpen oplossing, een rendabele compacte PCM toepassing, nog niet interessant is om te realiseren.

Om de toepassing goed te laten functioneren moet er een bypass worden gemaakt voor het PCM, die alleen open gaat als de temperatuur van de menglucht warmer is dan de temperatuur van het PCM en als de buitentemperatuur hoger is dan 16 [°C]. Hierdoor heeft het PCM geen invloed op de verwarming en heeft het PCM alleen een positieve invloed op de koeling.

Het toepassen van PCM in de compacte toepassing levert inderdaad een energiebesparing op. Bij nieuwbouw ligt deze besparing tussen de € 0,27 en € 0,63, bij bestaande bouw ligt dit tussen de € 0,84 en € 1,38. De prijs van één PCM paneel is € 11,-. Omdat er in deze toepassing 10 PCM panelen (13 [kg] PCM) zitten, zal de investering voor het PCM €110,- zijn. Als er puur wordt gekeken naar de kostenbesparing op energie zal de investering in het PCM niet in 5 jaar zijn terugverdiend.

In de huidige ontworpen toepassing zijn er ook niet genoeg PCM panelen aanwezig om te besparen op geïnstalleerd koelvermogen.

Om wel op geïnstalleerd koelvermogen te besparen, zullen er veel meer PCM panelen moeten worden toegepast om de ontworpen toepassing interessant te maken. Bij bijvoorbeeld 100 PCM panelen (130 [kg] PCM) is te zien dat er wel wordt bespaard op geïnstalleerd koelvermogen. De toepassing zal hierdoor echter veel groter en zwaarder worden, terwijl het juist ontworpen was om een lokale en ook compacte oplossing te zijn. Om een dergelijke toepassing rendabel te maken zal het dus niet mogelijk zijn om een compacte toepassing te maken.

Als wordt gekeken naar toepassingen van het bedrijf 'OC Autarkis' is inderdaad te zien dat hier veel meer PCM panelen in één toepassing worden geïmplementeerd. Op deze manier wordt er op energie en op geïnstalleerd koelvermogen bespaard, wat de toepassing wel interessant maakt.

Ook is er een test gedaan naar de werking van het PCM in de praktijk. Hierin is aangetoond dat het PCM inderdaad de lucht afkoelt. Gemiddeld nam één PCM paneel tijdens smelten 5,5 [W] op en stond het tijdens smelten 4,8 [W] af.

Terugkoppelend op de hoofdvraag van dit onderzoek:

"Is het interessant PCM technologie toe te passen in de klimaattechniek?"

Het is interessant om PCM technologie toe te passen in de klimaattechniek, omdat er is aangetoond dat PCM werkt en energie bespaart. Echter zal de technologie pas echt interessant worden als er een grote hoeveelheid PCM panelen wordt toegepast, omdat er dan ook op geïnstalleerd koelvermogen kan worden bespaard. De onderzochte compacte toepassing is daarom nog niet interessant om te maken.

Aanbevelingen

Bij de ontwikkeling van een dergelijke toepassing, zal er goed onderzocht moeten worden hoeveel PCM panelen er nodig zijn om voldoende te besparen op energie en koelvermogen. Ook moet er kritischer worden gekeken naar de afstand tussen de PCM panelen, omdat deze afstand voor een groot deel de overdrachtscoëfficiënt bepaald.

Pas daarna zal de rest van de toepassing moeten worden gedimensioneerd.

Bij verdere ontwikkeling zal er nog gekeken moeten worden naar andere aspecten om de toepassing goed te laten werken, bijvoorbeeld:

- Het toepassen van kleppen om het luchtdebiet te regelen.
- Het toepassen van kleppen om de richting van de stroming bij dag en nacht te veranderen.
- Het toepassen van een ventilator bij de afvoer van lucht naar buiten, om de stromingen beter te laten verlopen.
- Alle regeltechniek, om de toepassing goed te laten functioneren.

Pas hierna zal er een goede indicatie kunnen worden of de totale kosten van de toepassing niet te hoog worden (eis 1.2)

Bij het onderzoek naar de rendabiliteit van het PCM is er een versimpeld dynamisch model gemaakt om een inzicht te krijgen of het PCM daadwerkelijk interessant is.

Bij verdere ontwikkeling zal er een gedetailleerder dynamisch model moeten worden gemaakt om een betrouwbaardere uitspraak te kunnen doen over de rendabiliteit van deze PCM toepassing.

Zo is er in de modellering van het PCM geen rekening gehouden met onderkoeling en hysteresis, hier zal nog meer onderzoek naar moeten worden gedaan om de bepalen hoe dit de effectiviteit van het PCM beïnvloedt.

Ook is er in de modellering van het PCM aangenomen dat de luchttemperatuur en PCM temperatuur tijdens de overdracht constant blijft. Dit zou verfijnd kunnen worden door het overdrachtsproces op te delen in kleinere stukjes, waardoor de temperatuur verandering tijdens de overdracht wel wordt meegenomen.

De test die is uitgevoerd heeft aangetoond dat het PCM in de praktijk ook daadwerkelijk werkt.

Bij een verdere ontwikkeling van een PCM toepassing zullen er echter betrouwbaardere testen moeten worden uitgevoerd, waarbij een professionele klimaatkamer nodig is.

Hierbij moeten er ook worden getest of er aan de volgende eisen wordt voldaan:

- De toepassing moet voldoen aan de verschillende gestelde comforteisen
- De toepassing moet voldoen aan de geluidseisen
- De toepassing moet voldoen aan de eis voor de CO₂ concentratie

Aan de hand van deze aanbevelingen is er duidelijk gemaakt welke aandachtspunten er nog zijn als er PCM wordt geïmplementeerd.

BRONNEN

Tijdens het uitvoeren van deze afstudeeropdracht zijn de volgende bronnen gebruikt:

Geraadpleegde literatuur:

- [1] Ning-Wei Chiu, J. (2011). Heat Transfer Aspects of Using Phase Change Material in Thermal Energy Storage Applications. Stockholm: School of Industrial Engineering and Management
- [2] Sharma, A. (2007). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Taiwan: Kun Shan University
- [3] Zhao, W. (2013). Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. Pennsylvania: Lehigh University
- [4] Oskam, I., Cowan, K., Hoiting, L. & Souren, P. (2011). Ontwerpen van technische innovaties, eerste druk. Groningen/houten: Noordhoff Uitgevers B.V.
- [5] Keller, B. (1997). Klimatgerechtes Bauen: Grundlagen – Dimensionierung – Beispiele. Duitsland: Vieweg+Teubner
- [6] Turnpenny, J.R. (1999). Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Nottingham: Nottingham University
- [7] Uros Stritih (2007). Energy saving in building with PCM cold storage. Ljubljana: University of Ljubljana (Faculty of Mechanical engineering)
- [8] Knoll, ir. W.H., Wagenaar, ir. E.J. & van Weele, ir. A.M. (Red.)(2002). Handboek installatietechniek. Rotterdam: Stichting ISSO
- [9] Nederlands Normalisatie-instituut (2007). NEN-EN 13779, Ventilatie voor utiliteitsgebouwen – Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut
- [10] Schmitz, H. (2014). PCM koeling met een minimale COP van 139 (deel I en II). Alphen a/d Rijn: RCC koude & luchtbehandeling
- [11] Schmitz, H. (2015). Presentatie ISSO publicatie PCM. Holten: OC Autarkis bv
- [12] Verein Deutscher Ingenieure (2010). VDI heat atlas. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH

Geraadpleegde websites:

- [13] OC Autarkis (jaar: onbekend). PCM producten. Geraadpleegd op 24 Augustus 2015 via: <http://www.autarkis.nl/nl/downloads>
- [14] Solid air (2012). Koelconvectoren. Geraadpleegd op 25-08-2015 via: <http://www.nijburg.com/files/file/brochures/uitgebreide%20koelconvectoren%20catalogus.pdf>
- [15] Trox (jaar: onbekend). Design manual. Geraadpleegd op 25-08-2015 via: (inductie principe) http://www.trox.nl/downloads/3bd087e488d58b63/s_aws_air_water_systems_en.pdf
- [16] Bouwbesluit online (2012). Voorschriften voor gebouwen. Geraadpleegd op 15-09-2015 via: (Minimale vernieuwing) <http://www.bouwbesluitonline.nl/Inhoud/docs/wet/bb2012>
- [17] Veiligheid.nu (jaar: onbekend). Klimaatonderzoek. Geraadpleegd op 16-09-2015 via: (comfort temperatuur) http://www.veiligheid.nu/Diensten/dienst_klimaatonderzoek.html
- [18] Arbeidsomstandighedenbesluit (2015). Wet- en regelgeving arbeidsomstandigheden. Geraadpleegd op 29-09-2015 via: http://wetten.overheid.nl/BWBR0008498/volledig/geldigheidsdatum_29-09-2015
- [19] ISSO (2015). Kennisinstituut installatiesector. Geraadpleegd op 30-09-2015 via: <http://www.isso-digitaal.nl/>
- [20] Veab (2015). Warmtewisselaars. Geraadpleegd op 13 Oktober 2015 via: <http://www.veab.com/en/products/>
- [21] ACS (2015). Filterselectie. Geraadpleegd op 13-10-2015 via:

http://www.acsfilters.com/index.php?option=com_zoo&task=item&item_id=14&category_id=1&Itemid=200

[22]Soler&Palau (2015). Ventilator selectie. Geraadpleegd op 22-10-2015 via:

<http://easyvent.solerpalau.com/>

[23]Rubitherm (2015). Soortelijke warmte vast en vloeibaar PCM. Geraadpleegd 24-11-2015 via:

http://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_SP21E_DE_15102015.PDF

[24]Hygrotemp (2015). Berekenen enthalpie lucht. Geraadpleegd 19-11-2015 via:

<https://www.hygrotemp.nl/vochtcalculator>

Geraadpleegde documentatie binnen Verkade klimaat B.V.:

[25]Klimacomp B.V. (2012). Transmissie- en koellastberekeningen Kantoor Vlothove Monster. Delft: Klimacomp B.V.

[26]Weger air solutions (jaar: onbekend) Slide chart for air duct calculation

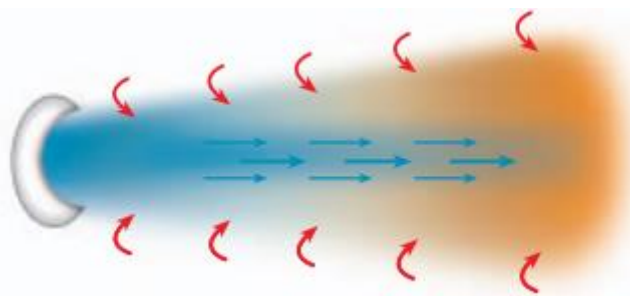
Geraadpleegde personen:

[27]Bron: geraadpleegd voor allerlei informatie, geraadpleegd op 27 Augustus 2015, via: Walter van Kampen (OC Autarkis)

I INDUCTIEPRINCIPE

Inductieprincipe

Door het inductieprincipe kan lucht worden aangezogen. Het principe wordt uitgelegd met behulp van *figuur I-0-1*. Lucht wordt door een kleine opening geblazen waardoor een vrije straal ontstaat, die met hoge snelheid de ruimte wordt ingeblazen. De omtrek van de vrije straal wrijft de lucht tegen de lucht in de ruimte en brengt de aangrenzende lucht in beweging. Hierdoor neemt de stromende luchthoeveelheid toe[10].



Figuur I-0-1 Inductieprincipe [15]

II. SAMENVATTING GESPREK 'OC AUTARKIS' (27-08-2015)

Hieronder is een samenvatting weergegeven van het bezoek aan 'OC Autarkis'. In dit bedrijf is gesproken met Walter van Kampen. Eerst zijn alle vooraf opgestelde vragen weergegeven. Daarna zijn alle aantekeningen weergegeven, die tijdens het bezoek gemaakt zijn.

Waarom is er gekozen voor PCM met fase-overgang van vast-vloeibaar en niet vast-vast of vloeibaar-gas?

- De ontwikkeling van producten met vast-vast overgang is nog niet ver genoeg, er zijn lopende onderzoeken over deze materialen. Commercieel is het dus nog niet goed verkrijgbaar.
- Bij de fase-overgang van vloeibaar-gas is er een grote volumeverandering dat een probleem vormt.

Waarom wordt er zouthydraat gebruikt en geen paraffine?

Paraffine is brandbaar en zouthydraat niet. Brandveiligheid is belangrijk in gebouwen.

Hoe los je de segregatie van zouthydraat op?

Door verpakking en compartimentering van het PCM wordt segregatie tegengegaan

Hoe los de optredende hysteresis op bij zouthydraat?(Bron)

Dit lossen we op door in de vast-vloeibaar overgang te blijven. Hysteresis treedt voornamelijk op bij de overgang van vloeibaar naar vast. Daarom overdimensioneren wij altijd als we de hoeveelheid PCM moeten bepalen. Hierdoor blijven wij altijd binnen de vast-vloeibaar overgang, waar geen hysteresis optreedt.

Er wordt beweerd dat 50% opwarmvermogen wordt bespaard met het toepassen van PCM. Is dit opwarmvermogen of totale vermogen?

Dit is 50% van het totale vermogen.

PCM kan 30x zoveel energie opnemen dan beton. Hoe kom je aan deze gegevens?(Bron)

Dit is een hele gecompliceerde berekening. Ik zal hem naar je sturen.

Waarom kan het alleen toegepast worden in traag reagerende ruimtes?

PCM reageert heel traag. In snel reagerende ruimtes kan PCM zijn functie niet goed vervullen

Welke overgangstemperaturen zijn verkrijgbaar?

Voor zouthydraat, wat wij nu gebruiken, zijn overgangstemperaturen van 5-40 °C verkrijgbaar.

Welke materialen worden er precies gebruikt? (PCM+ verpakking)

Voor het PCM wordt dus zouthydraat gebruikt, voor verpakking wordt HDPE gebruikt. Beide zijn recyclebaar

Hoelang duurt het voordat de volledige capaciteit wordt bereikt?

De hoeveelheid PCM wordt per project uitgerekend en zo gedimensioneerd dat hij 12 uur laadt en 12 uur ontlad. De hoeveelheid PCM wordt altijd overgedimensioneerd om hysteresis te voorkomen.

Bij het koelplafond is veel meer besparing dan bij de koelwand. Hoe komt dit?

Dit komt omdat bij het plafond de PCM over het hele plafond is verspreid. Bij koelwand zit het PCM alleen in de wand waardoor het PCM minder efficiënt verspreid is. Dit maakt dat er verschil is in besparingen.

Hoe stolt het PCM? Is overal ventilatie nodig om het te laten stollen (warmte kwijtraken)?

Om het PCM in de nacht weer te laten stollen is er bij elke toepassing ventilatie nodig. Gebeurt dit niet, dan moet het PCM puur afkoelen op straling wat veel te lang duurt.

Wat is het functionele verschil met het PCM plafond en de PCM wand?

Zie vraag: *Bij het koelplafond is veel meer besparing dan bij de koelwand. Hoe komt dit?*

Voordat PCM volledig is opgewarmd, is er last van koudere vlakken?(reducert comfort)(klimaatvloer)?

Nee, dit is inderdaad getest want dit dachten wij ook. Maar door de laag die nog boven de PCM panelen ligt, wordt de warmte heel snel verspreid.

Welke toepassing is het beste toepasbaar als je kijkt naar de hoeveelheid aanpassingen die moeten worden gedaan aan het gebouw?

Als je puur kijkt naar hoe makkelijk het toepasbaar is dan is dit de volgorde:

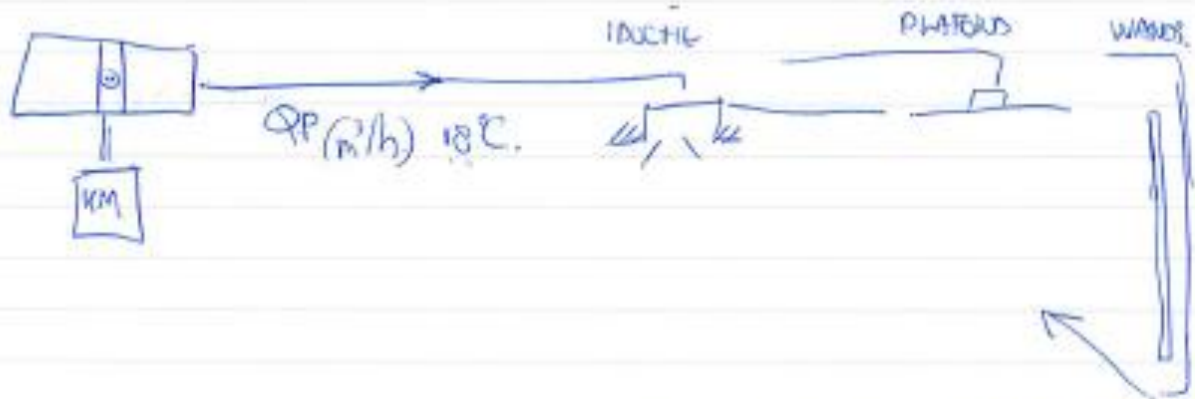
1. Inductieunit
2. Plafond
3. Klimaat vloer
4. Klimaat wand

Is er ook een toepassing die lokaal kan worden toegepast?(scheelt aanpassingen, makkelijker te implementeren)

Ja, die hebben wij laatst ontworpen, ik zal je de informatie daarover sturen.

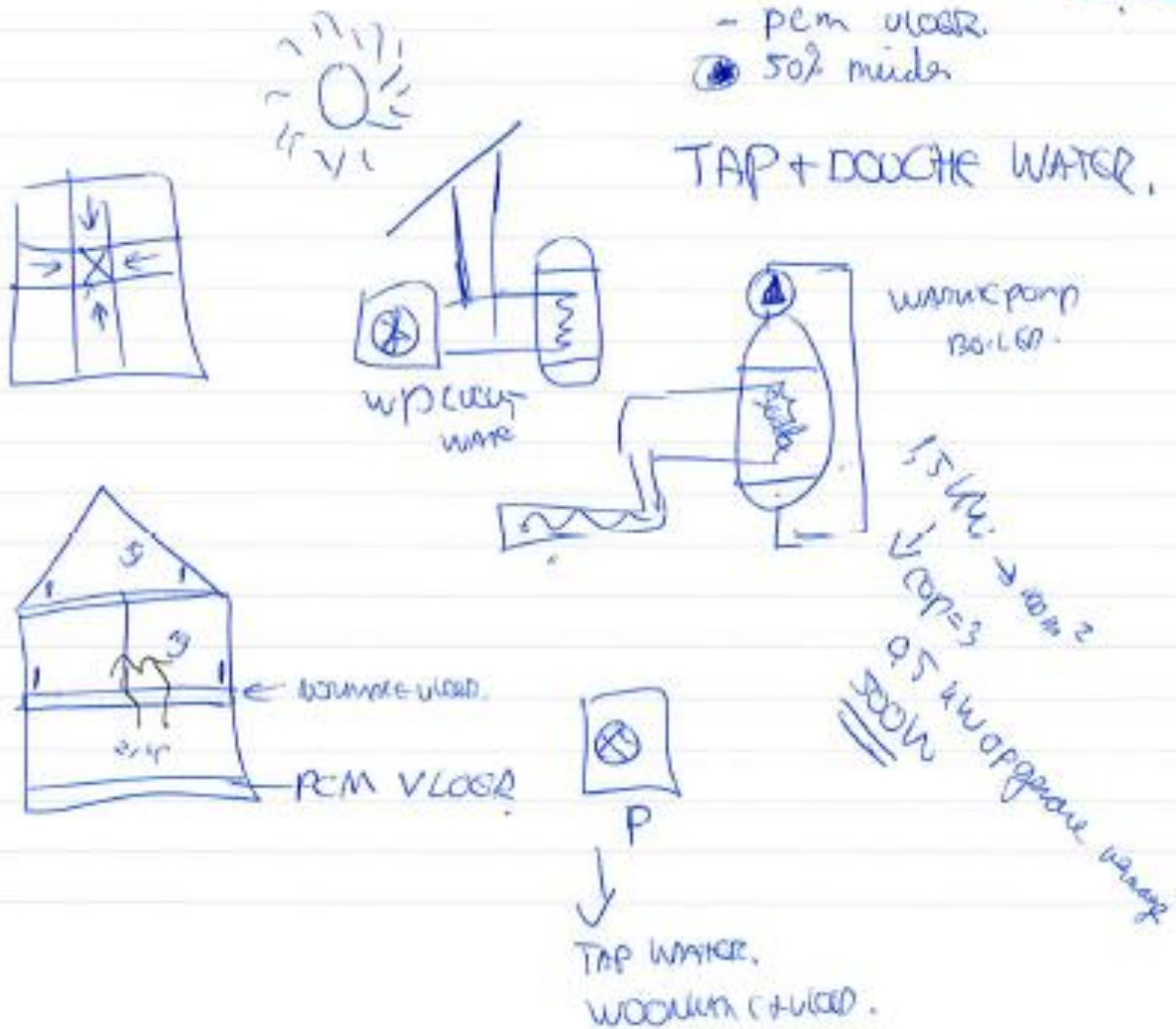
INTERIEUR $\emptyset$
 AUTARCHIS

- KANTOREN
 - PCM inclusief
 - PLATEAUS
 - WINTERS. $\odot$



- WINTERS. PCM 25
 - PCM vloer.
 - $\odot$ 50% minder

TAP + DOUCHE WATER.

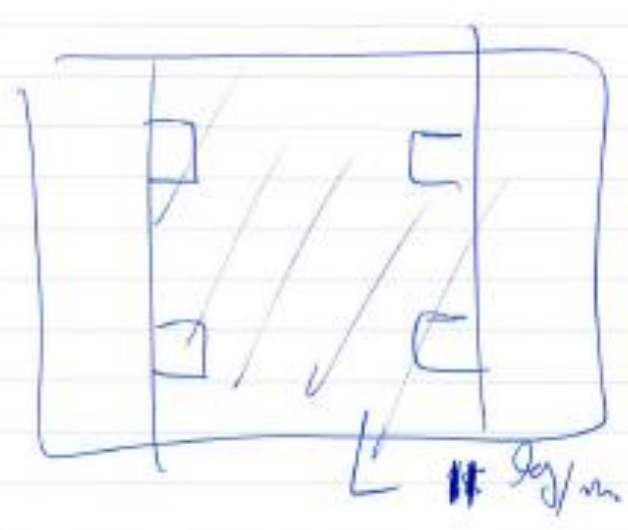
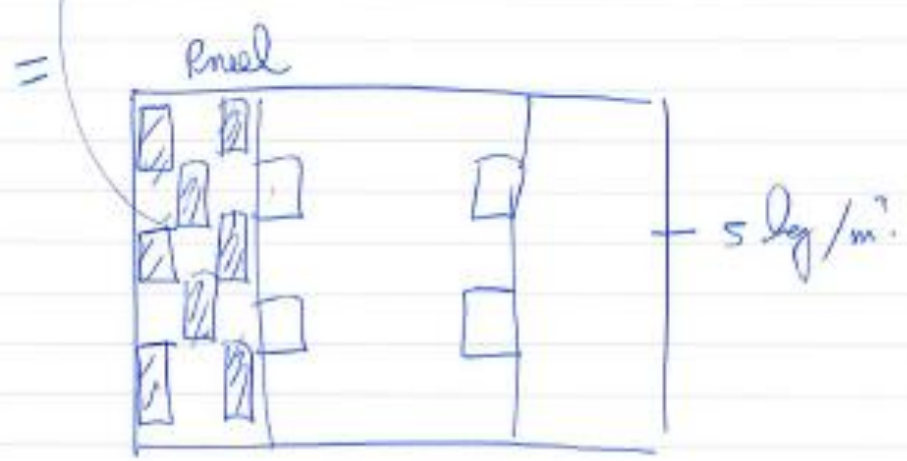
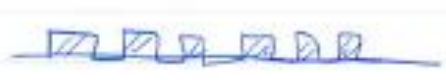


1/3

50% koef. mach. u.s.

PLAFOND PC17 23

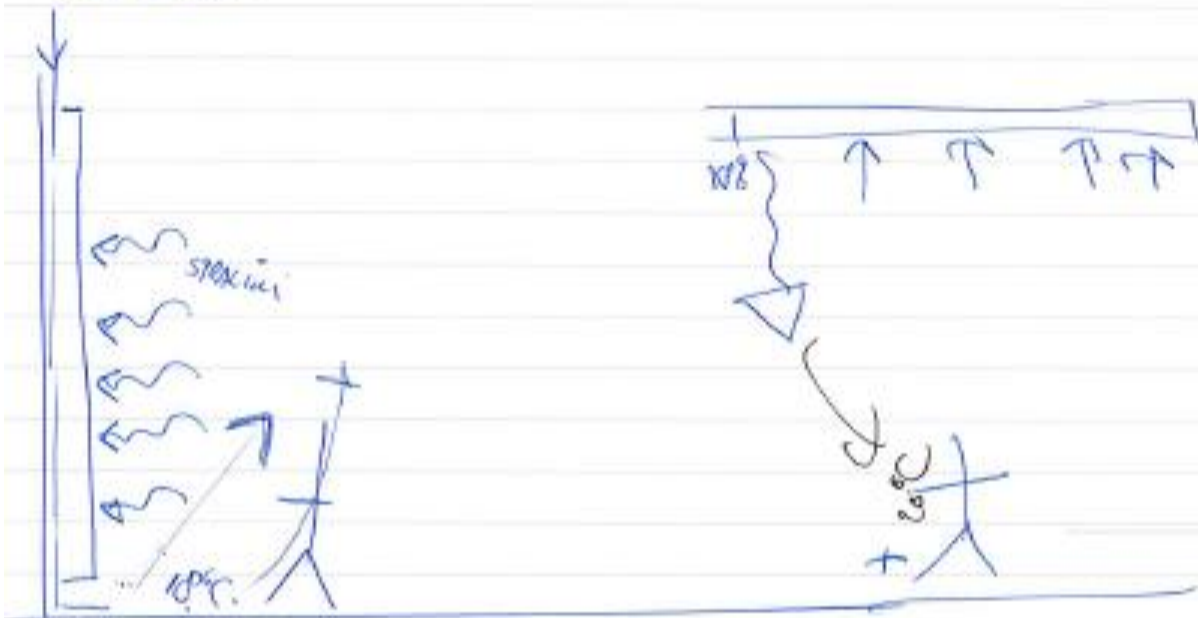
↓
5 kg/m²
Spring behanding



3/3

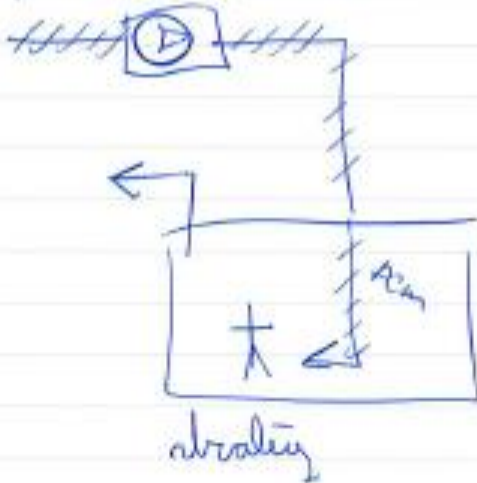
WAND VS PLAFOND PCM 23

$Q \text{ PCm}^2\text{h}$

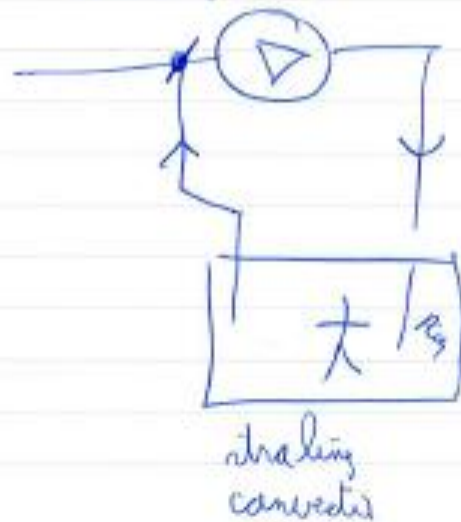


VERWARMEN

30% Energie besparing
per m² nacht.

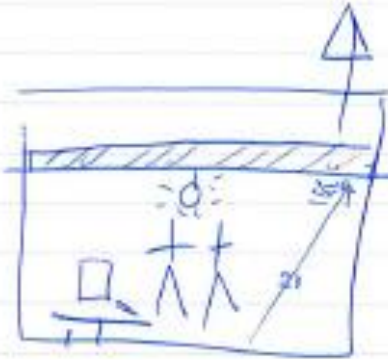


50% besparing
nacht.



3/3

VERWARMEN

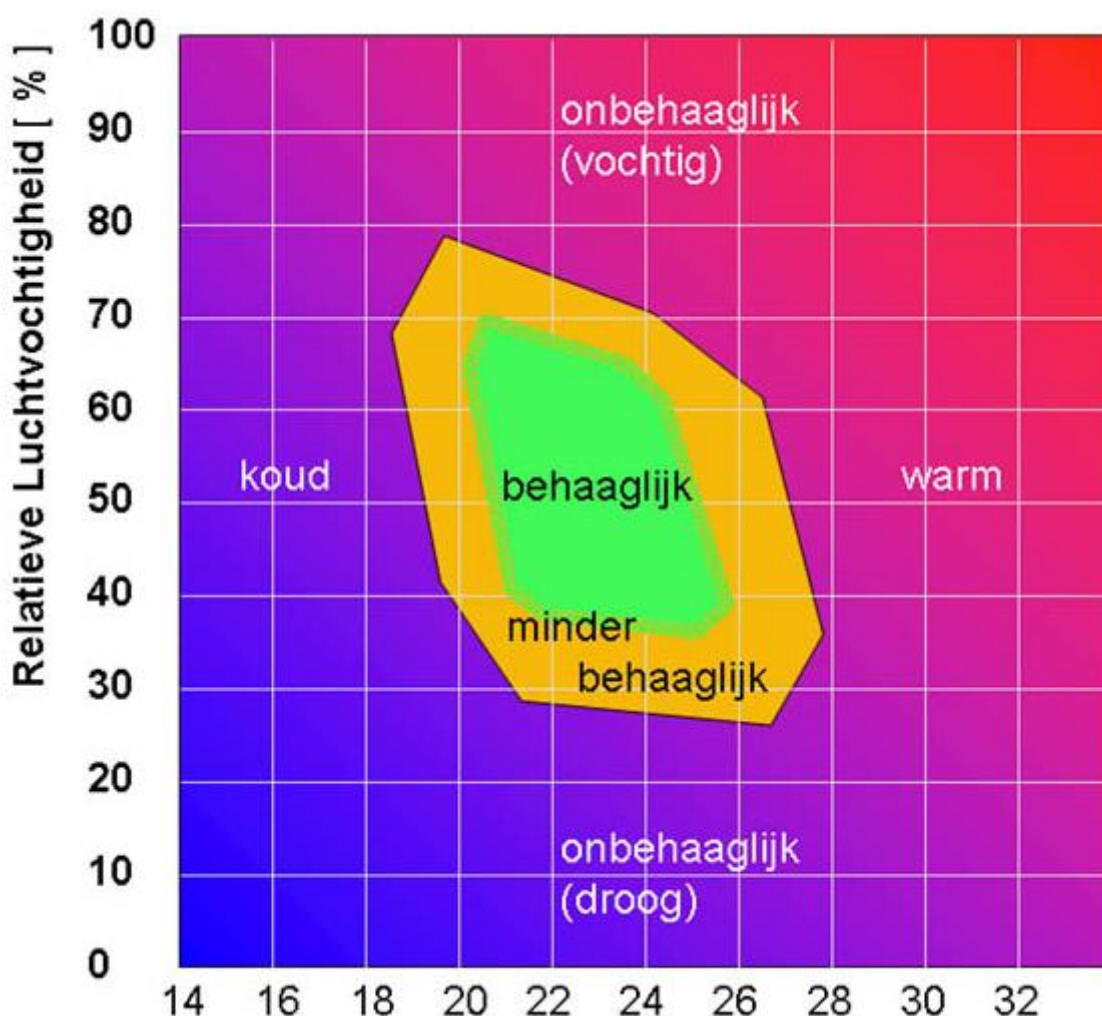


$\dot{Q}_{\text{roof}} = 10-15 \text{ W/m}^2$
 $\dot{Q}_{\text{vent}} = 85-150 \text{ W}$
 $\dot{Q}_{\text{rad}} = 15-20 \text{ W/m}^2$

III. THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID

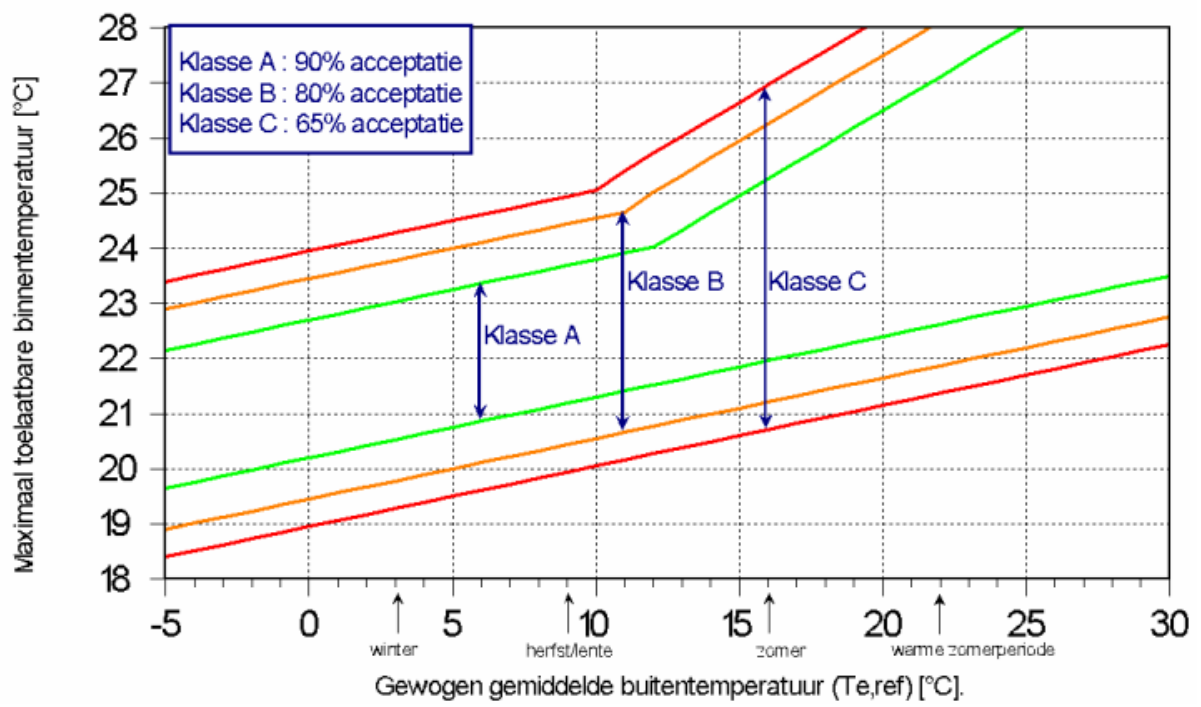
Thermische behaaglijkheid is erg subjectief, omdat het per persoon verschilt wat als een aangenaam klimaat wordt ervaren. Desondanks zijn er modellen ontwikkeld waarmee een voorspelling over de beleving gemaakt kan worden. In *figuur III-0-2* is het model te zien dat door 'Verkade Klimaat' wordt gebruikt om de behaaglijkheid te bepalen.

Wanneer het om een klimaatinstallatie gaat, wat hier het geval is, dan moet de relatieve luchtvochtigheid tussen de 40 en 70% liggen.



Figuur III-0-2 Grafiek thermische behaaglijkheid

Om nog meer zekerheid te hebben over het comfort van de klimaatinstallatie, wordt er gebruik gemaakt van een tweede grafiek, te zien in *figuur III-0-3*. In dit figuur zijn verschillende comfortklassen te zien aan de hand van de buitentemperatuur en de binnentemperatuur, gebaseerd op gebouwen met airconditioning. Het is de bedoeling dat de uiteindelijke toepassing minstens voldoet aan comfortklasse B.



Figuur III-0-3 Grafiek comfortklassen

IV. UITLEG SCORE SUCCESCRITERIA

Na overleg met de opdrachtgever zijn alle acceptabele toepassingen beoordeeld. Hoe de scores tot stand zijn gekomen is hieronder per criterium beschreven. Bij de beoordeling is gekeken naar de toepassing in een kantoor. Ook is er gekeken naar de onderdelen van de toepassing lokaal gezien, dus niet naar de centrale LBK die de lucht aanvoert.

Toepassing 1: PCM inductieconvactor

Toepassing 2: PCM klimaatplafond

Toepassing 3: PCM klimaatwand

Toepassing 5: PCM Fan Coil Unit

Zo min mogelijk bewegende delen

Hierin hebben toepassing 1,2 en 3 een hogere score, omdat zij geen bewegende delen hebben. Toepassing 5 heeft een ventilator als bewegend deel, waardoor het lager scoort. Toch krijgt deze toepassing nog drie punten, omdat 1 bewegend deel nog steeds niet veel bewegende delen zijn.

Zo min mogelijk aanpassingen aan huidig systeem

- Toepassing 5 scoort hier het hoogste aangezien dit een 'plug & play' oplossing is, je rijdt de machine in de kamer en je bent klaar. Voor deze toepassing hoeft dus niks te worden aangepast.
- Hierna scoort toepassing 2 het hoogste, omdat hier in principe alleen de plafondtegels van een kantoor moeten worden vervangen door de PCM plafondtegels. De aanvoer en afvoer zal enigszins moeten worden aangepast, maar verder zijn er geen aanpassingen nodig.
- Toepassing 3 scoort iets lager, omdat hier nog een wand moet worden geplaatst, deze wand is wel 'pre-fab', maar toch zal dit tot meer aanpassingen leiden.
- Toepassing 1 scoort het laagste omdat hier in het verlaagde plafond nog kanalen moet worden aangelegd naar de inductie-unit toe. Dit zal tot de meeste aanpassingen leiden.

Zo min mogelijk tijd om te installeren

Dit criterium heeft precies dezelfde score als het criterium hiervoor, omdat hoe minder aanpassingen er moeten worden gemaakt, hoe minder tijd dit in beslag neemt.

Neemt zo min mogelijk ruimte in beslag

Toepassing 1,2 en 3 scoren hier het hoogste. Deze toepassingen nemen redelijk wat ruimte in beslag, maar kunnen in het plafond of een wand worden verwerkt. Hierdoor staat de toepassing niet in de weg. Toepassing 5 scoort het slechtste, omdat de toepassing niet kan worden verwerkt in het plafond of een wand waardoor het in de weg staat in het kantoor.

Onderhoudskosten zo min mogelijk

De hoeveelheid onderhoudskosten hangen voornamelijk af van het aantal bewegende delen dat er in de toepassing zitten. Hierdoor heeft toepassing 5 de meeste onderhoudskosten. Toepassing 1 moet af en toe worden schoongemaakt maar heeft geen bewegende delen en scoort daarom hoger. Voor toepassing 2 en 3 zijn er bijna geen onderhoudskosten en scoren daarom het hoogste.

Bespaart zoveel mogelijk energie

Welke toepassing het meeste energie bespaart is gehaald uit de analyse van alle toepassingen. In de brochures van 'OC Autarkis' waren de energiebesparingen in % aangegeven.

Toepassing 2 en 3 hebben een besparing op koeling van 20% en 25% op verwarming, en scoren het hoogste. Toepassing 1 heeft alleen een besparing op koeling van 20% en scoort hierdoor lager. Het laagste scoort toepassing 5, omdat hier nog geen besparingen over bekend zijn. Er wordt naar verwachting weldegelijk energie bespaard, maar omdat dit nog niet bekend is wordt hier een lagere score aan toegekend.

Zo gemakkelijk mogelijk te demonteren voor reparatie

Naar verwachting is toepassing 5 het gemakkelijkste te demonteren, als de omkasting wordt verwijderd kan alles gemakkelijk worden vervangen. Voor de andere toepassingen moet bij het plafond worden gewerkt of bij de wand. Toepassing 1 scoort toch iets hoger, omdat dit onderdeel kleiner qua omvang is, waardoor het demonteren minder tijd in beslag neemt.

V. KOELLASTBEREKENINGEN UITLEG

Hieronder is uitgelegd welke waarden voor de berekening van de koellast zijn gehanteerd en waarom deze waarden zijn gekozen. De maximale koellast voor een bestaand gebouw en een nieuw gebouw zijn berekend. De verschillende componenten zijn hieronder één voor één behandeld met de waarden beide situaties. Alle gebruikte tabellen zijn uit de 'ISSO publicatie; kleintje koellast' gehaald. [19]

SWM waarde

Voor de SWM waarde (specifieke werkzame massa) is gekozen voor de 100 [kg/m²] bij bestaande bouw en 90 [kg/m²] bij nieuwbouw, omdat nieuw gebouwen tegenwoordig steeds lichter gebouwd worden. Er is daarom een klein verschil aangebracht in gebouwmassa. De massa is bepaald aan de hand van *tabel V-0-1*.

Tabel V-0-1 Bepalen SWM [19]

Scheidingswand	Borstwering	Verlaagd plafond	SWM [kg/m ²]
Steenachtig materiaal	Niet steenachtig	wel	90
		geen	100
	Steenachtig	wel	100
		geen	100

Externe voelbare componenten

Externe koellast wordt veroorzaakt door warmte die van buiten afkomstig is. Hieronder is weergegeven hoe deze externe koellast is berekend.

Φ_{zg} (Koellastbijdrage door zonnewarmte via ramen)

De koellast door zonnewarmte via ramen, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{zg} = z \cdot A_g \cdot g \cdot Q_{zon} \cdot redac \quad (11)$$

Waarin:

z	=	factor voor opvallende zonnestraling met en zonder beschaduwing	[-]
A _g	=	glasoppervlakte	[m ²]
g	=	g-waarde	[-]
Q _{zon}	=	koellast t.g.v. zonbelasting via ramen per m ² glas en bij g = 1	[W/m ²]
Redac	=	correctiefactor voor maandinvloed	[-]

- Factor z = 1, omdat in dit model geen beschaduwing aanwezig is.
- Om het glas oppervlakte te berekenen, wordt het gehele raamoppervlakte berekend, het glasoppervlakte wordt vervolgens bepaald aan de hand van *tabel V-0-2*.

Tabel V-0-2 Bepalen glaspercentage [19]

Gebruiksfunctie	Raamoppervlakte [m ²]	Glaspercentage	
		Metalen kozijn [%]	Houten of kunststofkozijn [%]
Utiliteitsgebouwen	Met te openen ramen	70	
	Niet te openen ramen	85	

Met niet te openen ramen is het glaspercentage 85%.

Het glaspercentage is dan: $h \cdot b \cdot 0,85 \cdot \text{aantal ramen} = 1,15 \cdot 1,30 \cdot 0,85 = 2,54 \text{ [m}^2\text{]}$.

Dit geldt voor alle 2 de situaties.

- De g-waarde voor bestaande bouw en nieuwbouw is uit de *tabel V-0-3* te halen.

Tabel V-0-3 Bepalen g-waarde [19]

Beglazing	Zonwering		g-waarde	U
	Binnen	Buiten		
Dubbelglas, blank			0,7	3,3
	X		0,45	3,1
		X	0,15	3,0
HR-glas			0,55	2,0
	X		0,32	1,6
		X	0,2	1,4

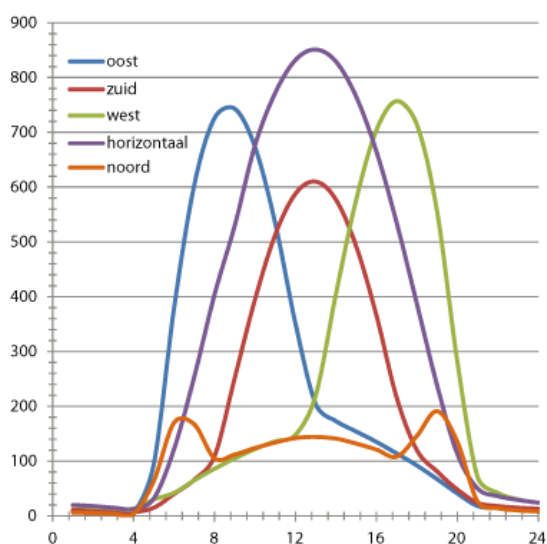
Voor bestaande bouw wordt uitgegaan van een glasoort met een lagere g-waarde, omdat het een ouder gebouw is.

- g-waarde nieuw gebouw: 0,32 (HR-glas met binnenzonwering)
- g-waarde bestaand gebouw: 0,45 (dubbelglas, blank met binnen zonwering)

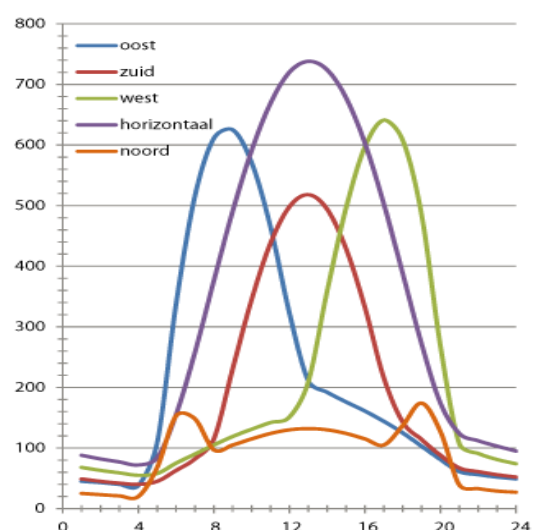
- Qzon is bepaald aan de hand van een oriëntatie naar het zuiden

Deze waarde wordt bepaald met formule: $Q_{zon} = q_z(0) + (q_z(100) - q_z(0)) \cdot 0,01 \cdot SWM$

Qz(0) wordt met *figuur V-0-4* bepaald, qz(100) met *figuur V-0-5*.



Figuur V-0-4 Bepalen qz (0) [19]



Figuur V-0-5 Bepalen qz (100) [19]

Voor een bestaand gebouw is SWM 100, voor een nieuw gebouw is SWM 90. Als dit wordt ingevuld in de formule komen de volgende waarden eruit:

$Q_{zon} \text{ nieuw gebouw} : 610 \text{ [W/m}^2\text{]}$

$Q_{zon} \text{ bestaand gebouw} : 529 \text{ [W/m}^2\text{]}$

- Voor de redactiewaarde is uitgegaan van '1', een gemiddelde uit tabel V-0-4 met zuidelijke oriëntatie.

Tabel V-0-4 Bepalen redactie-waarde [19]

	Mei	Juni	Juli	Aug.	Sept.
Voor vlakken zuid	1,07	0,97	1,0	1,12	1,0

- De uiteindelijke waarden voor Φ_{zg} : Bestaand gebouw: 697 [W]

Nieuw gebouw: 430 [W]

Φ_{zt} (Koellastbijdrage door ondoorzichtige wanden en daken)

De koellast door ondoorzichtige wanden en daken, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{zt} = a \cdot A_{d,o} \cdot q_{zt} \cdot C_{iso} \quad (12)$$

Waarin:

a = de absorptiecoëfficiënt van het oppervlak voor opvallende zonnestraling [-]

$A_{d,o}$ = het oppervlakte van het ondoorzichtige deel van de buitenwand [m²]

q_{zt} = de koellast door belasting van zon en temperatuur op ondoorzichtige wanddelen bij $a = 1$ [W/m²]

C_{iso} = correctiefactor voor isolatie [-]

- De absorptiecoëfficiënt 'a' is gekozen aan de hand van tabel V-0-5.

Tabel V-0-5 Bepalen absorptiecoëfficiënt [19]

Materiaal		a
Baksteen	gebroken wit	0,2
	licht	0,3
	rood (van licht naar donker)	0,5 - 0,8
	geel	0,5 - 0,7
	blauw	0,9

Er is gekozen voor rode bakstenen met een absorptie coëfficiënt van 0,7; omdat gebouwen vaak uit dit soort bouw materiaal bestaan.

- Voor $A_{d,o}$ zijn de afmetingen van de gevel berekend:

$$A_{gevel} - A_{raam} = 2,7 \cdot 3,6 - (1,30 \cdot 1,15 \cdot 2) = 6,73 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Voor q_{zt} moet eerst de gebouw categorie worden bepaald, hierbij is uitgegaan van een gemiddelde categorie, categorie II (tabel V-0-6).

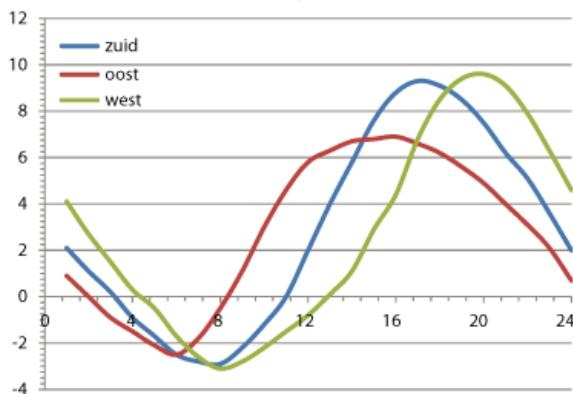
Tabel V-0-6 Bepalen gebouw categorie [19]

Buitenblad	Binnenblad	Categorie
Metselbaksteen/ beton (<12 cm)	plaatmateriaal	II
Plaatmateriaal/glas	diverse soorten licht beton (max 150 kg/m ²)	

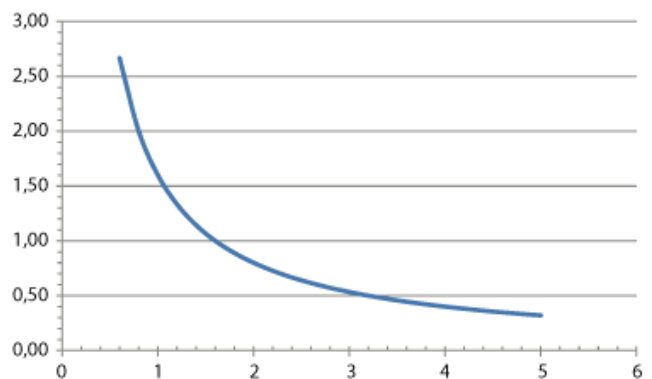
Na de keuze van de categorie wordt in *figuur V-0-6* de waarde voor q_{zt} uitgelezen voor een zuidelijke oriëntatie op een tijdstip van 13.00, omdat dan de zon het hoogste staat. De waarde van q_{zt} is hier 4.

- de C iso waarde, wordt bepaald aan de hand van een Rc-waarde (isolatiewaarde) van 4,5 [m²K/W] (*figuur V-0-7*). Dit is een minimale isolatiewaarde voor buitenwanden volgens het bouwbesluit artikel 5.3.

De C iso waarde is 0,35



Figuur V-0-6 q_{zt} bepalen [19]



Figuur V-0-7 C iso bepalen [19]

- De uiteindelijke waarden voor Φ_{zt} voor beide situaties is 6,60 [W]

Φ_{tg} (transmissie door glasvlakken)

De koellast door transmissie door glasvlakken, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{tg} = U_r \cdot A_r \cdot (T_{bu} - T_{bi}) \quad (13)$$

Waarin:

U_r	=	U-waarde van het raam	[W/(m ² ·K)]
A_r	=	oppervlakte van het raamsysteem (incl. kozijn)	[m ²]
T_{bu}	=	momentane buitentemperatuur	[°C]
T_{bi}	=	vertrekluchttemperatuur	[°C]

Voor de U-waarde van het kozijn is 3,8 [W/m²/K] aangenomen, metalen kozijnen met thermische onderbreking, omdat deze in het kantoor van Verkade Klimaat ook worden gebruikt.

De U-waarde van het glas is 3,1 [W/m²/K] bij bestaande gebouwen en 1,6 [W/m²/K] bij nieuwe gebouwen (zie berekening Φ_{zg} , g-waarde).

Dit geeft U-waardes voor bestaande gebouwen van 3,45 [W/m²/K] (geschat) en 2,5 [W/m²/K] voor nieuwe gebouwen (zie tabel V-0-7).

Tabel V-0-7 Bepalen U-waarde ramen [19]

	U _{glas}	Kozijn, met U _{kozijn} [W/(m ² ·K)]							
		1,0	1,4	1,8	2,4 ¹⁾	2,8	3,2	3,8 ²⁾	7,0 ³⁾
Enkel glas	5,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	6,2
Meervoudig glas	3,3	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,4	3,6	4,6
	3,2 dubbel glas	2,9	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	4,5
	1,8 HR-glas	1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	3,6
	1,6	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	3,4

1) Voor een kozijn van hout of kunststof: U_{kozijn} = 2,4 W/(m²·K).
2) Voor een metalen kozijn met thermische onderbreking als forfaitaire waarde: U_{kozijn} = 3,8 W/(m²·K).
3) Voor metalen kozijn zonder (voldoende) thermische onderbreking: U_{kozijn} = 7,0 W/(m²·K).

- Het oppervlakte van het raam is $1,30 \cdot 1,15 \cdot 2 = 2,99$ [m²]

- Voor de binnentemperatuur is 24 [°C] gekozen, voor de buitentemperatuur is 30 [°C] gekozen.

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{tg} :

Bestaand gebouw:	61,89 [W]
Nieuw gebouw:	44,85 [W]

Φ_{fi} (infiltratie van buitenlucht)

De koellast door infiltratie van buitenlucht, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{fi} = q_{vi} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{bu} - T_{bi}) \quad (14)$$

Waarin:

q _{vi}	=	luchtdebiet buitenluchttoetreding door infiltratie	[m ³ /s]
ρ	=	dichtheid van lucht	[kg/m ³]
c	=	soortelijke warmte van lucht	[J/(kg·K)]
T _{bu}	=	momentane buitentemperatuur	[°C]
T _{bi}	=	vertrekluchttemperatuur	[°C]

- Om q_{vi} te berekenen wordt de volgende formule gebruikt: $q_{vi} = q_i \cdot A_b$

Het oppervlakte van de gevel is: $3,6 \cdot 2,7 = 9,72$ [m²]

Om q_i te berekenen moet eerst q_{v,10,kar} (karakteristieke luchtdoorlatendheid) worden bepaald aan de hand van tabel V-0-8.

Tabel V-0-8 Bepalen q_{v,10,kar} [19]

Omschrijving	q _{v,10,kar}
U-bouw voldoet aan bouwbesluit met veel kleine kamers langs gang Woning voldoet aan Bouwbesluit en overige ventilatiesystemen	0,5

Met een q_{v,10,kar} van 0,5 wordt met tabel V-0-9 'q_i' berekend.

Tabel V-0-9 Bepalen q_i [19]

$q_{v,10,kar}$	Infiltratie per m ² geveloppervlak gebouwhoogte				
	6 m	9 m	15 m	20 m	≥ 30 m
≤ 0,2	$10 \cdot 10^{-5}$	$13 \cdot 10^{-5}$	$17 \cdot 10^{-5}$	$19 \cdot 10^{-5}$	$23 \cdot 10^{-5}$
0,2 tot 0,4	$15 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$25 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-5}$	$34 \cdot 10^{-5}$
0,4 tot 0,6	$25 \cdot 10^{-5}$	$33 \cdot 10^{-5}$	$40 \cdot 10^{-5}$	$47 \cdot 10^{-5}$	$55 \cdot 10^{-5}$

q_i (infiltratie per m²) is $25 \cdot 10^{-5}$. q_{vi} wordt hierdoor: $25 \cdot 10^{-5} \cdot 9,72 = 2,43 \cdot 10^{-3}$ [m³/s]

- ρ van de lucht is 1,20 [kg/m³]

- c van lucht is $1,007 \cdot 10^3$ [J/kg.K]

- Voor de binnentemperatuur is 24 [°C] gekozen, voor de buitentemperatuur is 30 [°C] gekozen.

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{fi} :
Bestaand gebouw: 17,62 [W]
Nieuw gebouw: 17,62 [W]

Φ_{fv} (ventilatie van buitenlucht)

De koellast door ventilatie van buitenlucht, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{fv} = q_{vv} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{bu} - T_{bi}) \quad (15)$$

Waarin:

q_{vv}	=	luchtdebiet door buitenluchttoetreding door ventilatie	[m ³ /s]
ρ	=	dichtheid van lucht	[kg/m ³]
c	=	soortelijke warmte van lucht	[J/(kg.K)]
T_{bu}	=	momentane buitentemperatuur	[°C]
T_{bi}	=	vertrekluchttemperatuur	[°C]

- q_{vv} is de minimale hoeveelheid verse lucht die vanuit buiten moet worden aangezogen. Volgens het bouwbesluit is dit 0,0065 [m³/s] per persoon. Voor twee personen is dit dus 0,013 [m³/s].

- ρ van de lucht is 1,20 [kg/m³]

- c van lucht is $1,007 \cdot 10^3$ [J/kg.K]

- Voor de binnentemperatuur is 24 [°C] gekozen, voor de buitentemperatuur is 30 [°C] gekozen.

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{fv} :
Bestaand gebouw : 94,26 [W]
Nieuw gebouw: 94,26 [W]

Interne voelbare componenten

Interne koellast wordt veroorzaakt door warmte die binnenin het vertrek wordt gegenereerd. Hieronder is weergegeven hoe deze interne koellast wordt berekend.

Φ_l (warmteafgifte door verlichting)

De koellast door verlichtingswarmte, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_l = Pl \cdot L1 \cdot (CF1' + ((1 - CF1) \cdot Slv)) \quad (16)$$

Waarin:

Pl	=	geïnstalleerd verlichtingsvermogen	[W]
L1	=	reductiefactor	[-]
CF1	=	convectiefactor	[-]
CF1'	=	convectiefactor, tijdens branduren CF1'=CF1, buiten branduren CF1'=0[-]	
Slv	=	accumulatiefactor van vertrek	[-]

- Voor Pl, het aansluitvermogen van de verlichting, is uitgegaan van 4 TL-balken van 36 [W] per stuk.
Dit komt neer op een aansluitvermogen van 144 [W].

- Reductiefactor, L1, is gelijk aan '1' omdat de armaturen niet worden afgezogen.

- Convectiewaarde, CF 1, is bepaald aan de hand van *tabel V-0-10*.

Tabel V-0-10 Bepalen CF1 waarde [19]

Armatuurtype		CF1
Met luchtafzuiging		0,2
Zonder luchtafzuiging	Inbouwarmatuur	0,3
	Opbouwarmatuur	0,4
	Vrij hangend	0,5

De verlichting is een inbouwarmatuur zonder luchtafzuiging, waardoor CF1 een waarde van '0,3' heeft. Voor CF1' is de waarde ook '0,3' omdat tijdens branduren geldt: CF1'=CF.

- De Slv waarde is bepaald aan de hand van *tabel V-0-11* bij tijdstip 13.00 uur, SWM 90 [kg/m²] voor nieuwe gebouwen en SWM 100 [kg/m²] voor bestaande gebouwen.

De waarde Slv is 0,64 voor nieuwe gebouwen en 0,62 voor oude gebouwen.

Tabel V-0-11 Bepalen Slv [19]

Tijdstip	SWM					
	30	55	65	75	90	100
11:00	0,72	0,67	0,64	0,62	0,58	0,56
12:00	0,75	0,70	0,67	0,65	0,61	0,59
13:00	0,77	0,72	0,69	0,67	0,64	0,62

- De uiteindelijke waarde voor Φ_l :

Bestaand gebouw :	105,70 [W]
Nieuw gebouw :	107,71 [W]

Φ_p (warmteafgifte door personen)

De koellast door personen, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_p = n \cdot c_k \cdot P_p \quad (17)$$

Waarin:

n	=	aantal personen in het vertrek	[-]
c _k	=	correctiefactor voor afwijkende kleding	[-]
P _p	=	voelbare warmteafgifte van personen	[W]

- n, het aantal personen, is aangenomen op 2 personen.
- c_k, correctiefactor, bepaalde met behulp van tabel V-0-12 aan de hand van lichte werkkleding.
- De c_k-waarde is 1,1.

Tabel V-0-12 Bepalen correctiefactor [19]

Kleding	c _k [-]
Zomerkleding (clo 0,3-0,5)	1
Lichte werkkleding (clo 0,5 - 0,7)	1,1
Zware werkkleding (clo > 0,7)	1,15

- P_p, het vermogen dat een persoon afgeeft, is met behulp van tabel V-0-13 bepaald en is 100 [W].

Tabel V-0-13 Bepalen vermogen persoon [19]

Activiteit	P _p [W]
Rustig zitten, lezen	80
Zittend, algemeen kantoorwerk	100
Staand, algemeen laboratoriumwerk	110

- De uiteindelijke waarde voor Φ_p voor beide situaties is 220 [W].

Φ_m (warmteafgifte door machines)

De koellast door machines, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_m = N \cdot m_1 \cdot m_2 \quad (18)$$

Waarin:

N	=	het nominale aansluitvermogen	[W]
m ₁	=	de benuttingsfactor	[-]
m ₂	=	de gelijktijdigheidsfactor	[-]

- Het aansluitvermogen van de apparaten is bepaald aan de hand van 2 personen die beide 1 PC, 2 beeldschermen en 1 telefoon adapter hebben (tabel V-0-14).

Het totale aansluitvermogen is 520 [W].

- voor m₁ en m₂, benuttingsfactor en gelijktijdigheidsfactor, is voor beide 0,7 aangenomen.

- De uiteindelijke waarde voor Φ_m voor beide situaties is 254,8 [W].

Tabel V-0-14 Bepalen vermogen apparaten [19]

Omschrijving	Vermogen [W]
PC	200
Vlak beeldscherm 17"	25
Vlak beeldscherm 19"	30
Adapter telefoon etc.	10
1) Gemiddeld zijn printers minder dan 5% van de tijd in bedrijf.	

Latente koellast

Latente koellast bestaat uit de energie die nodig is om de lucht in een gebouw te ontvochtigen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de luchtvochtigheid buiten. Hieronder is weergegeven hoe deze latente koellast wordt berekend.

$\Phi_{f,lat}$ (Latente koellast door infiltratie)

De latente koellast door infiltratie, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{f,lat} = q_{vi} \cdot 2500 \cdot (X_e - X_i) \quad (19)$$

Waarin:

q_{vi}	=	luchtdebiet door infiltratie	[m ³ /s]
X_e	=	absolute vochtigheid buitenlucht	[g/kg]
X_i	=	absolute vochtigheid van de vertrek lucht	[g/kg]

- q_{vi} is $2,43 \cdot 10^{-3}$ [m³/s] (zie Φ_{fi})

- x_e is bepaald met behulp van *tabel V-0-15*, waarbij is uitgegaan van de hoogste absolute luchtvochtigheid om 13.00 uur. x_e is hier dus 10,9 [g/kg].

- Voor x_i is uitgegaan van 6,0 [g/kg] wat gebruikelijk volgens 'ISSO publicatie, kleintje koellast'.

- De uiteindelijke waarde voor $\Phi_{f,lat}$ voor beide situaties is 29,77 [W].

Tabel V-0-15 Bepalen x_e [19]

Uur	Maand				
	Mei	Juni	Juli	Aug.	Sept.
12	6,6	8,2	8	10,4	10,6
13	6,6	8,4	8,3	10,2	10,9
14	6,7	8,5	8,3	10,4	9,6

$\Phi_{p,lat}$ (Latente koellast door personen)

De latente koellast door personen, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{p,lat} = \Phi_{p,lat \text{ per persoon}} \cdot n_p \quad (20)$$

Waarin:

$\Phi_{p,lat \text{ per persoon}}$	=	latente koellast per persoon	[W]
n_p	=	aantal personen	[-]

- $\Phi_{p,lat \text{ per persoon}}$ is bepaald met *tabel V-0-16*

$\Phi_{p,lat \text{ per persoon}}$ is 40 [W].

- n_p , het aantal personen, is 2.

- De uiteindelijke waarde voor $\Phi_{f,lat}$ voor beide situaties is 80 [W].

Tabel V-0-16 Bepalen $\Phi_{p,lat}$ per persoon [19]

Activiteit	$\Phi_{p,lat}$ [W]
Rustig zitten, lezen	20
Zittend, algemeen kantoorwerk	40
Staand, algemeen laboratoriumwerk	60

Vermindering koellast door toegelaten stijging luchttemperatuur

De vermindering van de koellast door een toegelaten temperatuurstijging geldt alleen voor de situatie met een buitentemperatuur >28 [°C], omdat alleen in deze extreme situatie een tijdelijke temperatuur stijging toegelaten is. Deze temperatuur stijging is 1 [°C], omdat dit nog binnen de thermische behaaglijkheid van *bijlage III* valt. Hieronder staat hoe deze vermindering wordt berekend.

$\Phi_{vv,acc}$ (extra warmteaccumulatie in wanden)

De koellastvermindering door extra warmteaccumulatie in wanden, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{vv, acc} = \left(1,12 + 0,55 \cdot \frac{SWM}{100}\right) \cdot A_v \cdot \Delta T_{max} \quad (21)$$

Waarin:

SWM	=	specifiek werkzame massa	[kg/m ²]
A _v	=	totale van binnenuit zichtbare oppervlakte (incl. ramen en deuren)	[m ²]
ΔT max	=	maximaal toegestane temperatuurstijging	[K]

- De SWM waarden voor bestaande gebouwen is 100 [kg/m²] en 90 [kg/m²] voor nieuwe gebouwen (zie **SWM waarde**).

- A_v, het van binnenuit zichtbare oppervlakte, is als volgt berekend:

$$A_v = (2,7 \cdot 5,4 \cdot 2) + (2,7 \cdot 3,6 \cdot 2) + (3,6 \cdot 5,4 \cdot 2) = 87,88 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Voor ΔT_{max} is gekozen voor een stijging van 1 [°C].

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{vv,acc}: Bestaand gebouw (T_{max}.): 146,76 [W]
Nieuw gebouw (T_{max}.): 141,93 [W]

$\Phi_{vv,t}$ (geringere warmtetransmissie door ramen)

De koellastvermindering door geringere warmtetransmissie door ramen, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{vv, t} = U_r \cdot A_r \cdot \Delta T_{max} \quad (22)$$

Waarin:

U _r	=	U-waarde van het raam	[W/(m ² ·K)]
A _r	=	oppervlakte van het raamsysteem (incl. kozijn)	[m ²]
ΔT max	=	maximaal toegestane temperatuurstijging	[K]

- Voor ΔT_{max} is gekozen voor een stijging van 1 [°C].

- U-waardes voor bestaande gebouwen van 3,45 [W/m²K] (geschat) en 2,5 [W/m²K] voor nieuwe gebouwen. (zie **Φ_{tq}**)

- A_r, het oppervlakte van de vensters is 2,99 [m²] (zie **Φ_{tq}**)

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{vv,t}: Bestaand gebouw (T_{max}.): 10,32 [W]
Nieuw gebouw (T_{max}.): 7,48 [W]

$\Phi_{vv,f}$ (geringere warmtetoevoer door infiltratie en ventilatie)

De koellastvermindering door geringere warmtetoevoer door infiltratie en ventilatie, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{vv,f} = 1200 \cdot (q_{vi} + q_{vv}) \cdot \Delta T_{max} \quad (23)$$

Waarin:

q_{vv} = luchtdebiet door buitenluchtttoetreding infiltratie [m³/s]

q_{vi} = luchtdebiet door buitenluchtttoetreding ventilatie [m³/s]

ΔT_{max} = maximaal toegestane temperatuurstijging [K]

- Voor ΔT_{max} is gekozen voor stijging van 1 [°C].

- q_v bestaat uit q_{vv} en q_{vi} (zie Φ_{fv} & Φ_{fi}). q_v is $1,54 \cdot 10^{-2}$ [m³/s].

- De uiteindelijke waarde voor $\Phi_{vv,f}$: Bestaand & nieuw gebouw (T_{max}): 18,65 [W]

VI. WARMTEVERLIESBEREKENINGEN

Hieronder is uitgelegd welke waardes voor de berekening van het warmteverlies zijn gehanteerd en waarom deze waardes zijn gekozen. Het warmteverlies voor een bestaand gebouw en een nieuw gebouw zijn berekend. Ook is het gemiddelde en het maximale warmteverlies berekend voor beide gebouwen. De verschillende componenten zijn hieronder één voor één behandeld met de waardes voor beide situaties. Alle gebruikte tabellen zijn uit de 'ISSO publicatie 53' gehaald. [19]

Het totale warmteverlies is volgens deze formule berekend: $\Phi_{\text{tot}} = \Phi_t + \Phi_v + \Phi_o$

Warmteverlies door transmissie

Het transmissiewarmteverlies is de som van alle warmtestromen door vlakken die de ruimte begrenzen.

Het transmissieverlies voor een ruimte volgt uit:

$$\Phi_t = (H_{t,ie} + H_{t,ia} + H_{t,io} + H_{t,ib} + H_{t,ig}) \cdot (T_{bi} - T_{bu}) \quad (24)$$

Hieronder wordt beschreven hoe deze verschillende elementen worden berekend.

H_{t,ie} (specifiek warmteverlies naar de buitenlucht)

Het specifieke warmteverlies door uitwendige scheidingsconstructies, wordt als volgt berekend:

$$H_{t,ie} = \sum k (A_k \cdot f_k \cdot (U_k + 0,1)) \quad (25)$$

Waarin:

A _k	=	oppervlakte van vlak k	[m ²]
U _k	=	warmtedoorgangscoefficiënt van vlak k	[W/(m ² ·K)]
f _k	=	correctiefactor voor de invloed van de temperatuurgradiënt	[-]
0,1	=	forfaitaire toeslag voor lineaire thermische bruggen	[-]

- A_k, het oppervlakte van de ramen is 2,99 [m²](zie Φ_{tg}) en van de buitenwand (3,6 · 2,7) – 2,99 = 6,73 [m²]

- f_k, de correctiefactor is '1', omdat dit geldt voor buitenwanden en ramen volgens de ISSO publicatie [19].

- U_k-waarde van een raam is 2,5 [W/m²K] voor nieuwe gebouwen en 3,45 [W/m²K] voor bestaande gebouwen (zie Φ_{tg}). De U_k-waarde van de buitenwand is bepaald aan de hand van een oude warmteverliesberekening verkregen vanuit Verkade Klimaat B.V. Aan de hand van deze oude warmteverliesberekening is ook de U_k-waarde van de binnenwand, de vloer begane grond, en de tussenvloer tevens plafond bepaald. In *figuur VI-0-8* staan deze U_k-waarden weergegeven.

Nr. Omschrijving	Srt vlak	Zit in	Ori ling	Hel temp	Agrenz	Lengte /opp	Brdte/ hoogte	Aftrek opp	Prd nr	Massa	U *
				[gr]	[grC]	[m,m2]	[m]	[m2]		[kg/m2]	[W/m2K]
1w Tu-wand	tw		305	90	zelfde	2.40	4.68	2.07	4	200.0	1.79
2w Binnendeur	deur	lw			zelfde	0.90	2.30		5		1.64
3w tu-wand zwaar	gw		35	90	26.0	5.25	4.68		11e	750.0	2.45
4w Bu-gevel	bw		125	90	buiten	2.40	4.68	1.49	1	81.9	0.27
5w Raam K-10 (zw)	raam	4w			buiten	2.30	0.65		2		1.80
6w Tu-wand	gw		215	90	26.0	5.25	4.68		4	200.0	2.86
1v Bg-vloer	vk				20.0	12.60			2	606.3	0.27
1p Tu-vloer	vp				zelfde	12.60			6	600.0	1.57

Figuur VI-0-8 Bepalen U-waarden [25]

De U-waarde voor de buitenwand is 0,27 [W/m²K].

- De uiteindelijke waarde voor Ht,ie: Bestaand gebouw: 13,10 [W/K]
Nieuw gebouw: 10,26 [W/K]

Ht,ia (specifiek warmteverlies naar andere verwarmde ruimten)

Het specifieke warmteverlies naar verwarmde ruimten, wordt als volgt berekend:

$$H_{t,ia} = \sum k (A_k \cdot U_k \cdot f_{iak}) \quad (26)$$

Waarin:

A_k = oppervlakte wand k [m²]
U_k = warmtedoorgangscoefficiënt van wand k [W/(m²·K)]
f_{iak} = correctiefactor voor aanpassing temperatuurverschil van ontwerpbuitentemperatuur en temperatuur beschouwde ruimte [-]

- A_k, voor binnenwanden is: (5,4 · 2,7 · 2) + (3,6 · 2,7) = 38,88 [m²]
A_k, voor plafonds is: 3,6 · 5,4 = 19,44 [m²].

- U_k is bepaald aan de hand van oude warmteverlies berekeningen (zie Ht,ie). De U_k-waarde van de binnenwanden is 1,79 [W/m²K] en de U_k-waarde van het plafond is 1,57 [W/m²K].

- De f_{iak}-waarde voor wanden wordt met de volgende formule berekend:
(T_{bi} - T_{aangr.ruimte})/(T_{bi} - T_{bu}) = (22-21)/(22 - -10) = 1/32

Voor plafonds wordt de f_{iak}-waarde met de volgende formule berekend:

$$((T_{bi} + \Delta T_1) - (T_{aangr.ruimte} + \Delta T_{a.2})) / (T_{bi} - T_{bu})$$

De waarde voor ΔT₁ en ΔT_{a.2} wordt gehaald uit tabel VI-0-17

Tabel VI-0-17 Bepalen ΔT₁ en ΔT_{a.2} [19]

Verwarmingssystemen	Δθ ₁ resp. Δθ _{a1} [K]	Δθ ₂ resp. Δθ _{a2} [K]	Δθ _v [K]
Lokale verwarming	+4	-1	0

De f_{iak}-waarde is dus: ((22 + 4) - (21 + -1)) / (22 - -10) = 6/32

- De uiteindelijke waarde voor Ht,ia voor beide situaties is 7,90 [W/K]

Ht,io (specifiek warmteverlies naar aangrenzende onverwarmde ruimten)

Omdat de kruipruimte in dit model beschouwd wordt als een onverwarmde ruimte, moet ook Ht,io worden berekend. Het specifieke warmteverlies door aangrenzende onverwarmde ruimten, wordt als volgt berekend:

$$H_{t,io} = \sum k (A_k \cdot U_k \cdot f_k) \quad (27)$$

Waarin:

A _k	=	oppervlakte wand k	[m ²]
U _k	=	warmtedoorgangscoefficiënt van wand k	[W/(m ² ·K)]
f _k	=	correctiefactor voor afwijkend temperatuurverschil van ontwerpbuitentemperatuur en temperatuur beschouwde ruimte	[-]

- A_k, oppervlakte in contact met de onverwarmde ruimte, is als volgt berekend: $5,4 \cdot 3,6 = 19,44 \text{ [m}^2\text{]}$

- U_k is bepaald aan de hand van oude warmteverlies berekeningen (zie Ht,ie). De U_k-waarde van de vloer van de begane grond is $0,27 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

- De f_k-waarde van vloeren wordt met de volgende formule berekend:

$$((T_{bi} + \Delta T_2) - T_{aangr.ruimte}) / (T_{bi} - T_{bu})$$

De waarde voor ΔT₂ wordt bepaald met tabel in Ht,ia en is '-1'. Voor 'T aangrenzend' is gekozen voor 10 [°C].

$$\text{De } f_k \text{ waarde is dus: } ((22 + -1) - 10) / (22 - -10) = 11/32$$

- De uiteindelijke waarde voor Ht,ia voor beide situaties is $1,80 \text{ [W/K]}$

Ht,ib (specifiek warmteverlies naar een aangrenzend gebouw)

Het specifieke warmteverlies naar aangrenzende gebouwen is in dit model niet aanwezig, omdat de ruimte in dit model tussen andere kantoren ligt en dus niet aan een ander gebouw grenst.

Ht,ig (specifiek warmteverlies naar de grond)

Het specifieke warmteverlies van scheidingsconstructies die grenzen aan de grond zijn in dit model ook niet aanwezig, omdat in dit model zich onder de vloer nog een kruipruimte bevindt die als aangrenzende onverwarmde ruimte wordt beschouwd.

Het transmissieverlies voor de 4 verschillende situaties is hieronder weergegeven:

Formule: $\Phi_t = (H_{t,ie} + H_{t,ia} + H_{t,io} + H_{t,ib} + H_{t,ig}) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W}]$

Bestaand gebouw T_{max}: $\Phi_t = (13,10 + 7,90 + 1,80 + 0 + 0) \cdot (22 - -10) = 729,80 \text{ [W]}$

Nieuw gebouw T_{max}: $\Phi_t = (10,26 + 7,90 + 1,80 + 0 + 0) \cdot (22 - -10) = 638,91 \text{ [W]}$

Φ_v (warmteverlies door buitenluchttotetreding)

Het warmteverlies door buitenluchttotetreding gebeurt via infiltratie en ventilatie. Hieronder is weergegeven hoe dit is berekend.

Φ_{vent} (warmteverlies door ventilatie)

Het warmteverlies door ventilatie, wordt als volgt berekend:

$$\Phi_{vent} = H_v \cdot (T_{bi} - T_{bu}) \quad (28)$$

Waarin:

H_v	=	specifiek warmteverlies ten gevolge van ventilatie	[W/K]
T_{bi}	=	ontwerpbinrentemperatuur	[°C]
T_{bu}	=	ontwerpbuientemperatuur (-10 [°C])	[°C]

- H_v is te berekenen met $H_v = q_{vv} \cdot 1200 \cdot f_v$

q_{vv} is de minimale hoeveelheid verse lucht die vanuit buiten moet worden aangezogen. Volgens het bouwbesluit is dit 0,0065 [m³/s] per persoon. Voor twee personen is dit dus 0,013 [m³/s].

f_v wordt als volgt berekend: $(T_{bi} + \Delta T_v - T_{bu}) / (T_{bi} - T_{bu})$

De waarde voor ΔT_v wordt bepaald met tabel in **Ht,ia** en is '0'.

De f_v waarde is dus: $(22 + 0 - (-10)) / (22 - (-10)) = 32/32 = 1$

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{vent} : Bestaand en nieuw gebouw: 499,20 [W]

Φ_i (warmteverlies door infiltratie)

Het warmteverlies door infiltratie is in dit model niet van toepassing, omdat de 'ISSO-publicatie' voorschrijft: "Bij mechanische toevoer en afvoer wordt ervan uit gegaan dat er voldoende verse lucht binnenkomt om aan de gezondheidseisen te voldoen. Hier is moeilijk onderscheid te maken tussen lucht die door ondichtheden infiltreert en lucht die door roosters toetreedt. Daarom wordt alle luchttoetreding aan ventilatie toegerekend. Φ_i is daarom gelijk aan 0".

In dit model is mechanische ventilatie van toepassing, waardoor er geen warmteverlies door infiltratie wordt meegenomen.

Φ_{op} (in rekening brengen warmtetoeslag voor bedrijfsbeperking)

Om rekening te houden met warmtetoeslag bij kantoren die per ruimte geregeld zijn, wordt de volgende formule gehanteerd:

$$\Phi_{op} = P \cdot A_a \quad (29)$$

Waarin:

P	=	specifieke toeslag voor bedrijfsbeperking	[W/m ²]
A_a	=	accumulerend oppervlak	[m ²]

- Om P , de specifieke toeslag, uit te rekenen moet eerst de afkoeling van het gebouw worden berekend:

Afkoeling van het gebouw: $\Delta T = (T_{bi} - T_{bu}) - ((T_{bi} - T_{bu}) \cdot e^{(-t/T)})$

Voor de afkoeltijd van het gebouw, t , wordt de langste afkoeltijd genomen, wat in het weekend is.

De afkoeltijd in het weekend is: 24 + 24 + 12 = 70 uur.

Tijdconstante, T, wordt als volgt berekend: $T = CT / Ht$

CT, de warmte inhoud van een constructiedeel, wordt als volgt berekend:

$CT = (0,7 \cdot (d_i \cdot A_i \cdot \rho \cdot c_p))$ voor inwendige constructies en $(0,5 \cdot (d_u \cdot A_u \cdot \rho \cdot c_p))$ voor uitwendige constructies.

De dichtheid, ρ , voor buitenwanden en vloeren in de begane grond is bepaald op $2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ en voor binnenwand plafonds $1300 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ aan de hand van 'ISSO Publicatie 6' [19]

De soortelijke warmte van beton, c, is $0,85 \text{ [J/kg.K]}$

De thermisch effectieve dikte, d_i & d_u , van een wand is maximaal $0,06 \text{ [m]}$ volgens 'ISSO publicatie 53'[19].

CT binnenwand =	$0,7 \cdot (0,06 \cdot 38,88 \cdot 1300 \cdot 0,85) =$	1804,42	[J/K]
CT buitenwand =	$0,5 \cdot (0,06 \cdot 6,97 \cdot 2500 \cdot 0,85) =$	444,34	[J/K]
CT plafond =	$0,7 \cdot (0,06 \cdot 19,44 \cdot 1300 \cdot 0,85) =$	902,21	[J/K]
CT vloer begane grond =	$0,7 \cdot (0,06 \cdot 19,44 \cdot 2500 \cdot 0,85) =$	1735,02	[J/K]
CT totaal =	$1804,42 + 444,34 + 902,21 + 1735,02 =$	4885,99	[J/K]

Ht, de warmteweerstand van een gebouw, wordt als volgt berekend:

$$Ht = Ht_{ie} + Ht_{ib} + Ht_{io} + Ht_{ig} + H_i$$

$$Ht \text{ bestaand gebouw (Tmax)} = 13,10 + 0 + 1,80 + 0 + 0 = 14,91 \text{ [W/K]}$$

$$Ht \text{ nieuw gebouw (Tmax)} = 10,26 + 0 + 1,80 + 0 + 0 = 12,06 \text{ [W/K]}$$

Nu kan de tijdsconstante worden uitgerekend: $T = CT / Ht$

$$T \text{ bestaand gebouw (Tmax)} = 4885,99 / 14,91 = 327,72 \text{ [s]}$$

$$T \text{ nieuw gebouw (Tmax)} = 4885,99 / 12,06 = 404,86 \text{ [s]}$$

Nu kan de afkoeling worden berekend: $\Delta T = (T_{bi} - T_{bu}) - ((T_{bi} - T_{bu}) \cdot e^{(-t/T)})$

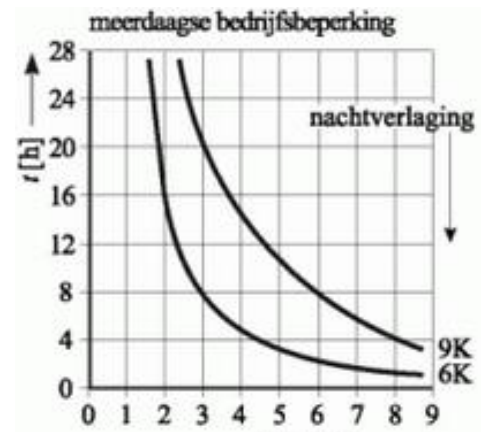
$$\Delta T \text{ bestaand gebouw (Tmax)} = (22 - -10) - ((22 - -10) \cdot e^{(-70/327,72)}) = 6,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T \text{ nieuw gebouw (Tmax)} = (22 - -10) - ((22 - -10) \cdot e^{(-70/404,86)}) = 5,08 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Nu de afkoeling (ΔT) duidelijk is, kan in *figuur VI-0-9* worden bepaald wat P, de specifieke toeslag, is. Bij een opwarmtijd, t, van 4 uur is de P voor de verschillende situaties:

$$P_{\text{bestaand gebouw (Tmax)}} = 4,5 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$P_{\text{nieuw gebouw (Tmax)}} = 3,3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$



- Aa is te berekenen met de volgende formule: $Aa = f_a \cdot Ak$

Figuur VI-0-9 Specifieke toeslag bij opwarmtijd (t) [19]

f_a is '0,7' bij vloeren op de begane grond en buitenwanden, en '1' bij binnenwanden en plafonds.

$$Ak_{\text{voor binnenwanden is:}} (2 \cdot 2,7 \cdot 5,4) + (3,6 \cdot 2,7) = 38,88 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Ak_{\text{voor vloer is:}} (5,4 \cdot 3,6) = 19,44 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Ak_{\text{voor plafond is:}} (5,4 \cdot 3,6) = 19,44 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Ak_{\text{voor buitenwanden is:}} (2,7 \cdot 3,6) = 9,72 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Aa_{\text{totaal}} = (38,88 \cdot 1) + (19,44 \cdot 0,7) + (19,44 \cdot 1) + (9,72 \cdot 0,7) = 78,73 \text{ [m}^2\text{]}$$

- De uiteindelijke waarde voor Φ_{op} :

<u>Bestaand gebouw (Tmax):</u>	<u>354,29 [W]</u>
<u>Nieuw gebouw (Tmax):</u>	<u>259,82 [W]</u>

VII. DRUKVERLIESBEREKENINGEN

Om het vermogen van de ventilator te bepalen, moet er eerst worden berekend hoeveel drukverlies er in de toepassing optreedt. Het totale drukverlies in de toepassing is te berekenen met de volgende formule:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_k + \Delta P_b + \Delta P_o \quad (30)$$

Waarin:

ΔP_k	=	Kanaalweerstand	[Pa]
ΔP_b	=	Weerstand van de bochten	[Pa]
ΔP_o	=	Weerstand van overige componenten	[Pa]

Deze drukverliezen kunnen berekenen met de volgende formule:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (31)$$

Waarin:

ζ	=	Weerstandscoefficiënt zeta	[-]
ρ	=	Dichtheid van het medium	[kg/m ³]
v^2	=	Lichtsnelheid	[m/s]

Achtereenvolgens worden van de volgende onderdelen het drukverlies berekend:

- Luchtkanalen
- Bochten
- Warmtewisselaar
- LuchtfILTER
- PCM

Drukverlies rechte luchtkanalen & bochten in luchtkanalen

Om het drukverlies in bochten en rechte delen van luchtkanalen uit te rekenen, kan er gebruik worden gemaakt van de formules uit 'ISSO publicatie 17' [19]. Voor dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van de 'Slide chart for air duct calculation' van Weger air solutions [26]. Dit is een tool die gemakkelijk bepaald wat het drukverlies is in rechte luchtkanalen bochten en veranderingen van diameters van luchtkanalen. In deze tools worden dezelfde formules gebruikt als de formules in 'ISSO publicatie 17' [19]. Bij deze tool moeten de volgende gegevens vooraf bepaald worden:

- Lichtsnelheid in het luchtkanaal (*hoofdstuk 5.2*) [m/s]
 - Groot luchtkanaal: 1,05 [m/s]
 - Klein luchtkanaal: 1,55 [m/s]
- Hydraulische diameter [cm]

$$D_{hy} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} \quad (32)$$

Waarin:

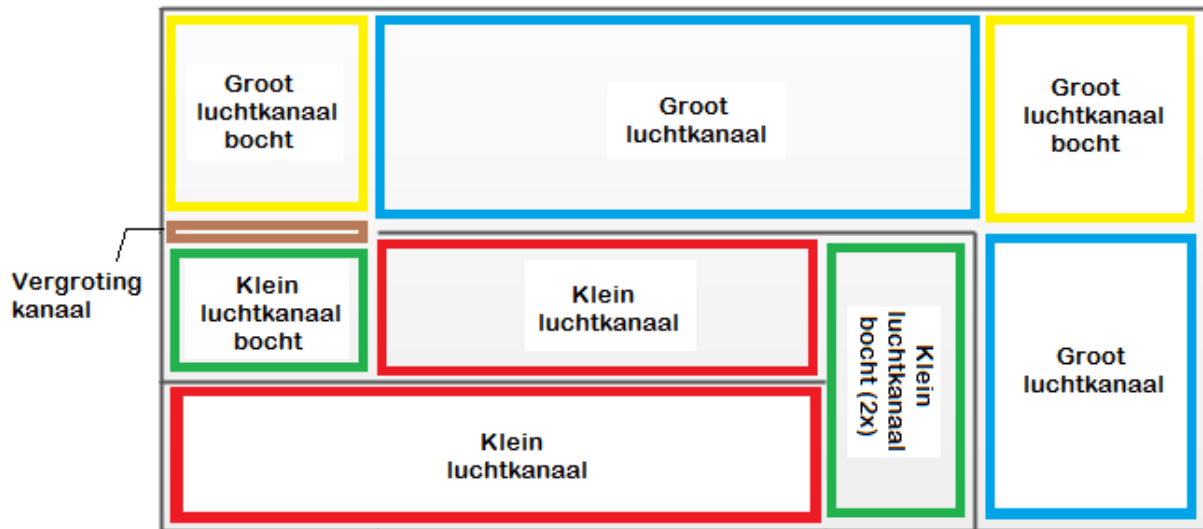
b = Breedte luchtkanaal

h = Hoogte luchtkanaal

- Groot luchtkanaal: $(2 \cdot 25,5 \cdot 32,6) / (25,5 + 32,6) = 28,62$ [cm]
- Klein luchtkanaal: $(2 \cdot 25,5 \cdot 22,0) / (25,5 + 22,0) = 23,60$ [cm]

- Lengte van de rechte luchtkanalen (*hoofdstuk 5.2*) [m]
 - Groot luchtkanaal: $0,82 + 0,44 = 1,26$ [m]
 - Klein luchtkanaal: $0,926 + 0,60 = 1,526$ [m]

Aan de hand van *figuur VII-0-10* wordt uitgelegd welke weerstanden er zijn.



Figuur VII - 0-10 Overzicht weerstanden in luchtkanalen

Het drukverlies in de rechte luchtkanalen wordt aan de hand van *figuur VII-0-11* bepaald.

Met deze tool van Weger air solutions [26] kan het drukverlies van rechte luchtkanalen gemakkelijk worden bepaald.



Figuur VII -0-11 Bepaling weerstand recht luchtkanaal (voorbeeld klein luchtkanaal) [26]

In deze tool moeten eerst de lichtsnelheid en de hydraulische diameter gelijk worden gezet. Daarna kan daaronder met dezelfde hydraulische diameter, het drukverlies per meter (R) [Pa/m] worden bepaald.

Drukverlies groot luchtkanaal: $R \cdot l \text{ kanaal} = 0,05 \cdot 1,26 = 0,063$ [Pa]

Drukverlies klein luchtkanaal: $R \cdot l \text{ kanaal} = 0,12 \cdot 1,526 = 0,183$ [Pa]

De toepassing heeft 5 bochten, in de bochten worden schoepen toegepast. In *tabel VII-0-18* wordt de weerstandscoefficiënt weergegeven. De weerstandscoefficiënt (ζ) voor bochten met 90° is 0,5.

Ook is er nog weerstandscoefficiënt voor een vergroting van het kanaal.

In *tabel VII-0-19* is weergegeven wat de weerstandscoefficiënt (ζ) is voor deze vergroting.

Tabel VII-0-18
Weerstandscoefficiënt bochten [26]

ζ - Coefficients Duct elbows		
	90°	45°
	1.25	0.4
	0.5	0.2
	0.5	0.2

Eerst moet de waarde voor A1 : A2 worden uitgerekend. De waarde hiervoor is: $0,056 : 0,083 = 0,67 \approx 0,6$. De weerstandscoefficiënt is dan 0,16

De totale weerstandscoefficiënt is: $2,5 + 0,16 = 2,66$.

Invullen van formule (31) geeft een drukverlies van:

$$\Delta P_b = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \left(1,66 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,20 \cdot 1,55^2\right) + \left(1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,20 \cdot 1,05^2\right) = 3,05 \text{ [Pa]}$$

Slide chart for air duct calculation

ζ - Coefficients Transformation pieces					
A1 : A2	0	0.2	0.4	0.6	0.8
1 2	1	0.64	0.36	0.16	0.04

Drukverlies warmtewisselaar

Het drukverlies in de warmtewisselaar is aangegeven bij de technische specificaties van de warmtewisselaar (*hoofdstuk 5.1.3*). Hier is weergegeven dat het drukverlies bij deze warmtewisselaar 42 [Pa] is bij een luchtdebiet van 355[m³/h].

Drukverlies luchtfilter

Het drukverlies in de luchtfilter is aangegeven in *figuur 5.8* in *hoofdstuk 5.5*. Hieruit kan worden afgelezen dat bij een filter F7 en een luchtdebiet van 315 [m³/h] het drukverlies ongeveer 40 [Pa] is.

Drukverlies PCM

Het drukverlies in het PCM wordt berekend volgens de formules uit het artikel over PCM [10].

Het drukverlies per PCM paneel wordt met de volgende formule berekend:

$$\Delta P_{pcm} = \rho_{lucht} \cdot (\zeta \cdot v_{in}^2 + \frac{23}{Re} \cdot \frac{b_p}{D_h} \cdot v v^2) \quad (33)$$

Waarin:

ρ_{lucht}	=	dichtheid van lucht	= 1,2	[kg/m ³]
ζ	=	weerstandcoëfficiënt Zeta	= 1,5	[-]
v_{in}	=	luchtsnelheid voor en na het PCM	= 1,55	[m/s]
Re	=	getal van Reynolds	= te bepalen	[-]
b_p	=	breedte PCM	= 0,198	[m]
D_h	=	hydraulische diameter	= 0,02	[m]
v_v	=	luchtsnelheid in de spleet	= te bepalen	[m/s]

Het getal van Reynolds wordt volgens het artikel op de volgende manier berekend:

$$Re = \frac{v v \cdot D_h}{u} \quad (34)$$

Waarin:

v_v	=	luchtsnelheid in de spleet	= te bepalen	[m/s]
D_h	=	hydraulische diameter	= 0,02	[m]
u	=	kinematische viscositeit lucht	= $15,9 \cdot 10^{-6}$	[m ² /s]

De luchtsnelheid in de spleet wordt volgens het artikel op de volgende manier berekend:

$$vv = \frac{Vv}{3600 \cdot dv \cdot lp} \quad (35)$$

Waarin:

Vv	=	Luchtdebiet per spleet/paneel	= te bepalen	[m ³ /h]
dv	=	afmetingen van de lichtspleet	= 0,01	[m]
lp	=	lengte PCM paneel	= 0,570	[m]

Om de luchtsnelheid [m/s] in de lichtspleet te berekenen, moet eerst het luchtdebiet per spleet [m³/h] worden uitgerekend. Het luchtdebiet per spleet wordt berekend door het totale luchtdebiet te delen door het aantal panelen. Het luchtdebiet per paneel is:

$$\text{Totale luchtdebiet} / \text{aantal panelen} = 315 / 10 = 31,5 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Aan de hand van dit gegeven kan formule (35) worden berekend. De luchtsnelheid in de spleet wordt:

$$vv = \frac{Vv}{3600 \cdot dv \cdot lp} = \frac{31,5}{3600 \cdot 0,01 \cdot 0,570} = 1,54 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Aan de hand van dit gegeven kan formule (34) worden berekend. Het getal van Reynolds is:

$$Re = \frac{vv \cdot Dh}{u} = \frac{1,54 \cdot 0,02}{15,9 \cdot 10^{-6}} = 1930,93 [-]$$

Met behulp van de gegevens uit formule (34) en (35) kan het drukverlies van één PCM paneel worden berekend met formule (33). Het drukverlies van één PCM paneel is:

$$\Delta P_{pcm} = \rho \cdot \left(\zeta \cdot v \text{ in}^2 + \frac{23}{Re} \cdot \frac{bp}{Dh} \cdot vv^2 \right) = 1,2 \left(1,5 \cdot 1,54^2 + \frac{23}{1930,93} \cdot \frac{0,198}{0,02} \cdot 1,54^2 \right) = 4,66 \text{ [Pa]}$$

Het drukverlies van één PCM paneel is 4,66 [Pa].

Het drukverlies voor 10 PCM panelen is dus 46,60 [Pa].

Het totale drukverlies in [Pa] is weergegeven in *tabel VII-0-20*:

Tabel VII-0-20 Totale drukverlies

ΔP_{totaal} (totale drukverlies)	$\Delta P_k + \Delta P_b + \Delta P_o$
ΔP_k (kanaalweerstand)	0,246
ΔP_b (weerstand in bochten)	3,05
ΔP_o (weerstand overige componenten)	126,6
dPo Warmtewisselaar	129,896

VIII. Φ NETTO COMPONENT IN DYNAMISCH MODEL

Hieronder is alle informatie weergegeven betreffende Φ netto in het dynamische model.

Aannames

Om het dynamische model zo simpel mogelijk te maken zijn er een aantal componenten verwaarloosd. Hier is uitgelegd waarom sommige componenten niet zijn meegenomen in het dynamische model.

- Φ_{zt} (belasting door zonnewarmte en transmissie via buitenwanden en daken) is niet meegenomen, omdat deze component verwaarloosbaar klein is in vergelijking met Φ_{zg} . Bijvoorbeeld bij een buitentemperatuur van 30 [°C] en een binnentemperatuur van 24 [°C] is voor een nieuw gebouw Φ_{zg} 430 [W] en Φ_{zt} 6,6 [W] (zie bijlage V: koellastberekening). Wel zal er met de transmissie via buitenwanden rekening worden gehouden via Φ_{tb} .
- Φ_{fi} (infiltratie buitenlucht) wordt niet meegenomen, omdat 'ISSO-publicatie 53' [19] voorschrijft: *"Bij mechanische toevoer en afvoer wordt ervan uit gegaan dat er voldoende verse lucht binnenkomt om aan de gezondheidseisen te voldoen. Hier is moeilijk onderscheid te maken tussen lucht die door ondichtheden infiltreert en lucht die door roosters toetreedt."* Om deze reden is ervoor gekozen geen rekening te houden met infiltratie van buitenlucht in dit dynamische model.
- $\Phi_{f,lat}$ (latente belasting door infiltratie) wordt niet meegenomen, omdat Φ_{fi} ook niet wordt meegenomen. De latente belasting door infiltratie zal daarom ook niet aanwezig zijn.
- Φ_v (energiestroom door buitenlucht toetreding) wordt niet meegenomen, omdat deze component al wordt meegenomen in Φ_{fv} van de dynamische berekening. Als deze component wel wordt meegenomen zal het dubbel worden gedaan.
- $H_{t,ia}$ & $H_{t,io}$ (specifieke energiestroom naar aangrenzende verwarmde en onverwarmde ruimten) worden in het dynamische model niet meegenomen, omdat er in dit versimpelde model wordt aangenomen dat de temperatuur van de aangrenzende ruimte dezelfde temperatuur hebben (dit in tegenstelling tot de statische berekening van het warmteverlies). Hierdoor zal er geen warmtestroming plaatsvinden tussen aangrenzende ruimten.
- $H_{t,ib}$ & $H_{t,ig}$ (specifiek energiestroom naar aangrenzend gebouw en naar de grond) worden niet meegenomen, omdat deze componenten in de statische berekening van het warmteverlies al niet meegenomen was.
- $H_{t,ie}$ ramen (specifieke energiestroom door naar de buitenlucht door ramen) wordt niet meegenomen, omdat hier al rekening mee wordt gehouden in Φ_{tg} .
- Φ_{op} (warmte toeslag door bedrijfsbeperking) wordt niet meegenomen in Φ netto. Wel wordt er in het model rekening gehouden met het opwarmen van de ruimte na nachtverlaging, door de warmtewisselaar 2 uur eerder aan te zetten om de ruimte weer op temperatuur te krijgen.

Componenten in dynamisch model

Hieronder is voor elk component van Φ netto dat wel wordt meegenomen, beschreven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

- Φ intern (interne warmteafgifte door personen, verlichting en machines)

De interne warmteafgifte wordt bepaald door personen, verlichting en machines. De formules en waarden hiervoor zijn dezelfde als die gebruikt zijn in *bijlage V*.

Hieronder zijn de verschillende formules weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

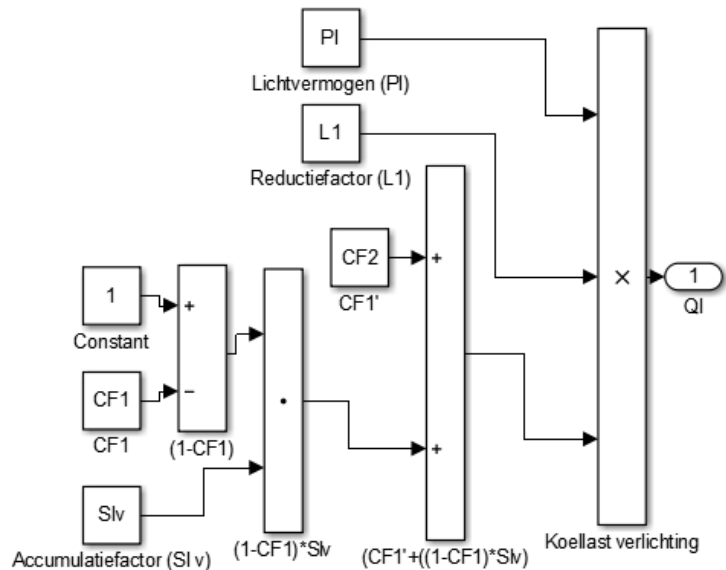
Interne warmte door verlichting:

$$\Phi_l = Pl \cdot L1 \cdot (CF1' + ((1 - CF1) \cdot Slv))$$

In *figuur VIII-0-12* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

Pl =	144	[W]
L1 =	1	[-]
CF1' =	0,3	[-]
CF1 =	0,3	[-]
Slv (nieuw) =	0,64	[-]
Slv (bestaand) =	0,62	[-]



Figuur VIII-0-12 Warmteafgifte verlichting in Simulink

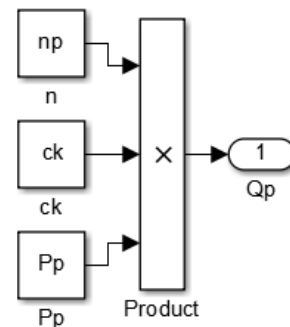
Interne warmte door personen:

$$\Phi_p = n \cdot ck \cdot Pp$$

In *figuur VIII-0-13* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

n =	2	[-]
ck =	1,1	[-]
Pp =	100	[W]



Figuur VIII-0-13 Warmteafgifte personen in Simulink

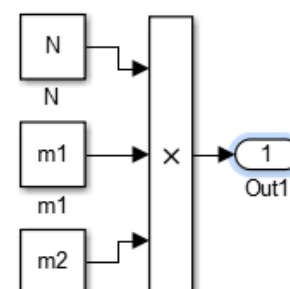
Interne warmte door machines:

$$\Phi_m = N \cdot m1 \cdot m2$$

In *figuur VIII-0-14* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

N =	520	[W]
m1 =	0,7	[-]
m2 =	0,7	[-]



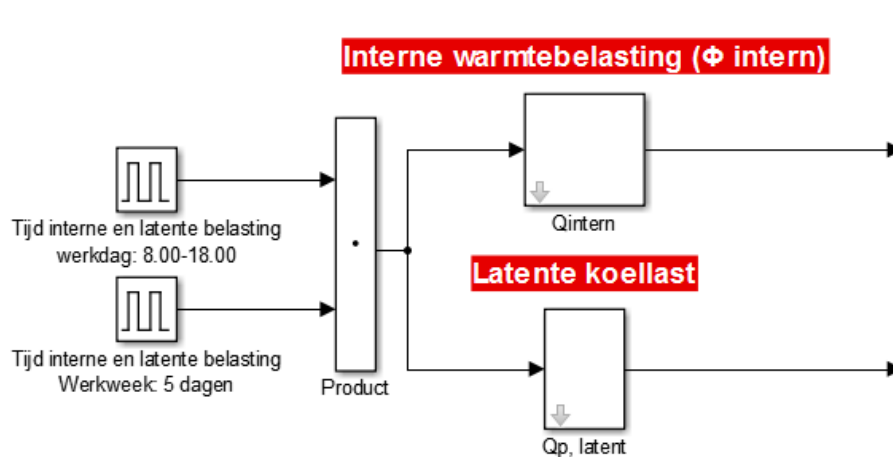
Figuur VIII-0-14 Warmteafgifte machines in Simulink

Al deze waarden bij elkaar worden vermenigvuldigd met de tijdbelasting. De tijdbelasting bepaald welke tijdspanne deze belasting van toepassing is. De interne belasting is er elke werkdag van 8.00 tot 18.00. In de nacht en in het weekend geldt deze belasting dus niet.

Dit wordt gesimuleerd met behulp van twee pulsgeneratoren. De eerste generator heeft een periode van 7 dagen, waarbij het de eerste 5 dagen aan staat. De tweede generator heeft een periode van 24 uur, waarbij het van 8.00 tot 18.00 uur aanstaat.

Door deze twee pulsgeneratoren te vermenigvuldigen en vervolgens te vermenigvuldigen met de interne belasting, zal de interne belasting alleen gelden voor de gekozen tijdspanne.

In *figuur VIII-0-15* is weergegeven hoe dit er in Simulink uit ziet.



Figuur VIII-0-15 Pulsgenerator in Simulink

- $\Phi_{p,lat}$ (latente warmteafgifte door personen)

Voor de latente belasting door personen zijn de formule en waarden hiervoor dezelfde als die gebruikt zijn in *bijlage V*. Hieronder is de formule weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

$$\Phi_{p,lat} = \Phi_{p,lat \text{ per persoon}} \cdot n_p$$

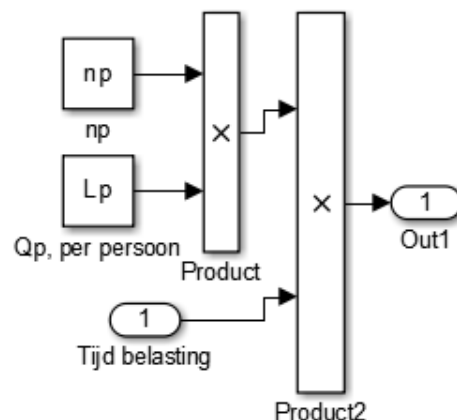
In *figuur VIII-0-16* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

$$p_{lat \text{ pp}} = 40 \quad [\text{W}]$$

$$n_p = 2 \quad [-]$$

Ook hier is de latente belasting vermenigvuldigd met de tijdbelasting. De uitleg van de tijdbelasting staat hierboven.



Figuur VIII-0-16 Latente belasting in Simulink

- Φ_{tb} (transmissie door buitenwanden)

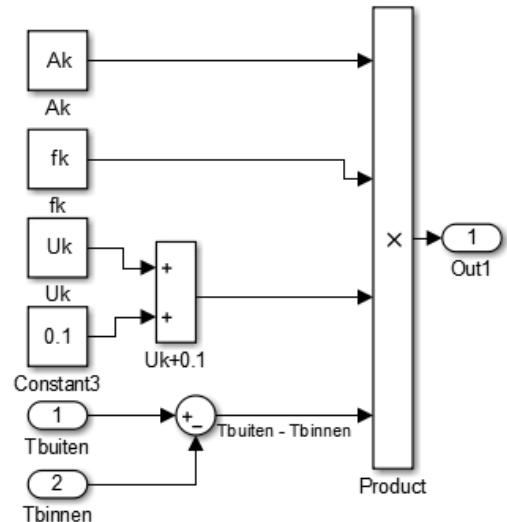
Voor de transmissie door buitenwanden wordt gebruik gemaakt van de formule voor $H_{t,ie}$ in *bijlage VI* en daarna vermenigvuldigd met het temperatuur verschil tussen buiten en binnen. In dit model wordt voor $H_{t,ie}$ alleen gekeken naar de buitenwand, de transmissie door glasvlakken wordt in Φ_{tg} meegenomen. Hieronder is de formule weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

$$\Phi_{tb} = (A_k \cdot f_k \cdot (U_k + 0,1)) \cdot (T_{bu} - T_{bi})$$

In *figuur VIII-0-17* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

$A_k =$	6,73	[m ²]
$f_k =$	1	[-]
$U_k =$	0,27	[W/m ² ·K]



Figuur VIII-0-17 Transmissie door buitenwanden in Simulink

De binnentemperatuur komt uit de temperatuurverandering van de kamer en de buitentemperatuur komt uit een klimaatbestand. (*uitgelegd in hoofdstuk 5.1, Φ_{netto} component*).

- Φ_{fv} (energiestroom door ventilatie van buitenlucht)

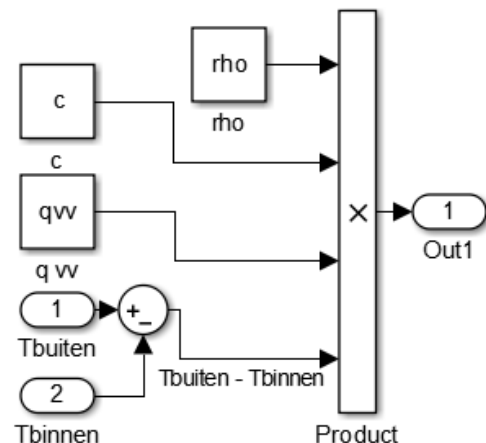
Voor de energiestroom door ventilatie van de buitenlucht zijn de formule en waarden hiervoor dezelfde als die gebruikt zijn in *bijlage V*. Hieronder is de formule weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

$$\Phi_{fv} = q_{vv} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{bu} - T_{bi})$$

In *figuur VIII-0-18* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

$q_{vv} =$	0,013	[m ³ /s]
$\rho =$	1,20	[kg/m ³]
$c =$	$1,007 \cdot 10^3$	[J/kg·K]



Figuur VIII-0-18 Ventilatie buitenlucht in Simulink

De binnentemperatuur komt uit de temperatuurverandering van de kamer en de buitentemperatuur komt uit een klimaatbestand. (*uitgelegd in hoofdstuk 5.1, Φ_{netto} component*).

- Φ_{tg} (transmissie door glasvlakken)

Voor de transmissie door glasvlakken zijn de formule en waarden hiervoor dezelfde als die gebruikt zijn in *bijlage V*. Hieronder is de formule weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

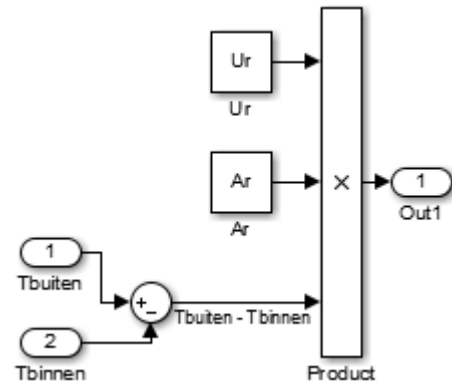
$$\Phi_{tg} = U_r \cdot A_r \cdot (T_{bu} - T_{bi})$$

In *figuur VIII-0-19* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

U_r (nieuw) =	2,5	[W/m ² ·K]
U_r (bestaand) =	3,45	[W/m ² ·K]
A_r =	2,99	[m ²]

De binnentemperatuur komt uit de temperatuurverandering van de kamer en de buitentemperatuur komt uit een klimaatbestand. (uitgelegd in hoofdstuk 5.1, Φ_{netto} component).



Figuur VIII-0-19 Transmissie glasvlakken in Simulink

- Φ_{zg} (belasting door zonnewarmte via ramen)

Voor de zonnewarmte via ramen zijn de formule en waarden hiervoor dezelfde als die gebruikt zijn in *bijlage V*. Hieronder is de formule weergegeven en weergegeven hoe het in Simulink gemodelleerd is.

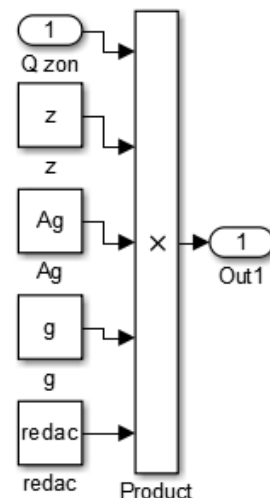
$$\Phi_{zg} = z \cdot A_g \cdot g \cdot Q_{zon} \cdot redac$$

In *figuur VIII-0-20* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.

De volgende waarden zijn gekozen:

z =	1	[-]
A_g =	2,54	[m ²]
g =	0,32	[-]
$Redac$ =	1	[-]

Q_{zon} komt uit een klimaatbestand. (uitgelegd in hoofdstuk 5.1, Φ_{netto} component).



Figuur VIII-0-20 Belasting door zonnewarmte in Simulink

IX. KAMER COMPONENT IN DYNAMISCH MODEL

Om de kamer component te simuleren moeten de massa en soortelijke warmte van de kamer worden bepaald.

Om de massa van de kamer te bepalen wordt de specifiek werkzame massa (SWM) gebruikt die ook in de koellastberekeningen zijn gebruikt. Dit is 90 [kg/m²] voor nieuwe gebouwen en 100 [kg/m²] voor bestaande gebouwen.

Deze massa wordt vermenigvuldigd met het warmte accumulerende oppervlakte [m²] van de kamer om de totale massa te verkrijgen.

Het warmte accumulerende oppervlakte is:

Plafond en vloer =	$5,4 \cdot 3,6 \cdot 2 =$	38,88 [m ²]
Tussenwand - deuren =	$2,7 \cdot 5,4 \cdot 2 - (2 \cdot 0,93 \cdot 2,315) =$	24,854 [m ²]
Gangwand - deuren =	$2,7 \cdot 3,6 - (0,93 \cdot 2,315) =$	7,567 [m ²]
Buitenwand - ramen =	$3,6 \cdot 2,7 - (2 \cdot 1,15 \cdot 1,30) =$	6,73 [m ²]
Totaal =		78,031 [m²]

De massa van de kamer voor nieuwe en bestaande gebouwen is:

Bestaand gebouw =	100 · 78,031 =	7803,1 [kg]
Nieuw gebouw =	90 · 78,031 =	7022,8 [kg]

Voor de soortelijke warmte wordt de waarde van steen en beton genomen wat **840 [J/kg·K]** is, gehaald uit 'ISSO publicatie 32'[19].

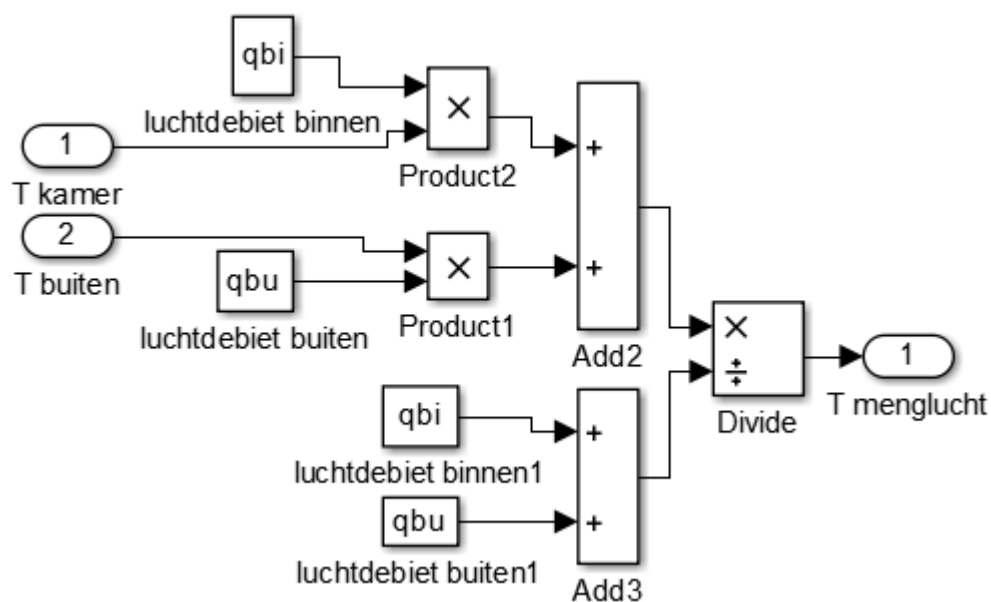
Om de massa van de lucht uit te rekenen wordt de dichtheid [kg/m³] met de inhoud [m³] vermenigvuldigd. Voor de dichtheid wordt dezelfde waarde gebruikt die in de koellast berekeningen zijn gebruikt. De massa van de lucht is:

$$\text{Massa lucht} = 1,2 \cdot (5,4 \cdot 3,6 \cdot 2,7) = 62,99 \text{ [kg]}$$

Voor de soortelijke warmte wordt dezelfde waarde gebruikt die in de koellastberekeningen zijn gebruikt. De soortelijke warmte van lucht is **1,007·10³[J/kg·K]**.

X. MENGING LUCHT IN DYNAMISCH MODEL

In *figuur X-0-21* is weergegeven hoe de berekening van de menging van de lucht eruit ziet in Simulink.



Figuur X-0-21 Menging van de lucht in Simulink

XI. PCM IN DYNAMISCH MODEL

Hoe het PCM is gemodelleerd in Simulink en welke waarden zijn aangenomen is hieronder weergegeven.

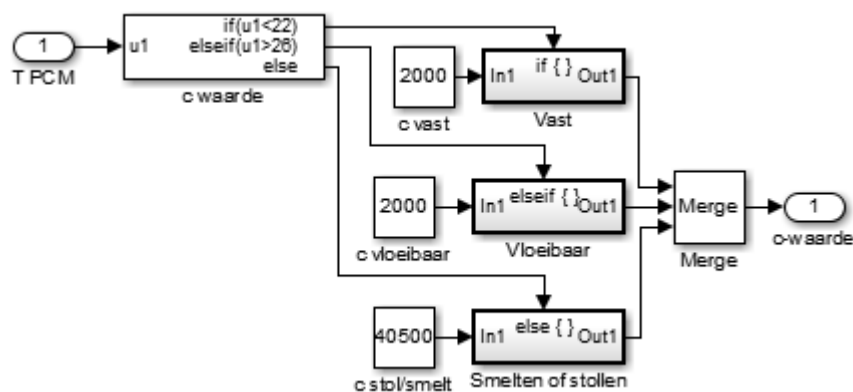
Model in Simulink

Voordat wordt berekend hoe het PCM reageert, wordt eerst berekend welke c-waarde moet worden aangenomen.

c-waarde

De hoeveelheid energie die je PCM opneemt hangt onder andere af van de soortelijke warmte (c-waarde) van het PCM. Deze c-waarde hangt af van de fase waarin het PCM zich bevindt, wat weer afhangt van de temperatuur van het PCM.

Hoe de c-waarde bepaald wordt in Simulink wordt aan de hand van *figuur XI-0-22* uitgelegd, waarin een PCM met een gemiddelde smelt-/stoltemperatuur van 24 [°C] is gekozen en een smelt-/stoltraject van 4 [°C].



Figuur XI-0-22 Bepalen c-waarde in Simulink

Het ingaande signaal is de temperatuur van het PCM.

- Als de temperatuur van het PCM zich onder het smelttraject bevindt ($u1 < 22$), dan wordt de c-waarde van vast PCM gekozen (2000 [J/kg·K])
- Als de temperatuur van het PCM zich boven het smelttraject bevindt ($u1 > 26$), dan wordt de c-waarde van vloeibaar PCM gekozen (2000 [J/kg·K])
- Als de temperatuur van het PCM zich tussen de 22 [°C] en 26 [°C] bevindt, dan wordt de c-waarde van het PCM tijdens het smelt-/stolproces aangehouden

Deze c-waarde is een ingangssignaal voor het gedrag van het PCM.

Gedrag PCM

Hoe de luchttemperatuur reageert op het PCM wordt bepaald door de volgende drie formules:

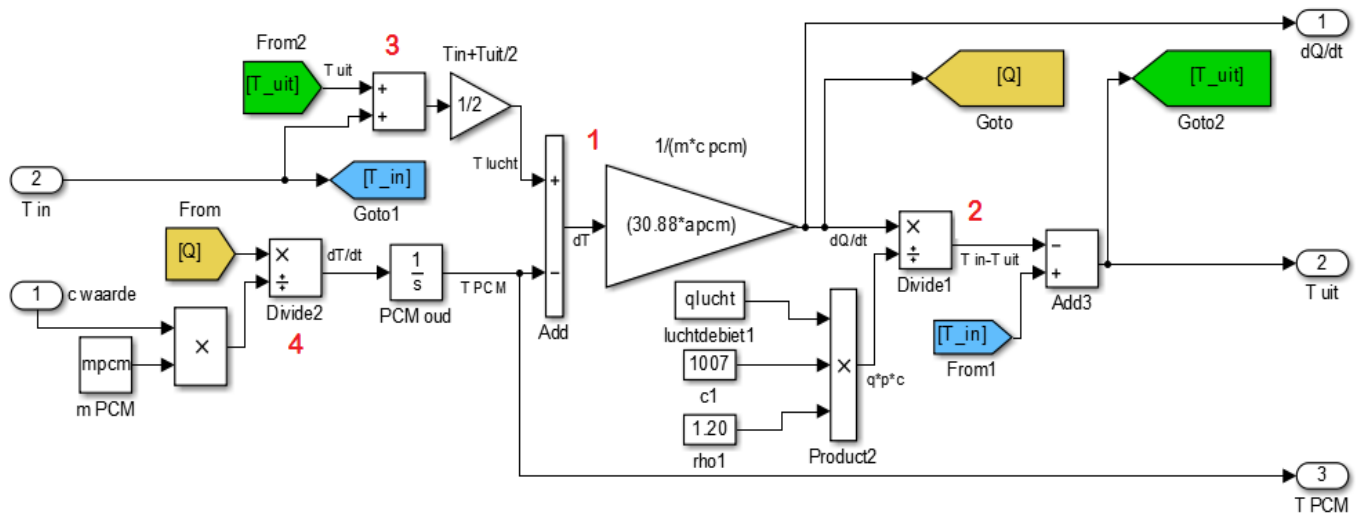
$$\text{Energie lucht: } Q = q_{\text{lucht}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}})$$

$$\text{Energie PCM: } Q = m_{\text{PCM}} \cdot c_{\text{PCM}} \cdot (T_{\text{PCM}} - T_{\text{PCM oud}})$$

$$\text{Energie overdracht: } Q = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{lucht}} - T_{\text{PCM}})$$

Om dit in Simulink te modelleren wordt aangenomen dat luchttemperatuur tijdens de overdracht een uniforme temperatuur heeft, waardoor T_{lucht} gelijk is aan $(T_{\text{lucht,in}} + T_{\text{lucht,uit}})/2$

Dit ziet er in Simulink als volgt uit (figuur XI-0-23):



Figuur XI-0-23 Gedrag PCM in Simulink

Het figuur wordt in de volgorde van de nummers uitgelegd:

1. Eerst wordt de overdrachtsenergie uitgerekend:

$$Q_{\text{overdracht}} = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{lucht}} - T_{\text{PCM}})$$

- Eerst wordt het temperatuurverschil uitgerekend: $\Delta T = T_{\text{lucht}} - T_{\text{PCM}}$.
- Dit temperatuurverschil wordt vermenigvuldigd met $(\alpha \cdot A)$ waardoor de overdrachtsenergie [J/s] wordt berekend.
- Deze energie is gelijk aan de energie die de lucht afstaat

2. Hier wordt de temperatuur van de uitgaande luchtstroom berekend:

$$Q_{\text{lucht}} = q_{\text{lucht}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}})$$

- Eerst wordt het temperatuur verschil van de lucht uitgerekend:

$$(T_{\text{in}} - T_{\text{uit}}) = \frac{Q_{\text{lucht}}}{q_{\text{lucht}} \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}}}$$

- Vervolgens wordt de temperatuur van de uitgaande luchtstroom berekend:

$$T_{\text{uit}} = (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}}) + T_{\text{in}}$$

T_{in} is hier de temperatuur van de menglucht. T_{uit} is het ingangssignaal voor de verwarming en koeling.

3. Hier wordt de luchttemperatuur in het PCM kanaal uitgerekend. Aangenomen wordt dat deze temperatuur een gemiddelde is tussen $T_{lucht, in}$ en $T_{lucht, uit}$.

$$T_{lucht} = \frac{T_{lucht, in} + T_{lucht, uit}}{2}$$

Deze temperatuur is weer een ingangssignaal voor formule van de overdrachtsenergie (1)

4. Als laatste wordt T_{PCM} uitgerekend:

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot c_{PCM} \cdot (T_{PCM} - T_{PCM, oud})$$

- Eerst wordt de temperatuurverschil van het PCM uitgerekend:

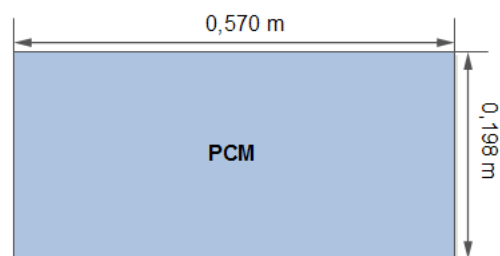
$$(T_{PCM} - T_{PCM, oud}) = Q \cdot \frac{1}{m \cdot c_{PCM}}$$

- T_{PCM} wordt berekend door het temperatuurverschil van het PCM te integreren. De integrator heeft als beginwaarde de gemiddelde smelttemperatuur van het PCM. T_{PCM} is weer het ingaande signaal voor de formule van de overdrachts-energie.

Bepalen waarden voor model

Hieronder zijn de waarden voor het PCM model weergegeven:

- T_{in} , wordt bepaald door het uitgangssignaal van menging van de lucht
- q_{lucht} , is het luchtdebiet van de ventilator: $348 \text{ [m}^3/\text{h}] = 0,0967 \text{ [m}^3/\text{s}]$
- c_{lucht} , is de soortelijke warmte van de lucht: $1007 \text{ [J/kg}\cdot\text{K}]$
- ρ_{lucht} , is de dichtheid van lucht: $1,20 \text{ [kg/m}^3]$
- c_{PCM} , is de soortelijke warmte van het PCM. Voor PCM in vast en vloeibare fase is de soortelijke warmte $2000 \text{ [J/kg}\cdot\text{K}]$. Voor PCM tijdens het smelt-/stolproces is de enthalpie van het PCM (162000 [J/kg]) verdeeld over een smelttraject van $4 \text{ [}^\circ\text{C}]$. Dit geeft een soortelijke warmte tijdens het smelt-/stolproces van $40500 \text{ [J/kg}\cdot\text{K}]$.
- m_{PCM} , voor de massa van het PCM wordt de massa van 10 PCM panelen genomen. 1 PCM paneel heeft een massa van $1,3 \text{ [kg]}$, dus 10 PCM panelen hebben een massa van 13 [kg] .
- A , het uitwisselende oppervlakte van het PCM hangt af van de lengte en de breedte van het PCM paneel (figuur XI-0-24). Dit moet vermenigvuldigd worden met 2, omdat de lucht door een spleet van 2 PCM panelen wordt geleid. Dit zorgt voor 2 keer het uitwisselende oppervlakte. Het uitwisselende oppervlakte is $0,226 \text{ [m}^2]$ per PCM paneel. Voor 10 PCM panelen zal dit dus $2,26 \text{ [m}^2]$ worden.



Figuur XI-0-24 Afmetingen PCM paneel

- α , de warmteoverdrachtscoëfficiënt moet eerst het getal van Nusselt worden bepaald voor de situatie van warmteoverdracht door een spleet. Met behulp van de 'VDI heat atlas' zijn de formules gevonden om dit te bepalen [12].
- Om α te bepalen moet de volgende formule worden gebruikt:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{dh} \quad (36)$$

λ , de warmtegeleidingscoëfficiënt, is hier 0,023 [W/mK] (bij lucht van 20 [°C]).
 dh , is de hydraulische diameter, in deze situatie 2 x de dikte van de lichtspleet is 0,02 [m] (figuur XI-0-25).

- Om het getal van Nusselt uit te rekenen moet eerst het getal van Reynolds (Re) worden bepaald. Om het (Re) te bepalen wordt de volgende formule gebruikt:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot dh}{\eta} \quad (37)$$

ρ , de dichtheid van lucht, is 1,20 [kg/m³]
 η , de dynamische viscositeit, is $1,81 \cdot 10^{-5}$ [Ns/m²]
 v , de snelheid wordt als volgt bepaald:

$$v = \frac{q_{lucht}}{3600 \cdot A_{spleet}} = \frac{348}{3600 \cdot 1,98 \cdot 10^{-3}} = 4,88 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (38)$$

Het getal van Reynolds (37) wordt hierdoor:

$$Re = \frac{1,20 \cdot 4,88 \cdot 0,02}{1,81 \cdot 10^{-5}} = 6473,576$$

Het getal van Reynolds zit hierdoor in het transitiegebied. Om het getal van Nusselt moet daarom als volgt worden uitgerekend:

$$Nu = (1 - \gamma) \cdot Nu_{lam,2300} + \gamma \cdot Nu_{turb,10^4} \quad (39)$$

γ , een dimensieloos getal, wordt berekend door de volgende formule:

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} = \frac{6474 - 2300}{10^4 - 2300} = 0,542 \quad (40)$$

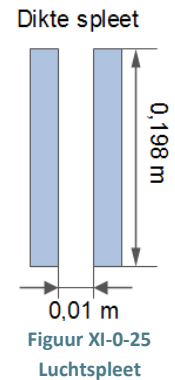
Eerst wordt het getal van Nusselt uitgerekend voor laminaire stroming bij $Re = 2300$:

$$Nu_{lam,2300} = (Nu_1^3 + Nu_2^3)^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

$$Nu_1 = 7,541$$

$$Nu_2 = 1,841 \sqrt[3]{\frac{Re \cdot Pr \cdot dh}{l}} = 1,841 \sqrt[3]{\frac{2300 \cdot 0,71 \cdot 0,02}{0,570}} = 7,097 \quad (42)$$

$$Nu_{lam,2300} = (Nu_1^3 + Nu_2^3)^{\frac{1}{3}} = (7,541^3 + 7,097^3)^{\frac{1}{3}} = 9,23 \quad (41)$$



Nu wordt het getal van Nusselt uitgerekend voor turbulente stroming bij $Re = 1 \cdot 10^4$:

$$Nu_{turb,10^4} = \frac{\frac{\zeta}{8} Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\zeta}{8} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}} \cdot \left[1 + \left(\frac{dh}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (43)$$

$$\zeta = (1,8 \log_{10} Re - 1,5)^{-2} = (1,8 \cdot \log_{10}(1 \cdot 10^4) - 1,5)^{-2} = 0,0308 \quad (44)$$

$$Nu_{turb,10^4} = \frac{\frac{0,0308}{8} \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 0,71}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{0,0308}{8} \left(0,71^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,02}{0,57} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 36,039 \quad (43)$$

Het uiteindelijke getal van Nusselt (39) wordt nu:

$$Nu = (1 - \gamma) \cdot Nu_{lam,2300} + \gamma \cdot Nu_{turb,10^4} = (1 - 0,542) \cdot 9,23 + 0,542 \cdot 36,039 = 23,76$$

- Aan de hand van het getal van Nusselt kan vervolgens de warmteoverdrachtscoëfficiënt (α) worden bepaald(36):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{dh} = \frac{23,76 \cdot 0,026}{0,02} = 30,88 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

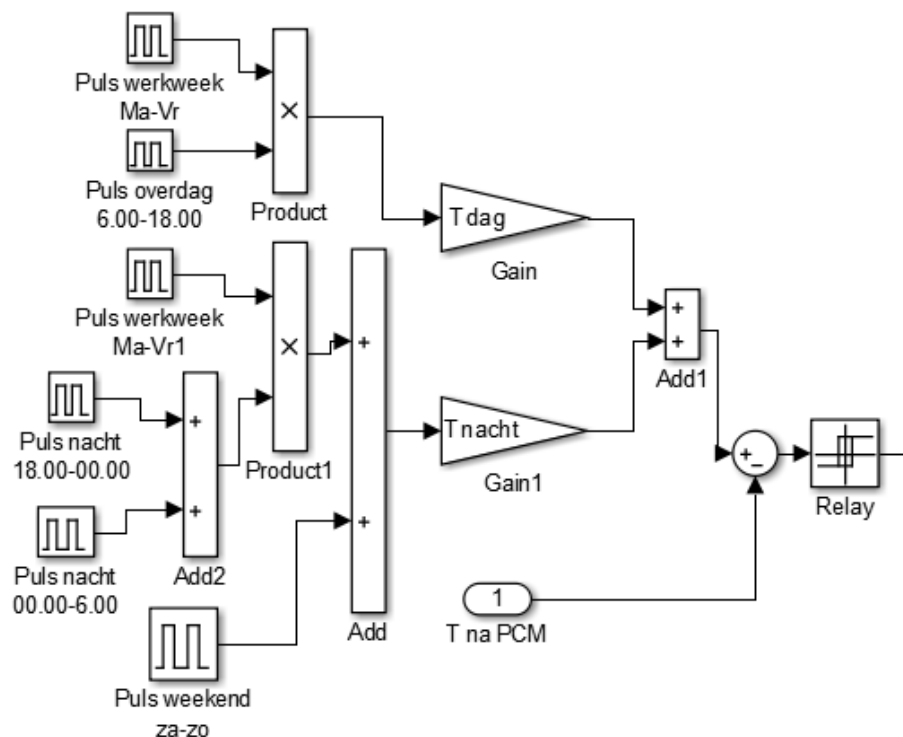
Deze waarde wordt gebruikt voor de warmteoverdrachtsformule die in het gedrag van het PCM verwerkt zit. Dit is een realistische waarde aangezien bij gedwongen convectie van gassen de overdrachtscoëfficiënt tussen de 10 en 100 [W/m²K] ligt.

XII. VERWARMING EN KOELING IN DYNAMISCH MODEL

Hieronder is uitgelegd hoe de actie koelen en actie verwarmen zijn gemodelleerd.

Verwarmen

Om te bepalen wanneer er een instelwaarde van 22 [°C] moet worden aangehouden en wanneer een instelwaarde van 18 [°C], is er gebruik gemaakt van puls generatoren. De werking wordt uitgelegd aan de hand van *figuur XII-0-26*.



Figuur XII-0-26 Actie verwarmen in Simulink

De tijd wanneer de instelwaarde van 22 [°C] (T dag) moet worden gebruikt, is gemodelleerd aan de hand van twee pulsgeneratoren. De eerste pulsgenerator geeft een puls van maandag tot vrijdag, de tweede pulsgenerator van 6 uur 's ochtends tot 6 uur 's avonds. Door deze generatoren te vermenigvuldigen zal het uitgangssignaal alleen '1' worden op kantoortijden van maandag tot vrijdag. Deze '1' wordt vermenigvuldigd met een instelwaarde naar keuze, in dit geval 22.

De tijd wanneer de instelwaarde van 18 [°C] (T nacht) moet worden aangehouden, is gemodelleerd aan de hand van 4 pulsgeneratoren. De eerste pulsgenerator geeft weer een puls van maandag tot vrijdag. De volgende twee pulsgeneratoren geven een puls van 6 uur 's avonds tot 12 uur 's nachts en van 12 uur 's nachts tot 6 uur 's ochtends. Door dit te sommeren zal de puls van 6 uur 's avonds tot 6 uur 's ochtends plaatsvinden. Dit wordt weer vermenigvuldigd met de eerste pulsgenerator om zo een '1' als uitgangssignaal te genereren van maandag tot vrijdag tussen 6 uur 's nachts en 6 uur 's ochtends.

De laatste pulsgenerator geeft een puls in het weekend, wanneer er niet gewerkt wordt. Uiteindelijk wordt het gesommeerd en vermenigvuldigd met een instelwaarde naar keuze, in dit geval 18.

Deze twee blokken worden vervolgens weer gesommeerd om of de instelwaarde 18 of de instelwaarde 22 door te geven.

Uiteindelijk wordt overdag het verschil tussen de instelwaarde en de temperatuur na het PCM berekend en vervolgens naar de 'relay' gestuurd. 's Nachts wordt het verschil tussen de instelwaarde en de kamertemperatuur berekend. De 'relay' zorgt ervoor dat het de verwarmingscomponent aanzet 0,5 [°C] onder de instelwaarde en weer uitzet 0,5 [°C] boven de instelwaarde.

Koelen

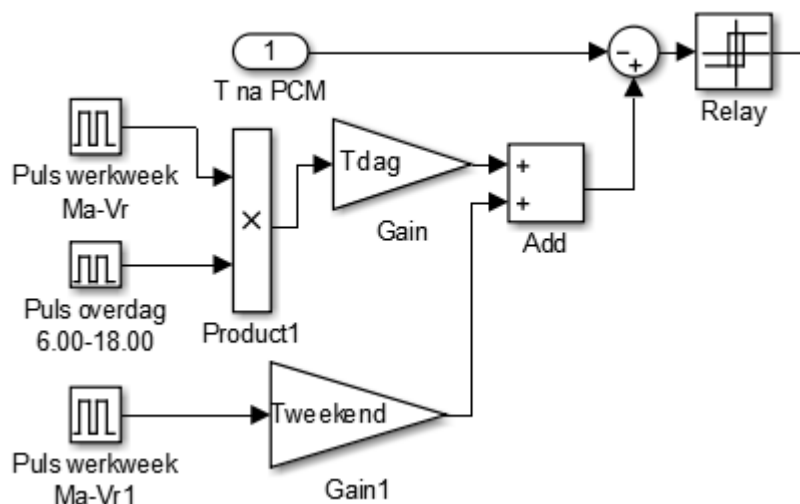
Ook bij het koelen worden er twee instelwaarden aangehouden.

Tijdens kantoortijden is de instelwaarde 24 [°C]. Door een pulsgenerator van 6 uur 's ochtends tot 6 uur 's avonds en een pulsgenerator van maandag tot vrijdag te maken zal deze waarde gelden tijdens kantoortijden doordeweeks.

In het weekend is er bepaald dat de temperatuur in het kantoor niet hoger dan 28 [°C] mag worden. Door een pulsgenerator in het weekend zal deze waarde alleen gelden in het weekend.

Deze twee blokken worden vervolgens weer gesommeerd om of de instelwaarde 24 of de instelwaarde 28 door te geven.

Omdat het hier om koelen gaat zal de relay de koelcomponent aanzetten 0,5 [°C] boven de instelwaarde en uitzetten 0,5[°C] onder de instelwaarde (andersom in vergelijking met de verwarmingscomponent). In *figuur XII-0-27* is te zien hoe dit in Simulink gemodelleerd is.



Figuur XII-0-27 Actie koelen in Simulink

De nacht is niet gemodelleerd voor het koelen, omdat het na verwachting in de avond bijna nooit meer dan 24 [°C] zal worden.

Energiekosten verwarmen en koelen

Om de energiekosten te berekenen, moet het uitgangssignaal van de verwarming en koeling ($\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ in [J/s]) worden omgerekend naar energiekosten in [€]. Dit wordt volgens de volgende stappen uitgevoerd.

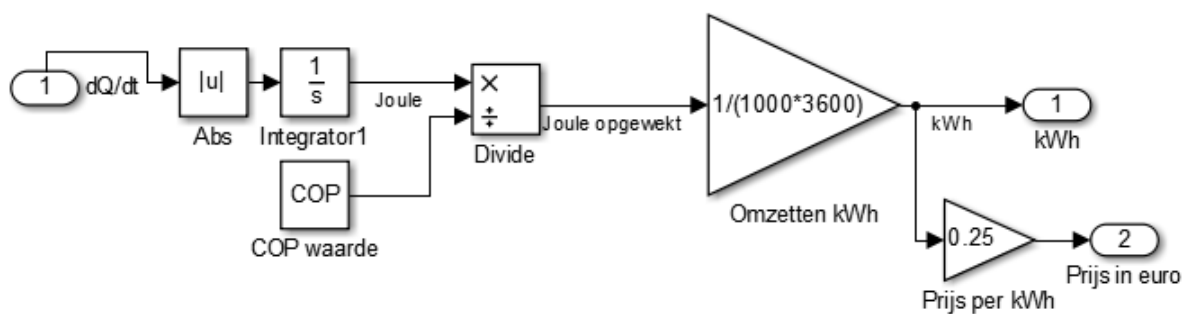
- Eerst wordt het uitgangssignaal geïntegreerd, waardoor [J] wordt verkregen
- Daarna wordt er gekeken hoeveel energie er is opgewekt om deze hoeveelheid [J] te verkrijgen. Er is voor dit model aangenomen dat de energie wordt opgewekt door een warmtepomp met een COP van 3 voor verwarmen en koelen. De formule hiervoor is:

$$COP = \frac{E_{netto}}{E_{opgewekt}}$$

Om de opgewekte energie te berekenen, moet de netto energie worden gedeeld door de COP waarde.

- Als de opgewekte energie bekend is, moet dit worden omgezet naar kilowattuur [kWh]. 1 [kWh] is gelijk aan 3.600.000 [J], de opgewekte energie [J] moet dus worden vermenigvuldigd met $(1/3.600.000)$.
- Nu het aantal kilowattuur is verkregen moet dit nog worden vermenigvuldigd worden met de prijs per kWh. Nu is de prijs verkregen voor verwarming en koeling.

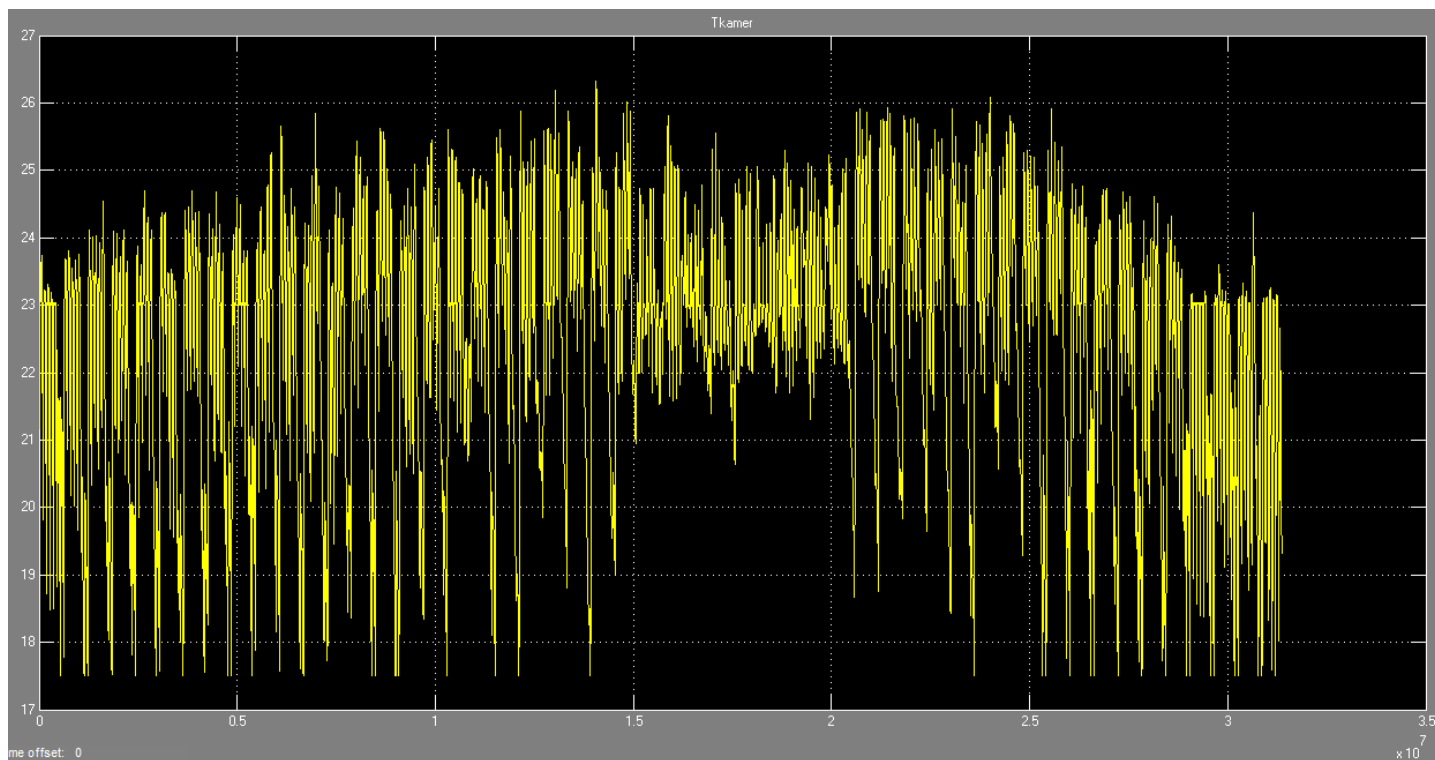
In Simulink ziet dit er als volgt uit (figuur XII-0-28):



Figuur XII- 0-28 Uitrekenen energiebesparing

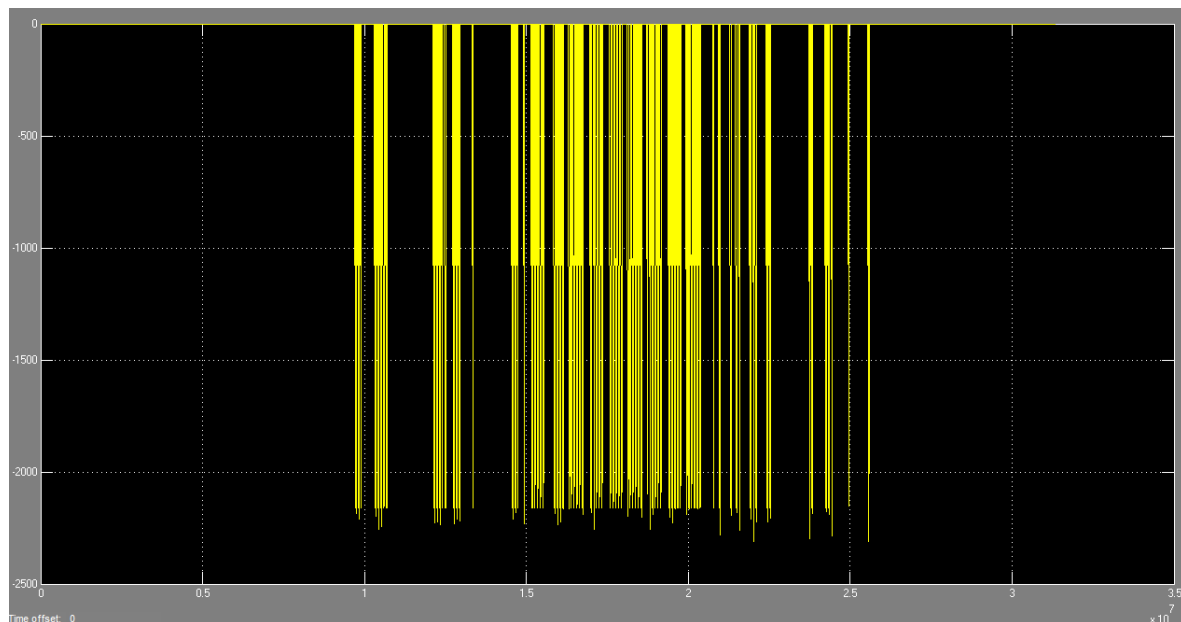
XIII. GRAFIEKEN DYNAMISCH MODEL

Hieronder zijn meer grafieken weergegeven van het dynamisch model. De onderstaande grafieken zijn afkomstig van het model van een bestaand gebouw met PCM 23. De grafieken van de andere modellen zullen iets verschillen maar zullen over het algemeen op onderstaande grafieken lijken.



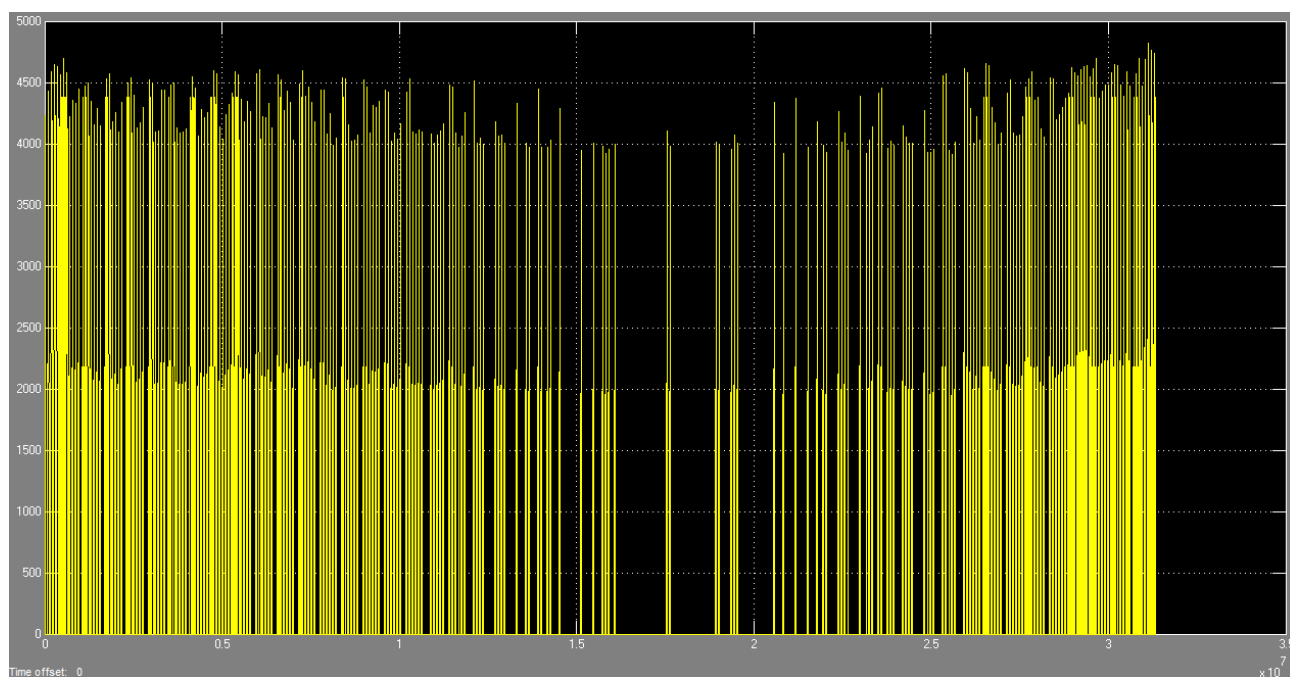
Figuur XIII-0-29 Kamertemperatuur gedurende een jaar

In deze grafiek is te zien dat er in de kamer gedurende het jaar een redelijk stabiele temperatuur heerst. De pieken onderin stellen de nacht voor waar de verwarming een nachtverlaging heeft van 18 [°C].



Figuur XIII-0-30 Koelenergie gedurende een jaar

In bovenstaande grafiek is te zien wanneer er koelenergie is toegevoegd aan de kamer. Er is goed te zien dat de koeling in het midden van het jaar actief is, wanneer het lente/zomer is. Dit komt omdat er is ingesteld dat de koeling alleen actief is bij een buitentemperatuur hoger dan 16 [°C].



Figuur XIII-0-31 Verwarmingsenergie gedurende een jaar

In bovenstaande grafiek is te zien dat er in het midden van het jaar veel minder verwarming nodig is. Dit klopt aangezien het dan zomer is. Aan het begin en het einde van het jaar is er veel meer vraag naar verwarming omdat het dan winter is.

XIV. TESTOPSTELLING

Hieronder staat informatie over testen die zijn gedaan voor de eigenlijke test om de testopstelling accurater te maken en berekeningen die zijn gemaakt om tot het testresultaat te komen.

Testen van tevoren

Rooktest

Om te kijken of de testopstelling daadwerkelijk luchtdicht is, is er een rooktest gedaan. Er is een rookmachine voor de testopstelling gezet om te kijken of er nog spleten waren waar er lucht kon ontsnappen. Na deze test zijn de laatste spleten gedicht om de testopstelling luchtdicht te maken. In *figuur XIV-0-32* is deze rooktest te zien.



Figuur XIV-0-32 Rooktest

Luchtdebiet bepalen

Om uiteindelijk te bepalen hoeveel energie er is opgenomen, moet het luchtdebiet [m^3/h] worden bepaald. Met het luchtdebiet en de dichtheid van lucht kan worden bepaald hoeveel massa aan lucht er per tijdseenheid over het PCM paneel wordt geleid.

Het bepalen van het luchtdebiet is gedaan met een luchtdebietmeter. Dit apparaat wordt op het uiteinde van de testopstelling gemonteerd. Met behulp van plastic en tape is er voor gezorgd dat het apparaat geen valse lucht aanzuigt, hierdoor wordt alleen de lucht uit de PCM box gemeten.

Met behulp van de regelklep is het luchtdebiet ingesteld op 24 [m^3/h]. In *figuur XIV-0-33* is deze opstelling te zien.



Figuur XIV-0-33 Luchtdebiet bepalen

Invloed op test reduceren

Om de invloed op de test te reduceren wordt de gehele opstelling zonder PCM paneel al eerder in de ruimte gezet. Het materiaal kan dan al acclimatiseren, waardoor de temperatuur na het PCM niet wordt beïnvloed door warmteopname van andere materialen.

Berekeningen testresultaat

Om de resultaten uit te rekenen is tijdens de proef per 20 seconden de RV en temperatuur gemeten. Hieruit is per 5 minuten een gemiddelde RV en temperatuur berekend, voor en na het PCM

- Met temperatuur en de RV, is vervolgens met behulp van een calculator [24] de enthalpie voor en na PCM berekend.
- Vervolgens is de energie inhoud van de lucht gedurende 5 minuten voor en na PCM [W] berekend:

$$\text{Energieinhoud lucht [W]} = \text{Enthalpie} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \cdot \rho_{\text{lucht}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot q_{\text{lucht}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

- De energieopname en –afgifte van het PCM gedurende 5 minuten zijn daarna als volgt berekend:

$$\text{Energieopname PCM [W]} = \text{energieinhoud lucht voor PCM} - \text{energieinhoud lucht na PCM}$$

$$\text{Energieafgifte PCM [W]} = \text{energieinhoud lucht na PCM} - \text{energieinhoud lucht voor PCM}$$

- De gemiddelde energieopname en – afgifte gedurende de gehele test zijn als volgt berekend:

$$\text{Gem. energieopname PCM [W]} = \frac{\text{totale energieopname [W]}}{\text{aantal metingen}}$$

$$\text{Gem. energieafgifte PCM [W]} = \frac{\text{totale energieafgifte [W]}}{\text{aantal metingen}}$$

- Uiteindelijk is de energieopname/-afgifte gedurende de gehele test berekend:

$$\text{Totale energieopname [J]} = \text{gem. energieopname [W]} \cdot \text{totale tijd}$$

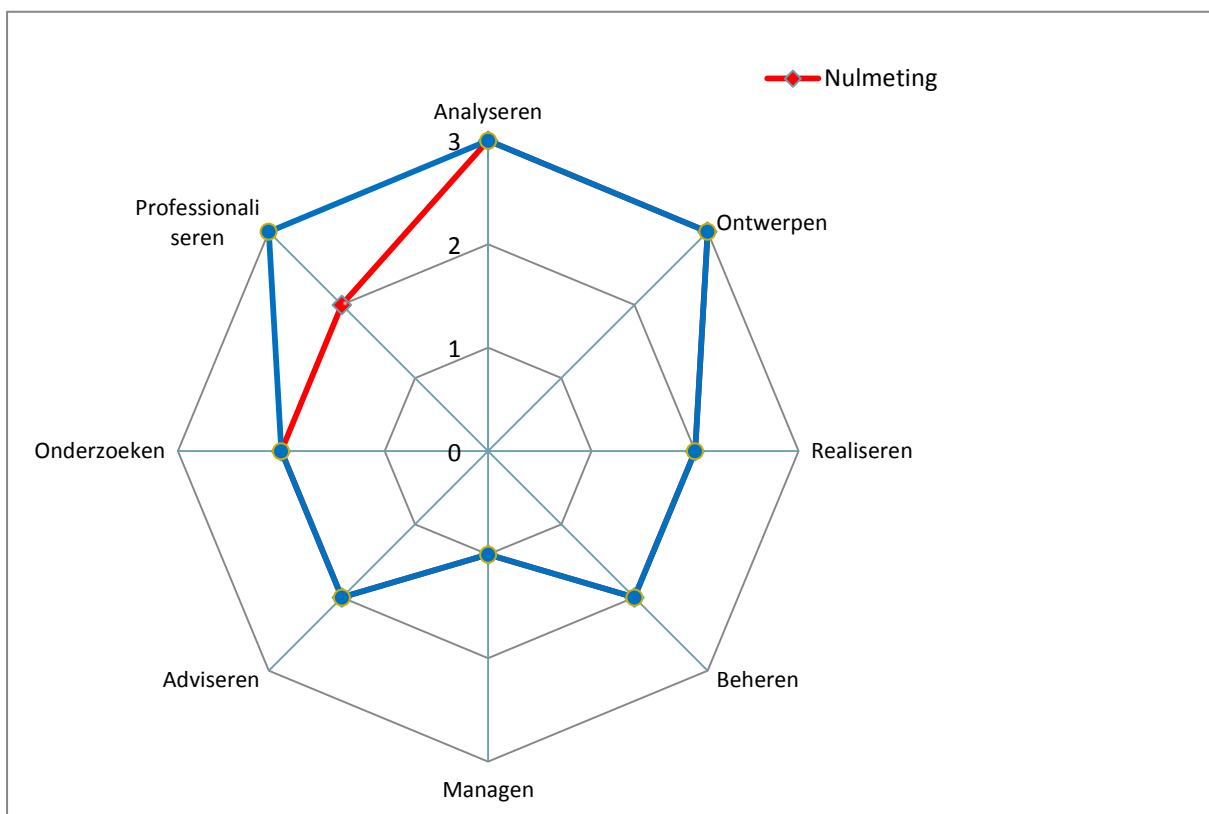
$$\text{Totale energieafgifte [J]} = \text{gem. energieafgifte [W]} \cdot \text{totale tijd}$$

- De totale opslagcapaciteit van het PCM is berekend door de enthalpie van het PCM te vermenigvuldigen met de massa.

XV. REFLECTIEVERSLAG

Om aan te tonen dat dit afstudeeronderzoek van voldoende niveau is, is hieronder het reflectieverslag gemaakt. In dit reflectieverslag is onderbouwd welke competenties aan bod zijn gekomen en op welk niveau deze competenties tijdens de afstudeeropdracht zijn uitgevoerd.

In *figuur XV-0-34* is het spinnenwebfiguur te zien. Hier is met rood aangegeven welk niveau de afstudeerder aan het begin van de afstudeeropdracht had. Met blauw is het niveau aangegeven dat de afstudeerder na de opdracht heeft bereikt.



Figuur XV-0-34 Competentieniveau voor en na het afstuderen

Analyseren

De competentie analyseren is op de volgende manier op niveau 2 gehouden:

Indien nodig onder begeleiding opstellen van programma van (bekende en complexe technische & niet-technische) eisen en dit vast kunnen leggen.

Om te weten te komen of PCM ook daadwerkelijk interessant is, moest er eerst een pakket van eisen worden opgesteld. Dit pakket van eisen is opgesteld door te analyseren welke eisen er worden gesteld met betrekking tot het comfort in een leefomgeving. Met behulp van het bouwbesluit en de arbowet zijn deze eisen opgesteld. Er is geanalyseerd welke economische aspecten van belang zijn om het PCM te toetsen en er is gekeken naar bestaande toepassingen met PCM. Op deze manier is na intensief overleg met de opdrachtgever een zo volledig mogelijk pakket van eisen opgesteld.

Omdat het pakket van eisen met intensief overleg is gebeurd met de opdrachtgever, is het niveau van de competentie analyseren op niveau 2 gebleven.

Professionaliseren

De competentie professionaliseren is op niveau 3 behaald op de volgende manier:

“Op zelfstandige wijze een onbekend en complex leerdoel en leerstrategie bepalen en uitvoeren in een multidisciplinaire context en het resultaat terugkoppelen naar het leerdoel.”

Tijdens deze afstudeeropdracht is van tevoren een leerdoel bepaald, namelijk: leren hoe PCM werkt en vervolgens uit zoeken in hoeverre dit interessant is om toe te passen in de klimaattechniek.

Van tevoren is hiervoor een leerstrategie bepaald:

- Eerst moest PCM worden geanalyseerd, om een pakket van eisen op te stellen.
- Daarna zou er met behulp van een keuzeverantwoording een toepassing moeten worden gekozen.
- Deze toepassing zou verder moeten worden uitgewerkt.
- Uiteindelijk zou met behulp van een dynamisch model en een mogelijke fysieke test aan het leerdoel moeten kunnen worden voldaan

Aan het einde van deze afstudeeropdracht is het inderdaad gelukt om dit leerdoel te halen.

- Aan de hand van de analyse is een pakket van eisen opgesteld.
- Met de keuzeverantwoording is er een toepassing gekozen, namelijk een compact en lokale toepassing met PCM.
- De toepassing is verder uitgewerkt om te bepalen hoe de hoofdonderdelen moeten worden gedimensioneerd. Er was verwacht om de toepassing verder uit te werken, echter was dit in dit tijdsbestek niet mogelijk.
- Met het dynamisch model en een fysieke test is aangetoond dat PCM wel interessant is om toe te passen in de klimaattechniek. Echter is het niet interessant voor compacte lokale toepassingen, omdat hiervoor te weinig PCM kan worden toegepast.

De leerstrategie is van tevoren dus bepaald en uiteindelijk ook naar behoren uitgevoerd. Dit heeft als resultaat dat het leerdoel ook behaald is. Er kan daarom worden geconcludeerd dat deze competentie op niveau 3 gehaald is.

Onderzoeken

De competentie analyseren is op de volgende manier op niveau 2 gehouden:

“Indien nodig onder begeleiding de resultaten samenvatten, structureren en interpreteren en conclusies trekken in relatie tot de bekende en complexe onderzoeksvraag.”

Deze competentie is gehaald en hierbij zijn twee onderzoeksmethodes gebruikt: het maken van een computersimulatie en het uitvoeren van een fysieke test.

Computersimulatie

Door het maken van een computersimulatie kon worden onderzocht hoeveel energie het PCM op jaarbasis bespaarde in vergelijking met de toepassing zonder PCM. Uit de resultaten kon worden geconcludeerd, dat er met een kleine hoeveelheid PCM panelen niet genoeg energie bespaard kan worden. Om meer op energie te besparen en ook nog eens op koelvermogen te besparen zal er een grotere hoeveelheid PCM panelen moeten worden toegepast.

Fysieke test

Door het realiseren en uitvoeren van een fysieke test, kon worden uitgezocht hoeveel energie een PCM paneel daadwerkelijk opneemt. Aan de hand van de resultaten kon er inderdaad worden geconcludeerd dat het PCM werkt en een redelijke hoeveelheid energie opnam. Ook kon er worden geïnterpreteerd waarom de resultaten naar alle waarschijnlijkheid zijn beïnvloed.

Met behulp van deze twee onderzoeksmethoden is er een antwoord op de onderzoeksvraag verkregen. Wel is er bij het maken van de computersimulatie hulp gevraagd aan een expert. Ook is er bij de realisatie van de fysieke test overlegd met de opdrachtgever over hoe de test het beste op te zetten. Vandaar dat deze competentie op het niveau 2 is behouden.