

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Validatie en optimalisatie van het koelsysteem van het hybride
testvoertuig

PROMOTOR :

ir. Frederik ROGIERS

PROMOTOR :

ir. ing. Nick DE BIE

Nick Vanpol

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Validatie en optimalisatie van het koelsysteem van het hybride testvoertuig

PROMOTOR :

ir. Frederik ROGIERS

PROMOTOR :

ir. ing. Nick DE BIE

Nick Vanpol

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica



KU LEUVEN

Woord vooraf

Voor u ligt de scriptie “Validatie en optimalisatie van het koelsysteem van het hybride testvoertuig”. Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de gezamenlijke opleiding “master in de industriële wetenschappen – elektromechanica” van UHasselt en KULeuven. Hierin kan u de opdracht voor het strategisch onderzoekscentrum Flanders Make te Lommel terugvinden.

Graag wil ik mijn promotoren ir. Frederik Rogiers en ir. Ing. Nick De Bie bedanken voor de goede begeleiding en de hulp bij het afleggen van deze masterproef. Zonder hun hulp had ik deze opdracht niet kunnen realiseren.

Ook zou ik de lectoren van deze opleiding willen bedanken voor het inzicht dat ze mij hebben bijgebracht. Hierdoor heb ik problemen die ik ben tegengekomen snel kunnen oplossen.

Uiteindelijk wil ik mijn ouders bedanken voor de mogelijkheid en de steun die ze mij gegeven hebben om verder te studeren. In tweede instantie ook mijn familie en vrienden die steeds in mij zijn blijven geloven.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Nick Vanpol

Hasselt, juni 2021

Inhoud

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Abstract in English	11
1 Inleiding	13
1.1 Situering.....	13
1.2 Probleemstelling.....	14
1.3 Doelstellingen	15
1.4 Methode	16
2 Thermische modulatie koelcircuit	17
2.1 Literatuurstudie	17
2.2 Thermische model	19
2.2.1 Warmtebron	19
2.2.2 Warmteafleider.....	21
2.2.3 Vloeistof transport.....	22
2.3 Thermisch model in-wielmotor.....	24
2.3.1 Warmteoverdachtcoëfficiënt luchtmedium	25
2.3.2 Warmteoverdachtcoëfficiënt koelmedium.....	26
2.4 Thermische model radiator	27
2.4.1 LMTD methode	27
2.4.2 e-NTU methode	29
3 Huidige koelsysteem.....	31
3.1 Koelcircuit in-wielmotoren	31
3.1.1 Sensoren	32
3.1.2 Regelorgaan	34
3.2 Koelcircuit batterijpakket.....	35
3.2.1 Sensoren	35
3.2.2 Regelorgaan	36

4	Simulatie warmteontwikkelingen	37
4.1	Aandrijflijn model	37
4.1.1	In-wielmotor model	39
4.1.2	Batterijpakket model	39
4.1.3	Fysische parameters	40
4.2	Rijcyclussen	41
4.3	Simulatie warmteontwikkelingen	42
4.4	Resultaten	43
5	Identificatie koelsysteem in-wielmotoren	45
5.1	Identificatie radiator en ventilatoren	45
5.1.1	Vorbereiding	45
5.1.2	Meetmethode	47
5.1.3	Resultaten	53
5.2	Identificatie elektromotor	55
6	Simulink model	59
6.1	Simulink model radiator	59
6.2	Simulink model in-wielmotor	62
6.2.1	Aandrijflijn model	62
6.2.2	Warmteontwikkelingen in-wielmotor	64
6.2.3	Warmteopname koelmedium	64
6.2.4	Warmteafgifte omgeving	65
6.3	Simulink model pomp	65
7	Conclusie en toekomstige uitbreidingen	67
7.1	Huidige opstelling radiator	67
7.2	Conceptuele opstelling radiatoren	69
7.2.1	Serie werking	70
7.2.2	Parallel werking	71
7.3	Besluiten	72
7.4	Toekomstige uitbreidingen	73
	Bronnenlijst	74

Lijst van tabellen

Tabel 1: Regel standen koelcircuit in-wielmotoren.....	32
Tabel 2: Controllervariabelen voor de koelpomp van het batterijpakket	36
Tabel 3: Specificaties Range Rover Hybride	40
Tabel 4: Overzicht warmteontwikkelingen voor elke rijcyclus	43
Tabel 5: Parameterinstellingen voor proefondervindelijke meting radiator.....	52
Tabel 6: Vastgelegde toerental en koppel waardes voor aanvang thermische simulatie	56

Lijst van figuren

Figuur 1: Vereenvoudigde voorstelling greybox principe [5]	18
Figuur 2: Typische verloop interne weerstand li-ion cell f(SOC, temp.) [6, p6].....	19
Figuur 3: Typische prestatie map van PMSM motor met geïntegreerde inverter efficiëntie [7, p3580]	20
Figuur 4: Prestatie curve pomp batterijpakket	22
Figuur 5: Vereenvoudigde voorstelling meetopstelling radiator	23
Figuur 6: Vereenvoudigd thermische massa model voor in-wielmotoren	24
Figuur 7: F-factor voor warmtewisselaar waarbij mediums elkaar ongemengd kruisen [12, p52]	28
Figuur 8: Opstelling koelcircuit in-wielmotoren.....	31
Figuur 9: Koelcircuit in-wielmotoren implementatie vortex sensoren (Bron: Flanders Make)	33
Figuur 10: Eigenschappen Huba vortex flow sensor [15].....	33
Figuur 11: Vereenvoudigde voorstelling regeling pomp en ventilatoren.....	34
Figuur 12: Opstelling koelcircuit batterijpakket (Bron: Flanders Make).....	35
Figuur 13: Aandrijflijn model hybride wagen.....	37
Figuur 14: Inwerkende krachten op een wagen [17, p4]	38
Figuur 15: Vereenvoudigd elektrische circuit Li-ion batterijpakket [19, p127]	40
Figuur 16: Snelheidsprofielen rijcyclussen.....	41
Figuur 17: Warmteontwikkelingen NEDC rijcyclus.....	42
Figuur 18: Warmteontwikkelingen WLTP rijcyclus.....	42
Figuur 19: 3D model proefopstelling radiator in-wielmotoren	46
Figuur 20: Plot tekening montage bevestiging ventilatoren/sensoren	46
Figuur 21: Plot tekening onderstel.....	46
Figuur 22: Meetopstelling radiator in-wielmotoren	47
Figuur 23: Meetopstelling luchtstroom radiator in-wielmotoren	48
Figuur 24: Weergave uitgaande snelheidsvariatie bij 14 V aangelegde spanning	49
Figuur 25: Luchtsnelheid ventilatoren i.f.v. de aangelegde procentuele bronspanning	49
Figuur 26: Elektrische vermogen ventilatoren i.f.v. de procentuele aangelegde bronspanning.....	50
Figuur 27: Temperatuurvariatie van de uitgaande lucht bij $T_{koel_In} = 60^{\circ}C$ en $U_{bron} = 14 V$	50
Figuur 28: Boxplot temperatuurmeting koelmedium bij omgevingstemperatuur	51
Figuur 29: Tsi velociCalc met externe thermokoppel aansluitingen [22, p9]	51
Figuur 30: Warmteafgifte radiator bij werkingstemperatuur van $45^{\circ}C$	54
Figuur 31: Warmteafgifte radiator bij werkingstemperatuur van $60^{\circ}C$	54
Figuur 32: UA-waarde radiator bij werkingstemperatuur van $45^{\circ}C$	54
Figuur 33: UA-waarde radiator bij werkingstemperatuur van $60^{\circ}C$	54
Figuur 34: Invullen geometrische eigenschappen van de elektromotor.....	55
Figuur 35: Aanduiden koelmethode: Water Jacket.....	55
Figuur 36: Rijcyclus simulatie in Motor-CAD	56
Figuur 37: Prestatie map elektromotor Motor-CAD	56
Figuur 38: Instellen werkingpunt elektromotor	57
Figuur 39: Instellen koelmiddel ingangstemperatuur en debiet.....	57
Figuur 40: Overzicht van de werkingstemperaturen van de verschillende onderdelen	57
Figuur 41: Bepaling efficiëntie koellichaam	58
Figuur 42: Simulink blok thermische capacitef debiet	59
Figuur 43: Formules thermische capacitef debiet.....	59

Figuur 44: Prestatie map van de globale conductantie voor de verschillende mediumsnelheden.....	60
Figuur 45: Bepaling effectiviteit radiator	60
Figuur 46: Effectiviteit van een warmtewisselaar waarbij de medium elkaar ongemengd kruisen	60
Figuur 47: Thermisch model radiator in-wielmotoren.....	61
Figuur 48: Thermische model in-wielmotor.....	62
Figuur 49: Omzetting rijcyclus naar afstand, snelheid en versnelling	62
Figuur 50: Omzetting snelheid en versnelling naar rotatiesnelheid en koppel.....	63
Figuur 51: Aandrijfmodel in-wielmotor.....	63
Figuur 52: Bepaling warmteontwikkeling in-wielmotor	64
Figuur 53: Bepaling warmteopname koelmedium.....	64
Figuur 54: Bepaling warmteafgifte aan de omgeving	65
Figuur 55: Thermische model pomp.....	65
Figuur 56: Huidige positie radiator in-wielmotoren (Bron: Flanders Make)	67
Figuur 57: Configuratie huidig koelcircuit in-wielmotoren	67
Figuur 58: Luchtsnelheid i.f.v. aangelegde spanning bij pull en push configuratie	68
Figuur 59: Warmteafgifte radiator voor originele opstelling bij WLTP rijcyclus.....	68
Figuur 60: Voorbumper Range Rover Evoque [20]	69
Figuur 61: Radiator batterijpakket	69
Figuur 62: Configuratie serie werking radiatoren in optimale rijwind	70
Figuur 63: Warmteafgifte radiator serie werking voor WLTP rijcyclus.....	70
Figuur 64: Configuratie parallel werking radiatoren in optimale rijwind	71
Figuur 65: Warmteafgifte radiator parallel werking voor WLTP rijcyclus	71

Abstract

De onderzoeksinstituten Flanders Make onderzoekt o.a. nieuwe technologische ontwikkelingen binnen het domein van de voertuigindustrie. Eén van de lopende projecten is deze van het hybride testvoertuig, gebaseerd op een Range Rover Evoque platform. De doelstelling van deze masterproef bestaat eruit om een beter inzicht te krijgen over het thermisch gedrag van het huidige koelsysteem van de elektrische motoren en het batterijpakket.

Om het thermisch gedrag van de vermogencomponenten, bestaande uit respectievelijk het batterijpakket en de in-wielmotoren, op te stellen werd er gebruik gemaakt van een vereenvoudigd aandrijfmodel van de wagen. In functie van een opgelegde rijcyclus konden de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten gesimuleerd worden. Door experimentele identificatie van de radiator van de in-wielmotoren, kon met behulp van de e-NTU methode, de warmteafgifte van de radiator aan de omgeving gesimuleerd worden.

De resultaten geven aan dat het koelcircuit van de in-wielmotoren voldoende koelvermogen kan leveren om de in-wielmotoren in hun gewenste temperatuurgebied te houden. Op basis van het ontwikkelde model kunnen verdere verbeteringen aan het koelsysteem onderzocht worden.

Abstract in English

The research institute Flanders Make investigates, among other things, new technological developments within the field of the vehicle industry. One of the current projects is that of the hybrid test vehicle, based on a Range Rover Evoque platform. The objective of this master thesis is to gain a better understanding of the thermal behavior of the current cooling system of the electric motors and the battery pack.

In order to establish the thermal behavior of the power components, consisting of the battery pack and the in-wheel motors respectively, a simplified powertrain model of the car was used. As a result of an enforced driving cycle, the heat generation of the power components could be simulated. Through experimental identification of the radiator of the in-wheel motors, the heat transfer from the radiator to the environment could be simulated using the e-NTU method.

The results indicate that the cooling circuit of the in-wheel motors can provide enough cooling power to keep the in-wheel motors in their desired temperature range. Based on the developed model, further improvements to the cooling system can be investigated.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef werd uitgevoerd bij het strategisch onderzoekscentrum voor de maakindustrie Flanders Make. Hun missie is om de internationale competitiviteit van de Vlaamse industrie te versterken. Daarom werken zij samen met KMO's en grote bedrijven aan precompetitief, industriegedreven technologisch onderzoek, met als resultaat concrete product- en productie-innovatie in de voertuigindustrie, de verwerkende industrie en de productieomgevingen.

Op de cité in Lommel focust Flanders Make zich op de technologische ontwikkelingen van de voertuigindustrie. Om deze vernieuwende technieken te valideren, beschikt Flanders Make over twee testvoertuigen, namelijk een volledige elektrische- en een hybride wagen. Beide voertuigen zijn een conversie van een standaard Range Rover Evoque platform, waarbij de gewenste aanpassingen werden aangebracht om volledig elektrisch of hybride te kunnen rijden.

Deze masterproef zal uitsluitend betrekking hebben tot de hybride Range Rover Evoque. Hierbij is er vertrokken van een conventionele wagen waarbij het vermogen uitsluitend werd geleverd door de verbrandingsmotor. Na de ombouw naar een hybride aandrijflijn, wordt het vermogen geleverd door de originele verbrandingsmotor enkel overgedragen op de voorwielen van de wagen. Dit werd mogelijk gemaakt door de cardanas te verwijderen. Elk achterwiel is nu aangedreven door een in-wiel elektromotor.

De elektromotoren zorgen samen met het ingebouwde batterijpakket voor het nodige mechanische vermogen op van de achterwielen van de wagen. Door de toevoeging van deze vermogencomponenten (elektromotoren en batterijpakket) en rekening houdend dat de efficiëntieverliezen hoofdzakelijk omgezet worden in warmteverliezen, was een extra koelcircuit noodzakelijk. In de huidige opstelling hebben zowel de in-wielmotoren als het batterijpakket een apart koelcircuit. Om zowel het batterijpakket als de in-wielmotoren in hun optimaal temperatuursgebied te houden, zal in ieder koelcircuit het debiet van de koelvloeistof en het luchtdebiet van de ventilatoren geregeld worden. Deze regelingen worden mogelijk gemaakt door enerzijds respectievelijk het toerental van de pomp en anderzijds het toerental van de ventilatoren aan te passen. In de huidige opstelling worden de twee koelcircuits op een verschillende manier aangestuurd.

1.2 Probleemstelling

Gezien de korte doorlooptijd betreffende de opbouw van het hybride Range Rover Evoque platform, moesten er keuzes worden gemaakt welke prioriteiten voor dit project voorrang kregen. Een eerste belangrijke mijlpaal was de integratie van de componenten voor de elektrische aandrijflijn (elektromotoren, invertoren, batterijpakket, pompen, ventilatoren...). Hiervoor moesten er bijvoorbeeld verschillende aanpassingen worden gedaan aan de bekabeling van de wagen. Doordat de laatste jaren de auto's meer en meer worden voorzien van elektronica was dit zeker geen gemakkelijke onderneming. Gezien de tijdsnood maakte men met behulp van de voorhanden informatie een ruwe berekening van het gewenste koelvermogen, dit voor zowel de elektromotoren, de invertoren als ook het batterijpakket. Om een goede werking van de in-wielmotoren alsook het batterijpakket te kunnen garanderen werden enkele componenten zoals de radiatoren en pompen mogelijks overgedimensioneerd.

Het koelcircuit van de in-wielmotoren wordt uitsluitend geregeld op basis van de temperaturen van de invertoren en elektromotoren, welke worden ingelezen via de CAN-bus. Aan de hand van deze waarden zal bij het overschrijden van een vooropgestelde temperatuur, bijvoorbeeld 50 °C, de stand van de pomp en ventilatoren verhoogd worden. Dit gebeurt door middel van de pulsbreedte- modulatiemethode (PWM-methode). Dit principe van blackbox regeling maakt het mogelijk om op een eenvoudige manier het koelcircuit te regelen. Het blackbox systeem wordt toegepast t.g.v. de beperkte aanwezigheid van externe sensoren, welke het mogelijk maken om een terugkoppeling te sturen van bijvoorbeeld het effectieve pompdebiet. Een bijkomend nadeel is dat de gemoduleerde spanning afhankelijk is van de aangelegde voedingsspanning. Dit maakt dat wanneer de 12 V batterij ontladend, het maximale pomp- en ventilatortoerental ook afneemt. Dit is opgelost door het inbouwen van een DC-DC converter die de spanning van de 12 V batterij constant houdt op 14 VDC.

De regeling voor het batterijkoelcircuit is flexibeler aangezien het voorzien is van externe sensoren, wat het mogelijk maakt om efficiënter te koelen. Daarnaast kan het toerental van de pomp en ventilatoren traploos aangepast worden in functie van het gewenste koelvermogen. Omwille van een bovengrens op het maximale vloeistofdebiet, opgesteld door de batterijproducent, zullen zowel het toerental van de pomp, de grootte van de radiator als de regelbaarheid van het volumedebiet van de ventilatoren de bepalende factoren worden.

Naast een optimaal thermisch management vormt ook de beperkte inbouwruimte om deze systemen te plaatsen een extra uitdaging. Gezien er vertrokken is van een standaard benzinewagen, waar stelselmatig extra componenten werden toegevoegd, zijn beide koelreservoirs ingebouwd in de kofferbak. De pompen zijn ingebouwd onder het voertuig, samen met de ventilatoren en radiatoren. Hierdoor is er de vraag om na te gaan of de huidige koelcircuits geschikt zijn om de elektromotoren en het batterijpakket te laten werken in hun optimale werkingsgebied en daarbij ook oververhitting ten alle tijden vermeden kan worden. Daarnaast is er de vraag of de afmetingen van de componenten gereduceerd kunnen worden, zonder in te boeten op het maximale gewenste koelvermogen zodat een herpositionering van de radiator tot de mogelijkheden behoort.

1.3 Doelstellingen

De voornaamste doelstelling van deze masterproef is om een thermisch model op te stellen van de huidige koelcircuits. Meer specifiek zal voornamelijk het koelcircuit van de in-wielmotoren aan bod komen gezien hierover weinig tot geen kennis geweten is over de effectieve warmteoverdracht t.g.v. het gebrek aan externe sensoren. Hierbij moet er met behulp van simulatie software (MATLAB/Simulink) nagegaan worden of het huidige koelcircuit genoeg koelvermogen produceert om de in-wielmotoren in hun gewenste temperatuurgebied tot 60 °C te laten opereren.

Een eerste tussendoel is om de warmteverliezen van respectievelijk de in-wielmotoren en het batterijpakket te bepalen in functie van verschillende rijcyclussen. Aan de hand hiervan kan de grootte orde van het gewenste koelvermogen voor beide circuits vastgelegd worden.

Vervolgens moet de warmteopname van ieder koelsysteem ter hoogte van de vermogencomponent, evenals de warmteafgifte van de radiator aan de omgeving bepaald worden in functie van de regelbare parameters. Deze parameters zijn bijvoorbeeld de rotatiesnelheid van de pompen en ventilatoren. Op die manier kan het koelvermogen van ieder koelsysteem gevalideerd worden. Aan de hand van de warmteverliezen en het koelvermogen van ieder koelsysteem kan voor een willekeurige rijcyclus, de temperatuur van de vermogencomponenten (in-wielmotoren en batterijpakket) in functie van de tijd bepaald worden.

Tenslotte moet er onderzocht worden of er een mogelijke optimalisatie van de afmetingen van de radiator kan uitgevoerd worden, waarbij de optimale temperatuursregeling in het werkingsgebied van de vermogencomponenten gegarandeerd blijft.

1.4 Methode

Om de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten te bepalen wordt er een model van de aandrijflijn opgesteld. Hierbij worden verschillende voertuigparameters zoals het gewicht van de wagen, het frontale oppervlak, de energie-inhoud van het batterijpakket etc. meegenomen. Aan de hand hiervan kunnen verschillende genormeerde rijcyclussen, bestaande uit een snelheids-, versnellings- en hellingsprofiel gesimuleerd worden. Het model van de aandrijflijn zet deze variabelen om naar het overeenkomend benodigde koppel en rotatiesnelheid van iedere elektromotor. Hierdoor kan ook het benodigd vermogen van het batterijpakket bepaald worden. Door de implementatie van de aanwezige efficiëntie tabellen van de vermogencomponenten kunnen de warmteverliezen in functie van de tijd bepaald worden.

Ten gevolge van de beperkte technische informatie van enkele onderdelen meer bepaald de radiator en de interne afmetingen van het koellichaam van de in-wielmotoren was een volledige analytische bepaling van de warmteopname en afgifte van het koelsysteem aan de omgeving niet mogelijk. Hierdoor wordt een thermisch greybox model opgesteld, welke deels bestaat uit meetwaarden van de sensoren in de vorm van look-up tabellen. Zij maken het mogelijk om noodzakelijke verbanden te leggen tussen het koelvermogen en de regelbare parameters. Door gebruik te maken van de voorhanden reserve onderdelen van het in-wielmotor koelcircuit, meer specifiek m.b.v. een duplicaat van de radiator en ventilatoren, kon een laboratorische proefopstelling uitgewerkt worden. Deze proefondervindelijke opstelling geeft ons de mogelijkheid om in een gecontroleerde omgeving verschillende parameters te variëren en het resultaat hiervan te registreren. Hierbij worden de medium (lucht/koelmiddel) temperaturen en snelheden via een vooropgesteld patroon vastgelegd om vervolgens de overeenkomende globale conductantie (UA) te bepalen. Voor de finalisering van het greybox model worden de gekende mathematische beschrijvingen van de radiator aan het model toegevoegd.

Ten slotte zal door uitvoerige simulaties van verschillende rijcyclussen de performantie van het in-wielmotoren systeem bepaald worden. Hierdoor kunnen de ideale afmetingen van de radiator vastgelegd worden door regelbare parameters aan te passen, zoals het warmteoverdracht oppervlak van de radiator, koel- en luchtmediumdebieten. Dit kan leiden tot een iteratief proces aangezien er de mogelijkheid bestaat om de radiator te plaatsen in een idealer natuurlijke luchtstroom, wat een positieve invloed heeft op de reductie van de radiator. Daarnaast kan, voor een vast radiatoroppervlakte, ook het controle algoritme voor de pompen en ventilatoren geoptimaliseerd worden door verschillende vloeistof- en/of luchtdebieten te simuleren.

2 Thermische modulatie koelcircuit

2.1 Literatuurstudie

De opzet van deze masterproef is om het thermische gedrag te modelleren van de huidige koelcircuits van de hybride Range Rover Evoque. Aan de hand hiervan kan de efficiëntie en de effectieve warmteafgifte van deze koelcircuits bepaald worden. Onder het thermisch model behoort allereerst de bepaling van de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten (in-wielmotoren en het batterijpakket). De omvang van de warmteontwikkelingen kunnen op verschillende manieren bepaald worden.

Bij beperkte gegevens van de vermogencomponenten kan door de stappen van V.D.B. & Lofaro [1] te volgen, experimenteel de warmteafgifte van de vermogencomponenten aan het koelwater bepaald worden. Hierbij wordt het temperatuurverschil van het koelmedium gemeten ter hoogte van de in- en uitlaat van de vermogencomponenten. Afhankelijk van het ingestelde koelmedium debiet kan een thermisch karakteristiek van de warmteopname van het koelmedium bekomen worden. Deze methode is slechts een benadering. Dit aangezien er vanuit wordt gegaan dat de warmte, ontwikkelt door de vermogencomponenten, gelijk wordt gesteld aan de warmteopname van het koelmedium ($Q_{comp} = Q_{cool}$). In de praktijk zal een gedeelte van de warmteontwikkelingen afgegeven worden aan de omgeving in de vorm van convectie aan de omgevingslucht.

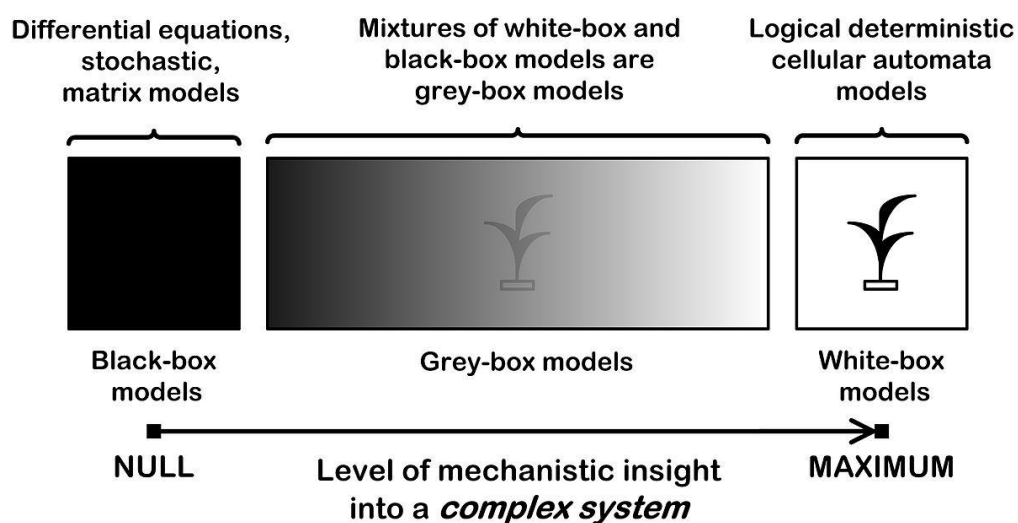
Voor een meer realistische bepaling van het koelvermogen ontwikkelde Park [2] een virtueel aandrijflijnmodel van een wagen. Hierin worden de efficiëntietabellen van de elektromotoren en batterijpakket geïmplementeerd. Met behulp van het aandrijflijnmodel kunnen verschillende rijcyclussen gesimuleerd worden om zo het brandstofverbruik en de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten in kaart te brengen. Het aandrijflijnmodel zet de respectievelijke snelheids-, versnellings- en hellingsprofielen van de rijcyclus om in een overeenkomend vermogen. Voor de in-wielmotoren betekent dit een benodigd koppel en een bepaalde rotatiesnelheid. Voor het batterijpakket komt dit neer op een ontlad- of laadvermogen. Aan de hand van deze berekeningen en de efficiëntietabellen kunnen nu accurate warmteverliezen geplot worden in functie van de tijd. Na het doorlopen van verschillende rijcyclussen kunnen de maximale warmteverliezen vergeleken worden. Voor het dimensioneren van het koelsysteem wordt er uitgegaan van het worst case scenario.

Eens de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten bepaald zijn, kan er overgeschakeld worden naar de bepaling van het thermische gedrag van de koelsystemen. De methode die hier toegepast wordt zal sterk afhangen van welke middelen en informatie er beschikbaar worden gesteld. Wanneer er niet kan vertrokken worden van een bestaand koelcircuit zoals bij La Marre [3] zullen enkele onbekenden zoals de in- en uitlaattemperatuur van respectievelijk de luchtstroom en de vloeistofstroom door de radiator ingeschat moeten worden. Aan de hand van een iteratief proces kunnen vervolgens de grootte van de pomp, radiator en ventilatoren bepaald worden. Deze analytische wijze is enkel mogelijk wanneer de producenten van de pompen, radiator en ventilatoren een uitgebreide documentatie voorzien over de componenten. Hierbij zou minstens de drukval in functie van het volumedebiet alsook de warmteafgifte van de radiator voor een bepaalde luchtstroom gekend moeten zijn.

Wanneer men wel beschikt over een bestaand koelsysteem zoals bij V.D.B. & Lofaro [1], maar de documentatie van deze gebruikte componenten is beperkt, kan het gedrag van het koelcircuit met behulp van enkele proefondervindelijke metingen in kaart worden gebracht. Door gebruik te maken van de e-NTU methode kan via een temperatuursmeting aan de in- en uitlaat van de radiator, de effectieve warmteafgifte van de radiator bepaald worden. Hieruit kan de effectiviteit van de radiator afgeleid worden door de verhouding van de effectieve warmteafgifte op de thermodynamische bovenlimiet (Q_{max}). Tenslotte wordt de globale conductantie (UA) voor de respectievelijke koelmedium- en lucht-mediumsnelheden bekomen. Met behulp van de interpolatie van het warmteoverdrachtsoppervlak kunnen de optimale afmetingen van de radiator vastgelegd worden.

Gezien de beperkte technische informatie over de radiatoren in het huidige koelsysteem van de inwielmotoren en het batterijpakket, zal een proefondervindelijke bepaling van de warmteoverdracht van de radiator aan de omgeving noodzakelijk zijn. Het ontwikkelde thermisch model van de radiatoren zal uiteindelijk de effectieve warmteoverdracht van de radiator moeten bepalen in functie van de omgevingstemperatuur, de inlaattemperatuur van het koelmedium en de respectievelijke medium snelheden. Aan de hand hiervan kan de uitlaattemperatuur van het koelmedium bepaald worden. Deze temperatuur is belangrijk aangezien het koelmedium na de radiator via de pomp opnieuw naar de vermogenscomponenten stroomt. Om de uitgangstemperatuur van de radiator te bepalen, zullen de resultanten verwerkt worden via het greybox [4] principe. Dit wil zeggen dat er kennis is van het thermische gedrag van het systeem maar dat onbekende relaties proefondervindelijk toegevoegd moeten worden. Op deze manier kan via simulatie de optimale grootte van de pomp, radiator en bijhorende ventilatoren gedimensioneerd worden.

Wanneer er uitsluitend data gedreven informatie gebruikt wordt om een proces te beschrijven zal dit een beperkte flexibiliteit geven om aanpassingen toe te voegen aan het model. Dit wordt het black-box principe genoemd. Vanuit dit principe zouden sensormetingen van het voertuig een verband geven tussen het koelvermogen en de mediumtemperaturen, de massadebiten van de koelvloeistof en de luchtstroom. Dit zonder gebruik te maken van het fysische gedrag van het koelsysteem. Hierbij zou het moeilijk worden om betrouwbare inschattingen te doen van de optimale orde grootte van de componenten in het koelsysteem. Onderstaande figuur geeft grafisch het verschil weer tussen de verschillende modellen.



Figuur 1: Vereenvoudigde voorstelling greybox principe [5]

Vanuit de warmteontwikkelingen (Q_{comp}), de warmteopname (Q_{cool}) en de effectieve warmteafgifte van de radiator aan de omgeving (Q_{rad}) kan de temperatuur van de vermogenscomponenten bepaald worden in functie van de tijd. Wanneer de warmteontwikkeling van de vermogenscomponenten groter is dan het effectieve koelvermogen van het koelcircuit zal de temperatuur van de vermogenscomponenten toenemen.

2.2 Thermische model

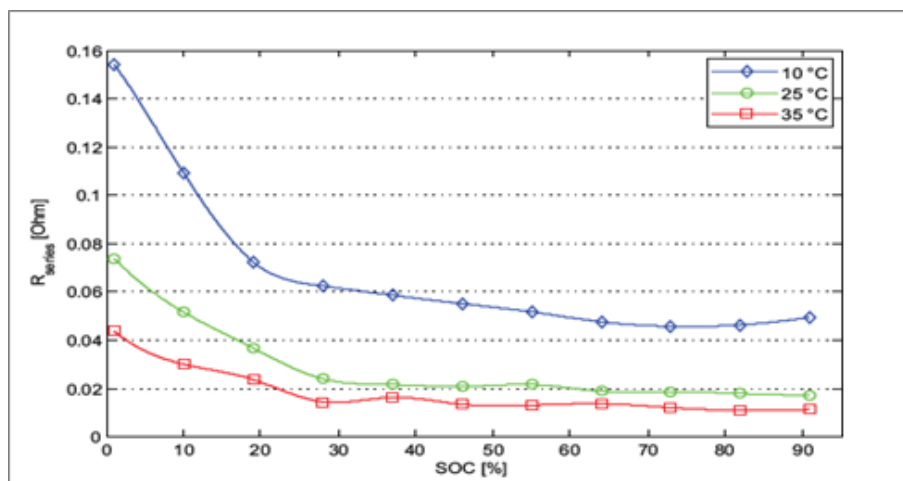
Het thermische model van elk koelcircuit kan opgedeeld worden in drie groepen: warmtebron, warmteafleider en vloeistoftransport. Hierbij zal zowel de mathematische bepaling van de in-wielmotoren als het batterijpakket aangehaald worden. Voor de bepaling van de warmteopname van het koelmedium ter hoogte van de vermogenscomponenten evenals de warmteafgifte van de radiatoren aan de omgeving zullen nog de nodige experimentele tests, simulaties uitgevoerd worden. Tenslotte zullen de werkingpunten van de pomp en de ventilatoren bepaald worden, aangezien deze drukafhankelijk zijn in functie van het geleverde debiet.

2.2.1 Warmtebron

Batterijpakket:

De warmteontwikkelingen van het batterijpakket worden bepaald aan hand van de interne weerstand van het batterijpakket en de geleverde stroom van het batterijpakket. Onderstaande figuur geeft een typisch verloop van de interne weerstand van een Li-ion cel [6] weer in functie van de State-Of-Charge (SOC) en de werkingstemperatuur van de cel.

$$Q_{verlies,batt} = I^2 \cdot R_{int} \quad (1)$$



Figuur 2: Typische verloop interne weerstand li-ion cell f(SOC, temp.) [6, p6]

Hieruit kan vastgesteld worden dat bij afname van de SOC de interne weerstand zal toenemen. Dit zal als gevolg hebben dat de warmteontwikkelingen van het batterijpakket proportioneel zullen toenemen met de interne weerstand. Daarnaast zal de interne weerstand van nature afnemen wanneer de werkingstemperatuur van het batterijpakket toeneemt. Het nadeel van deze hogere temperaturen is dat het batterijpakket sneller degradatieverschijnselen gaat vertonen. Hierdoor zal de levensduur van het batterijpakket sterk afnemen. Het optimale temperatuurgebied van het batterijpakket wordt vastgelegd tussen de 30 en 45 graden Celsius.

In-wielmotoren:

De warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren worden bepaald aan de hand van een efficiëntiemap, welke een functie is van het effectieve koppel en het toerental van de in-wielmotoren. Zoals bij de bepaling van het benodigd elektrische vermogen van de in-wielmotoren zal ook hier een onderscheid moeten gemaakt worden tussen motor- en generatorwerking.

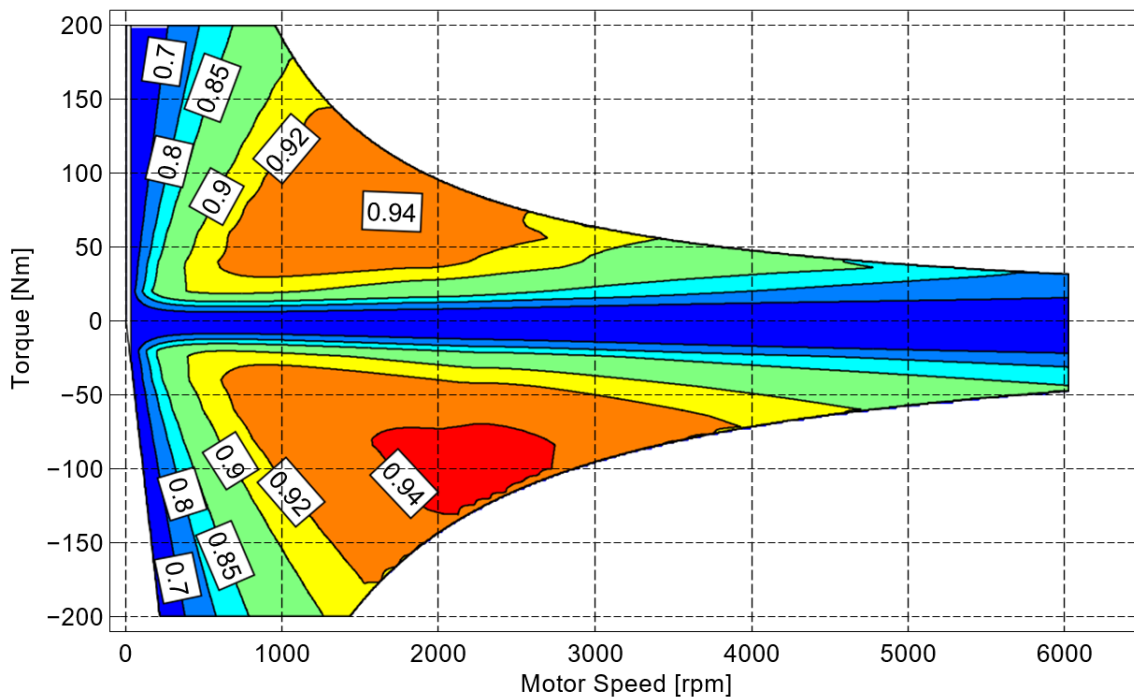
In het geval van **motor werking** zullen de warmteontwikkelingen bepaald worden aan de hand van onderstaande formulering. Waarbij T_n , ω en η_{sys} respectievelijk het nuttig koppel, de rotatiesnelheid en het systeemrendement van de in-wielmotor weergeven.

$$Q_{verlies,EM} = T_n \cdot \omega \cdot \left(\frac{1}{\eta_{sys}} - 1 \right) \quad (2)$$

In het geval van **generator werking** zullen de warmteontwikkelingen bepaald worden aan de hand van onderstaande formulering.

$$Q_{verlies,EM} = T_n \cdot \omega \cdot (1 - \eta_{sys}) \quad (3)$$

Onderstaande figuur geeft de typische efficiëntiemap [7] weer voor het systeemrendement van een permanent magneet synchroon motor (PMSM) met bijhorende inverter. Het systeemrendement zal dus afnemen bij lage toerentallen gecombineerd met een hoog koppel (bijv. een sterk hellende weg) evenals bij hoge toerentallen en een relatief laag koppel (bijv. bij een autosnelweg).



Figuur 3: Typische prestatie map van PMSM motor met geïntegreerde inverter efficiëntie [7, p3580]

2.2.2 Warmteafleider

Koellichaam:

Onder de warmteafleider behoort onder meer het koellichaam (kanalen) van de vermogenscomponenten. Deze ingewerkte koelkanalen maken het mogelijk om de warmte, gegenereerd door de in-wielmotoren en het batterijpakket, over te dragen aan het koelmedium. Hierbij zullen zowel het vloeistofdebiet geleverd door de pomp, als de inwendige temperatuur van de vermogenscomponent en de ingangstemperatuur van het koelmedium een bepalende rol spelen in de orde grootte van het vermogen van de warmteoverdracht $Q_{koellichaam}$.

$$Q_{koellichaam} = \dot{m}_{koel} \cdot C_{p,koel} (T_{koel,uit} - T_{koel,in}) \quad (4)$$

$$Q_{verlies,comp} = Q_{koellichaam} + Q_{omgeving} \quad (5)$$

Om een correlatie vast te leggen tussen de warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren, de warmteopname van het koelcircuit en de regelbare parameter (koelmedium debiet) kan een thermische prestatiekaart opgesteld worden. Deze prestatiekaart zou uitgevoerd kunnen worden op de voorhanden rollenbank, **maar ten gevolge van de beperkte tijdsperiode en de beschikbaarheid van de wagen is ervoor gekozen om enkel de werkwijze vast te leggen en niet de uitvoering**. Hierbij zal de rollenbank fungeren als wegbelasting waardoor in functie van het ingestelde toerental en koppel een respectievelijke warmteoverdracht bekomen kan worden. Hierbij wordt voor elk ingesteld werkpunt een temperatuurmeting uitgevoerd aan de in- en uitlaat van het koellichaam.

$$R_{koel} = \frac{(T_{comp} - T_{koel,gem})}{Q_{koellichaam}} \quad (6)$$

$$R_{omgeving} = \frac{(T_{comp} - T_{omg})}{Q_{omgeving}} \quad (7)$$

Uit deze thermische prestatiekaart kunnen twee veranderlijke thermische weerstanden R_{koel} en $R_{omgeving}$ afgeleid worden. De thermische weerstand van het koelmedium zal een beter beeld geven van het temperatuurverschil tussen de vermogenscomponenten en het koelmedium t.o.v. de effectieve warmteopname van het koelwater bij een bepaald koeldebiet. De thermische weerstand aan de omgeving geeft een verband weer over het verloop van de werkingstemperatuur van de componenten in functie van de warmteontwikkelingen en warmteafgifte aan het koelsysteem.

Radiator:

Naast de koellichamen van de vermogenscomponenten behoren de geïntegreerde radiatoren van de koelcircuits ook tot de groep van de warmteafleiders. De functie van de radiatoren is om de warmte, opgenomen door het koelmedium ter hoogte van de vermogenscomponenten, terug af te geven aan de omgeving. Dit zal hoofdzakelijk mogelijk gemaakt worden door warmteoverdracht in de vorm van convectie aan de omgevingslucht. Voor een efficiënte regeling van de warmteafgifte aan de omgeving wordt er gebruik gemaakt van een luchtdebiet regeling geleverd door twee ventilatoren. De grootte van de radiator, meer specifiek het warmteoverdrachtsoppervlak aan luchtzijde, werd initieel bepaald door een vereenvoudigde labo opstelling. In deze opstelling werd het thermische vermogen (8) van een kleinschalige radiator bepaald door middel van de in- en uitgaande temperatuur van het koelmedium te meten over de radiator. Hierbij draaiden de ventilatoren op hun maximale stand en werd een debiet van het koelmedium ingesteld, bijvoorbeeld 7 L/min, wat overeenkomt met het maximale koeldebiet doorheen het batterijpakket.

$$Q_{\text{rad,koel}} = m_{\text{koel}} \cdot C_{p,\text{koel}} (T_{\text{koel,in}} - T_{\text{koel,uit}}) \quad (8)$$

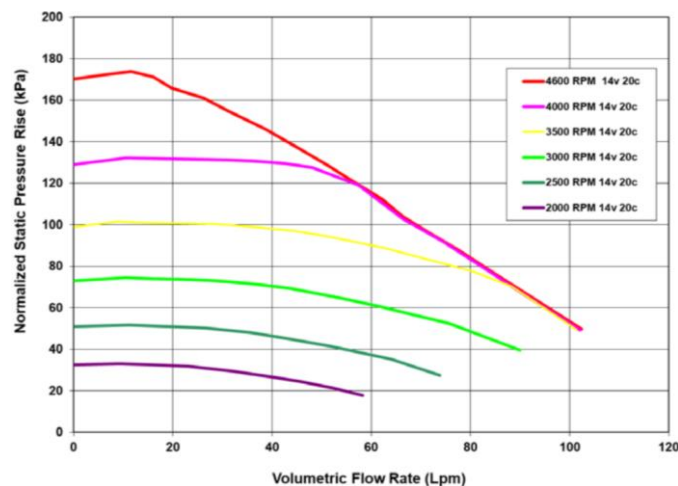
Aan de hand van de warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren, batterijpakket en de berekende warmteafgifte van de radiator, kunnen de benodigde afmetingen van de radiator, om een optimale koeling van de vermogenscomponenten te kunnen garanderen, bepaald worden.

$$Q_{\text{verlies,comp}} = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{ref}}} \cdot Q_{\text{rad}} \quad (9)$$

Na de bepaling van het benodigde warmteoverdrachtsoppervlak werd de radiator aangekocht en geïmplementeerd. In deze masterproef wordt er nog een stap verder gegaan door een thermisch model van deze radiator op te stellen. Ten gevolge van de beperkte eigenschappen van de gebruikte radiatoren zal deze laboratorische proefopstelling herhaald worden door gebruik te maken van een aangekochte reserve radiator. In tegenstelling tot de vorige proefopstelling zal hierbij de snelheid van beide vloeistofmediums bepaald worden om zo een goed thermisch gedrag te kunnen vastleggen. In de proefopstelling wordt er gebruik gemaakt van een Lauda koeling/verwarmingssysteem om de ingaande temperatuur van de radiator te regelen. De geregelde mediumtemperatuur zal de thermische belasting van respectievelijk de in-wielmotoren en het batterijpakket simuleren. Het effectieve debiet geleverd door de pomp van de Lauda kan ingesteld worden door de druk van de pomp te regelen. Het effectieve luchtdebiet geleverd door de ventilatoren evenals de in- en uitgangstemperatuur van het luchtmedium zal bepaald worden met een mobiele anemometer. Voor de volledigheid wordt zowel de LMTD als e-NTU methode in een volgend hoofdstuk aangehaald.

2.2.3 Vloeistof transport

Onder vloeistof transport behoren de pomp en ventilatoren. Het debiet geleverd door de pomp en ventilatoren voor een bepaald toerental zal afhangen van de drukval over het systeem. De pomp zal een drukval over de vermogenscomponenten, radiator, sensoren en leidingen moeten overwinnen. In functie van de leidingskarakteristiek (drukval) van het koelsysteem en het toerental van de pomp kan door gebruik te maken van de pompkarakteristiek aangeleverd door de fabrikant van de pomp, het vloeistofdebiet van de pomp bepaald worden. Door de integratie van een debietsensor in het koelcircuit kan deze bepaling vereenvoudigd worden omdat het debiet dan rechtstreeks door de sensor gemeten wordt. Onderstaande figuur geeft de pompkarakteristiek weer van het batterijpakket voor verschillende toerentallen (bron: Flanders Make).



Figuur 4: Prestatie curve pomp batterijpakket

Het nuttig vermogen van de pomp kan vervolgens bepaald worden aan de hand van de statische druk en het geleverde pompdebiet.

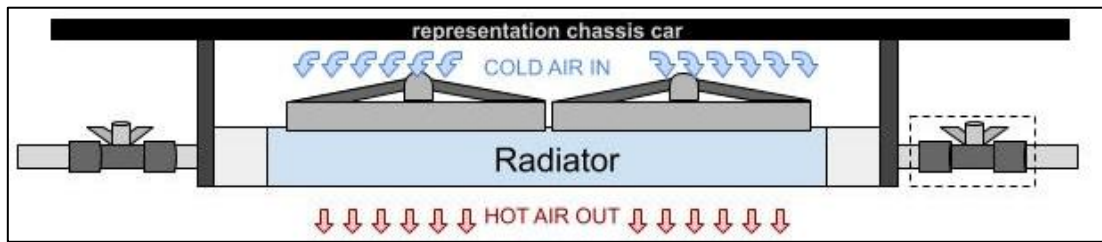
$$P_{\text{hyd,pomp}} = V_{\text{pomp}} \cdot \Delta P_{\text{pomp}} \quad (10)$$

Om in de toekomst het energieverbruik van het koelcircuit te optimaliseren zal ook een efficiëntiemap van de pomp opgesteld moeten worden. Hierbij zal aan de hand van een spanning- en stroommeting het elektrische vermogen van de pomp bepaald worden in functie van de aangelegde PWM spanning.

$$P_{\text{elek,pomp}} = U_{\text{PWM}} \cdot i \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{hyd,pomp}}}{P_{\text{elek,pomp}}} \quad (12)$$

Het principe waarbij het geleverde debiet afhangt van de drukval geldt ook voor de ventilatoren. Hierbij is in de huidige opstelling geen terugkoppeling voorzien van het geleverde luchtdebiet. Door de positie van de radiator en ventilatoren op de wagen te simuleren in een proefopstelling, zoals in onderstaande figuur wordt weergegeven, kan via een mobiele anemometer de snelheid evenals de uitgangstemperatuur van de luchtstroom bepaald worden. De gebruikte werkwijze voor de bepaling van de gegenereerde luchtstroom, evenals de temperatuurvariatie van de uitgaande lucht zal verder aangehaald worden in een volgend hoofdstuk.



Figuur 5: Vereenvoudigde voorstelling meetopstelling radiator

Gezien de bepaling van de luchtstroom over het frontale oppervlak van de radiator kan fluctueren zal een extra controleberekening noodzakelijk zijn. Hiervoor wordt de warmteoverdracht berekend aan de hand van temperatuursverandering ter hoogte van het koelmedium (8) gelijk gesteld aan de formulering van de warmteoverdracht (13) aan de luchtzijde. Hieruit kan vervolgens de massa van de luchtsnelheid afgeleid worden.

$$Q_{\text{rad,lucht}} = \dot{m}_{\text{lucht}} \cdot c_{p,\text{lucht}} (T_{\text{lucht,uit}} - T_{\text{lucht,in}}) \quad (13)$$

$$Q_{\text{rad,koel}} = Q_{\text{rad,lucht}} \quad (14)$$

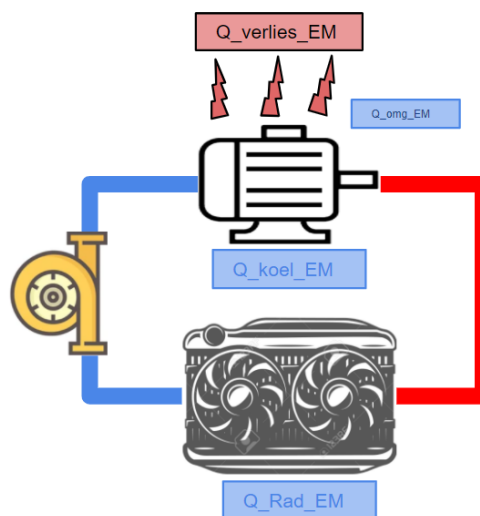
$$\dot{m}_{\text{lucht}} = \frac{Q_{\text{rad,koel}}}{c_{p,\text{lucht}} (T_{\text{lucht,uit}} - T_{\text{lucht,in}})} \quad (15)$$

2.3 Thermisch model in-wielmotor

Om een thermische model op te stellen van de in-wielmotoren is het noodzakelijk om over de gewenste thermische specificatie van deze elektromotoren te beschikken. Vanuit Flanders Make werden de efficiëntie datasheets van de fabrikant van de in-wielmotoren ter beschikking gesteld. Hieruit kan met behulp van een opgestelde rijcyclus, de warmteontwikkelingen in functie van de tijd bepaald worden. De stappen om dit te bekomen worden verder aangehaald in hoofdstuk 4.1.1. Hierbij zal in dit deelhoofdstuk meer aandacht worden gelegd op de bepaling van de warmteafgifte van elektromotor aan zijn intern koelkanalen en omgevingslucht. Hierbij maken de in-wielmotoren gebruik van geïntegreerde koelkanalen om de warmte te kunnen onttrekken. Om de omvang van deze warmteafgifte te kunnen simuleren is het noodzakelijk om respectievelijk, de warmteoverdrachtcoëfficiënten aan lucht- en koelmedium zijde te kunnen bepalen in functie van de variërende mediumsnelheden en temperaturen.

In een ideaal scenario kan deze warmteafgifte van de elektromotor aan het koelmedium bepaald worden door experimenteel het temperatuursverschil te meten van het koelmedium aan de in- en uitlaat van de koelkanalen van de elektromotor zoals toegelicht werd in hoofdstuk 2.2.2. Een alternatief hiervoor zou zijn om gebruik te maken van het bestaand CAD (Computer-aided design) model, om zo een CDF (Computational Fluid Dynamics) analyse uit te voeren. Om hieruit een goed resultaat te halen moet je dit bekijken als een masterproef op zich. Om toch een idee te krijgen van de omvang van de warmteafgifte aan het koelmedium en de omgeving, zal met behulp van empirische correlatieve formules gebaseerd op dimensieloze analyses, de respectievelijke warmteoverdrachtscoëfficiënten bepaald worden. Het voordeel van deze dimensieloze formules is dat deze gebruikt kunnen worden voor overeenstemmende geometrieën, waarbij de absolute afmetingen van de elektromotor mogen verschillen ten opzichte van deze in de literatuur gebruikte elektromotor. Hierbij zullen verschillende veronderstellingen en vereenvoudigingen doorgevoerd worden om een benadering te kunnen bekomen.

De uiteindelijke bedoeling is om m.b.v. het thermische model (Fig. 6) van de in-wielmotoren, de interne temperatuur van de in-wielmotoren te kunnen simuleren. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van een vereenvoudigd thermische massa model van de in-wielmotoren.



Figuur 6: Vereenvoudigd thermische massa model voor in-wielmotoren

$$m_{EM} \cdot C_{p,EM} \cdot \frac{dT_{EM}}{dt} = Q_{verlies,EM} - (Q_{koel,EM} + Q_{omg,EM}) \quad (16)$$

Waarbij m_{EM} , $C_{p,EM}$ en $\frac{dT_{EM}}{dt}$ respectievelijk de actieve massa, de specifieke warmte en de interne temperatuursverandering van de elektromotor weergeeft. Wanneer de warmteverliezen ($Q_{verlies,EM}$) van de elektromotor groter zijn dan de som van de warmteafgifte aan het koelmedium in de kanalen van het koellichaam ($Q_{koel,EM}$) en de warmteafgifte aan de omgeving ($Q_{omg,EM}$) zal de interne temperatuur van de elektromotor stijgen.

2.3.1 Warmteoverdachtcoëfficiënt luchtmedium

De warmteoverdracht van de in-wielmotoren aan de omgeving zal gebeuren via convectie. De warmtetransport via convectie is gecompliceerd gezien het van verschillende factoren afhankelijk is. De belangrijkste drie factoren worden hieronder opgesomd:

- ❖ de thermische eigenschappen van het luchtmedium $f(T, v_{\infty})$,
- ❖ de ruwheid van het warm oppervlak,
- ❖ de snelheid van het luchtmedium (laminair/turbulent).

$$Q_{omg,EM} = h \cdot A (T_{EM} - T_{\infty}) \quad (17)$$

Waarbij h , A , T_{EM} en T_{∞} respectievelijk de warmteoverdachtcoëfficiënt, het nat oppervlak, de oppervlak temperatuur van de elektromotor en de omgevingstemperatuur weergeeft. Voor de bepaling van de warmteoverdachtcoëfficiënt aan de luchtzijde zal gebruik worden gemaakt van het dimensieloze Nusselt getal. Onderstaande vergelijking geeft de Nusselt vergelijking, in functie van het Reynolds getal en Prandtl getal, van voorwerpen met een cilindrische vorm weer. Deze correlatie werd uitgewerkt door Churchill en Bernstein [8].

$$Nu_{cyl} = \frac{h \cdot D}{k} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4 Pr)^{2/3}]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (18)$$

Waarbij D , k , Re en Pr respectievelijk de buitenste diameter van de in-wielmotor, de thermische conductie van lucht, het Reynolds getal en de Prandtl getal van de omgevingslucht weergeeft.

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot D}{\mu} \quad (19)$$

Waarbij ρ , v_{∞} en μ respectievelijk de massadichtheid, de snelheid en de dynamische viscositeit van het luchtmedium weergeeft. Het Reynolds getal geeft de verhouding weer tussen de massastraagheidskrachten en de viscositeitskrachten van het medium.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (20)$$

Waarbij C_p de specifieke warmtecapaciteit van het luchtmedium voorstelt. Gezien het Prandtl getal voor onze toepassing enkel afhankelijk is van de omgevingstemperatuur en de fluctuatie in de omgevings-temperatuur een verwaarloosbare verandering voor het Prandtl getal tot gevolg heeft, zal er uitgegaan worden van constante waarden.

2.3.2 Warmteoverdrachtcoëfficiënt koelmedium

Vergelijkbaar met de bepaling van de warmteoverdrachtscoëfficiënten van respectievelijk de lucht-medium zijde kan voor de koelmedium zijde een soortgelijke bepaling van het Nusselt getal gebruikt worden. Aan de hand van deze warmteoverdrachtscoëfficiënten kan met behulp van een commercieel softwarepakket, bijv. Motor-CAD [9], de uiteindelijke temperatuursveranderingen in het koelmedium bepaald worden. Dit door de integratie van een onderliggend opgesteld thermische netwerk van enkelvoudige parameters.

Voor geforceerde convectie wordt typische de volgende convectie correlatie gebruikt. Waarbij a, b en c de constante zijn die worden toegevoegd.

$$Nu = a \cdot (Re)^b \cdot (Pr)^c = \frac{h \cdot L}{k} \quad (21)$$

De omgang van Re geeft een beter beeld over het type stroming van het koelmedium. Hierbij maken we een onderscheid tussen laminaire en turbulente stroming. Tussen de twee stromingen bevindt zich een transitiezone.

Afhankelijk van de geometrie van het inwendig koelkanaal kan het overeenkomende Nusselt getal bepaald worden voor een **laminaire stroming** [10].

Cirkelvormige kanaal:



$$Nu = 3.66 + \frac{0.065 \cdot (D/L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.04 \cdot ((D/L) \cdot Re \cdot Pr)^{2/3}} \quad (22)$$

Rechthoekig kanaal:



$$Nu = 7.49 - 17.02 \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + 22.43 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^2 - 9.94 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^3 + \frac{0.065 \cdot (D/L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.04 \cdot ((D/L) \cdot Re \cdot Pr)^{2/3}} \quad (23)$$

Ovaalvormige kanaal:



$$Nu = 7.54 + \frac{0.03 \cdot (D/L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.016 \cdot ((D/L) \cdot Re \cdot Pr)^{2/3}} \quad (24)$$

Voor een volledig ontwikkelde **turbulente stroming** ($3000 < Re < 10^6$) [11] kan het Nusselt getal bepaald worden aan de hand van onderstaande correlatie.

$$Nu = \frac{f}{8} \cdot \frac{(Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (25)$$

Waarbij de wrijvingsfactor f voor gladde leiding kan berekend worden met onderstaande vergelijking.

$$f = [0.79 \cdot \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (26)$$

2.4 Thermische model radiator

In de huidige situatie zijn enkel de volumetrische afmetingen van de aangekochte radiatoren gekend. Dit is niet voldoende om te beginnen aan de opstelling van het thermische model van de radiator. Zoals in eerdere secties aangehaald, zal een prestatiekaart van de radiatoren proefondervindelijk opgesteld moeten worden. Aan de hand van de mediumsnelheden en temperatuursveranderingen van de mediums ter hoogte van de radiator kan de warmteoverdracht van de radiator bepaald worden. Hiervoor worden twee methodes uitgewerkt, namelijk de LMTD en e-NTU methode. Een alternatief op de e-NTU is de P-NTU. Ten gevolge van de beperkte referenties van P-NTU methode zal deze niet in deze scriptie beschreven worden.

Na simulatie van de warmteoverdracht van de radiatoren kan met behulp van de prestatiekaart (UA) in functie van de ingangstemperatuur van het koel- en luchtmedium, de optimale mediumsnelheden bepaald worden. Hierbij zal de ingangstemperatuur van het vloeistofmedium aan de radiatoringang bepaald worden door de geïntegreerde temperatuursmeting van de geïnstalleerde sensor. De bepaling van de ingaande luchttemperatuur zal bekomen worden door de integratie van een extra temperatuursensor.

2.4.1 LMTD methode

Zoals al aangehaald in een voorafgaand hoofdstuk kan de warmteoverdracht van de radiator bepaald worden aan de kant van zowel het lucht- (13) als koelmedium (8) door de snelheid en de temperatuursverandering van de respectievelijke mediums in kaart te brengen. Deze formuleringen geven echter geen beeld over de bouw en het aanwezige warmteoppervlak van de radiator. Om hierover een beter beeld te krijgen kan er gebruik gemaakt worden van de LMTD (Logaritmic Mean Temperature Difference) [12] methode. Bij de bepaling van de warmteoverdracht van de radiator met behulp van de LMTD methode, wordt er een onderscheid gemaakt tussen drie verschillende doorgangen van de mediums namelijk gelijkstroom, tegenstroom en dwarsstroom. Beide radiatoren ingebouwd op de wagen maken gebruik van het dwarsstroom principe. Onderstaande formule geeft de warmteoverdrachtsbepaling van een warmtewisselaar weer waarbij de twee ongemengde mediums elkaar kruisen.

$$Q_{\text{rad}} = UA \cdot F \cdot \Delta T_{\text{LM,ts}} \quad (27)$$

Waarbij U de warmteoverdrachtcoëfficiënt, A het warmteoverdrachtsooppervlak, F dimensieloos correctiefactor en $\Delta T_{\text{LM,ts}}$ het logaritmische gemiddelde temperatuursverschil aangeeft.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_{\text{koel}} \cdot A_{\text{rad,int}}} + \frac{t_{\text{rad}}}{k_{\text{rad}}} + \frac{1}{\eta_0 \cdot h_{\text{lucht}} \cdot A_{\text{rad,ext}}} \quad (28)$$

Waarbij h_{koel} en h_{lucht} de respectievelijke warmteoverdrachtscoëfficiënten aan koel- en luchtmediumzijde, $A_{\text{rad,int}}$ en $A_{\text{rad,ext}}$ de respectievelijke warmteoverdrachtsooppervlakken aan koel- en luchtmediumzijde, t_{rad} de materiaal dikte en k_{rad} warmtegeleidbaarheid van de radiator weergeeft.

$$\Delta T_{\text{LM,ts}} = \frac{(T_{\text{koel,uit}} - T_{\text{lucht,in}}) - (T_{\text{koel,in}} - T_{\text{lucht,uit}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{koel,uit}} - T_{\text{lucht,in}}}{T_{\text{koel,in}} - T_{\text{lucht,uit}}}\right)} \quad (29)$$

Waarbij $T_{koel,in}$, $T_{koel,uit}$, $T_{lucht,in}$ en $T_{lucht,uit}$ respectievelijk de ingangstemperatuur van het koelmedium, de uitgangstemperatuur van het koelmedium, de ingangstemperatuur van het luchtmedium en de uitgaande temperatuur van het luchtmedium ter hoogte van de radiator aangeeft.

$$P = \frac{T_{lucht,uit} - T_{lucht,in}}{T_{koel,in} - T_{lucht,in}} = \frac{\Delta T_{lucht}}{\Delta T_{max}} \quad (30)$$

De waarde P geeft de temperatuur effectiviteit ter hoogte van de koude zijde van de warmtewisselaar aan.

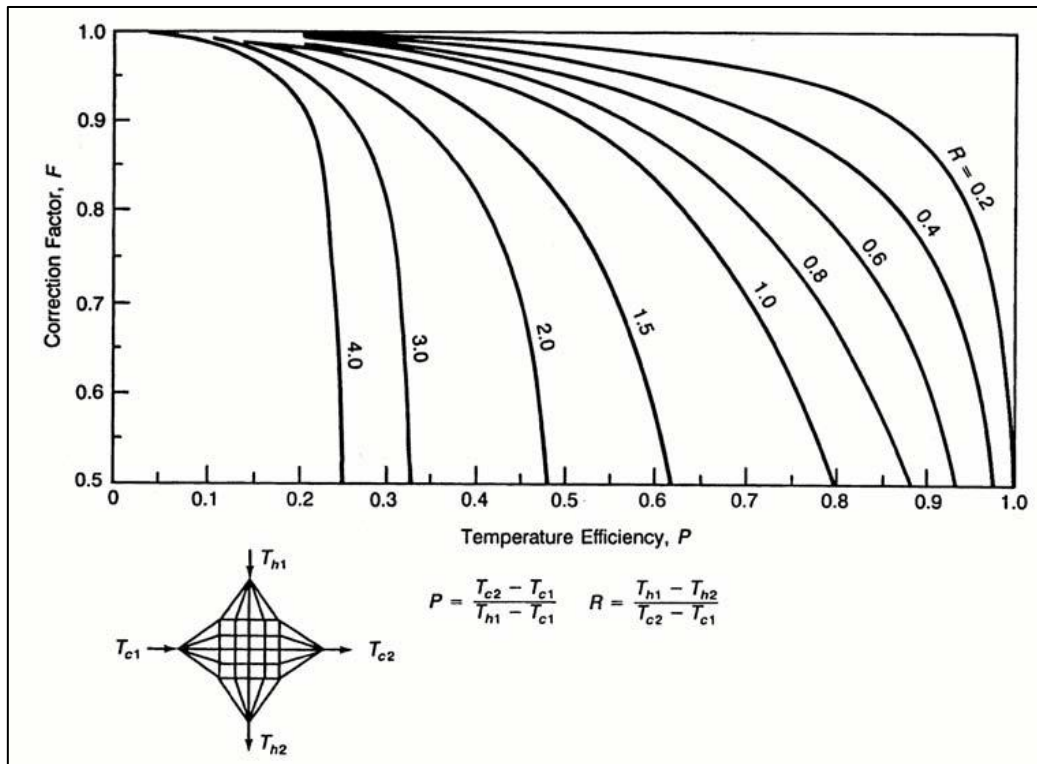
$$R = \frac{C_{lucht}}{C_{koel}} = \frac{\Delta T_{koel}}{\Delta T_{lucht}} \quad (31)$$

De waarde R geeft de verhouding van het thermische capacitef debiet van de lucht t.o.v. het koel-vloeistof medium weer.

Om een accuratere berekening te bekomen wordt een correctiefactor F toegevoegd. Deze factor is een maat voor het verschil van een dwarsstroom warmtewisselaar ten opzichte van een tegenstroom warmtewisselaar.

$$F = f(P, R, \text{stromingschikking}) \quad (32)$$

Waarbij F dimensieloos is en afhankelijk is van de temperatuur effectiviteit P, de capaciteitsverhouding R en de stromingsrichting van de warmtewisselaar. Onderstaande figuur [12] geeft de correctiefactor F weer van een warmtewisselaar waarbij de mediums elkaar ongemengd kruisen (dwarsstroom principe).



Figuur 7: F-factor voor warmtewisselaar waarbij mediums elkaar ongemengd kruisen [12, p52]

2.4.2 e-NTU methode

Om de ordegrrootte betreffende de warmteafgifte van de radiator te bepalen kan er ook gebruik gemaakt worden van de e-NTU methode [13]. In tegenstelling van LMTD methode wordt naast de temperatuurswaarde van het ingangsmidum ook rekening gehouden met de snelheid waarmee het koelmiddel en de lucht zich voortbewegen doorheen de radiator.

In eerste instantie bepalen wij het thermische capaciteits debiet , C_{lucht} voor het lucht- en C_{koel} voor het koelmiddel. Indien $C_{lucht} < C_{koel}$ nemen wij aan dat C_{min} gelijk is aan C_{lucht} , anders visa versa.

$$C_{lucht} = \dot{m}_{lucht} \cdot C_{p,lucht} \quad (33)$$

$$C_{koel} = \dot{m}_{koel} \cdot C_{p,koel} \quad (34)$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (35)$$

Vervolgens wordt de bovenlimiet op de warmtewisselaar berekend. Met behulp van het werkelijke warmteverlies kan de effectiviteit van de radiator bepaald worden.

$$q_{max} = C_{min} (T_{koel,in} - T_{lucht,in}) \quad (36)$$

$$q = C_{koel} (T_{koel,in} - T_{koel,uit}) \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (38)$$

Aan de hand van de waarden van de effectiviteit [14] kan de overeenkomende NTU waarden bepaald worden.

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r (NTU)^{0.78}] - 1 \} \right] \quad (39)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (40)$$

Met behulp van de NTU waarden en de capaciteitsratio (C_r) kan de globale conductantie (UA) bepaald worden. De UA-waarde is het warmtevermogen dat in de warmtewisselaar overgedragen wordt bij een gemiddelde temperatuursverschil van één kelvin tussen de twee fluidumstromen.

$$UA = NTU \cdot C_{min} \quad (41)$$

Aan de hand van de formule (28) kan er afgeleid worden dat de globale conductantie afhankelijk is van de convectie coëfficiënten aan de lucht en koelmiddel zijde. Zoals eerder aangehaald zullen deze afhankelijk zijn van de volumesnelheden van de mediums. Hierdoor kan er een verband opgesteld worden tussen de volume snelheden en de warmteoverdracht van de radiator.

3 Huidige koelsysteem

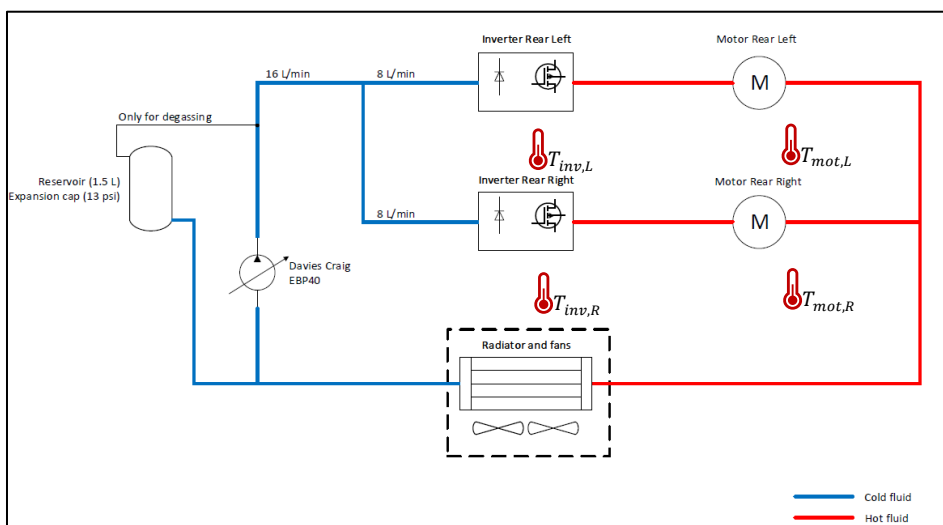
In dit hoofdstuk zullen beide ingebouwde koelcircuits besproken worden. Zoals in de projectopzet is beschreven zal deze masterpoef zich in eerste instantie toeleggen tot de verificatie van de huidige geïnstalleerde koelcircuits om indien nodig enkele essentiële aanpassingen na simulatie door te voeren. Hierbij wordt er nagegaan of elk koelcircuit genoeg koelvermogen heeft om de in-wielmotoren of het batterijpakket in hun gewenst temperatuurgebied te houden, onafhankelijk van de verschillende werkingscondities (bijv. warm klimaat, heuvelachtige omgeving). Om een beter beeld te krijgen van de werking van de huidige circuits zullen de componenten, sensoren en de regeling beknopt besproken worden.

In beide koelcircuits kunnen de benodigde componenten opgesplitst worden in drie groepen met elk hun specifieke functie. Het primaire onderdeel in het koelcircuit is het koellichaam, welke het mogelijk maakt om de ontwikkelde warmte van de vermogencomponenten af te geven aan het koelmiddel. Vervolgens wordt er gebruik gemaakt van een radiator om de opgenomen warmte van het koelmiddel af te geven aan de omgevingslucht, waarbij de warmteoverdracht hoofdzakelijk gebeurt via convectie. Om een efficiëntere koeling van het koelmiddel te bekomen, worden telkens twee ventilatoren bevestigd, welke de luchtstroom langs de vinnen van de radiator regelen. Tenslotte zorgt de elektrisch regelbare pomp ervoor dat het koelmiddel zich met een bepaald debiet kan voortbewegen.

Het koelmiddel waarmee gewerkt wordt bestaat voor 50 procent uit ethyleen glycol (antivries) en voor 50 procent uit gedemineraliseerd water. Deze combinatie wordt vaak gebruikt in de automobiel-industrie. Door de toevoeging van het antivries zal de stollingstemperatuur van de vloeistof verlaagd worden. Enig nadeel van de toevoeging van het antivries is de afname van de warmtecapaciteit van het koelmedium, vergeleken met een zuivere water oplossing. Hierdoor zullen de componenten minder efficiënt gekoeld worden.

3.1 Koelcircuit in-wielmotoren

De huidige opstelling van het koelcircuit van de in-wielmotoren wordt in onderstaande figuur weergegeven (Bron: Flanders Make).



Figuur 8: Opstelling koelcircuit in-wielmotoren

Gezien het compacte ontwerp en de warmteontwikkelingen van de elektromotoren zal luchtkoeling niet efficiënt genoeg zijn. Hierdoor is er vanuit de motorfabrikant gekozen om de componenten met behulp van een ingewerkt koelkanaal en bijhorend koelmedium te koelen. Om een efficiënte werking van de in-wielmotoren te garanderen wordt een minimumdebiet van 7 L/min aanbevolen, waarbij de temperatuur van het koelmiddel aan de ingang niet hoger mag zijn dan 65 °C. Het toerental van de ventilatoren en de pomp worden elk afzonderlijk geregeld d.m.v. Pulsebreedtemodulatie (PBM). Hierbij worden drie verschillende standen gedefinieerd: (Bron: Flanders Make)

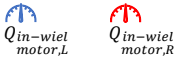
Tabel 1: Regel standen koelcircuit in-wielmotoren

Stand	PBM pomp	PBM ventilatoren
1	80 %	20 %
2	85 %	75 %
3	100 %	100 %

Uitgaande dat de maximale aangelegde spanning (stand 3) 14 Volt bedraagt, kunnen de overeenkomende gemoduleerde spanningen voor stand 1 en 2 bepaald worden. De verandering van de gemoduleerde spanning maakt het mogelijk om het toerental van de pomp en ventilatoren te regelen. Hierdoor zal een respectievelijk vloeistof- en luchtdebiet bekomen worden. De effectieve waarden van deze debieten kan in de huidige opstelling niet bepaald worden aangezien er geen terugkoppeling is. Hiervoor zullen extra sensoren bijgeplaatst moeten worden.

3.1.1 Sensoren

In de huidige opstelling is er de mogelijkheid om de temperatuurwaarden van respectievelijk de motor en inverter (T_{mot} , T_{inv}) uit te lezen via de CAN bus. Wanneer de temperatuur van de vermogenscomponenten een bepaalde maximumwaarde overschrijdt zal de inverter in *fail safe mode* schakelen om schade aan de componenten te voorkomen. Omwille van deze reden wordt een veiligheidsmarge genomen waardoor de maximum temperatuur voor de in-wielmotoren vastgelegd is op 60°C. Om een beter beeld van het gedrag van het koelcircuit te verkrijgen zullen enkele essentiële sensoren aangekocht moeten worden om vervolgens te integreren in het koelcircuit. Hierbij zouden onderstaande sensoren de thermische relaties moeten blootleggen. De gekozen vortex flow sensor bevat naast een debietmeting ook een temperatuursmeting van het medium. De positie van deze sensor kan teruggevonden worden in de volgende figuur

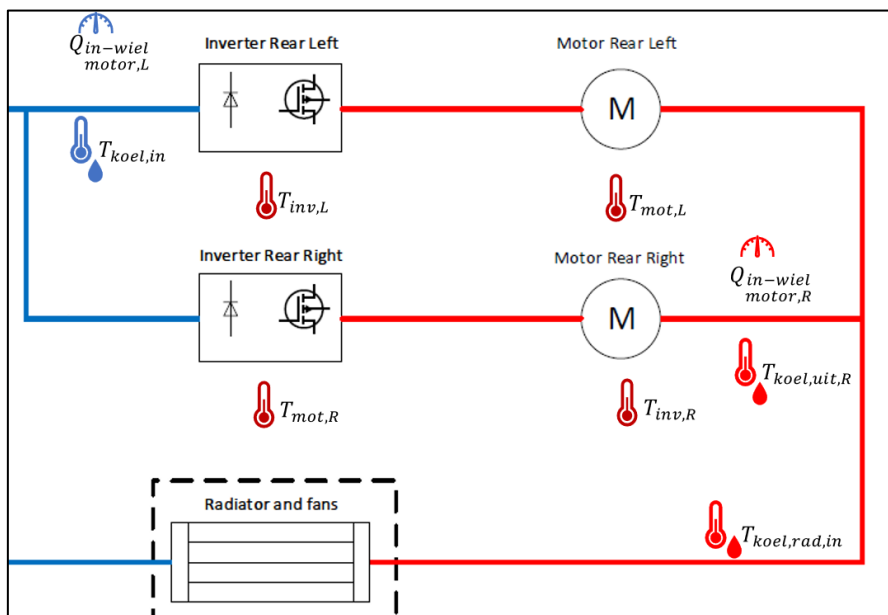
- Debietmeting:**


Door de integratie van debietsensoren kan het totale geleverde debiet van de pomp bepaald worden. Gezien het respectievelijke debiet van elke aftakking afhankelijk is van de drukval over de vermogenscomponenten, worden beide paralleltakken voorzien van een debietmeting. Een mogelijk drukverschil zal vervolgens ook de aanleiding geven voor een verschillende warmteafgifte aan het koelmiddel, aangezien dit in functie is van vloeistofdebiet. Hierdoor zou één van de twee in-wielmotoren minder efficiënt gekoeld worden. Door de integratie van de debietsensoren zou bovenstaand vermeld gedrag gemonitord kunnen worden, wat een optimalere regeling van het systeem mogelijk maakt.

▪ **Temperatuurmeting → in- en uitlaat in-wielmotoren:**



Voor de bepaling van de warmteafgifte van de vermogencomponenten aan het koelcircuit evenals de warmteafgifte van de radiator aan de omgeving is het noodzakelijk om het temperatuursverschil van het koelmedium over de in- en uitgang van de in-wielmotoren en radiator te kennen in functie van het ingestelde vloeistofdebiet. Dit zal uiteindelijk leiden tot de temperatuur monitoring van de vermogenscomponenten in de tijd. Hierbij is er gekozen om drie temperatuursensoren te plaatsen. Sensor $T_{koel,in}$ zal de ingaande temperatuur voor de in-wielmotoren inlezen, welke voor beide motoren hetzelfde is. Door een vortex flow sensor te plaatsen aan de uitgang van de rechtse in-wielmotor kan ook rechtstreeks de respectievelijke temperatuur van het koelmedium bepaald worden. Na de fusie van de 2 parallel vertakkingen kan door integratie van een 3^{de} vortex flow sensor met geïntegreerde temperatuurmeting de effectieve mediumtemperatuur lopende naar de radiator bepaald worden. Hieruit kan tenslotte ook de uitgaande temperatuur van de linkse in-wielmotor afgeleid worden.



Figuur 9: Koelcircuit in-wielmotoren implementatie vortex sensoren
(Bron: Flanders Make)

De eigenschappen van de gebruikte vortex sensor worden hieronder weergegeven.



Figuur 10: Eigenschappen Huba vortex flow sensor [15]

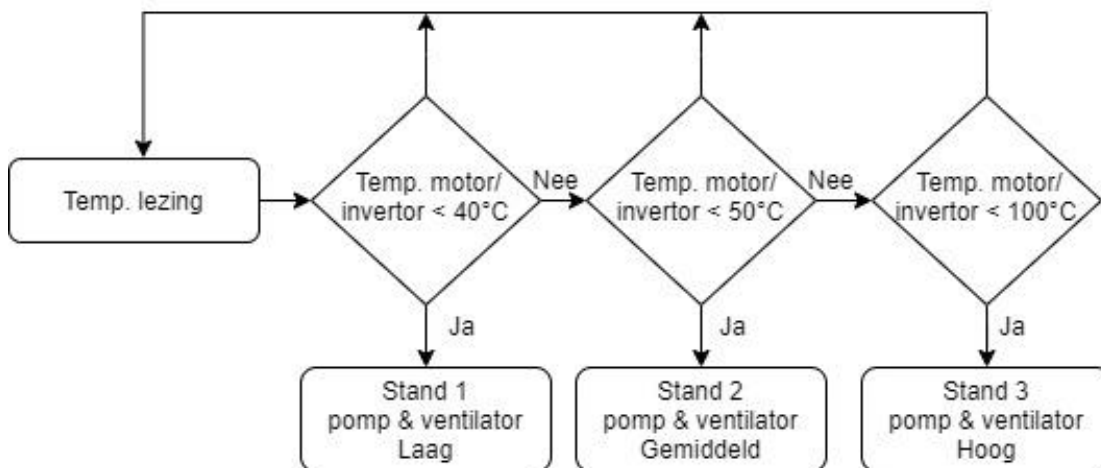
Temperatuur (°C)	Meetprincipe	PT 1000 (RTD)
	Meetbereik	-40 +125 °C
	berekeningswijze	$T = \frac{150^{\circ}C}{10 V} \cdot U_{out,t} - 25^{\circ}C$
Debiet (L/min)	Meetprincipe	Piëzo-elektrisch element
	Meetbereik	1,8 32 L/min
	berekeningswijze	$Q = 3,2 \cdot U_{out,t}$

3.1.2 Regelorgaan

Omwille van de huidige beperkte aanwezigheid van sensoren in het koelsysteem gebeurt de sturing via een state flow principe. Onderstaande figuur geeft een vereenvoudigde weergave van deze regeling. Aan de hand van de temperatuurlezing van de motoren en invertoren via CAN bus kunnen de ventilatoren met behulp van PBM geregeld worden. Hierbij zal het luchtdebiet bepaald worden in functie van de temperatuurmeting van de componenten. Initieel zal stand 1 ingeschakeld zijn, welke een overeenkomend minimaal debiet van de ventilatoren opgeeft. Wanneer de temperatuur van de motoren/invertoren toeneemt en de vooropgestelde temperatdrempel van respectievelijk 40 en 50 graden Celsius overstijgt zal de stand verhoogd worden. In stand 3 zullen de ventilatoren hun maximaal debiet leveren. Zoals eerder aangehaald zou de optimale werkingstemperatuur beperkt moeten worden tot 60°C om een goede werking van de in-wielmotoren te kunnen garanderen.

Wanneer er op één van de in-wielmotoren of invertoren een temperatuur hoger dan 60 °C wordt gemeten, zal de koppelvraag voor beide elektromotoren gecontroleerd naar nul gezet worden door de centrale controle unit.

De gewenste stand (PBM) in functie van de temperatuur is in de praktijk geïmplementeerd als een lookup tabel zodat deze eenvoudig aanpasbaar is. Dit principe wordt onderstaand weergegeven.

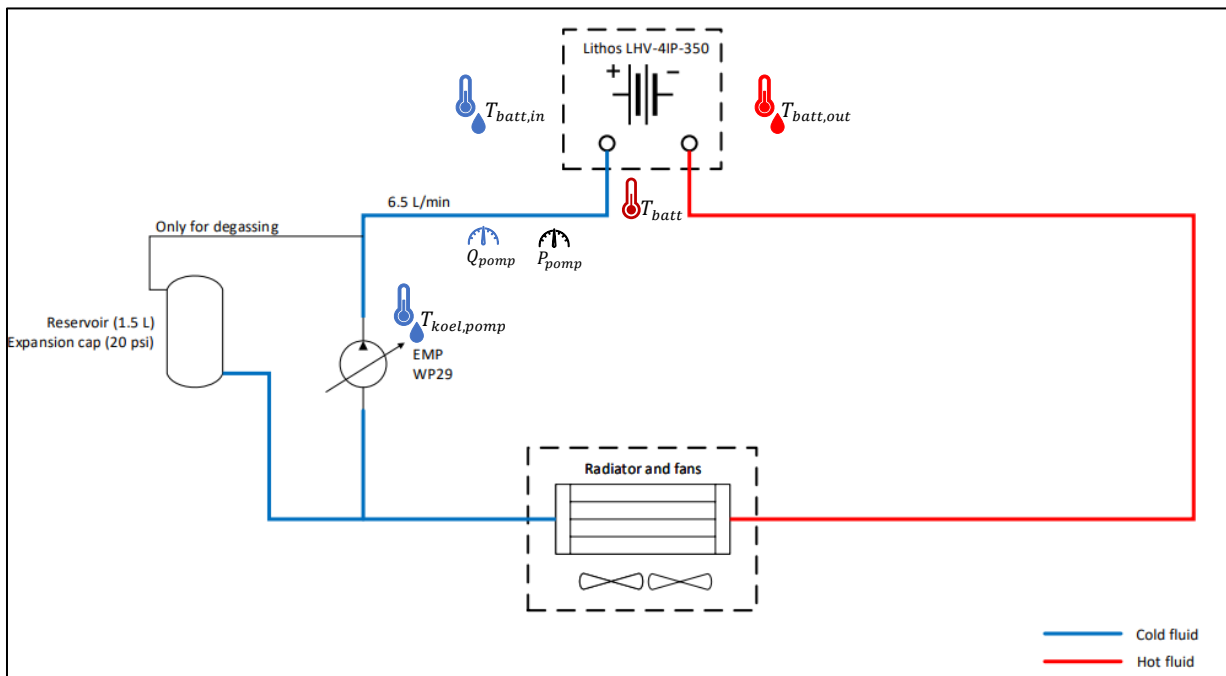


Figuur 11: Vereenvoudigde voorstelling regeling pomp en ventilatoren

Na de implementatie van de eerder aangehaalde sensoren geeft dit de mogelijkheid om de oorspronkelijke aansturing van de pomp en ventilatoren te optimaliseren. Door de toevoeging van de debietsensoren kan het effectieve geleverde vloeistofdebiet van de pomp uitgelezen worden. Hierdoor kan een traploze regeling van de pomp en ventilatoren tot de mogelijkheid behoren, mits de PBM aansturing ook traploos gemaakt wordt. Deze regeling zal niet enkel gunstig zijn voor het energieverbruik van het systeem maar ook voor een optimale regeling zorgen voor de temperatuur van de vermogencomponenten.

3.2 Koelcircuit batterijpakket

De opstelling van het koelcircuit van het batterijpakket, weergegeven in onderstaande figuur, is vergelijkbaar met dat van de in-wielmotoren. Hierbij is er vanuit de batterijpakketproducent ook gekozen voor koelmediumkoeling waarbij een minimum debiet van 4 L/min wordt aanbevolen. Daarnaast mag de temperatuur van het koelmiddel aan de ingang van het batterijpakket de waarde van 55 °C niet overschrijden. Het rendementsverlies van het batterijpakket kan bepaald worden met behulp van de meegeleverde efficiëntietabellen, die de interne weerstand van het batterijpakket aangeven. Deze weerstandswaarden zijn bepaald aan de hand van de State-of-Charge (SOC) en de temperatuur van het batterijpakket. Hieruit volgt dan de warmteontwikkeling in functie van de batterijtoestand en het geleverd vermogen. Gezien de relatief grote drukval over het batterijpakket ten opzichte van de in-wielmotoren moest dit gecompenseerd worden met een krachtigere centrifugaalpomp. Daarnaast kunnen zowel de ventilatoren als de pomp traploos aangestuurd worden om zo een optimale regeling van het koelcircuit mogelijk te maken. (Bron: Flanders Make)



Figuur 12: Opstelling koelcircuit batterijpakket (Bron: Flanders Make)

3.2.1 Sensoren

Zoals figuur 12 aangeeft zijn vanuit Flanders Make al enkele essentiële sensoren geplaatst. Dit hoofdzakelijk om het batterijpakket te beschermen tegen te hoge drukken en debieten. Hierbij is de regelbare centrifugaalpomp voorzien van een ingewerkte temperatuursensor ($T_{koel,pomp}$) waardoor het pompdebiet geregeld kan worden in functie van de ingangstemperatuur van het koelmiddel. Daarnaast is aan de ingang van het batterijpakket zowel een debiet (Q_{pomp}) als druksensor (P_{pomp}) bijgeplaatst zodat de pomp het maximale toelaatbare debiet van 7 L/min en druk van 1 bar voor het batterijpakket niet zou overschrijden. Daarnaast bevat het batterijpakket ook een inlaat- en uitlaatemperatuursmeting van het koelmiddel. Deze metingen kunnen uitgelezen worden via de CAN bus. Hierdoor zullen er geen extra sensoren geïntegreerd moeten worden om de thermische karakteristiek van het koelcircuit proefondervindelijk te karakteriseren.

3.2.2 Regelorgaan

Het toerental van de pomp van het batterijpakket wordt door een PI-controller geregeld via CAN bus. De ingang van deze controller is een debietsetpunt in L/min. De uitgang van deze controller is een gewenst pomptoerental. Om een hoog instroomdebiet door een snel stijgend pomptoerental te voorkomen, wordt de pomp eerst aangestuurd naar het basistoerental van 1200 RPM. Zodra het debiet de waarde van 2,5 L/min bereikt wordt er naar het gewenste setpunt geregeld. Wanneer het debiet de waarde van 7 L/min overschrijdt of de vloeistofdruk hoger wordt dan 1 bar (terwijl het debiet setpunt lager ingesteld staat), zal de pomp automatisch gedeactiveerd worden.

De ventilatoren voor de batterijkoeling worden geactiveerd zodra de koelpomp actief is. Wanneer de pomp niet actief is zijn de ventilatoren eveneens uitgeschakeld. De ventilatoren worden via een PWM signaal traploos aangestuurd, gaande van 0 tot 100 %. Standaard wordt het gewenste PWM signaal bepaald vanuit een lookup tabel met als ingang de temperatuur van het batterijpakket.

Ref. Flanders Make

4 Simulatie warmteontwikkelingen

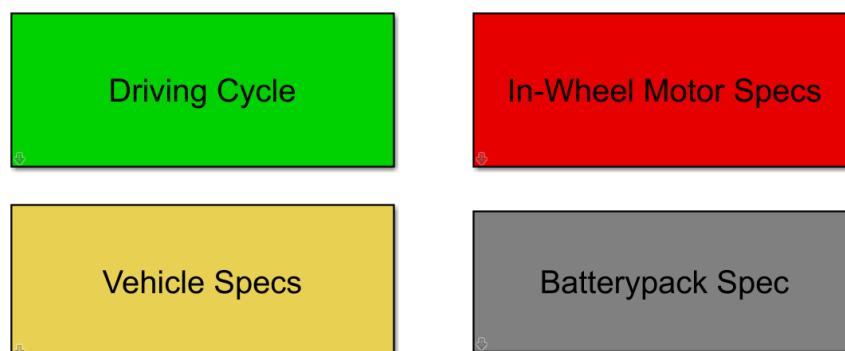
Door middel van een vereenvoudigd aandrijfmodel kunnen de warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren en het batterijpakket in functie van een opgelegde rijcyclus bepaald worden. Aan de hand hiervan kan eveneens het maximale benodigde koelvermogen van het koelcircuit bepaald worden. Gezien het benodigde koelvermogen zal afhangen van de warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten, is het noodzakelijk om het thermische gedrag van deze componenten te simuleren.

Ten gevolge van de beperkte kennis betreffende het modelleren van de aandrijflijn van een hybride wagen is er vertrokken van een algemeen Simulink model [16], vrijgegeven door de Universiteit Chalmers te Zweden. In dit model zal het mechanische vermogen van de wagen, evenals het elektrisch vermogen van het batterijpakket, gesimuleerd worden in functie van een opgestelde rijcyclus. Dit gebeurt aan de hand van enkele fysieke parameters van de wagen. Hierbij wordt het snelheidsprofiel van de geselecteerde rijcyclus omgezet naar een overeenkomend koppel en rotatiesnelheid van de in-wielmotoren. Door de implementatie van de werkelijke efficiëntietabellen van de in-wielmotoren en de interne weerstandwaarden van het batterijpakket kunnen de warmteontwikkelingen van deze vermogencomponenten in functie van de tijd bepaald worden.

Om een goed beeld te verkrijgen over het benodigde vermogen van het koelsysteem is de simulatie uitgevoerd op twee verschillende rijcyclussen. Aan de hand van de gemiddelde en maximale warmteontwikkelingen van de vermogencomponenten kunnen de afmetingen van de radiator, ventilatoren en pomp ingeschat worden.

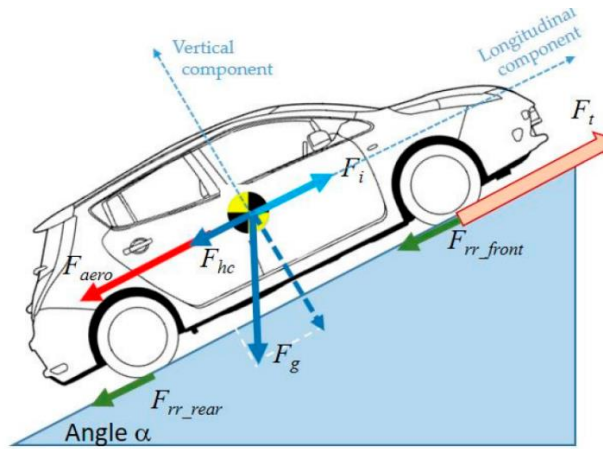
4.1 Aandrijflijn model

Het aandrijfmodel wordt onderverdeeld in vier submodellen. In eerste instantie moet de gewenste rijcyclus geselecteerd worden. Vervolgens zet het voertuigmodel het verkregen snelheids- en versnellingsprofiel van de wagen om naar een overeenkomend nuttig koppel en respectievelijke rotatiesnelheid van de in-wielmotoren.



Figuur 13: Aandrijflijn model hybride wagen

Om het benodigde koppel [17] te kunnen bepalen moet de totale aandrijfkracht (F_t) berekend worden. Deze bestaat uit een som van verschillende inwerkende krachten zoals de rolweerstand (F_{rr}), luchtweerstand (F_{aero}), massastraagheid (F_i) en de zwaartekracht (F_{hc}).



Figuur 14: Inwerkende krachten op een wagen [17, p4]

$$F_{aandrijf} = F_{rolweerstand} + F_{luchtweerstand} + F_{massatraagheid} + F_{zwaartekracht} \quad (42)$$

De berekening van de rolweerstand wordt onderstaand weergegeven. Waarbij m_{wagen} , a_g , C_{rol} en α de totale massa van de wagen (Kg), de valversnelling (m/s^2), de rolweerstandcoëfficiënt en de hellingsgraad ($^\circ$) van de weg weergeeft.

$$F_{rolweerstand} = m_{wagen} \cdot a_g \cdot C_{rol} \cdot \cos(\alpha) \quad (43)$$

De impact van de luchtweerstand is voornamelijk afhankelijk van de snelheid waarmee de wagen zich voortbeweegt. Waarbij ρ_{lucht} , C_{lucht} , A_f en v de luchtmassadichtheid (Kg/m^3), de luchtweerstandcoëfficiënt, het frontale oppervlak (m^2) van de wagen en de snelheid (m/s) van de wagen weergeeft.

$$F_{luchtweerstand} = 0,5 \cdot \rho_{lucht} \cdot C_{lucht} \cdot A_f \cdot v^2 \quad (44)$$

De massastraagheid geeft de eerste wet van Newton weer, de traagheidswet. De massastraagheidskracht werkt in op de wagen wanneer de wagen een positieve of negatieve versnelling ondergaat.

$$F_{massatraagheid} = m_{wagen} \cdot \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} \quad (45)$$

De zwaartekracht werkt in wanneer de wagen zich over een hellend profiel beweegt. De gebruikte rijcyclussen uitgevoerd op de simulatie beschikte niet over een hellingsprofiel waardoor de zwaartekracht geen rol speelde in de bepaling van de totale aandrijfkracht.

$$F_{zwaartekracht} = m_{wagen} \cdot a_g \cdot \sin(\alpha) \quad (46)$$

Met behulp van de gekende wieldiameter van de wagen en de totale tractiekracht kan het nuttig koppel berekend worden.

$$T_n = F_{aandrijf} \cdot \frac{d_{wiel}}{2} \quad (47)$$

De effectieve waarden van de gebruikte constanten zoals bijvoorbeeld de rol- en luchtweerstandcoëfficiënt kunnen teruggevonden worden in tabel drie.

4.1.1 In-wielmotor model

In het elektromotor model wordt het nuttig koppel en rotatiesnelheid van de elektromotoren omgezet naar het totaal geleverde vermogen van de in-wielmotoren. Om het benodigd elektrische vermogen te bepalen moeten de (warmte)verliezen van de elektromotoren in rekening worden gebracht. Gezien de efficiëntietabellen van de in-wielmotor fabrikant enkel het systeemrendement (elektromotor en inverter) aangeven, zal in het verdere verloop gesproken worden van het systeemrendement van de in-wielmotor. Uit onderzoek [18] blijkt dat het rendement van een typische gebruikte inverter rond de 95 procent ligt. Hierdoor zal het systeemrendement vooral bepaald worden door de efficiëntie van de elektromotoren. Daarnaast zal het elektrische vermogen verschillend zijn tijdens tractie en regeneratie. Om hier rekening mee te houden zal het teken van het mechanische vermogen bepalen of de elektromotor als motor of generator werkt. Een positieve waarde van het mechanische vermogen leidt tot motor werking, een negatieve waarde betekent generator werking.

Het mechanische vermogen ($P_{\text{mech,EM}}$ in W) wordt bepaald in functie van het nuttig koppel (T_n in N) en de rotatiesnelheid (ω in rad/s) van de rotor.

$$P_{\text{mech,EM}} = T_n \cdot \omega \quad (48)$$

In het geval van motor werking zal het benodigd elektrische vermogen berekend worden door het mechanische vermogen te delen door het systeemrendement.

$$P_{\text{elek,EM}} = \frac{T_n \cdot \omega}{\eta_{\text{sys}}} ; \eta_{\text{sys}}(T_n, n) \quad (49)$$

In het geval van generator werking zal het geleverde elektrische vermogen bepaald worden door het mechanische vermogen te vermenigvuldigen met het systeemrendement.

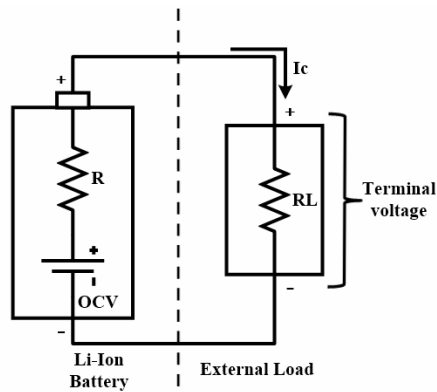
$$P_{\text{elek,EM}} = T_n \cdot \omega \cdot \eta_{\text{sys}} ; \eta_{\text{sys}}(T_n, n) \quad (50)$$

4.1.2 Batterijpakket model

Een vergelijkbaar model is opgesteld voor het batterijpakket. Hierbij is het model opgebouwd aan de hand van de elektrochemische karakteristiek van het batterijpakket [19], waarbij het opladen van het batterijpakket is aangegeven met een negatieve waarde voor de stroom. Het ontladen wordt weergegeven door een positief teken van de geleverde stroom. Onderstaande formule geeft de bepaling van de effectieve spanning aan de contactpunten van het batterijpakket weer.

$$U_{\text{batt,term}} = U_{\text{batt,OCV}} - I \cdot R_{\text{int}} \quad (51)$$

Voor de bepaling van de nullast spanning ($U_{\text{batt,OCV}}$) en de interne weerstand (R_{int}) van het batterijpakket wordt er gebruik gemaakt van look-up tabellen, aangeleverd door de batterijfabrikant. Hierbij zullen zowel de nullast spanning als de interne weerstand bepaald worden in functie van de State-Of-Charge (SOC) en de inwendige temperatuur van het batterijpakket.



Figuur 15: Vereenvoudigd elektrische circuit Li-ion batterijpakket [19, p127]

Voor de bepaling van de SOC van het batterijpakket is er gebruik gemaakt van de Coulomb telling methode. Hierbij wordt er vertrokken van een initiële waarde van de State-Of-Charge om vervolgens, door middel van de integratie van de geleverde stroom op de nominale capaciteit van het batterijpakket, een nieuwe State-Of-Charge te bekomen.

$$SOC(t_2) = SOC(t_1) + \frac{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt}{Ah_{nom}} \times 100 \quad (52)$$

4.1.3 Fysische parameters

Vooraleer de simulatie wordt uitgevoerd aan de hand van een geselecteerde rijcyclus, zullen eerst enkele noodzakelijke parameters aangevuld moeten worden. De onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende parameters welke worden meegenomen in het Simulink model.

Tabel 3: Specificaties Range Rover Hybride [20]

Specificaties voertuig		Specificaties batterijpakket		Specificaties in-wielmotoren	
Totale massa [kg] m_{wagen}	1913	Nominale capaciteit [Ah]	36	Continue koppel [Nm]	650
Frontaal oppervlak [m^2] A_f	2.65	Nominale spanning [V]	350	Maximaal koppel [Nm] < 10 sec	1500
Luchtweerstand coëfficiënt C_{lucht}	0.36	Continue ontladstroom [A]	180	Continue vermogen [kW]	65
Rolweerstand coëfficiënt C_{rol}	0.015	Maximale ontladstroom [A] <30 sec	360		
Diameter wiel [m] d_{wiel}	0.728				

Zoals bovenstaande tabel aangeeft is de stroomsterke welke het batterijpakket kan leveren beperkt. In eerste instantie wordt er nagegaan of de benodigde stroomsterke, over een periode van 30 seconden, binnen de aanvaardbare waarde van 360 Ampère blijft.

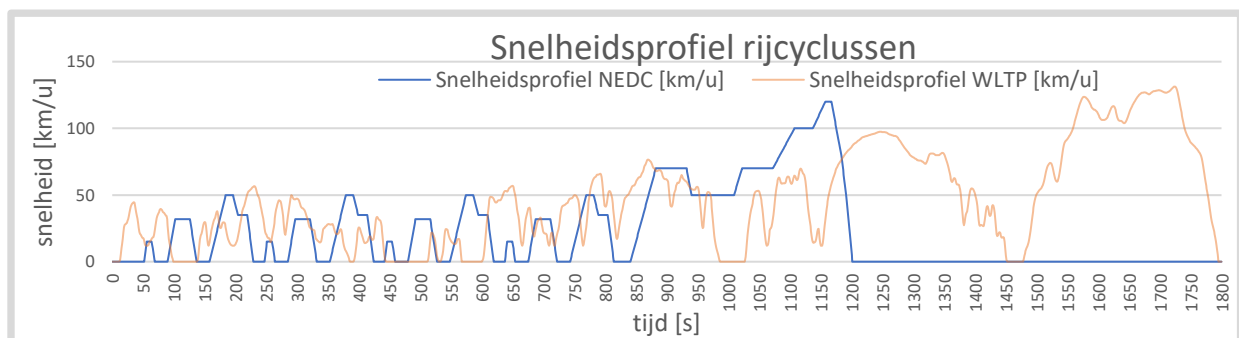
Na de simulatie van beide rijcyclussen, kon er vastgesteld worden dat het benodigd vermogen volledig geleverd kon worden door de elektrische aandrijving van de wagen. In de praktijk zal in deze situatie, bij een hoog benodigd mechanisch vermogen, de verbrandingsmotor, de elektromotoren ondersteunen om een hoog geleverd koppel te bekomen. Hetzelfde principe geldt ook voor het regeneratief remmen, waarbij de elektromotor overgaat naar generatorwerking. Hierdoor zal deze fungeren als elektrische rem om zo de snelheid van de wagen te laten afnemen. Indien de geleverde stroom de maximale laadstroom van het batterijpakket gaat benaderen of wanneer het batterijpakket volgeladen is, zal het resterend remvermogen geleverd worden door de hydraulische remmen.

4.2 Rijcyclussen

Voor de bepaling van de gemiddelde en maximale warmteverliezen van de vermogencomponenten zijn twee verschillende rijcyclussen gesimuleerd. Deze rijcyclussen worden opgelegd aan de autoconstructeurs voor de bepaling van het brandstofverbruik en de emissies van de wagen. In het aandrijflijn model worden deze rijcyclussen gebruikt om het benodigd aandrijfvermogen van de wagen te simuleren, waaruit vervolgens de warmteverliezen afgeleid worden.

Hierbij is er gekozen voor de NEDC (New European Driving Cycle) en de WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) rijcyclus [21]. Vanaf de jaren '80 werd er gebruik gemaakt van de NEDC laboratorium testprocedure, gebaseerd op een theoretisch rijprofiel. Door de ontwikkelingen in de autotechniek en rijomstandigheden is deze testmethode sterk achterhaald. Hierdoor is er vanaf 1 september 2017 overgeschakeld naar de nieuwe WLTP testprocedure. Deze testprocedure, gebaseerd op het werkelijke gedrag van de automobilisten, geeft een betere benadering van het effectieve brandstofverbruik en de emissies van de wagen.

Daarnaast worden bij de WLTP rijcyclus de voertuigen onderverdeeld in drie verschillende klassen, in functie van hun vermogen/gewicht ratio (uitgedrukt in kilowatt per ton gewicht). De gebruikte hybride wagen bevindt zich in de hoogste klasse, namelijk klasse 3. De duur, evenals het snelheidsprofiel van de test is voor elk van de WLTP klassen hetzelfde. Enkel de acceleraties evenals de maximale snelheid zal verschillend zijn voor de verschillende voertuig klassen. Onderstaande grafiek geeft het snelheidsprofiel van beide rijcyclussen (NEDC en WLTP) weer.



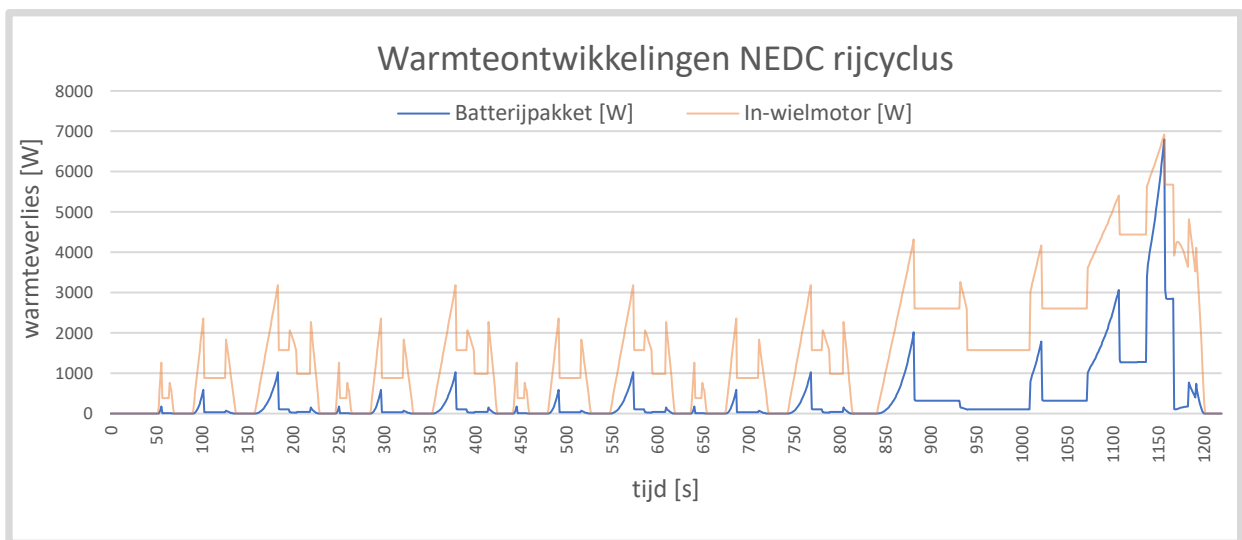
Figuur 16: Snelheidsprofielen rijcyclussen

De duur van de NEDC rijcyclus bedraagt twintig minuten en deze van de WLTP rijcyclus bedraagt dertig minuten. Om zeker te zijn dat de State-of-Charge na het doorlopen van de rijcyclus niet onder de (typische) minimale waarde van tien procent daalt, wordt de initiële SOC ingesteld op een veilige waarde (75 %).

4.3 Simulatie warmteontwikkelingen

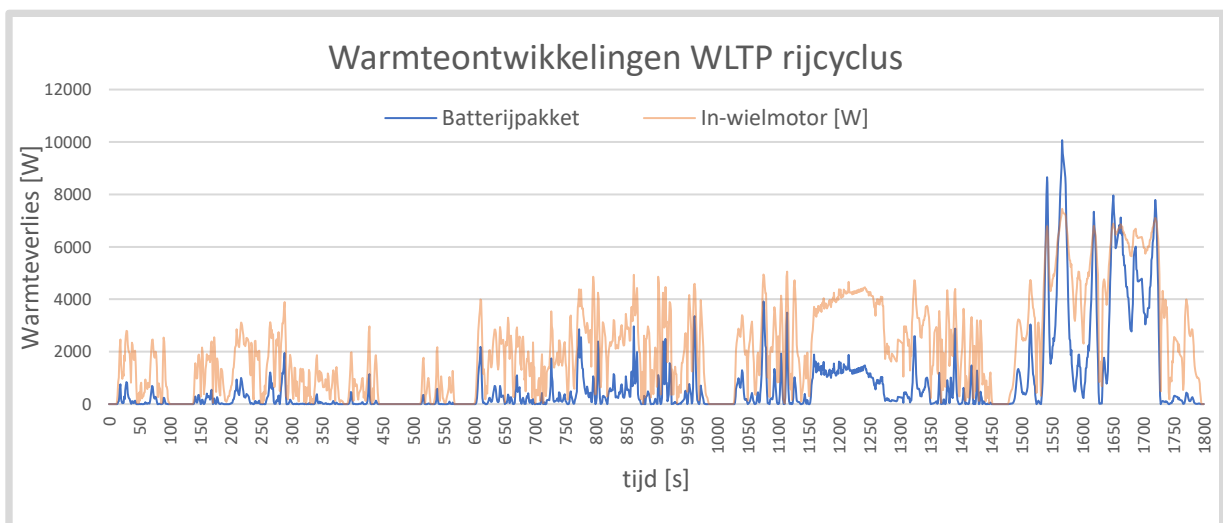
Voor de start van de simulatie wordt de initiële SOC ingesteld op 75 procent en de omgeving temperatuur op 20 graden Celsius. Deze gegevens zijn belangrijk voor de bepaling van de weerstandswaarde en spanning van het batterijpakket. Wanneer de SOC onder de waarde van ongeveer 30 procent komt ondervindt het batterijpakket een typische toename van de interne weerstand. Deze weerstandswaarde kan zelfs tot twee à drie keer de initiële weerstandswaarde aannemen. Dit verklaart waarom in eerste instantie de warmteontwikkeling van de in-wielmotor enkele malen groter zijn dan deze van het batterijpakket. Wanneer in beide rijcyclussen op het einde een versnelling op hogere snelheid wordt uitgevoerd zullen de warmteontwikkelingen van het batterijpakket deze van de in-wielmotor benaderen of overstijgen in het geval van de WLTP rijcyclus.

NEDC:



Figuur 17: Warmteontwikkelingen NEDC rijcyclus

WLTP:



Figuur 18: Warmteontwikkelingen WLTP rijcyclus

4.4 Resultaten

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemiddelde en maximale warmteontwikkeling van respectievelijk het batterijpakket en de in-wielmotoren bij het doorlopen van de WLTP en NEDC rijcyclus. Hieruit blijkt dat bij de WLTP rijcyclus de hoogste gemiddelde en maximale warmteontwikkelingen bekomen worden. Dit ligt in de lijn van verwachtingen aangezien dit rijprofiel hogere acceleraties en snelheden met zich meebrengt, wat leidt tot hogere tractiekrachten. Dit zal uiteindelijk leiden tot grotere warmteverliezen.

Tabel 4: Overzicht warmteontwikkelingen voor elke rijcyclus

	gem. warmteontwikkeling [W]		max. warmteontwikkeling [W]	
	NEDC	WLTP	NEDC	WLTP
batterijpakket	691	1230	6797	10070
in-wielmotor L	1949	2464	6919	7450
in-wielmotor R	1949	2464	6919	7450
in-wielmotoren	3898	4928	13837	14900

In het verdere verloop van deze thesis zal de nadruk gelegd worden op het koelcircuit van de in-wielmotoren. De keuze hiervoor is omwille van de beperkte aanwezigheid van thermische gegevens over dit circuit, gezien hiervoor nog geen specifieke sensoren aanwezig zijn. Daarnaast is de huidige positie van de radiator aan de onderzijde van het chassis van de wagen een mogelijk nadeel, gezien in deze opstelling de vinnen van de ventilator mogelijks kunnen beschadigd worden door opvliegende steenslag. Daarnaast kan er in deze positie niet optimaal gebruik gemaakt worden van de luchtstroom lopende aan de onderzijde van de wagen d.m.v. de actieve verplaatsing van de wagen over het wegdek.

Hierbij zal voor de verdere uitwerking van het koelcircuit van de in-wielmotoren rekening moeten gehouden worden met een gemiddelde warmteontwikkeling van **2.5 kilowatt** voor een enkelvoudige in-wielmotor. Waarbij de radiator in het ideale geval **5 kilowatt** aan warmte moet kunnen afgeven aan de omgeving in zijn maximale stand van de respectievelijke medium snelheden.

5 Identificatie koelsysteem in-wielmotoren

Betreffende de identificatie van het koelsysteem van de in-wielmotoren werd in eerste instantie het thermische gedrag van de radiator bepaald. Hiervoor werd een proefondervindelijke meetprocedure uitgewerkt. Waarbij een daaruit volgende prestatiekaart kon geïntegreerd worden in de e-NTU warmte-overdrachtsbepaling. De stappen van deze meetprocedure kunnen terug gevonden worden in het hoofdstuk 5.1.

Ten gevolge van de beperkte beschikbaarheid van de wagen kon de proefondervindelijke meting van het thermische gedrag van de in-wielmotoren niet uitgevoerd worden. Hierdoor moest er gekeken worden naar een mogelijke alternatief. Gezien de interne geometrische afmetingen niet ter onze beschikking konden gesteld worden, zal er uitsluitend een benadering gedaan worden naar het thermische gedrag van de in-wielmotoren door gebruik te maken van het software pakket Motor-CAD. Hierbij zal er vertrokken worden van een elektromotor (terug te vinden in de bibliotheek van Motor-CAD), welke zijn toepassing ook terugvindt in de automobiel industrie.

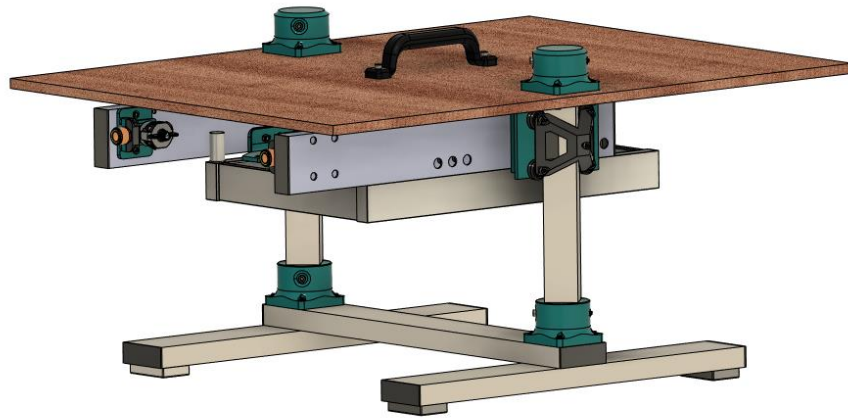
5.1 Identificatie radiator en ventilatoren

Zoals eerder aangehaald zal een puur mathematische bepaling van het thermische gedrag van de radiator van de in-wielmotoren niet mogelijk zijn ten gevolge van de beperkte voorhanden technische (thermische) eigenschappen van de radiator. In deze proefondervindelijke meting zal het thermisch gedrag van de radiator gevalideerd worden. Hierbij zal de ingaande temperatuur van het koelmedium ingesteld worden door een extern warmte/koel regelsysteem van de fabrikant Lauda. Door gebruik te maken van het Lauda systeem kan het thermisch werkingpunt van de in-wielmotoren gesimuleerd worden. De voorhanden reserve radiator en bijhorende ventilatoren maakten het mogelijk om metingen uit te voeren wanneer de hybride wagen niet vrijgegeven kon worden.

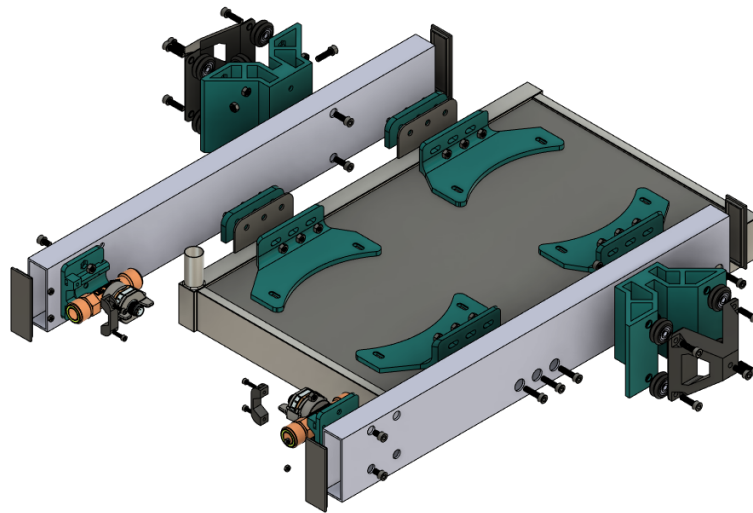
Tevens om de effectieve luchtstroom gegenereerd door de ventilatoren te bepalen is er een proefopstelling opgemaakt. Enkele belangrijke eisen waarbij rekening moest gehouden worden bij het ontwerp was de onderlinge afstand tussen de bodemplaat van de wagen en de bovenkant van de radiator evenals de afstand van de onderkant van de radiator en het wegoppervlak. Om eventuele optimalisatie mogelijkheden te kunnen simuleren kan deze relatieve afstand eveneens eenvoudig aangepast worden door middel van een lineaire geleiding.

5.1.1 Voorbereiding

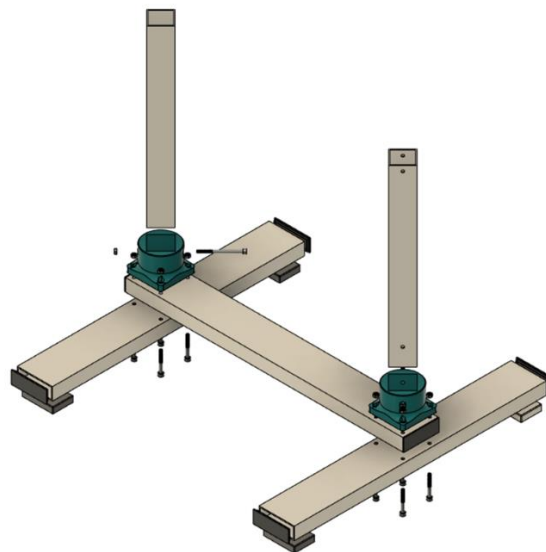
Vooraleer de eerste metingen konden plaatsvinden, moest er een frame voor deze proefopstelling bepaald worden. Hierbij is er gekozen om voor montage van de ventilatoren en sensoren op de radiator gebruik te maken van aluminium profielen en 3D geprinte componenten. Om de gewenste lineaire beweging mogelijk te maken word er gebruik gemaakt van v-wielen welke contact maken met de hoekpunten van de aluminium profielen. Volgende figuren geven het uitgewerkt ontwerp weer.



Figuur 19: 3D model proefopstelling radiator in-wielmotoren



Figuur 20: Plot tekening montage bevestiging ventilatoren/sensoren

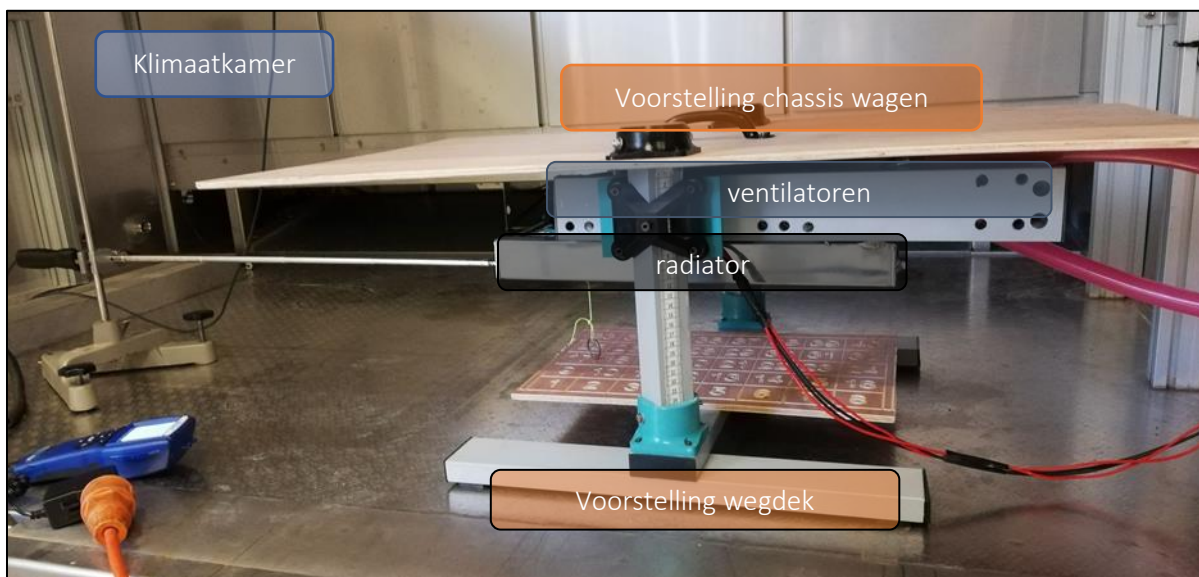


Figuur 21: Plot tekening onderstel

5.1.2 Meetmethode

Door zowel gebruik te willen maken van de LMTD als de e-NTU methode zullen hiervoor verschillende parameters opgemeten moeten worden. Voor de bepaling van de globale conductantie (UA) van de radiator zullen de in- en uitgaande temperaturen van zowel het koelmedium als het luchtmedium gemonitord worden. Voor de bepaling van UA-waarde met behulp van de e-NTU methode zal naast de ingangstemperaturen van beide mediums ook de snelheid van de mediums geregistreerd moeten worden.

De bepaling van het koelmedium debiet evenals de in- en uitgangstemperaturen van het koelmedium zal gebeuren m.b.v. een vortex debietsensor met geïntegreerde temperatuurmeting (PT 1000) welke zijn meetwaarden doorstuurt naar het aanwezig data acquisitie systeem. Het temperatuursverschil aan de luchtzijde zal bepaald worden door de integratie van twee thermokoppels (K-type). Thermokoppels worden vaak gebruikt in de industrie gezien de geringe kost, flexibele montage mogelijkheden en breed temperatuursbereik. Het nadeel van dit K-type thermokoppels is de relatieve hoge standaard meetfout van 2,2 °C. Om representatieve meetwaarden te bekomen zal er initieel een eenvoudige kalibratie uitgevoerd moeten worden waarbij het verschil tussen beide thermokoppels bij omgevingstemperatuur in rekening wordt gebracht, voor het vervolg van de temperatuurmetingen. Hetzelfde kalibratie principe zal ook toegepast worden bij de temperatuurbepaling van het koelmiddel waarbij stilstand van de Lauda machine een mogelijks afwijkende temperatuursverschil bij omgevingstemperatuur in rekening wordt gebracht.

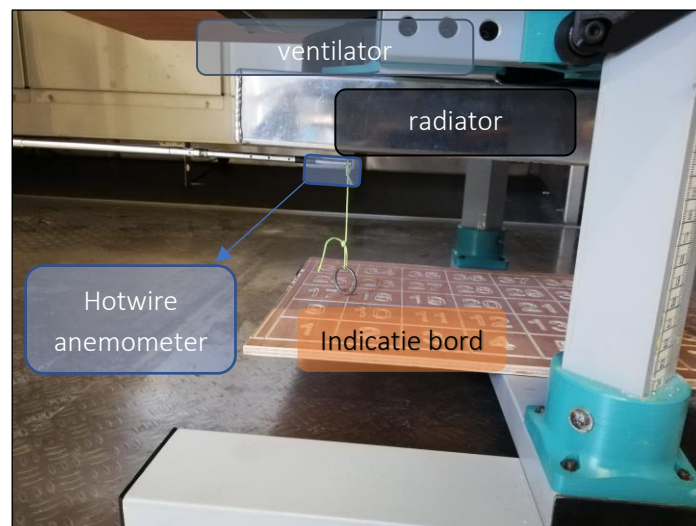


Figuur 22: Meetopstelling radiator in-wielmotoren

Luchtdebiet ventilatoren

Voor de bepaling van het luchtdebiet wordt er gebruik gemaakt van een warmtedraad anemometer. Hierbij zal het radiatorvlak in functie van de positie van de ventilatoren ingedeeld worden in verschillende meetpunten. Hieruit zal een gemiddelde luchtsnelheid uit voortvloeien welke meegenomen zal worden in de berekeningen van de e-NTU methode. Ter controle van de luchtstroom zal de warmteoverdracht aan de luchtzijde gelijkgesteld worden aan de warmteoverdracht aan koelmedium zijde. Hier kan vervolgens een berekende luchtsnelheid uit voortvloeien.

In onderstaande figuur wordt de meetmethode voor de luchtstroombepaling weergegeven. Hierbij zal de Lauda machine uitgeschakeld worden, waardoor er geen koelmiddel door de radiator zal stromen. Dit is noodzakelijk om stabiele meetresultaten te bekomen. De temperatuurverandering van het luchtmedium heeft in verhouding weinig effect op de luchtsnelheid van de radiator voor een bepaalde aangelegde spanning waardoor dit effect mag verwaarloosd worden. In deze opstelling zal voor de volgende aangelegde spanningen 3.5, 7, 10.5 en 14V de luchtstroom bepaald worden, door telkens m.b.v. de anemometer over de 16 controle¹ vlakken te bewegen.



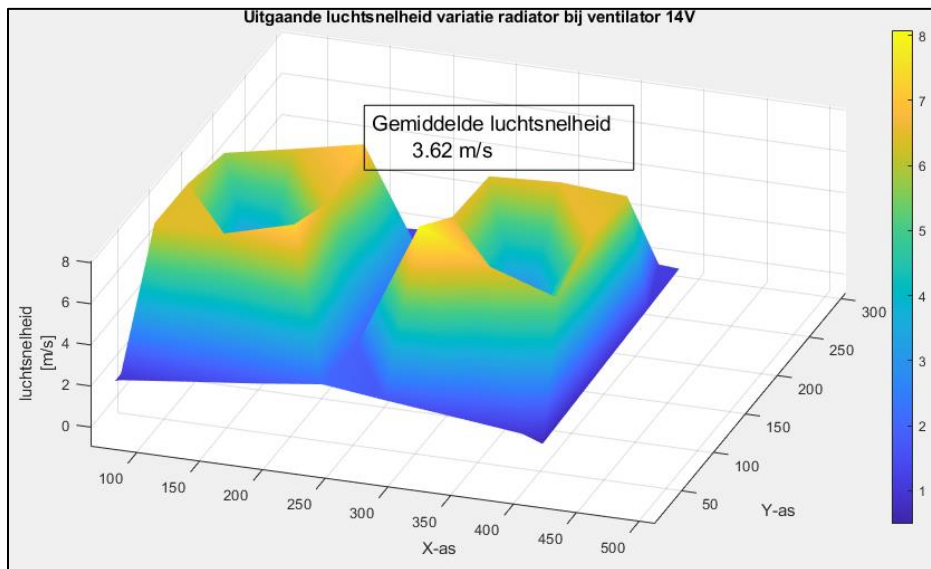
Figuur 23: Meetopstelling luchtstroom radiator in-wielmotoren

Gezien de vorm en positie van de ventilatoren, zal het luchtdebiet langs de vinnen van de radiator verschillend zijn. Om deze variatie in luchtstroom in rekening te kunnen brengen zal het radiator oppervlak ingedeeld worden in verschillende controle oppervlakken. Voor elk controle oppervlak zal een gewicht toegekend worden aan de uitgevoerde luchtstroommeting in functie van de grootte van het controle oppervlak. Hierdoor kan uiteindelijk een gemiddelde luchtstroom bepaald worden doorheen de vinnen van de radiator.

Om op een zo nauwkeurig mogelijke manier veelvuldige metingen op te meten voor de verschillende aangelegde spanningen, werd er gebruik gemaakt van een indicatiebord en een eenvoudige pendel voor het positioneren van de anemometer in het gewenste controlegebied.

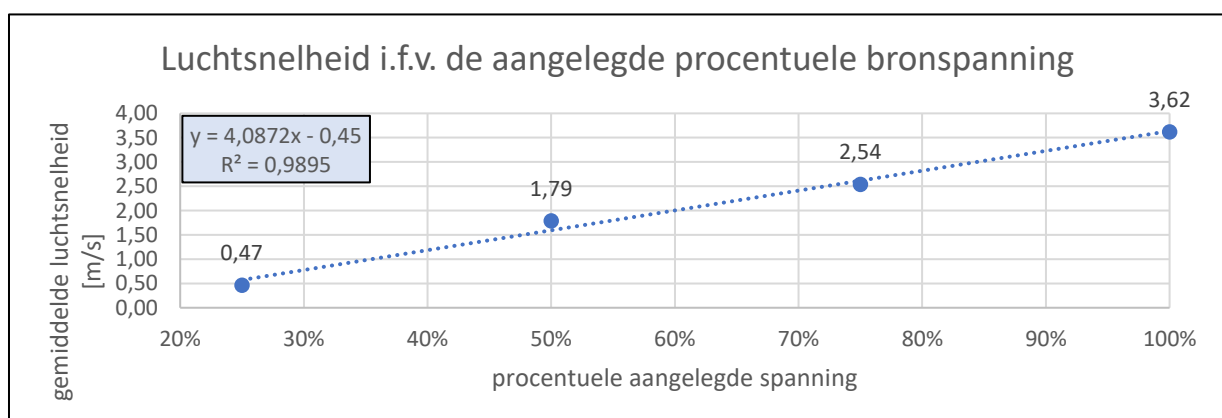
¹ In eerste instantie werd het radiator oppervlak opgedeeld in 40 gelijke oppervlakken, bij de tweede revisie van de meetopstelling werd dit gereduceerd naar 16 controle oppervlakken in functie van de positie van de ventilatoren.

Figuur 24 geeft vervolgens de snelheidsvariatie weer van het uitstromende luchtmedium bij een aangelegde bronspanning van 14V. In de regio waar de ventilatoren gepositioneerd zijn, worden de grootste luchtsnelheden gemeten met pieken tot 8 meter per seconden. De laagste luchtsnelheden worden gemeten in de regio verder afgelegd van het ventilator oppervlak. Na het uitmiddelen van de meetwaarden in functie van het respectievelijk controle oppervlak wordt een gemiddelde luchtsnelheid van 3.62 meter per seconden vastgelegd.



Figuur 24: Weergave uitgaande snelheidsvariatie bij 14 V aangelegde spanning

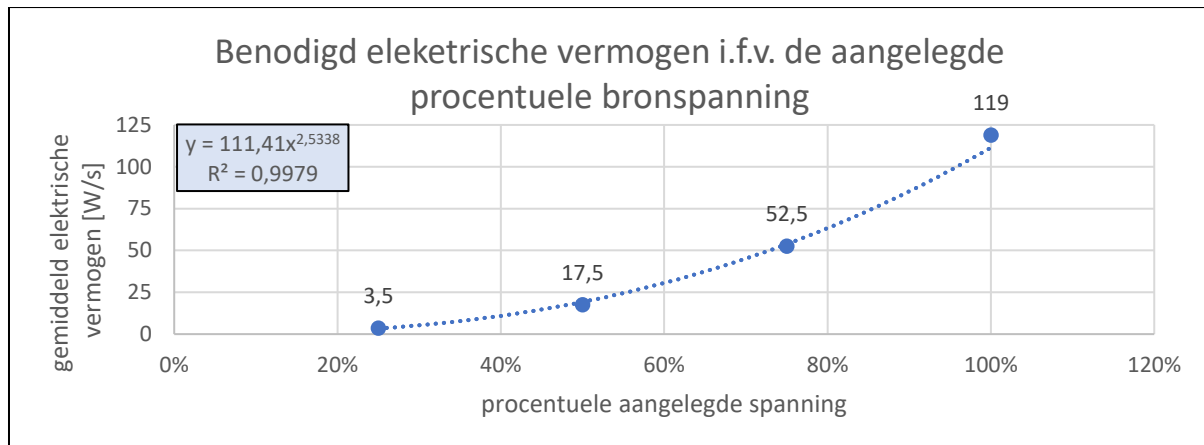
Na het opmeten van de luchtsnelheden in de 16 controle vlakken voor de vier verschillende aangelegde bronspanningen kon onderstaande grafiek opgesteld worden, welke het geleverde luchtdebiet weergeeft in functie van de procentuele bronspanning. Hierbij kan een benaderend lineaire verband teruggevonden worden, welke het mogelijk maakt om voor een verschillende aangelegde bronspanning, de overeenkomende luchtsnelheid te bepalen.



Figuur 25: Luchtsnelheid ventilatoren i.f.v. de aangelegde procentuele bronspanning

Voor de volledigheid wordt in de volgende figuur nog het benodigd elektrische vermogen van de ventilatoren in functie van de aangelegde spanning weergegeven. Hierbij zal er geen lineaire verband bekomen worden. Volgens de gelijkvormigheidswetten schaalt het elektrische vermogen en het toerental (resp. de aangelegde spanning) met een derde machtsverhouding. Dit verband is duidelijk

terug te vinden in onderstaande figuur. Dit is zeker een bepalende factor bij het opstellen van een energie efficiënt regelsysteem welke t.g.v. tijdsgebrek buiten de scope van deze masterproef zal liggen.

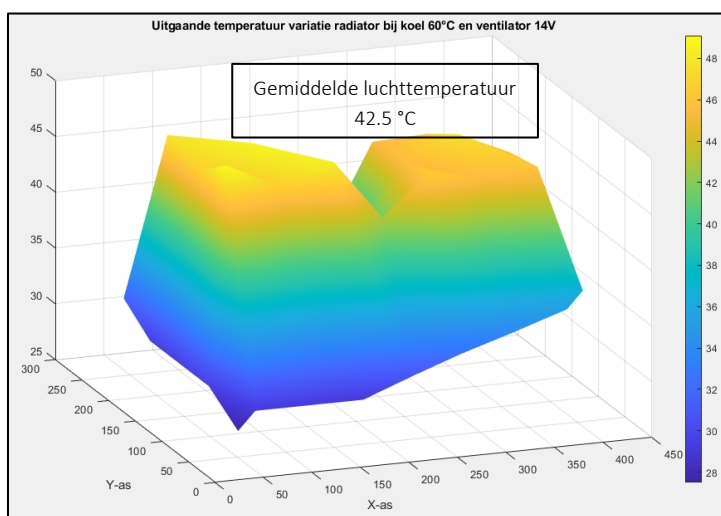


Figuur 26: Elektrische vermogen ventilatoren i.f.v. de procentuele aangelegde bronspanning

Temperatuurvariatie luchtzijde

Ten gevolgen van de snelheidsvariatie over het radiator vlak zal ook de uitgaande luchttemperatuur aan de radiator variëren. Hierdoor zal de positie van thermokoppels bepalend zijn voor de uiteindelijke meetresultaten. Door hetzelfde meetprincipe toe te passen als bij de luchtstroombepaling kan de gemiddelde uitgaande luchttemperatuur bepaald worden. Vervolgens zal het thermokoppel gepositioneerd worden in de regio, welke het dichtst aanleunt bij de gemiddelde uitgaande luchttemperatuur.

Voor de bepaling van de temperatuurvariatie van de uitgaande luchtstroom zal de werkingstemperatuur, de temperatuur van het ingaande koelmedium, ingesteld worden op 60°C. De keuze voor deze relatief hoge werkingstemperatuur berust op het feit dat hier de grootste temperatuurvariatie zal vastgesteld worden. Deze metingen worden uitgevoerd bij omgevingstemperatuur om de mogelijkheid te kunnen bieden om het thermokoppel te kunnen herpositioneren, wat moeilijker is vanuit een gesloten klimaatkamer. Onderstaand figuur geeft een overzicht van de effectieve temperatuurvariatie bij een aangelegde bronspanning van 14V .



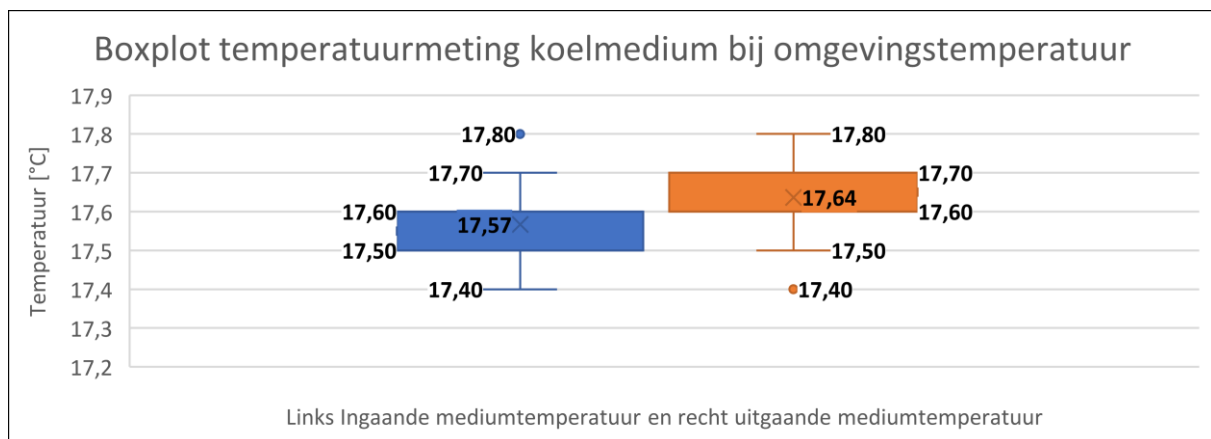
Figuur 27: Temperatuurvariatie van de uitgaande lucht bij T_koel_In = 60°C en Ubron = 14 V

Warmteoverdracht

Eens de luchtsnelheden evenals de temperatuurvariaties in kaart zijn gebracht kan er overgeschakeld worden naar de effectieve bepaling van de warmteafgifte van de radiator aan de omgeving voor de verschillende ingestelde parameters. Uit een eerste iteratie van de proefondervindelijke bepaling blijkt dat het temperatuurverschil tussen de omgevingstemperatuur en werkingstemperatuur voldoende groot moet zijn om betrouwbare meetresultaten te kunnen bekomen. Hierdoor was de intentie om in het verdere verloop van de testen gebruik te maken van de aanwezige klimaatkamer in Flanders Make. De omgevingstemperatuur zou hierbij vastgelegd worden op 10°C.

Door materiële schade aan de proefopstelling kon onderstaande herwerkte revisie van de proefopstelling niet uitgevoerd worden. Hierbij zal uitsluitend de beoogde werkwijze worden aangehaald, waarbij de meetresultaten van de eerste proefmetingen zullen geïntegreerd worden in het radiator model.

In deze tweede iteratie van de proefondervindelijke bepaling wordt er gebruik gemaakt van het aanwezige datalogging systeem. Hierdoor zouden eventuele standaard meetfouten deels weg gefilterd kunnen worden door de meetresultaten uit te middelen. Onderstaande figuur toont de variatie van de koelmedium temperaturen van het koelmedium bij omgevingstemperatuur. Het boxplot diagram geeft duidelijk weer dat de variatie op de temperatuurverschil metingen van het koelmedium kunnen gereduceerd worden tot 0.07°C door datalogging tot te passen.



Figuur 28: Boxplot temperatuurmeting koelmedium bij omgevingstemperatuur

Hetzelfde principe wordt toegepast voor de temperatuurmeting aan de luchtzijde. Hierbij zal er gebruik gemaakt worden van de datalogging capaciteiten van de TSI velociCalc meter [22]. Door de aanwezigheid van twee poorten voor K-type thermokoppels kan de in- en uitgaande luchttemperatuur gemonitord worden. Hierbij werd initieel de temperatuurvariatie bij omgevingstemperatuur vastgelegd op namelijk 0.1°C, om vervolgens deze standfout in rekening te brengen bij het verdere verloop van de metingen.



Figuur 29: Tsi velociCalc met externe thermokoppel aansluitingen [22, p9]

Eens alle kalibratie procedures zijn afgelopen kan er overgeschakeld worden naar de metingen om de effectieve warmteafgifte van de radiator te kunnen bepalen in functie van de verschillende variërende parameters.

In eerste instantie zal de werkingstemperatuur stelselmatig verhoogd worden, vertrekkend bij 40°C tot 60°C in stappen van 10°C. Vervolgens zal voor elke werkingstemperatuur, het koelmediumdebiet, vertrekkend bij 10 l/min, verhoogd worden naar 20 l/min in stappen van 5l/min. Tenslotte zal bij elk ingestelde pompdebiet de aangelegde spanning van de ventilator vertrekkend bij 3.5V verhoogd worden naar 14V in gelijke stappen van 3.5V.

Per ingestelde parameter zal respectievelijke de in- en uitgaande temperaturen van het koelmedium, de in- en uitgaande temperaturen van het luchtmedium en het koelmedium debiet gemonitord worden over een periode van 60 seconden. De bepaling van het luchtmedium debiet werd al in een eerdere meting bepaald, gezien de temperatuursveranderingen verwaarloosbare variaties zou opleven in het geleverde luchtdebiet. Onderstaande tabel geeft de ingestelde parameters voor de uitgemiddelde temperatuursmetingen weer.

Tabel 5: Parameterinstellingen voor proefondervindelijke meting radiator

40°C								10°C								
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Temp. Air IN [°C]				Temp. Air OUT [°C]			
Debiet [L/min]	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V
10,0																
15,0																
20,0																
50°C								10°C								
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Temp. Air IN [°C]				Temp. Air OUT [°C]			
Debiet [L/min]	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V
10,0																
15,0																
20,0																
60°C								10°C								
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Temp. Air IN [°C]				Temp. Air OUT [°C]			
Debiet [L/min]	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V	3.5 V	7 V	10.5 V	14 V
10,0																
15,0																
20,0																

Aan de hand van de medium temperaturen en snelheden kan de effectieve warmteoverdracht van de radiator bepaald worden. Daarnaast zal met behulp van de e-NTU en LMTD methode de globale conductantie (UA) vastgelegd worden. De gebruikte formules kunnen terug gevonden worden in hoofdstuk 2.4.

5.1.3 Resultaten

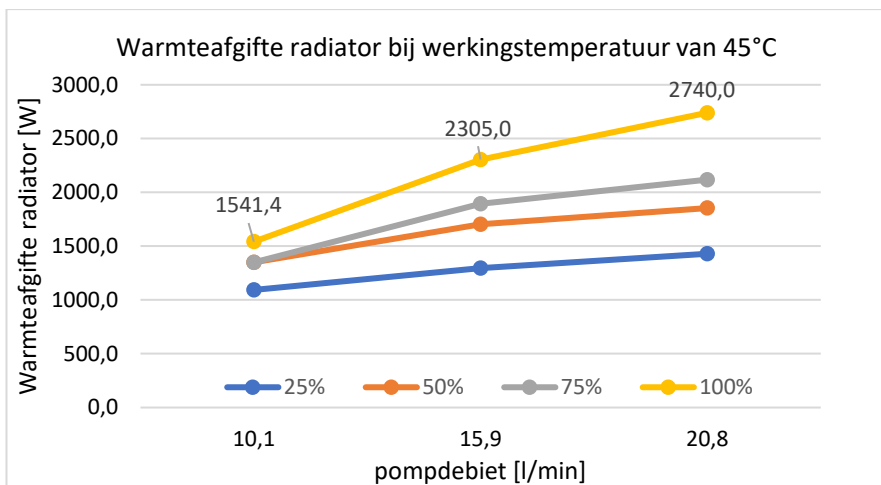
De figuren (Figuur 30 & Figuur 31) geven de warmteafgifte van de radiator weer aan de omgeving bij een respectievelijk ingaande koelmedium temperatuur van 45 en 60°C. Bij een normale belasting van de elektromotoren zou het koelmedium eerder moeten aanleunen naar de werkingstemperatuur van 45°C. Uit hoofdstuk 4.4 kon vastgesteld worden dat de gemiddelde warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren liggen rond een kleine 5 kilowatt. In het ideale geval zou de radiator minstens evenveel warmte moeten afgeven aan de omgeving als het koellichaam kan opnemen aan de elektromotoren.

Het maximale koelvermogen van de radiator kan bekomen worden door deze te plaatsen in stand 3, welke overeenkomt met een aangelegde bronspanning van 14 volt voor de pomp en ventilatoren. Het overeenkomende pompdebiet voor stand 3 is op dit moment niet geweten, gezien in de opstelling van het koelcircuit hiervoor geen terugkoppeling voorzien is. Hierdoor wordt verondersteld dat het maximale pompdebiet 20 l/min bedraagt.

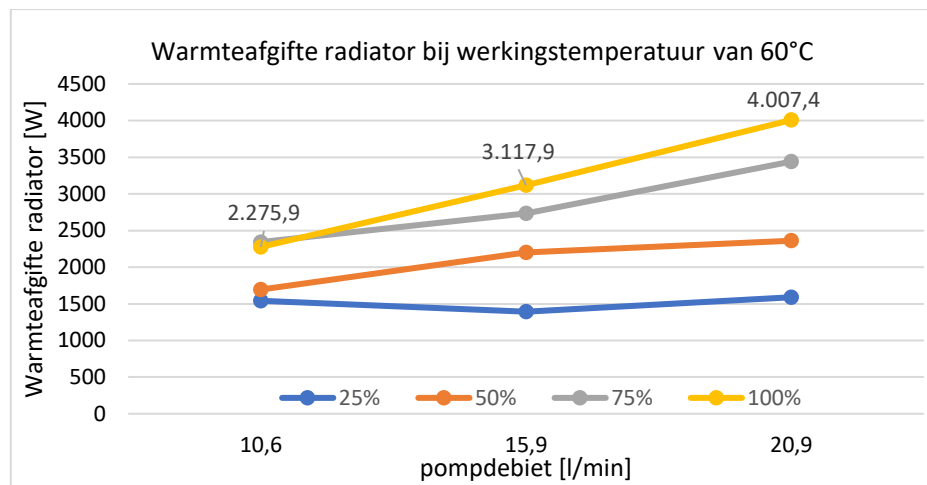
Hieruit kan via Figuur 30 afgeleid worden dat voor de maximale stand drie, bij een werkingstemperatuur van 45°C, 2740 watt warmte wordt afgegeven aan de omgeving. Hierbij moet er wel rekening gehouden worden dat deze meetwaarden werden uitgevoerd in een steady state opstelling waarbij de wind onder de wagen niet gesimuleerd werd. Dit aangezien de radiator in zijn huidige opstelling onder de wagen niet in de optimale rijwind geplaatst kon worden. Hierdoor werd er besloten om deze factor niet in rekening te brengen tijdens de proefopstelling.

Voor de bepaling van de convectie coëfficiënten aan de kant van respectievelijk het koel- en luchtmedium zal de prestatiekaart van Figuur 33 geïntegreerd worden in het thermische model van de radiator. Zoals aangetoond in [23] zal de variatie op de omgevingstemperatuur en het ingaande koelmedium temperatuur een verwaarloosbaar effect opleveren t.o.v. de snelheidsvariatie van het koelmiddel voor de effectiviteit van de radiator. Hieruit kan besloten worden dat met uitsluitend de gekende mediumsnelheden, de globale conductantie (UA) afgeleid kan worden.

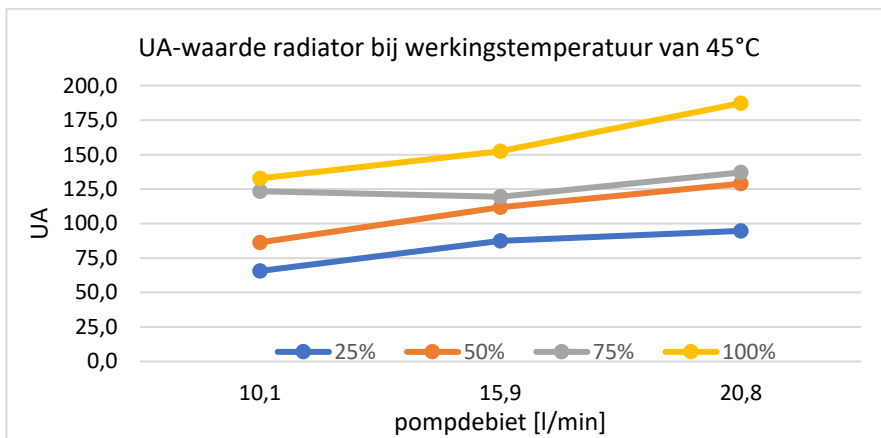
Indien de radiator niet voldoende warmte kan afgeven aan de omgeving zal t.g.v. een stijgende interne temperatuur van de in-wielmotoren, de ingaande temperatuur van het koelmedium stijgen. Om aan de veiligheidsvoorschriften van de in-wielmotor fabrikant te voldoen (ingaande koelmediumtemperatuur max 65 °C) werd ook een maximale werkingstemperatuur van 60°C uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de radiator **voor een initiële montage van de ventilator schoepen 4 kilowatt aan warmte kan afgeven aan de omgeving**. Dit is nog steeds lager dan de gemiddelde warmteontwikkeling van beide in-wielmotoren tijdens het doorlopen van de WLTP rijcyclus. Het verschil tussen de warmteafgifte in de originele pull configuratie en de huidige push configuratie kan in hoofdstuk zeven terug gevonden worden.



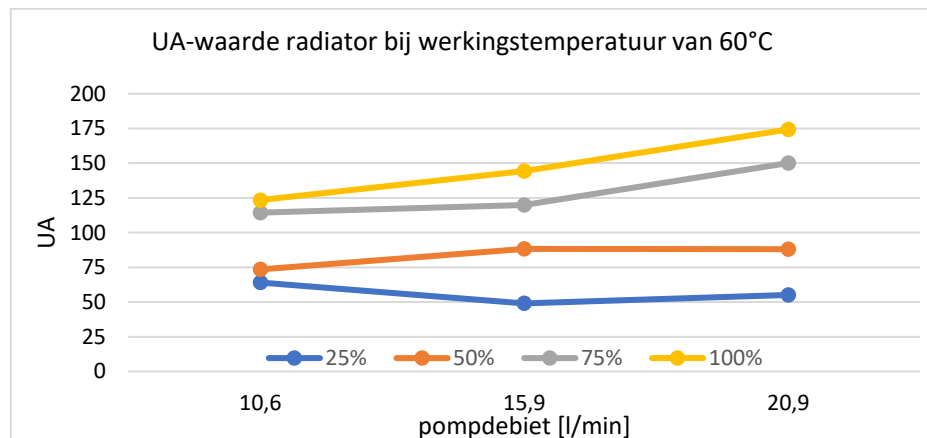
Figuur 30: Warmteafgifte radiator bij werkingstemperatuur van 45°C



Figuur 31: Warmteafgifte radiator bij werkingstemperatuur van 60°C



Figuur 32: UA-waarde radiator bij werkingstemperatuur van 45°C

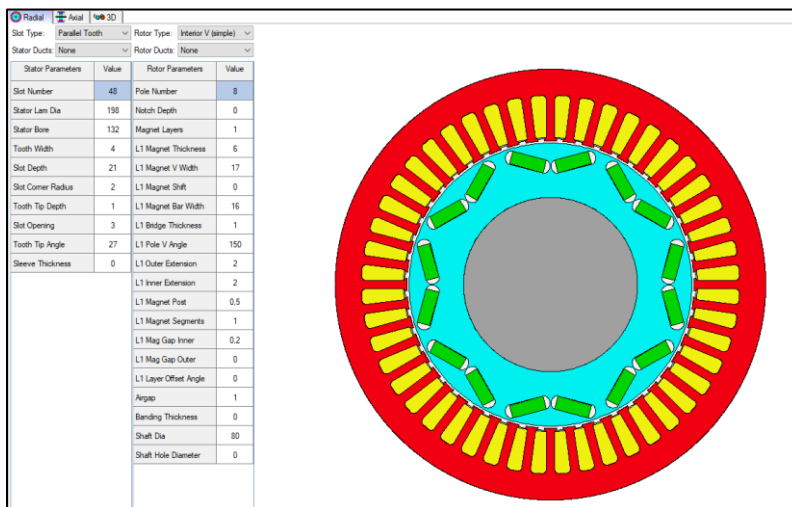


Figuur 33: UA-waarde radiator bij werkingstemperatuur van 60°C

5.2 Identificatie elektromotor

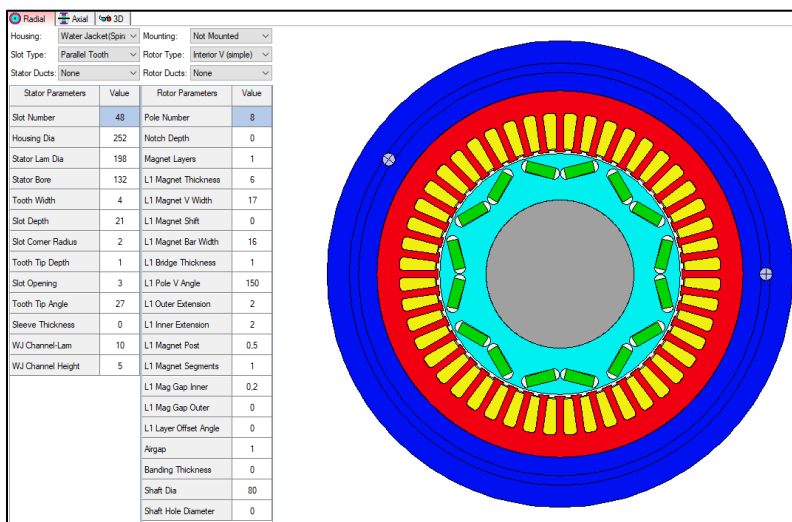
Zoals eerder aangehaald konden de interne geometrische afmetingen van de gebruikte in-wielmotoren niet medegedeeld worden door de fabrikant. Om toch een beeld te krijgen over de temperatuursverandering van het koelmedium doorheen het koellichaam van de elektromotor werd er gebruik gemaakt van een **vergelijkbare elektromotor** meegeleverd door het software programma Motor-CAD, welke ook een automobiel toepassing uitvoert. De benodigde stappen om tot een thermische analyse te bekomen worden onderstaand overlopen.

Onderstaande figuur geeft een overzicht van de verschillende geometrische parameters, welke aangevuld moeten worden. In het voorbeeld word er gebruik gemaakt van een permanente magneet synchroon motor. Dit is hetzelfde type als deze van de in-wielmotoren.



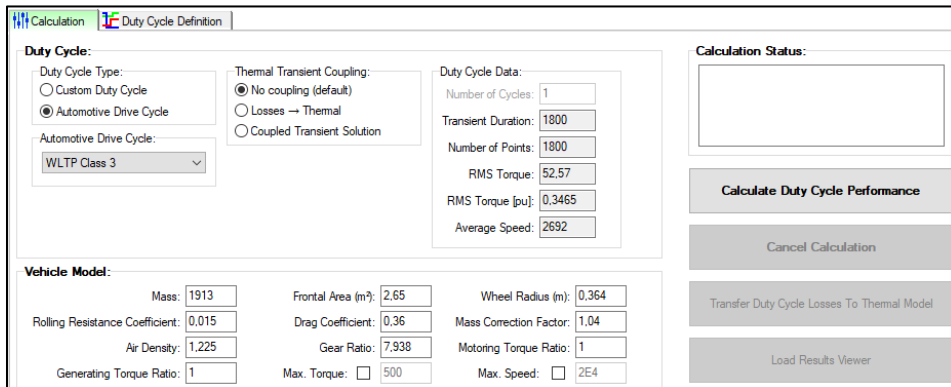
Figuur 34: Invullen geometrische eigenschappen van de elektromotor

In het tabblad thermische model kan vervolgens aangegeven worden welk type van koeling strategie er toegepast moet worden. Zoals bij de in-wielmotoren is er gekozen voor een koellichaam (Water Jacket). Hierbij ging de voorkeur uit naar een rechthoekige vorm voor de inwendige kanalen, welke een spiraal vormig verloop kennen.



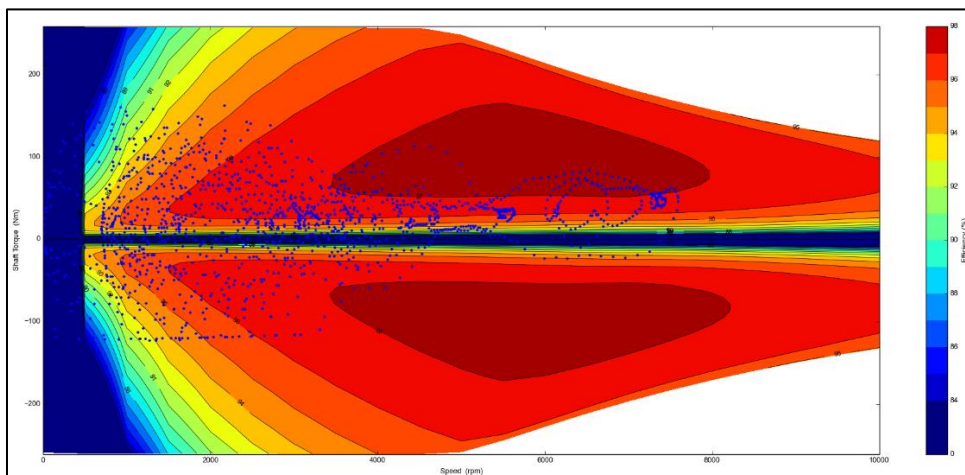
Figuur 35: Aanduiden koelmethode: Water Jacket

Voor het bepalen van de werkingpunten van de elektromotor werd er gebruik gemaakt van een ingewerkte rijcyclus simulatie. Hierbij werden dezelfde gegevens als deze van het Simulink model ingevuld. Verschillend met de in-wielelektromotor zal deze motor voorzien worden van een snelheidsreductie van acht door de integratie van een reductiekast.



Figuur 36: Rijcyclus simulatie in Motor-CAD

Vervolgens kunnen de werkingpunten van de elektromotor (blauwe puntjes) terug gevonden worden in de prestatie map van de elektromotor. Voor het verdere verloop van de thermische bepaling van het koelmedium zullen voor enkele rij snelheden, het overeenkomend koppel vastgelegd worden.



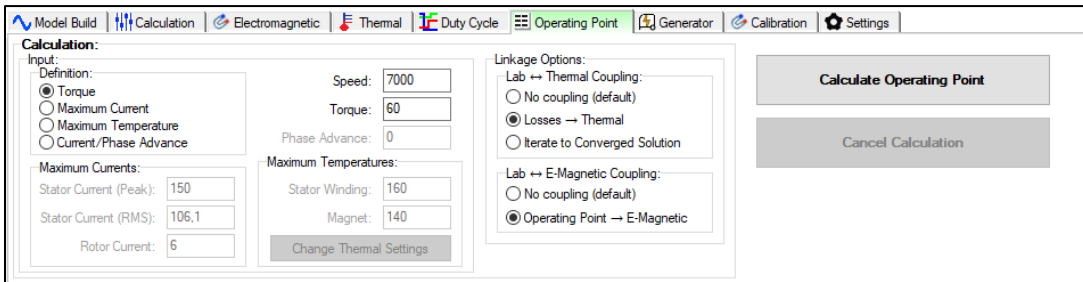
Figuur 37: Prestatie map elektromotor Motor-CAD

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de vastgelegde werkingpunten van de elektromotor, welke vervolgens meegenomen worden in de verdere thermische simulatie van het koelmedium.

Tabel 6: Vastgelegde toerental en koppel waarden voor aanvang thermische simulatie

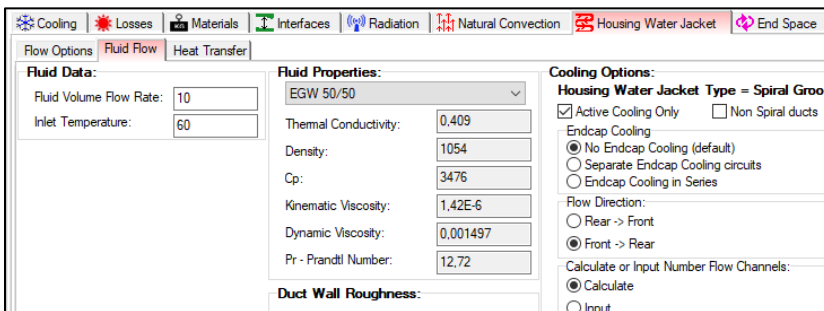
	N [tr/min]	T [N]	Verlies [W]
50 km/h	2900	58	575
70 km/h	4090	45	625
90 km/h	5250	40	750
120 km/h	7000	60	1282

Voor de bepaling van het thermische gedrag van het koelmedium wordt in eerste instantie het respectievelijk werkingpunt ingevuld.



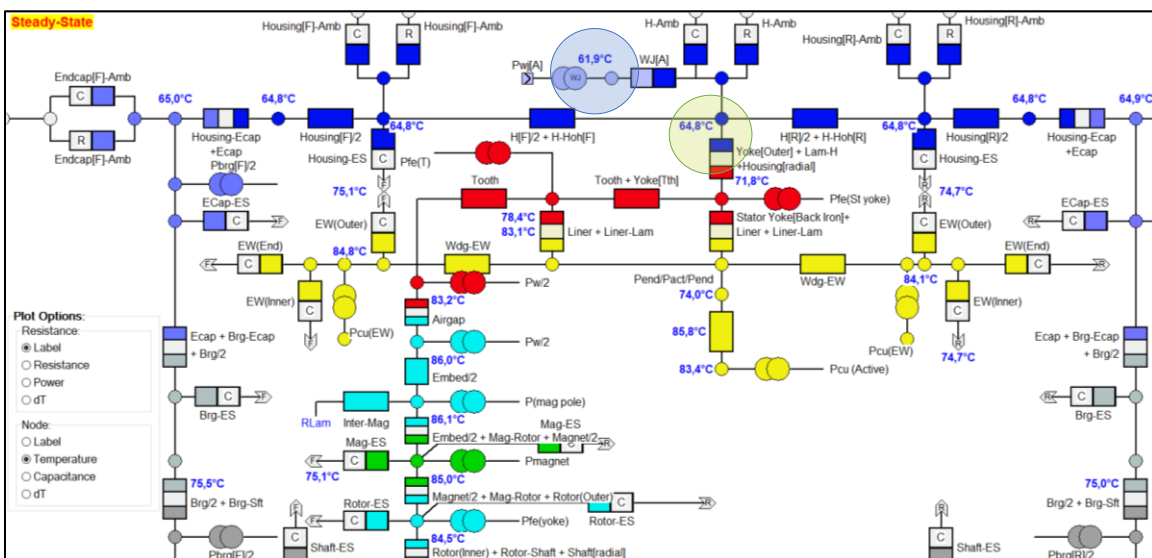
Figuur 38: Instellen werkingpunt elektromotor

Vervolgens moet zowel de ingangstemperatuur van het koelmiddel als de snelheid waarmee het koelmiddel zich voortbeweegt vastgelegd worden. Hierbij is er gekozen om de temperatuur van het koelmedium te laten variëren vertrekkend van 30 °C tot 60 °C in gelijke stappen van 15 graden. Het debiet zal op zijn beurt verhoogd worden van 5 liter per minuut naar 10 liter per minuut in gelijke stappen van 2.5 liter per minuut.



Figuur 39: Instellen koelmiddel ingangstemperatuur en debiet

Figuur 40 geeft ten slotte een overzicht van de temperaturen van de verschillende onderdelen in de elektromotor. Hierbij zal enkel de uitgangstemperatuur van het koelmedium (61.9°C) en de temperatuur van de behuizing van de elektromotor (64.8 °C) in rekening worden gebracht.



Figuur 40: Overzicht van de werkingstemperaturen van de verschillende onderdelen

Wanneer alle ingestelde parameters gesimuleerd en gedocumenteerd worden krijgen we onderstaand overzicht. Met behulp van onderstaande meetresultaten kan er een betere inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid warmte, gegeneerd door de elektromotor, die kan opgenomen worden door het koelmiddel in functie van de verschillende mediumdebieten en mediumtemperaturen. Deze efficiëntie tabel (ϵ) wordt vervolgens ook geïntegreerd in het Simulink model van de in-wielmotoren. Hierdoor kan in een verder verloop, de temperatuur van de in-wielmotoren bepaald worden in functie van de tijd.

Daarnaast wordt de gemiddelde medium temperatuur bepaald door de integratie van thermische weerstandswaarde (R_{koel}). De benodigde formules hiervoor kunnen terug gevonden worden in H 2.2.2.

Simulatie thermische prestatie watergekoelde elektromotor

30°C																												
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Tcomp				Qkoellichaam [W]				Rkoel				Qverlies				ϵ			
Debiet [L/min]	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120
5,0	30,0	30,0	30,0	30,0	31,7	31,8	32,3	34,0	39,6	40,8	43,2	53,2	497,9	533,5	681,8	1186,2	0,0177	0,0186	0,0177	0,0179	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,87	0,86	0,91	0,93
7,5	30,0	30,0	30,0	30,0	31,1	31,2	31,5	32,7	37,9	38,9	40,9	49,1	502,3	533,4	666,8	1200,6	0,0146	0,0156	0,0152	0,0148	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,87	0,86	0,89	0,94
10,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,9	31,0	31,2	32,0	35,0	35,6	36,8	41,9	509,6	592,6	711,2	1185,6	0,0089	0,0086	0,0087	0,0092	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,89	0,95	0,95	0,92

45°C																												
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Tcomp				Warmteafgifte radiator [W]				Rkoel				Qverlies				ϵ			
Debiet [L/min]	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120
5,0	45,0	45,0	45,0	45,0	46,4	46,7	47,0	48,7	53,7	54,6	56,9	66,7	418,3	508,0	597,7	1106,3	0,0191	0,0172	0,0182	0,0179	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,728	0,814	0,797	0,863
7,5	45,0	45,0	45,0	45,0	46,0	46,1	46,4	47,6	49,4	50,0	51,2	56,2	448,2	493,0	627,5	1165,8	0,0087	0,0090	0,0088	0,0085	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,780	0,790	0,837	0,909
10,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,8	45,9	46,1	47,0	47,5	47,8	48,5	51,3	478,0	537,8	657,3	1195,5	0,0044	0,0044	0,0045	0,0044	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,832	0,862	0,876	0,932

60°C																												
Pomp	Temp. Cool IN [°C]				Temp. Cool OUT [°C]				Tcomp				Warmteafgifte radiator [W]				Rkoel				Qverlies				ϵ			
Debiet [L/min]	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120	50	70	90	120
5,0	60,0	60,0	60,0	60,0	61,4	61,5	61,9	63,6	65,2	65,7	67,2	73,7	421,7	451,8	572,4	1085,0	0,0107	0,0110	0,0109	0,0110	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,73	0,72	0,76	0,85
7,5	60,0	60,0	60,0	60,0	60,9	61,0	61,3	62,5	62,4	62,7	63,4	66,4	406,6	451,8	587,3	1129,8	0,0048	0,0049	0,0047	0,0046	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,71	0,72	0,78	0,88
10,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,7	60,8	61,0	61,9	61,8	62,0	62,5	64,8	421,6	481,9	602,3	1144,7	0,0034	0,0033	0,0033	0,0034	574,4	623,8	750,0	1282,0	0,73	0,77	0,80	0,89

Figuur 41: Bepaling efficiëntie koellichaam

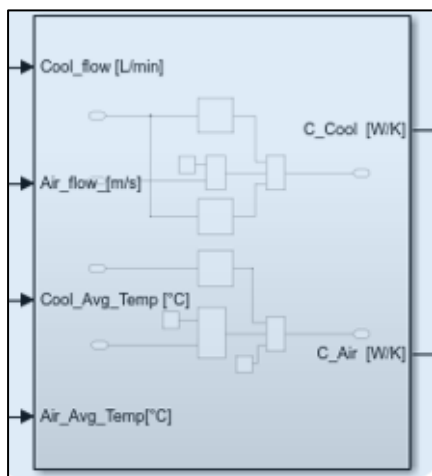
6 Simulink model

6.1 Simulink model radiator

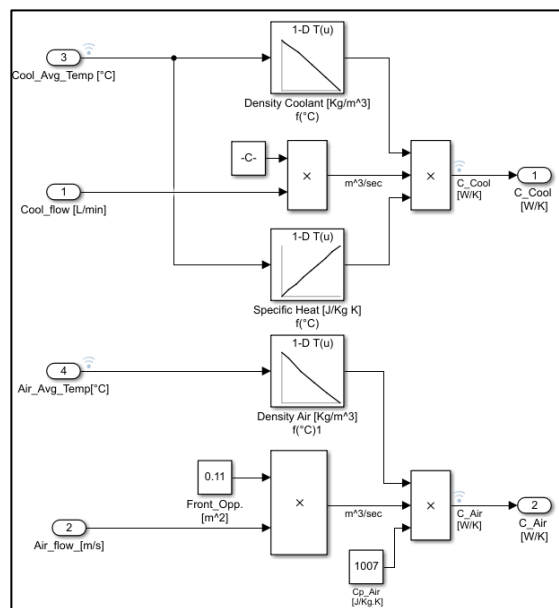
De warmteafgifte van de radiator aan de omgeving wordt bepaald met behulp van de integratie van de e-NTU methode. Figuur 47 geeft het bekomen thermisch model weer voor de radiator van de inwielmotoren. Voor de bepaling van de warmteoverdracht maakt het radiatormodel gebruik van vier parameters.

- ❖ ingaande temperatuur koelmedium $T_{koel,IN}$ ($^{\circ}C$),
- ❖ ingaande temperatuur luchtmedium $T_{lucht,IN}$ ($^{\circ}C$),
- ❖ snelheid luchtmedium v_{lucht} (m/s),
- ❖ debiet koelmedium pomp \dot{Q}_{pomp} (l/min).

Voor de bepaling van het thermische capacitef debiet van beide mediums wordt in eerste instantie het debiet en de snelheid van de mediums in acht genomen. Gezien de thermische eigenschappen van de mediums afhankelijk zijn aan de temperatuur, is ervoor gekozen om met de gemiddelde temperaturen tussen de in- en uitgang verder te werken. In functie van de gemiddelde temperatuur van het medium kan vervolgens de dichtheid en specifieke warmte van het lucht en koelmedium bepaald worden. Hieruit volgt dan de thermische capaciteit.



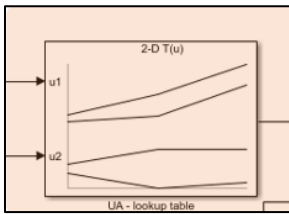
Figuur 42: Simulink blok thermische capacitef debiet



Figuur 43: Formules thermische capacitef debiet

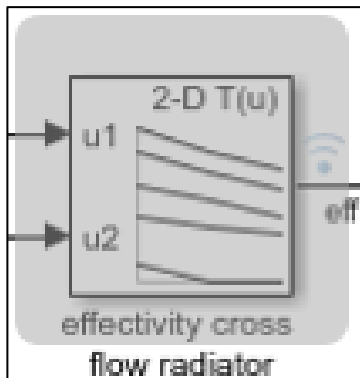
Vervolgens worden beide thermische capaciteve debieten met elkaar vergeleken. Hierbij was C_{koel} telkens groter dan C_{lucht} , waardoor C_{lucht} gelijk wordt gesteld aan C_{min} en C_{koel} gelijk wordt gesteld aan C_{max} . Hierbij zal de minimale thermische capaciteit meegenomen worden voor de bepaling van de warmteafgifte van de radiator en de maximale thermische capaciteit mee de capaciteitsratio bepalen.

Aan de hand van de medium snelheden kan met behulp van de proefondervindelijke opgestelde prestatie map (fig. 44), de overeenkomende globale conductantie (UA) bepaald worden. Met behulp van de globale conductantie en de thermische capaciteve debieten kan de NTU waarde afgeleid worden.

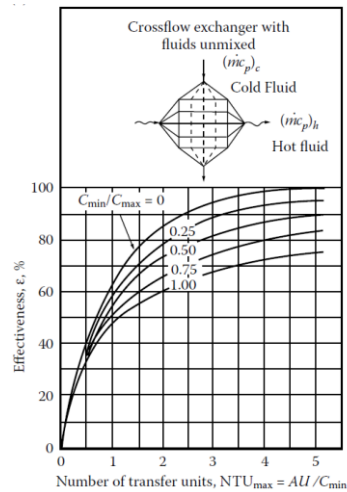


Figuur 44: Prestatie map van de globale conductantie voor de verschillende mediumsnelheden

Vervolgens kan met behulp van onderstaand look up tabel de effectiviteit van de radiator, waarbij de mediums elkaar ongemengd kruisen, bepaald worden in functie van de NTU-waarde en de capaciteit ratio.



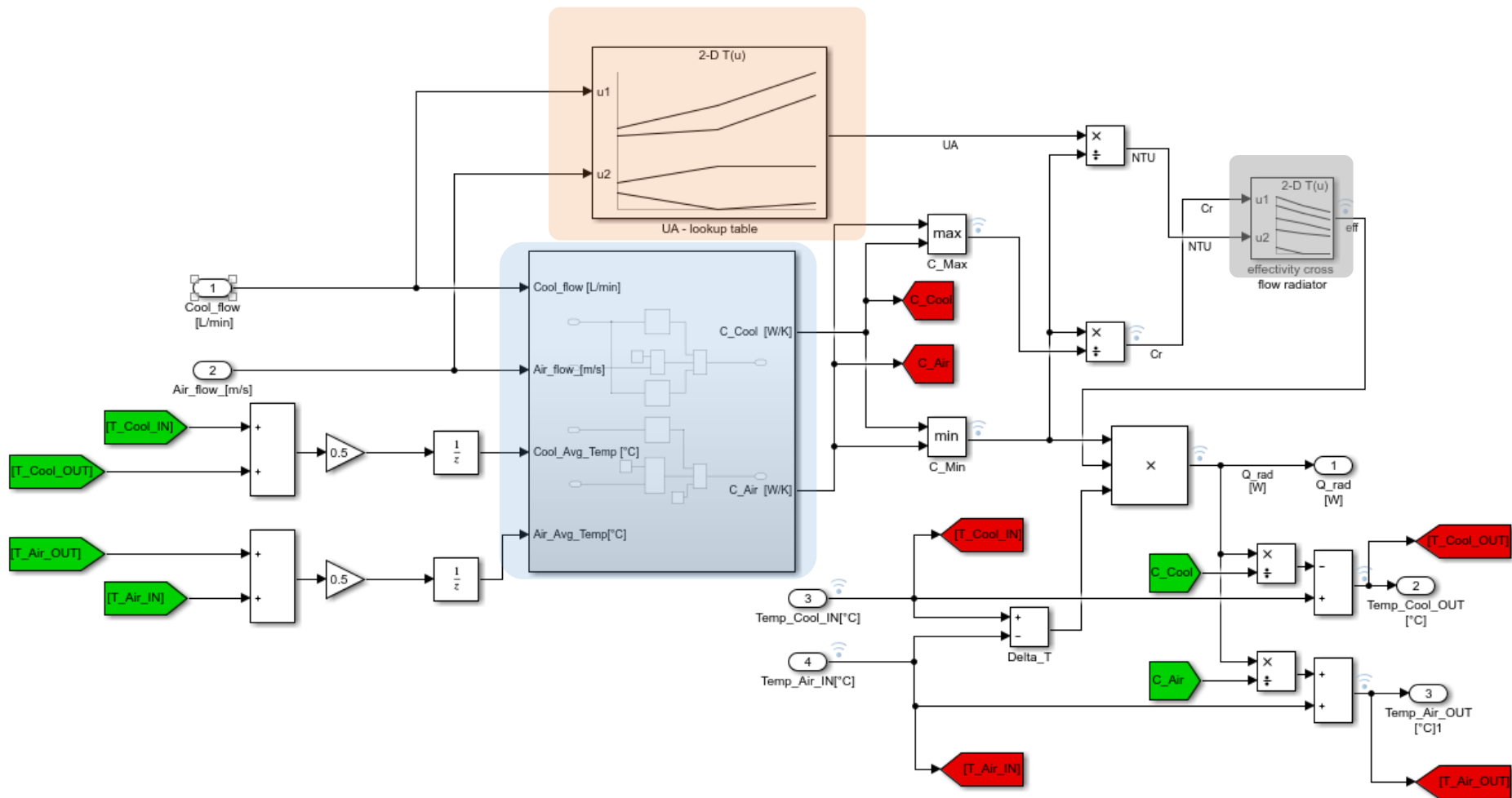
Figuur 45: Bepaling effectiviteit radiator



Figuur 46: Effectiviteit van een warmtewisselaar waarbij de medium elkaar ongemengd kruisen

Tenslotte kan met behulp van de gekende ingangstemperaturen van het lucht- en koelmedium, de warmteoverdracht van de radiator aan de omgeving bepaald worden. Voor de volledigheid worden ook nog uitgaande mediumtemperaturen berekend.

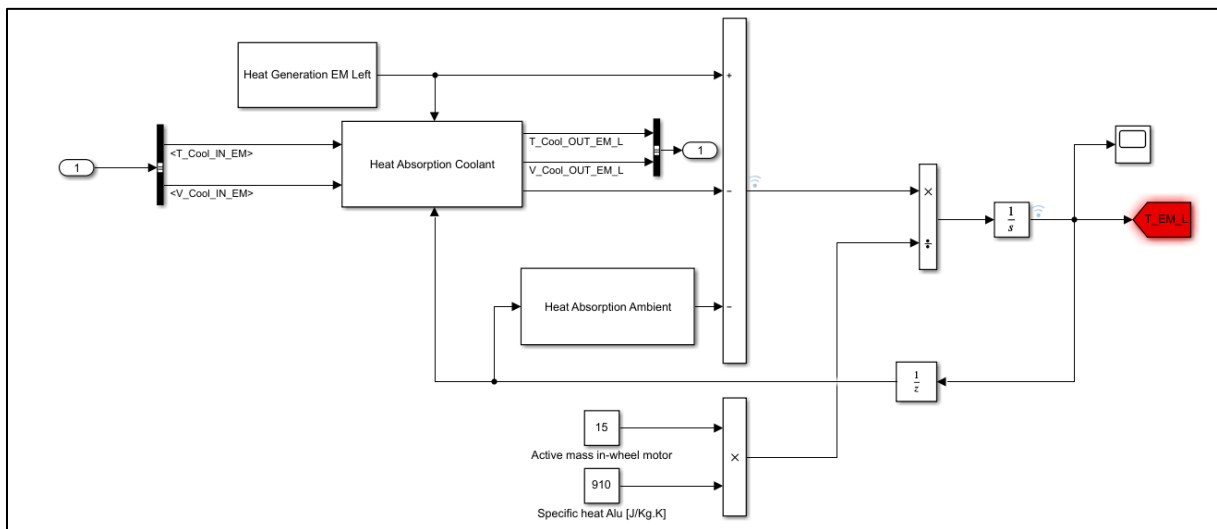
In de huidige situatie worden de gemiddelde koelmediumtemperaturen bepaald in functie van de inwendige temperatuur van de elektromotor en het koelmediumdebiet. Een realistischere bepaling van het koelmedium is op dit moment niet aan de orde gezien hiervoor thermische tijdvertragingen in het Simulink model moeten geïntegreerd worden. De essentie van dit thermische model is om veranderingen aan het radiator model te kunnen simuleren en te vergelijken. Dit door o.a. de positie van de radiator te simuleren. Hierbij zal de gemiddelde warmteafgifte van de radiator aan de omgeving vergeleken worden. De regeling van de luchtsnelheid zal gebeuren door een terugkoppeling van de werkingstemperatuur van het oppervlak van de elektromotor.



Figuur 47: Thermisch model radiator in-wielmotoren

6.2 Simulink model in-wielmotor

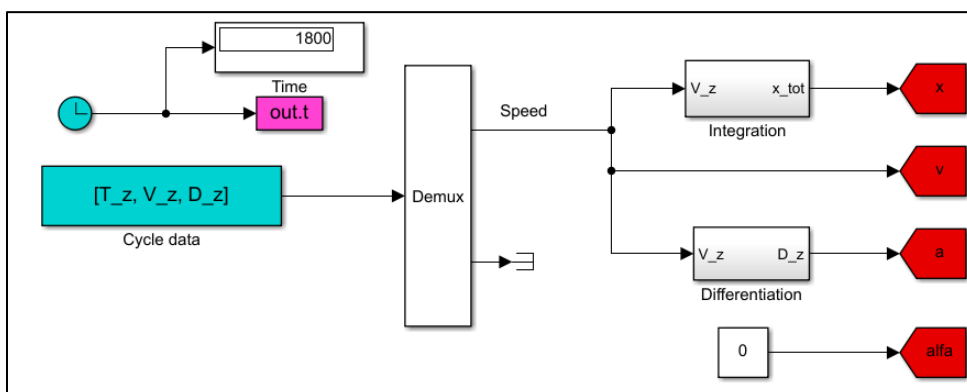
Het thermische model van de in-wielmotoren wordt onderverdeelt in drie groepen. In eerste instantie vind je het aandrijfmodel, welke de warmteontwikkelingen van de elektromotoren gaat bepalen in functie van het rijprofiel. Vervolgens is er een vereenvoudigd model van de warmteafgifte van de elektromotor aan het koelmedium, welke veranderlijk zal zijn in functie van de warmte-ontwikkelingen van de elektromotor, mediumtemperaturen en koelmedium debiet. Daar aansluitend zal ook de warmteafgifte van de in-wielelektromotor aan de omgeving bepaald worden door de integratie van het Nusselt getal voor een cilindervormig voorwerp. Door deze drie factoren te bepalen kan door de integratie van een vereenvoudigd thermisch massamodel de temperatuur van de in-wielmotoren geplot worden.



Figuur 48: Thermische model in-wielmotor

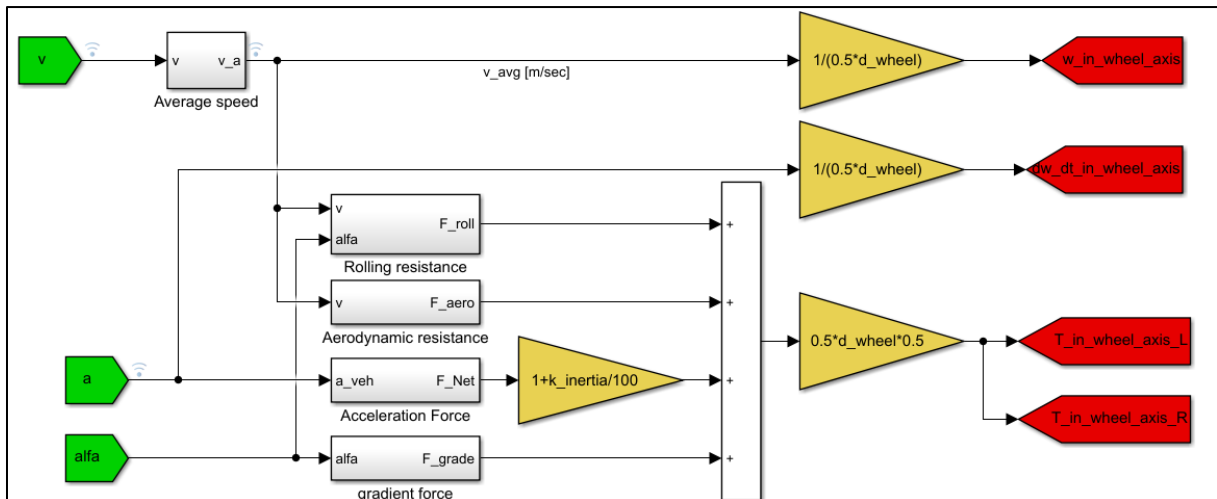
6.2.1 Aandrijflijn model

De warmteontwikkelingen van de elektromotor werden zoals eerder vermeld berekend door gebruik te maken van een opgelegde rijcyclus. In de gebruikers interface kan de gewenste rijcyclus geselecteerd worden. Voor de bepaling van de afgelegde afstand van de wagen wordt de effectieve snelheid geïntegreerd over de afgelegde tijdsspanne. De bepalingen van de versnelling van de wagen gebeurt via een differentiatie van de snelheid over een interval van één seconde.



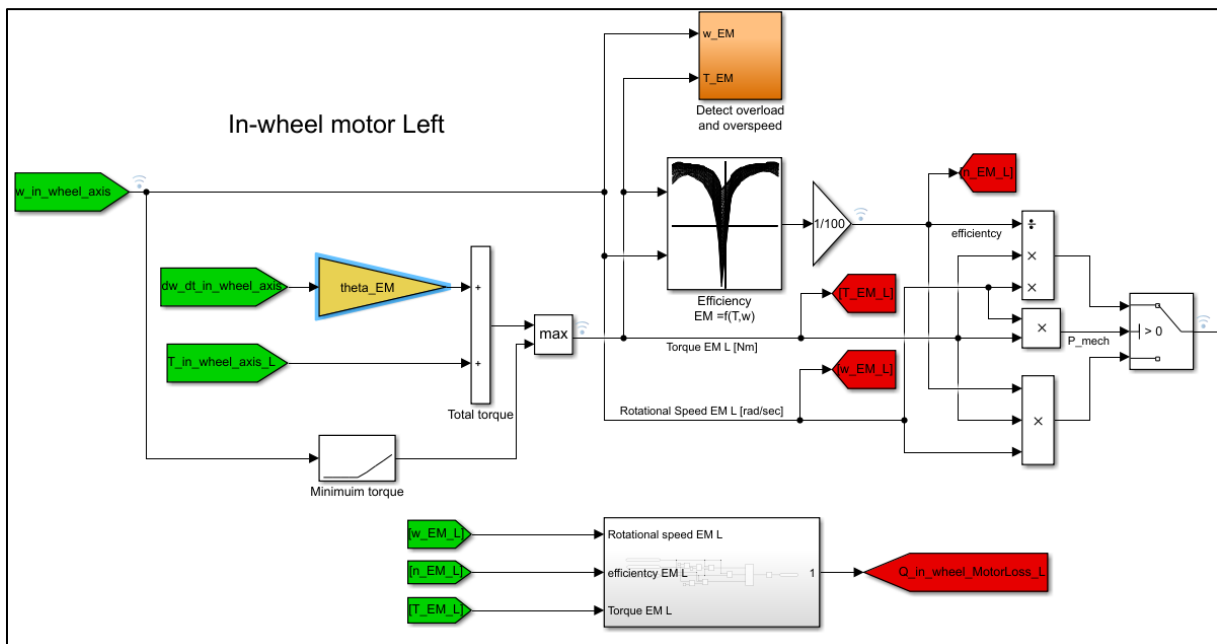
Figuur 49: Omzetting rijcyclus naar afstand, snelheid en versnelling

De snelheid en de versnelling van de wagen worden m.b.v. enkele eigenschappen van de wagen zoals bijvoorbeeld het gewicht en het frontaal oppervlak van de wagen, omgezet naar de inwerkende krachten op de wagen. De gebruikte formules kunnen terug gevonden worden in hoofdstuk 4.1. De som van de inwerkende krachten op de wagen geeft de totale aandrijfkracht. De vermenigvuldiging van de aandrijfkracht met de radius van de band van de wagen geeft ons het benodigd koppel, waarbij slip verliezen niet in rekening gebracht worden. Daarnaast worden ook de rotatiesnelheid en versnelling van de wielen berekend.



Figuur 50: Omzetting snelheid en versnelling naar rotatiesnelheid en koppel

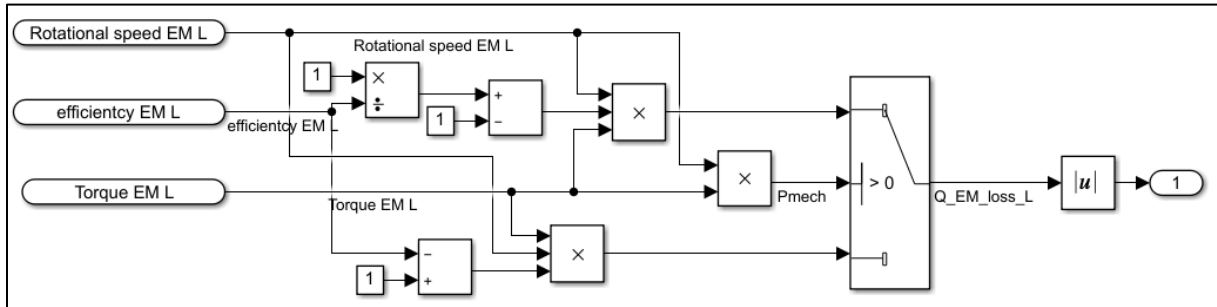
Vervolgens kan met behulp van de respectievelijke rotatiesnelheid en benodigd koppel het overeenkomend mechanisch vermogen bepaald worden. Hierbij wordt in functie van het teken van het mechanisch vermogen een onderscheid gemaakt tussen motor en generator werking.



Figuur 51: Aandrijfmodel in-wielmotor

6.2.2 Warmteontwikkelingen in-wielmotor

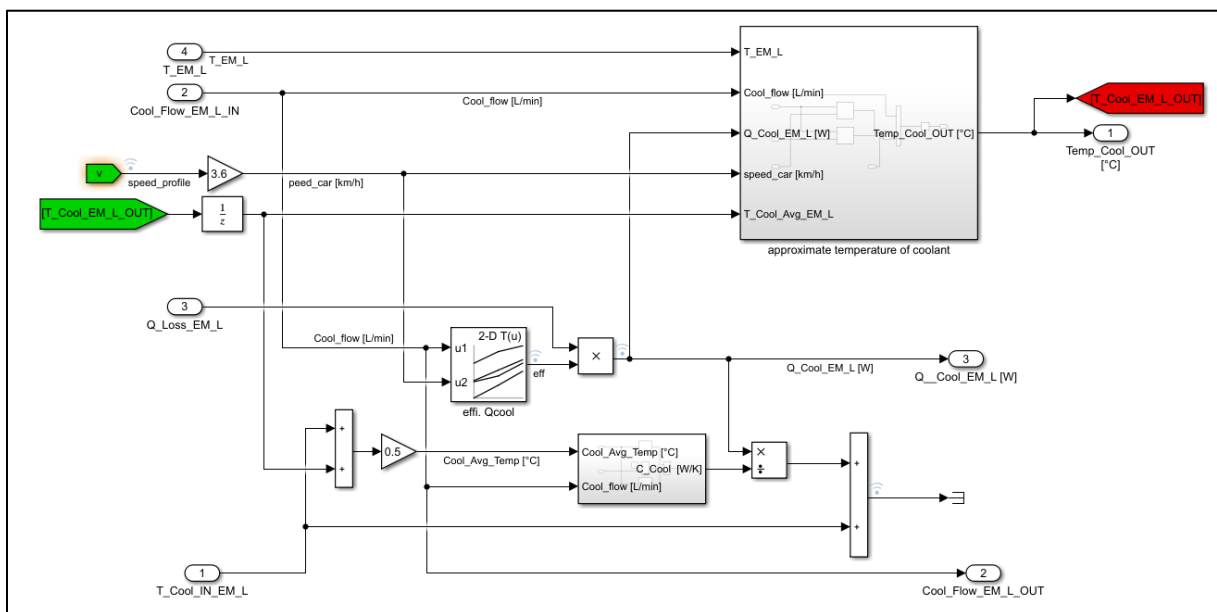
Door gebruik te maken van eerder aangehaald aandrijfmodel, kunnen nu de warmteontwikkelingen bepaald worden. Hierbij zal het teken van het koppel motor of generator werking aangeven. In functie hiervan wordt een andere formule geselecteerd welke in functie van het koppel, rotatiesnelheid en de overkomende efficiëntiewaarden, de warmteontwikkelingen van de elektromotor berekend. De gebruikte formules kunnen terug gevonden worden in H 2.2.1.



Figuur 52: Bepaling warmteontwikkeling in-wielmotor

6.2.3 Warmteopname koelmedium

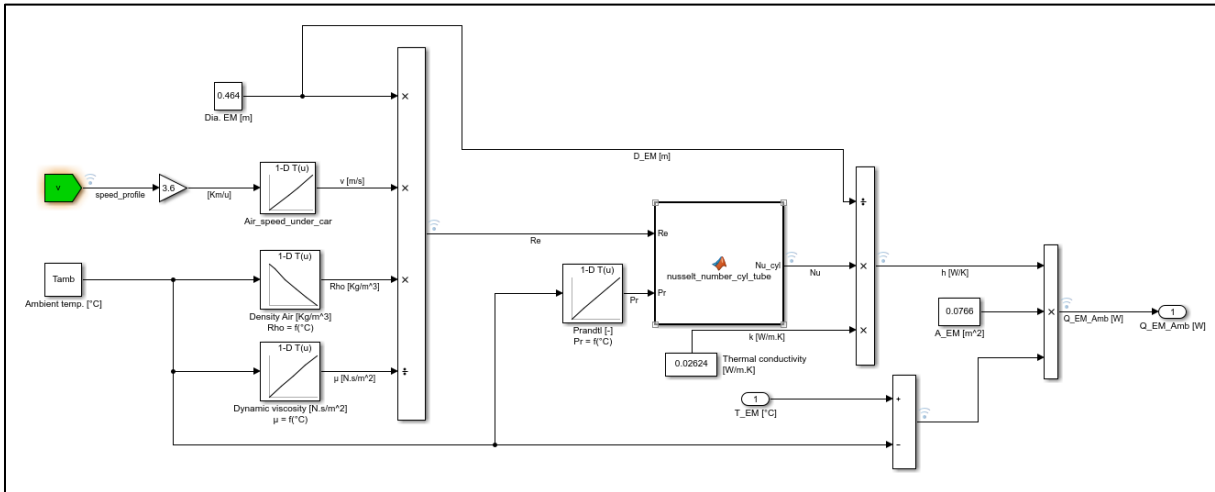
Zoals toegelicht in hoofdstuk 5.2. zal in functie van de warmteontwikkeling, het koelmedium debiet en de snelheid van de wagen, de warmteopname van het koelmedium in het koellichaam bepaald worden. Hieruit kan door de integratie van de thermische weerstandswaarde (R_{koel}) de gemiddelde temperatuur van het koelmedium bepaald worden.



Figuur 53: Bepaling warmteopname koelmedium

6.2.4 Warmteafgifte omgeving

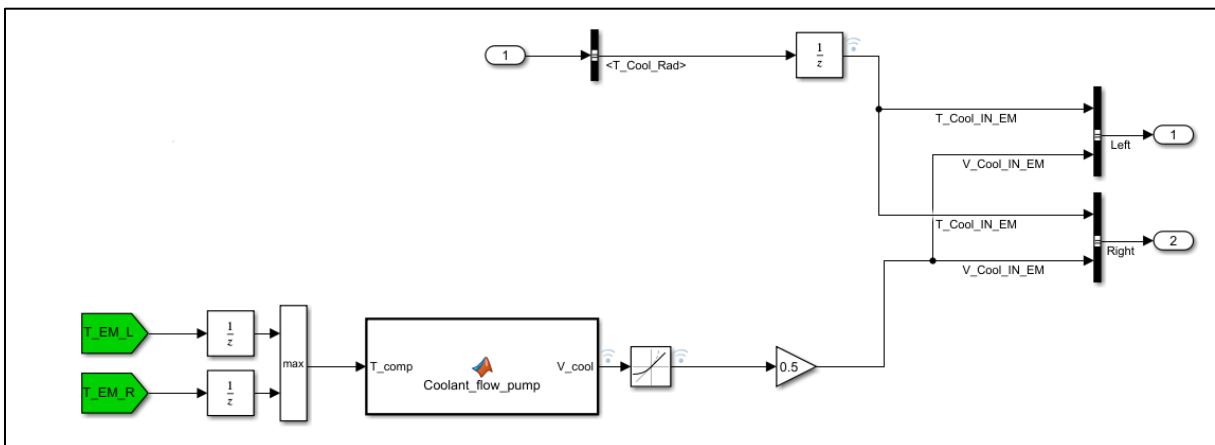
Voor de volledigheid wordt ook nog de warmteafgifte van de elektromotor aan de omgeving in rekening gebracht. De bepaling hiervan berust op het Nusselt getal. In functie van het Nusselt getal kan vervolgens de lokale warmteoverdrachtcoëfficiënt bepaald worden. Tenslotte vloeit hieruit de warmteoverdracht door convectie d.m.v. de integratie van het nat oppervlak van de in-wielmotor, de werkingstemperatuur van de elektromotor en de omgevingstemperatuur te integreren.



Figuur 54: Bepaling warmteafgifte aan de omgeving

6.3 Simulink model pomp

Het thermische model van de pomp is zeer eenvoudig gehouden. In functie van de werkingstemperatuur van de elektromotor zal het koelmedium debiet geleverd door de pomp verhoogd of verlaagd worden. Hierbij zal het koelmediumdebiet gelijkmatig verdeeld worden over de twee in-wielmotoren.



Figuur 55: Thermische model pomp

7 Conclusie en toekomstige uitbreidingen

In dit laatste hoofdstuk zullen de resultaten van het Simulink model overlopen worden voor de verschillende radiatoropstellingen. Hierbij zal er in eerste instantie vertrokken worden van de huidige opstelling van de radiator aan de onderzijde van de wagen. Deze opstelling zal als referentie dienen voor een eventuele herpositionering van de radiator naar de voorzijde van de wagen. Vervolgens zal er een antwoord worden gegeven op de vraag of het koelcircuit dan nog voldoende koelvermogen biedt om de in-wielmotoren in hun gewenst temperatuursgebied te houden

7.1 Huidige opstelling radiator

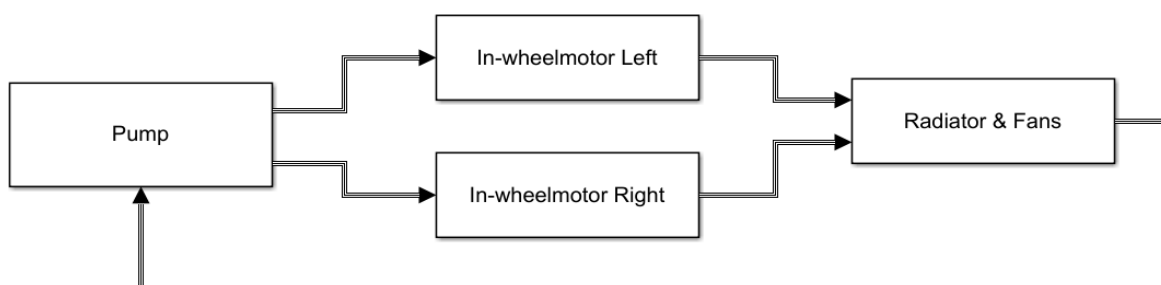
In de huidige opstelling kan de radiator terug gevonden worden aan de onderzijde van het chassis van de wagen. Hierbij werkten de ventilatoren initieel in een pull configuratie t.g.v. een verkeerde rotatie richting van de schoepen. In een pull configuratie zal de lucht aangezogen worden, waarbij de omgevingslucht zich zal verplaatsen vertrekkend aan de onderzijde van de radiator langs de vinnen van de radiator naar de bovenste zijde van de radiator.

Tijdens het doorlopen van de thesis werd deze fout opgemerkt en werd ook besloten om in deze opstelling verder gebruik te maken van push configuratie. Hierbij zal de luchtstroom zich verplaatsen van boven naar onder.



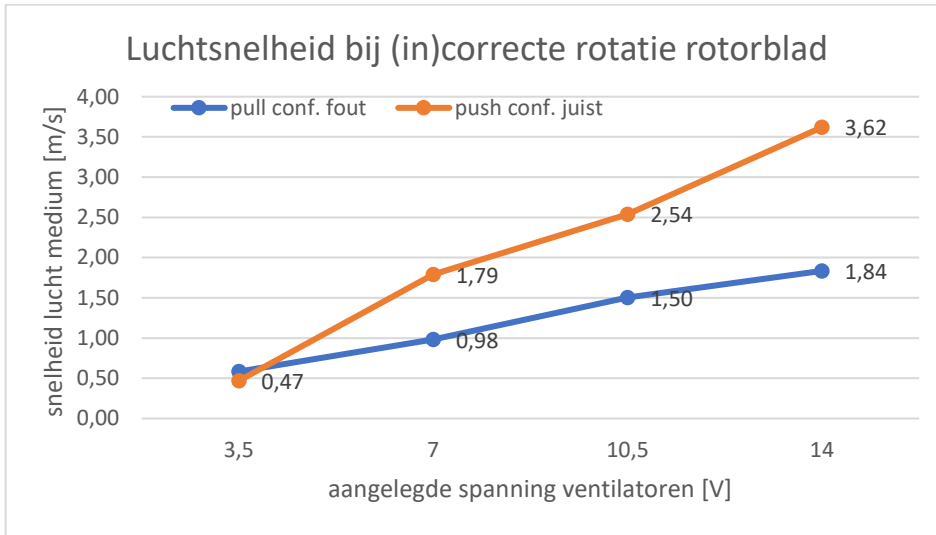
Figuur 56: Huidige positie radiator in-wielmotoren (Bron: Flanders Make)

Door de beschrijving van de verschillende componenten in het Simulink model kon er een gesloten thermische model van het huidig koelcircuit bekomen worden. Hierbij kon voor zowel de pull als push configuratie gebruik worden gemaakt van hetzelfde model, waarbij enkel de snelheid van het luchtmedium zal verschillen voor de drie opgelegde standen van de aangelegde bronspanning.



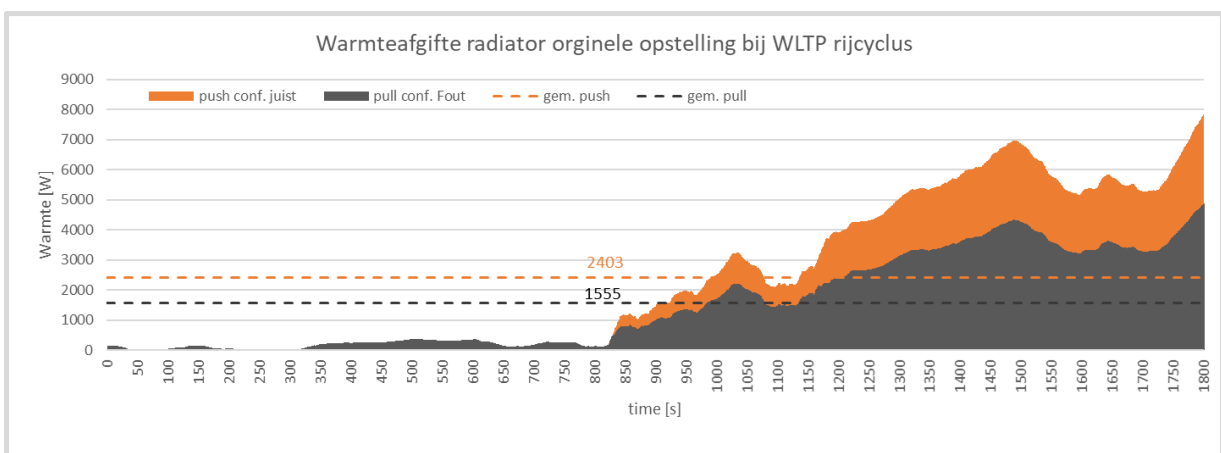
Figuur 57: Configuratie huidig koelcircuit in-wielmotoren

Figuur 58 geeft de gemiddelde luchtsnelheden over het radiator oppervlak weer, gemeten met de beschikbare anemometer. Hierbij kan vastgesteld worden dat in de nieuwe push configuratie beduidend hogere luchtsnelheden bekomen worden voor eenzelfde aangelegde spanning. Gezien hierdoor het thermische capacitef debiet C_{lucht} zal toenemen zal dit uiteindelijk leiden tot een vergelijkbare toename van de warmteafgifte van de radiator Q_{rad} .



Figuur 58: Luchtsnelheid i.f.v. aangelegde spanning bij pull en push configuratie

Tenslotte zal voor de huidige positie van de radiator, de gemiddelde warmteafgifte gesimuleerd worden in functie van de opgelegde WLTP rijcyclus. Hierbij wordt zowel de push als pull configuratie met elkaar vergeleken. Hieruit blijkt dat door middel van de hogere gegeneerde luchtsnelheden van de ventilatoren in de push configuratie er een duidelijk verschil kan terug gevonden worden in de gemiddelde warmteafgifte van de radiator voor de WLTP rijcyclus. Hierbij moet er wel vermeld worden dat t.g.v. een ongelukkig schadegeval aan de labo opstelling er geen proefondervindelijke warmteoverdrachtbepaling kon uitgevoerd worden op de ventilatoren in de push configuratie. Hierdoor werden enkel de gemeten luchtsnelheden aangepast in het nieuwe Simulink model van de radiator en ventilatoren. Het Simulink model zal vervolgens zelf de nieuwe globale conductantie (UA) bepalen door middel van interpolatie, welke uiteindelijk zal leiden tot de bepaling van de warmteafgifte van de radiator.



Figuur 59: Warmteafgifte radiator voor originele opstelling bij WLTP rijcyclus

7.2 Conceptuele opstelling radiatoren

Een laatste doelstelling voor deze masterproef is om na te gaan of het mogelijk is om de radiator van de in-wielmotoren te vervangen door een gereduceerd formaat om deze te positioneren in de rechtstreekste rijwind van de wagen. De ruimte in het verbrandingsmotor compartiment is door de positie van de radiator van deze verbrandingsmotor natuurlijk beperkt.

Een mogelijke alternatieve positie is deze achter de linkse en rechtse grill van de voorbumper, ter hoogte van de mistlichten. Deze ruimte is beperkt waarvoor een opsplitsing van het totale radiator oppervlak nodig zal zijn. Voor de verdere simulatie is er vertrokken van het frontale oppervlak van de radiator van het batterijpakket als referentie oppervlak. Hierbij werd er verondersteld dat zowel links als rechts een radiator wordt geplaatst. Hieruit volgen er twee mogelijkheden om deze radiatoren aan te sluiten, namelijk in serie of parallel.



Figuur 60: Voorbumper Range Rover Evoque [20]

Serie werking

Een eerste mogelijkheid is om beide radiatoren in serie te laten werken. Hierdoor zal een vergelijkbaar hoog koelmedium debiet door de radiatoren stromen. Een nadeel van serie is dat de ingaande koelmedium temperatuur van de 2^{de} radiator lager zal liggen dan deze van de eerste radiator. Hierdoor zal de warmteafgifte van de tweede radiator lager liggen.

Parallel werking

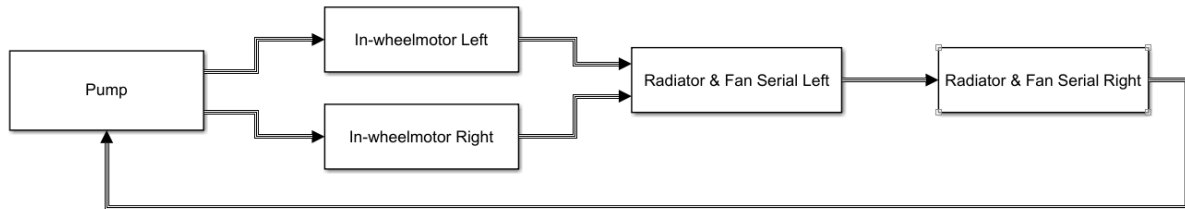
Hierbij zal elke in-wielmotor over zijn eigen radiator beschikken. Hierdoor zal het koelmedium debiet gereduceerd worden tot de helft t.o.v. serie werking, welke ook zijn effect zal hebben op de warmteafgifte van de radiator.



Figuur 61: Radiator batterijpakket

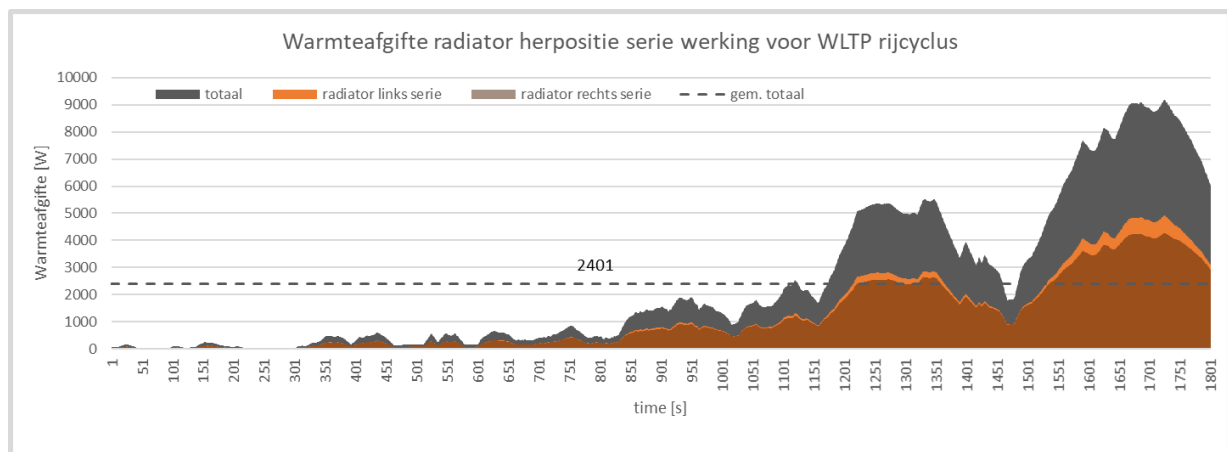
7.2.1 Serie werking

Voor serie werking werd onderstaand thermische model van het koelsysteem van de in-wielmotoren bekomen. In serie werking zal zoals juist aangegeven het koelmedium debiet hoger liggen dan bij parallel werking, gezien het koelmedium stromend door beide in-wielmotoren gecombineerd wordt.



Figuur 62: Configuratie serie werking radiatoren in optimale rijwind

In onderstaand overzicht van de warmteafgifte van de linkse en rechtse radiator in serie werking kan duidelijk het warmteafgifte verschil terug gevonden worden wanneer het laatste gedeelte van de WLTP cyclus wordt doorlopen. Dit zal voornamelijk veroorzaakt worden door het koelmedium temperatuurverschil over de linkse radiator, waarbij de grootteorde van het temperatuurverschil zal toenemen door de toename van de gemiddelde mediumtemperatuur. Een langere ingangstemperatuur van het koelmedium van de rechtse radiator zorgt vervolgens voor een lagere warmteafgifte aan de omgeving.



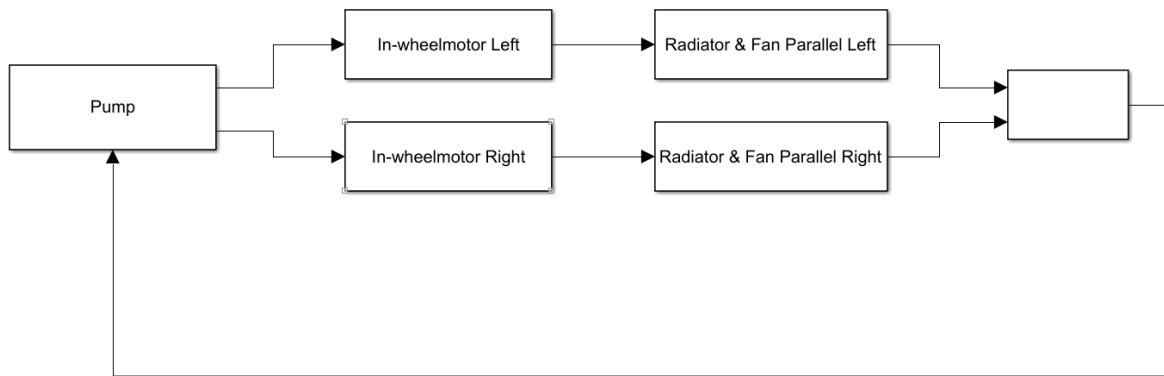
Figuur 63: Warmteafgifte radiator serie werking voor WLTP rijcyclus

De gemiddelde warmteafgifte van de radiator ligt rond **2.4 kilowatt**. Dit komt zo goed als overeen met de warmteafgifte van de huidige radiator in zijn huidige opstelling waarbij de ventilatoren in push configuratie zijn ingesteld. Dit wordt mogelijk gemaakt door nuttig gebruik te maken van de rijwind. Hierdoor kon het totale benodigde radiator oppervlak bijna gereduceerd worden tot de helft.

Hierbij vermeld ik wel dat enkel de verandering van het frontale oppervlak van de radiator in rekening is genomen. De vin densiteiten en het aantal vinnen per centimeter, van de radiator van het batterijpakket ligt hoger. Hieruit volgt dat per vierkante centimeter frontaal oppervlak deze beschikt over een groter nat oppervlak, welke het mogelijk maakt om meer warmte af te geven aan de omgeving. Om deze factor in de toekomst in rekening te brengen kan hiervoor een vergelijkbare proefondervindelijke meting uitgevoerd worden, waarbij in functie van de mediumsnelheden (lucht/koelmiddel) en de ingangstemperatuur van de mediums de globale conductantie (UA) kan bepaald worden. Dit zal uiteindelijk leiden tot een betere bepaling van de warmteafgifte van deze radiator.

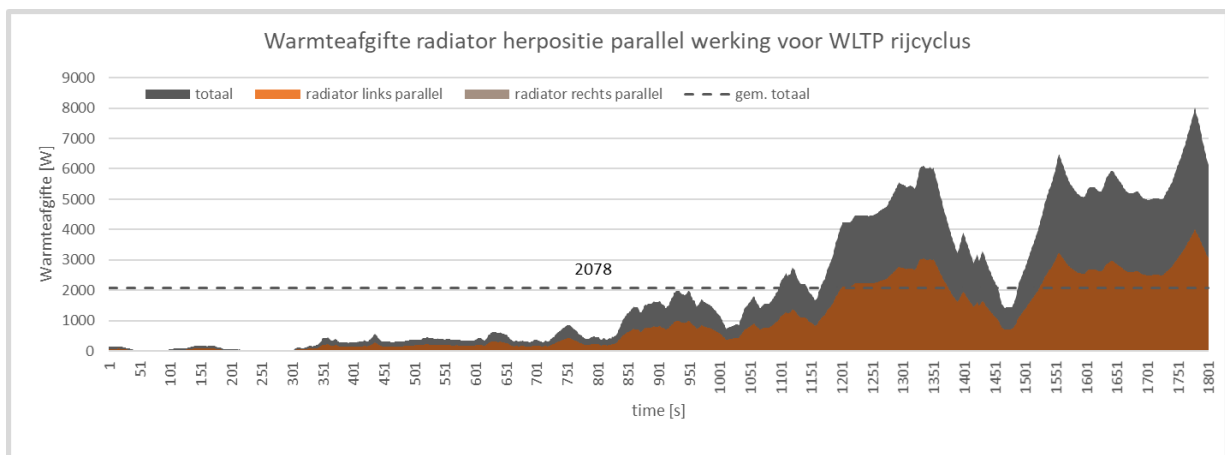
7.2.2 Parallel werking

In parallel werking zal elke in-wielmotor voorzien zijn van zijn eigen radiator. Hierdoor zal de warmteafgifte van de linkse en rechtse radiator gelijklopend zijn voor eenzelfde mechanische belasting. Het voordeel van deze opstelling is dat de ingaande mediumtemperatuur van beide radiatoren hierdoor hetzelfde is. Ten gevolge van deze parallelen opsplitsing zal het koelmedium debiet doorheen de respectievelijke radiatoren afnemen met de helft.



Figuur 64: Configuratie parallel werking radiatoren in optimale rijwind

Uit onderstaande figuur kan de totale gemiddelde warmteafgifte van de radiatoren in parallel werking terug gevonden worden. Hierbij bedraagt de gemiddelde warmteafgifte bij het doorlopen van de opgelegde WLTP rijcyclus **2.1 kilowatt**. Deze lagere warmteafgifte van de radiatoren in parallel werking is voornamelijk te wijten aan het lagere koelmediumdebiet doorheen de radiatoren.



Figuur 65: Warmteafgifte radiator parallel werking voor WLTP rijcyclus

7.3 Besluiten

De warmteontwikkelingen van de in-wielmotoren zullen afhankelijk zijn van het rijgedrag van de eindgebruiker evenals de aandrijfmodus (ICE, Hybrid, EV) welke de gebruiker verkiest om zich op voort te bewegen. In deze studie werd er uitgegaan van de meest kritische toestand, namelijk EV modus en de WLTP rijcyclus. Voor de huidige Plug-In hybride wagens is de actieradius, waarbij er uitsluitend elektrisch kan gereden worden, beperkt tot 50 km. Hierdoor kan er vastgesteld worden dat voor langere afstanden de hybride wagen zich voornamelijk zal voortbewegen d.m.v. de verbrandingsmotor met ondersteuning van de elektrische aandrijving op momenten dat het benodigd mechanische vermogen toeneemt. Uit de WLTP rijcyclus kon vastgesteld worden dat de gemiddelde warmteontwikkelingen over deze cyclus rondt de 2.5 Kilowatt zou bedragen per elektromotor. Dit geeft in totaal 5 Kilowatt aan warmte welke afgegeven moet worden om geen temperatuurverhoging te ondergaan.

Het warmtegedeelte dat opgenomen zal worden door het koelmiddel ter hoogte van het koellichaam van de in-wielmotoren ligt tussen de 70 en 95 procent. Wat wil zeggen dat tussen de 3.5 en 4.75 kilowatt warmte circuleert doorheen het koelcircuit, vertrekkend vanuit het koellichaam van de in-wielmotoren. Dit geeft aan dat in het ideale geval de radiatoren een vergelijkbare hoeveelheid warmte moet kunnen afgeven aan de omgeving om de temperatuur van het koelmedium niet te hoog te laten stijgen. Uit de simulaties van de warmteafgifte van de radiator in zijn huidige opstelling blijkt dat de gemiddelde warmteafgifte zich eerder situeert rond de 2.4 kilowatt. Ten gevolgen van beperkte dynamische gegevens over het temperatuursverloop in het koelsysteem was het moeilijk om de effectieve temperatuur van de in-wielmotoren te simuleren. Met behulp van een vereenvoudigd massa model kan een globale werkingstemperatuur gesimuleerd worden. Hierbij zou volgens simulatie de temperatuur van de in-wielmotoren startend van omgevingstemperatuur toenemen tot ongeveer 70 °C .

Uit deze meetresultaten voor de hybride wagen in EV modus volgt dat, het huidig koelcircuit, meer specifiek de radiator van de in-wielmotoren niet voldoende warmte kan afgeven om de werkingstemperatuur van de in-wielmotoren onder de vooropgestelde 60°C te houden. Hierbij moet wel rekening gehouden worden dat de maximale werkingstemperatuur van de in-wielmotoren wordt vastgelegd op 85°C door de fabrikant. Om de gemiddelde warmteafgifte van de radiator te verhogen kan na integratie van de aangekochte vortex flow sensoren een optimalere koelregeling bekomen worden. Er is dan de mogelijkheid om traploos, het koelmedium debiet geleverd door de pomp en het luchtmedium geleverd door de ventilatoren, traploos te regelen. Door de conceptuele uitwerking, waarbij twee kleinere radiatoren links en rechts achter de grill van de voorbumper geplaatst worden, weten we nu dat een serie opstelling resulteert in een vergelijkbare warmteafgifte aan de omgeving. Indien de positie het toelaat kan er gekeken worden of eventuele grotere radiatoren tot de mogelijkheden kan behoren.

Ook kan er besloten worden dat voor de hybride rij modus het koelsysteem van de in-wielmotoren voldoende koelcapaciteit heeft om de in-wielmotoren binnen het vooropgestelde temperatuurgebied te houden. Dit aangezien de elektromotoren enkel een bijkomende ondersteuning bieden aan de verbrandingsmotor en dus beduidend lagere gemiddelde warmteverliezen ontwikkelen. In het geval dat het koelsysteem toch gedimensioneerd moet worden op basis van de puur elektrische rijmodus zal een extra aanpassing aan het radiator oppervlak noodzakelijk zijn.

7.4 Toekomstige uitbreidingen

Voor een nog betere bepaling van het thermische gedrag van het huidig koelsysteem kunnen in de toekomst nog enkele punten uitgevoerd worden. In eerste instantie kunnen de aangekochte sensoren toegevoegd worden aan het koelcircuit van de in-wielmotoren. Dit zou het mogelijk maken om met behulp van de voorhanden rollenbank, een prestatiekaart op te stellen. Hierbij zou de thermische weerstand van het koelmedium bepaald kunnen worden in functie van de gemiddelde koelmediumtemperatuur over de in-wielmotoren, de werkingstemperatuur van de in-wielmotor en de effectieve warmteopname van het koelmedium ter hoogte van het koellichaam van de in-wielmotoren. Deze test kon ten gevolge van een beperkt tijdsbestek niet uitgevoerd worden waardoor enkele vereenvoudigingen doorgevoerd moesten worden.

Daarnaast zou door de uitvoering van een proefondervindelijke meting op de radiator van het batterijpakket, een accurater gedrag gesimuleerd kunnen worden voor de conceptuele uitwerking waarbij twee van deze radiatoren, links en rechts, achter de grill van de voorbumper geplaatst worden. Op dit moment werd enkel het verschillende frontaal oppervlak in rekening gebracht. Echter zal in realiteit ook de geometrische vorm van de radiator bepalend zijn, denk maar aan bijvoorbeeld de vin dichtheid.

Tenslotte kan met behulp van deze testen een accurater Simulink model bekomen worden. Na het optimaliseren van dit thermische model, behoort een validatie van dit model tot de modelijkheden. Hierbij kan door het effectief uitvoeren van de WLTP rijcyclus op de rollenbank, de performantie en de betrouwbaarheid van het virtuele model vastgelegd worden.

Bronnenlijst

- [1] L. Van Der Berg and B. Lofaro, "Formula SAE Cooling System Design," *Calif. State Univ.*, 2014.
- [2] by S. Park, "A Comprehensive Thermal Management System Model for Hybrid Electric Vehicles," *Phd thesis*, p. 63, 2011.
- [3] J. Lamarre, "FSAE Electric Vehicle Cooling System Design," *Univ. Akron*, 2015.
- [4] K. Mohd. Ehmer and K. Farmeena, "A Comparative Study of White Box , Black Box and Grey Box Testing Techniques," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 6, pp. 12–15, 2012.
- [5] "Witte doos (software engineering)." [https://en.wikipedia.org/wiki/White_box_\(software_engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/White_box_(software_engineering)) (accessed Oct. 02, 2020).
- [6] A. Haniff Mahmud, Z. Hilmi Che Daud, and Z. Asus, "the Impact of Battery Operating Temperature and State of Charge on the Lithium-Ion Battery Internal Resistance," *J. Mek.*, vol. 40, no. June, pp. 1–8, 2017, [Online]. Available: <https://mech.utm.my/wp-content/uploads/2017/12/1-THE-IMPACT-OF-BATTERY-OPERATING-TEMPERATURE-AND-STATE-OF-CHARGE-ON-THE-LITHIUM-ION-BATTERY-INTERNAL-RESISTANCE.pdf>.
- [7] T. Ott, C. Onder, and L. Guzzella, "Hybrid-Electric vehicle with natural gas-diesel engine," *Energies*, vol. 6, no. 7, pp. 3571–3592, 2013, doi: 10.3390/en6073571.
- [8] "Forced Convection Around Obstacles," *Convect. Heat Transf.*, pp. 119–139, 2010, doi: 10.1002/9780470611890.ch4.
- [9] D. A. Staton and A. Cavagnino, "Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 10, pp. 3509–3516, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.922604.
- [10] GNIELINSKI V., "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," 1976.
- [11] A . F . Mills, "Heat Transfer (2nd Edition)," *Engelwood Cliffs*, 1999.
- [12] H. L. Sadik Kakac, "HEAT EXCHANGERS: Selection, Rating, and Thermal Design," *Taylor Fr. Gr.*, 2012.
- [13] W. S. Janna, "Engineering Heat Transfer," *CRC Press LLC*, pp. 488–493, 2000.
- [14] R. Badgujar Pankaj, S. Rangarajan, and S. R. Nagaraja, "Analytical Performance Analysis of Cross Flow Louvered Fin Automobile Radiator," *MATEC Web Conf.*, vol. 172, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201817202003.
- [15] Huba Control, "Flow sensor type 210 for liquid media Flow range Nominal diameters Temperature measurement ent," pp. 1–11, 2019.
- [16] L. Guzzella and a Amstutz, "The QSS Toolbox Manual," *Fuel*, no. June, 2005.
- [17] D. Jiménez, S. Hernández, J. Fraile-Ardanuy, J. Serrano, R. Fernández, and F. Alvarez, "Modelling the effect of driving events on electrical vehicle energy consumption using inertial sensors in smartphones," *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 1–24, 2018, doi: 10.3390/en11020412.
- [18] K. Kumar, M. Bertoluzzo, G. Buja, and F. Ortenzi, "Quantitative Analysis of Efficiency Improvement of a Propulsion Drive by Using SiC Devices: A Case of Study," *Adv. Power Electron.*,

vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/9149472.

- [19] S.-H. Lee and S.-W. Lee, "Battery State-of-Charge Estimation Algorithm Using Dynamic Terminal Voltage Measurement," *IEIE Trans. Smart Process. Comput.*, vol. 4, no. 2, pp. 126–131, 2015, doi: 10.5573/ieiespc.2015.4.2.126.
- [20] Range Rover, "Range Rover Evoque Specification." pp. 1–2, 2017.
- [21] B. C. S. Tsiakmakis, G. Fontaras, C. Cubito, J. Pavlovic, K. Anagnostopoulos, "From NEDC to WLTP: Effect of the type approval CO2 emissions of light-duty vehicles," *JRC Sci. HUb*, 2017.
- [22] B.-E. N. Onderhoudshandleiding, "LUCHTSNELHEIDSMETER MODEL 9565-SERIE," 2014.
- [23] C. Lin, J. Saunders, and S. Watkins, "The effect of changes in ambient and coolant radiator inlet temperatures and coolant flowrate on specific dissipation," *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 2000, doi: 10.4271/2000-01-0579.