



## Förarklimat i solcellsdriven bil

**Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Maskinteknik**

AUGUSTSSON ROBERT

EDLIND JESPER

GONERA MARTIN

LUBEGA ISAAC

REHNBERG MARIA

SANDIN OLLE

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling

*Avdelningen Produktutveckling*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2013

Kandidatarbete PPUX03-13-15

Förklimat i solcellsdriven bil  
Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Maskinteknik

AUGUSTSSON ROBERT  
EDLIND JESPER  
GONERA MARTIN  
LUBEGA ISAAC  
REHNBERG MARIA  
SANDIN OLLE

© AUGUSTSSON ROBERT, EDLIND JESPER, GONERA MARTIN, LUBEGA ISAAC,  
REHNBERG MARIA, SANDIN OLLE, 2013

PPUX03-13-15  
Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling  
Avdelningen för Produktutveckling  
Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

## Sammanfattning

Syftet med detta kandidatarbete var att undersöka och utveckla möjliga metoder för att förbättra förarklimatet i en solcellsdriven tävlingsbil inför World Solar Challenge som Chalmers tekniska högskola planerar att tävla i. I projektet ingick även en undersökning av hur människokroppen påverkas av de tuffa förhållandena som man utsätts för under tävlingen. Lösningar undersöktes ifall de kunde implementeras i personfordon. En grundlig genomgång av förhållandena under World Solar Challenge, undersökning kring tidigare tävlingsbilar, förstudier av passiva kylmetoder och materialanalyser, forskning av de fysiologiska aspekterna och metoder för förhindring av uppvärmning genomfördes.

Problemet delades upp i tre huvudområden: *nedkylning av kupé, undvika uppvärmning av kupé och föraren*. Sekundära mål bestod av implementering av lösningar i personbilar, deras kostnad och miljöpåverkan. Arbetets upplägg möjliggjorde att tydliga mål och avgränsningar kunde sättas för att effektivisera arbetet där varje delmedlem kunde fördjupa sig inom valt ämne. Arbetet är grundat på matematiska modeller och beräkningar då ingen tävlingsbil funnits tillgänglig. Ytterligare begränsningar bestod av att ingen möjlighet till mätning av väderförhållanden och testning av lösningsförslag gavs.

Då tävlingsbilen har en begränsad mängd solcellsenergi lades störst vikt i arbetet på att undersöka metoder som drivs utan tillförd elektrisk energi. Alternativa metoder som skulle kunna utnyttja spillenergi eller självdrivande kemiska processer för kylande effekt har i största grad undersökts. Både beprövade och nya metoder har undersökts.

Projektet resulterade i en kombination av fyra stycken metoder för att förbättra förarklimatet i tävlingsbilen: isolering, toning och ventilation av hytten samt användning av kylväst av föraren. Denna kombination är den mest lämpliga för projektet med avseende på World Solar Challenges regelverk, kraftiga vikt- och energirestriktioner, enkelhet att implementera samt kostnad. Den totala kostnaden för systemet uppskattades vara 8 150 kr. Efter noggrann utvärdering framgick att användning av avancerade kylsystem skulle medföra större viktökning av tävlingsbilen än vad som tillåts inom projektets avgränsningar samt att vissa system ej uppfyller faktorer som säkerhetsaspekter och komplexitet.

## **Abstract**

The purpose of this bachelor thesis was to investigate and develop possible methods to improve the driver climate in a solar powered racing car for the World Solar Challenge which Chalmers University of Technology plans to compete in. The project also included a study of how the human body reacts to tough climate conditions encountered during the contest. An examination of whether the solutions could be implemented in road vehicles was also done. The following aspects were incorporated throughout the project: a thorough review of the conditions during the World Solar Challenge, an investigation of previous race cars, the research of passive cooling methods and materials analysis, a research of the physiological aspects and methods for preventing heating of the cabin.

The problem was divided into three areas: *cooling the passenger compartment*, *to avoid heating of the passenger compartment* and *driver comfort*. Secondary objectives consisted of implementation in road cars, cost analysis and environmental impact of a possible solution. The working setup allowed clear objectives and boundaries to be set in order to work more efficiently and allowed every member of the group to immerse themselves in a chosen topic. The work is based on mathematical models and calculations since practical tests were not feasible because of the absence of a racing car. Another limitation was that no possibility of measuring weather conditions or testing of proposed solutions was given.

Because of the racing car's limited amount of solar energy, more emphasis was put on investigating different methods that operated without solar powered electrical energy. Alternative methods that could utilize waste energy or self-propelled chemical processes for cooling effect were examined. Both old and new methods were investigated.

The project resulted in a combination of four different methods to improve the driver's climate in the race car: insulation, tinting and ventilation of the cabin and the use of a cooling vest by the driver. This combination was the most suitable for the project based on the World Solar Challenge regulations, the weight and energy restrictions, simplicity to implement and the cost. The total cost of the system was estimated to be 8,150 SEK. After careful evaluation it appeared that the use of an advanced cooling system would lead to greater weight gain of the racing car than what was allowed within the project boundaries, and that some of the systems did not meet the restrictions for safety and complexity.

## **Förord**

Denna rapport är ett resultat av ett kandidatarbete som utförts under vårterminen 2013 av sex teknologer på civilingenjörsutbildningen i maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg.

Vi vill rikta ett tack till vår handledare Göran Gustafsson, universitetslektor vid institutionen för produkt- och produktionsutveckling vid Chalmers tekniska högskola, som har guidat oss genom detta arbete. Vidare vill vi sända ett stort tack till Filip Nielsen och Torbjörn Lindholm vid institutionen för installationsteknik på Chalmers tekniska högskola för den hjälp de har bidragit med under arbetets gång. Vi vill även tacka Ronnie Hansson på Volvo Cars AB för att han tagit sig tid att besvara alla våra frågor samt Andrew Dawkes och Jonathan Rice på institutionen för tillämpad mekanik på Chalmers tekniska högskolan för ovärderlig vägledning.

## Innehåll

Sammanfattning .....	ii
Abstract .....	iii
Förord .....	iv
1 Inledning .....	1
1.1 Bakgrund och förutsättningar .....	1
2 Syfte och problemformulering .....	2
2.1 Nedbrytning till delproblem .....	2
2.2 Avgränsningar .....	3
2.3 Disposition.....	4
3 Förstudier .....	5
3.1 Kylmetoder i dagens tävlingsbilar .....	5
3.2 Prestationsförmåga .....	6
3.2.1 Syre- och koldioxidhalten .....	6
3.2.2 Luftfuktighet.....	7
4 Metod .....	8
4.1 Anskaffande av information .....	8
4.2 Beräkningar .....	8
4.2.1 Ventilation.....	8
4.2.2 Luftfuktighet.....	9
4.2.3 Värmebalans.....	12
4.3 Upprättande av kravspecifikation .....	13
4.4 Konceptgenerering.....	13
4.5 Val av koncept .....	13
5 Resultat .....	14
5.1 Ventilation .....	16
5.2 Luftfuktighet.....	17
5.3 Beskrivning av kravspecifikationen .....	17
5.4 Lösningförslag .....	18
5.4.1 Nedkylning av kupén .....	18
5.4.2 Undvika uppvärmning av kupén .....	25
5.5 Föraren.....	29
5.6 Eliminering .....	31

5.7	Utvärdering efter eliminering .....	32
5.7.1	Adsorptionskylning (APACS).....	33
5.7.2	Heat pipes .....	34
5.7.3	Kylväst med PCM .....	34
5.7.4	Toning .....	34
5.7.5	Isolering.....	35
6	Slutsats och rekommendationer .....	36
7	Diskussion.....	37
7.1	Arbetsgång.....	37
7.2	Förarklimatet .....	37
7.3	Spillvärme.....	38
7.4	Kostnad.....	38
7.5	Energiförbrukning och miljöpåverkan.....	38
7.6	Implementering av kylsystem i personbilar.....	39
	Källförteckning.....	40
	Bilaga A Kravspecifikation.....	44
	Bilaga B Använda värden vid beräkning av värmebalans .....	45
	Bilaga C Tabellvärden för vatten .....	46

# 1 Inledning

Samhället strävar efter att utveckla energisnåla system för att reducera energi- och resursförbrukningen. I dagens fordon står klimatanläggningen för en betydande del av energiförbrukningen. Detta projekt undersöker möjligheter till att anpassa en energisnål klimatanläggning till ett tävlingsfordon där den tillgängliga energin är kraftigt begränsad.

## 1.1 Bakgrund och förutsättningar

Chalmers tekniska högskola vill inom snar framtid delta i World Solar Challenge som är en tävling för solcellsdrivna fordon, se Figur 1. World Solar Challenge består av flera klasser. Den mest prestigefulla är Challenger och är den klass Chalmers så småningom vill ställa upp i. Tävlingen sker i Australien där man börjar i Darwin och kör genom hela kontinenten och slutar i Adelaide. Sträckan är cirka 3000 km. Under loppet kan temperaturen uppnå 40°C vilket kan leda till att temperaturen i förarkabinen blir ytterligare 10°C varmare. Dessa temperaturer är en stor påfrestning för föraren då han kör fordonet i max fyra timmar i sträck. För närvarande krävs förtäring av vatten för att undvika uttorkning samt för att kyla ner sig.

För Challengerklassen gäller att tävlingsbilen endast ska innefatta föraren (World Solar Challenge 2012). Storleksmässigt får bilen maximalt vara 4,5 m lång, inte vara högre än 1,8 m och inte vara bredare än 1,8 m. Solcells bilen ska även ha fyra symmetriskt placerade hjul vilket är nytt för i år. Bilen får endast drivas utav solenergi.



Figur 1. Tidigare deltagarbilar som är utformade för att vara så aerodynamiska och lätta som möjligt för att på ett energisnålt sätt fullborda tävlingen (ESHI INTERNATIONAL PTE LTD 2011, Karotki 2011 och Wikipedia 2013)



## 2 Syfte och problemformulering

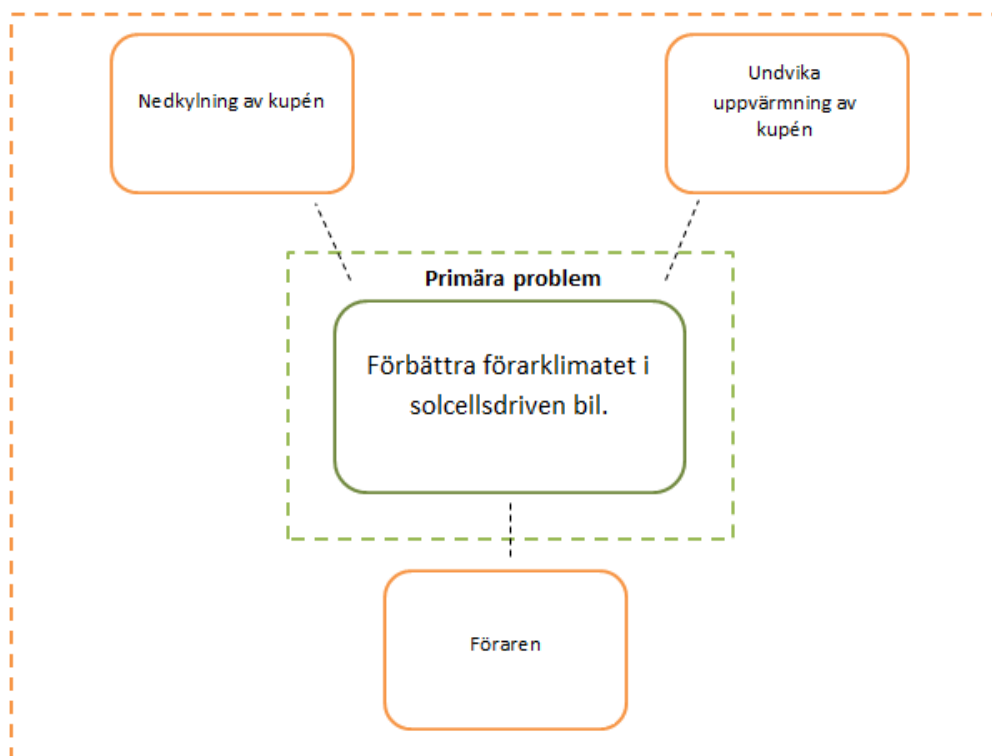
Syftet med detta projekt är att ta fram en metod för att skapa ett behagligt klimat i kupén som möter de krav som ställs i form utav exempelvis vikt, effektbehov och komplexitet samt göra en studie kring de fysiologiska aspekter som påverkar människans komfort. Projektet innefattar även en mindre undersökning om huruvida de slutgiltiga resultaten kan implementeras i personbilar samt serietillverkas inom fordonsindustrin.

Den största utmaningen i detta projekt är att skapa ett drägligt klimat i hytten utan att i större utsträckning påverka tävlingsbilens energiförbrukning. Då tävlingen utförs med tävlingsbilar som är helt och hållet drivna med solenergi, vars mängd begränsas av World Solar Challenges regelverk, vill man att största delen av denna energi går till driften av fordonet.

### 2.1 Nedbrytning till delproblem

För att utveckla ett koncept som förbättrar förarklimatet delas projektets primära problem in i delproblem. Detta görs för att säkerställa att alla delar i problemet beaktas och möjliggöra att det valda konceptet löser alla befintliga problem. Vid nedbrytning till delproblem förenklas lösningsgången då varje delproblem blir mindre komplext. Alla lösningar kan sedan integreras till en slutgiltig lösning.

Projektets primära problem och huvudfokus är att förbättra förarklimatet i den solcellsdrivna tävlingsbilen. Detta problem delas in i tre delproblem, se Figur 2, där alla gemensamt bidrar till ett förbättrat förarklimat.



Figur 2. Nedbrytning av primära problem till delproblem.

### ***Nedkylning av kupén***

Temperaturen i hytten kan regleras med hjälp av ett kylsystem. Olika sorters kylsystem utför detta på skilda sätt. Ett passivt kylsystem är fördelaktigt då det drivs utan att förbruka användningsbar energi (solcellsenergi) utan använder exempelvis spillenergi. Passiva metoder är relativt utvecklade för byggnader med vinddrag och smarta skugglösningar som kylningsmetoder. Däremot är passiva lösningar inte lika utvecklade för fordon. Prototyper av passiva kylsystem för HEV<sup>1</sup> och EV<sup>2</sup> finns för närvarande endast i utvecklingsstadium. Beroende på förmågan hos ett passivt kylsystem att förbättra förarklimatet bör man överväga om ett aktivt kylsystem med hög verkningsgrad är tillämpningsbart för projektet.

### ***Undvika uppvärmning av kupén***

Instrålning av solenergi medför temperaturökning i kupén. Detta får som konsekvens att effektbehovet av ett potentiellt kylsystem ökar. Projektet undersöker metoder som motverkar uppvärmning av kupén från solinstrålning och omgivningen.

### ***Föraren***

I detta projekt läggs fokus på att skapa ett klimat för föraren där prestationsförmågan inte försämras. Studier genomförs för att finna vilka temperaturer som är acceptabla under tävlingen. Projektet tar även hänsyn till de fysiologiska problem som kan uppstå om kroppen utsätts för höga temperaturer samt hur de påverkar förarens körförmåga. En förutsättning för att föraren ska kunna genomföra loppet är att luften i hytten håller tillräcklig kvalitet. Studier av vilka syre- och koldioxidnivåer som är kritiska och när de inträffar utförs. En annan aspekt som studeras är luftfuktigheten och dess påverkan på temperaturuppfattningen.

### ***Sekundära delproblem***

Utöver de primära delproblemen innehar projektet en del som beaktar det framtagna systemet och dess möjlighet att implementeras i vanliga personbilar. I detta ingår att utvärdera ifall en potentiell lösning kan anpassas till olika fordonsmodeller samt massproduceras. Kostnader för en potentiell lösning samt dess miljöpåverkan betraktas som sekundära delproblem i projektet. Dessa uppgifter klassas som sekundära delproblem då projektets främsta fokus ligger på att höja tävlingsbilens komfort.

## **2.2 Avgränsningar**

World Solar Challenge omfattar ett flertal klasser där varje klass innehar olika regler och krav. Chalmers tekniska högskola skall ställa upp och tävla i Challenger som är den hårdast reglerade klassen. Därav skall projektet följa de regelverk som gäller för denna klass. Den mest signifikanta regeln för projektet är att ingen extern energikälla utöver solenergi får användas. Under projektet finns inget solcellsdrivet fordon tillgängligt för att testa lösningarna. Projektet kommer endast vara en teoretisk studie för att beskriva allmänna sätt att skapa ett acceptabelt klimat i kupén.

---

1 Hybrid Electric Vehicle

2 Electric Vehicle

### **2.3 Disposition**

Arbetet är indelat i en grundläggande förstudie, modellering och beräkningar av problemet och en slutgiltig undersökning av potentiella lösningar samt rekommendationer och diskussion om lämpligt lösningsförslag.

### 3 Förstudier

För att få kunskap om problemet gjordes förstudier. Faktorer som antogs vara relevanta var temperaturens och luftkvalitetens påverkan på människan samt dagens kylningsmetoder i tävlingsbilar. En analys av klimatet under loppet utfördes som underlag.

#### 3.1 Kylmetoder i dagens tävlingsbilar

I andra biltävlingar används kylmetoder för att hålla förarens kroppstemperatur på önskvärd nivå. Dessa kylmetoder är inte dimensionerade för att skapa ett klimat som skulle anses drägligt i privatfordon. Förebyggande åtgärder görs för att gardera sig mot den extrema värmen. Innan förarna sätter sig i förarkabinerna förbereder de sig genom diverse metoder för att stärka sig mentalt såväl som fysiskt. Förarna stärker sin mentalitet främst för att hålla sig lugna när de sitter i de små förarutrymmena med höga temperaturer. Anledningen till detta är att inte låta stress fungera som en ytterligare faktor för försämrade komfort. Vissa tävlingsdeltagare använder sig av yoga för att stärka både kropp och mentaliteten så att kroppen blir uthålligare och lugnare (Hicks 2011), vilket är viktigt då föraren ska sitta i en kupé med hög temperatur i flera timmar. Ett ytterligare sätt att förbereda kroppen är att sänka kroppstemperaturen hos föraren genom ett isbad innan tävlingen startar. Föraren förtär vatten efter behov under tävlingens gång för att kyla ner sig och inte utsättas för vätskebrist.

Temperaturen och luftfuktigheten stiger under körperioden. Detta medför en mer påfrestande miljö i förarkupén varför ytterligare kylmetoder krävs utöver en stark mentalitet. För att fortsätta hålla förarens kroppstemperatur nere används kylvästar, fläktar och ventilation. Kylvästarna används för att kyla nära intill kroppen för att slippa kyla hela förarkupén. Fläktar används för att flöda omgivande hyttluft mot kroppen vilket ger en känsla av att det är en lägre temperatur än vad det egentligen är. Denna metod fungerar för temperaturer upp till 35°C och har sedan motsatt effekt, luften upplevs varmare. För ventilation används ofta luftintag i form av NACA-kanaler, se Figur 3. Detta på grund av deras låga påverkan av aerodynamiken. Syftet är att få ett flöde av svalare omgivningsluft in i den varma kupén och på så sätt ge en kylande effekt.



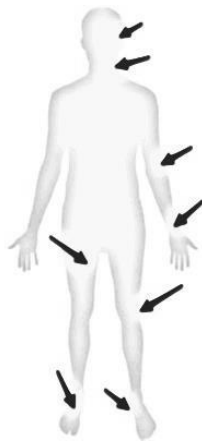
Figur 3. Utformning av NACA-kanaler för att reducera den aerodynamiska påverkan (Chassis Shop 2013).

## 3.2 Prestationsförmåga

Med rätt temperatur och kupéklimat ökar komforten och prestationsförmågan. Förarens prestationsförmåga bedöms utifrån förarens koncentration och uppmärksamhet i trafiken. Forskning har utförts kring hur bilförare påverkas av olika temperaturförhållanden. Wyon, Wyon, och Norin har påvisat att förare mår och presterar som bäst vid kupétemperaturer på cirka 20-22°C. Vid högre temperaturer försämras reaktionsförmågan och risken för missbedömningar ökar. Ytterligare en slutsats är att män och kvinnor påverkas olika vid höga temperaturer. Studien visar att kvinnor som utsätts för höga temperaturer presterar sämre än män som utsätts för samma påfrestningar.

Vid höga temperaturer svettas föraren och det är viktigt att förtära tillräcklig mängd vatten för att ersätta den genom svettning förlorade vattenmängden. Temperaturkontrollen av kroppen kan annars sättas ur spel och man får värmeslag, som i extrema fall kan medföra döden.

Ett sätt att försöka kontrollera kroppstemperaturen är att kyla ner de ställen på kroppen där man enkelt kan känna av sin puls. Just dessa områden är lämpliga på grund av att kroppens stora blodkärl är så pass nära ytan på huden (Baskind 2010). Ytliga blodkärl möjliggör att med hjälp av kallt vatten eller kall luft kyla ner blodet och i sin tur även sänka kroppstemperaturen. Figur 4 visar var på kroppen man kan komma åt dessa ytliga blodkärl, bland annat halsen, handlederna och insida armbåge.



Figur 4. Delar av kroppen där kyla upplevs starkast (Gordon, W. 2010).

Färger kan påverka hur kroppen upplever olika miljöer genom att skapa och frambringa vissa känslor och uppfattningar. Färgen blå är känd för att framkalla känslan av att vara sinneslugn samtidigt som den skapar säkerhet och förtroende genom att kroppen börjar producera kemiska preparat som är dämpande och nervlugnande (Stuart 2010). Mycket användning av färgen mörkblå kan få kroppen att känna sig kall vilket kan vara användbart inom projektet.

### 3.2.1 Syre- och koldioxidhalten

En viktig aspekt kring förarens prestation är luftkvaliteten. Luftens koncentration av koldioxid ( $CO_2$ ) och syre ( $O_2$ ) är de två ämnen som avgör kvalitén av luften. En lägre halt syre än 19 % medför att föraren får sänkt koncentrationsförmåga enligt The Engineering Toolbox. En hög halt koldioxid kan rent av vara livshotande. Halten koldioxid får inte överstiga 0,09 %.

### **3.2.2 Luftfuktighet**

Relativ luftfuktighet är ett mått på hur mycket vattenånga som finns i luften kontra den maximala mängden vattenånga luften kan innehålla vid en viss temperatur och tryck. En hög luftfuktighet medför att temperaturen upplevs högre än vad termometern visar. Detta på grund av att en hög luftfuktighet medför att svetten på kroppen tar längre tid att avdunsta vilket i sin tur innebär att värmeenergin tar längre tid att föras bort från kroppen. Den upplevda temperaturen beskrivs av Humidex (Canadian Centre for Occupational Health and Safety 2011), som är ett förhållande mellan faktiskt temperatur, relativ luftfuktighet och upplevd temperatur.

## 4 Metod

Olika metoder tillämpades för att erhålla de bästa möjliga lösningarna. Detta för att säkerställa att lösningarnas olika aspekter beaktades på ett tillförlitligt vis. Arbetet genomfördes på ett ingenjörsmässigt iterativt sätt där ständig återkoppling ingick för att verifiera resultatet. Dessa metoder presenteras och motiveras i respektive avsnitt.

### 4.1 Anskaffande av information

Informationsanskaffning av ämnen som berörde projektet pågick under hela projektets gång. Uppdaterat material har i största möjliga mån använts för att lyckas producera ett aktuellt och uppdaterat resultat. Informationsinsamlingen innefattade fördjupning i passiva och aktiva klimatanläggningar, relevanta termodynamiska avsnitt, materialegenskaper och fysiologiska aspekter av människan. För att erhålla information studerades ämnesrelaterade böcker, filmer, forskningsrapporter och internethemsidor. Kontakt togs med relaterade företag, organisationer och institutioner för rådfrågning och feedback. Ett studiebesök utfördes på Jönköpings Tekniska Högskola där deras Solar Team presenterade sin kommande tävlingsbil vilket bjöd på en hel del inspiration.

### 4.2 Beräkningar

För att bestämma effektbehovet av kylkapaciteten i förarhytten krävs att ett flertal variabler tas i hänsyn till. Bland dessa är hur stor mängd luft som skall tempereras, avgiven och tillförd värmeenergi, ventilation och aktuell luftfuktighet. Dessa problem har delats upp och behandlats separat för att kombineras till en slutgiltig beräknad kyleffekt.

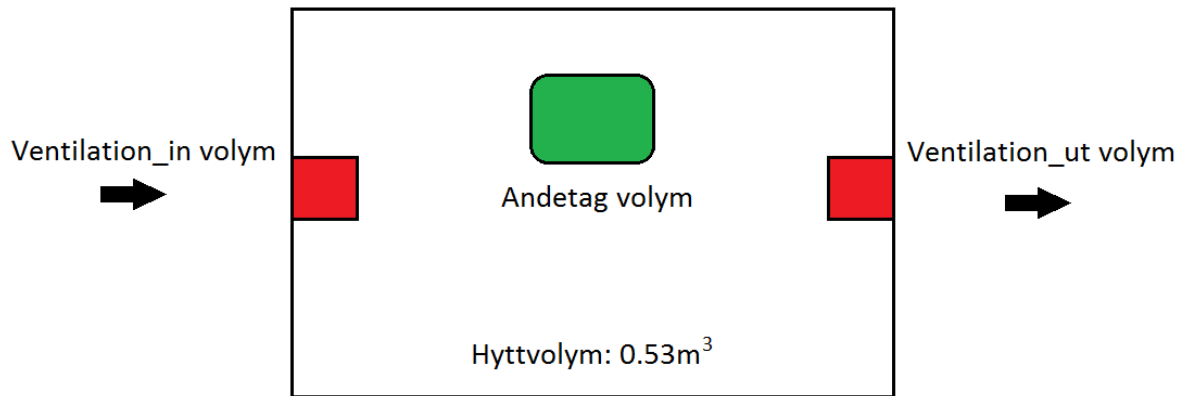
#### 4.2.1 Ventilation

Koncentrationen av syre och koldioxid i förarhytten påverkas av mängden luft föraren förbrukar via andning och den tillförda luften via ventilation till hytten. För att kunna hålla koncentrationen av syre och koldioxid till rimliga värden måste ventilationen beräknas.

Ett andetag motsvarar 0,5 liter luft (Villem 1972) och en människa tar ungefär 12 andetag per minut vid vila (Lindh, Pooler, Tamparo, och Dahl 2009). Via cellandning i kroppen sker en energiomvandling som förbrukar syret och ökar koldioxidhalten på utandningsluften. Denna luft kommer i sin tur blandas med den inneslutna luften i hytten och höja koldioxidhalten. För att halten av syre och koldioxid inte ska nå en kritisk nivå krävs tillräcklig ventilation.

Atmosfären består av 21 % syre och 0,04 % koldioxid medan ett andetag består av 15 % syre och 4,2% koldioxid (BBC). Volymen av hytten har uppskattats till  $0,53\text{m}^3$  utifrån Costin och Phipps (1974) samt den metod som tävlingsbilar i Formula Student utformas efter (SAE International). En iteration av ventilationsvolymen utfördes där både syre och koldioxidhalten togs till hänsyn.

Figur 5 illustrerar hur problemet modellerades. Hytten har ett konstant luftflöde med frisk luft utifrån och ett utflöde av hyttluften. Föraren andas kontinuerlig och ändrar luftens ämneshalter.



Figur 5. Modellerig av luftflöden i förarhytten.

$$CO_{ny} = \frac{(CO_{hytt} * m_{hytt}) - (CO_{hytt} * m_{andetag} - CO_{andetag} * m_{andetag}) + (CO_{luft} * V_{ventilation} * \rho_{luft} - CO_{hytt} * V_{ventilation} * \rho_{luft})}{m_{hytt}}$$

#### Ekvation 1. Förändringen av $CO_2$ -halten i hytten

Ekvation 1 beskriver förändringen av koldioxidhalten per sekund.  $m$ -termerna representerar massan på ett andetag och massan på hyttluften.  $CO$  representerar koldioxidhalten vid aktuellt atmosfärsförhållande, andetag och blandningen av luften i hytten.  $V_{ventilation}$  är den okända variabeln som måste beräknas för att få ett tillfredsställande värde på  $CO_2$ -koncentrationen. Samma ekvation gäller för att bestämma  $O_2$ -koncentrationen.

#### 4.2.2 Luftfuktighet

Upplvd temperatur beror på luftens relativa fuktighet och faktiska temperatur. De faktorer som avgör luftfuktigheten i hytten är den kända luftfuktigheten vid väderstationer och den fukt föraren avger via andning och svettning, så kallad latent energi. Hur mycket fukt luften kan innehålla beror på dess tempertur och atmosfärstrycket. Andningen och svettning, rådande väderförhållanden och ventilation ger den slutgiltiga luftfuktigheten i hytten. Med denna information kan temperaturen som hytten bör ha för ett acceptabelt klimat avgöras med hjälp av Humidex.

Vid beräkningen antas att temperaturen är densamma utanför och inuti hytten. Då den relativa luftfuktigheten är känd vid väderstationer utefter loppet kan den absoluta luftfuktigheten beräknas enligt Ekvation 2 (Mörtstedt och Hellsten).  $x$  betecknar den absoluta fuktigheten,  $p$  betecknar det rådande ångtrycket,  $\varphi$  den relativa fuktigheten och  $p''_w$  är ångans mättnadstryck vid den aktuella temperaturen.

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p''_w}{p - \varphi \cdot p''_w} \quad [kg/kg \text{ luft}]$$

#### Ekvation 2. Absoluta luftfuktigheten i hytten.

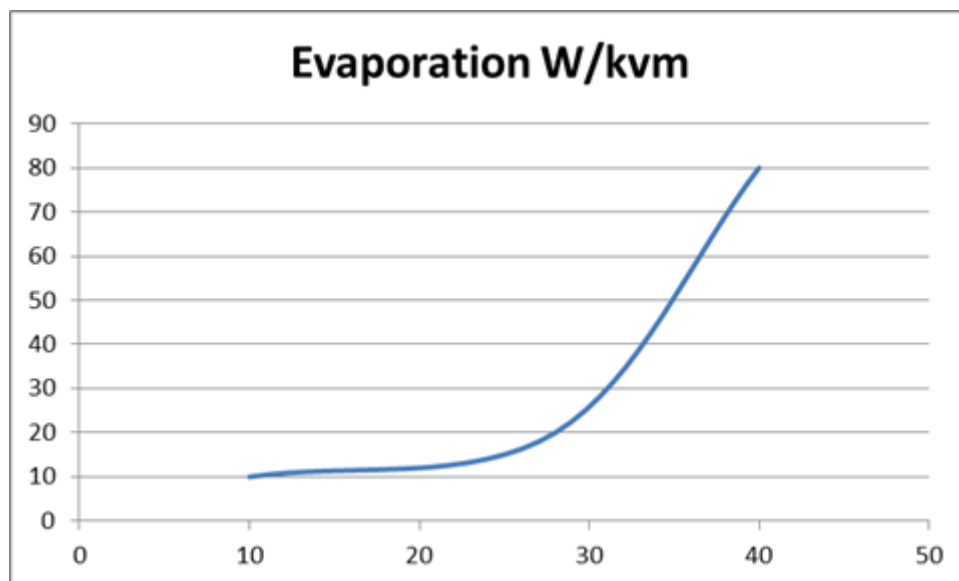
Ångans mättnadstryck är temperaturberoende och beräknas enligt Ekvation 3 (Leer och Keeley) där  $t$  är temperaturen i  $^{\circ}C$ . Ekvationen stämmer till 0,3% inom intervallet  $-35^{\circ}C$  till  $35^{\circ}C$ .



$$p''_w(t) = 100 \cdot 6,112 \cdot \exp\left(\frac{17,67t}{t + 243,5}\right) \quad [Pa]$$

Ekvation 3. Ångans mättnadstryck.

Den latent energi föraren avger är den energi som avges genom evaporation (svett och andning) och därmed ökar luftfuktigheten. Latent effekt uppskattas efter en kurvanpassning som gjorts till en graf tillhandahållen av Ronnie Hansson vid Volvo Cars<sup>3</sup>, se Figur 6. Evaporationen beror på kroppsarea. Den genomsnittliga kroppsarean för en vuxen människa är  $1,7 \text{ m}^2$  (Ronnie Hansson).



Figur 6. Evaporation från föraren.

Massflödet av vattenånga från kroppen beräknas enligt Ekvation 4 (Torbjörn Lindholm<sup>4</sup>) där  $h_{\text{ångbildning}}$  betecknar ångbildningsentalpi vid  $0^\circ\text{C}$ , vilken är  $2501 \text{ kJ/kg}$  (Mörtstedt och Hellsten).

$$\dot{m}_{\text{vattenånga}} = \frac{P_L}{h_{\text{ångbildning}}} \quad [kg/s]$$

Ekvation 4. Massflöde vattenånga som avges av föraren.

Volym evaporerad vattenånga fås genom Ekvation 5 där  $\rho_{\text{luft}}$  för aktuell temperatur i hytten används. Värdet interpoleras från tabell (Mörtstedt och Hellsten).

$$\dot{V}_{\text{förare}} = \frac{\dot{m}_{\text{vattenånga}}}{\rho_{\text{luft}}} \quad [m^3/s]$$

Ekvation 5. Volymflöde vattenånga som avges av föraren.

Absolut fuktighet tillförd från föraren genom evaporation per tidsenhet kan därmed beräknas enligt Ekvation 6 med känd hyttvolym.

<sup>3</sup> Ronnie Hansson (Technical expert Climate, Volvo Cars Sweden) intervjuad av författarna 16 april 2013

<sup>4</sup> Torbjörn Lindholm (Universitetslektor, Chalmers tekniska högskola) intervjuad av författarna 21 mars 2013

$$\dot{x}_{f\u00f6rare} = \frac{\dot{V}_{f\u00f6rare}}{V_{hytt}} \quad [1/s]$$

Ekvation 6. Absolut luftfuktighet tillf\u00f6rd av f\u00f6raren per tidsenhet.

Absoluta fuktigheten i hytten med h\u00e4nsyn till f\u00f6raren \u00e4r s\u00e5ledes enligt Ekvation 7 d\u00e4r  $x_{initial}$  ber\u00e4knas enligt Ekvation 2.

$$x_{f\u00f6rare} = x_{initial} + \dot{x}_{f\u00f6rare}t$$

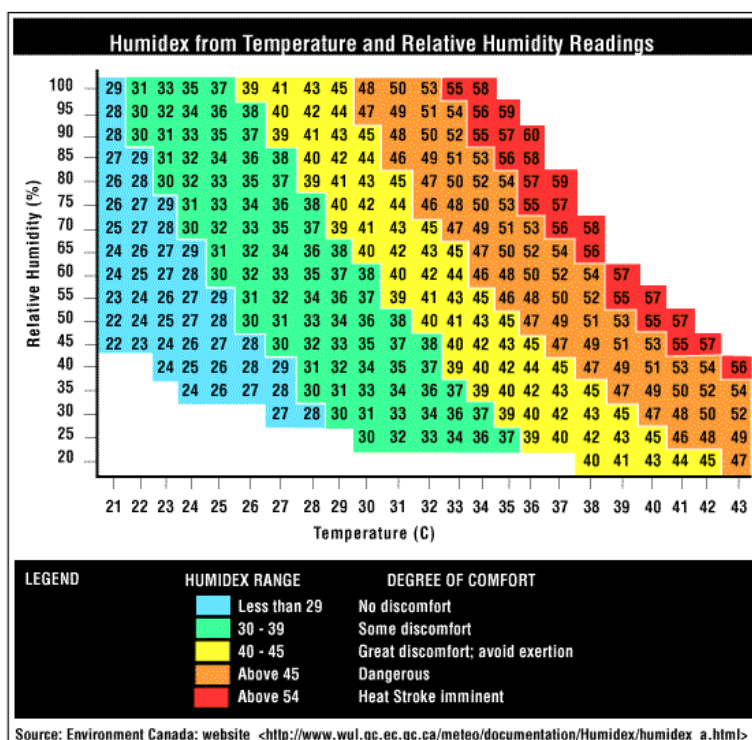
Ekvation 7. Absolut luftfuktighet i hytten vid tiden t p\u00e5 grund av tillf\u00f6rd vatten\u00e5nga fr\u00e5n f\u00f6raren.

Ventilationen kommer att byta ut luft med volymfl\u00f6det enligt  $O_2$ - och  $CO_2$ -villkoret vilket resulterar i att absoluta luftfuktigheten kan ber\u00e4knas enligt Ekvation 8.

$$x_{hytt} = \frac{x_{f\u00f6rare}(V_{hytt} - V_{ventilation}) + x_{ventilation}V_{ventilation}}{V_{hytt}}$$

Ekvation 8. Absoluta luftfuktigheten i hytten med h\u00e4nsyn till ventilation och av f\u00f6raren tillf\u00f6rd vatten\u00e5nga.

Den upplevda temperaturen beskrivs av Humidex (Canadian Centre for Occupational Health and Safety 2011), se Tabell 1. Den relativa luftfuktigheten  $\varphi$  som anv\u00e4nds i Humidex l\u00f6ses ut ur Ekvation 2. Med detta ges den maximala till\u00e5tna temperatur som f\u00f6raren f\u00e5r uts\u00e4ttas f\u00f6r. Inom projektet best\u00e4mdes att f\u00f6raren maximalt skulle uts\u00e4ttas f\u00f6r n\u00e5got obehag, gr\u00f6nt i Tabell 1.



Tabell 1. Upplevd temperatur med komfortniv\u00e5. Bl\u00e5 niv\u00e5 \u00e4r inget obehag p\u00e5 grund av v\u00e4rme, gr\u00f6n niv\u00e5 n\u00e5got obehagligt, gul niv\u00e5 mycket obehagligt. Orange och r\u00f6d \u00e4r farliga niv\u00e5er (Canadian Centre for Occupational Health and Safety 2011).

### 4.2.3 Värmebalans

En värmebalans modellerades utifrån en avhandling av Huang (1998) som användes vid beräkningar av A/C-system i fordon. Med detta kunde en kyleffekt bestämmas för projektets tävlingsbil. En omarbetad version av Huangs ekvationer finns i artikel av Gado, Hwang och Radermacher (2005) som är en tillräcklig approximation, se Ekvation 9, Ekvation 10, Ekvation 11. Termerna för dessa beskrivs i Tabell 2. Denna har använts för beräkningar av värmebalansen över förarkabinen.

$$M_r C_p \dot{T}_r + M_c C_c \dot{T}_c = -m_e C_p (T_m - T_s) + Q_{sol} + Q_{ps} + U_o A_o (T_{amb} + T_r) + m_{iv} C_p (T_{amb} - T_r)$$

Ekvation 9. Värmeeffekt med avseende på interiörens- och hyttluftens temperatur

$$M_c C_c \dot{T}_c = -h_c A_c (T_c - T_r)$$

Ekvation 10. Värmeeffektsutbytet mellan inredning och hyttluften

$$m_{iv} C_p T_{amb} + (m_e - m_{iv}) C_p T_r = m_e C_p T_m$$

Ekvation 11. Kyleffekt från A/C med inkluderad ventilation

$A_o$	Area kupé	$m^2$
$A_c$	Area interiör	$m^2$
$C_p$	Specifik värmekapacitet	$J/(kg \cdot K)$
$C_c$	Specifik värmekapacitet inredning	$J/(kg \cdot K)$
$h_c$	Konvektiv värmeöverföringskoefficient mellan inredning och kupéluft	$W/(m^2 \cdot K)$
$M_r$	Massa insidan kupén	$kg$
$M_c$	Massa inredning	$kg$
$m_e$	Massflöde från A/C (evaporator)	$kg/s$
$m_{iv}$	Massflöde infiltration och/eller ventilation	$kg/s$
$Q_{sol}$	Effekt solstrålning	$W$
$Q_{ps}$	Sensibel effekt från passagerare	$W$
$\dot{T}_r$	Temperaturändring insidan kupén eller rummet	$K/s$
$\dot{T}_c$	Temperaturändring inredning	$K/s$
$T_m$	Temperatur mix in i A/C	$K$
$T_s$	Temperatur tillförd ut ur A/C	$K$
$T_{amb}$	Temperatur omgivning	$K$
$T_r$	Temperatur kupén	$K$
$T_c$	Temperatur interiör	$K$
$U_o$	Värmeöverföringskoefficient mellan kupé och omgivande luft	$W/(m^2 \cdot K)$

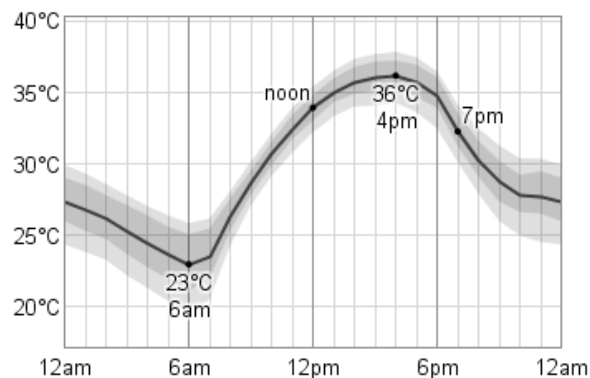
Tabell 2. Nomenklatur vid beräkning av värmebalans

Utifrån ekvationerna för värmebalans kunde ett tid-temperaturdiagram tas fram som beskriver hur temperaturen i hytten ( $T_r$ ) och inredning ( $T_c$ ) förändras med tiden beroende på temperaturen på luften ut från kylsystemet ( $T_s$ ). Med det som utgångspunkt kunde kyleffekt tas fram ur Ekvation 12.

$$Total\ kyleffekt = m_e * C_p * (T_m - T_s)$$

Ekvation 12. Slutgiltig kyleffekt som krävs för att hålla konstant temperatur.

Då vädret och lufttemperaturen förändras under loppet ändras även effektbehovet. För att undersöka kylsystemets maximala effektbehov under loppet beräknas en värmebalans under den delsträcka då omgivningstemperaturen är som högst. Från WeatherSpark (2013) fås diagram som beskriver genomsnittstemperaturer för valt område och datum. I detta projekt jämförs de olika delstoppen längs med sträckan som kommer köras i World Solar Challenge 2013. Den varmaste delsträckan går genom Katherine, Northern Territory där temperaturen under dygnet beskrivs enligt Figur 7. Som Figur 7 anger nås den högsta genomsnittstemperaturen i Katherine för 8 oktober vid 16.00 och når 36°C.



Figur 7. Temperaturförhållanden i Katherine, Northern Territory i Australien 8 oktober (WeatherSpark 2013).

### 4.3 Upprättande av kravspecifikation

En kravspecifikation upprättades för att på ett överskådligt sätt illustrera de krav och önskemål som ställs på lösningen. I kravspecifikationen sammanställdes de krav och önskemål som sattes av World Solar Challenges regelverk och Chalmers tekniska högskola. Önskemålen viktades efter prioritet medan kraven måste uppfyllas. Kylmetoder från tidigare tävlingsbilar beaktades också för att säkerställa att lösningarna är likvärdiga eller överträffar existerande system. De krav och önskemål som innefattar värden och parametrar räknades eller uppskattades.

### 4.4 Konceptgenerering

Olika koncept genererades för att ge uppslag till lösningar på problemet. Generering av koncept skedde genom brainstorming där alla idéer oavsett rimlighetsgrad godtogs. Då sessionen var över granskades förslagen med hjälp av tillgänglig kunskap och en beskrivning gjordes av de olika förslagen för att ytterligare öka förståelsen.

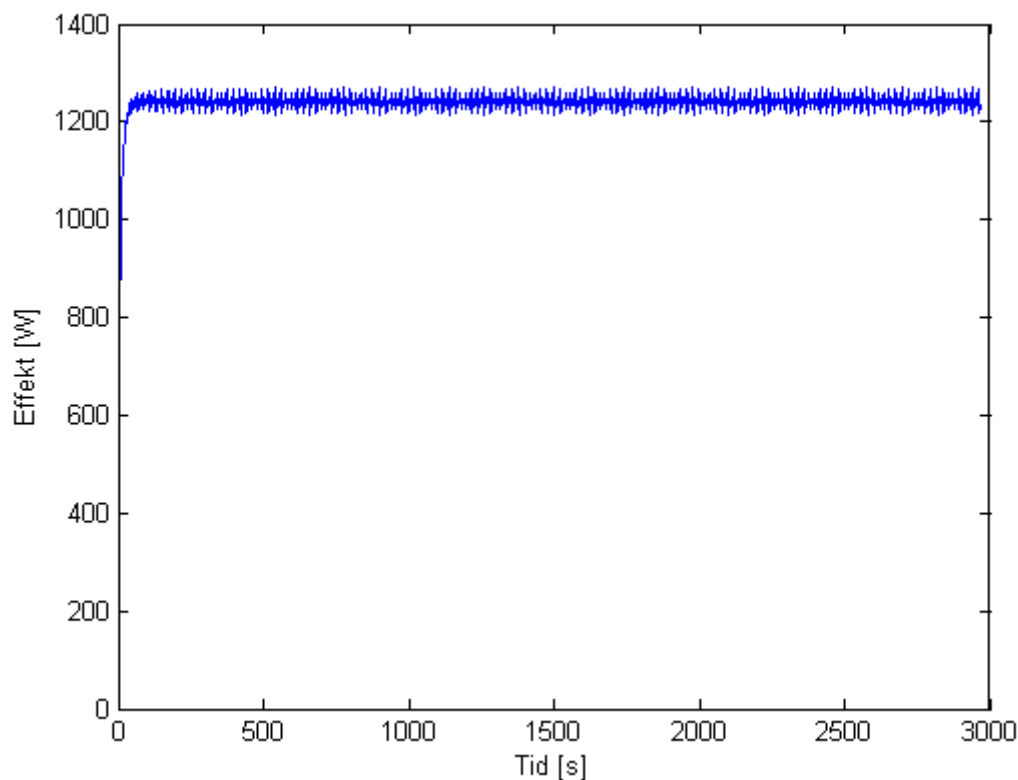
### 4.5 Val av koncept

För att eliminera koncept användes en elimineringsmatris där koncepten jämfördes med kraven från kravspecifikationen. Om ett koncept inte uppfyllde kraven vidareutvecklades inte dessa koncept. Fortsatt arbete fokuserades således endast på de koncept som uppfyller kraven.

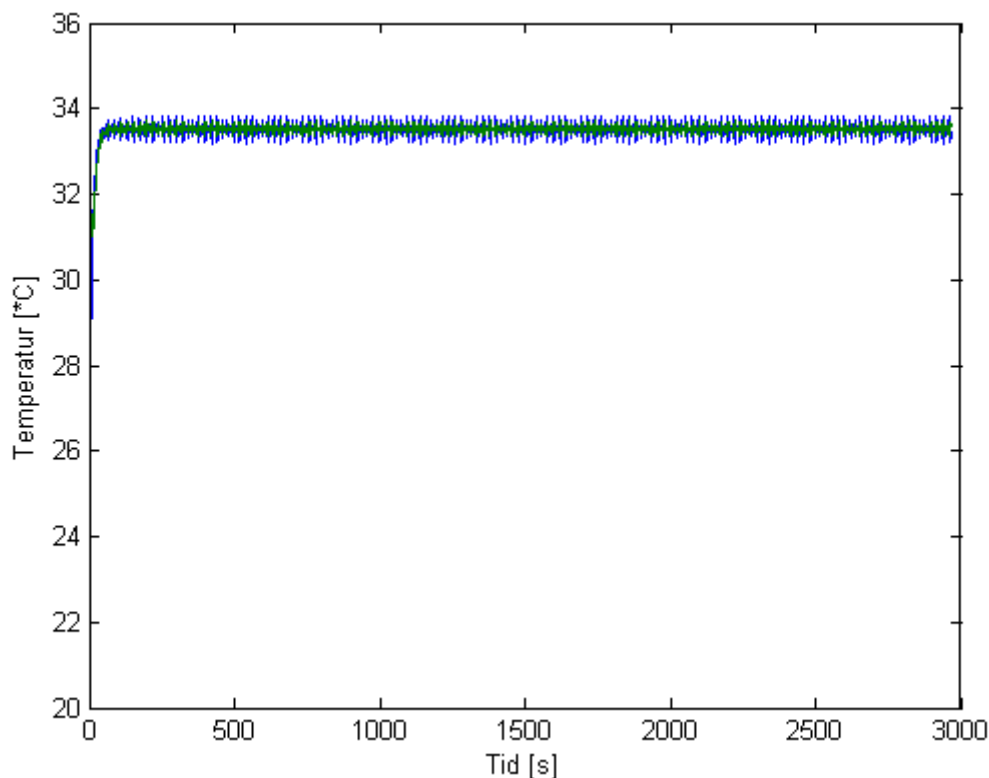
## 5 Resultat

Vid de mest extrema förhållandena under loppet kring Katherine utfördes en beräkning för att undersöka det maximala kyleffektsbehovet. Temperaturen vid denna delsträcka är 36°C och den relativa luftfuktigheten är 26 %. Vid dessa förhållanden är utifrån Humidex, Tabell 1, den högsta tillåtna temperaturen i hytten 33°C då relativa luftfuktigheten i hytten blir 39,4 %. Den önskade temperaturen på luften från kylsystemet blir därmed 20°C och med en ventilation utifrån av luft på 6,5 l/s. Det totala kyleffektbehovet blir då 1240 W.

Figur 8 och Figur 9 åskådliggör effektbehovet respektive temperaturen i hytten. Utifrån dessa kan insvängningstiden för temperaturen och vilket värde temperaturen och effekten får utläsas.



Figur 8. Kyleffektsbehovet under delsträckan kring Katherine



**Figur 9. Temperatur på hyttluften under delsträckan vid Katherine**

Insvängningen hos temperaturkurvan, Figur 9, är till följd av att beräkningarna börjar när föraren precis satt sig i bilen och från den stunden tillför värme till omgivningen, samt att solens instrålning från det att hytten stängs kommer värma upp luften i hytten. Anledningen till att kurvan till slut planar ut är att det uppstår en jämvikt mellan den av solen, föraren och omgivningstemperaturen uppvärmda luften i hytten och den kylda luft som tillförs från ett tänkt kylsystem.

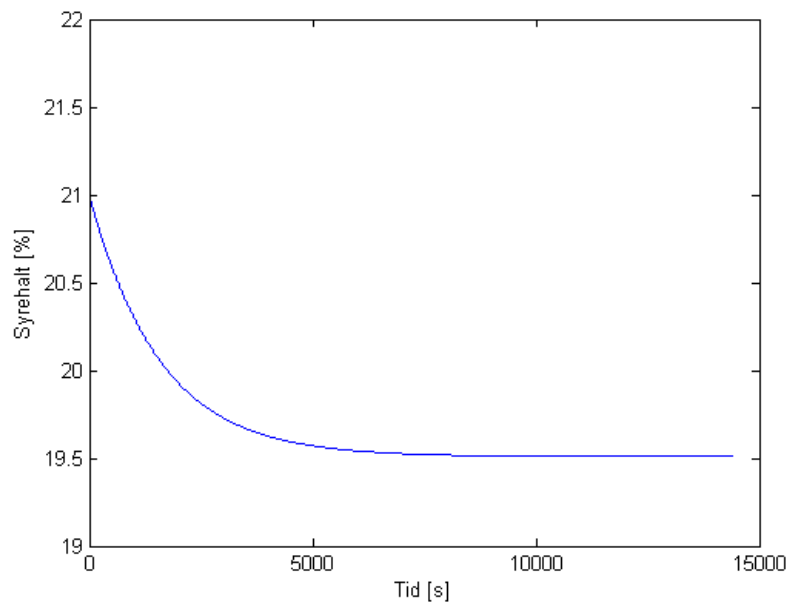
Effektkurvan, Figur 8, stiger med tiden till följd av att kylsystemet kommer behöva sänka temperaturen på luften från kylsystemet ( $T_s$ ) i och med att luften i hytten samtidigt värms upp av solinstrålning, förare och omgivning. Till slut hamnar kylsystemet i jämvikt och stabiliserar effektbehovet.

För att göra en jämförelse av hur resultatet kan skilja sig från område till område längs med loppet görs beräkningar för en sträcka med mildare klimat. Vid Adelaide, där loppet slutar, ligger genomsnittstemperaturen för den 13 oktober på  $19^{\circ}\text{C}$  och relativa luftfuktigheten på 54 % (WeatherSpark). Vid dessa förhållanden är utifrån Humidex, Tabell 1, den högsta tillåtna temperaturen i hytten  $30^{\circ}\text{C}$  då relativa luftfuktigheten i hytten blir 61,6%. Omgivningstemperaturen är dock så pass låg att enbart ventilation räcker som kylning av hytten. Temperaturen i hytten blir  $28,5^{\circ}\text{C}$ , vilket ligger under den högsta tillåtna temperaturen.

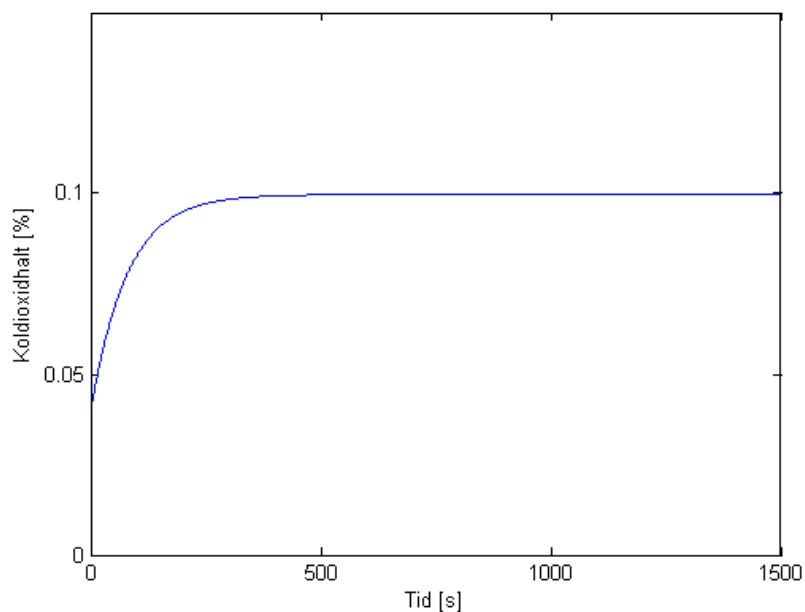
En jämförelse med dubbelt ventilationsflöde,  $13 \text{ l/s}$ , utfördes för att undersöka hur ventilation påverkar kyleffektsbehovet. Vid de tuffaste förhållanden kring Katherine påverkades inte kyleffektsbehovet nämnvärt medan vid Alice Springs där ytttemperaturen är  $30^\circ\text{C}$  och den relativa luftfuktigheten är  $19\%$ , innebär en fördubbling av ventilationen att kyleffektsbehovet blir  $917 \text{ W}$  jämfört med  $956 \text{ W}$  som krävs då ventilationen är  $6.5 \text{ l/s}$ . En större ventilation minskar alltså kyleffektbehovet endast marginellt.

## 5.1 Ventilation

Syrehalten i hytten över tiden illustreras i Figur 10 och koldioxidhalten illustreras i Figur 11.



Figur 10. Syrekonzentrationen i hytten.

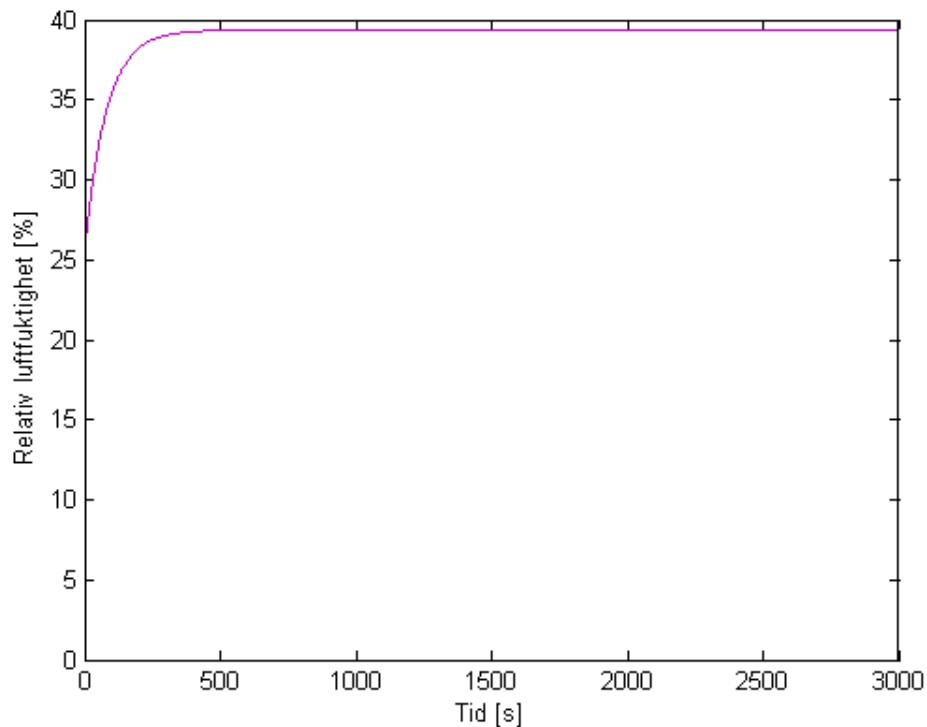


Figur 11. Koldioxidkoncentrationen i hytten.

Koldioxidhalten konvergerar snabbare mot det kritiska värdet 0,09 % än syrekoncentrationen konvergerar mot det kritiska värdet 19 % , vilket innebär att koldioxidhalten är dimensionerande för hur stor ventilationen måste vara. Ventilationen av hytten måste uppgå till minst 6,5 l/s luft för att hålla sig inom satta värden.

## 5.2 Luftfuktighet

För extremfallet 36°C och 26 % relativ luftfuktighet i Katherine stabiliseras den relativa luftfuktigheten i hytten på 39,4 %, se Figur 12.



Figur 12. Relativ luftfuktighet i hytten.

## 5.3 Beskrivning av kravspecifikationen

Kravspecifikationen innefattar; prestanda, säkerhet, storlek, kostnad, miljö, komplexitet och material, se Tabell 3. De parametrarna som är direkt mätbara är vikt och energiförbrukning. En potentiell lösning kan direkt jämföras med dessa parameterar för att sedan avgöra om resterande krav och önskemål, t.ex. komplexitet, uppfylls. Målvärdena är snävt satta för ett eventuellt kylsystem då tävlingsbilens körprestanda är av högre prioritet än förarens komfort av Chalmers tekniska högskola. Kravspecifikationen i sin helhet presenteras som Bilaga A.



Kriterier	Kriterier	Kontrollmetod	Målvärde	Krav/ Önskemål	Prioritering	Intressent
<b>1. Prestanda</b>						
1.1	Humidexvärde för komfortnivå	Termometer	Tabellvärde	K		Föraren
1.4	Energi-förbrukning	Multimeter	~0	Ö	1	Chalmers
1.5	Energi-förbrukning	Multimeter	<100W	K		Chalmers
1.6	Systemets prestanda	Tidur	-	Ö	1	Chalmers
<b>2. Säkerhet</b>						
2.1	Följa regelverken	Dokument	-	K		World Solar Challenge
2.2	Trafiksäkerhetsaspekter	Dokument	-	K		Staten
<b>3. Storlek</b>						
3.1	Vikt	Våg	<10kg	K		Chalmers
3.2	Vikt	Våg	<5kg	Ö	1	Chalmers

Tabell 3. Utdrag ur kravspecifikationen. Hela kravspecifikationen återfinns som bilaga.

## 5.4 Lösningförslag

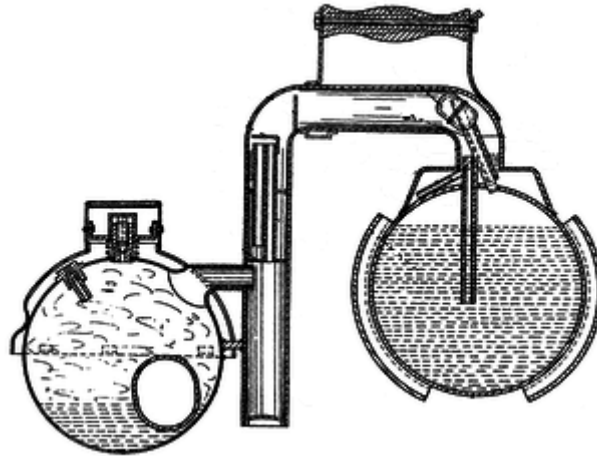
Då problemet var uppdelat i fyra olika delproblem gavs möjlighet till djupare analys av dellösningar. I kommande avsnitt presenteras de lösningförslag som löser respektive delproblem. Varje dellösning förklaras tydligt för att få en klar inblick om hur lösningen fungerar.

### 5.4.1 Nedkylning av kupén

Ett sätt att försöka åstadkomma den beräknade kyleffekten är att använda sig av ett system som aktivt kyler ned kupén.

#### *Absorptionskylare*

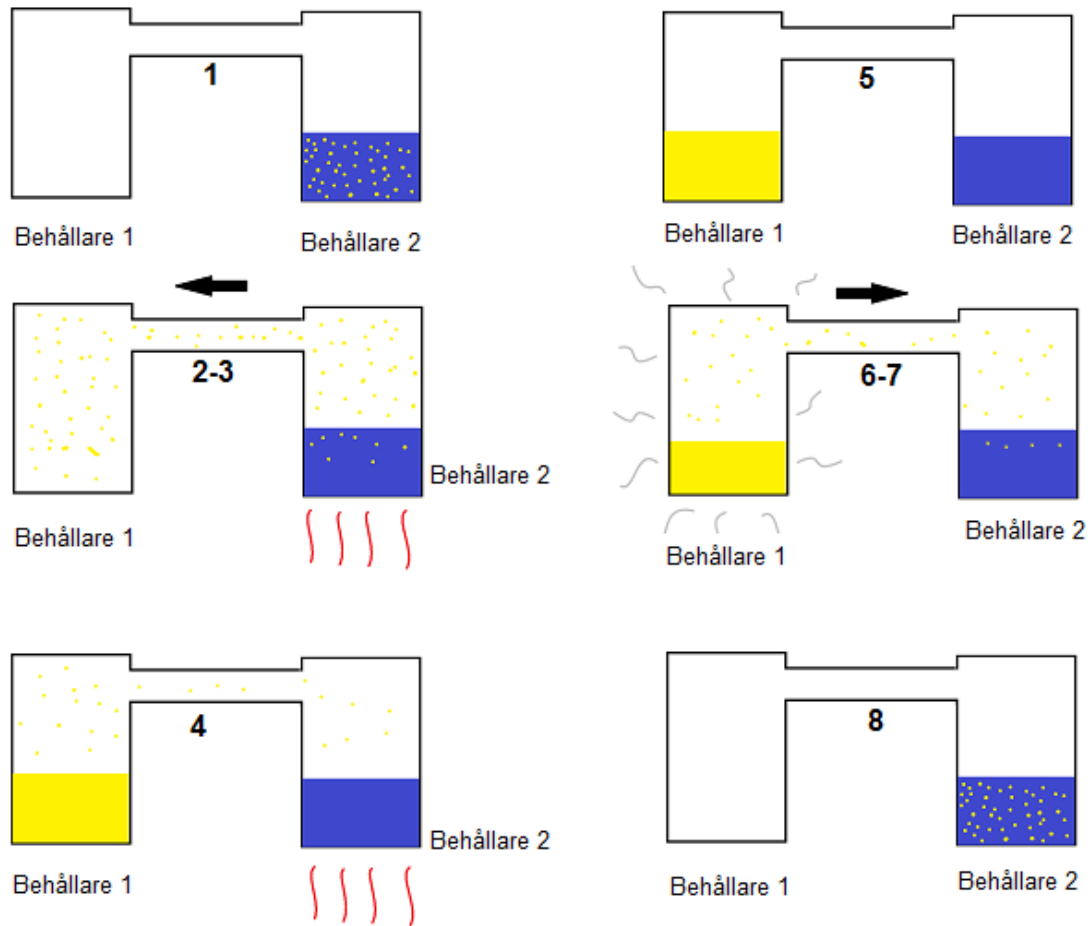
Absorptionskylare fungerar på ett sådant sätt att man endast använder sig av en värmekälla för att via fasomvandling få en kylande effekt. Då systemet ej består av rörliga komponenter är det lämpligt för enklare konstruktioner. Teknologin har använts sedan 1920-talet. Kommersiella produkter som Icy ball, se Figur 13, användes för kylning där man inte hade tillgång till elektricitet utan använde sig av någon form av förbränning som energikälla. Två svenska ingenjörer, Carl Munters och Baltzar von Platen, utvecklade ett kylskåp som fungerade med denna princip. Idag används principen för till exempel gasolkylskåp.



Figur 13. Icy ball (Crosley Automobile Club Inc. 2013)

Absorptionskylning fungerar på ett sådant sätt att man använder sig av antingen två eller tre stycken fluider beroende på systemets utförande. En möjlig blandning består av ammoniak och vatten. Kylprocessen fungerar på följande sätt, se Figur 14:

1. Behållare två består av en blandning av ammoniak och vatten.
2. Behållaren värms försiktigt upp till en sådan temperatur att ammoniaken kokar bort från vattnet.
3. Ammoniaken fraktas vidare till behållare ett, som är i rumstemperatur.
4. Trycket byggs upp i systemet pga. upphettningen i behållare två, ammoniaken övergår från gas till vätska i behållare ett.
5. När trycket är tillräckligt högt kondenserar ammoniaken i behållare ett och uppvärmningen av behållare två avbryts.
6. Trycket faller i systemet och ammoniaken börjar avdunsta från behållare ett.
7. Då ammoniaken förångas absorberas värmeenergi från omgivningen. Temperaturen i behållare nummer ett faller.
8. Ammoniaken fraktas till behållare två där den återförenas med vattnet.



Figur 14. Absorptionskylningscykel med vatten och ammoniak.

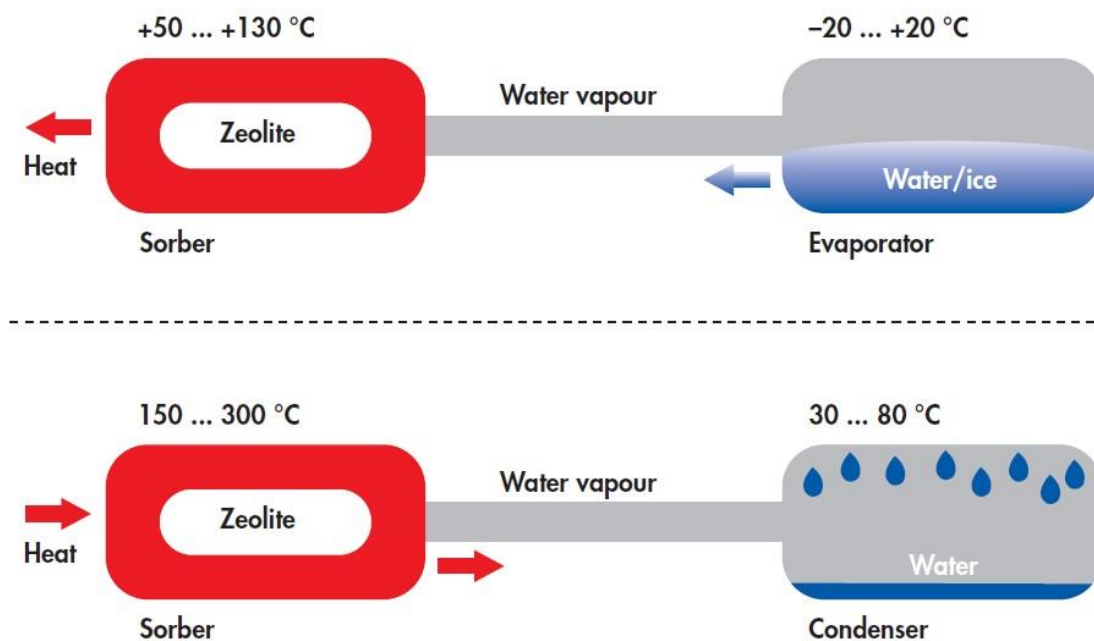
Prestandan hos en egenutvecklad absorptionskylare testades av Kong, Liu, Zhang och Fang (2010). Man lyckades uppnå ett COP-värde<sup>5</sup> mellan 0.37 och 0.40 beroende på den tillförda termiska energin som varierade mellan 4800 W och 6400 W. Med denna konstruktion uppnåddes ett tryck på 14 bar. Kyleffekten blev mellan 1900 W och 2200 W. En annan sorts kommersiellt tillgänglig absorptionskylare i mindre format producerades av företaget Rotartica S.A. Deras absorptionskylare drevs av spillenergi i form av varmvatten och solenergi där kylaren klarade att producera en kyleffekt på 4,5 kW, hade volymen 0,61 m<sup>3</sup> samt en totalvikt på 240 kg.

#### **Adsorptionskylning med zeolit som adsorptionsämne**

Adsorptionskylning med zeolit fungerar genom att vatten hålls i en behållare med lågt tryck som är ihopkopplad med en behållare med adsorptionsämne, t ex zeolit, se Figur 15. Zeolit används för att det har en stark adsorptionsförmåga av vattenånga och driver i kombination av det låga trycket vattnet till att förångas och adsorberas av zeoliten. När vattnet förångas tas energi i form av värme från omgivningen och det vatten som är kvar i vätskebehållaren fryser till is. För att återgå till ursprungstillståndet krävs det att zeolitbehållaren värms upp till en hög temperatur för att vattnet ska förångas och återgå till behållaren med is.

<sup>5</sup> Coefficient of performance

Det krävs att vakuum eller ett stort undertryck skapas i zeolitbehållaren för att processen ska kunna genomföras.



Figur 15. Beskrivning av hur kylning med zeolit kan fungera. Vänster behållare innehåller zeolit och höger behållare innehåller vatten (Meyer 2013).

Systemet är passivt i den mån att det inte nödvändigtvis behöver energi från drivlinan för att fungera, men för att adsorptionen ska ske krävs att ett lågt tryck skapas i vätskebehållaren, samt att zeoliten hettas upp när systemet ska återställas till ursprungstillstånd. Dessa processer kräver energi i form av pumparbete och värmeförsel. Enligt Ramos, Espinoza, Horn och Ferreira Leite (2003) krävdes det ca 4,5 kg zeolit för att i kombination med 0,5 kg vatten kunna skapa frysmiljö under 6 timmar. Omgivningstemperatur nådde  $-2^{\circ}\text{C}$ .

För närvarande finns en mängd olika tillämpningar av adsorptionskylsystem med zeolit som adsorptionsämne. Grundprincipen är dock densamma, se Figur 15.

### ***Kontinuerlig adsorptionskylning***

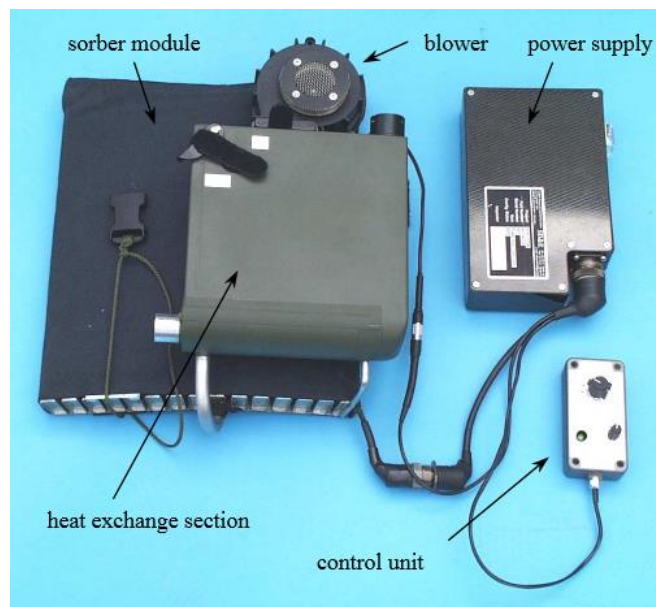
Det faktum att zeoliten måste värmas efter en kylcykel utnyttjas för energieffektiva kylmetoder, då uppvärmningen av zeoliten kan drivas av spillvärme från exempelvis en förbränningsmotor (Zhang 2000). Därmed finns ett naturligt tillämpningsområde för adsorptionskylning med zeolit då denna kylmetod tros kunna ersätta dagens mer energikrävande klimatanläggningar. Att zeoliten tillslut mättas av vattenånga och måste värmas medför ett avbrott i kylningen. Detta har lösts genom system som består av två stycken adsorptionscyklar, där ena cykeln kyler och den andra cykeln värms upp för att återställas. Dessa två cyklar växlar uppgift då den ena kyler och den andra återställs. I det kontinuerliga adsorptionskylsystem som Zhang (2000) beskriver används 6.2 kg zeolit i varje behållare och ger en kyleffekt på 308W.

### ***Handburen adsorptionskylning***

En befintlig produkt som använder sig av adsorptionskylning med zeolit är APACS<sup>6</sup>, en handburen luftkonditionering som tagits fram av Maier-Laxhuber, Schmidt och Grupp (2001) till den amerikanska flottan för att kyla klimatet i stridspiloters hjälmar och dräkter (Kaufman 1999). Kylsystemet styrs av en ventil som öppnas när adsorptionsprocessen ska påbörjas och när systemet behöver återställas värms zeolitbehållaren av en extern värmepistol. Under återställandet kan således inte produkten användas till kylning.

Luften som ska kylas sugas in i en värmeväxlare och kyls ner av isen som bildats i vattenbehållaren och blåses sedan ut med hjälp av en fläkt. Luften leds därefter in i pilotens hjälm och dräkt.

Denna produkt är anpassad för de tuffa krav som sätts på helikopterpiloter i strid och kan därmed sänka lufttemperaturen med cirka 8°C och har en totalvikt på cirka 6 kg. Fläkten är den enda komponenten i produkten som kräver en extern energikälla. Den är kopplad till ett batteri och förbrukar cirka 50 W för att driva kyl luften genom systemet med önskat flöde. Figur 16 visar APACS.



Figur 16. Bärbart adsorptionskylsystem med zeolit som adsorptionsämne (Maier-Laxhuber, Schmidt och Grupp 2001).

### ***Adsorptionsdrivet kylsystem***

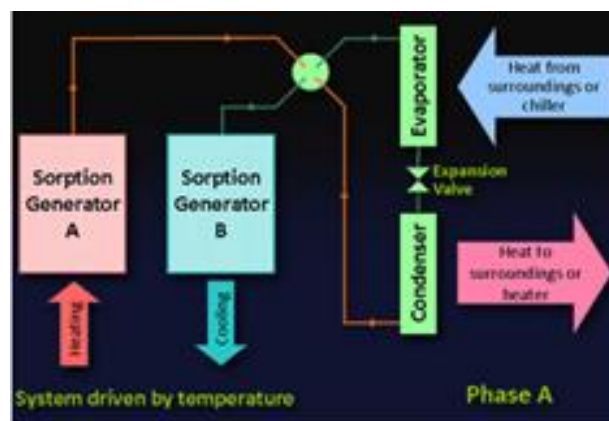
Ett annat tillämpningsområde för zeolitens adsorptionsförmåga beskrivs av Verde, Cortés, Corberán, Sapienza, Vasta och Restuccia (2010) där två behållare med ett adsorptionsämne, förslagsvis zeolit, har samma funktion som kompressorn i ett AC-system. Likt ett konventionellt AC-system består detta kylsystem även av en kondensor, en strypventil och en förångare. Adsorptionsförmågan hos zeolit utnyttjas för att driva kylarvattnet från en vattenkyld förbränningsmotor i en kylcykel där kylarvattnet fungerar som köldmedium. Detta kylsystem tar bort behovet av den energikrävande kompressor som vanligtvis används i AC-

<sup>6</sup> Advanced Portable Air Conditioning System

system. Dessutom tar den tillvara på en del av den spillvärme som en vätskekyld motor i ett fordon avger.

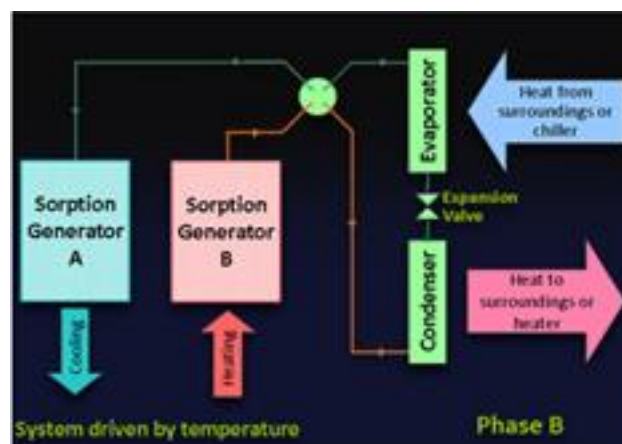
Processens delsteg beskrivs nedan:

- Kylcykeln startar med att den första behållaren (behållare A i Figur 17) värms upp av det varma kylarvattnet. När behållare A värms upp avges redan bunden vattenånga i behållaren och skapar ett övertryck i systemet.
- Vattenångan börjar kondensera på grund av det skapade övertrycket i kondensorn.
- Vattnet leds från kondensorn genom en strypventil till en förångare. När vattnet förångas tar vattnet energi från omgivningen och kyler därigenom luften kring förångaren.
- Den nu varma ångan drivs vidare i kylsystemet genom att behållare B adsorberar ångan.



Figur 17. Adsorptionsdrivet kylsystem (Millikin 2010).

För att kylsystemet ska vara kontinuerligt kan kretsen kopplas om så att behållare B värms upp och behållare A adsorberar kylmediet enligt Figur 18.

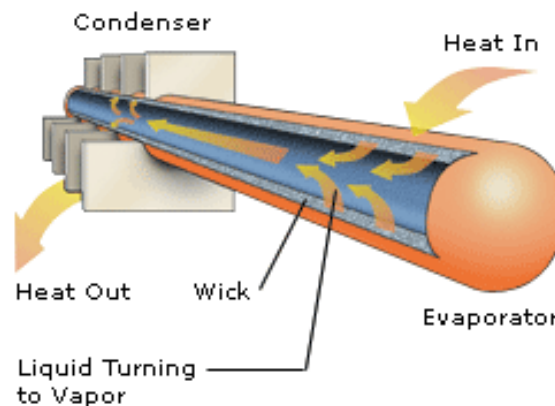


Figur 18. Kylsystemet har kopplats om så att behållare B värms upp och behållare A adsorberar ånga från förångaren (Millikin 2010).

Enligt de beräkningar som beskrivs av Verde, Cortés, Corberán, Sapienza, Vasta och Restuccia (2010) har detta system en maximal kyleffekt på 5kW, kan avge kyld luft från förångaren på 10°C och väger 60 kg, där varje behållare innehåller 480 gram zeolit.

### **Heat pipes**

Principen bakom heat pipes är att smala rör i ett slutet system fyllt med ett kylmedium under tryck ska leda värme från en förångare vid en varm yta till en kondensor vid en kall yta. Vid förångningen som sker på den varma ytan tar kylmediet upp energi i form av värme och förångas och transporterar på så sätt bort värmen. Kylmediet avger värme till omgivningen via kondensorn. Systemet drivs av de tryckskillnader som uppstår vid förångning och kondensation och kräver således ingen extern kraftkälla i form av pump eller dylikt för att drivas. Heat pipes är användbart då man vill kyla varm inredning i en bil, till exempel på instrumentbrädan.



**Figur 19. Heat pipes (Thermacore Inc. 2013)**

För tävlingsbilen lämpar sig heat pipes väl i den mån att systemet är passivt och inte kräver elenergi från solcellerna. Nackdelar som systemet bär med sig är att det kräver en hög temperaturskillnad mellan kall och varm omgivning för att ge hög kyleffekt. Vid tester gjorda med varierande solintensitet gav systemet en maximal temperatursänkning på 4°C kring instrumentbrädan (Midwest Research Institute 2003).

### **Termoelektrisk kylning**

Användning av termoelektriska material har fördelen att de beroende på tillämpning kan skapa elektricitet med temperaturdifferens eller tvärtom. Systemet använder sig inte av några fluider eller rörliga delar, är formbart och har lång livslängd. Lösningen är med andra ord väldigt enkel att tillämpa för många situationer där till exempel vikt, utrymme och komplexitet är viktiga faktorer. Nackdelen är att termoelektriska material är dyra och att verkningsgraden med dagens teknologi är låg, mellan 10 och 15 % (Caillat, Fleurial, Snyder och Borshchevsky 2001).

### **Kylning med is**

En cirkulation av hyttluften som passerar ett isblock eller ett kylblock ger en kylande effekt. Luften som passerar isblocket kommer att kylas via konvektion. Isen som smälter kan användas som drickbart vatten, vilket innebär att ingen extra vattendepå behöver medtas och gör det möjligt att skifta vikten från vattendepån till ett extra kylsystem.

För att få ut tillräcklig kyleffekt måste isen ha en låg ursprungstemperatur som antogs vara  $-20^{\circ}\text{C}$  samt vara bra isolerad för att utesluta påverkan från andra faktorer än luftflödet. I beräkningar antogs isoleringen vara fullständig. En beräkning av tiden ett isblock kan kyla kupén utfördes, se Ekvation 13. För värden på termerna i Ekvation 13, se Bilaga C. Ekvation 13 består av tre delar: värmeabsorption av is, fasomvandling från is till vatten och värmeabsorption av vattnet. Värme absorberas från luften tills isen blir  $0^{\circ}\text{C}$  varvid en fasomvandling sker. När all is har omvandlats till vatten kommer ytterligare värme absorberas tills vattnet nått en kritisk temperatur där det inte längre kyler hyttluften. Beräkningen genomfördes med förutsättningarna och antagandena att värmeutbytet mellan luften och isen var 100 %. Tre områden vid olika temperaturer med beräknade kyleffektskrav utifrån värmebalansen beaktades, se Tabell 4.

$$Q = C_{p,is} \cdot m \cdot (T_{2,is} - T_{1,is}) + l_{is \rightarrow vatten} \cdot m + C_{p,vatten} \cdot m \cdot (T_{2,vatten} - T_{1,vatten})$$

Ekvation 13. Totala mängden kylenergi i ett isblock med massan  $m$ .

Plats	Fall 1 – Ventilation 6.5 l/s			Fall 2 – Ventilation 13 l/s		
	Kathrine	Alice Springs	Cooper Pedy	Kathrine	Alice Springs	Cooper Pedy
<b>Beräknad kyleffekt [W]</b>	1240	956	1098	1226	917	1050
<b>Luftfuktighet [%]</b>	27	19	20	27	19	20
<b>Omgivningstemperatur [°C]</b>	36	30	33	36	30	33
<b>Hytttemperatur [°C]</b>	33,5	35	34,2	34,2	35	35
<b>Kritisk temperatur [°C]</b>	20	23	24	20	23	24
<b>Massa is [kg]</b>	38,8	28,9	33,4	38,3	27,7	32,0

Tabell 4. Beräknad massa is för att tillgodose behovet av kyleffekt för väderdata för olika delsträckor (WeatherSpark).

För att undvika överdimensionering kräver lösningen att ett nytt isblock sätts in vid varje depåstopp då isen kommer smälta.

#### 5.4.2 Undvika uppvärmning av kupén

För att minimera kylbehovet undersöktes om det är möjligt att undvika uppvärmning av hytten från solinstrålning och omgivande temperatur. En potentiell klimatanläggning behöver då ej leverera lika stor kyleffekt vilket kan vara en fördel vid dimensionering, kostnad och systemets komplexitet.

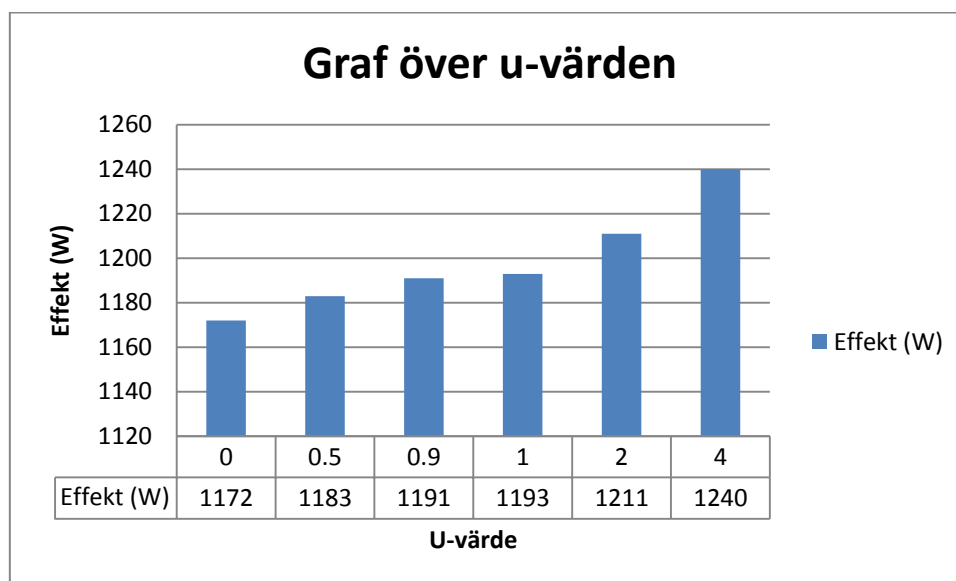
#### Solskyddsglas

I nuvarande tävlingsbilar används härdat laminerat glas som vindruta. Härdat laminerat glas består av två härdade glasrutor som är ihopsatta med en tunn skiva plast emellan, vanligast bestående av polyvinyl butyral (PVB). Glaset måste enligt regelverket (World Solar Challenge 2012) vara laminerat för att inte splittras vid krock. Vindrutan får inte vara dubbelglas utan måste vara enkelglas för att förhindra ljusbrytningar. Glaset skall helst ha ett så lågt U-värde som möjligt för att reducera mängden värme som överförs genom konduktion.



U-värdet är värmeledningskoefficienten som beskriver värmeöverföringsförmågan genom materialet. Vanliga framrutor i dagens fordon har ett U-värde på ca  $4 \text{ W/m}^2$ . En analys av olika U-värden utfördes för att undersöka U-värdets betydelse för värmebalansen vid delsträckan genom Katherine, se Figur 20. Analys av olika U-värden..

Solskyddsglas med låga U-värden bidrar till att mindre kyleffekt krävs och likaså leder höga U-värden till att mer kyleffekt krävs av kylsystemet. Som Figur 20 visar är inte skillnaden i U-värde speciellt avgörande gällande kyleffekten. Glas med U-värde nästintill  $0 \text{ W/m}^2$  kräver en kyleffekt på  $1172 \text{ W}$ , medan ett glas med U-värde  $4 \text{ W/m}^2$  kräver  $1240 \text{ W}$ .



Figur 20. Analys av olika U-värden.

I glastillverkaren Pilkingtons utbud ingår två varianter av enkelglas med låga U-värden, se Tabell 5. Glasen kan både härddas och lamineras samt böjas. Dessa glas är anpassade för byggnader men enligt Pilkington Floatglas AB (2012) är det teoretiskt möjligt att utforma en önskad design till ett högt pris.

Glastyp	Lägsta U-värde [W/mK]
<b>Pilkington Optifloat</b> (färgat glas)	0.9
<b>Pilkington Arctic Blue</b> (färgat glas)	0.9

Tabell 5. Glas med låga U-värden från Pilkington.

### Toning

Toning av rutan motverkar uppvärmningen av hytten genom solinstrålning och minimerar på så sätt kyleffektsbehovet. Toning medför dock en lägre transparens på glasytan den appliceras. Enligt World Solar Challenge regelverk ska vindrutan ha en optisk transparens på minst 75 %. Därav utesluts mörkare toning på rutor där siktkrav finns och en helt transparent toning, en så kallad genomskinlig solfilm, undersökts för dessa rutor, se Figur 21.

Solfilmen Scotchtint från företaget 3M är nästintill helt transparent och stoppar 58 % av värmen från solen som strålar på glasets yta. Solfilmen har 75 % optisk transparens och monteras på bilglaset som i sig har en optisk transparens på ungefär 80 %. Den totala optiska transparensen minskar då till ca 60 %.



Figur 21. Exempel på toningsfilm (Apex Window Films of Toronto 2009).

På grund av geometrisvårigheter i applicering av solfilmen på tävlingsbilens kupol skärs små bitar ut som sedan monteras separat. Dessa placeras på tävlingsbilens glasytor där transparens på 60 % tillåts enligt World Solar Challenges regelverk. Fastmonteringen av solfilmen sker med uppvärmning till 600 °C med en värmepistol. Detta ställer krav på att vindrutan klarar uppvärmning till denna temperatur. Filmen består av olika lager såsom termoplasten PET, ett metallskikt, lim samt ett UV-laminat. Enligt försäljaren Göteborgs solfilmsmontage kan vissa solfilmer medföra en temperaturreduktion från solinstrålning på minst 10°C<sup>7</sup>.

### **Isolering**

Värmeöverföring mellan kupé och omgivning sker via fönster, väggar, tak och golv. Vid tillämpning av isolering minskar värmeöverföringen mellan det yttre klimatet och förarkupén vilket då bidrar till en minskad uppvärmning av kupén. Materialet som används för chassit antogs vara samma material som används i Chalmers Formula Students bil 2013 vilket är kolfiber som har hög värmeöverföringsförmåga. Värmeöverföringsförmågan är olika för olika delar av hytten. Vid värmebalansberäkningar med isolering frångås antagandet av det U-värde som är baserat på Gado, Hwang, och Radermacher (2005). Detta innebär att tidigare värmebalansberäkningar inkluderar en viss isolering, därav kommer resultat för oisolerad hytt medföra ett högre kyleffektsbehov. För att få ett förhållande mellan isoleringsmaterialet och glaset antogs hyttens väggar, golv och tak ha en yta på 2.7 m<sup>2</sup> och glasets yta 1 m<sup>2</sup>.

En undersökning utfördes på fyra olika isoleringsmaterial samt kolfiber, det vill säga oisolerat. För att utreda om isoleringsmaterialen påverkade kyleffektsbehovet tillämpades en genomsnittlig värmeöverföringskoefficient för vägg, golv och tak tillsammans med kupéglaset. Isoleringsmaterialen är *vakuumisoleringspaneler(VIP)*, *aerogel (laminerad filt)*, *glasull (mineralull)* och *Polyuretan (PUR)* och behandlas i Claesson, Helmersson, Strömsten, Willhammar och Ödling (2012), se Figur 22. Specifikationer för dessa olika material hämtades från Claesson, Helmersson, Strömsten, Willhammar och Ödling samt CES EduPack 2012 och redovisas i Tabell 6.

<sup>7</sup> Daniel Berntzén, Göteborgs Solfilmsmontage, intervjuad av författarna 2013-05-21

	VIP (Vakuumisoleringspaneler)	Aerogel som laminerad filt	Glasull (Mineralull)	Polyuretan (PUR)	Ingen isolering (Kolfiber)
<b>Flexibilitet</b>	Något flexibel	Flexibel och fullt böjbar	Flexibel	Flexibel	Flexibel
<b>Tålighet</b>	Omtåligt, höljet får ej skadas	Ej ömtålig, men dammar	Ej ömtålig	Ej ömtålig	Ej ömtålig
<b>Värmekonduktivitet (<math>\lambda</math>) [W/mK]</b>	0,008 ( $\approx$ 0,025 om skadad)	0,014	0,036	0,026	80-200
<b>Paneltjocklek [mm]</b>	6-40	10	45	10	10
<b>Densitet [kg/m<sup>3</sup>]</b>	150-220	150	16-19	80	1800
<b>Brandklass</b>	Euroklass A1	Euroklass C	Euroklass F	Euroklass B	Euroklass A
<b>Användningstemperatur [°C]</b>	- 50 till +90 (sönderfaller vid 150)	< +200	< +80	- 30 till +80	< +530
<b>Fuktegenskaper</b>	Mycket diffusionströgt hölje	Hydrofobt material diffusionsöppet			
<b>Pris</b>	600 kr/m <sup>2</sup> , 10mm	300 kr/m <sup>2</sup>	37.5 kr/m <sup>2</sup>	60 kr/m <sup>2</sup>	1000 kr/m <sup>2</sup>
	600 kr/m <sup>2</sup> , 20mm				
	1 300 kr/m <sup>2</sup> , 40mm				

Tabell 6. Olika isoleringsmaterial och dess egenskaper.

Teoretiska modellberäkningar redovisade att utan isolering skulle kyleffektsbehovet vara över 3000 W och cirka 1200 W med isolering enligt Humidexvärden för komfort i förarhytten. Beräkningen modellerades efter delsträckan genom Katherine där ytttemperaturen är 36 °C och relativa luftfuktigheten är 26 %. Isolering av tävlingsbilen visar sig vara en essentiell del för att åstadkomma en uppnåelig kyleffekt. Beräknad kyleffekt mellan de olika isoleringsmaterialen redovisas i Tabell 7.

	VIP (Vakuumisoleringspaneler)	Aerogel som laminerad filt	Glasull (Mineralull)	Polyuretan (PUR)	Ingen isolering (kolfiber)
<b>Krävd kyleffekt [W]</b>	1204	1209	1199	1218	>3000

Tabell 7. Kyleffektsbehov för olika isoleringsalternativ.



Figur 22. Isoleringsmaterialen glasull, VIP, aerogel samt PUR-skum (Thomsen 2013, Fullchance Industrial Co., Ltd. 2013 och Jordnära Alingsås 2013).

## 5.5 Föraren

En metod för att förbättra komforten för föraren är att direkt påverka föraren utan att samtidigt påverka omgivningen som denne befinner sig i. Energin koncentreras då till att förbättra temperatur och luftkvalitet där de behövs.

### *Kyldräkt*

En kylkläds är ett system som består av en vattenbehållare, slangdräkt och pump för att cirkulera vatten kring föraren. Målet är att kyla ner och stabilisera kroppstemperaturen till en rimlig nivå. Pro Air & Water System är en produkt från företaget CoolShirt Systems (2012) som koler föraren med kallt vatten som cirkulerar runt förarens kropp genom slangar som är monterade i en dräkt, se Figur 23. Systemet kan kyla föraren mellan två och fyra timmar innan vattnet måste ersättas. Vattenmängden som en behållare kan förvara är mellan 11 och 23 liter beroende på modell. Pumpen drivs av en källa som kan leverera 2 A via ett 12 V-uttag.



Figur 23. CoolShirt Pro Air & Water System (Patrick Motorsports 2012).

### ***Ventilationshjälm***

En ventilationshjälm leder frisk luft från omgivningen direkt in till hjälmen via ett filter. Pro Air & Water System består av en hjälm med en fläkt och luftkylare som är kopplad till ett luftintag med filter, se Figur 23. Produkten reglerar luftflödet och förhindrar att föroreningar tränger in samtidigt som frisk och kyld luft tillförs direkt till förarens huvud. På så sätt kyles föraren.

### ***Kylväst med fasomvandlingsmaterial (PCM)***

En kylväst fungerar genom användning av fasomvandlingsmaterial (PCM<sup>8</sup>) som är skräddarsydda för lång fasomvandlingstid vid given temperatur. Västen har i uppgift att isolera omgivningen samtidigt som fasomvandlingen av PCM-elementen koler föraren under längre tidsperioder. Cooling vest från TST Sweden (2012) är en specialanpassad kylväst som har ca 10-20 fickor med PCM-element, se Figur 24. Dessa element består av en blandning av salter, där en fasomvandling sker vid arbetstemperaturen 28°C eller 32°C. Elementen börjar absorbera värmen som kroppen avger samtidigt som den håller temperaturen vid kroppen inom området 28-35°C. I detta område kan elementen arbeta ca 4h innan de måste laddas om. Laddningsprocessen tar cirka 4 h men påskyndas vid lägre temperaturer än 28°C (TST Sweden 2013). Vid temperaturer större än 22°C bör västen omladdas i en kylbox. Västen väger totalt cirka 2 kg och inkluderas enligt regelverket för World Solar Challenge i förarens totalvikt.



**Figur 24. Kylväst med PCM-element (TST Sweden 2012)**

### ***Ventilation av hytt***

En viktig aspekt kring förarens trivsel under loppet är luftkvaliteten i hytten. NACA-kanaler är luftintag som är nedsänkta i karosyten och har fördelen att ha ett lågt luftmotstånd, se Figur 3. De placeras oftast där det är högt tryck vilket gör att de inte påverkar aerodynamiken avsevärt. Storleken på kanalen kan justeras beroende på hur högt flöde som önskas. Detta bidrar till en ökad luftkvalitet.

---

<sup>8</sup> Phase Changing Material

## 5.6 Eliminering

Utifrån de framtagna lösningarna utfördes en systematisk eliminering där kravspecifikationen var mest avgörande. En diskussion av de potentiella lösningar som stämde överrens med de satta värdena för kravspecifikationen utfördes för att avgöra deras möjlighet till implementering i tävlingsbilen. Varje delösning delades in i enskilda elimineringsmatriser där de ställdes mot respektive krav.

### *Nedkylning av kupén*

Analys av delösningarna för nedkylning av kupén och huruvida de uppfyller de satta kraven i kravspecifikationen redovisas i Tabell 8. Då den beräknade kyleffekten uppnår 1240 W kräver det att motsvarande mängden kyleffekt måste kunna levereras av delösningen. Ett luftkonditioneringssystem (AC) vars vikt är mindre än 10 kg och förbrukar mindre energi än 100 W är inte realiserbart under temperaturförhållandena tävlingsbilen kommer befinna sig inom. Detta gör att ett AC-system som delösning elimineras. Termoelektrisk kylning elimineras på grund av dess dåliga verkningsgrad. Absorptionskylning uppfyller inte säkerhetskraven då kylprocessen sker med fluider under högt tryck. Kylning med is elimineras då det kräver för stor vikt. Heat pipes och adsorptionskylning med APACS är de delösningarna som uppfyller kraven och utvärderas närmare.

Krav \ Koncept	Heat pipes	Air Conditioning (A/C)	Kylning med is	Termoelektrisk kylning	Absorptionskylning	Handburen adsorptionskylning (APACS) (zeolit)	Kontinuerligt adsorptionskylsystem	Adsorptionsdrivet kylsystem
Nå önskat humidexvärde för komfortnivå	Ja	Ja	Ja	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja
Vikt < 10 kg	Ja	Nej	Nej		Nej	Ja	Nej	Nej
Energiförbrukning (<100W)	Ja					Ja		
Följa regelverken	Ja					Ja		
Uppfylla lagkrav rörande trafiksäkerhet	Ja					Ja		
Ingen hälsopåverkan	Ja					Ja		
Temperaturtåligt	Ja					Ja		
Vattentåligt	Ja					Ja		
Behåll?	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Nej

Tabell 8. Elimineringmatris för kriteriet nedkylning av kupén.

### **Undvika uppvärmning av kupén**

Analysen av dellösningarna till delproblemet Undvika uppvärmning av kupén redovisas i Tabell 9 där solskyddsglas elimineras på grund av att det inte uppfyller lagkrav. De två undersökta glasen är färgtonade och har därmed en transparens som är lägre än 75 % vilket inte uppfyller kraven. Det finns nästintill genomskinliga solskyddsglas men dessa består av två eller flera lager glas och som elimineras på grund av ljusbrytningsfel. Toning och isolering av kupén uppfyller kravspecifikationen och anses vara lämpliga att utvärdera.

Krav \ Koncept	Solskydds- glas	Toning	Isolering: VIP	Isolering: Aerogel	Isolering: Glasull	Isolering: PUR- skumm
Följa regelverken	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Vikt < 10 kg	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Uppfylla lagkrav rörande trafiksäkerhet	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Ingen hälsopåverkan		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Temperaturtåligt		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Vattentåligt		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Behåll?	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabell 9. Elimineringssmatris för kriteriet *undvika uppvärmning av kupén*

### **Föraren**

Elimineringssmatrisen för kylning av föraren redovisas i Tabell 10. Kylklädsel och ventilationshjälm uppfyller ej viktkraven från kravspecifikationen. Kylväst med PCM-element uppfyller alla krav och utvärderas närmare.

Krav \ Koncept	Kylklädsel	Kylväst med PCM	Ventilationshjälm
Kyla föraren till 32°C	Ja	Ja	Ja
Vikt < 10 kg	Nej	Ja	Nej
Följa regelverken		Ja	
Uppfylla lagkrav rörande trafiksäkerhet		Ja	
Ingen hälsopåverkan		Ja	
Temperaturtåligt		Ja	
Vattentåligt		Ja	
Behåll?	Nej	Ja	Nej

Tabell 10. Elimineringssmatris för kriteriet *föraren*

## **5.7 Utvärdering efter eliminering**

De dellösningar som klarade sig igenom elimineringssmatriserna, det vill säga de som inte blev eliminerade, diskuteras och analyseras vidare. För- och nackdelar diskuteras där de dellösningar som bäst uppfyller de högst prioriterade önskemålen behålls, medan de andra dellösningarna elimineras.

### 5.7.1 Adsorptionskylning (APACS)

Att kyla tävlingsbilens kupé genom att använda en adsorptionsprocess likt APACS skulle vara genomförbart i den mån att tekniken finns och är beprövad. APACS uppfyller även de krav som är satta i kravspecifikationen, där bland annat lösningen lyckas sänka temperaturen på den kylda luften, ej överstiger viktkravet på 10 kg och har ett effektbehov på under 100 W. Effektbehovet försvinner helt om fläkten som driver luften genom systemet, ersätts med det luftflöde som uppstår när solcells bilen körs.

Däremot finns andra aspekter i implementeringen av ett kylsystem likt APACS som gör systemet olämpligt.

Att APACS ger kyla i två och en halv timmar, för att sedan behöva värmas lika lång tid i 350°C. Detta begränsar dess tillämpbarhet som kylsystem i tävlingsbilen då det innebär att det behövs flera APACS-enheter som kan användas under de dagar som kyla krävs under åtta timmars perioder som körs per dag. Även det faktum att APACS behöver värmas upp kan vara ett förhinder, då möjligheterna till att driva ett värmelement till 350°C och hålla den temperaturen i två och en halv timmar kan vara begränsade.

Då APACS inte finns tillgängligt kommersiellt bruk gör det att ett sådant system inte kan köpas och implementeras i bilen, utan kräver att systemet måste utvecklas på egen hand. Då systemet är beroende av ett lågt tryck sätter detta stora krav på tillverkningen av exempelvis zeolit- och vattenbehållare och ventiler för att hålla det låga trycket. Även detta talar emot att ett kylsystem likt APACS ska användas som kylsystem i den tävlingsbil Chalmers tekniska högskola skall tävla med i World Solar Challenge då konstruktionen av ett sådant system blir så komplicerat att det inte är värt att vidareutveckla för den begränsade kylkapacitet som kylsystemet ger.



### 5.7.2 Heat pipes

Heat pipes anses inte vara tillräckligt effektiva för att implementera i tävlingsbilen. Lösningen kräver stora temperaturskillnader för att ge nämnvärt kylande effekt. En annan aspekt som är viktig att ta hänsyn till är utifall att temperaturskillnaden skulle vara motsatt än den man är ute efter, det vill säga i projektets fall att temperaturen i hytten skulle lyckas bli kallare än yttertemperaturen, skulle systemet få en motsatt effekt och istället värme upp hytten.

En möjlig lösning hade varit att redan vid tidigt stadiet av utveckling av tävlingsbilen lyckas basera hyttens uppbyggnad på heat pipes. Fördelar man kan tänka sig är styvare konstruktion och på så sätt stabilisera tävlingsbilen. Vad man bör analysera är ifall denna metod hade ökat tävlingsbilens vikt, vilket är något i största mån vill undvika då det som konsekvens försämrar tävlingsbilens prestanda.

På grund av en kombination av vikt, låg kyleffekt, risk för motsatt funktion samt säkerhetsrisk vid olycka avrådes heat pipes som en metod för kylning.

### 5.7.3 Kylväst med PCM

Kylväst är en lättanvänd lösning som är enkel att applicera. Lösningen kräver ingen yttre energikälla vilket är en viktig faktor som ökar dess tillämpbarhet. Vikten är försumbar då västen anses vara klädsel enligt World Solar Challenge kriterier om den bärs under hela loppet. Västen håller en konstant temperatur mot kroppen under den fyra timmar långa körsträckan innan förarutbyte. Kylvästen förhindrar inte användningen av andra lösningar. Kostnaden för en väst är mellan 2000 och 3000 kr.

Nackdelen med lösningen är att den inte funkar kontinuerligt utan kräver uppladdning genom nerkyllning. En möjlig nackdel är att föraren ständigt måste ha västen på sig under körtiden då den räknas som beklädnad.

Trots dessa nackdelar väger fördelarna tyngst mest med tanke på att de uppfyller de högst viktade önskemålen såsom vikt, pris, komplexitet och energiförbrukning bäst. Kylväst blir därmed en utav dem vinnande delösningarna.

### 5.7.4 Toning

Toning anses vara en enkel och effektiv lösning för att undvika uppvärmning av kupén. Den eliminerar drygt hälften av solvärmens som strålar mot rutan samt är placerad på rutor där den inte skymmer föraren sikt. Toning av hytten kan kombineras med andra lösningar. Priset för en standardsolfilm för en personbil är ca 2500 kr. I detta fall tillkommer en ytterligare kostnad på ca 500-1000 kr utöver standardpriset på grund av hyttgeometrins komplexitet.

Nackdelen med denna lösning kan vara att den begränsar valet av material på vindrutan. Vindrutan kan ej tillverkas i värmekänsligt material såsom plast på grund av att applicering av toningsfilmen sker vid 600°C.

Fördelarna med denna lösning anses överväga nackdelarna samt att de uppfyller de viktigaste önskemålen såsom storlek på system, pris och systemets komplexitet bäst vilket resulterar i att toning blir ett utav de vinnande delösningarna.

### 5.7.5 Isolering

Syftet med att isolera hytten är att behålla den svala luften i hytten utan att exponeras för den varma omgivningstemperaturen. Isoleringen innesluter dock luft oberoende om den är varm eller kall. Detta kan få en motsatt effekt ifall hyttens temperatur skulle överstiga yttertemperaturen. Detta kan enkelt åtgärdas med ventilation av hytten.

Isolering kan anses som en integrerad del i tävlingsbilens konstruktion och påverkar därmed inte tävlingsprestandan gällande aerodynamik, solcellsarea och batterimängd. Någon större effektbesparing mellan de olika isoleringsmaterialen observerades inte, se Tabell 11. Slutsatsen är att ingen större undersökning bör behandla detta ämne då effektbesparingarna är försumbara kontra dess vikt och kostnad. Det slutgiltiga valet av isoleringsmaterial kan vara såväl PUR-skum som VIP-isolering beroende på konstruktörens önskemål.

	<b>Ingen isolering (Kolfiber)</b>	<b>VIP (Vakuumisoleringspaneler)</b>	<b>Aerogel</b>	<b>Glasull</b>	<b>PUR-skum</b>
<b>Krävd kyleffekt (W)</b>	>3000	1204	1209	1199	1218
<b>Extra vikt (kg)</b>	0	4,05 – 5,94	5,55	2,67 – 3,16	2,16
<b>Pris (kr)</b>	0	1620	1110	139	129,6

Tabell 11. Krävd kyleffekt, vikt och pris för isoleringsmaterial.

## 6 Slutsats och rekommendationer

Projektets rekommendation är att kombinera toning, isolering av hytten samt användning av kylväst med fasomvandlingselement. Dessa tre lösningar anses tillsammans med ventilation kunna förbättra klimatet till en acceptabel nivå. Lösningarna uppfyller alla kraven såsom vikt och energiförbrukning. Lösningarna är även enkla att tillämpa då de inte kräver några större ingrepp i tävlingsbilens konstruktion.

En undersökning av system som skulle ersätta traditionella A/C-system som drivs på elektricitet utfördes. Dessa system i form av adsorptions- och absorptionskylare föll på de säkerhetskrav och viktkrav som ställts inom projektet. Deras låga verkningsgrad medför även ett hinder för att uppnå den beräknade kyleffekten. Hantering av spillvärme för drift av dessa system anses svår då den är beroende av solens position och intensitet. En eventuell lösning med linser för att fokusera värmeenergin från solen, samt bortföringen av värmen från batterierna och solcellerna skulle både vara svårt att hantera samt att det kräver användning av dyrbar area som redan är begränsad av regelverket för tävlingen. Ett sådant system skulle dessutom öka tävlingsbilens vikt.

Integrerade adsorptionskylare baserade på undertryck och adsorptionsämne anses vara värt att forska vidare kring. System som använder adsorptionsteknik finns inom militären för stridspiloter och pansarförare. Systemet kan användas direkt på föraren och även implementeras i förardräkten för att skapa optimal kyleffekt.

Utifrån utförd undersökning av de fysiologiska aspekterna bör föraren inte utsättas för högre temperaturer än de angivna i Humidex relativt till den aktuella luftfuktigheten. Syre- och koldioxidnivåerna i hytten skall hålla acceptabla nivåer vilket man enkelt kan uppnå med tillräcklig ventilation. De kroppsdelar där blodkärlen är mest ytliga bör kylningen fokuseras på för att ge maximal effekt. Hyttinredningen bör vara ljus då mörkare färger absorberar solstrålning bättre vilket i sin tur ökar temperaturen i hytten. Förtäring av vatten bör ske efter behov.

Den totala kostnaden för den slutgiltiga rekommendationen uppskattas vara cirka 8 150 kr. Isoleringen av hytten med PUR-skum uppskattas kosta 150 kr. En uppskattning på 4000 kr har beräknats utefter tillgängliga priser för solfilm. Priset för två kylvästar uppgår till ca 4000 kr.

Att använda sig av projektets rekommendationer för personfordon anses vara möjligt rent praktiskt men inte något som hade fungerat i verkligheten. Toning, isolering och ventilation av hytten används redan idag för personfordon men vad gäller kylvästar är dessa mer användbara vid specifika användningsområden, i detta fall en tävling. Forskning sker för absorptions- och adsorptionskylare för fordon med avgaser som spillvärmeskälla. Dessa är dock i utvecklingsstadiet och kombinerat med deras vikt och låga verkningsgrad bör mer forskning utföras innan marknadsintroduktion.

## 7 Diskussion

Projektet granskas opartiskt för att diskutera för- och nackdelar med projektet och dess arbetsgång utifrån metod- och syftesformuleringen. En diskussion om resultaten med de antagande och de modeller samt teorier som använts i projektet utförs för att avgöra dess trovärdighet. De mest intressanta områdena i kandidatarbetet lyfts därmed fram i diskussionen och presenteras.

### 7.1 Arbetsgång

De kvalificerade antaganden som gjorts inom projektet bör vid tillgång till relevant data ersättas med värden för tävlingsbilen. Försök att kontakta andra tävlande för att anskaffa information om tävlingsbilar och förarupplevelse har gjorts men inte lyckats. Inom detta projekts ramar har jämförelser med bilar inom andra tävlingar som Chalmers tekniska högskola ställer upp i varit mest givande.

Då få lösningskoncept kvarstod efter eliminering utifrån kravspecifikationen ansågs ytterligare elimineringsmatriser ej behövas. Det framtagna resultatet kan därför vara mer godtyckligt än resultatet vid användande av en kvantifierbar metod. Lösningsförslagen anses dock ha så tydliga för- och nackdelar att någon skillnad i resultat inte skulle ha uppkommit.

Lösningsförslagen ansågs så oberoende av varandra att utvärdering av olika lösningskombinationer ej utfördes. Att en komplett jämförelse med kravspecifikationen ej utfördes för olika kombinationer kan vara en nackdel. En sådan utvärdering anses dock inte tillföra något som inte framgick inom den individuella jämförelsen med uppdelande av krav efter delproblem.

### 7.2 Förarklimatet

Utöver solinstrålning, omgivningstemperatur och förarens avgivna värme märks i beräkningar hur andra faktorer påverkar resultatet. Exempelvis ger ökad ventilation ett mindre behov av kyleffekt. Detta på grund av att ökad ventilation medför att luftfuktigheten i hytten sänks, vilket i sin tur påverkar vilken temperatur föraren upplever. Dock kan en ökad ventilation medföra försämrade aerodynamiska egenskaper för tävlingsbilen. Minskningen av effektbehovet anses vara så liten att en ökning av ventilationen inte motiverar eventuella aerodynamiska förluster. Detta antagande bygger dock på att de aerodynamiska förlusterna är mer påtagliga än effektminskningen. Luftkvaliteten i hytten är helt beroende av ventilationen. En tillräcklig ventilation för att hålla godkända koldioxid- och syrehalter är en förutsättning och utgör en gräns för optimering av luftintaget.

I värmebalansen är de antagna värmeöverföringskoefficienterna för karossen och kupolen stark materialberoende vilka kan skilja sig från den slutgiltiga tävlingsbilen beroende på materialval. En längre körsträcka kräver att föraren sitter i en ergonomiskt utformad stol. Stolen ingår i interiören som påverkar värmebalansen genom sin massa och materialegenskaper. En mindre interiörmassa medför att initialkyleffekten är lägre än då interiörmassan är stor. En kompromiss mellan komfort och kyleffekt bör övervägas. En mindre interiörmassa medför också ett lättare tävlingsfordon vilket är önskvärt ur prestationshänseende.

Den satta solinstålningsenergin  $425\text{ W}$  är uppskattad utifrån Huang (1998) där man utgick ifrån ett fordon med  $30\text{ m}^2$  hyttarea där solinstålningsenergin var  $950\text{ W}$ . En exakt uppmätning av solinstrålningsenergin under World Solar Challenge bör genomföras för att få en bättre approximation av den teoretiska värmebalansen.

Värmebalansen bygger på en teoretisk tävlingsbil där alla dimensioner och mått har uppskattas utifrån andra tävlingsfordon, främst Chalmers Formula Student. Då det ej har funnits möjlighet att mäta upp temperatur, luftfuktighet eller solinstrålning för hela loppet har data från väderstationer använts. Den beräknade kyleffekten baseras på dessa förhållanden. Dessa faktorer medför att resultaten till en viss grad avviker från de faktiska förhållandena under tävlingsförhållandena. Vad som bör has i åtanke är att värmebalansen är en approximation av Huangs modell (1998) som är tillämpad för personbilar. Detta kan påverka resultatets noggrannhet.

### **7.3 Spillvärme**

Den spillenergi som är tillgänglig är i form av spillvärme från fordonet. Spillvärme kan tillvaratas från solceller, motor och batteri. Dock har komponenterna som tävlingsbilen drivs av högsta möjliga verkningsgrad. Detta medför att spillvärmens är tillgänglig i dess minsta möjliga mängd. Denna mängd spillenergi är inte tillräckligt stor för att driva ett kylsystem eftersom kylsystem baserade på spillvärme har relativt låga verkningsgrader. Andra komplikationer är att denna spillvärme ska koncentreras, vilket medför konstruktionskomplikationer som troligtvis kommer innebära ökad vikt. En vidare forskning och tidigt fokus kring spillvärmens vid utvecklingen av tävlingsfordonet kan eventuellt medföra att spillvärme kan användas som en energikälla.

### **7.4 Kostnad**

Priserna är baserade på antagna dimensioner på en tävlingsbil. Anledningen till att två kylvästar används är att minst två förare växlar med varandra under åtta timmars körtid. Ventilationen ses som en integrerad del av fordonskonstruktionen varför ingen extra kostnad tillkommer.

### **7.5 Energiförbrukning och miljöpåverkan**

Kylmetoderna som valdes består av toning och isolering av hytten, kylväst samt ventilation och använder sig inte utav energi från solcellerna. I stor utsträckning uppnås kyleffekt via kemiska processer som varken kräver mekanisk eller elektrisk energi. Kylvästen från TST-Sweden kan återanvändas i princip oändligt många gånger och laddas om genom att kylas ner till rumstemperatur. Att kylvästarna måste kylas ned för att återanvändas kan vara en energikrävande process om temperaturförhållandena där de förvaras är sådana att de inte kan laddas om. Under natten sjunker temperaturen längs loppet så pass mycket att västarna bör kunna laddas om utan kylning. Avsaknaden av extern energikälla för användning av kylvästen samt den långa livslängden gör miljöaspekten till en fördel.

En optimerad ventilation av hytten medför minimala aerodynamiska förluster för tävlingsbilen. Den aerodynamiska utformningen av fordonet påverkar dess energiförbrukning för drift. En strömlinjeformad bil har lägre energiförbrukning än en bil som inte är

strömlinjeformad. Även om ventilation påverkar aerodynamiken av fordonet till en viss grad kylar ytterluften hytten och minskar på så sätt den totala kyleffekten som krävs. Då solfilm och isolering är applicerade minskar även de kyleffektsbehovet.

Då projektet har fokuserats på att undersöka energisnåla och alternativa kylningsmetoder har miljöaspekten indirekt blivit en del av projektet. Dock har ingen livscykelanalys genomförts för systemet eller dess komponenter och miljöpåverkan under tillverkning och avveckling är således ej känd.

## **7.6 Implementering av kylsystem i personbilar**

För att förbättra förarklimatet i tävlingsbilen valdes lösningar som redan används inom bilindustrin, d.v.s. toning, ventilering och isolering. Utöver dessa valdes användning av kylväst specifikt för att kyla föraren. Att använda en kylväst för att kyla ner föraren i en personbil är en otillräcklig lösning då den anses vara opraktisk i den mån att den snarare är ett tillbehör än en del av en integrerad klimatanläggning. Enligt de beräkningar som utförts finns viss kyleffektsbesparingspotential i att använda sig av mer effektiva isoleringsmaterial än PUR-skum som används i personbilar. Dock är dessa besparingar relativt små och tillför större vikt och kostnad.

Av de lösningsförslag som inte blev del av det slutgiltiga konceptet finns en viss utvecklingspotential för implementering i personbilar. Användandet av koncept som kan utnyttja spillvärme från exempelvis avgaser kan göra kylsystem i personbilar mer energisnåla. Nämnvärt är att forskning inom detta har pågått i flera år och mycket av informationen som detta projekt bygger på kommer ifrån sådana forskningsrapporter.

## Källförteckning

Apex Window Films of Toronto (2009) *Wholesale Window Film*.

<http://www.apexfilms.ca/window-film-wholesale-dealer-price.htm> (2013-05-21)

Baskind, C. (2010) 5 unusual ways to stay cool. *Mother Nature Network*. 27 april.

<http://www.mnn.com/health/fitness-well-being/stories/5-unusual-ways-to-stay-cool> (2013-05-17)

BBC (2013) BBC – GCSE Bitesize: *Inhaled and exhaled air*.

[http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/pe/appliedanatomy/1\\_anatomy\\_respiratorysys\\_rev3.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/pe/appliedanatomy/1_anatomy_respiratorysys_rev3.shtml) (2013-05-18)

Caillat, T., Fleurial, J-P., Snyder, G. P. och Borshchevsky, A. (2001) *High Efficiency Segmented Thermoelectric Unicouples*. Pasadena: California Institute of Technology

Canadian Centre for Occupational Health and Safety (2011) Humidex Rating and Work: OHS Answers. *Canadian Centre for Occupational Health and Safety*.

[http://www.ccohs.ca/oshanswers/phys\\_agents/humidex.html](http://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/humidex.html) (2013-04-23).

Chassis Shop (2013) *Fiberglass Naca Duct*. Chassis Shop Performance Products.

<http://secure.chassisshop.com/partlist/5731> (2013-05-21)

Claesson, E., Helmersson, S., Strömsten, J., Willhammar, A. och Ödling, A. (2012)

*Implementering av passivhusteknik i bilar – ett steg mot en energieffektiv kupéuppvärmning*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola

CoolShirt Systems (2012) *CoolShirt Systems for drivers and racing teams*.

[http://www.coolshirt.com/media/productattachments/files/c/s/cs\\_racing.pdf](http://www.coolshirt.com/media/productattachments/files/c/s/cs_racing.pdf) (2013-05-17)

Costin, M. och Phipps, D. (1974) *Racing and Sports Car Chassis Design*, London: B. T. Batsford

Crosley Automobile Club Inc. (2013) Crosley IcyBall.

[http://crosleyautoclub.com/IcyBall/crosley\\_icyball.html](http://crosleyautoclub.com/IcyBall/crosley_icyball.html) (2013-05-21)

ESHI INTERNATIONAL PTE LTD (2011) *Seven most eco friendly vehicle designed for race tracks*. <http://www.ecofriend.com/eco-friendly-vehicles-designed-race-tracks.html> (2013-05-21)

Gado, A., Hwang, Y. och Radermacher, R. (2005) Dynamic Performance Measurement Method Integrated With Cabin Model. I *SAE Technical Paper Series*; 11-14 april 2005, Detroit

Gordon, W. (2010) Know Your Body's Quick-Cooling Spots. Lifehacker.

<http://lifehacker.com/5571072/know-your-bodys-cooling-spots> (2013-05-21)

- Hicks, J. (2011) Solar car driver faces sweaty challenge. *The Record.com*. 7 oktober. <http://www.therecord.com/news/local/article/605766--solar-car-driver-faces-sweaty-challenge> (2013-05-17)
- Huang, C-C. D. (1998) *A dynamic computer simulation model for automobile passenger compartment climate control and evaluation*. Michigan Technological University
- Jordnära Alingsås (2013) *Isolering glasull Isover*. [http://www.jordnara.se/?page\\_id=1150](http://www.jordnara.se/?page_id=1150) (2013-05-21)
- Karotki, S. (2011) Nuna 6 Solar Vehicle to Compete in \$10 Million Race [Gallery]. TheBlogIsMine. 9 augusti. <http://www.theblogismine.com/2011/08/09/nuna-6-solar-vehicle-to-compete-in-10-million-race-gallery/> (2013-05-21)
- Kaufman, J. W. (1999) *Development of the U.S. Navy Advanced Personal Air Conditioning System (APACS)*. Patuxent River: Naval Air Warfare Center Aircraft Division
- Kong, D., Liu, J., Zhang, L. och Fang, Z. (2010) Investigation of a Ammonia-Water Absorption Chiller Performance. I *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*; 28-31 mars 2010, Chengdu
- Lehr, J. H. och Keeley, J. (2005) *Water Encyclopedia Vol. 4: Oceanography; Meteorology; Physics and Chemistry; Water Law; and Water History Art, and Culture*. Hoboken, NJ: Wiley, ss. 270-274
- Lindh, W. Q., Pooler M. S., Tamparo, C. D. och Dahl B. M. (2009) *Delmar's Comprehensive Medical Assisting: Administrative and Clinical Competencies*, uppl. 4, New York: Delmar Cengage Learning, ss. 576-577
- Maier-Laxhuber, P., Schmidt, R. och Grupp, C. (2001) Air Ventilated Heating and Cooling Based on Zeolite Technology, I *RTO HFM Symposium*; 8-10 oktober 2001, Dresden
- Meyer, F. (2013) *Kühlgeräte mit Zeolith und Wasser*. BINE Informationsdienst. <http://www.zeo-tech.de/images/pdf/bine-informationsdienst.pdf> (2013-05-21)
- Midwest Research Institute (2003). *Passive cooling system for a vehicle*. US6964294
- Millikin, M. (2010) Sorption Energy Seeking to Commercialize Waste Heat-Driven Adsorption Heat Pump Technology for Vehicle Air Conditioning. *Green Car Congress*. 24 april. <http://www.greencarcongress.com/2010/04/sorption-energy-seeking-to-commercialize-waste-heatdriven-adsorption-heat-pump-technology-for-vehicl.html> (2013-05-17)
- Mörtstedt, S-E. och Hellsten, G. (2010) *Data och Diagram*, uppl. 7, Stockholm: Liber
- Patrick Motorsports (2012) Cool Shirt Pro Air & Water System – 24 Quart. <http://www.patrickmotorsports.com/part/acc-cs-psaw-h-24/> (2013-05-21)
- Pilkington Floatglas AB (2012) *Pilkington GLASFAKTA 2012*. [http://www.pilkington.com/resources/seglasfakta2012\\_sol skydd.pdf](http://www.pilkington.com/resources/seglasfakta2012_sol skydd.pdf) (2013-05-21)



- Ramos, M., Espinoza, R. L., Horn, M. J. och Leite, A. P. F. (2003) *Evaluation of a Zeolite-Water Solar Adsorption Refrigerator*. Göteborg: ISES Solar World Congress 2003
- Rotartica S.A. *Rotartica Product Description*.  
[http://andyschroder.com/static/pdf/Rotartica/Rotartica\\_Product\\_Description.pdf](http://andyschroder.com/static/pdf/Rotartica/Rotartica_Product_Description.pdf) (2013-05-21)
- SAE International (2012) *2013 Formula SAE Rules*.  
<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf> (2013-05-18)
- Stuart, A. (2011) How color impacts emotions and behaviors. *99 designs*. 8 september.  
<http://99designs.com/designer-blog/2011/09/08/how-color-impacts-emotions-and-behaviors/>  
 (2013-05-17)
- The Engineering ToolBox (2013) *Carbon Dioxide Comfort Levels*.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/co2-comfort-level-d\\_1024.html](http://www.engineeringtoolbox.com/co2-comfort-level-d_1024.html) (2013-05-17)
- Thermacore Inc. (2013) *Heat Pipe Technology: Passive Heat Transfer for Greater Efficiency*.  
<http://www.thermacore.com/thermal-basics/heat-pipe-technology.aspx> (2013-05-21)
- Thomsen, L. (2013) *Thermal Insulation Building Materials*.  
<http://www.starch.dk/private/energy/insulation.asp> (2013-05-21)
- TST Sweden AB (2012) *Prislista TST Cooling*. <http://www.tst-sweden.com/>
- TST Sweden AB (2013) *ComfortCooling*. <http://www.tst-sweden.com/>
- Verde, M., Cortés, L., Corberán, J. M., Sapienza, A., Vasta, S. och Restuccia, G. (2010) Modelling of an adsorption system driven by engine waste heat for truck cabin A/C. Performance estimation for a standard driving cycle. *Applied Thermal Engineering* vol. 30, nr. 13, ss 1511-1522.
- Villee, C. A. (1972) *Biology*. W. B. Saunders, ss. 370
- WeatherSpark (2013) Average Weather On October 8 For Katherine, Australia.  
<http://weatherspark.com/averages/34081/10/8/Katherine-Northern-Territory-Australia> (2013-05-17)
- Wikipedia (2013) *Tokai Challenger*. Wikipedia, the free encyclopedia.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Tokai\\_Challenger](http://en.wikipedia.org/wiki/Tokai_Challenger) (2013-05-21)
- World Solar Challenge (2013) *Regulations for the 2013 World Solar Challenge*.  
[http://www.worldsolarchallenge.org/files/21\\_2013\\_world\\_solar\\_challenge\\_regulations\\_v12\\_nov\\_2013.pdf](http://www.worldsolarchallenge.org/files/21_2013_world_solar_challenge_regulations_v12_nov_2013.pdf) (2013-05-17)
- Wyon, D. P., Wyon, I. och Norin, F. (2010) Effects of moderate heat stress on driver vigilance in a moving vehicle. *Ergonomics*, vol 39, nr 1, ss 61-75.
- Zhang, L. Z. (2000) Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system. *Applied Thermal Engineering* vol 20, nr 1, ss 103-114

**Framsida:** Web Wombat (2007) 2007 *World Solar Challenge: Across The Australian Outback*. [http://www.webwombat.com.au/motoring/news\\_reports/world-solar-challenge-2007.htm](http://www.webwombat.com.au/motoring/news_reports/world-solar-challenge-2007.htm) (2013-05-21)

## Bilaga A Kravspecifikation

Kriterier	Kriterier	Kontrollmetod	Målvärde	Krav/Önskemål	Prioritering	Intressent
<b>1. Prestanda</b>						
1.1	Humidexvärde för komfortnivå	Termometer	Tabellvärde	K		Föraren
1.2	Elektrisk energiförbrukning	Multimeter	0 W	Ö	1	Chalmers
1.3	Elektrisk energiförbrukning	Multimeter	<100 W	K		Chalmers
1.4	Funktionell tidsåtgång	Tidur	4 h	Ö	1	Chalmers
<b>2. Säkerhet</b>						
2.1	Följa regelverken	Dokument	-	K		World Solar Challenge
2.2	Trafiksäkerhetsaspekter	Dokument	-	K		Lagkrav
<b>3. Storlek</b>						
3.1	Vikt	Våg	<10 kg	K		Chalmers
3.2	Vikt	Våg	<5 kg	Ö	1	Chalmers
3.3	Storlek på system	Konstruktion	6 l	Ö	1	Chalmers
<b>4. Kostnad</b>						
4.1	Pris	Beräkning	<10 000 kr	Ö	2	Chalmers
<b>5. Miljö</b>						
5.1	Miljöpåverkan	Utsläpp	-	Ö	3	Chalmers
5.2	Hälsopåverkan	Utvärdering	Oförändrad	K		Föraren
<b>6. Komplexitet</b>						
6.1	Systemets komplexitet	Konstruktion	-	Ö	1	Chalmers
6.2	Lätthanterligt underhåll	Konstruktion	-	Ö	3	Chalmers
6.3	Tillämpbart inom fordonsindustrin	Konstruktion	Ja	Ö	2	Chalmers
6.4	Möjlighet för serietillverkning	Konstruktion	Ja	Ö	3	Chalmers
<b>7. Material</b>						
7.1	Temperaturtåligt	Dokument	50 °C	K		Chalmers
7.2	Vattentåligt	Dokument	90 % RH	K		Chalmers

## Bilaga B Använda värden vid beräkning av värmebalans

Akronym	Parameter	Värde	Enhet	Källa
$A_o$	Area kupé	3.7	$m^2$	Uppskattad
$A_c$	Area interiör	1	$m^2$	Uppskattad
$C_p$	Specifik värmekapacitet (luft)	1005	$J/(kg \cdot K)$	Hellsten, Mörtstedt(2010)
$C_c$	Specifik värmekapacitet inredning	1005	$J/(kg \cdot K)$	Hellsten, Mörtstedt(2010)
$h_c$	Konvektiv värmeöverföringskoefficient mellan inredning och kupéluft	100	$W/(m^2 \cdot K)$	Gado, Hwang, Radermacher (2005)
$M_r$	Massa insidan kupén	0,636	$kg$	Uppskattad
$M_c$	Massa inredning	2	$kg$	Uppskattad
$m_e$	Massflöde från A/C (evaporator)	0,045	$kg/s$	Gado, Hwang, Radermacher (2005)
$m_{iv}$	Massflöde infiltration och/eller ventilation	0,0161	$kg/s$	Beräknad
$Q_{sol}$	Effekt solstrålning	425	$W$	Uppskattad
$Q_{ps}$	Sensibel effekt från passagerare	17–93.5	$W$	Beräknad
$\dot{T}_r$	Temperaturändring insidan kupén eller rummet	Itereras	$K/s$	Beräknad
$\dot{T}_c$	Temperaturändring inredning	Itereras	$K/s$	Beräknad
$T_m$	Temperatur mix in i A/C	Itereras	$K$	Beräknad
$T_s$	Temperatur tillförd ut ur A/C	Itereras	$K$	Beräknad
$T_{amb}$	Temperatur omgivning	292-309	$K$	WeatherSpark
$T_r$	Temperatur kupén	Itereras	$K$	Beräknad
$T_c$	Temperatur interiör	Itereras	$K$	Beräknad
$U_o$	Värmeöverföringskoefficient mellan kupé och omgivande luft	4	$W/(m^2 \cdot K)$	Gado, Hwang, Radermacher (2005)

## Bilaga C Tabellvärden för vatten

$C_{p, \text{is}}$	2.20 kJ/kg·K
$C_{p, \text{vatten}}$	4,18 kJ/kg·K
$l_{\text{is} \rightarrow \text{vatten}}$	333.7 kJ/kg