

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**ANALÝZA TEPELNĚ IZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ  
KAROSERIE ELEKTROMOBILU**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langmajer** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **437717**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Analýza tepelně izolačních vlastností karoserie elektromobilu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Analysis of Electric Car Body Thermal Insulation Properties**

Pokyny pro vypracování:

Porovnejte koncepci karoserie osobního automobilu se spalovacím motorem a elektromobilu, přičemž se zaměřte na tepelně izolační vlastnosti. Identifikujte místa a prvky karoserie s největším vlivem na tepelné zisky nebo ztráty kabiny elektromobilu. Vyhodnoťte možnosti snížení tepelných ztrát nebo zisků úpravami karoserie elektromobilu. K řešení použijte informace z odborné literatury i dalších otevřených zdrojů a simulace ve vhodně zvoleném programu.

Seznam doporučené literatury:

Levinson R. et al. Potential benefits of solar reflective car shells: Cooler cabins, fuel savings and emission reductions. Applied Energy 88 (2011) 4343-4357.  
Pokorný J. et al. Calibration of the heat balance model for prediction of car climate. EPJ Web of Conferences 25, 01077 (2012).  
Simion M. et al. Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles. Energy Procedia 85 (2016) 472-480.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Martin Barták, Ph.D., ústav techniky prostředí FS**

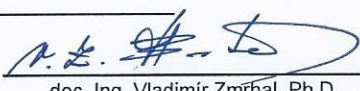
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


**Ing. Vít Doleček, Ph.D., ústav autom.,sp.motorů a kolej.voz. FS**

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **22.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

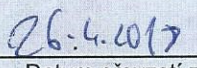
  
Ing. Martin Barták, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

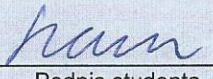
  
doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Souhrn

Práce se zabývá tepelnými vlastnostmi kabiny osobního automobilu se zaměřením na elektromobily, u kterých může energie potřebná na vytápění nebo chlazení kabiny výrazně omezit dojezd vozidla. V této souvislosti práce identifikuje hlavní rozdíly mezi automobily se spalovacím motorem a elektromobily.

Vliv úprav karosérie na tepelné ztráty a tepelnou zátěž kabiny lze efektivně zkoumat s užitím počítačových simulací. V práci jsou popsány výhody a nevýhody čtyř softwarových nástrojů, které by bylo možné pro takovou analýzu použít. Vlastní simulační studii provedl autor v programu pro energetickou simulaci budov IDA ICE. Studie byla zaměřena na vliv dodatečné tepelné izolace a zasklení kabiny vozidla na tepelnou ztrátu a tepelnou zátěž.

Práce otevírá řadu námětů pro další pokračování výzkumu v této oblasti.

## Summary

The thesis deals with thermal properties of a car body with the focus on electrical cars in which the energy required for cabin heating or cooling may significantly limit the driving range. In this context, the thesis identifies the main differences between cars with combustion engine and electrical cars.

The influence of car body modifications on the cabin heating losses and cooling loads can be studied effectively using computer simulations. Four software tools which could be used for this type of analysis are described in terms of their benefits and drawbacks. The author performed his own study using the building simulation software IDA ICE. This study was focused on the influence of additional thermal insulation and glazing of a car cabin on heating and cooling loads.

The thesis opens a number of issues for future research in this field.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Analýza tepelně izolačních vlastností karoserie elektromobilu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Bartáka, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 4. 7. 2018

Vojtěch Langmajer

## Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval panu Ing. Martinovi Bartákovi, Ph.D., za cenné rady, pomoc se simulačním programem a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vítovi Dolečkovi, Ph.D za poskytnutí programu GT Suite, panu Ing. Jiřímu Jirákoví z firmy Saint-Gobain Sekurit ČR za poskytnutí informací k zasklení a kolegům ze ZF (oddělení elektromobility) za praktické rady.

## Obsah

1	Úvod.....	8
2	Tepelné zisky a ztráty.....	9
3	Koncepce karoserie.....	11
3.1	Koncepce karoserie osobního automobilu .....	11
3.2	Koncepce karoserie elektromobilu .....	12
4	Tepelně kritické vlastnosti karoserie .....	14
4.1	Materiály karoserie .....	17
4.1.1	Konvenční materiály .....	17
4.1.2	Alternativní materiály .....	20
5	Srovnání vytápění a chlazení pro ASM a elektromobil.....	22
5.1	Systém pro vytápění a chlazení.....	22
5.2	Tepelně ovlivněné části karoserie.....	24
5.3	Lokální ohřev v karoserii .....	25
6	Simulace.....	28
7	Model a simulace.....	33
7.1	Import modelu pro IDA ICE .....	33
7.2	Vlastnosti stěn karoserie.....	34
7.3	Zasklení.....	37
7.4	Okrajové podmínky .....	38
7.5	Provozní podmínky.....	39
8	Výsledky a diskuse .....	41
8.1	Vytápění .....	41
8.2	Chlazení .....	43
9	Závěr .....	46
10	Použitá literatura .....	48

## Použité označení veličin

<b><math>A_{DS}</math></b>	součinitel pohltivosti pro přímé ozáření	[-]
<b><math>A_i</math></b>	součinitel sekundárního přestupu tepla na vnitřní straně	[-]
<b><math>c_p</math></b>	měrná tepelná kapacita	[J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
<b><math>h_i</math></b>	vnitřní součinitel přestupu tepla	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]
<b><math>h_e</math></b>	vnější součinitel přestupu tepla	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]
<b><math>R_{DS}</math></b>	součinitel odrazivosti pro přímé ozáření	[-]
<b><math>T_{DS}</math></b>	součinitel propustnosti vůči přímému slunečnímu záření	[-]
<b><math>T_{TS}</math></b>	součinitel celkové energetické propustnosti	[-]
<b><math>\alpha</math></b>	součinitel délkové teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
<b><math>\lambda</math></b>	součinitel tepelné vodivosti	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]

## Seznam zkratk

<b>ASM</b>	automobil se spalovacím motorem
<b>1D</b>	jednorozměrný (model)
<b>3D</b>	trojrozměrný (model)

## 1 Úvod

Jedním z faktorů, které negativně ovlivňují zájem spotřebitelů a tedy i výrobců o elektromobily, je jejich omezený dojezd, zvláště v porovnání s automobily se spalovacím motorem. Na dojezd elektromobilu má významný vliv spotřeba elektrické energie, která slouží k zajištění tepelné pohody osob v kabině vozidla. Tématem této bakalářské práce jsou obecně postupy, jak tuto spotřebu energie snížit.

Prvním krokem při zpracování této analýzy bylo zvážení specifických požadavků na karoserii elektromobilu, jejíž koncepce je v některých bodech odlišná od běžné koncepce automobilu se spalovacím motorem.

Cesty ke snížení spotřeby energie na vytápění a chlazení kabiny vozidla jsou dvojí. Jedním přístupem může být částečná náhrada přenosu energie vzduchem na lokální ohřev a chlazení některých součástí kabiny, které jsou v přímém kontaktu s osobami (např. volant, sedadla). Další možnost lze spatřit ve změně tepelných vlastností karoserie vozidla. Na druhý uvedený přístup je zaměřena praktická část této práce.

Rozbor možností úpravy tepelných vlastností karoserie lze provádět buď experimentálně, nebo analyticky, přičemž jako efektivní analytická metoda se jeví počítačové simulace. Cílem práce bylo rovněž zjistit, v jakých programech je možné takto zaměřené energetické simulace provádět. Ukázkou aplikace simulací je v rámci práce provedená studie vlivu tepelné izolace a zasklení kabiny vozidla na potřebný výkon vytápění a chlazení.

Práce si neklade za cíl obsáhnout danou problematiku v její celé šíři, ale spíše ukázat, jaké možnosti potenciálního zlepšení se v této oblasti nacházejí a jaké metody lze použít při analýze těchto možností.



## 2 Tepelné zisky a ztráty

V každém vozidle bez rozdílu pohonu dochází k přenosu tepla. Dochází k němu při provozu vozidla, ale i při stání na místě. Někdy je sdílení žádoucí, někdy však ne, je nutné rozlišit zisky a ztráty. Například v zimních měsících bude teplo ze sluneční radiace ziskem. Sdílení tepla s okolím se děje vedením, konvekcí a radiací.

Na vlastnosti přenosu tepla má vliv především technické zpracování karoserie, volba materiálů a okolní prostředí. Pro účely této práce lze uvažovat vnitřní a vnější součinitele přestupu tepla řádově  $h_e \sim 10^1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a  $h_i \sim 10^0 - 10^1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tepelný odpor karoserie, resp. jednotlivých částí karoserie se liší především podle použitých izolačních materiálů a materiálů karoserie. Akumulace ve stěnách nemá vliv, protože karoserie včetně izolačních materiálů je lehká konstrukce, většinou tvořena tenkými plechy, s tloušťkami do 2,1 mm.

Radiace je dalším podstatným mechanismem přenosu tepla. Je třeba uvážit sluneční a dlouhovlnnou radiaci. Sluneční radiace významně ovlivňuje teplotu uvnitř karoserie, především v letních měsících může způsobit problémy. Jedním z hlavních faktorů spojených se sluneční radiací je propustnost zasklení vozidla, které se může významně lišit dle volby zasklení. Dalším významným faktorem je úhel dopadu, který lze ovlivnit geometrií zasklení. Dlouhovlnná radiace je uvažována proti obloze a uvnitř kabiny vozidla.

Na tepelnou bilanci mají dále vliv vnitřní zdroje tepla, které zůstávají pro obě vozidla stejné – osoby uvnitř karoserie. Vytápění pro karoserii bude popsáno v kapitole 5, každopádně opět se liší z hlediska zdroje tepla – u automobilu se spalovacím motorem je využíváno ztrátové teplo, kdežto u elektromobilu je teplo získávané z akumulované elektrické energie, což je nežádoucí pro provoz elektromobilu. U elektromobilu je zahřívána topná spirála, přes kterou se proudící vzduch zahřívá – nejedná se tedy o využívání ztrátového tepla [6]. V případě automobilu se spalovacím motorem je využíváno ztrátového tepla, předávaného chladicí kapalinou, která proudí přes okruh. Uvnitř karoserie, v kabině vozidla je třeba uvážit i systém větrání. Větrání v kabině dosahuje hodnot dle nastavení systému uživatelem, běžně se však uvažuje střední průtok zhruba  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , minimální  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

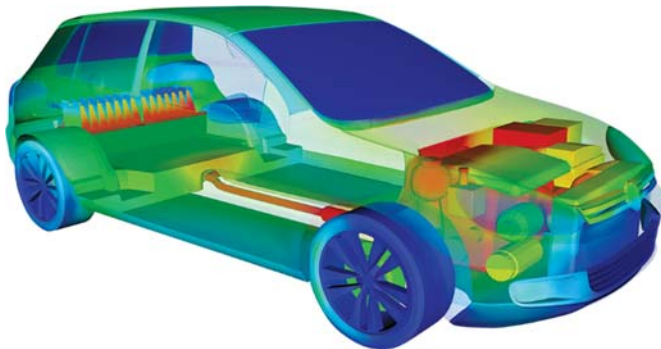
Ve vnitřní části karoserie může být důležitá akumulace tepla. Mezi prvky akumulující největší množství tepla v kabině vozidla se řadí palubní deska, sedadla a polstrování bočních dveří vozidla.

### 3 Koncepce karoserie

Koncepce karoserie je zažitý pojem, který popisuje především konstrukční rozložení pohonu v automobilu. Pojem karoserie bude pro účely této práce zahrnovat vozidlo bez pohonu a deformačních prvků, které přímo neovlivňují tepelnou charakteristiku karoserie. Jedná se tedy o kabinu a s ní spojené prvky, které mají významný vliv na tepelně izolační vlastnosti kabiny.

#### 3.1 Koncepce karoserie osobního automobilu

Při srovnání koncepce automobilu se spalovacím motorem (dále jen ASM) a elektromobilu jsou zřejmé hlavní rozdíly v konstrukci i rozložení karoserie. Některé hlavní komponenty zmizely nebo je nahradily nové. Na *Obr. 3.1* lze vidět tepelně ovlivněné oblasti v ASM s nejběžnější koncepcí. Za tu je v našich zeměpisných podmínkách považována karoserie automobilu s příčně uloženým motorem vpředu a poháněnou přední nápravou, případně poháněnými oběma nápravami. Z *Obr. 3.1* je patrné, že hlavním zdrojem tepla je spalovací motor. Komponenty spojené s odvodem a zpracováním jeho odpadního tepla také velmi významně ovlivňují rozložení teplot v karoserii. Ztrátové teplo se odvádí do karoserie přímo přes okruh vytápění a nepřímo od pohonu a výfukové soustavy, kterou jsou odváděny škodlivé spaliny. Spaliny jsou odváděny pod podlahou co nejdále od osob cestujících v automobilu [6].



*Obr. 3.1 – Model automobilu VW Golf 1.6TDI 6. generace se znázorněnými tepelnými zdroji a ovlivněnými oblastmi [6]*

Na *Obr. 3.2* jsou znázorněny komponenty, které předávají teplo od pohonu ASM do karoserie automobilu. Jedná se o koncepci s motorem uloženým vpředu a poháněnou zadní nápravou. Patrné je, že pro potřeby hledání kritických míst z hlediska tepelných ztrát či zisků v konstrukci karoserie budou rozdíly těchto dvou koncepcí zanedbatelné.

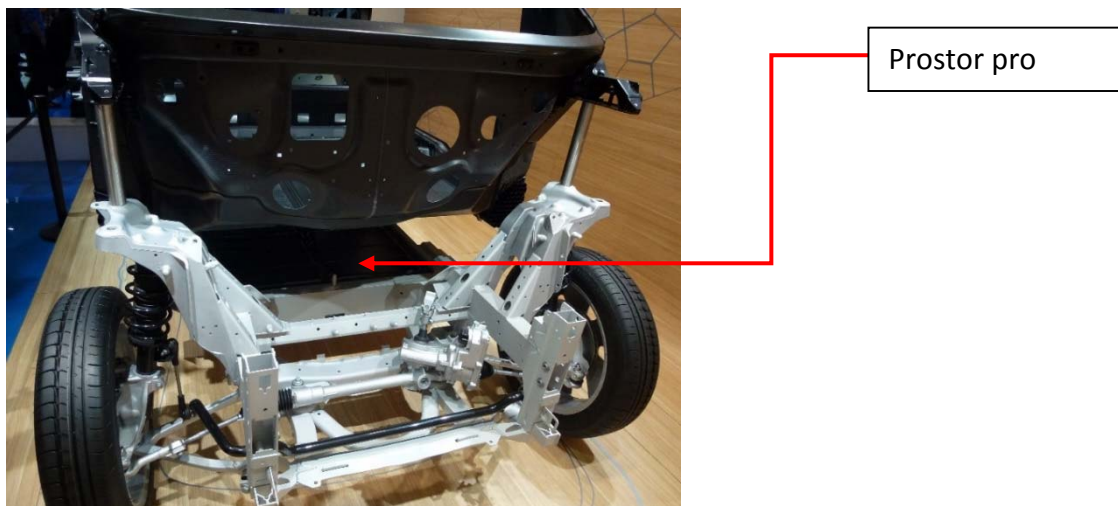
Existují i další méně obvyklé koncepce, které jsou však využívány zřídka a pro speciální, většinou sportovní či terénní automobily. Jedná se například o automobily s pohonem zadních, případně všech kol, s motorem uloženým v zadní části karoserie [1], [2].



*Obr. 3.2 – Znárodnění spalovacího agregátu a pohonu které jsou pro danou karoserii tepelnými zisky [3]*

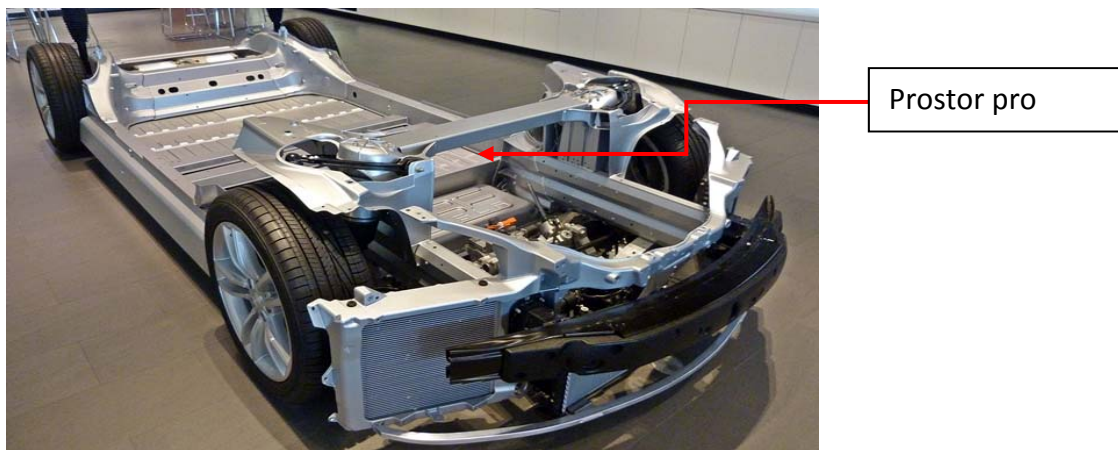
### 3.2 Koncepce karoserie elektromobilu

Pro požadavky elektromobilů není třeba řešit prostor pro umístění spalovacího motoru, složitého hnacího ústrojí pro přenos točivého momentu na vozovku či výfukovou soustavu. Oproti ASM je třeba uvážit pro koncepci elektromobilu umístění především baterií, které jsou poměrně objemné a těžké. Elektromobily mají tedy většinou stejnou koncepci, případně se liší pouze parametry a konstrukcí dle typu určení automobilu a počtu poháněných náprav [6]. Na *Obr. 3.3* je znázorněno jádro karoserie elektromobilu, konkrétně BMW i3. Pod prostorem podlahy se umísťují baterie, v přední části je náprava konstrukčně téměř totožná s ASM [6], [7].



Obr. 3.3 – Karoserie BMW i3 [4]

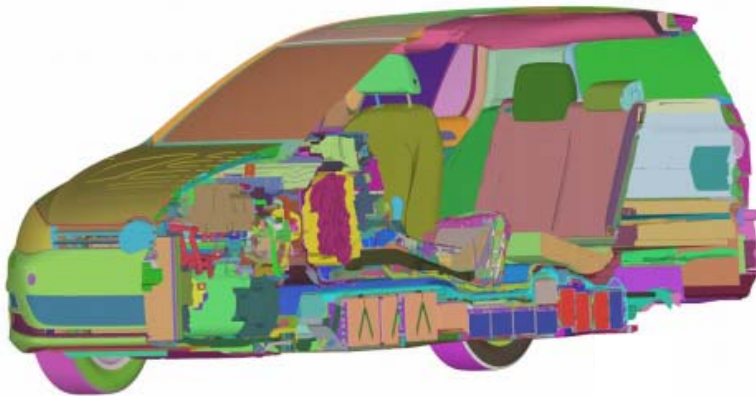
Z porovnání Obr. 3.3 a Obr. 3.4 je vidět, že malý elektromobil učený do města má podobnou koncepci jako jedno z nejrychlejších vozidel pro silniční přepravu – Tesla Model S na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 – Spodní část karoserie Tesly S [5]

#### 4 Tepelně kritické vlastnosti karoserie

Tepelné vlastnosti karoserie je nutné znát především pro posouzení tepelné bilance kabiny a dodržení optimálních teplot pro správné provozní vlastnosti vozidla. Kritická místa karoserie z hlediska tepelných vlastností lze identifikovat buď experimentálně, nebo simulací.



*Obr. 4.1 – Řez vozidlem při zohlednění struktury karoserie [3]*

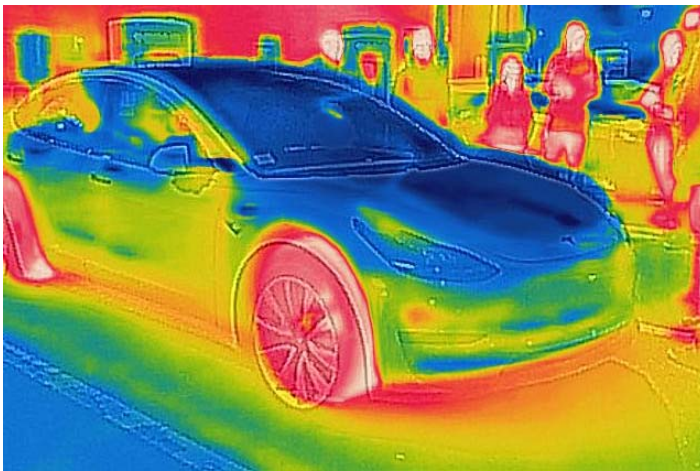
Pro správnou lokalizaci teplotně kritických míst je nutné zohlednit i strukturu dílů, které se při modelování často zanedbávají z důvodů malé mechanické odolnosti. Jedná se především o střechu, prosklené části, izolační materiály, pohledové interiérové prvky, sedadla a palubní desku [6].

Simulace modelu či experiment má za cíl určit oblasti, které je třeba modifikovat pro vhodné zlepšení charakteristiky tepelně kritických míst. Zmíněné oblasti vznikají v případě elektromobilů především tam, kde je zamezeno přísunu zbytkového tepla oproti ASM. Zmíněné teplo bylo přenášeno do kabiny ze spalovacího agregátu a dalších zařízení konvenčního, které v elektromobilu nejsou [2], [6].

Izolační materiály jsou zvolené podle technologických a uživatelských požadavků, volí se podle konstrukčních řešení karoserie, které souvisí především s kategorií vozidla. Vybavení interiéru vozidla má určité izolační vlastnosti, které lze velmi snadno upravit, osadit lokálními zdroji tepla či je odstranit. Sedadla mohou být také vybavena lokálním zdrojem tepla, vyhříváním. Dále lze změnit jejich tepelné vlastnosti změnou či modifikací výplně sedadel a materiálem potahu [6].

Všeobecnou tepelně kritickou oblastí karoserie vozidla jsou prosklené plochy, které jsou dlouhodobě řešenou oblastí (z hlediska přenosu tepla) vývoje vozidel, především z důvodu bezpečnosti a ceny výroby. Na *Obr. 4.2* je elektromobil odstavený po jízdě snímáný termokamerou.

Skla lze vyhřívat, ale dodávání energie do skel snižuje využitelnost elektromobilu, a proto se jedná o nepopulární řešení v oblasti elektromobility [7].



*Obr. 4.2 – Elektromobil Tesla 3 snímáný termokamerou [8]*

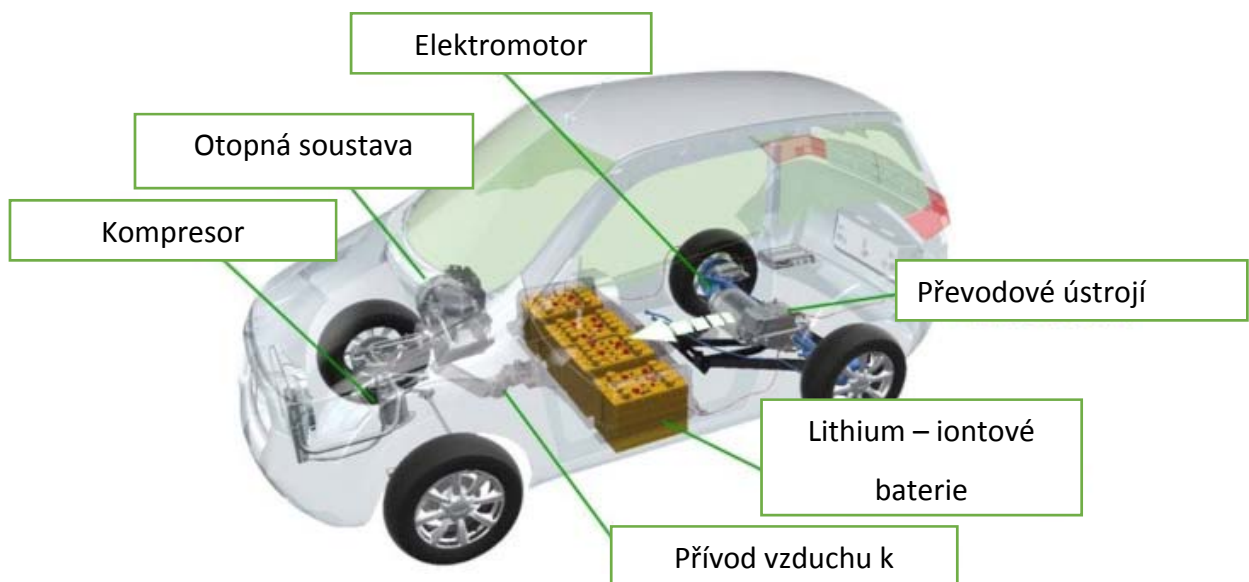
U prosklených částí je nutno zohlednit jejich tloušťku, materiál, technologii výroby a uvážit použití folií, barvu skla nebo vyhřívání ploch skla. Prosklené plochy zásadně ovlivňují provozní vlastnosti elektromobilu. Sklem osazené prvky vozidla nemusí sloužit pouze k dobré viditelnosti v provozu, zohlednit je třeba i moderní panoramatické střechy či prosklené kompletní dveře. Takto specifické prvky se pro elektromobily příliš nevyužívají. Důvodem je zvýšení tepelných ztrát i zisků v kabině [9].

Palubní deska se podle modelu vozidla může lišit tvarem a rozměry, každopádně ve většině vozidel se jedná o hlavní prvek pro nucený přívod tepla i chladu do kabiny. Vzduchem z palubní desky je vháněn vzduch s požadovanou teplotou přímo do kabiny a na posádku vozidla [7].

Další kritickou oblastí je podlaha karoserie. Problematika podlahové části je částečně řešena díky systému dvojité podlahy. S dvojitou podlahou přišla společnost Mercedes-Benz z důvodu zvýšení pasivní bezpečnosti automobilu, ale v oblasti elektromobilů je

využívána jako ideální místo pro uložení baterií elektromobilu [7]. Na *Obr. 4.3* je vidět usazení baterie v karoserii i v kombinaci s ostatními hlavními prvky pohonu a příslušenství elektromobilu.

Podlaha je jedna z nejbezpečnějších oblastí vozidla a zároveň jsou zde baterie umísťovány především pro ideální rozložení hmotnosti. Díky variabilnímu uložení baterií lze dosáhnout optimální rozložení hmotnosti 50:50 na přední a zadní nápravu. Zároveň lze snížit těžiště vozidla, což má pozitivní vliv na veškeré související provozní vlastnosti. Zvýšené pozornosti je potřeba podlaze věnovat především vzhledem k požadavkům na požadované udržení teploty baterií ve vozidle pro optimální životnost a kapacitu baterie. Nevhodné technické řešení může snížit dojezd elektromobilu [9], [10].



*Obr. 4.3 – Rozložení hlavních prvků v elektromobilu*



V důsledku odebrání spalovacího motoru vzniklo kritické místo – příčka před a pod palubní deskou. Tato oblast je důležitá i u ASM, jelikož odděluje motorový prostor od kabiny a veškeré otvory musí být dokonale utěsněné a tepelně i akusticky izolované [11].



*Obr. 4.4 – Příčka mezi přední nápravou a palubní deskou [6]*

#### 4.1 Materiály karoserie

Karoserie vozidla se skládá z různých materiálů, protože každá její část má jiné požadované vlastnosti. Požadavky pro vozidlo z pohledu materiálů jsou jasné – co nejvíce snížit hmotnost a zachovat maximální pasivní bezpečnost karoserie. Díky experimentům s materiály vozidel se v průběhu poslední dekády podařilo snížit u běžných automobilů hmotnost o 23 až 48 % při zachování stejných provozních vlastností [1].

##### 4.1.1 Konvenční materiály

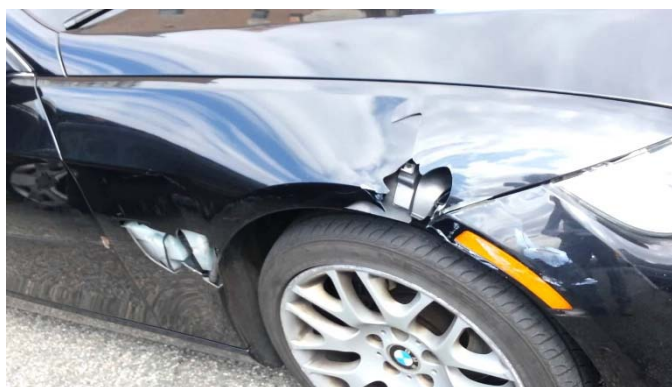
Běžné používané materiály pro karoserii ASM jsou částečně sdílené i s elektromobily, ale v případě elektromobilů jsou požadavky na charakteristické vlastnosti materiálů mnohem větší, než je tomu u ASM. Srovnání vlastností konvenčních materiálů je popsáno v *Tab. 4.1*.

Tab. 4.1 – Srovnání konvenčních materiálů [12], [13], [1]

	Polymer	Zkratka	$\alpha$ [ $K^{-1}$ ]	$\lambda$ [ $W/m \cdot K$ ]	$c_p$ [ $kJ/kg \cdot K$ ]
Termoplast	Nízkohustotní polyethylen	PE-LD	$25 \cdot 10^{-5}$	$0,32 + 0,40$	$2,10 + 2,15$
	Vysokohustotní polyethylen	PE-HD	$20 \cdot 10^{-5}$	$0,38 + 0,51$	$2,10 + 2,70$
	Polypropylen	PP	$(15 + 18) \cdot 10^{-5}$	$0,17 + 0,22$	2,00
	Polybutylentereftalát	PBT	$6 \cdot 10^{-5}$	0,21	1,30
	Akrylonitril-butadien-styren	ABS	$(6 + 11) \cdot 10^{-5}$	0,18	1,30
	Standardní polystyren	PS-GP	$(6 + 8) \cdot 10^{-5}$	0,18	1,30
	Polyamid 6	PA-6	$(8 + 10) \cdot 10^{-5}$	0,29	1,70
	Neměkčený polyvinylchlorid	PVC-U	$(7 + 8) \cdot 10^{-5}$	$0,14 + 0,17$	$0,85 + 0,90$
	Měkčený polyvinylchlorid	PVC-P	$(15 + 21) \cdot 10^{-5}$	0,15	$0,90 + 1,80$
	Polykarbonát	PC	$(6 + 7) \cdot 10^{-5}$	0,21	1,17
	Polytetrafluorethylen	PTFE	$(10 + 12) \cdot 10^{-5}$	0,25	1,00
	Lehčené plasty			$0,02 + 0,03$	
	Ostatní	Sklo		$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,6 + 1,2$
Ocel			$1,1 \cdot 10^{-5}$	50	0,26
Měď			$1,65 \cdot 10^{-5}$	380	0,39

## Polymery

Pro své dobré izolační vlastnosti se v automobilovém průmyslu začalo využívat velké množství polymerních materiálů. Jsou oblíbené především pro snadnou opravitelnost, cenu a fyzikální vlastnosti. Pro vnější části karoserie se využívají především plasty ABS, PA, PBT, POM, ASA nebo PP. Vnitřní část karoserie lze osadit především materiály SMA PP, ABS, PET, POM a PVC [14], [12], [15]. Na Obr. 4.5 je prasklý blatník vyrobený z polymerního materiálu.



Obr. 4.5 – Poškozený blatník vyrobený z polymeru [16]

## Ocel

Podstatnou část vnější karoserie a ve většině případů i nosné prvky samonosné karoserie, tj. nosníky jsou z oceli. V minulosti se používala především nízko-pevnostní

ocel bez intersticiálních prvků LSS. Dnes se používají vysokopevnostní HSS oceli. Součinitel tepelné vodivosti je pro LSS i HSS téměř totožný, proto lze tento rozdíl z pohledu tepelně izolačních vlastností zanedbat [17], [13].

### Sklo

Ve vozidle se běžně užívá více typů skel. Pro boční, zadní či střešní zasklení se užívají tepelně tvrzená skla. Tato skla mohou být kombinována v několika vrstvách, případně je lze spojit s pásy pro vyhřívání či foliemi pro zlepšení fyzikálních vlastností skla. Čelní skla se vyrábí odlišnou technologií, především z provozních důvodů se nepoužívají tepelně tvrzená skla. Součinitel prostupu tepla u prosklení vozidla ovlivní i další úpravy skel. U všech skel se součinitel tepelné vodivosti mění zvoleným materiálem skel či aplikací izolačních folií, případně zbarvení skla. Tepelné zisky či ztráty lze regulovat aktivně, či pasivně. Instalace izolačních folií je příkladem pasivního řešení. Aktivní řešení může znamenat např. mechanickou clonu která bude ovlivňovat prostup tepla [1].

Do některých automobilů lze zakoupit speciální dvouvrstvá skla. Dvouvrstvá skla se aplikují lepením dvou vrstev na sebe speciální pryskyřicí, nebo jsou s určitou mezerou vyplněnou plynem. Na *Obr. 4.6* je rozbité dvouvrstvé sklo, jednalo se o typ s plynovou výplní. Hlavními technickými parametry je tedy šířky vrstev jednotlivých skel, případně tloušťka mezi skly. Mezera mezi skly je vyplněna plynem s nízkou tepelnou vodivostí. Změna plynové výplně mezery u dvouvrstvých skel ovlivní součinitel prostupu tepla.



*Obr. 4.6 – Mercedes-Benz s „thermal dualpane“ okny [18]*

### 4.1.2 Alternativní materiály

S rostoucími požadavky na snížení hmotnosti a zlepšení prostupu tepla v karoserii se s postupem času mění použité materiály pro karoserii vozidla. Elektromobily se od automobilů liší z hlediska materiálů především požadavkem na tepelné vlastnosti v důsledku stále větší potřeby reálného dojezdu elektromobilu [19].

#### **Uhlíkové vlákno**

Uhlíkové vlákno je materiál používaný především pro svoje mechanické vlastnosti. Využití karbonových dílů na karoserii významným způsobem umožní snížit především hmotnost elektromobilu, polohu těžiště a mechanické vlastnosti. Z uhlíkových vláken jsou tvořeny celá jádra karoserie, případně i vnější panely karoserie v kombinaci s jinými materiály [6].



Obr. 4.7 – Karoserie BMW i3 bez vnějších dílů [4]

Z pohledu tepelných vlastností se jedná o izolant, kde lze porovnávat pro dané použití uhlíkové vlákno s hliníkovou slitinou. Hliníková slitina má až 40x větší tepelnou vodivost [1], [20], [21].

#### **Hliníková slitina**

Slitina hliníku je využívána v kombinaci s uhlíkovými vlákny tam, kde nejsou vysoké požadavky na izolaci tepla, nebo je dodatečně izolována. Z historického hlediska se hliníkové prvky na karoserie aplikovaly i mezi konvenční automobily vyšších cenových kategorií. Hliníkové slitiny jsou u elektromobilů využívány především na vnější plochy.

Zde jsou často zachovány kvůli mechanickým vlastnostem při střetu s překážkou a nespornou výhodou je i ekonomická výhodnost oproti uhlíkovým vláknům [10], [20].



Obr. 4.8 – Hliníková karoserie elektromobilu Tesla [22]

#### Hořčíková slitina

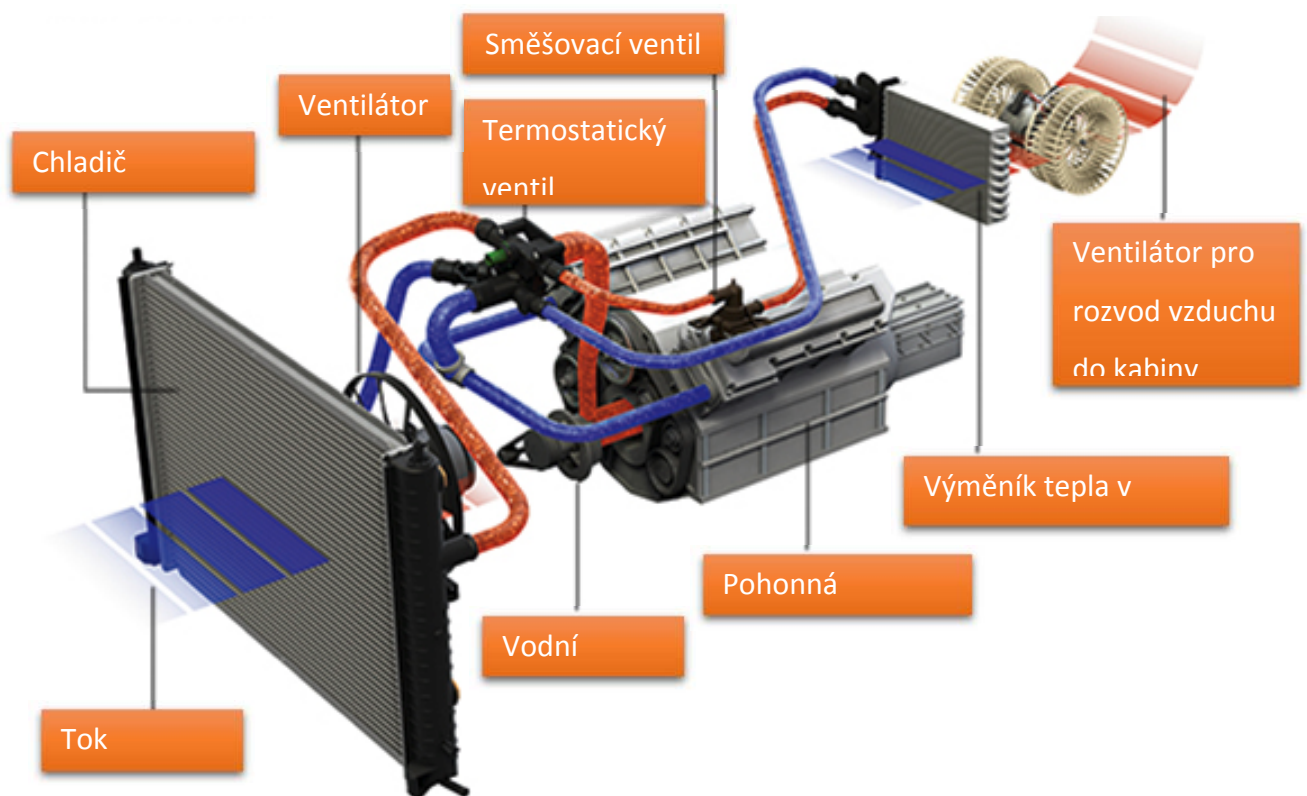
Možnosti aplikace hořčíkové slitiny na karoserii elektromobilu jsou podobné jako u hliníkové slitiny. K plošnému použití např. pro výrobu skeletu karoserie zatím u žádného sériově vyráběného vozidla nedošlo. V porovnání s hliníkovými slitinami jsou ty hořčíkové v provozních vlastnostech velice podobné, až na tepelnou vodivost, která je u hořčíkových slitin zhruba o 65 % nižší [6], [20].

Tab. 4.2 –Vlastnosti alternativních materiálů [23], [24], [20]

	$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	$\lambda$ [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	$c_p$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
Uhlíkové vlákno	$(0,08 \div 0,17) \cdot 10^{-5}$	3,3 ÷ 4,9	1300
Hliníková slitina	$2,3 \cdot 10^{-5}$	200 ÷ 260	1700
Hořčíková slitina	$2,52 \cdot 10^{-5}$	70 ÷ 158	1500

## 5 Srovnání vytápění a chlazení pro ASM a elektromobil

ASM využívá ztrátové teplo z pohonné jednotky vozidla viz *Obr. 5.1*. Při spalování paliva nutného pro chod automobilu dochází k ohřevu agregátu vozidla, který je chlazený kapalinou. Přes otopnou soustavu je tak dodávána část odpadního zbytkového tepla ze spalování v motoru až do kabiny, kde je dle potřeb uživatele rozváděn ohřátý vzduch do uživatelsky volených kabinových zón [1], [23].



*Obr. 5.1 – Vytápění v automobilu*

### 5.1 Systém pro vytápění a chlazení

Uvnitř elektromobilu se nachází tři důležité elektrické součásti. Ty se zahřívají a je z nich případně možné využít ztrátové teplo. Množství a možná využitelnost ztrátového tepla závisí především na výkonu a účinnosti pohonu elektromobilu. Další fakt, jenž je nutno brát v potaz, je využitelný průměrný výkon, který vozidlo potřebuje v závislosti na aktuální rychlosti vozu.

Jednou ze součástí je elektromotor, jeho ztrátové teplo je závislé čistě na účinnosti elektromotoru. Tepelné ztráty pak také může produkovat další součást – frekvenční měnič, který mění stejnosměrný proud na proud střídavý, při zachování konstantního

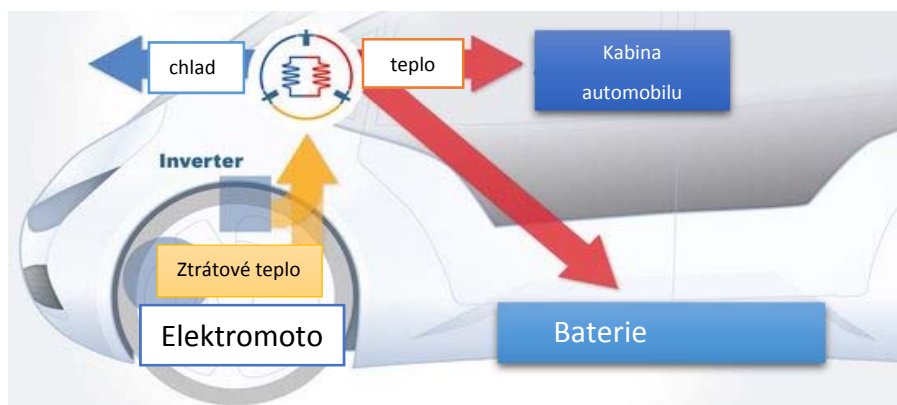
napětí 330 V. Poslední součástí, kde je možné hledat ztrátové teplo, jsou baterie. Baterie elektromobilu jsou nejvíce choulostivou částí pohonu celého vozidla. V současnosti jsou baterie na čím dál lepší technické úrovni a jejich kapacita i účinnost se stále zvyšuje. Baterie však není důležité pouze chladit, jako spíše udržovat na určité provozní teplotě. Ideální provozní teplota závisí na typu baterie, ale průměrně se tato hodnota pohybuje kolem 25°C.

V průběhu jízdy se zmíněné součásti zahřívají, potřebují tedy účinné chlazení. Chlazení elektromotoru zajišťuje odvod tepla vznikajícího ohmickými ztrátami ve vinutí, ztrátami v magnetickém obvodu vířivými proudy a mechanickými ztrátami v ložiscích. Chlazení může být provedeno jako přirozené nebo nucené, resp. kapalinové nebo plynové. Pro další využití odpadního tepla lze použít kapalinový rozvod podobný tomu v ASM na *Obr. 5. 1.* a vytápět s ním kabinu elektromobilu. Oproti vzduchovému vytápění se dá lépe regulovat a díky velké tepelné setrvačnosti chladicí kapaliny nedochází k většímu kolísání provozní teploty. Hlavní důvod pro volbu kapalinového chlazení je omezení hlučnosti, kterou vodní vytápění prakticky eliminuje, a také rozměry, které jsou oproti vzduchovému vytápění podstatně menší [11], [25], [23].

Existují dvě konstrukční řešení kapalinového vytápění. První řešení spočívá v tom, že chladicí tekutina proudí kanály ve tvaru šroubovice ve vnější části statoru. Druhá varianta funguje tak, že vytápění má podobu vodního pláště okolo statoru stroje. Z tepelně zatížených míst se pak odvádí teplo do chladiče. V zimním období proudí chladicí tekutina nejprve do tepelného výměníku, kde je teplo možno odvést pro případné vytápění interiéru. V letním období toto teplo proudí přímo do chladiče, kde je tekutině odebráno a přejímáno proudícím vzduchem [25], [21], [26]. Ochlazená tekutina se pak vrací zpět do elektromotoru. Jako náplň chladicího systému se používá chladicí kapalina se stejnými provozními vlastnostmi jako ta v ASM. Používá se celoročně, protože obsahuje přísady působící v soustavě antikorozně a zamezují tvorbě usazenin z minerálních látek [10], [9]. U ASM je celý systém znázorněn na *Obr. 5.1 na str. 24*, kde slouží k chlazení spalovacího motoru. Chladicím okruhem v bloku motoru protéká kapalina, která je poháněna mechanickou vodní pumpou. Celý okruh spalovacího motoru je regulován termostatem, který v případě potřeby otevře průtok systému k okruhu, kde je i chladič kapaliny osazený ventilátorem s variabilními otáčkami dle

potřeby chlazení. Systém pro kabinu vozidla je přímo napojen na okruh spalovacího motoru, což zajistí zásobování kabiny teplem v zimních měsících. Kabina elektromobilu je v důsledku absence spalovacího motoru vybavena topnou spirálou, přes kterou je vháněn ohřátý vzduch do jednotlivých zón interiéru elektromobilu. Ve většině případů je ASM i elektromobil vybaven systémem klimatizace, který je napojen na rozvod vzduchotechniky systému pro chlazení/vytápění ve vozidlech.

S vytápěním a rozvodem vzduchu do karoserie vozidla souvisí i větrání kabiny automobilu. Uvnitř automobilu je rozváděn vzduch plastovým potrubím do určitých zón, které končí vyústkami. Při uvážení všech otevřených vyústek jsou dále uvažovány hodnoty intenzity větrání přibližně  $40$  až  $80 \text{ h}^{-1}$ , dle nastavení ventilátoru který zajišťuje, přístup vnějšího vzduchu do kabiny.



Obr. 5.2 – Kapalinové chlazení elektromotoru

## 5.2 Tepelně ovlivněné části karoserie

Ideální stav je zajistit kompletní kabinu ideální teplotou ihned po nasednutí. Tento cíl je však především v našich zeměpisných podmínkách těžko dosažitelný. Je nutno uvažovat dva teplotní extrémy – letní a zimní. Dalším aspektem, který znemožňuje rovnoměrné rozložení teploty, je systém rozvodu vzduchu, který se do interiéru šíří ve většině případů lokálně vyvedenými vyústkami [10], [3].

V zimním období je požadavek na zvýšení provozní teploty v oblasti umístění baterií a v kabině pro komfort cestujících [7]. Kritické oblasti z hlediska provozních vlastností karoserie jsou až na specifická místa dané konstrukce stejná. Jedná se především o



ovládací prvky pro posádku, čelní okno, boční skla, oblast pro nohy pasažérů a palubní desku [3], [20] .

### 5.3 Lokální ohřev v karoserii

Pro pokrytí tepelné ztráty dané kritické oblasti je možné použít lokální ohřevy. Jedná se většinou o přeměnu elektrické energie na tepelnou. Z hlediska prosklení vozidel lze použít lokální ohřev pro vyhřívání skla, kde vyhřívání je konstrukčně usazeno do skla – s ohledem na celkovou viditelnost tak, aby řidič nebyl nijak omezen [1].



*Obr. 5.3 – Lokální ohřev čelního skla automobilu [27]*

Tímto způsobem je zpravidla vyhřívané pouze čelní sklo, ale lze jej umístit i do bočních oken. Na zadní prosklení nejsou tolik vysoké požadavky na viditelnost, proto se volí jiná



*Obr. 5.4 – Lokální ohřev zadního prosklení [27]*

a levnější technologie výhřevu okna, kde jsou pásy pro vyhřívání mnohem více viditelné [10], [23].

Nejčastěji lokálně vyhříváným prvkem v automobilu i elektromobilu jsou sedadla. Konstrukční řešení spočívá v umístění tenkých, ohebných topných folií pod čalounění sedadel. Ty jsou zde umístěny s ohledem na životnost desek i rychlý start prostupu tepla. Z hlediska přestupu tepla je mnohem vhodnější využívat látkové potahy sedadel. Na Obr. 5.5 je běžná topná folie, kterou lze umístit prakticky pod všechny čalouněné plochy. Takto lze vyhřívát libovolný počet sedadel ve vozidle. Toto technické řešení je náchylné na mechanické poškození v důsledku přílišného zatížení sedadla na malou plochu [1], [25].



Obr. 5.5 – Lokálně vyhřívaná spodní část sedadla [25]

Dalším prvkem interiéru pracujícím na stejném principu je volant elektromobilu. Technické řešení je vlastně úplně shodné jako u sedadel, jedná se opět o integraci topné folie pod potah volantu [1]. V rámci úspor elektrické energie je toto řešení vhodné aplikovat pouze na místa, s kterými je uživatel vozidla nejčastěji v kontaktu. Díky tomuto řešení se otopné fólie aplikují pouze na cca 35 % plochy věnce volantu [10], [25].



Obr. 5.6 – Lokální ohřev volantu [28]

Takto řešený lokální ohřev lze umístit prakticky kdekoli v kabině vozidla.

Někteří výrobci elektromobilů umísťují tyto ohebné folie i do vnitřních držáků dveří, na loketní opěrku či do středového tunelu který přichází do styku s nohou řidiče. Snaha výrobců je však snižovat počet lokálně ohřívaných míst, jelikož se pro ně využívá elektrická energie z baterií, což má za důsledek snížení dojezdové vzdálenosti [7], [25].

## 6 Simulace

Pro posouzení tepelných vlastností karoserie automobilu lze využít některý ze simulačních programů. Nastavením podrobného tepelného modelu vozidla pro simulaci lze docílit přesných výsledků a následně si ověřit, zda je dané technické řešení dostačující. Pro výpočetní model lze použít CAD model využívaný pro pevnostní analýzy a virtuální nárazové zkoušky.

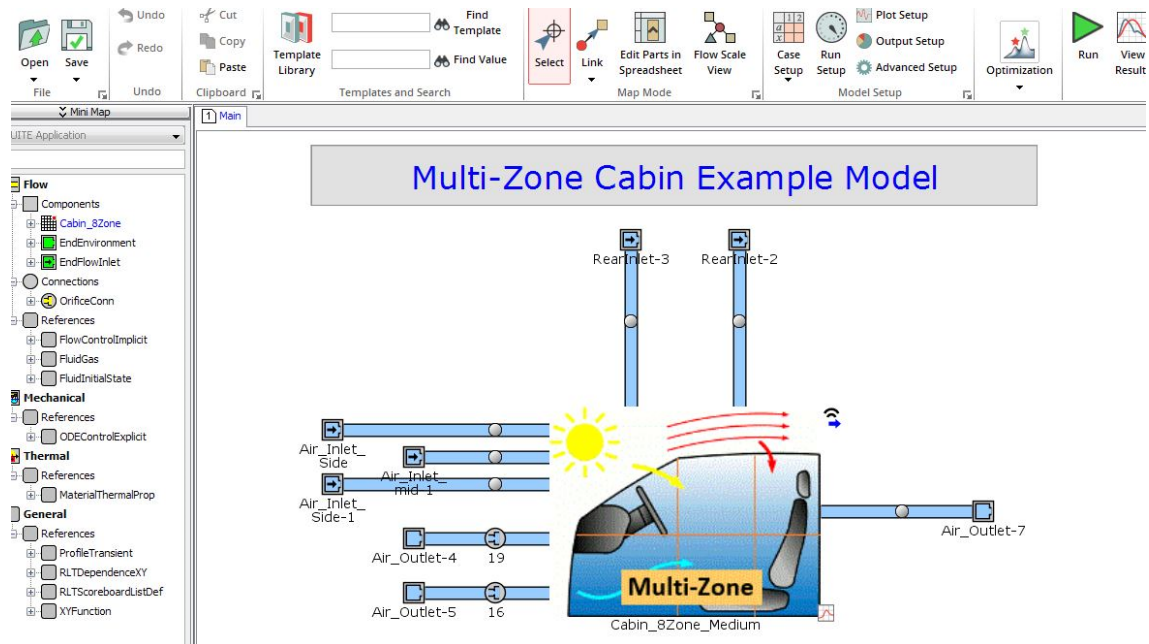
Díky moderním simulačním programům lze zvolit ideální tepelně izolační materiály s ohledem na konkrétní trh, kde bude vozidlo prodávané. Optimální vnitřní teplota pro většinu materiálů v karosérii automobilu a pasažéry je 20 až 30 °C. Některá místa této teploty bohužel nedosahují, zde je třeba rozlišit, zda tento aspekt ovlivní provozní vlastnosti okolních dílů a uživatele. Především u elektromobilů je tato teplota velmi důležitá pro optimální funkci a životnost baterií, které zajišťují pohon vozidla. Většina konvenčních baterií je navržena pro optimální teplotu 25 °C [1], [6].

Pro potřeby této práce bylo třeba vybrat vhodný simulační program a model. Prozkoumáním možností se výběr zredukoval na programy IDA ICE, GT Suite, TAItherm a Theseus- FE.

### **GT Suite**

GT Suite je jedním z nejznámějších simulačních programů pro automobilový průmysl a je využíván na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Jedná se o komplexní program, který je schopen simulovat současné průběhy mnoha veličin. Je využíván zejména pro simulace pohonu vozidel (spalovací motor, převodové ústrojí aj.). Zároveň je ale možné simulovat pomocná zařízení, jako je třeba kompresor pro chlazení vzduchu v kabině. Program umožňuje provést simulaci stojícího vozidla nebo pohybujícího se po určité trase s konkrétními okrajovými podmínkami.

Modelování je založeno na kombinaci komponent do síťového grafu – viz *Obr. 6.1*. Jedná se o 1D modelování. Program neobsahuje některé prvky, které jsou nutné pro simulaci v rámci této práce. Existují sice studie provedené v GT Suite, které jsou zaměřené na tepelný komfort v kabině vozidla, ty však využívají kosisimulaci s externí programy, které jsou zaměřené na tepelné chování kabiny. Takovými programy jsou např. Theseus-FE a THAItherm.

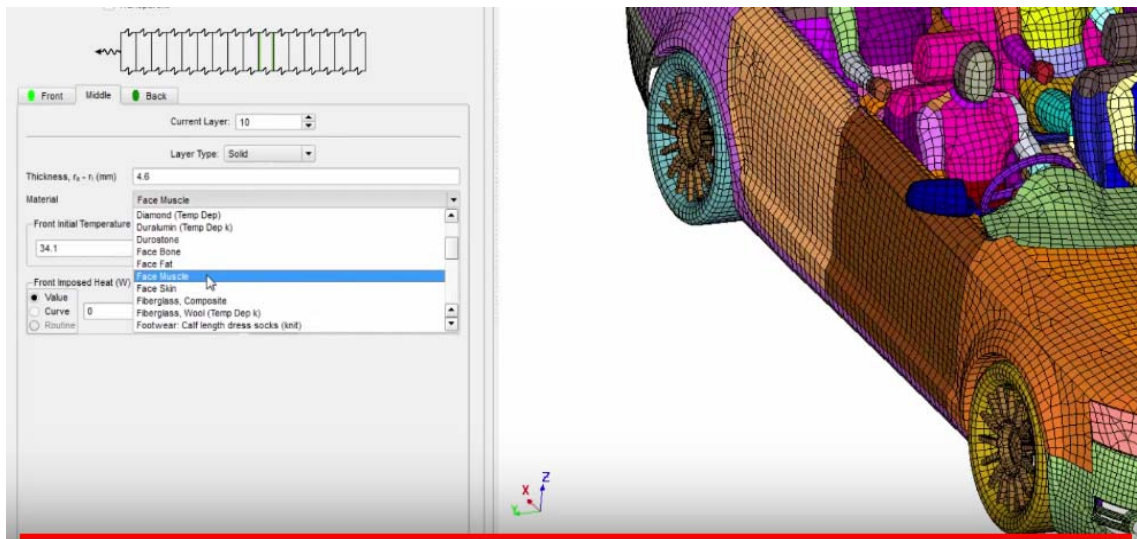


Obr. 6.1 – Grafické zobrazení modelu v programu GT Suite

Pro účely této práce byla využita vzorová vyřešená úloha v GT Suite jako zdroj geometrického modelu kabiny vozidla. K tomu posloužila součást GT Spaceclaim.

### TAITherm

TAITherm je program zaměřený na sdílení tepla a tepelný komfort v kabině. Je připravený především pro modelování a simulace ASM s tím, že dokáže zohlednit i osoby a detailně sledovat jejich tepelnou interakci s okolím. Na Obr. 6.2 je na pravé straně k dispozici výběr i jednotlivých částí obličeje řidiče, takto lze sledovat i další osoby ve vozidle. Dle potřeby lze dále sledovat jednotlivé díly, plochy nebo určitá přechodová místa ve vozidle. Zakřivené plochy pro simulaci nejsou problém. Z pohledu přenosu tepla je TAITherm dostatečně podrobný, modelování všech mechanismů přestupu tepla je na poměrně vysoké úrovni. Dalším kladným faktem je, že TAITherm umí nejlépe ze všech zmíněných programů sledovat teplotu pasažérů na jednotlivých částech těla.



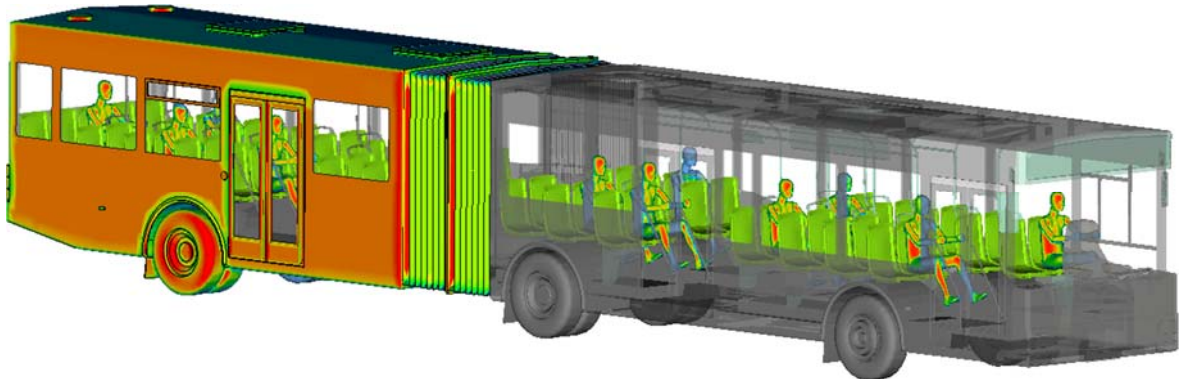
Obr. 6.2 – Model kabiny vozidla v programu TAItherm

Hlavní nevýhodou, především pro tuto práci, je problematická dostupnost tohoto programu, jelikož nenabízí žádné studentské licence ani spolupráci se školami, případně zkušební verze.

### Theseus-FE

Theseus-FE ve spojení s GT Suite pracuje uživatelsky velmi podobně, ale liší se především zaměřením. Jako jediný ze zmíněných programů je přímo modifikován pro aktuální potřeby elektromobility a zaměřuje se na i na problematické oblasti popsané v kap. 4. Umožňuje simulace např. elektrického autobusu, viz Obr. 6.3. Jako v jediném ze zmíněných programů zvládá v 3D simulovat baterii díky rozsáhlé databázi vlastností (včetně chemických složení baterií). Dále dokáže zohlednit i kabelové svazky a systém vytápění pro elektromobil. Stejně jako TAItherm dokáže Theseus-FE simulovat tepelný komfort, pro který byl původně navržen. Systém vybírání ploch a práce s plochami či díly je prakticky identická s programem THAItherm a je uživatelsky snadná. Rozdíl nastává v zadávání okrajových podmínek, kde Theseus-FE nabízí poměrně velké možnosti nastavení vnějších vlivů, včetně sluneční radiace i chování vozidla. Z hlediska elektromobility je tento program tedy ze všech uvedených nejvhodnější, má i největší databázi izolačních materiálů, nabízí kombinaci různých zasklení a obsahuje i zajímavé prototypy zasklení jako šablony. Bohužel, hlavní a asi jediná nevýhoda spočívá

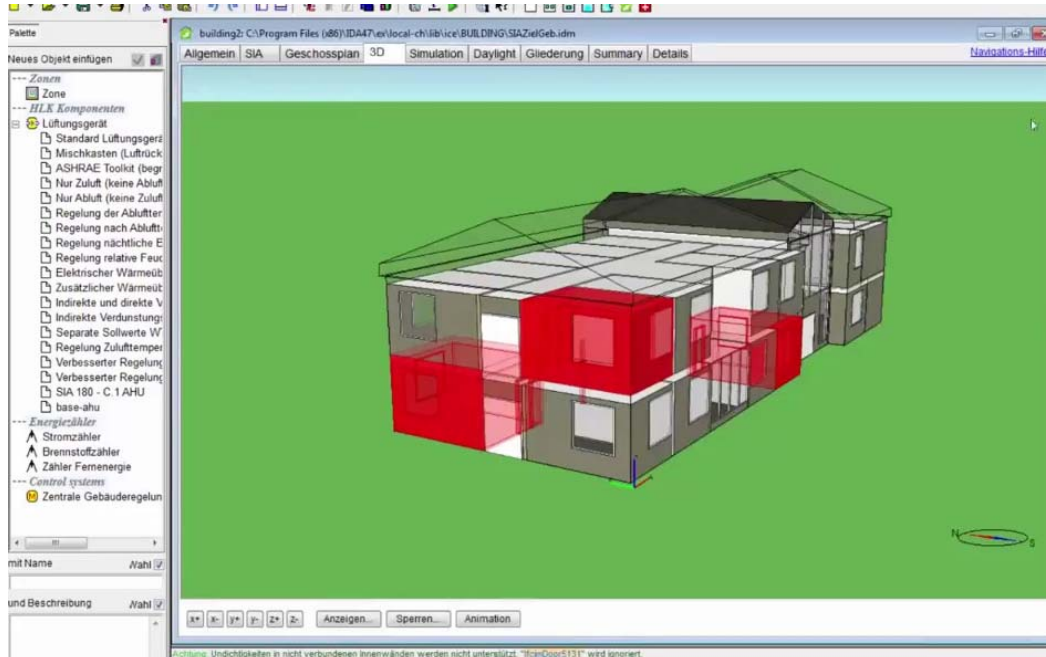
v nedostupnosti programu. Výrobce nechtěl poskytnout ani zkušební verzi pro studijní účely, později ani samotný program ke koupi.



Obr. 6.3 – Elektroautobus v programu Theseus-FE

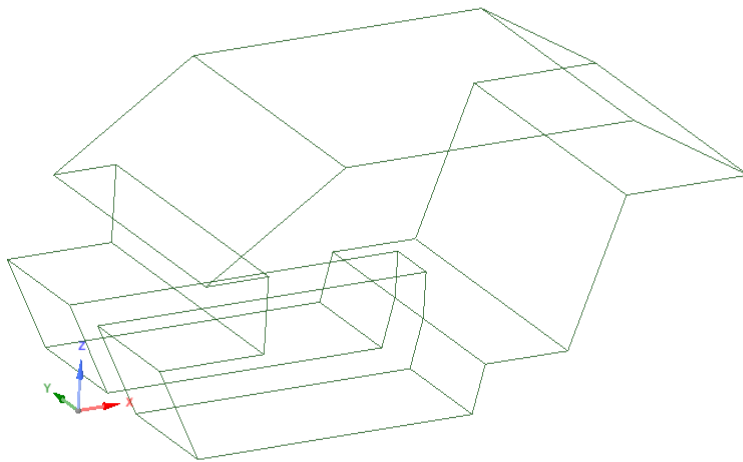
## IDA ICE

IDA ICE je sice program určený pro simulaci budov (viz Obr. 6.4), ale při vhodně zvoleném a vytvořeném modelu lze tento software aplikovat i na vozidla. Budova a vozidlo se pro naše účely liší v uvážení času a místa – budova stojí a nemění svoje natočení vůči světovým stranám, kdežto automobil v reálném provozu mění svůj směr, rychlost a natočení. Ve srovnání s programy určenými pro automobilový průmysl je zde další znevýhodnění – v databázi materiálů zcela chybí materiály používané ve vozidlech.



Obr. 6.4 – Program IDA ICE aplikovaný na původní zaměření

Oproti tomu má IDA ICE mnohem širší možnost nastavení v oblasti zasklení a okrajových podmínek. Hlavní rozdíl z uživatelského pohledu je práce s modelem. IDA ICE neumí pracovat se zakřivenými plochami a rozkládá je na velké množství malých rovinných ploch, což v praxi znamená velmi časově náročné, místy až nemožné nastavení modelu. Na *Obr. 6.5* je jednoduchý model karoserie importovaný z databáze GT Suite, který dokáže IDA ICE zpracovat. Model je bohužel nutné vždy importovat, protože v rozhraní programu lze vytvářet pouze objekty bez skloněných ploch (kromě střechy).



*Obr. 6.5 – Upravený model v programu GT- Spaceclaim*

Mezi hlavní klady IDA ICE lze tedy zařadit širokou možnost nastavení vnějších podmínek a potřebných parametrů modelu, výpočetní nenáročnost programu a dostupnost i v rámci výuky. Nedostatky s ohledem na tuto práci plynou z jiného určení programu, což se pojí i se systémem uživatelského výběru ploch a absencí databáze materiálů z automobilového sektoru.



## 7 Model a simulace

Po zvážení všech kladů a záporů zmíněných v kapitole 6 byl pro simulaci zvolen program IDA ICE. V tomto programu není možné vytvořit zjednodušený geometrický model vozidla, pro je nutné ho importovat z jiného softwaru. Následně je nutné nastavit vlastnosti modelu dle vlastností elektromobilu a je třeba uvážit okrajové podmínky. Varianty vlastností karoserie se týkají dvou typů zasklení a dvou typů izolace. Okrajové podmínky jsou letní a zimní provoz za jízdy rychlostí  $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Na začátku je vhodné vytvořit kořenový model, který bude dále upravován pro konkrétní scénáře.

### 7.1 Import modelu pro IDA ICE

Pro potřeby této práce je vhodný model ze šablony v GT Suite. Model pro GT Suite má rozdílný formát oproti modelům používaným v IDA ICE. Export modelu pro IDA ICE byl proveden v programu GT Spaceclaim. V *Tab. 7.1* jsou popsány nejpoužívanější formáty pro program IDA ICE, které jsou vhodné pro import.

*Tab. 7.1 – Tabulka možných formátů k importu do IDA ICE*

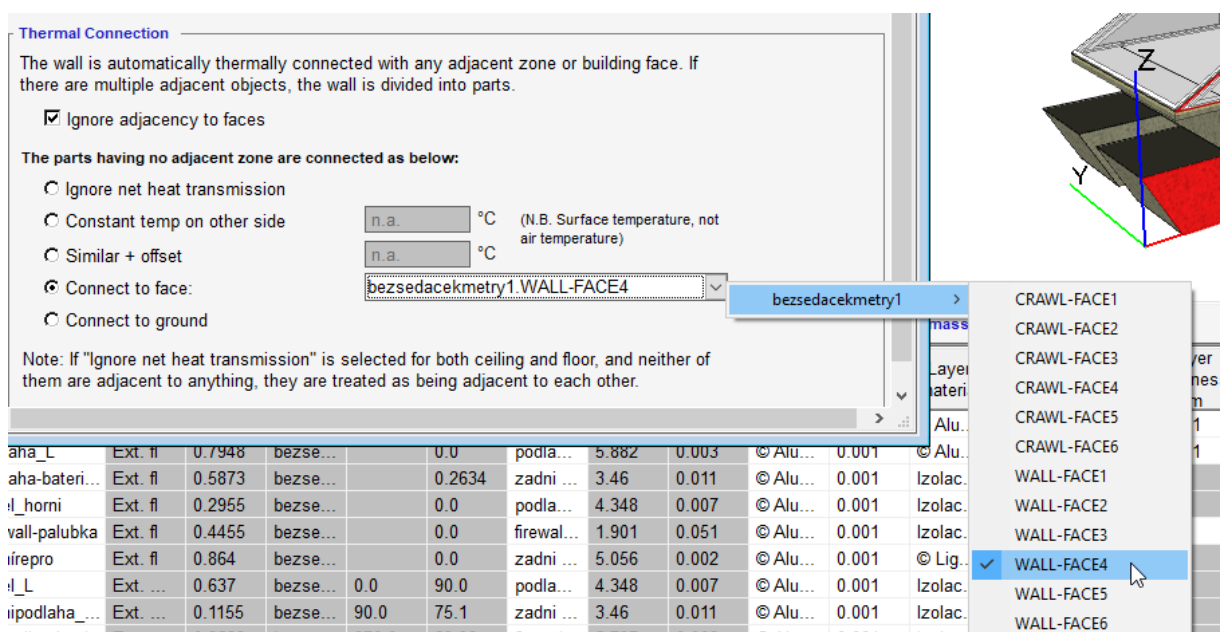
Program	Formát (přípona)
AutoCAD	.dwg, .dxf, .dwf
SketchUp	.skp
Wavefront	.obj

Pro převod geometrie byl zvolen formát OBJ, který obsahuje 3D souřadnice (polygon čar a bodů). Bylo ještě třeba vhodně konvertovat jednotky. Formát OBJ sám neobsahuje jednotky, ale při exportu jsou mu přiřazeny do jeho struktury. Program GT-Spaceclaim pracuje s modely vozidel v milimetrech, zatímco IDA ICE pracuje v metrech. Proto je nutné ihned po importu modelu provést kontrolu, zda jsou rozměry odpovídající, protože je následně nelze změnit.

Při následném importu do programu IDA ICE bylo nutné vložit *building body* a *zone geometry*. *Building body* definuje hranici, kde již působí vnější podmínky, což je např. obálka budovy. *Zone geometry* se týká tepelné zóny, v případě této práce se jedná o kabinu elektromobilu (jednozónový model). První v pořadí je třeba naimportovat

*building body* a následně *zone geometry*. *Zone geometry* se liší v tom, že by měla obsahovat sedadla. Pro zjednodušení lze sedadla nahradit vložením vnitřní hmoty (*Internall mass*) s charakteristickými vlastnostmi sedadel. To ušetří složité propojování ploch mezi *zone geometry* a *building body*.

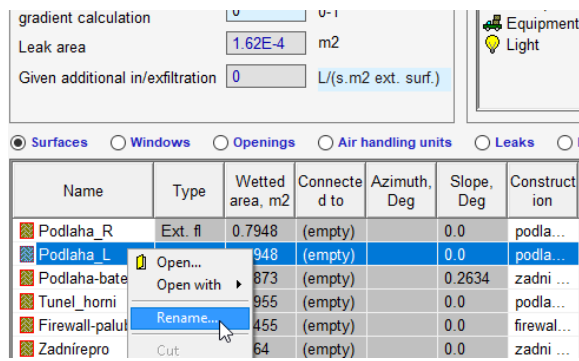
Použití stejné geometrie pro *bulding body* a *zone gometry* zajistí, že při napojování budou mít veškeré plochy stejné názvy a celé propojení bude rychlé. V opačném případě je nutné porovnat veškeré plochy, aby byly správně přiřazené. Propojení ploch je možné kontrolovat a měnit pouze manuálně v kartě *Floor plan*, což je u složitějšího modelu velmi problematické. Nastavení je vidět na *Obr. 7.1*. I nepatrná odlišnost v *zone geometry*, např. přidání předních sedadel způsobí přidání zhruba 30 ploch a následně posune celý systém přiřazování povrchů.



*Obr. 7.1 – Spojení zone geometry a bulding body*

## 7.2 Vlastnosti stěn karoserie

Po importu geometrie a následné kontrole rozměrů je nutné definovat vlastnosti materiálů a skladbu veškerých stěn karoserie i zasklení. Pro přehlednost a pro další úpravy je vhodné pojmenovat všechny plochy funkčními názvy, viz *Obr. 7.2*.

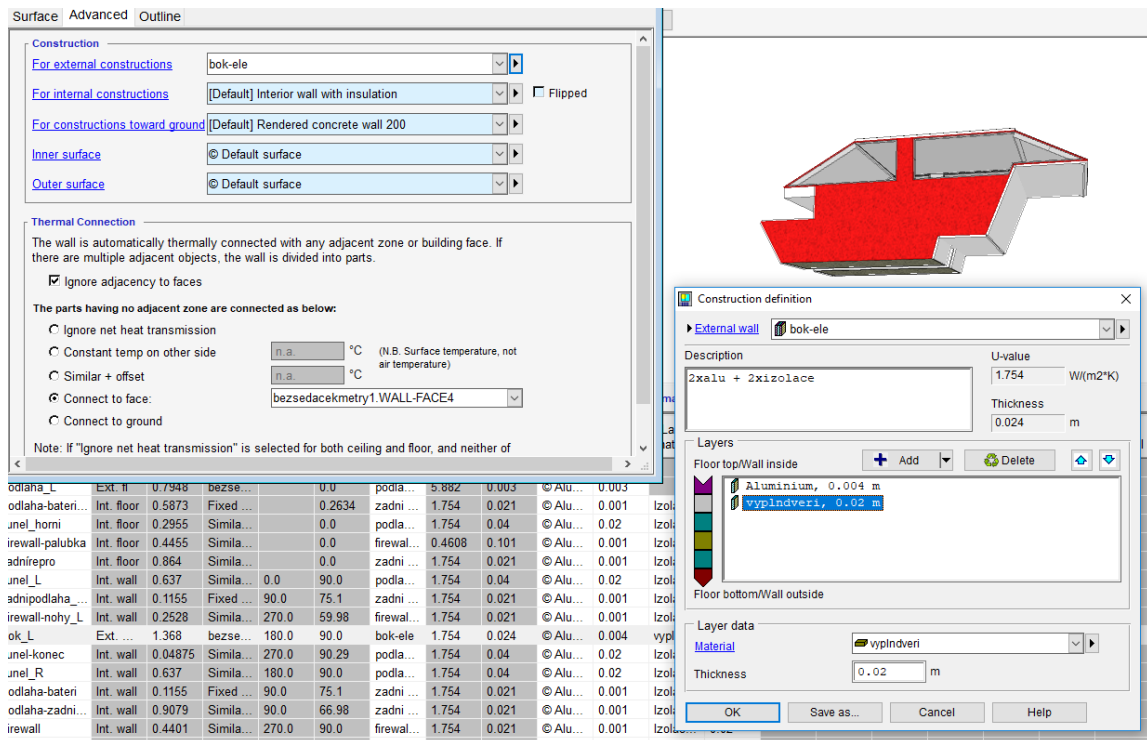


Obr. 7.2 – Přejmenování jednotlivých stěn modelu

Hlavním uvažovaným materiálem pro karoserii je hliníková slitina, která je z mechanických důvodů užívaná lokálně v několika vrstvách a má proměnlivé tloušťky plechu. Pro model se neuvažují např. tři vrstvy po 1 mm plechu, ale jedna vrstva plechu silná 3 mm. Plech z hliníkové slitiny je doplněn izolací, která se volí materiálem a tloušťkou podle potřeby pro danou lokaci. V praxi volba izolačního materiálu vychází i z jeho akustických vlastností. V Tab. 7.2 jsou uvedeny nejběžněji používané izolační materiály v elektromobilu.

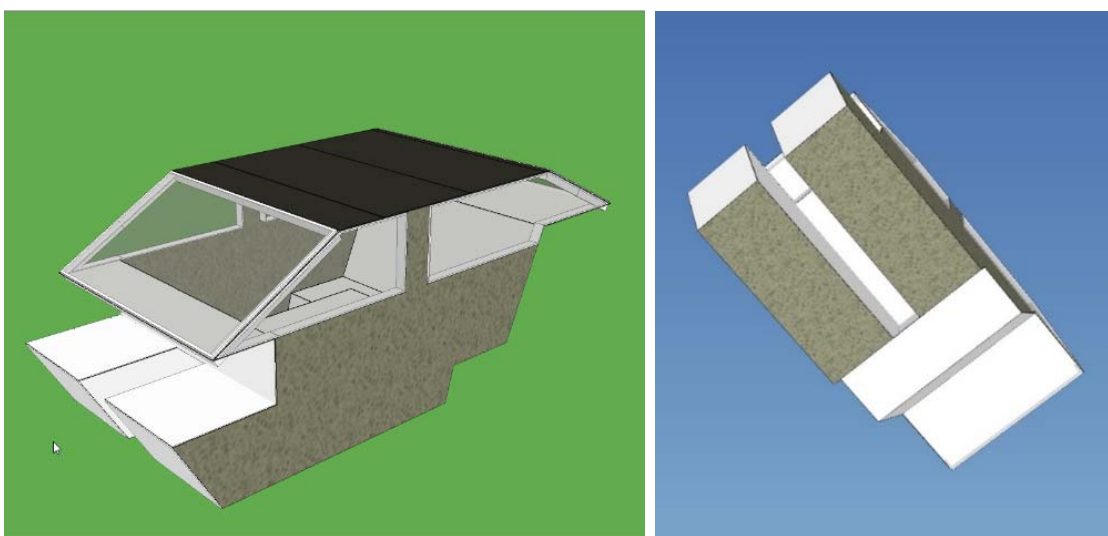
Tab. 7.2 – Nejvíce používané izolační materiály [29]

Název materiálu	$\lambda$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
Pevný PU	0,022
Měkká PU pěna	0,08
Pěnová izolace	0,182
Izolace obsahující jemná skleněná vlákna	0,074
Skelná vata odolná vysokým teplotám	0,069
Skelná tkanina	0,07



Obr. 7.3 – Výběr materiálu a vrstev pro danou část karoserie

Na Obr. 7.3 je stěna s již vybranými materiály bez detailního uvažování vrstev a struktury dílu. Plochy je třeba nastavit ještě z hlediska vnitřních a vnějších stěn. Jako vnější jsou uváženy pouze boky, střecha a podlaha kabiny vozidla. IDA ICE barevně rozliší stěny, takže pro následnou kontrolu by měly být ostatní plochy bílé, jako je tomu na Obr. 7.4.



Obr. 7.4 – Model z horního a dolního pohledu

Vnitřní stěny mají v modelu vždy nějakou teplotní podmínku. Jsou místa, kde je třeba udržet konstantní teplotu s minimální teplotní diferencí, např. prostor pro umístění baterií. U ostatních ploch lze uvážit teplotní diferencí, kladnou či zápornou. Pro model v této práci jsou okrajové podmínky stěn uvedeny v *Tab. 7.3*.

*Tab. 7.3 – Okrajové podmínky stěn v modelu*

Název zóny.Název stěny	Okrajová podmínka
bezsedacekmetry.Podlaha_R	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Podlaha_L	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Podlaha-baterie_horni	Teplota = 25°C
bezsedacekmetry.Tunel_horni	Teplota + 2°C
bezsedacekmetry.Firewall-palubka	Teplota - 3°C
bezsedacekmetry.Zadnírepro	Teplota - 5°C
bezsedacekmetry.Tunel_L	Teplota + 7°C
bezsedacekmetry.Zadnipodlaha_tunel	Teplota = 25°C
bezsedacekmetry.Firewall-nohy_L	Teplota + 5°C
bezsedacekmetry.Bok_L	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Tunel-konec	Teplota + 2°C
bezsedacekmetry.Tunel_R	Teplota + 7°C
bezsedacekmetry.Podlaha-baterie_R	Teplota = 25°C
bezsedacekmetry.Podlaha-zadninaprava	Teplota - 5°C
bezsedacekmetry.Firewall	Teplota - 5°C
bezsedacekmetry.Firewall-nohy_R	Teplota + 5°C
bezsedacekmetry.BOK_R	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.A-sloupek	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Nosnik-L	Teplota + 2°C
bezsedacekmetry.C-sloupek	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Strecha	Venkovní podmínky
bezsedacekmetry.Nosnik-R	Teplota + 2°C

### 7.3 Zasklení

Jako zasklení byly použity dva typy skel, jejichž vlastnosti poskytla společnost Saint-Gobain Sekurit. Jedná se o dvouvrstvá lepená skla odolná proti roztříštění, každá vrstva má tloušťku 4,96 mm, vnitřní vrstva je z čirého skla, vnější ze skla se zvýšenou pohltivostí (zelené sklo) nebo se zvýšenou odrazivostí (sklo s pokovením). Skla jsou vyráběna pro

čelní zasklení, v modelu byla pro jednoduchost aplikována ve všech otvorech. Vlastnosti podle normy ISO 13837 byly známy pouze pro kolmý dopad slunečních paprsků a pro lepené sklo jako celek. Součinitel emisivity 0,837 je u obou typů zasklení shodný. Z Tab. 7.3 je zřejmé, že zelené sklo bude sluneční radiaci spíše pohlcovat a sklo s kovovou vrstvou ji bude spíše odrážet.

Tab. 7.3 – Vlastnosti zasklení [30]

ISO 13837	$T_{DS}$ [%]	$R_{DS}$ [%]	$A_{DS}$ [%]	$A_i$ [%]	$T_{TS}$ [%]
<b>Sklo s kovovou vrstvou</b>	42.9	25.7	31.4	8.7	51.6
<b>Zelené sklo</b>	54.2	5.7	40.1	11.1	65.3

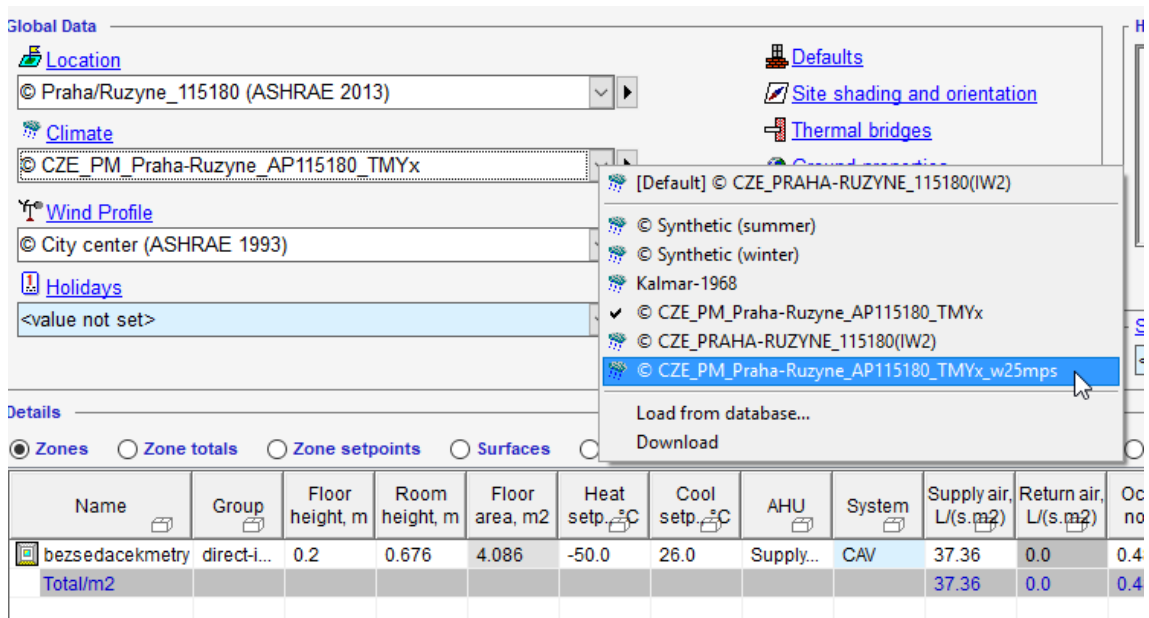
Tato skla posloužila také jako vnější panel pro dvojitě zasklení s izolační mezerou šířky 12 mm vyplněnou inertním plynem, jako vnitřní panel bylo použito čiré sklo tloušťky 4 mm. Úhlové charakteristiky zasklení si ve všech případech spočítal simulační program IDA ICE vlastním (skrytým) postupem.

Dále je třeba určit hodnotu součinitele prostupu tepla pro rám zasklení. Pro čelní a zadní okno se nejčastěji uvádí hodnoty  $0,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Technicky se jedná o přilepená okna ke karoserii, případně osazená těsněním pro zlepšení aerodynamiky vozidla a estetiky karoserie. Podobně je tomu i u bočního zasklení, zde je třeba uvážit, zda jsou okna stahovatelná či ne. Okna, která nelze stahovat, jsou často připevněna ke karoserii stejně jako čelní a zadní okno. Pro stahovatelná skla u elektromobilu je uváděn součinitel prostupu tepla rámu  $1,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Pro zjednodušení simulace a s určitou rezervou lze uvážit pro všechna skla součinitel prostupu tepla pro rám  $1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a relativní podíl rámu na celkové ploše zasklení 5 %.

#### 7.4 Okrajové podmínky

Aby simulace měla přínosné výsledky, je nutné zvolit okrajové podmínky vhodně vystihující provoz vozidla. Provozních stavů, které je vhodné zkoumat, je celá řada – zimní a letní období (vytápění nebo chlazení kabiny), stojící vozidlo, jízda ve městě, jízda mimo obec aj. V této práci byla provedena simulace pro jediný provozní stav – jízdu konstantní rychlostí  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Jako klimatická data byly použity běžné údaje typického meteorologického roku pro Prahu-Ruzyni ve formátu pro program EnergyPlus, se kterým umí IDA ICE pracovat. V této databázi byly nahrazeny rychlosti větru konstantní hodnotou  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , což odpovídá rychlosti obtékání kabiny vozidla vzduchem pro zvolený případ simulace. Problém je v tom, že simulační programy pro energetiku budov předpokládají určitý profil rychlosti větru u země a počítají lokální rychlost jako funkci výšky nad zemí. Hodnoty rychlosti větru v databázi počasí pocházejí z měření nejčastěji ve výšce 10 m nad zemským povrchem. Lokální rychlost větru má mimo jiné vliv na součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu. Proto byla kabina automobilu v režimu jízdy umístěna do výšky 10 m. Tím je zajištěno obtékání kabiny vzduchem požadovanou rychlostí. Upravená databáze počasí byla importována do IDA ICE (viz Obr. 7.5).



Obr. 7.5 – Výběr databáze počasí

## 7.5 Provozní podmínky

Z hlediska času je uvažováno letní období od 1.5. do 30.9., zimní období od 1.10. do 30.4. a ustálený provoz každý den od 8:00 do 18:00 hod.

Ve vozidle jsou uvažovány 2 osoby s aktivitou odpovídající 1,2 MET. V letním provozu je uvažováno pro osoby lehké oblečení s tepelným odporem ( $0,6 \pm 0,1$ ) CLO, pro zimní je uvažováno více vrstev oblečení tj. ( $1,2 \pm 0,2$ ) CLO.

V automobilu se uvažuje trvale infiltrace s intenzitou větrání  $0,05 \text{ h}^{-1}$ . Intenzita nuceného větrání je uvažována  $71,97 \text{ h}^{-1}$  pro střední nastavení otáček ventilátoru a  $39,93 \text{ h}^{-1}$  pro minimální výkon ventilátoru. [31]

Pro chlazení a vytápění byl použit ideální model s maximálním výkonem 10000 W. Vytápění má zajistit v době provozu požadovanou minimální teplotu vzduchu  $20^{\circ}\text{C}$ , chlazení má omezit maximální teplotu vzduchu na  $26^{\circ}\text{C}$ .



## 8 Výsledky a diskuse

Pro porovnání scénářů je vhodné zavést zkratky pro jednotlivé případy, které jsou uvedeny v *Tab. 8.1*. Dané scénáře jsou označeny kombinací zkratk, např. Z1W1P1 platí pro jednovrstvé zelené zasklení při minimální intenzitě větrání v kabině se standardní izolací.

*Tab. 8.1 – Vysvětlení zkratk*

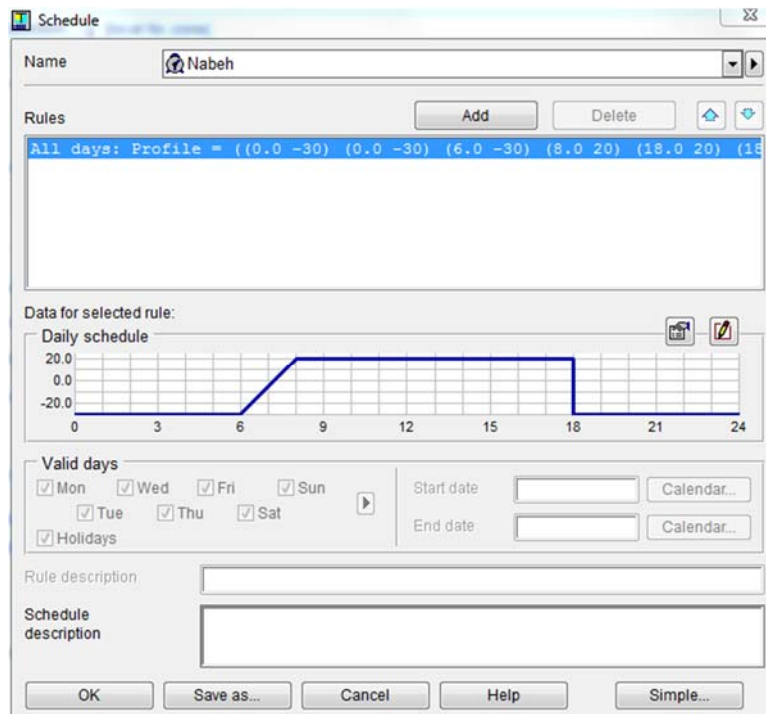
Zkratka	Popis
<b>Z1</b>	zelené sklo, jedna vrstva
<b>Z2</b>	zelené sklo, dvouvrstvé
<b>K1</b>	pokovené sklo, jedna vrstva
<b>K2</b>	pokovené sklo, dvouvrstvé
<b>W1</b>	stěna s běžnou izolací
<b>W2</b>	stěna s dodatečnou izolací
<b>P1</b>	minimální intenzita větrání
<b>P2</b>	střední intenzita větrání

### 8.1 Vytápění

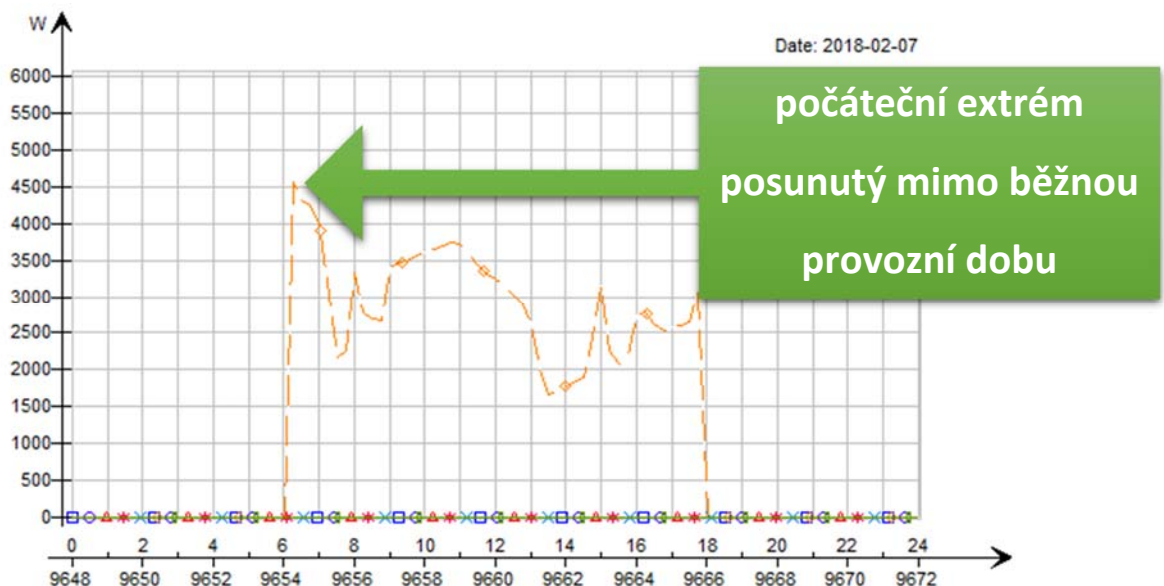
Pro hodnocení a porovnání scénářů v zimním provozu slouží maximální výkon potřebný k vyrovnání tepelné ztráty. Uvažuje se provoz vozidla od 8 do 18 hodin. V původním nastavení modelu začínal ohřev vzduchu také v 8 hodin. Protože však kabina vozidla přes noc vychladne a modelový systém (ideální ohříváč) se snaží dosáhnout co nejrychleji požadované teploty 20 °C, vzniká na začátku provozní doby extrémní požadavek na výkon ohříváče (lze jej chápat jako zátopový výkon). Tento výkon není prakticky ovlivněn izolačními vlastnostmi kabiny, liší se od běžných požadavků na tepelný výkon až o 100 %, a proto se nehodí pro porovnání uvažovaných variant izolace a zasklení.

K odstranění výše popsaného problému byl provoz vytápění nastaven tak, aby plynule nabíhal už od 6 hodin (viz *Obr. 8.1*), čímž se počáteční extrém posunul mimo provozní dobu (8 až 18 hod.), což je patrné z *Obr. 8.2*. Protože však IDA ICE neumožňuje přímo sledovat výsledky simulace jen v určitém časovém intervalu v rámci každého dne, bylo

nutné nasimulovaná data převést do Excelu a zde odfiltrovat hodiny před a po provozní době. V takto upravených výsledcích byl pak nalezen maximální požadovaný výkon vytápění, který lépe odpovídá běžným provozním podmínkám.



Obr. 8.1 – Časový profil náběhu regulace pro vytápění od 6:00 hod.



Obr. 8.2 – Průběh výkonu pro vytápění s modifikovaným časovým profilem

Tab. 8.2 – Výsledky zimního provozu

<b>Zimní provoz, vozidlo v pohybu</b>	
<b>Scénář</b>	<b>Potřebný výkon [W]</b>
<b>Z2W2P1</b>	4540
<b>Z2W1P1</b>	4633
<b>Z2W2P2</b>	4864
<b>Z2W1P2</b>	5001
<b>K2W2P1</b>	5473
<b>K2W1P1</b>	5543
<b>Z1W2P1</b>	5573
<b>K2W2P2</b>	5620
<b>Z1W1P1</b>	5703
<b>K2W1P2</b>	5732
<b>Z1W2P2</b>	5787
<b>Z1W1P2</b>	5836
<b>K1W2P1</b>	5935
<b>K1W1P1</b>	5997
<b>K1W2P2</b>	6237
<b>K1W1P2</b>	6382

V zimním období je z výsledků v Tab. 8.2 patrné, že zvýšení tloušťky izolace v karoserii (W1 vs. W2) nemá příliš vliv, snížení potřeby topného výkonu je v jednotkách procent. Oproti tomu izolační dvojsklo (K2 a Z2) téměř ve všech případech (kromě Z1 vs. K2) tepelné ztráty významně snižuje, a to o 8 až 20 %. Nižší úsporu vykazují případy s reflexním zasklením. Oproti tomu pohltivé (Z1 a Z2) sklo má v zimním období většinou lepší výsledky z hlediska snížení tepelné ztráty. Na vytápění má negativní vliv intenzita větrání v kabině (P1 a P2), která zvyšuje potřebný tepelný výkon.

## 8.2 Chlazení

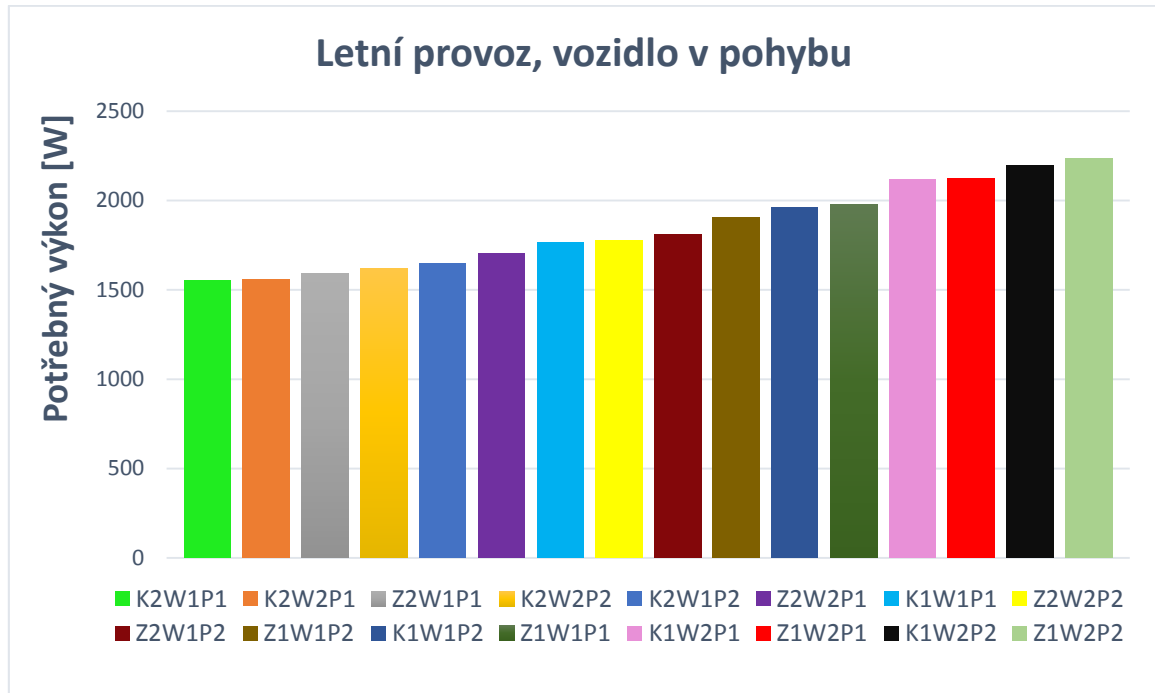
U chlazení nenastává počáteční extrém jako u vytápění. Maximální požadavek na chladicí výkon nastává během dne, nejčastěji odpoledne, kdy je systém chlazení již v běžném provozu. Proto není třeba řešit problém počátečního extrému jako u vytápění. V Tab. 8.3 je celkové srovnání výsledků z hlediska požadovaného chladicího výkonu.

Tab. 8.3 – Výsledky letního provozu

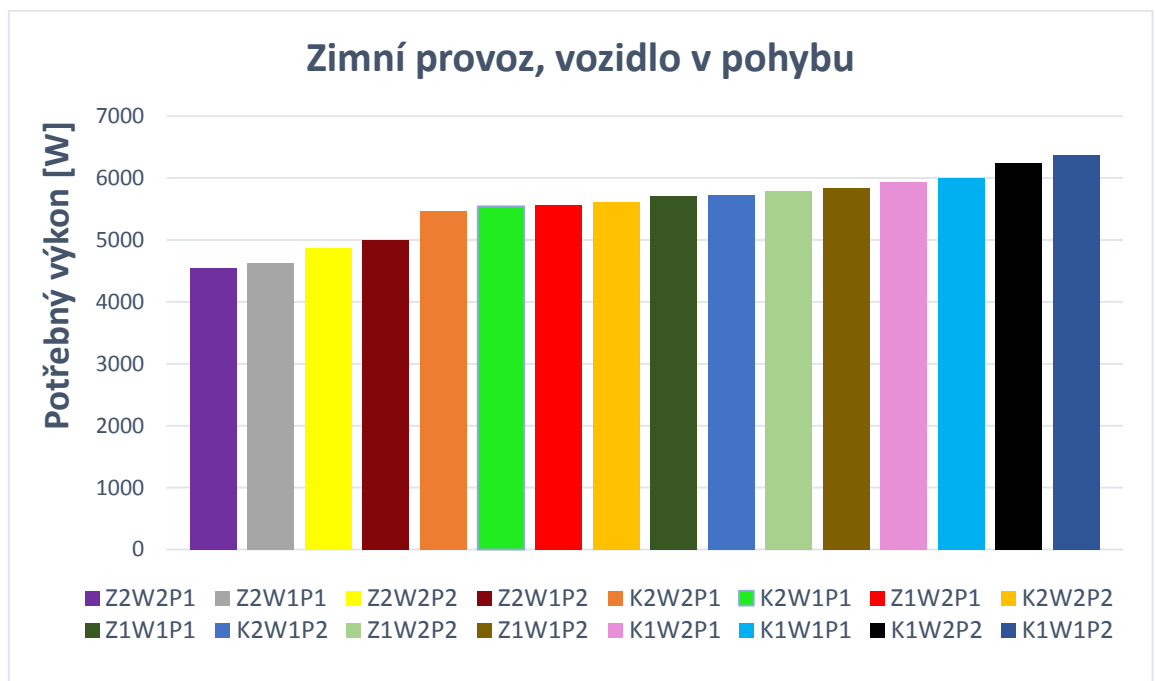
<b>Letní provoz, vozidlo v pohybu</b>	
Scénář	Potřebný výkon [W]
K2W1P1	1555
K2W2P1	1559
Z2W1P1	1590
K2W2P2	1623
K2W1P2	1647
Z2W2P1	1704
K1W1P1	1765
Z2W2P2	1777
Z2W1P2	1811
Z1W1P2	1904
K1W1P2	1960
Z1W1P1	1981
K1W2P1	2119
Z1W2P1	2124
K1W2P2	2196
Z1W2P2	2238

Z hlediska požadovaného chladicího výkonu v letním období lze říci, že je reflexní sklo (K1 a K2) vhodnější než pohltivé (Z1 a Z2). Z výsledků plyne, že zvýšený průtok čerstvého vzduchu (P2 vs. P1) zvyšuje tepelnou zátěž, což platí kromě případu Z1W1, kdy má pravděpodobně teplota vzduchu v kabině tendenci růst tak, že vyšší průtok vzduchu zvýší odvod tepla, požadovaný chladicí výkon se tedy sníží. Při porovnání výsledků s různou tepelnou izolací (W1 a W2) je vidět, že zesílení izolace nemá příliš velký význam. Oproti tomu velký význam má izolační dvojsklo v případech s vyšší odrazivostí (K2) i s vyšší pohltivostí (Z2). Při porovnání s běžným zasklením (Z1, K1) dochází u izolačního dvojskla ke snížení tepelné zátěže o 7 až 20 %.

Jednotlivé scénáře pro letní a zimní období lze porovnat na *Obr. 8.4* a *Obr. 8.5*. Každý scénář má v grafech stejnou barvu pro letní i zimní provoz. Z porovnání grafů vychází, že při uvážení zimního i letního provozu je v našich zeměpisných podmínkách nejvhodnější zvolit dvouvrstvé zelené zasklení se standardní tloušťkou izolace (Z2W1P1).



Obr. 8.5 – Požadovaný chladicí výkon při jednotlivých scénářích



Obr. 8.4 – Požadovaný topný výkon při jednotlivých scénářích

## 9 Závěr

Cílem práce bylo ukázat možnosti snížení energetické potřeby na vytápění a chlazení kabiny elektromobilu úpravami tepelných vlastností karoserie. Motivací pro studie tohoto typu je zvýšit dojezd elektromobilu.

Z literatury a dalších zdrojů byly shrnuty informace o rozdílech v koncepci karoserie elektromobilu a automobilu se spalovacím motorem a o možných přístupech k řešení vytápění a chlazení v elektromobilu. Byly popsány čtyři simulační softwary, které by šly využít při analýze výhod a nevýhod různých tepelných úprav karoserie vozidla.

Pro ukázkou aplikace tepelných simulací kabiny elektromobilu byl vybrán program IDA ICE, původně určený pro simulaci budov. Do tohoto programu byl přenesen z jiného programu zjednodušený geometrický model kabiny vozidla, který byl dále doplněn vlastnostmi stěn kabiny, okrajovými a provozními podmínkami. Na modelu byly zkoumány požadavky na výkon vytápění nebo chlazení vzduchu v kabině při celodenním provozu vozidla – jízdě rychlostí 90 km/h.

Výsledky naznačují, že největší význam by mohlo mít použití izolačních dvojskel místo běžně používaného zasklení automobilu. V některých případech došlo ke snížení maximálního požadovaného výkonu na vytápění nebo chlazení až o 20 %. Práce ovšem nebrala v úvahu praktické problémy, které tato myšlenka může přinést (např. vysokou cenu, obtížnost konstrukčního řešení, náročnou technologii výroby apod.).

Cílem práce nebylo pojmout danou problematiku v celé její šíři a hloubce. Nebyla zkoumána řada provozních stavů, jako je např. jízda ve městě, použití vozidla po delším stání v otevřeném prostoru aj. Přesto se i se zjednodušeným modelem podařilo naznačit možnosti zlepšení. Je zřejmé, že existuje potenciál pro snížení energetických nároků kabiny vozidla, kterého lze pravděpodobně dosáhnout různými způsoby.

Práce rovněž ukázala, jaké nedostatky mají dostupné simulační softwary. Pro další pokračování výzkumu v této oblasti bude především nutné zdokonalit nástroje počítačové simulace, buď rozšiřováním jednoho z dostupných programů (nejspíše GT Suite) nebo užitím kosimulace ve dvou simulačních programech. V oblasti modelování je třeba přesněji vystihnout chování skutečných systémů pro vytápění a chlazení. To

umožní analyzovat i dynamické stavy při náběhu zařízení po startu vozidla. Další zpřesnění modelu by přineslo uvažování průběžné změny orientace vozidla vůči světovým stranám během jízdy. Možnosti lokálního ohřevu a chlazení je možné analyzovat jen s užitím podrobného tepelného modelu lidského těla (např. Fialův model), který je nutno zařadit do příslušného simulačního nástroje.

## 10 Použitá literatura

- [1] WONG, J. *Theory of ground vehicles*. 4. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-17038-0.
- [2] MAY, A. *Traffic flow fundamentals*. 3. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1990. ISBN 0139260722.
- [3] MEHUL, P. Heat Model. In: *Hitechcae* [online]. Santa Clara: Hi-Tech House, 2013 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.hitechcae.com/blog/automotive-underhood-thermal-management/>
- [4] BMW i3. In: [Http://www.telegraph.co.uk](http://www.telegraph.co.uk) [online]. London: The Daily Telegraph, 2017 [cit. 2017-09-09]. Dostupné z: <http://www.telegraph.co.uk/motoring/car-manufacturers/bmw/10015336/BMW-i3-electric-car-the-inside-story.html>
- [5] Tesla S. In: *Hybridcars.com* [online]. Toronto: VerticalScope Inc., 2017 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.hybridcars.com/does-the-model-s-need-better-fire-protection/>
- [6] PAULKE, S. a R. HASS. Thermal simulation of a complete vehicle using manikin models. *Theseus-fe* [online]. 2017, **2017**(1), 1-31 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: [http://www.theseus-fe.com/th\\_s\\_content/publications/slides/20141118\\_slides\\_simvec\\_thermal-simulation-of-a-complete-vehicle-using-manikin-models\\_en.pdf](http://www.theseus-fe.com/th_s_content/publications/slides/20141118_slides_simvec_thermal-simulation-of-a-complete-vehicle-using-manikin-models_en.pdf)
- [7] KUMAR, R. a B. YAO. Model based power-split and control for electric energy system in hybrid electric vehicles. *American Society of Mechanical Engineers*. 2006, **2006**(6), 335-341.
- [8] Tesla 3 Heat. In: [Http://teslaferrals.eu/](http://teslaferrals.eu/) [online]. Holandsko: teslaferrals, 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://teslaferrals.eu/>
- [9] Mathematical model of Electric Vehicle Power Consumption for Traveling and Air Conditioning. *American Society of Engineers*. 2015, **6**(1), 1-29.



- [10] WU, X., D. FREESE a WA. KITCHA. Electric vehicles's energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015, **2015**(3), 40-68.
- [11] YANG, S. Electric vehicle's energy consumption of car following models. *Nonlinear Dynamics*. 2013, **2013**(607), 323-339.
- [12] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [13] Oceli ve vozidle. In: *Mmspektrum* [online]. Praha: MMspektrum, 2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: [mmspektrum.com](http://mmspektrum.com)
- [14] ŘEHULKA, Z. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2015. ISBN 978-80-7204-919-6.
- [15] KROISOVÁ, D. *Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [16] BMW E92 - plast. In: *E90post* [online]. USA: Jelsoft Enterprises, 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.e90post.com/>
- [17] FREMUNT, P. a T. PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. 4. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [18] MB Heat doublepane. *Benzworld.org* [online]. USA: benzworld, 2014 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: [www.benzworld.org](http://www.benzworld.org)
- [19] *Mathematical model of Electric Vehicle Power Consumption for Traveling and Air Conditioning* [online]. b.r. [cit. 2018-03-28].
- [20] Improvement of thermal characteristic of vehicle cabin roof for energy saving purpose. *Applied Mechanics and Materials* [online]. Curych, Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014, **2013**(1), 1-11 [cit. 2018-04-30]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.831.3989&rep=rep1&type=pdf>

- [21] FRANCO, F., K.A. CUNEFARE a M. RUZZENE. Structural-Acoustic Optimization of Sandwich Panels. *Journal of Vibration and Acoustics* [online]. 2007, **129**(3), 330- [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1115/1.2731410. ISSN 07393717. Dostupné z: <http://VibrationAcoustics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1470949>
- [22] Tesla 3 aluminium body. In: *Wrightsmedia* [online]. LA, USA: wrightsmedia.com, 2017 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [https://www.greencarreports.com/news/1096220\\_tesla-model-s-aluminum-body-why-repair-costs-are-higher](https://www.greencarreports.com/news/1096220_tesla-model-s-aluminum-body-why-repair-costs-are-higher)
- [23] KIM, J., N. KIM a S. HAN. Optimal stiffness design of composite laminates for a train carbody by an expert system and enumeration method. *Composite Structures* [online]. 2005, **68**(2), 147-156 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.03.009. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822304000650>
- [24] A.P. MOURITZ AND A.G. GIBSON., . *Fire properties of polymer composite materials*. 3. Dordrecht: Springer, 2006. ISBN 9781402053566.
- [25] SUKHANOV, J. a A. VALERIEVICH. Advanced materials of automobile bodies in volume production. *European Transport*. Volgograd State Technical University, 2014, **2014**(6), 1-27. ISSN ISSN 1825-3997.
- [26] HENDERSON, J.B., J.A. WIEBELT a M.R. TANT. A Model for the Thermal Response of Polymer Composite Materials with Experimental Verification. *Journal of Composite Materials* [online]. 2016, **19**(6), 579-595 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1177/002199838501900608. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199838501900608>
- [27] Audi B8 rear window. In: *Audizine* [online]. NY, USA: 2001-2018 Audizine, Audizine.com, and Driverzines.com, 2015 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.audizine.com/forum/showthread.php/304359-Official-B8-Tinting-Thread/page3>
- [28] *Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars* [online]. b.r., , 2-42 [cit. 2018-03-28].

- [29] BAO, Yue a Xiaoyu ZHAO. The research applications of new heat insulation composite material in automobiles. *Heat Transfer-Asian Research* [online]. 2018, **47**(1), 103-110 [cit. 2018-07-03]. DOI: 10.1002/htj.21293. ISSN 10992871. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/htj.21293>
- [30] J., JIRÁK. *Saint - Gobain Sekurit ČR spol. s.r.o.* Hořovice, 2018. Produktový list pro zasklení. MENTZEL R. V3.2.0.0.
- [31] POLÁČEK, F. *Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu.* Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně.