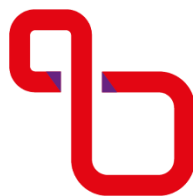




Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania
pomp ciepła w systemach ogrzewania
i chłodzenia samochodów.

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Jan Grygierzec

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem naukowym:

prof. dr hab. inż. Sebastiana Werle

Promotor pomocniczy dr inż. Tomasz Bury

Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Gliwice, 2022

Deklaracja

Niemniejszym chciałbym podziękować firmie Boryszew oddział Maflow za możliwość napisania niniejszej pracy, za udostępnienie mi wszelkich potrzebnych dokumentów oraz za całkowitą przychylność z ich strony.

Dziękuję także osobom, które w mniejszym lub większym stopniu przyczyniły się do ułatwienia opracowania pracy doktorskiej.

Abstract

The PhD thesis presents a technical and economic evaluation of heat pump applications in car heating and cooling systems. In the dissertation, the author developed a methodology for testing heating and cooling systems and their individual components, ensuring that reliable data is obtained under actual or near-actual operating conditions, while limiting the number and duration of individual tests. The concept of a test stand for carrying out these measurements is described. The current state of technology for heating and cooling systems in battery-powered cars is presented. An overview of car propulsion systems with detailed characteristics of combustion cars and with different levels of electrification is presented. The review indicates the multifunctionality and complexity of heating and cooling systems in battery-powered vehicles. The energy and cost intensity of the systems is indicated due to the additional functions that must be fulfilled by such systems.

Heating and cooling systems are presented, including the characteristics of heat pump solutions. In the paper, the author considered the influence of the use of different refrigerants, including so-called natural refrigerants. The author indicated the material characteristics of the individual components including a division into steel, elastomers and aluminium. Standard tests that are performed at the design stage of heating and cooling systems are described. Deficiencies in the adopted methodologies are pointed out, indicating the author's modifications of the applied test procedures. The results of the author's experimental tests using fixed geometry samples are described. Tests concerning, among other things, leakage, permeability and pressure drop are presented. The conclusions described on the basis of the tests served as input guidelines for proposing a conceptual test rig for heating and cooling systems.

The author presented concepts including, among other things, innovative measurement of pressure drop over defined sections under different operating conditions using refrigerant and lubricating oil, the possibility of determining the actual permeability value based on weight measurements of the entire system, the possibility of measuring the actual displacement of components and the possibility of measuring under actual operating conditions. Experimental and theoretical conceptual studies are

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Streszczenie

characterised with their detailed description. An economic analysis for the presented components is also presented. The author presented correlations of technological changes and their impact on reducing the loss of working medium, and limiting the length of flexible elements.

Streszczenie

W pracy doktorskiej została przedstawiona ocena techniczno-ekonomiczna zastosowań pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów. Autor w pracy doktorskiej opracował metodykę badań systemów grzewczo-chłodniczych oraz ich poszczególnych elementów zapewniając uzyskanie wiarygodnych danych o rzeczywistych lub zbliżonych do rzeczywistych warunkach pracy, przy ograniczeniu liczby i czasu trwania pojedynczych testów. Opisana została koncepcja stanowiska badawczego do realizacji wspomnianych pomiarów. Przedstawiony został aktualny stan technologii układów grzewczo-chłodniczych w samochodach z napędem bateryjnym. Przedstawiony został przegląd układów napędowych samochodów z szczegółową charakterystyka samochodów spalinowych oraz z różnym poziomem elektryfikacji.

W przeglądzie wskazano multifunkcyjność oraz złożoność układów grzewczo-chłodniczych w pojazdach z napędem bateryjnym. Wskazana została energochłonność oraz kosztocłonność układów ze względu na dodatkowe funkcje, które muszą być spełnione przez tego typu układy. Przedstawione zostały układy grzewczo-chłodnicze z uwzględnieniem charakterystyk rozwiązań opartych o pompę ciepła. W pracy autor uwzględnił wpływ zastosowania różnych czynników chłodniczych, w tym tzw. naturalnych. Autor wskazał charakterystyki materiałowe poszczególnych elementów z uwzględnieniem podziału na stal, elastomery oraz aluminium. Opisane zostały standardowe badania, jakie są wykonywane na etapie projektowania układów grzewczo-chłodniczych. Wskazano braki w przyjętych metodologiach, wskazując autorskie modyfikacje stosowanych procedur badawczych.

Opisane zostały wyniki autorskich eksperymentalnych badań z wykorzystaniem próbek o ustalonej geometrii. Przedstawiono badania dotyczące m.in. szczelności, przepuszczalności oraz spadku ciśnienia. Opisane na podstawie badań wnioski posłużyły jako wytyczne wejściowe do zaproponowania stanowiska koncepcyjnego do badania układów grzewczo-chłodniczych. Autor przedstawił koncepcje obejmującą między innymi innowacyjny pomiar spadku ciśnienia na definiowanych odcinkach w różnych warunkach pracy z wykorzystaniem czynnika chłodniczego oraz oleju smarnego, z możliwości określenia rzeczywistej wartości przepuszczalności w oparciu o pomiary

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Streszczenie

wagowe całego układu, możliwość pomiaru rzeczywistego przemieszczenia elementów oraz możliwość pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Scharakteryzowane zostały badania koncepcyjne doświadczalne oraz teoretyczne wraz z ich szczegółowym opisem. Przedstawiona została również analiza ekonomiczna dla przedstawionych elementów. Autor przedstawił korelacje zmian technologicznych oraz ich wpływu na ograniczenie ubytku czynnika roboczego, oraz ograniczenie długości elementów elastycznych.

Spis rysunków

Rysunek 1 Spadek zasięgu samochodów elektrycznych w różnych temperaturach [11]	24
Rysunek 2 Przykładowe chłodzenie silnika elektrycznego [16]	25
Rysunek 3 Zalety silników spalinowych	27
Rysunek 4 Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych	27
Rysunek 5 Układ napędowy w mikrohybrydzie	30
Rysunek 6 Układ napędowy w hybrydzie pośredniej	30
Rysunek 7 Układ napędowy w hybrydzie z skrzynią biegów	31
Rysunek 8 Układ napędowy w hybrydzie	31
Rysunek 9 Układ napędowy w hybrydzie z napędem równoległym	32
Rysunek 10 Układ napędowy w hybrydzie seryjnej	32
Rysunek 11 Układ napędowy w hybrydzie z równoległym zasilaniem	33
Rysunek 12 Zestawienie trybów pracy pojazdu z silnikiem elektrycznym	37
Rysunek 13 Zalety układu zwiększającego zasięg pojazdu elektrycznego opartego o silnik spalinowy	40
Rysunek 14 Schemat układu ogrzewania i chłodzenia Nissana Leaf	43
Rysunek 15 Schemat układu grzewczo-chłodniczego w Tesli Model S	44
Rysunek 16 Schemat układu grzewczo-chłodniczego w Mitsubishi i-MiEV	45
Rysunek 17 Wykres stężenia dwutlenku węgla	47
Rysunek 18 Przykładowe profile temperatury dla kabiny pojazdu i otoczenia w USA w ciągu 24 godzin. [29]	48
Rysunek 19 Umowny podział etapów rozwoju czynników chłodniczych	53
Rysunek 20 Wykres temperatura-entalpia	58
Rysunek 21 Budowa wykresu logarytmicznego p-h	58
Rysunek 22 Przebieg procesu w sprężarkowym urządzeniu chłodniczym	60
Rysunek 23 Przykładowy przewód gumowy stosowany do układów grzewczo-chłodniczych	63
Rysunek 24 Charakterystyka kompozytów wzmacnianych włóknami	65
Rysunek 25 Charakterystyka stali kontruskcyjnych	66
Rysunek 26 Charakterystyka parametrów gumy	68
Rysunek 27 Charakterystyka pierwiastków stopowych	73

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Rysunek 28 Zestawienie rodzajów detektorów	82
Rysunek 29 Wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000.....	83
Rysunek 30 Komora do badań korozyjnych	91
Rysunek 31 Charakterystyka warunków podczas prób ciśnieniowych.....	97
Rysunek 32 Impuls ciśnienia podczas testów laboratoryjnych.....	99
Rysunek 33 Wynik symulacji komputerowej przewodu do układów grzewczo- chłodniczych	102
Rysunek 34 Wynik symulacji komputerowej przewodu do układów grzewczo- chłodniczych	102
Rysunek 36 Elektrodynamiczny wzbudnik drgań Unholtz-Dickie	105
Rysunek 37 Podział narażenia wibracyjnego ze względu na umiejscowienie (linia pogrubioną przewody narażane drganiami od kompresora)	106
Rysunek 38 Podział narażenia wibracyjnego ze względu na umiejscowienie (linia pogrubiona przewody narażane drganiami od ramy pojazdu).....	106
Rysunek 39 Zestawienie profili wibracyjnych	107
Rysunek 40 Przyspieszeniometerze wykorzystywane do pomiarów przemieszczenia, wzmocnienia oraz częstotliwości	109
Rysunek 41 Poglądowy opis próbki badawczej.....	113
Rysunek 42 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr I.	114
Rysunek 43 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II.	115
Rysunek 44 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr III.	116
Rysunek 45 Blokowy schemat działania wewnętrznego wymiennika ciepła	118
Rysunek 46 Schemat poglądowy obiegu ciepła	119
Rysunek 47 Wykres p-h dla R1234yf.....	120
Rysunek 48 Schematyczny opis wewnętrznego wymiennika ciepła.....	121
Rysunek 49 Zestawienie elementów wpływających na wynik	122
Rysunek 50 Stanowisko badawcze [76]	123
Rysunek 51 Stanowisko badawcze [77]	124
Rysunek 52. Schemat układu pomiarowego na stanowisku z rysunku 49.	125
Rysunek 53 Koncepcja układu badawczego opartego na systemie Mitsubishi i-MIEV.	126

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Rysunek 54 Etapy walidacji z wykorzystaniem koncepcyjnego stanowiska badawczego	128
Rysunek 55 Zalety stanowiska koncepcyjnego	130
Rysunek 56 Podział koncepcyjnych stanowisk badawczych	132
Rysunek 57 Wykres cen aluminium na przestrzeni lat 2016-2022. [78]	135
Rysunek 58 Wykres cen stali nierdzewnej na przestrzeni lat 2016-2022. [79]	135
Rysunek 59 Giełdowe ceny energii elektrycznej w latach 2000-2021. [81]	136
Rysunek 60. Zestawienie procesów których koszt związany jest bezpośrednio z zużyciem energii elektrycznej.	137

Spis tabel

Tabela 1 Kluczowe etapy w rozwoju samochodów elektrycznych	18
Tabela 2 Zestawienie pojazdów elektrycznych oraz hybrydowych	22
Tabela 3 Spadek zasięgu samochodów elektrycznych w różnych temperaturach	23
Tabela 4 Zalety silników spalinowych	27
Tabela 5 Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych.....	27
Tabela 6 Główne cechy oraz funkcje pojazdów hybrydowych oraz elektrycznych	41
Tabela 7 Charakterystyka pojazdów ze względu na poziom elektryfikacji	33
Tabela 8 Szczegóły poszczególnych trybów pracy silnika elektrycznego.....	37
Tabela 9 Charakterystyka układów podkrytycznych oraz nadkrytycznych.....	56
Tabela 10 Charakterystyka kompozytów wzmacnianych włóknami	65
Tabela 11 Charakterystyka stali konstrukcyjnych	66
Tabela 12 Charakterystyka parametrów gumy.....	67
Tabela 13 Właściwości fizyczne aluminium niestopowego.....	70
Tabela 14 Klasyfikacja stopów aluminium wg składu chemicznego [63]	71
Tabela 15 Charakterystyka pierwiastków stopowych... Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.	
Tabela 16 Tabela przeliczeniowa jednostek nieszczelności.....	75
Tabela 17 Zestawienie rodzajów detektorów.....	82
Tabela 18 Zestawienie metod badania przepuszczalności materiałów.....	84
Tabela 19 Metodologia prób korozyjnych	93
Tabela 20 Charakterystyka warunków podczas prób ciśnieniowych	96
Tabela 21 Zestawienie testów podczas prób ciśnieniowych	97
Tabela 22 Zestawienie typów próbek podczas badań walidacyjnych	101
Tabela 23 Błędy symulacji komputerowych operacji o metody numeryczne Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.	
Tabela 24 Zestawienie połączeń oraz rodzaju narażenia	107
Tabela 25 Zestawienie różnic entalpii dla wewnętrznego wymiennika ciepła na przykładzie układu z czynnikiem R1234yf.....	119
Tabela 26 Zestawienie elementów wpływających na wynik	122

Spis treści

Deklaracja	I
Abstract	II
Streszczenie	IV
Spis rysunków	VI
Spis tabel	IX
Nomenklatura	XII
1 Techniczny przegląd układów grzania oraz chłodzenia w samochodach..	15
1.1 Historia rozwoju samochodów na przestrzeni lat	15
1.2 Przegląd układów napędowych samochodów	26
1.2.1 Samochód spalinowy	26
1.2.2 Mikro hybryda	28
1.2.3 Pośrednia-hybryda	29
1.2.4 Hybryda	33
1.2.5 Plug-In Hybryda	34
1.2.6 Pojazd elektryczny	36
1.3 Przegląd rozwiązań oraz układów grzewczo-chłodniczych w samochodach	
Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.	
1.3.1 Przegląd rozwiązań	Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.
1.3.2 Cele technologiczne	46
2 Układy grzewczo-chłodnicze oparte o pompę ciepła	49
2.1 Wprowadzenie	49
2.2 Czynniki chłodnicze	53
2.3 Przemiany termodynamiczne czynników roboczych	57

3	Badania wybranych elementów układów grzewczo-chłodniczych	62
3.1	Charakterystyka materiałowa elementów składowych.....	62
3.1.1	Stal.....	66
3.1.2	Elastomery.....	67
3.1.3	Aluminium	70
3.2	Badania szczelności	75
3.2.1	Charakterystyka przepuszczalności materiałów	82
3.3	Badania przepuszczalności materiałów	84
3.4	Badanie odporności chemicznej elementów do transportu czynnika roboczego 90	
3.4.1	Odporność korozyjna	90
3.4.2	Metodyka badań korozyjnych.....	93
3.4.3	Kompatybilność z olejami oraz czynnikami roboczymi.....	95
3.5	Badanie układów grzewczo-chłodniczych, symulujące wpływ ciśnienia.....	96
3.5.1	Metodyka badań odporności na ciśnienie	97
3.5.2	Metodyka badań odporności na zmiany ciśnienia.....	98
3.6	Symulacja odporności wibracyjnej przewodów w układach grzewczo- chłodniczych.....	100
3.6.1	Symulacje komputerowe	102
3.6.2	Badania przewodów na wzbudnikach drgań	104
3.7	Weryfikacja wybranych parametrów projektowych	111
3.7.1	Spadek ciśnienia	111
3.7.2	Badanie rurowych wymienników ciepła	118
3.8	Koncepcja stanowiska badawczego.....	121
3.8.1	Potencjał badawczy prototypowego stanowiska.....	129
3.8.2	Zalety rozwiązań koncepcyjnych.....	129
3.9	Metody oceny rozwiązań pomp ciepła	130

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

3.9.1	Sprawność Lorentza oraz współczynnik wydajności.....	130
4	Ekonomia.....	133
5	Wnioski.....	139
6	Bibliografia	141

Skróty

R134a

R1234yf

R744

R12

\dot{m} Masowe natężenie
przepływu $\frac{kg}{s}$

\dot{q}_m Masowe natężenie
przepływu $\frac{kg}{s}$

ρ Gęstość płynu $\frac{kg}{m^3}$

Nomenklatura

V Prędkość przepływu, $\frac{m}{s}$,

\dot{Q}_v Strumień objętości, $\frac{m^3}{s}$,

S Przekrój poprzeczny przewodu wejściowego lub wyjściowego połączonego z badaną częścią, m^2 ,

D Średnica przewodu wylotowej części, m.

ν Współczynnik lepkości kinematycznej płynu

μ Lepkość dynamiczna płynu $\frac{kg}{m \cdot s}$,

ρ Gęstość $\frac{kg}{m^3}$

ΔP Strata wysokości podnoszenia, Pa

S_e Równoważny przekrój poprzeczny, m^2

T Temperatura, $^{\circ}C$

\dot{Q} Strumień ciepła uzyskany ze skraplacza, kW

W moc energii elektrycznej pobranej przez pompę ciepła, kW

\dot{Q}_s Ciepło skraplania, $\frac{J}{kg}$

ΔQ Strata ciepła, J

N Moc elektryczna, kW

COP rzeczywisty współczynnik wydajności grzejej pompy ciepła

Indeksy dolne

g Temperatura górnego
 źródła ciepła

d Temperatura dolnego
 źródła ciepła

iz Strata ciepła na
 przewodach

els Moc elektryczna
 pobierana przez
 sprężarki

wch Moc pobierana przez
 wentylatory w części
 zewnętrznej

1 Techniczny przegląd układów grzania oraz chłodzenia w samochodach

1.1 Historia rozwoju samochodów na przestrzeni lat

Rozwój silników spalinowych jest jednym z największych osiągnięć współczesnej techniki. Samochody wniosły ogromny wkład do rozwoju nowoczesnego społeczeństwa, zwiększając potencjał mobilności w życiu codziennym. Szybki rozwój przemysłu samochodowego w zestawieniu z pozostałymi gałęziami technologicznymi, przyczynił się do wzrostu wysoko rozwiniętego społeczeństwa przemysłowego. Sektor "automotive" oraz branża pośrednie stanowią największą gałąź światowej. Jednakże duża liczba samochodów powoduje poważne problemy dla środowiska i życia ludzkiego. Zanieczyszczenie powietrza, globalne ocieplenie oraz wyczerpywanie się zasobów paliw na Ziemi są problemem o wysokim priorytecie. Ostatnie lata prac badawczo-rozwojowych związanych z szeroko rozumianym transportem kładły nacisk na rozwiązania wysokowydajne, bezemisyjne oraz bezpieczne. Pojazdy hybrydowe, elektryczne oraz w przyszłości autonomiczne rozwiązania mają zastąpić pojazdy konwencjonalne. Obecne pojazdy spalinowe do napędu wymagają spalania paliw kopalnych. Należy podkreślić, że reakcje podczas procesu spalania bez względu, na jakość paliwa na przestrzeni lat zachodziło w ten sam sposób. Spalanie to reakcja pomiędzy paliwem, a powietrzem w wyniku, której wydzielane jest ciepło oraz produkty spalania. Ciepło jest przekształcane w energię, mechaniczną z wykorzystaniem silnika, a produkty spalania trafiają do atmosfery. Podczas pełnego procesu spalania paliw kopalnych powstaje dwutlenek węgla i woda, które nie są szkodliwe dla środowiska; jednakże produktami spalania są również tlenki azotu, tlenki węgla oraz inne szkodliwe substancje. Tlenki azotu (NO_x) powstają w wyniku reakcji pomiędzy azotem zawartym w powietrzu a tlenem. Podczas wysokich temperatur oraz ciśnienia panującego w silniku stwarzają się korzystne warunki do powstawania tlenków azotu. Temperatura jest najważniejszym parametrem w tworzeniu się tlenków azotu. Najczęściej występuje tlenek azotu jednakże pojawiają się również dwutlenki azotu oraz śladowe ilości podtlenku azotu. Tlenek azotu reaguje z tlenem tworząc NO_2 . Jest on następnie rozkładany przez promieniowanie ultrafioletowe Słońca z powrotem do NO i wysoce reaktywnych atomów tlenu, które atakują błony żywych komórek. Dwutlenek azotu jest częściowo odpowiedzialny za smog; jego brązowawy kolor sprawia, że smog jest

widoczny. Reaguje on również z wodą tworząc kwas azotowy (HNO_3), który rozcieńcza się w deszczu. Zjawisko to jest określane, kwaśnymi deszczami" i jest odpowiedzialne za niszczenie lasów w krajach uprzemysłowionych. Tlenek węgla powstały podczas spalania z niedostateczną ilością tlenu jest również określane, jako trucizna ze względu na brak naturalnych mechanizmów pozwalających na samooczyszczenie organizmu.

Osoby odurzone tlenkiem węgla muszą być leczone w komora ciśnieniowych gdzie następuje rozrywanie szkodliwych wiązań [1]. Niektóre z produktów niezupełnego i niecałkowitego spalania mogą być bezpośrednimi truciznami lub rakotwórczymi substancjami chemicznymi. Mogą również być odpowiedzialne za powstawanie smogu; promieniowanie ultrafioletowe oddziałuje z niespalonymi substancjami oraz tlenkami azotu w atmosferze tworząc ozon oraz inne produkty. Ozon jest cząsteczką utworzona przez trzy atomy tlenu. Jest bezbarwny, ale bardzo niebezpieczny i trujący, ponieważ atakuje błony komórkowe żywych komórek, powodując ich przedwczesne starzenie się lub śmierć. Osoby starsze i astmatycy bardzo cierpią z powodu narażenia na wysokie stężenie ozonu. Co roku odnotowuje się zgony spowodowane wysokim stężeniem ozonu w zanieczyszczonych miastach [2]. Dodatkowe substancje w paliwach powodują również emisję większej ilości produktów podczas spalania. Głównym zanieczyszczeniem jest siarka występująca głównie w oleju napędowych, benzynie oraz gazie ziemnym [1]. W wyniku spalania siarki (lub związków siarki, takich jak siarkowodor) z tlenem uwalnia tlenki siarki (SO_x). Dwutlenek siarki (SO_2) jest głównym produktem tego spalania. W kontakcie z powietrzem tworzy on trójtlenek siarki, który następnie reaguje z wodą, tworząc kwas siarkowy, główny składnik kwaśnych deszczy.

Globalne ocieplenie jest wynikiem efektu cieplarnianego wywołanego dwutlenkiem węgla oraz metanem w atmosferze. Gazy te zatrzymują promieniowanie podczerwone odbite od Ziemi, zwiększając w ten sposób temperaturę. Rosnąca temperatura na Ziemi powoduje poważne szkody ekologiczne w ekosystemie oraz wiele katastrof naturalnych [1]. Uważa się, że duże ilości dwutlenku węgla uwalnianego do atmosfery są wynikiem działalności człowieka. Bezpośrednio wpływając na wzrost globalnej temperatury na Ziemi. Należy zauważyć, że dwutlenek węgla jest rzeczywiście trawiony przez rośliny i sekwestrowany przez oceany w postaci węglanów. Jednak naturalne procesy asymilacji są ograniczone oraz nie posiadają możliwości absorpcji całego wyemitowanego dwutlenku węgla, co prowadzi do akumulacji dwutlenku węgla

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

w atmosferze. Kolejnym elementem wpływającym na zwiększone zainteresowanie pracami badawczo-rozwojowymi związanymi z transportem była dostępność paliw kopalnych. Paliwa kopalne wykorzystywane w transporcie to paliwa płynne pochodzące z ropy naftowej. Ropa naftowa, jako paliwo kopalne, powstaje w wyniku rozkładu żywej materii uwieszonej miliony lat temu w stabilnych warstwach glebowych. Zasoby potwierdzone to "ilości, które według informacji geologicznych i inżynierskich z uzasadnioną pewnością mogą być wydobyte w przyszłości ze znanych zbiorników w istniejących warunkach ekonomicznych i operacyjnych [3]. Wydobywana ropa naftowa pochodzi z łatwo dostępnych zasobów znajdujących się blisko powierzchni ziemi w regionach gdzie klimat nie stwarza problemów podczas eksploatacji złóż. Uważa się, że znacznie więcej ropy znajduje się pod skorupą ziemską w takich regionach, jak Syberia czy Arktyka Amerykańska i Kanadyjska. W tych regionach obawy związane z klimatem i ekologią są głównymi przeszkodami w wydobywaniu lub poszukiwaniu ropy naftowej. Oszacowanie całkowitych zasobów Ziemi jest trudnym zadaniem z powodów politycznych oraz technicznych. Trudność w określeniu ilości dostępnej ropy na przestrzeni lat oraz nieodnawialny aspekt tego źródła powoduje zwiększone zainteresowanie rozwiązaniami opartymi o źródła odnawialne. Problemów związanych z spalaniem paliw kopalnych jest jednak więcej w szczególności z zanieczyszczeniem środowiska, globalnym ociepleniem oraz przewidywalnym wyczerpaniem zasobów. Koszty spowodowane zanieczyszczeniem środowiska obejmują wydatki zdrowotne. Jednakże ze względu na dostępność ropy naftowej, równoległe z analizami szkodliwości były prowadzone prace nad wykorzystaniem na szeroką skalę tego źródła energii. Rozwinięcie prac nad pojazdami napędzanymi silnikami spalinowymi równocześnie wpłynęło na rozwój silników elektrycznych. Jednym z pierwszych pojazdów elektrycznych był ten zbudowany przez Francuza Gustave Trouve w 1881 roku. Był to trójkołowiec napędzany silnikiem prądu stałego o mocy 0,1 KM zasilany z akumulatorów kwasowo-olowiowych. Cały pojazd wraz z kierowcą ważył około 160 kg. Realizacja tego typu nie wzbudzała większego zainteresowania opinii publicznej, ponieważ technologia nie była na tyle rozwinięta, aby konkurować z powozami konnymi. Wyścig z Paryża do Rouen w 1864 roku na dystansie 1135 km z średnią prędkością ok. 23 km/h wpłynęło na zwiększenie zainteresowania pojazdami innymi niż zaprzęgi konne. Pojawienie się pojazdów elektrycznych rozpoczęło rywalizację z uwagi na rodzaj napędu i związane

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

z tym ograniczenia. Podczas pierwszych prób rywalizacji ograniczenie zasięgu pojazdów elektrycznych nie stanowiło problemu ze względu na ograniczenia związane z drogami utwardzonymi, które ograniczały obszar, po którym mogły poruszać się pojazdy. Szybko rosnąca w Europie liczba dróg utwardzonych wymagała zwiększonego zasięgu, co faworyzowało pojazdy benzynowe [4]. Ważnym etapem w rozwoju pojazdów elektrycznych było wynalezienie oraz rozwój systemów hamowania regeneracyjnego, którego dokonał Francuz M.A Darracq końcem XIX wieku. Metoda ta umożliwiła odzyskiwanie energii kinetycznej pojazdu podczas hamowania i ładowanie akumulatorów, co znacznie zwiększało zasięg samochodu elektrycznego. La Jamais Contenete zbudowany przez Francuza Camillie'a Jenatzy'ego był pierwszym pojazdem elektrycznym osiągającym prędkość 100km/h; takiego rodzaju rekordy zwiększały zainteresowanie opinii publicznej tego typu technologią. W 1945 roku trzech naukowcy z Bell Laboratories wynaleźli tranzystor, który zastąpił lampy próżniowe w elektronice sygnałowej, pozwalając na wynalezienie tyrystora, który umożliwił przełączenie dużych prądów przy dużych napięciach. Wynalazki te rozwinęły możliwości regulacji mocy dostarczanej do silnika elektrycznego bez stosowania bardzo niewydajnych reostatów, które umożliwiły pracę silników prądu przemiennego o zmiennej częstotliwości. W 1966 roku firma General Motors skonstruowała samochód elektryczny, który napędzany silnikiem indukcyjnym zasilanym przez falowniki był budowany z tyrystorów. Pojazdem elektrycznym, który został doceniony za prostotę budowy był Lunar Roving Vehicle, z którego korzystali astronaucie programu Apollo. Niestety nawet wysoki budżet programu Apollo oraz warunki pracy pojazdu (o obniżonej grawitacji) nie pozwoliły inżynierom osiągnąć zasięgu większego od 65 km. W tabeli 1 przedstawiono kluczowe etapy w rozwoju samochodów elektrycznych na przestrzeni lat.

Tabela 1 Kluczowe etapy w rozwoju samochodów elektrycznych

Etap wstępny-	Pierwszy Etap	Drugi Etap	Trzeci Etap	Czwarty Etap
---------------	---------------	------------	-------------	--------------

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

1801 - 1850	1851-1899	1901 - 1950	1951-2000	2001-2022
Pierwsze pojazdy elektryczne pojawiły się w Szkocji oraz Stanach Zjednoczonych 1832-39- Robert Anderson szkocki inżynier zaprojektował pierwszy elektryczny pojazd 1834 – Thomas Davenport z Stanów Zjednoczonych wynalazł pierwszy silnik elektryczny prądu stałego	Pojazdy elektryczne dostępne w sieci sprzedaży 1888 – Niemiecki inżynier Andreas Flocken buduje pierwszy czterokołowy pojazd elektryczny 1897- Pierwszy komercyjny pojazd elektryczny, jako taksówka 1899 – La Jamais Contente buduje pierwszy pojazd elektryczny z prędkością większą niż 100km/h 1900 – 28% rynku w Stanach Zjednoczonych	Zwiększenie produkcji pojazdów elektrycznych oraz ich zastąpienie przez pojazdy spalinowe. 1908 – wprowadzenie pojazdu spalinowego 1909 William Taft prezydent USA kupuje samochód elektryczny 1912 – Charles Kettering wprowadza rozrusznik elektryczny ułatwiający zastosowanie pojazdów spalinowych 1930 Spadek zainteresowania samochodami elektrycznymi ze względu na niski koszt paliwa	Wzrost kosztów paliwa 1966 – Kongres USA wprowadza rekomendacje na pojazdy elektryczne 1976 Francja wprowadza programy wspierające samochody elektryczne 1996 General Motors wprowadza na rynek pojazd elektryczny 1997 Toyota wprowadza rozwiązanie hybrydowe w modelu Prius	Międzynarodowe zainteresowanie pojazdami elektrycznymi 2008 Ceny paliwa osiągają rekordowy poziom 2011 Elektryczny Nissan Leaf wygrywa nagrodę Europejskiego Samochodu Roku 2011 2014 Tesla Model S zdobywa wysoki wynik w europejskich testach zderzeniowych 2022 Jaguar planuje od 2025 roku sprzedawać wyłącznie samochody elektryczne. Ta data to 2030 rok dla Volvo i 2028 dla Lotusa.

Równolegle, w trakcie rozwoju pojazdów spalinowych oraz elektrycznych rozwijała się koncepcja pojazdów hybrydowych. Pierwotnym celem tego typu rozwiązania nie było ograniczenie zużycia paliwa a utrzymanie osiągnięć w różnych warunkach pracy silnika spalinowego. Pierwsze pojazdy hybrydowe zostały prezentowane na Salonie Paryskim w 1899 roku [5]. Były to pojazdy zbudowane przez

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

zakłady Piepera z Liege w Belgii oraz przez firmy Vedovelli i Priestly. Pojazd Piepera był hybryda, z chłodzonym powietrzem silnikiem benzynowym wspomaganym przez silnik elektryczny i akumulatory kwasowo-ołowiowe. Silnik elektryczny pracował wyłącznie w momencie, gdy zapotrzebowanie przekraczało dostępną moc silnika spalinowego. Dodatkową funkcją silnika elektrycznego było uruchamianie silnika spalinowego (rozwiązanie znane, jako rozrusznik elektryczny). Drugi pojazd hybrydowy zaprezentowany na Salonie Paryskim w 1899 roku był pierwszym seryjnym pojazdem hybrydowym. Wywodził się z pojazdu elektrycznego skonstruowanego przez francuska firmę Vedovelli i Priestly [4]. Trójkołowy pojazd posiadał zasilenie niezależnymi silnikami o mocy 3/4 KM oraz zespolonym generatorem o mocy 1,1 kW był zamontowany na przyczepie za pojazdem. Pojazd ten łączył silnik benzynowy o mocy 6 KM z maszyną elektryczną o mocy 14 KM, która mogła albo ładować akumulatory z silnik lub wspomagać podczas wysokiego obciążenia. Wczesne pojazdy hybrydowe budowano w celu wspomaganie słabych silników spalinowych lub aby zwiększać zasięg pojazdów elektrycznych. Wykorzystywano w nich podstawowe technologie elektryczne, które były dostępne. Pomimo dużej kreatywności w projektowaniu, wczesne pojazdy hybrydowe nie konkurowały z ulepszonymi silnikami benzynowymi. Rozwój silników spalinowych podczas wojny oraz zagrożenia związane z akumulatorami kwasowo-ołowiowymi spowodowały ograniczenie zainteresowania na pojazdy hybrydowe.

Etapem, który zrewolucjonizował wykorzystanie akumulatorów był rozwój elektroniki sterującej silnikami elektrycznymi. W połowie lat 60. XX wieku wczesne silniki elektryczne były sterowane za pomocą mechanicznych przełączników oraz rezystorów. Urządzenia te miały ograniczony zakres działania oraz nie pozwalały na szybką oraz efektywną pracę.

Pomimo dwóch kryzysów naftowych w latach 1973 i 1977 oraz rosnącego zainteresowania ekologią żaden pojazd hybrydowy nie trafił na rynek. Naukowcy skupili się na pojazdach elektrycznych, których prototypy pojawiały się w latach 80. Brak zainteresowania technologią, w tym okresie można przypisać nieefektywnym akumulatorom. Kolejne lata pozwoliły na zmniejszenie rozmiarów pojazdów napędzanych konwencjonalnymi silnikami spalinowymi oraz wprowadzone zostały katalizatory oraz wtrysk paliwa. Koncepcja pojazdów hybrydowych zyskała na

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

zainteresowaniu w momencie, kiedy zasięg oraz osiągi pojazdów elektrycznych odbiegały znacząco od pojazdów spalinowych. Firma Ford Motor Company zainicjowała Ford Hybrid Electric Vehicle Challenge, w ramach, którego podjęto próbę opracowania hybrydowego pojazdu. Samochody hybrydowe, które podczas tego konkursu zostały opracowane wzbudziły szerokie zainteresowanie, ze względu na odpowiednio wysokie parametry. Firma Dodge zbudowała Interpid ESX model napędzany turbodoładowanym trzycylindrowym silnikiem wysokoprężnym oraz zestawem akumulatorów. Dwa silniki elektryczne o mocy 100KM znajdowały się w kołach tylnej osi. Rząd Stanów Zjednoczonych zainicjował program Partnership for a New Generation of Vehicle, którego celem był średniej wielkości sedan, który mógłby osiągnąć 80 mil/h. Inicjatywa pozwoliła na powstanie modelu Ford Prodigy oraz GM Precept, które były pojazdami hybrydowymi napędzanymi turbodoładowanymi silnikami wysokoprężnymi połączonymi z manualnymi skrzyniami biegów. W Europie francuski koncern Renault przedstawił model Next mający silnik o pojemności 750 cm³ oraz dwa silniki elektryczne jednakże nie charakteryzował się parametrami, które mogły konkurować z pojazdami konwencjonalnymi. Widoczne efekty prac rozwojowych pojawiły się u japońskich producentów, którzy w 1997 roku wprowadzili na rynek Toyotę Prius sedan oraz Hondę Civic Hybrid, które są dostępne obecnie na rynku posiadając miano pierwszych skomercjalizowanych pojazdów hybrydowych. Ostatnie dziesięciolecie w przemyśle motoryzacyjnym przedstawiały znaczące postępy w technologii hybrydowo-elektrycznej. Uznano, że hybryda stanowi idealny etap przejściowy między tradycyjnymi pojazdami, a elektrycznymi pojazdami przyszłości. Najważniejszą cechą technologii hybrydowej układu napędowego jest spełnianie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin oraz wymagań odbiorców w związku parametrami pracy. Pojazdy hybrydowe mogą odgrywać znaczącą rolę w światowym ruchu kierowanym na ochronę środowiska i kwestii rosnącego braku bezpieczeństwa energetycznego. Ponadto rozwiązania hybrydowe są katalizatorem rozwoju wszystkich komponentów silników elektrycznych, układów energoelektronicznych i akumulatorów [6]. Pojazdy hybrydowe są systemami składającymi się z podzespołów wykorzystywanych w pojazdach elektrycznych oraz tradycyjnych spalinowych. Układ napędowy posiada charakter mieszanego i często występują w nim sprzeczne wymagania. Wymagania dotyczące pełnej użyteczności. Aby sprostać wymaganiom stawianym producentom opracowano

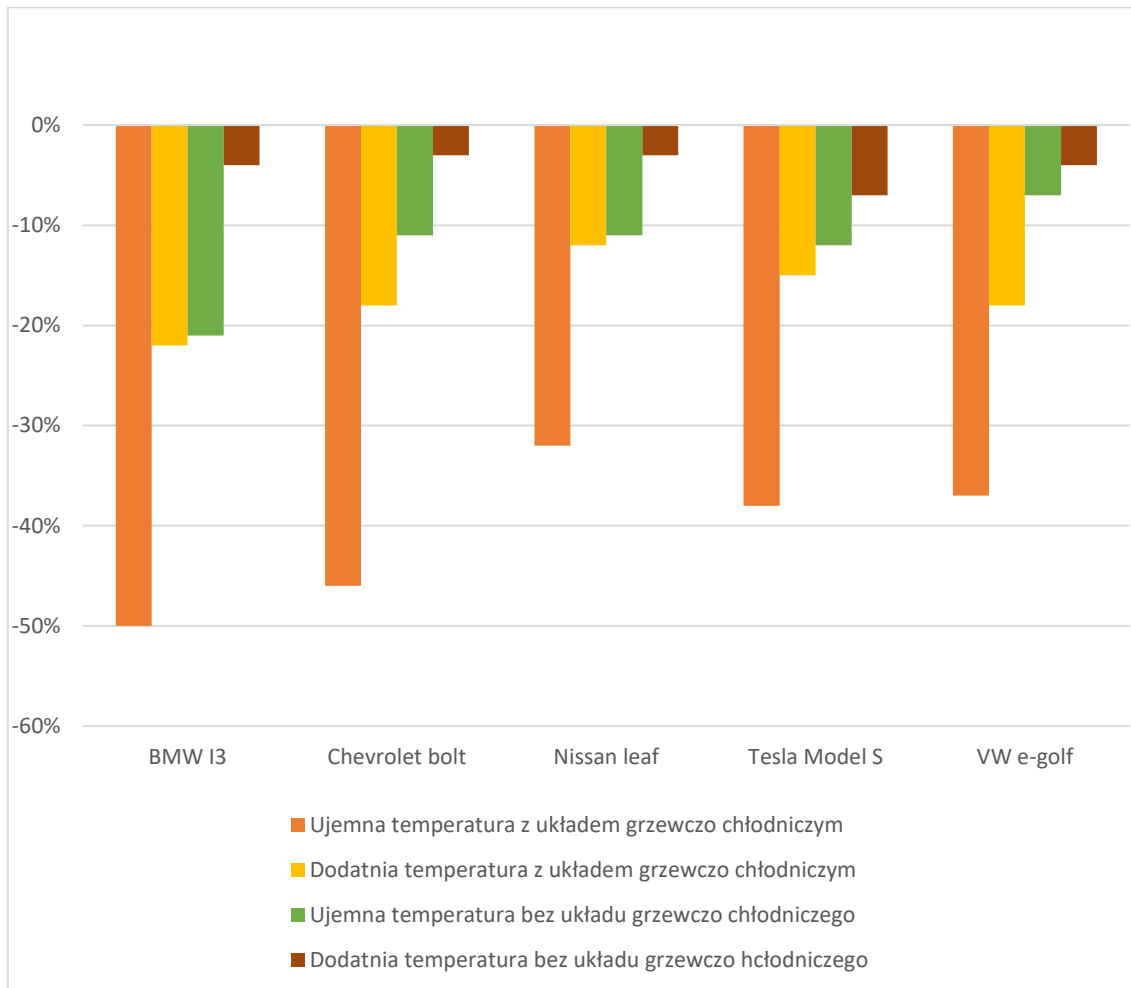
Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

różne koncepcje pojazdów. W zależności od stopnia hybrydyzacji obecne pojazdy można podzielić ze względu na rodzaj według klasyfikacji przedstawionej w tabeli 2.

Tabela 2 Zestawienie pojazdów elektrycznych oraz hybrydowych

Samochód elektryczny, bateryjny/akumulatorowy	<i>Ogólne określenie pojazdu zasilanego, w całości lub częściowo z akumulatora, który może być podłączony do sieci elektrycznej</i>
Hybrydy z możliwością ładowania	<i>Samochody wyposażone w silnik elektryczny oraz silnik spalinowy. Wykorzystanie energii w akumulatorach uruchamia silnik spalinowy.</i>
Pojazd elektryczny o wydłużonym zasięgu	<i>Samochód zasilany akumulatorem z silnikiem spalinowym w formie generatora. Silnik spalinowy ze względu na masę ogranicza wykorzystanie akumulatora i takiej samej pojemności jak w rozwiązaniu elektrycznym</i>
Hybryda	<i>Samochód hybrydowy zasilany energia w akumulatorach oraz silnikiem spalinowym, których wykorzystanie kontrolowane jest przez układ automatyki w zależności od prędkości, wykorzystania mocy, poziomu naładowania. Akumulator posiada możliwość ładowania wyłącznie z silnika spalinowego oraz podczas odzysku podczas hamowania.</i>
Hybryda pośrednia	<i>Układ elektryczny nie posiada możliwości ładowania, jest wykorzystywany, jako dodatkowy zapas mocy wykorzystywany w sytuacjach wysokiego obciążenia.</i>
Mikro hybryda	<i>Samochód wyposażony w układ start-stop</i>
Hybryda „start-stop”	<i>Samochód wyposażony w dodatkowy silnik elektryczny wykorzystywany wyłącznie podczas uruchomienia silnika spalinowego</i>
Samochód na paliwo alternatywne	<i>Grupa samochodów wyposażona w silnik na paliwo inne niż pochodzenia z ropy naftowej</i>

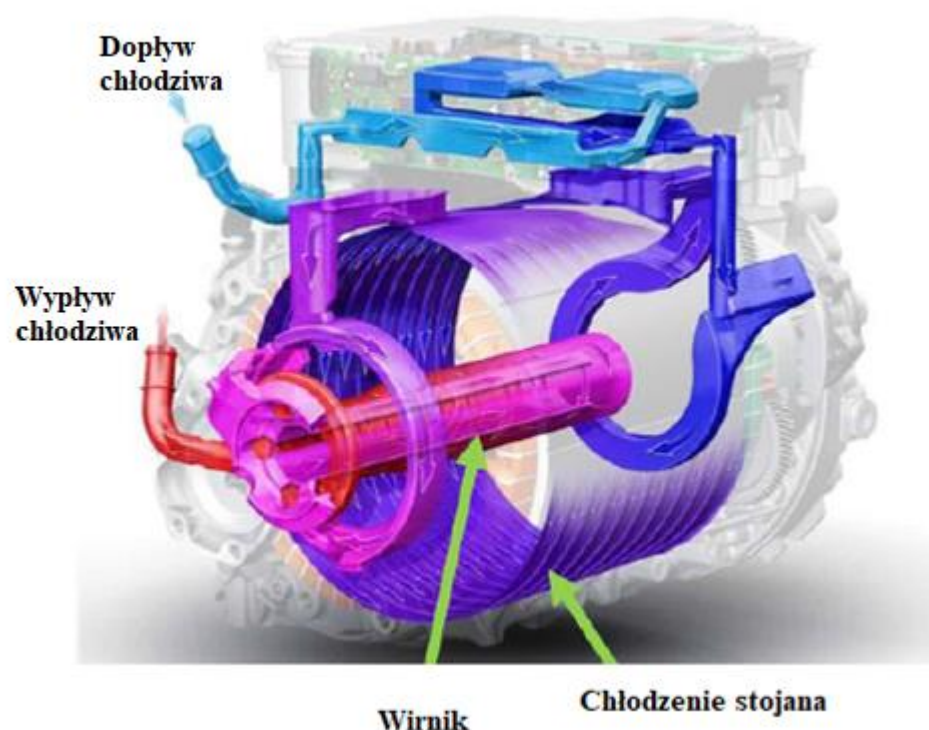
Branża automotive w roku 2022 ogłosiła wielkie plany dotyczące elektryfikacji swej produkcji. Oprócz Tesli i Polestar, które już dziś koncentrują się na pojazdach, elektrycznych, inni producenci tacy jak Volvo, ogłosili, że do 2040 roku będą sprzedawać wyłącznie pojazdy elektryczne [7]. Organizacje rządowe oraz producenci samochodów są również zaangażowani we wprowadzeniu zakazu sprzedaży samochodów napędzanych paliwami kopalnymi na rzecz pojazdów elektrycznych [8]. Elektryfikacja branży samochodowej w Europie został przeanalizowany w raporcie "The role of the European Union's vehicle CO₂ standards in achieving the European Green Deal" scenariusz wskazuje 100% sprzedaży pojazdów elektrycznych w latach 2030, 2035 i 2040 roku [9]. Zakłada się, że zostanie wyprodukowanych ponad 2 miliardy samochodów z silnikami elektrycznymi, a ich efektywność wzrośnie. Scenariusz na rok 2050 obejmuje zmniejszenie emisji CO₂ o 90% w porównaniu z poziomem z 1990 roku. Zwiększenie wydajności samochodu elektrycznego podczas różnych temperatur oraz warunków jazdy to wymaganie, które stawiane jest układom monitorującym warunki temperaturowe pojazdu. Badania przeprowadzone przez American Automobile Association w 2019 r. zbadano wpływ klimatyzacji i różnych warunków otoczenia na zasięg pojazdów elektrycznych [10]. Badania wskazały, że całkowity zasięg w cyklu jazdy z klimatyzacją zmniejszył się o 30-50% w zimnym i 10-20% w gorącym klimacie w porównaniu z warunkami optymalnymi. Różnice w zasięgu pomiędzy modelami pojazdów, obejmują wydajność układu zarządzania temperaturą w zakresie chłodzenia i ogrzewania kabiny pasażerskiej oraz podzespołów [11]. Zespół badawczy gromadzi informacje od producentów w celu oszacowania rzeczywistego zasięgu podczas prób w zimnym klimacie oraz umiarkowanym, wskazując spadek zasięgu wynoszący do 30%. Rysunek 1 przedstawia spadek zasięgu samochodów elektrycznych w różnych temperaturach.



Rysunek 2 Spadek zasięgu samochodów elektrycznych w różnych temperaturach [11]

Należy uwzględnić wszystkie systemy pobierające energię, jako źródło ograniczające zasięg oraz elementy wrażliwe na temperaturę takie jak akumulator, oraz silnik. Akumulator jest szczególnie wrażliwy na temperaturę, w której pracuje. Optymalna temperatura pracy jest w zakresie 15°C -35°C [12]. Zakres ten może być rozszerzony do -45°C, jednakże nie są to warunki zalecane do ładowania oraz rozładowywania akumulatorów [13]. W zimniejszym klimacie akumulator przez zwiększoną rezystancję wewnętrzną rozładowuje się mniej wydajnie oraz traci pojemność [13]. Obniżenie wydajności akumulatora w niskich temperaturach należy uwzględnić podczas projektowania systemów zarządzania temperaturą, w celu zwiększenia pojemności oraz zasięgu, trwałości oraz bezpieczeństwa. W temperaturze powyżej 50°C akumulator może zacząć się rozszerzać i odpowietrzać, co również ma wpływ na jego żywotność [13]. Zakres temperatur, w których silniki elektryczne mogą efektywnie pracować jest większy niż akumulatorów. Temperatura powyżej 100°C nie wpływa na pracę silnika. Jednakże w temperaturze 180°C może nastąpić stopienie

izolacji, przez co wymagany jest stały monitoring temperatury oraz jego chłodzenie [14]. Wzrost temperatury powodowane jest ciepłem spowodowanym przez straty wewnątrz silnika elektrycznego. Obniżenie efektywności odprowadzania ciepła obejmuje straty w miedzi, żelazie oraz mechaniczne [15]. Temperatura wzrasta wraz ze wzrostem momentu obrotowego, którego wykorzystanie zależy od obciążenia, preferencji kierowcy, nachylenia jezdni. Skomplikowanie elementów wpływających na obciążenie wprowadza dodatkowy system monitorująco-chłodzący silnik przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 3 Przykładowe chłodzenie silnika elektrycznego [16]

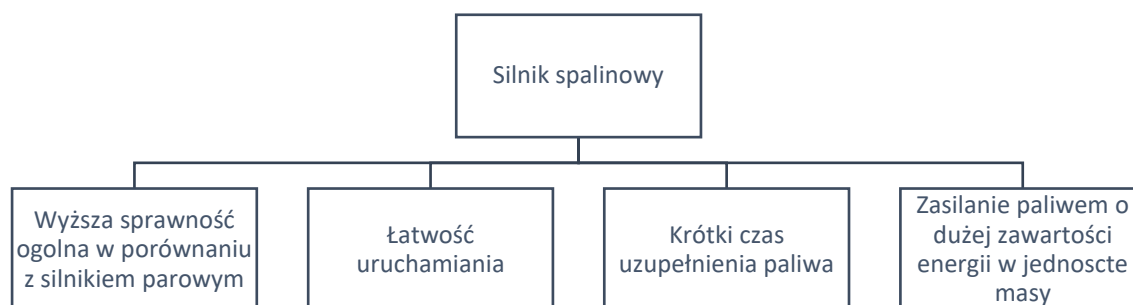
Istnieje wiele metod utrzymywania pracy silnika elektrycznego w zakresie temperatur optymalnych. W przypadku silników elektrycznych o mniejszych obciążeniach (mniejszych prądach), można stosować maszyny otwarte oraz oparte na wymuszony ruchem elementów obieg powietrza. Technologia tego typu jest stosowana w mniejszych silnikach elektrycznych. W samochodach elektrycznych jest jednak niewystarczająca. Chłodzenie cieczą wykorzystywane w silnikach elektrycznych jest skuteczne dzięki wodzie lub olejowi. Chłodzący płaszcz wodny otaczający stojan lub

kanały wodne otaczające stojan lub przechodzące przez niego kanały pokazano na rysunku 2. Chłodziwo wpływa od górnej części przez płytę chłodzącą układy elektrycznie, przez końcówki uzwojeń miedzianych oraz wirnik. Przewodzenie ciepła wewnątrz silnika jest problematyczne ze względu na wykorzystaną miedź, która jest umieszczona wewnątrz stojana gdzie jest odizolowana od żelaza za pomocą wykładziny szczelinowej. Wszystkie te elementy wpływają na skomplikowanie układów monitorujących oraz regulujących warunki temperaturowe w samochodzie.

1.2 Przegląd układów napędowych samochodów

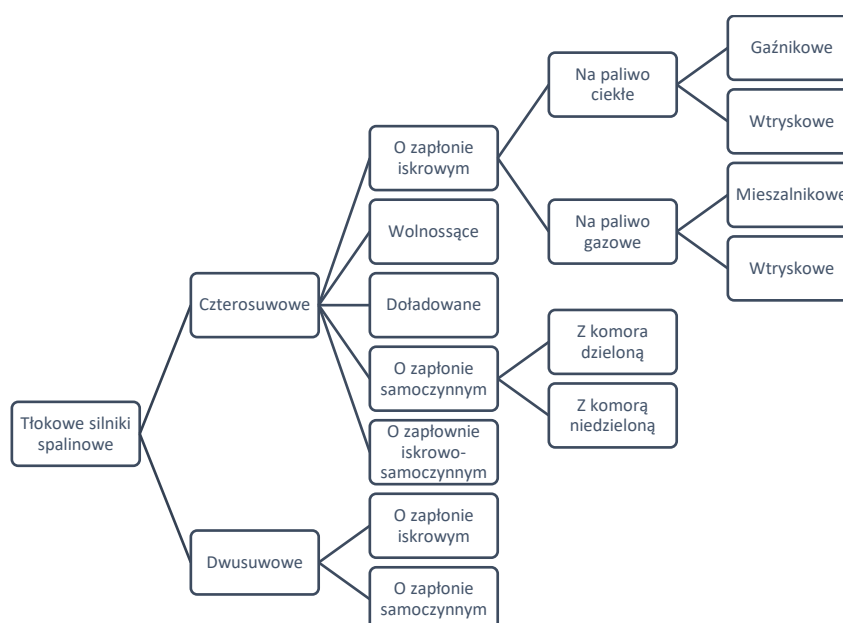
1.2.1 Samochód spalinowy

Szacuje się, że na świecie jest 1,1 miliarda lekkich pojazdów użytkowych zdefiniowanych, jako pojazdy o masie poniżej 3,5t i około 380 milionów pojazdów ciężarowych [17]. Liczba pojazdów rośnie głównie w krajach rozwijających się, a do 2040 r. liczba pojazdów na świecie ma wzrosnąć do 1,7-2 miliardów [18] [19] [20] [21]. Paliwa płynne stały się głównym źródłem energii dla transportu ze względu na łatwość ich transportu oraz magazynowania. W takich samych warunkach temperaturowych, gęstość objętościowa benzyny jest około 3100 razy większa i 800 razy większa w porównaniu z wodorem i gazem ziemnym. Różnice znacząco wpłyną na koszt rozbudowy globalnej infrastruktury do produkcji oraz dystrybucji paliw płynnych. Około 80% samochodów na świecie napędzanych jest silnikami o zapłonie iskrowym, wykorzystującym benzynę [19], natomiast w sektorze przewozów towarowych dominują silniki napędzane olejami napędowymi. Silniki spalinowe przetwarzające energię chemiczną paliwa na pracę mechaniczną są klasyfikowane według wykorzystywanego rodzaju paliwa (benzyna, olej napędowy). Obecnie te dwa typy silników spalinowych stanowią większą część rynku motoryzacyjnego, w których również obecne są silniki wykorzystujące gaz ziemny, etanol oraz wodór. Wszystkie silniki spalinowe opierają się o tłokowy silnik spalinowy. W takim silniku tego rodzaju występuje zamiana energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną. Szerokie wykorzystanie silnika spalinowego na przestrzeni lat związane jest z wieloma zaletami przedstawionymi na rysunku 3.



Rysunek 4 Zalety silników spalinowych

Niekorzystny przebieg charakterystyki momentu obrotowego oraz za duże wartości obrotowe powodujące konieczności stosowania w układach napędowych skrzyń biegów. Uruchamianie silnika spalinowego również jest zależne od rozrusznika zasilanego z akumulatora, a jego praca jałowa wymaga minimalnej prędkości obrotowej. Silniki spalinowe osiągają stabilną pracę, dopiero przy wyższych prędkościach obrotowych, dlatego zastosowane są dodatkowe elementy takie jak sprzęgło, które pozwala na łączenie silnika z układem napędowym samochodu. Klasyfikacje silników zasilanych paliwami kopalnymi przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 5 Klasyfikacja tłokowych silników spalinowych

Obecnie stosowane silniki spalinowe opierają się na najskuteczniejszych rozwiązaniach czterosurowych. Bez względu na klasyfikacje silnika spalinowego, liczbę ruchomych części wymaga regularnych wymian oleju, okresowych przeglądów, (co wpływa na zwiększone koszty układu).

Dodatkowo wymagane są układy:

- układ paliwowy wprowadzający optymalną mieszaninę paliwowo-powietrzną,
- układ zapłonowy, aby uzyskać spalanie w odpowiednim czasie,
- układ chłodzenia,
- układ smarowania,
- układ wydechowy.

Poziom prac badawczo-rozwojowych przedłożonych przez lata w silniki spalinowe jest widoczny w liczbie producentów oraz dostawców podzespołów. Technologia opierająca się o spalanie paliw kopalnych ograniczała pracę nad układami grzewczo-chłodniczymi wyłącznie do zwiększania potencjału chłodniczego gdyż ciepło odpadowe było wykorzystywane do ogrzewania kabiny.

1.2.2 Mikrohybryda

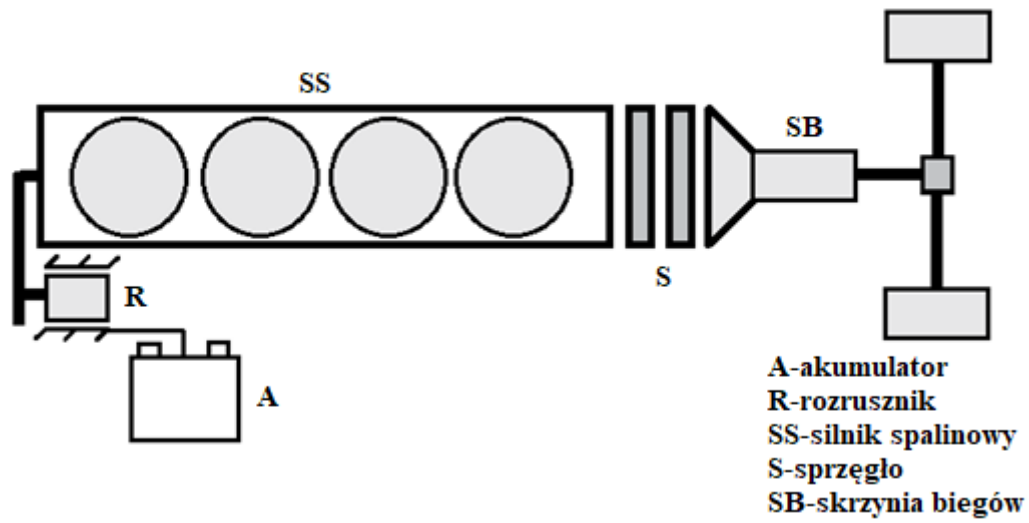
Mikrohybrydowe pojazdy elektryczne są zasadniczo zasilane napięciami od 12V do 48V. Zasilanie na takim poziomie pozwala na osiągnięcie mocy maksymalnie 5kW, dlatego mikro hybrydowe pojazdy elektryczne są wyposażone jedynie w systemy automatycznego zatrzymywania się start-stop. Podczas hamowania i pracy na biegu neutralnym tradycyjny silnik spalinowy zostaje automatycznie zatrzymany bez wpływu na wszystkie funkcjonalności pojazdu. Pojazdy o zwiększonej mocy akumulatora posiadają układ odzyskiwania energii podczas hamowania, co pozwala na wydłużenie pracy układów podczas wyłączenia silnika spalinowego. Większość pojazdów o charakterze mikro hybryd jest rozbudowanym samochodem spalinowym posiadającym zmodyfikowany alternator oraz rozrusznik. Konwencjonalny układ pasków rozrządu jest wzmacniany w celu umożliwienia rozruchu silnika oraz ładowania akumulatora podczas bardziej wymagających cykli rozruchu silnika spalinowego.

Największą zaletą pojazdów mikro hybrydowych jest niski koszt zmian pojazdu tradycyjnego.

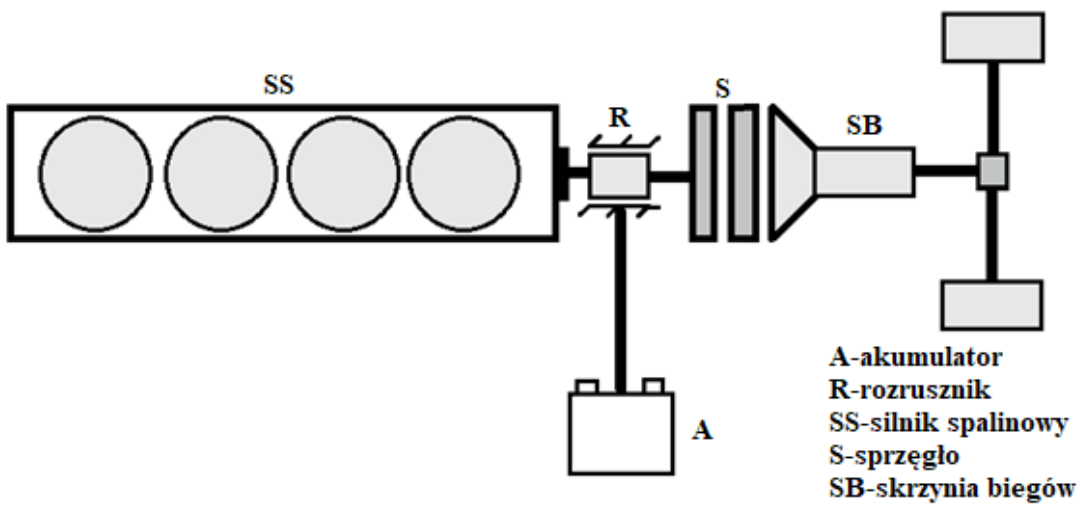
1.2.3 Pośrednia-hybryda

Pośrednia hybryda posiada niezależny elektryczny układ napędowy umożliwiający wytworzenie mocy na poziomie 5 do 20 kW oraz elektryczny układ napędowy działający w zakresach napięcia od 48V do 200V. Samochód posiada elektryczny silnik do wspomagania silnika spalinowego w fazach nagłego przyspieszenia oraz umożliwia odzyskiwanie energii regeneracyjnej w fazie zwalniania. W związku z tym pojazdy tego typu posiadają dużą swobodę w zakresie optymalizacji zużycia paliwa oraz zapewniają uzyskanie zwiększonych osiągnięć. Pośrednie hybrydy są realizowane w zależności od producentów na różnym poziomie "hybrydyzacji". Rozrusznik z generatorem, sprzężony mechanicznie za pośrednictwem paska alternatora w sposób zbliżony do realizowanego rozwiązania w mikrohybrydach. Czasem spotyka się rozwiązanie bardziej skomplikowane.

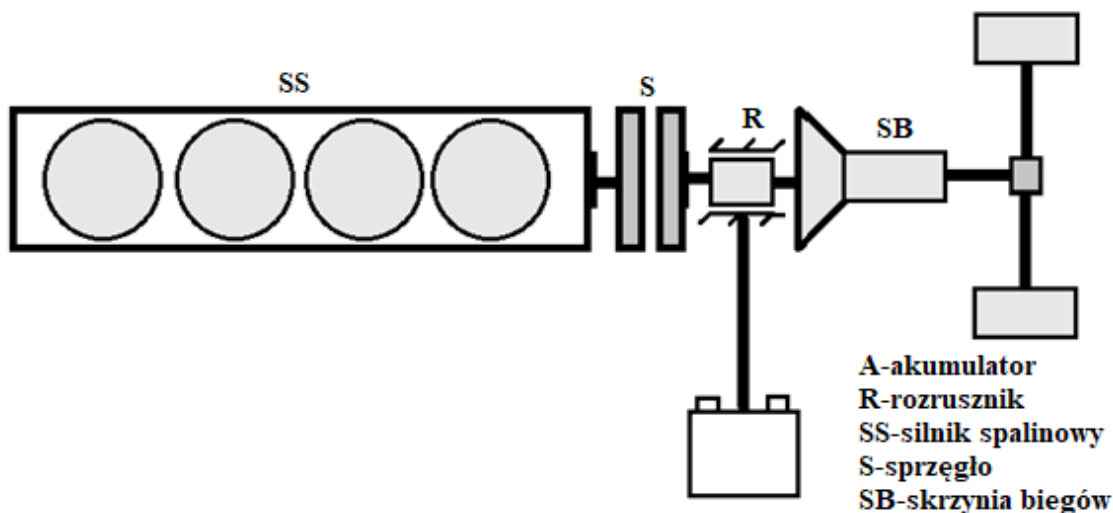
Gdzie rozrusznik pełniący funkcję generatora wewnętrznego jest sprzężony z wałem korbowym. Cechą wyróżniającą pośrednie hybrydy jest brak możliwości wyłączenia elektrycznego trybu napędowego. Oszczędność paliwa jest realizowana podczas wyłączenia silnika podczas zatrzymania samochodu, wykorzystaniu energii elektrycznej do rozruchu pojazdu oraz ograniczeniu punktów pracy silnika spalinowego do minimum. Oszczędność paliwa w pośrednich hybrydach wynosi od 15% do 20%. Na rysunkach 2 do 8 przedstawiono funkcjonalność układów hybrydowych realizowanych z wykorzystaniem różnych typów rozwiązań technicznych.



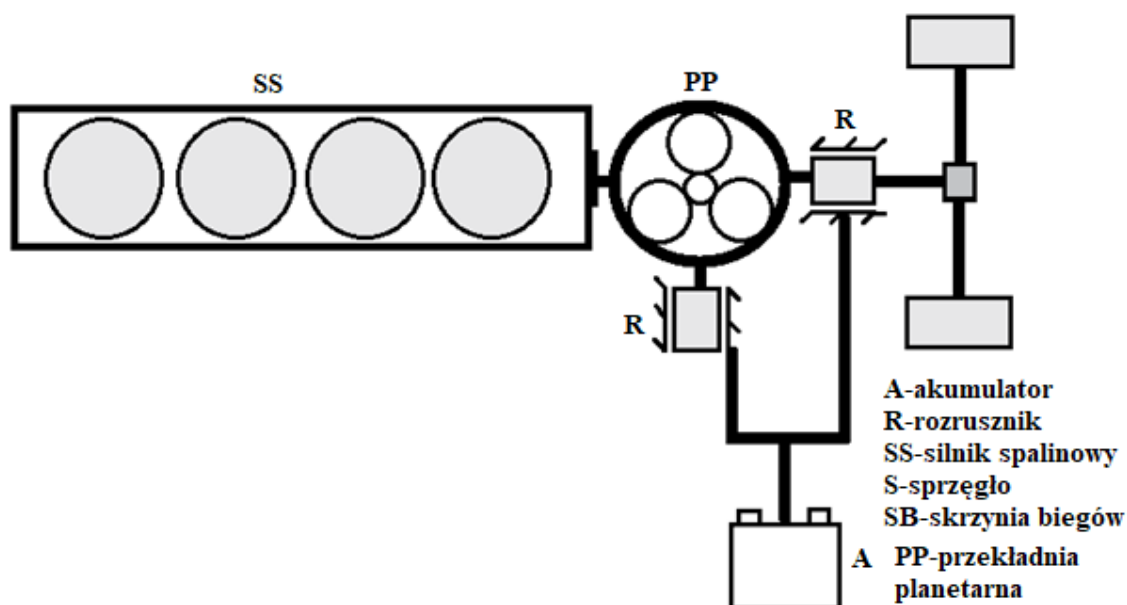
Rysunek 6 Układ napędowy w mikrohybrdzie



Rysunek 7 Układ napędowy w hybrydzie pośredniej



Rysunek 8 Układ napędowy w hybrydzie z skrzynią biegów



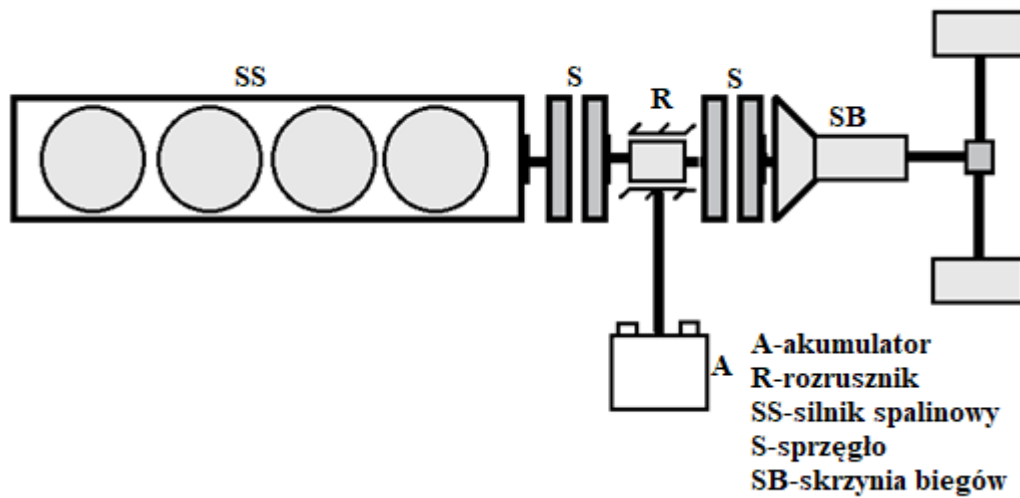
Rysunek 9 Układ napędowy w hybrydzie

Hybrydowe układy napędowe mogą być realizowane za pomocą różnych rozwiązań technologicznych. Mikro hybrydy oraz hybrydy pośrednie, nie mają możliwości zasilania bezpośredniego pojazdu, przez co ich efektywność nie jest określana realnym zasięgiem.

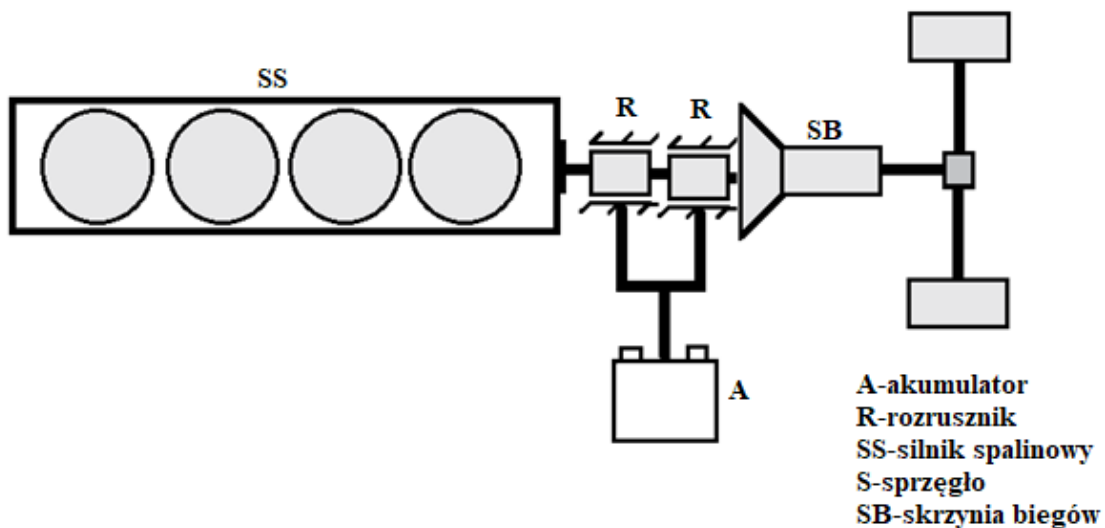
Grupa ta zasilana jest przez rozwiązania równoległe, w których silnik elektryczny jest zwykle rozrusznikiem napędzanym paskiem lub zintegrowanym rozrusznikiem napędzanym pasem klinowym. Alternatywą do rozruszników jest rozwiązanie, w której silnik elektryczny jest zintegrowany z przekładnią. Koncepcja podziału mocy

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

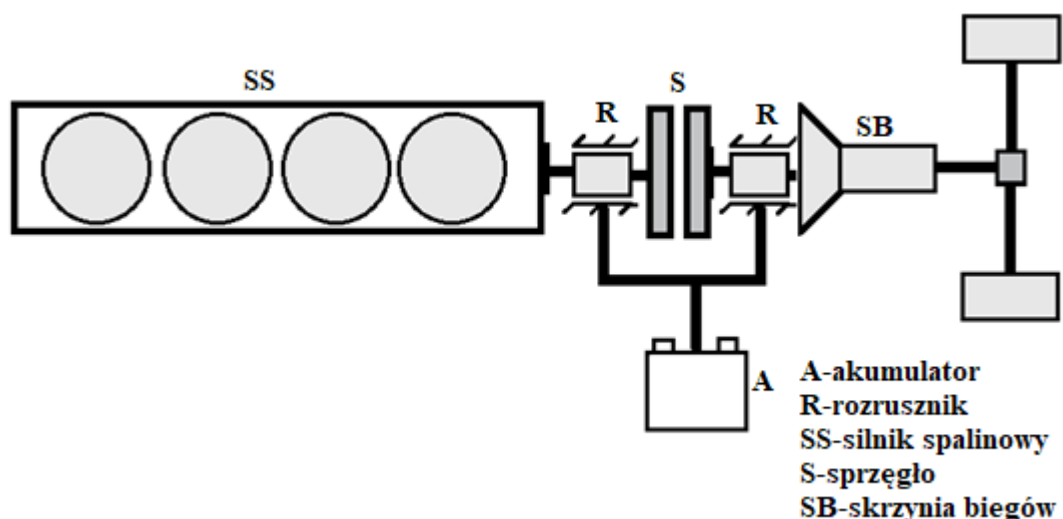
wykorzystuje przekładnię planetarną, która pozwala na rozdzielenie mocy silnika spalinowego na mechaniczną oraz elektryczną, która jest magazynowana w akumulatorze. Hybryda równoległa posiada układ napędowy równoległe umocowany z silnikiem elektrycznym, zwiększając w ten sposób bezpośrednio osiągi. Konfiguracja szeregową obejmuje silnik spalinowy, który służy za pomocą generatora do ładowania akumulatorów (bez połączenia z napędem). Na rysunkach 9 do 11 przedstawiono układy napędowe w konfiguracji szeregowej.



Rysunek 10 Układ napędowy w hybrydzie z napędem równoległym



Rysunek 11 Układ napędowy w hybrydzie seryjnej



Rysunek 12 Układ napędowy w hybrydzie z równoległym zasilaniem

Konfiguracja szeregowo-równoległa jest wyposażona w dwa silniki elektryczne oraz sprzęgło pomiędzy nimi, pozwalające na bezpośrednie przełączanie się pomiędzy trybem szeregowym oraz równoległym.

1.2.4 Hybryda

Samochody hybrydowe są definiowane z uwagi na moc, zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3 Charakterystyka pojazdów ze względu na poziom elektryfikacji

Poziom „hybrydyzacji”	Mikro Hybryda	Hybryda Pośrednia	Hybryda pełna	Hybryda z możliwością ładowania z sieci
Przykładowe modele samochodów	Mercedes Benz A-klasa, Smart, Fiat 500, Citroen C3, BMW 1 / 3 seria, Ford Focus	BMW 7 seria ActiveHybrid, Honda Civic, Mercedes Benz S400 BlueHybrid	Toyota Prius / Camry Hybrid, Honda CR-Z, chevrolet Tahoe Hybrid, Ford C-Max	Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-In, Porsche Panamera S E-Hybrid
Silnik spalinowy	Tradycyjny	Zmniejszona pojemność	Zmniejszona pojemność	Zmniejszona pojemność

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Silnik elektryczny	Dodatkowy układ na pasku rozrządu / Uruchamiany z wykorzystaniem sprzęgła	Dodatkowy układ na pasku rozrządu / Uruchamiany z wykorzystaniem sprzęgła	Uruchamiany z wykorzystaniem sprzęgła	Uruchamiany z wykorzystaniem sprzęgła
Moc elektryczna	2-5kW	10-20kW	15-100kW	70kW+
Napięcie w układzie	12V	60-200V	200V+	200V+
Oszczędność paliwa (benzyny / oleju napędowego)	2-10%	10-20%	20-40%	20% +

W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę pojazdów ze względu na poziom elektryfikacji wskazując różnice w zużyciu paliwa. Pojazdy w pełni hybrydowe posiadają układ napędowy o mocy przekraczającej 40kW i pracujący przy napięciu powyżej 150V. Elektryczny układ napędowy samochodu w pełni hybrydowego jest w stanie napędzić pojazd w krótkich okresach, podczas gdy silnik spalinowy pracuje z niższą sprawnością a układ magazynowania energii może odzyskiwać energię odzyskaną podczas np. hamowania lub zwalniania. Technologia tego typu pozwala również zapewnić poruszanie się wyłącznie na silniku elektrycznym np.: w obszarach gdzie ruch ograniczony jest do poruszania się wyłącznie pojazdami o zerowej emisji, tunelach, w pomieszczeniach zamkniętych. Idealny scenariusz zastosowania w pełni hybrydowych pojazdów elektrycznych obejmuje poruszanie się z zastosowaniem minimum systemu start stop.

1.2.5 Plug-In hybryda

Hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in (posiadające możliwość doładowania akumulatorów z sieci) łączy cechy zarówno w pełni hybrydowych samochodów elektrycznych posiadając dodatkową opcję ładowania akumulatora przez gniazdko

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

prądu zmiennego podłączone do sieci elektrycznej. Elektryczny układ napędowy w tego typu pojazdach ma moc od 80kW - 150 kW, umożliwiając eksploatację samochodu wyłącznie w trybie elektrycznym. Rozwiązanie pozwala na osiągnięcie zasięgu 50-100 km na większości tras (wykluczając warunki górskie). Podobnie jak bateryjne pojazdy elektryczne, pojazdy hybrydowe z możliwością doładowania wykorzystują energię elektryczną z sieci do ładowania akumulatora. Podczas jazdy samochód rozpoczyna swoją pracę wyłącznie w trybie elektrycznym bez wykorzystania silnika spalinowego. Dołączenie silnika spalinowego następuje w momencie osiągnięcia odpowiednio niskiego poziomu naładowania akumulatorów, w takim trybie akumulator zapewnia dodatkowe zasilanie elektryczne oraz magazynuje energię hamowania regeneracyjnego. Rozwiązanie pozwala ograniczyć zużycie paliwa oraz poprawić osiągi dynamiczne, a także zmniejszyć emisję spalin.

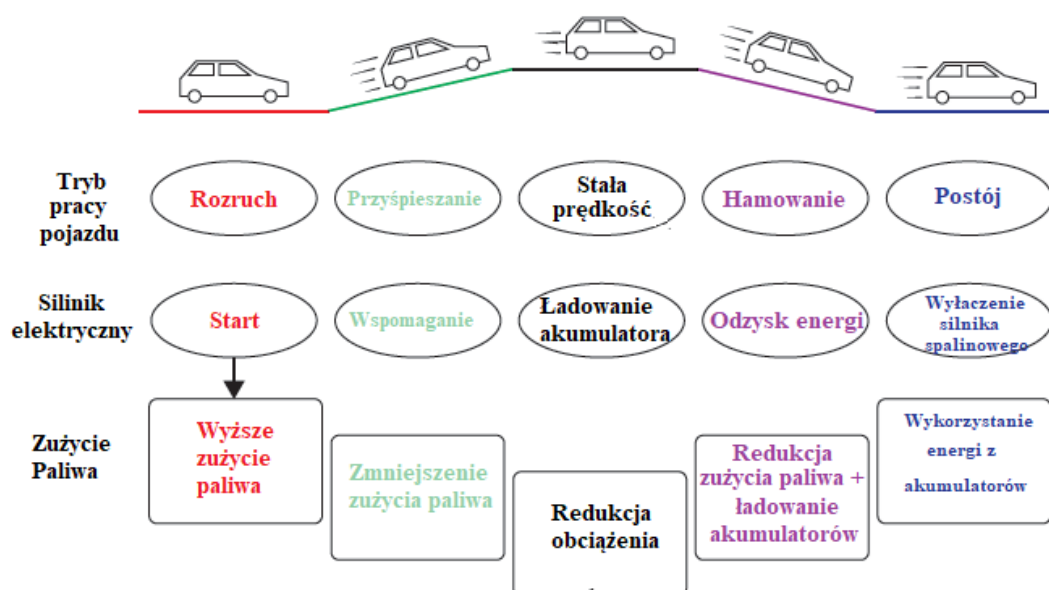
Dodatkowe funkcjonalności pojazdów hybrydowych mogą być realizowane na wiele sposobów. Funkcje te nie wpływają jednak na klasyfikację pojazdu. Dodatkowe zwiększenie mocy przez silnik elektryczny napędzany paskiem lub mocowanym na wale korbowym nie wpływają na klasyfikację ale na ilość dodatkowych funkcji. Samochód elektryczny może posiadać różnego rodzaju silniki (indukcyjny, z magnesami trwałymi), wpływając na różnorodność komponentów. Jednakże możliwość ładowania z sieci bezpośrednio wpływa na klasyfikację pojazdu do grupy plug-in hybryd.

1.2.6 Pojazd elektryczny

Pojazdy w pełni elektryczne są zasilane energią elektryczną a ich budowa nie jest uzupełniana o silnik spalinowy. Obecne pojazdy elektryczne wykorzystują akumulatory litowo-jonowe, jako system magazynowania energii, z możliwością podłączenia dodatkowego ładowania z sieci. Mającej na celu uzupełnienie energii zmagazynowanej w akumulatorze. Pojemność układu magazynowania energii odgrywa kluczową rolę wpływając na zasięg pojazdu elektrycznego. Jednak zwiększenie pojemności magazynowanej energii w akumulatorach przekłada się na ciężar pojazdu oraz jego gabarytów. Dodatkowo wymaga dłuższego czasu na ładowanie akumulatora w trybie domowym (bez wykorzystania stacji szybkiego ładowania). Kluczową rolę w określeniu przystępności rozwiązania samochodu elektrycznego jest ocena zasięgu pojazdu, na którą wpływają poza masą pojazdu, wszystkie systemy wykorzystujące do pracy energię magazynowaną w akumulatorze. Dlatego głównym problemem związanym z pojazdami elektrycznymi zasilanymi z akumulatorów jest ograniczenie zasięgu. Wiązą się z tym wyzwania techniczne, do których należą m.in.:

- zwiększenie pojemności akumulatorów,
- zwiększenie zasięgu pojazdu,
- skrócenie czasu ładowania,
- określenie ilości energii pozostałej w akumulatorze,
- zwiększenie skuteczności urządzeń zainstalowanych w pojeździe z wykorzystaniem mniejszej ilości energii.

W przypadku pojazdów o napędzie spalinowym zwiększone zużycie paliwa podczas rozruchu w warunkach zimowych wynika z energii traconej na nagraniu silnika oraz skrzyni biegów. Na rysunku 12 przedstawiono tryby pracy pojazdu elektrycznego.



Rysunek 13 Zestawienie trybów pracy pojazdu z silnikiem elektryczny.

Wykorzystanie energii podczas hamowania oraz pozostałe funkcje silnika elektrycznego wpływają znacząco na poziom złożoności układów sterujących. Dodatkowe funkcje przewidziane dla układów, jak dodatkowe wspomaganie podczas przyspieszania wymagają odpowiedniego monitorowania temperatur całego układu. Tabela 4 przedstawia szczegóły poszczególnych trybów pracy silnika elektrycznego.

Tabela 4 Szczegóły poszczególnych trybów pracy silnika elektrycznego

Tryb	Szczegóły
Rozruch	Podczas uruchomienia w warunkach normalnych silnik osiąga prędkość 1000 obrotów/minutę.
Przyspieszanie	Energia z akumulatorów jest przekształcana na prąd zmienny przez inwerter i dostarczana do silnika. Moc wyjściowa silnika jest wykorzystywana do uzupełnienia mocy wyjściowej silnika elektrycznego w trakcie przyspieszania. Prąd z modułu akumulatora jest konwertowany do zasilania układu elektrycznego pojazdu. Zmniejsza to obciążenie powodowane przez alternator. Gdy pozostały stan naładowania akumulatora jest na niskim poziomie maksymalne uzupełnienie występuje tylko podczas

pełnego otwarcia przepustnicy. Osiągnięcie minimalnego stanu naładowania dezaktywuje możliwość pełnego przyspieszenia.

Jazda z stałą prędkością Wymagający naładowania akumulator podczas jazdy ze stałą prędkością wykorzystuje silnik jako generator. Uzyskany prąd wyjściowy ładuje akumulator. Gdy pojazd porusza się z stałą prędkością akumulator wysokiego napięcia jest wystarczająco naładowany, silnik elektryczny wspomaga silnik spalinowy. Generowany prąd jest przekształcany na prąd stały o napięciu 12 V i wykorzystywany wyłącznie do zasilania układu elektrycznego pojazdu.

Hamowanie Podczas zwalniania silnik napędzany przez koła zostaje przełączony w tryb generatora energii. Wytworzona moc jest wykorzystywana do zasilania akumulatorów.

Praca na biegu jałowym W sytuacji niskiego naładowania akumulatora, układ sterowania silnikiem zwiększa obroty w celu dodatkowego wykorzystania alternatora, którego energia ładuje akumulator. Hybrydy nie pracują na biegu jałowym, ze względu na wykorzystanie silnika wyłącznie podczas jazdy.

Dodatkowym aspektem jest energia wymagana do ogrzania kabiny pojazdu, która w pojazdach spalinowych pochodzi z silnika wytwarzającego ciepło.. Ze względu na wydłużoną fazę rozgrzewania silnika spalinowego w celu ogrzewania kabiny pasażerskiej zużycie paliwa podczas rozruchu wzrasta, ale jest często pomijane w całościowej kalkulacji zużycia energii. Pojazdy bateryjne posiadają wysoką sprawność układu elektrycznego silnika trakcyjnego oraz falowania przy niskich temperaturach. Natomiast układ nie wytwarza ciepła odpadowego, które może posłużyć do ogrzania kabiny pasażerskiej. Niezbędne jest dodatkowe elektryczne urządzenie grzejne, które wykorzystuje energię elektryczną magazynowaną w bateriach. Wraz z obniżaniem temperatury podczas zimnego startu zmniejsza się również zdolność akumulatora do zapewniania wymaganej wydajności silnika elektrycznego. W celu zwiększenia atrakcyjności pojazdów elektrycznych należy ograniczać utrudnienia, których odbiorcy nie odczuwają podczas eksploatacji samochodów z silnikiem spalinowym. Dodatkowo podczas niskich temperatur ograniczenia obejmują również czas ładowania pojazdu

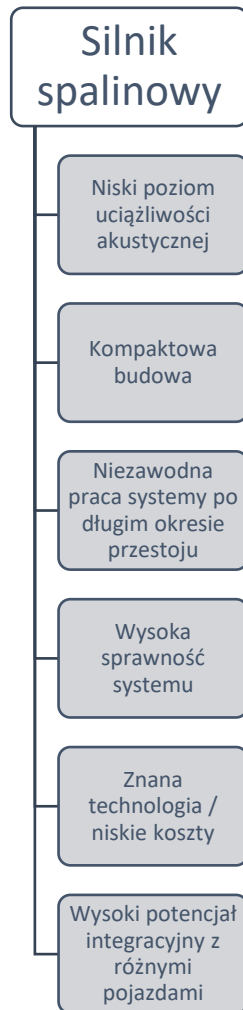
elektrycznego. Uwaga konstruktorów podczas projektowania pojazdów uwzględniających inne rodzaje napędu niż silnik spalinowy, powinna być skupiona ograniczaniu różnic związanych z samym napędem.

4.2.7. Pojazd elektryczny o zwiększonym zasięgu

Ograniczenie dotyczące zasięgu pojazdu w pełni elektrycznego w zróżnicowanych warunkach, wpływają na subiektywny "niepokój związany z zasięgiem" pojawiający się u odbiorców. Obserwowane wysiłki zmierzające do rozwoju lokalnej mobilności koncentrują się na technologii hybryd z możliwością doładowania oraz pojazdów w pełni akumulatorowych w dużych miastach. Obecnie konstruktorzy coraz częściej biorą pod uwagę podejście polegające na wprowadzaniu elementów zwiększających zasięg, rozwiązania umożliwiające bezpieczne i skuteczne wydłużenie pracy na baterii pojazdu [23]. Istotną rolę, w problemie zasięgu pojazdu odgrywa jego masa obejmująca, silnik oraz skrzynie biegów. Wyniki pomiarów emisji CO₂ wskazywane przez producentów pojazdów są uzyskiwane w warunkach minimalnego oporu oraz optymalnej konfiguracji wagowej. Producenci w celu osiągnięcia jak największego zasięgu zwiększają liczbę baterii oraz wprowadzają dodatkowe źródła zasilania akumulatorów. Systemy zwiększające zasięg stanowią rozszerzony poziom hybrydyzacji, który pozwala na zwiększenie zdolności samochodu do wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła. Ze względu na możliwość przełączania konfiguracji szeregowej lub szeregowo-równoległej, wydajność alternatora może być niższa niż w przypadku silnika spalinowego np. o 30% [24] do 60% [25]. Układ dodatkowego silnika spalinowego jest aktywowany przede wszystkim podczas wyższych prędkości samochodu i zwiększonym hałasie otoczenia. Strategie pracy silnika spalinowego określa się zgodnie z oczekiwaniami kierowcy dotyczącymi prędkości pojazdu i hałasu związanego z dodatkowym obciążeniem w celu redukcji problemów akustycznych. Silnik spalinowy może pochodzić z gamy istniejących silników produkcyjnych w celu ograniczenia prac rozwojowych i kosztów produkcji [24], [25], [26]. Innymi rozwiązaniami zwiększającymi zasięg są układy, które dostarczają energię do silnika elektrycznego. Takie rozwiązanie stanowi rozszerzenie pojemności akumulatora i pełni funkcje awaryjnego generatora. Projektowanie układu opiera się o dane wykorzystania baterii akumulatora do pokrycia dynamicznych obciążeń szczytowych. Wymagana moc jest określona przez średnie zapotrzebowanie na moc przy

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

wstępnie zdefiniowanej prędkości układu pojazdu. Układ tego typu uruchamia się automatycznie, gdy stan naładowania baterii spadnie poniżej zdefiniowanej wartości minimalnej rezerwy akumulatora lub w wypadku zdefiniowanej wcześniej sytuacji (dynamiczne przyspieszenie, ograniczona przyczepność). Rozwiązania oparte o układy zwiększające zasięg posiadają wiele cech przedstawionych na rysunku 13.



Rysunek 14 Zalety układu zwiększającego zasięg pojazdu elektrycznego opartego o silnik spalinowy

Projektowanie układu opiera się o dodatkowe kryteria związane z mocą wyjściową dobieraną na podstawie ustalonych danych oczekiwanego poziomu przyspieszenia oraz momentu obrotowego. Te wymagania dotyczące mocy szczytowej są znacznie wyższe niż zapotrzebowanie na moc ciągłą.

Dodatkowy system może mieć mniejsza moc, jeżeli została zapewniona rezerwa energii w akumulatorach. Systemy tego rodzaju posiadają potencjał do współpracy

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

z układem grzewczo-chłodniczym związane z ciepłem odpadowym podczas pracy. Jednakże rozwiązanie tego typu będą posiadały charakter dodatkowego źródła ciepła wykorzystywanego w określonych sytuacjach. W tabeli 5 przedstawiono główne cechy oraz funkcje pojazdów hybrydowych oraz elektrycznych.

Tabela 5 Główne cechy oraz funkcje pojazdów hybrydowych oraz elektrycznych

Typ	Funkcje				
	Start-stop	Odzysk podczas hamowania	Dodatkowe przyspieszenie (energia z akumulatora)	Tryb wyłączenie elektryczny	Zasięg akumulatorowy (jazda bez emisyjna)
Mikro hybryda	TAK	Opcja	BRAK	BRAK	BRAK
Hybryda pośrednia	TAK	TAK	TAK	BRAK	BRAK
Pełna hybryda	TAK	TAK	TAK	OPCJA	MOŻLIWY (ograniczony)
Hybryda z możliwością ładowania	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Samochód elektryczny	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK

1.3 Przegląd układów grzewczo-chłodniczych

1.3.1 Układy grzewczo-chłodnicze

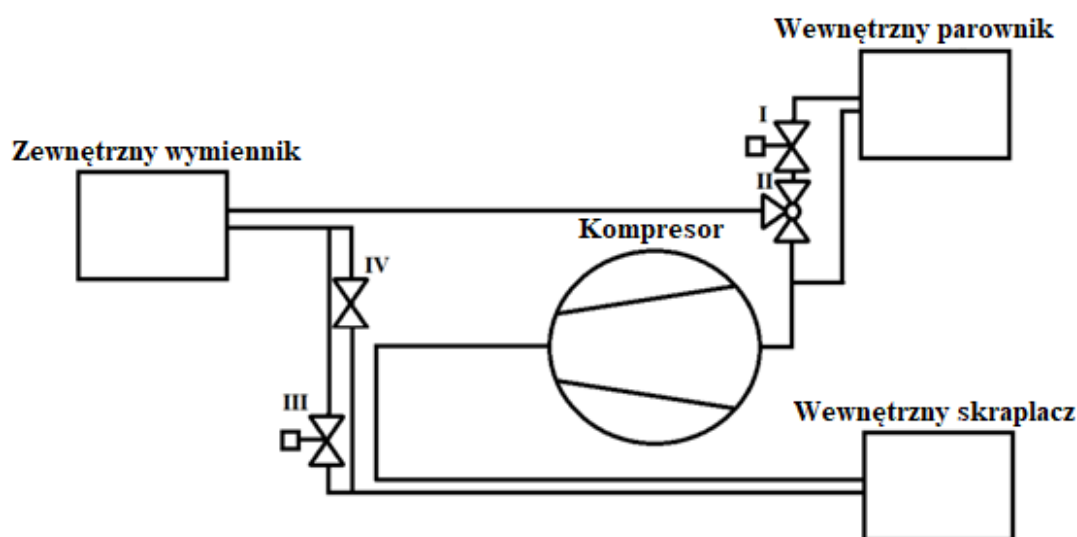
Układy grzewczo-chłodnicze w pojazdach można podzielić według zastosowania:

- powszechnie stosowane
- dostępne w nowych pojazdach
- rozwiązania przyszłościowe

Pojazdy obecnie poruszające się po drogach wykorzystują układy oparte o czynnik R134a oraz R1234yf dodatkowo w pojedynczych przypadkach o R744. Przystosowanie starych systemów do różnych czynników chłodniczych wymaga kosztownych modyfikacji.

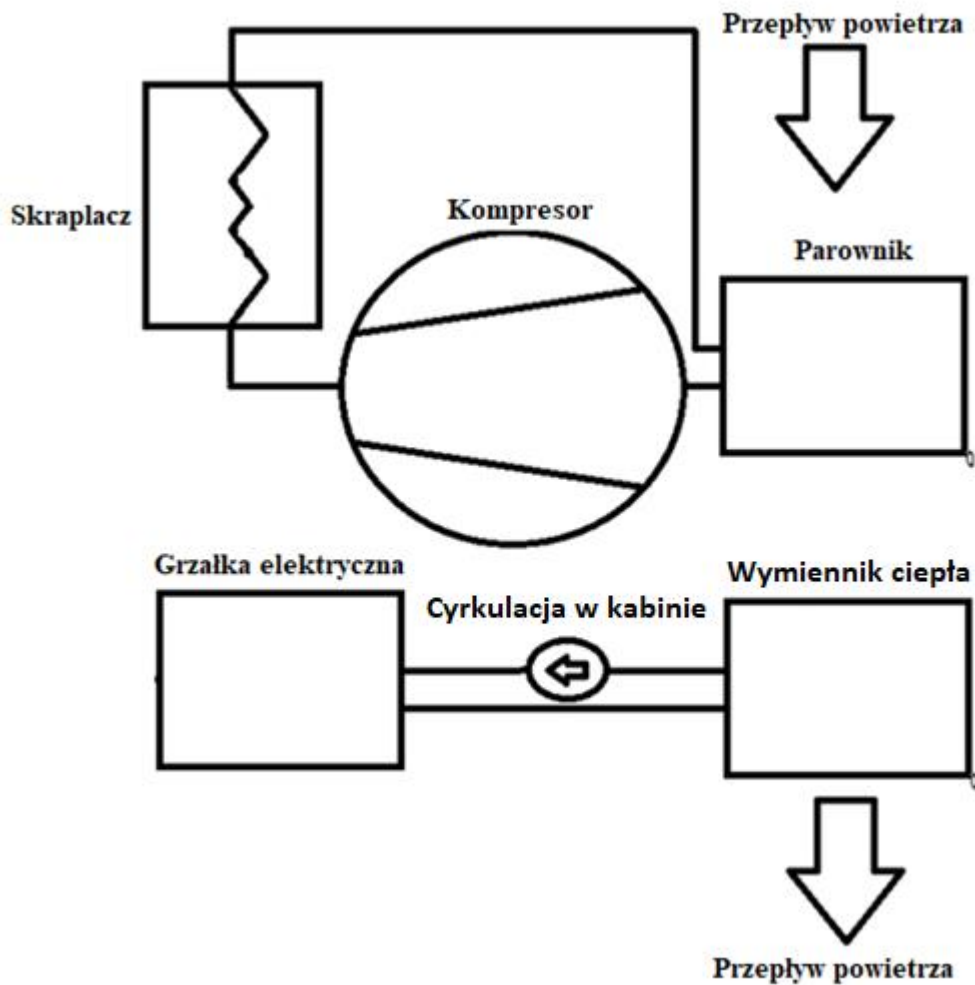
Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Przemysł motoryzacyjny nie oferuje tego rodzaju modyfikacji oraz nie pozostawia możliwości na wykonywanie takich zmian. Oznacza to, że układy grzewczo-chłodnicze przeznaczone są do jednego rodzaju czynnika chłodniczego. Firmy produkujące elementy układów grzewczo-chłodniczych posiadają wytyczne od producentów dotyczące nie tylko parametrów systemu, ale także szczegółowych wymagań dotyczących warunków pracy przewidzianych wyłącznie do jednego czynnika chłodniczego. Wymagania dla układów przesyłu czynnika związane są z wytrzymałością na ciśnienie robocze oraz olej smarny dedykowany do poszczególnych czynników roboczych. W pojazdach elektrycznych wymagania dotyczące układów grzewczo-chłodniczych muszą sprostać dodatkowo surowym normom dotyczącym poziomu hałasu. Takie zmiany skutkują pojawieniem się różnic w zależności nie tylko od czynnika chłodniczego, ale również od typu pojazdu. Projektowanie takich układów odbywa się jednocześnie z innymi układami w pojeździe. Takie rozwiązanie pozwala na efektywne wykorzystanie przestrzeni roboczej w pojazdach ograniczając jednocześnie możliwość wprowadzenia zmian w przyszłości. Systemy oparte o R744 są obecnie dostępne w nowych pojazdach oznacza, że technologia zakończyła proces walidacji i jest bezpieczna w użyciu. Nowe układy grzewczo-chłodnicze z R744 oferowane są wyłącznie w pojazdach z wyższych segmentów, jako wstęp do wdrożenia tej technologii w innych modelach w przyszłości. Obecnie coraz częściej stosowane także rodzaje układów opartych o pompy ciepła. Pompa ciepła zastosowana w Nissanie Leaf stanowi zespół trzech wymienników ciepła, dwóch zaworów rozprężnych (I, III), zaworu trójdrożnego (II), zaworu obejściowego (II), blokady przepływu powietrza oraz elektrycznej sprężarki klimatyzacji. Podczas pracy w gorące dni wewnętrzny skraplacz jest omijany, zawór rozprężny obiegu grzewczego (IV) jest omijany przez otwarcie zaworu bocznikowego, a zewnętrzny wymiennik ciepła pracuje w trybie skraplacza. Rysunek 14 przedstawia schemat układu ogrzewania i chłodzenia Nissana Leaf (I III zawór rozprężny, II zawór trójdrożny, IV bypass)



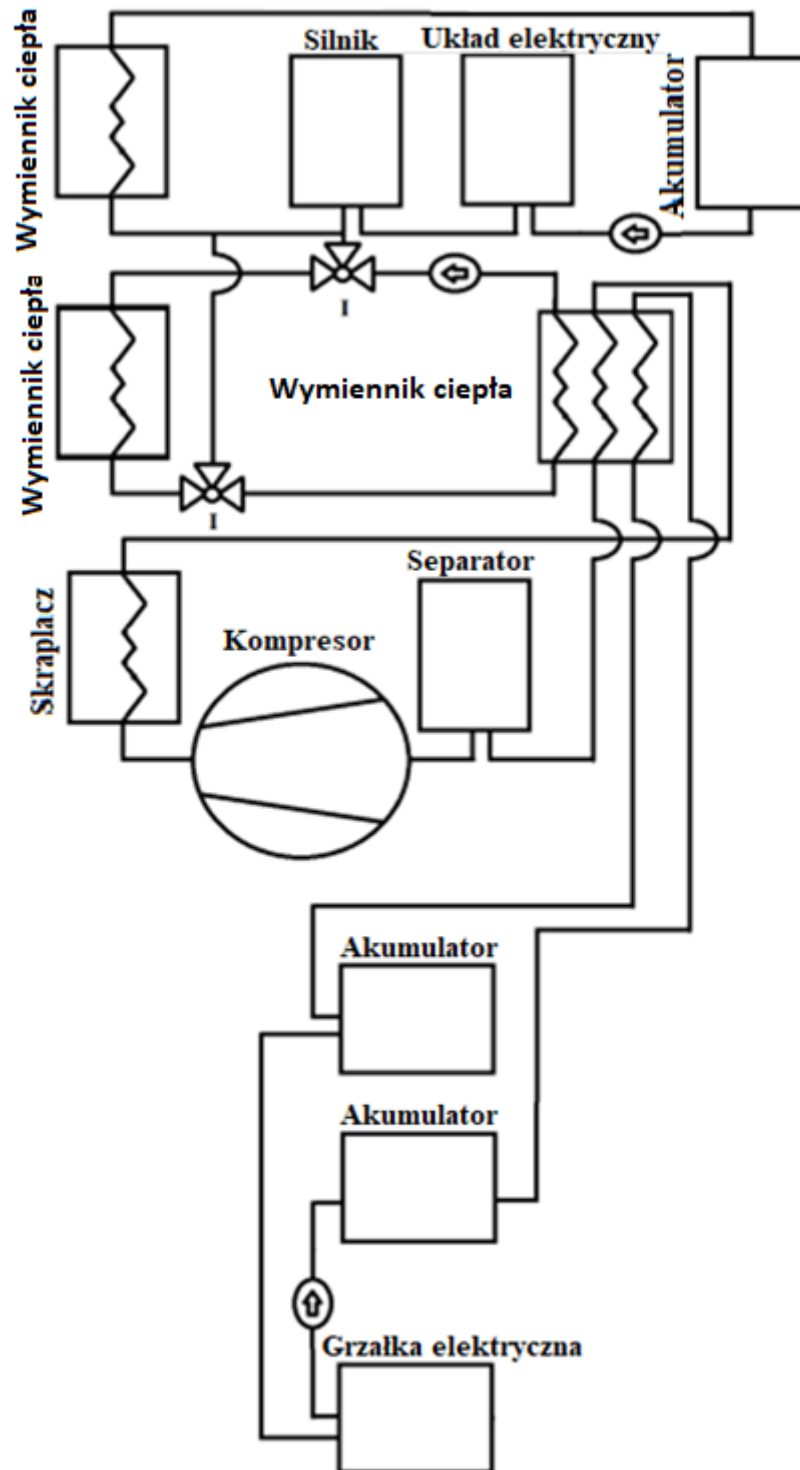
Rysunek 15 Schemat układu ogrzewania i chłodzenia Nissana Leaf

Powietrze przepływające przez wewnętrzny skraplacz ogrzewa przedział pasażerski. Zawór rozprężny (I) i wewnętrzny parownik są pomijane poprzez ustawienie zaworu trójdrożnego (II). Zawór obejściowy jest równolegle zamknięty, co powoduje przepływ czynnika chłodniczego przez zawór rozprężny. Możliwa jest równocześnie praca parownika i skraplacza wewnętrznego w tym samym czasie przy użyciu zaworu trójdrogowego i zaworu obejściowego. Stosowane rozwiązania różnią się w zależności od firmy, na przykład amerykańska firma Tesla stosuje inny typ systemu w swoich pojazdach elektrycznych. W zimne dni ciepło jest pobierane z obiegu płynów w silnikach elektrycznych. Ciepło to może być dostarczane do cyrkulacji w kabinie, omijając ciecz o wyższej temperaturze w obiegu za pomocą zaworu trójdrożnego (II). (II). Umożliwia to regulację temperatury silników oraz pozostałych elementów w samochodzie elektrycznym. W gorące dni w gorące dni obieg chłodniczy zwiększa swoją wydajność i wymienia ciepło z obiegiem kabinowym w wymienniku ciepła. Na rysunku 15 przedstawiono schemat układu grzewczo-chłodniczego w Tesli Model S.



Rysunek 16 Schemat układu grzewczo-chłodniczego w Tesli Model S

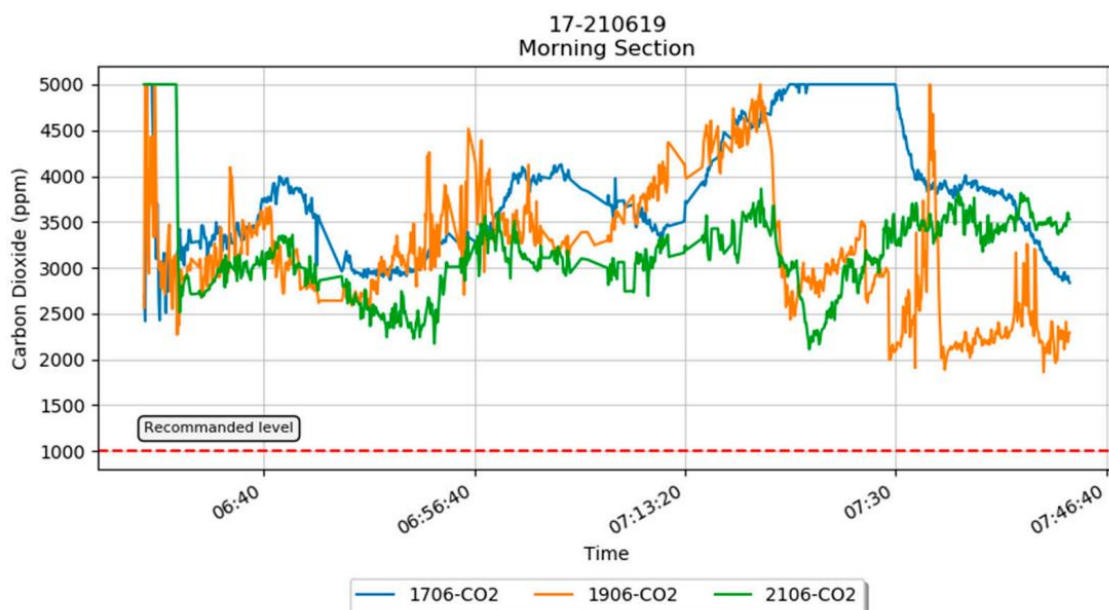
Firma Mitsubishi Motors Corporation wprowadziła system składający się z obiegu chłodniczego, obiegu silnikowego i obiegu w kabinie pasażerskiej. W gorące dni ciepło w kabinie jest rozpraszane w parowniku. W zimne dni wykorzystywana jest grzałka elektryczna w obiegu kabiny. Rysunek 16 przedstawia schemat układu grzewczo-chłodniczego w Mitsubishi i-MIEV



Rysunek 17 Schemat układu grzewczo-chłodniczego w Mitsubishi i-MiEV

1.3.2 Cele technologiczne

Cele technologiczne układów grzewczo-chłodniczych opierają się przede wszystkim na kontroli warunków temperaturowych we wnętrzu kabiny pasażerskiej. Warunki temperaturowo wilgotnościowe, jakie są wymagane we wnętrzu pojazdu zależą od wielu czynników. Z punktu widzenia bezpieczeństwa szczególną uwagę należy zwrócić na kierowcę samochodu. Niekorzystny wpływ na ludzką zdolność koncentracji mają określone warunki atmosferyczne takie jak wysoka temperatura, wilgotność a także zapylenie. Elementy te należy brać pod uwagę, jako nadrzędne cele układów grzewczo-chłodniczych. Wszystkie środki zapewniające zwiększenie jakości powietrza w kabinie pasażerskiej muszą uwzględniać równoległe podróżujących pasażerów. Układy grzewczo-chłodnicze wykorzystywane w samochodach, poza zwiększaniem komfortu podróży posiadają aspekt zwiększający bezpieczeństwo. Odczucie ciepła przez człowieka związane jest z temperatura, wilgotnością oraz ruchem strumienia powietrza. Urządzenia klimatyzacyjne mogą być sterowane odpowiednio każdym z tych parametrów. Negatywne oddziaływanie powierzchni o niższej temperaturze na komfort podróży można również redukować z wykorzystaniem układów grzewczo-chłodniczych. Równie ważnym parametrem jest strumień powietrza, którego podstawowe parametry wpływają, na jakość podróży. Kierunek, prędkość przepływu oraz liczba źródeł nawiewu powietrza wpływa na komfort. Jakość powietrza znajdującego się w kabinie pasażerskiej należy monitorować ze względu na poziom zanieczyszczeń. Głównym składnikiem wpływającym na człowieka jest obecność dwutlenku węgla. Jak wskazują wyniki pomiarów Chew Cheik Goha i innych [27] poziom dwutlenku węgla w kabinie pasażerskiej podczas podróży może zmieniać się w zakresie od 2000 ppm do 5000 ppm. Na rysunku 17 przedstawiono wykres stężenia dwutlenku węgla.



Rysunek 18 Wykres stężenia dwutlenku węgla

Wysokie stężenie dwutlenku węgla spowoduje zmniejszenie O_2 i może spowodować trwałe uszkodzenie narządów, w tym mózgu i serca [28]. Celem układów grzewczo-chłodniczych jest zbliżenie się do parametrów powietrza, w których objętościowy udział składników suchego powietrza jest następujący:

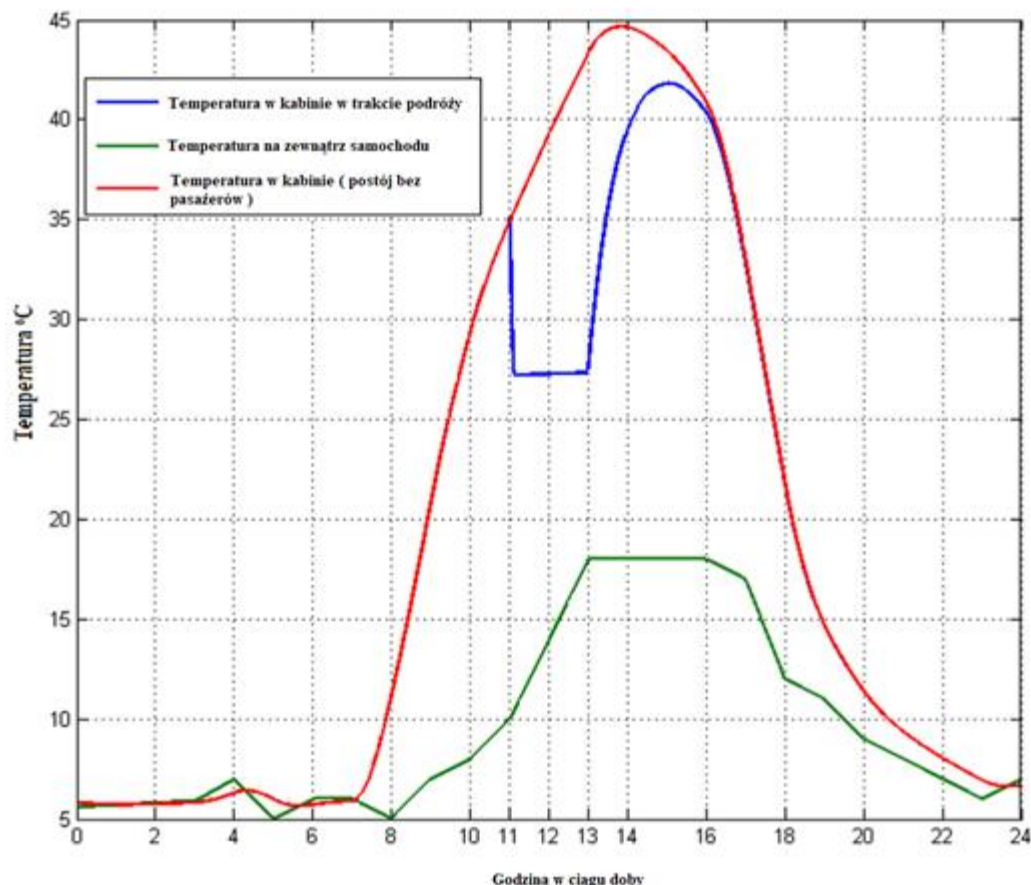
Azot 78,08%,

-Tlen 20,95%,

-Argon 0,93%,

-Dwutlenek węgla 0,03%.

Pozostałe składowe są to gazy szlachetne oraz para wodna. W zależności od pogody może stanowić do 3% wagowego udziału w powietrzu. Badanie przeprowadzone przez Kambly, oraz Bradley [29] wskazały jak warunki temperaturowe w samochodzie mogą zmieniać się w ciągu doby ze względu na nasłonecznienie. Na rysunku 18 przedstawiono przykładowe profile temperatury otoczenia oraz kabiny.



Rysunek 19 Przykładowe profile temperatury dla kabiny pojazdu i otoczenia w USA w ciągu 24 godzin [29]

Przedstawione temperatury maksymalne osiągnięte podczas postoju wskazują wartości dochodzące do 45°C. Rozpoczęcie pracy układu podczas maksymalnych temperatur będzie skutkowało wykorzystywaniem energii z akumulatorów w pierwszych etapach podróży. Celem technologicznym dla układów grzewczo-chłodniczych jest poprawne określenie wszystkich możliwych warunków pracy podczas w celu poprawnego określenia wydajności układu.

2 Układy grzewczo-chłodnicze oparte o pompę ciepła

2.1 Wprowadzenie

Konwencjonalne samochody oraz układy klimatyzacji dla silników spalinowych ulegają szybkim zmianom, które mają na celu spełnienie wymagań wynikających z nowych przepisów. Producenci samochodów oraz badacze poszukający ekologicznych czynników chłodniczych oraz systemów grzewczo-chłodniczych o zwiększonym potencjale ekonomiczno-jakościowym rozszerzają zakres prac badawczo-rozwojowych. Prace te uwzględniają rozwiązania oparte o czynnik chłodniczy, CO₂ oraz alternatywne czynniki chłodnicze o niższych wartościach potencjału niszczenia ozonu oraz potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ODP,GWP). W celu zminimalizowania zużycia energii przez układ grzewczo-chłodniczy podczas jazdy samochodu prowadzono liczne badania nad poszczególnymi komponentami, optymalizacją cyklu oraz udoskonaleniem technik sterowania. Szczególnie obserwowany problem ogrzewania w warunkach poniżej 0°C w pojazdach

o charakterze hybrydowym oraz eklektycznym. Producenci pojazdów hybrydowych oraz elektrycznych wykorzystują do ogrzewania wysokonapięciowe grzejniki elektryczne o dodatnim współczynniku temperaturowym do ogrzewania kabiny ze względu na szybkość nagrzewania [30]. System ogrzewania oparty o grzejniki elektryczne charakteryzują się niską sprawnością, czego efektem jest zwiększony pobór energii z akumulatorów. Wykorzystanie grzałek elektrycznych do ogrzewania skraca zasięg pojazdu od 30 do 65 % w zimnych warunkach pogodowych [31]. W celu ograniczenia wpływu układów grzewczo-chłodniczych na zasięg pojazdu wykorzystywane są rozwiązania oparte o pompy ciepła. Badacze [32] wskazują wykorzystanie tego typu układów po raz pierwszy w pojazdach elektrycznych w 1900 roku przez Harrison Diviion do ogrzewania i chłodzenia dwu osobowego samochodu. Pompa ciepła została zbadana również przez Domitrovic i in. w 1997 roku [33] wykorzystując czynnik R12 oraz R134a. Lee i inni [34] zbadali doświadczalnie wydajność samochodowej pompy ciepła dla dużego samochodu elektrycznego, który wykorzystuje ciepło odpadowe z urządzeń elektrycznych do ogrzewania i chłodzenia. Wskazana została możliwość integracji klimatyzacji i ogrzewania z pompą ciepła. Badania nad poprawą wydajności konwencjonalnych układów grzewczo-chłodniczych dla silników spalinowych trwały od

lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Opublikowanie licznych materiałów doświadczalnych dotyczących usprawnień układów grzewczo-chłodniczych wskazuje rozwiązania ekonomiczne, ekologiczne oraz zwiększające wydajność. Kaynakli i Horuz [35] zbadali doświadczalnie wydajność samochodu systemu grzewczo-chłodniczego oraz ocenili cały układ. Zaprojektowali układ doświadczalny składający się ze sprężarki z napędem pasowym oraz silnikiem elektrycznym wskazując zwiększenie zużycia energii przez sprężarkę wraz ze wzrostem temperatury skraplacza. Wydajność chłodnicza parownika wzrastała wraz ze wzrostem temperatury powietrza na wlocie do parownika znacząco wpływając na współczynnik COP (współczynnik wydajności). Badania wskazały wpływ skrajnych warunków pracy na realne parametry układu grzewczo-chłodniczego oraz zwiększony pobór energii. Qi i inni [36] zaproponowali zwiększenie wydajności układu grzewczo-chłodniczego z wykorzystaniem mikro kanałów w wymiennikach ciepła wykorzystujący czynnik R134a. Zaprojektowane zostały dwa zmodernizowane kompaktowe oraz wysokosprawne wymienniki ciepła. Zaprezentowany parownik oraz skraplacz w porównaniu z rozwiązaniami rynkowymi zmniejszyły o 17% i 14% objętość oraz zmniejszyły o 2.8% i 14.9% masę. Opracowane elementy wpłynęły na lepszą wydajność chłodniczą we wszystkich warunkach przeprowadzanych testów. Li i inni [37] przedstawili nową metodę sterowania przepływu czynnika chłodniczego w samochodzie z układem grzewczo-chłodniczym z zainstalowanym zaworem rozprężnym. Rozwiązanie to miało poprawić reakcje systemu na zakłócenia w zależności od zmian prędkości oraz warunków środowiskowych. Maruyama i inni [38] już w 1982 roku badali numerycznie sterowanie wydajnością sprężarki typu rotacyjnego. Przedstawili model matematyczny do analizy charakterystyki ciśnienia w komorze ssawnej. Tian i Li [39] przedstawili model matematyczny układu grzewczo-chłodniczego ze sprężarką o zmiennej wydajności. Symulacja wskazała zgodność pomiędzy modelem teoretycznym a wynikami eksperymentalnymi. Jabardo i inni [40] przedstawili model symulacji komputerowej stanu ustalonego mający na celu ocenę wydajności układu grzewczo-chłodniczego ze sprężarką o zmiennej wydajności. Podczas badań wykonano prototypowe stanowisko doświadczalne w celu sprawdzenia działania poszczególnych komponentów oraz całego układu grzewczo-chłodniczego. Badania obejmowały ocenę wpływu prędkości sprężarki, temperatury powietrza w parowniku oraz temperatury powietrza skraplającego. Wyniki analiz oraz ich walidacji na stanowisku badawczym wskazały zgodność na poziomie 20%.

Hosoz i Ertunc [41] przedstawili model sztucznej sieci neuronowej, której celem było przewidywanie charakterystyki pracy układów grzewczo-chłodniczych. Badania zostały wykonane na systemie zasilanym czynnikiem R134a, a instalacja eksperymentalna do badania wydajności posiadała możliwość ustalania prędkości pracy sprężarki oraz wydajności chłodniczej i temperaturowej skraplania. Walidacja eksperymentalna założeń teoretycznych wskazała błędy na poziomie od 1,5% do 2,5%.

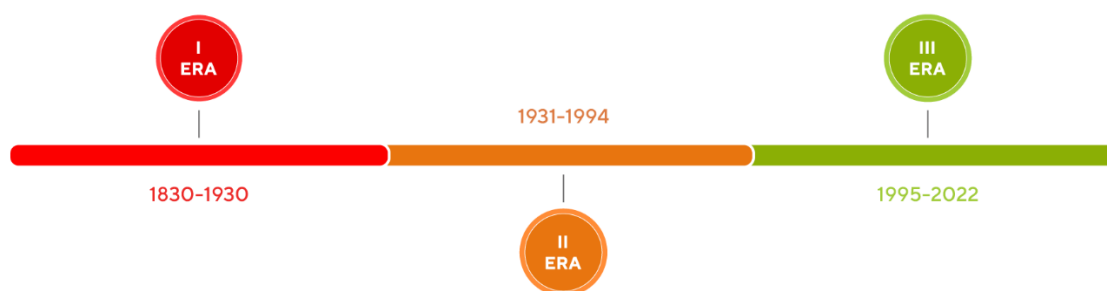
Rozwój samochodów napędzanych nowymi źródłami energii oraz między innymi rozporządzenie UE nr 517/2014 zwiększyło zainteresowanie czynnikami chłodniczymi o mniejszym wpływie na środowisko. Protokół z Kioto określił również zobowiązania do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Takie zmiany wpłynęły na poszukiwanie alternatywy dla czynnika R134a. Badania z lat dziewięćdziesiątych między innymi Ghodbana [42] oraz Lorentzena i Pittersena [43] wskazywały odpowiednio, jako alternatywne czynniki R152 oraz CO₂. R152a musiałby zostać stosowany w pętli wtórnej z uwagi na palność, zwiększoną liczbę elementów takiego układu zwiększałaby koszt budowy. Dwutlenek węgla na ówczesny stan technologiczny, wykazywał się ciśnieniem pracy, które wymagało opracowania wszystkich elementów układu grzewczo-chłodniczego od początku. Cecchinato i inni [44] oraz Minetto i inni [45] wskazali, że większa gęstość, CO₂ zwiększa masowe natężenie czynnika chłodniczego, wpływając na wydajność w niskich temperaturach. Wang i inni [46] wskazali zalety pompy ciepła wykorzystującej dwutlenek węgla, jako czynnik chłodniczy. Cichong i inni [47] porównali wydajność grzewcza R134a, R1234yf oraz dwutlenku węgla wskazali zwiększoną wydajność układu pompy ciepła podczas pracy z wykorzystaniem CO₂. Właściwości fizyczne oraz charakterystyka układu grzewczo-chłodniczego wykorzystującego R1234yf oraz R134a są bardzo podobne [48]. Przedstawione dane wskazywały, dlaczego R1234yf został przyjęty, jako następcą R134a, ograniczając w ten sposób koszty związane z opracowaniem od podstaw układów dla dwutlenku węgla. Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ciepłownictwa, Chłodnictwa oraz Klimatyzacji określiło poziom bezpieczeństwa czynnika R1234yf jako nietoksyczny i słabo palny, umożliwiając jego globalne zastosowanie dla pomp ciepła. Dodatkowo poza zmianami związanymi z czynnikami chłodniczymi postępujące zmiany dotyczące napędu samochodów zwiększyły uwagę producentów na układy grzewczo-chłodnicze. Ogrzewanie w tradycyjnych pojazdach samochodowych było zapewniane przez ciepło

odpadowe z silnika spalinowego. Pojazdy elektryczne nie wskazały tej możliwości [49]. Choi i inni [50] przedstawili technologię ekonomicznego wtrysku pary w pompie ciepła wskazując jej efektywność w niskich temperaturach. Zhang i in [51] przedstawili wyniki analiz pracy pompy ciepła opartej o czynnik chłodniczy R134a. Wskazali zwiększoną wydajność o 44% dzięki zastosowaniu wtrysku pary. Wang i inni [52] przeanalizowali stopień przegrzania pary podczas różnych temperatur odparowania oraz kondensacji wskazując, że efektywność oraz wydajność grzewcza systemu z czynnikiem R134a była wyższa niż dla R1234yf. Navarro i inni [53] wskazali że układy opierające się o R1234yf posiadały niższą wydajność niż podczas pracy na R134a. Qi [54] wskazał, że R134a posiada lepsze parametry wymiany ciepła oraz przepływu niż R1234yf w parowniku w pompie ciepła. Jednakże ze względów ograniczenia wpływu czynników chłodniczych na środowisko wprowadzono ograniczenie wykorzystania R134a. Protokół Montrealski, protokół z Kioto oraz zwiększona uwaga producentów samochodowych na proekologiczne rozwiązania również w układach grzewczo-chłodniczych rozszerzają pracę nad czynnikiem R744. Antonijev [55] wskazał, że nie jest konieczne wychwytywanie czynnika chłodniczego podczas napełniania lub serwisu systemu klimatyzacji, co znacząco upraszcza proces. Wskazano, że czynnik R744, pod względem ekologicznym jest najkorzystniejszym rozwiązaniem w układach grzewczo-chłodniczych. McEnaney i in [56] dodatkowo opisali eksperymentalnie działanie układu grzewczo-chłodniczego pracującego z wykorzystaniem czynnika R744 zestawiając parametry z R134a. Systemy zostały porównane pod względem ciężaru komponentów oraz powierzchni czołowych. Wyniki wskazały, że system z czynnikiem R744 wskazywał wyższą wydajność o 40% niż system R134a. Pettersen i inni [57] przeprowadzili badania na wymiennikach ciepła wykorzystujących R744, których innowacyjna budowa zwiększała strumień masy czynnika chłodniczego. Rezultaty badań wskazały wyraźną przewagę R744 nad czynnikami fluorowęglowodorowymi. Bullard i inni [58] przeprowadzali szereg badań nad układem grzewczo-chłodniczym opartym o pompę ciepła wykorzystującym czynnika R744. Prototyp układu grzewczo-chłodniczego działał w trybie chłodniczym oraz grzewczym. Wydajność grzewcza przy niskich temperaturach otoczenia nie wykazywała obniżenia wydajności energetycznej. Realizacja przeprowadzonych badań wskazuje na złożoność problemu

doboru czynnika chłodniczego, a rozwiązania grzewczo-chłodnicze w pojazdach elektrycznych wymagają odpowiedniego procesu walidacji.

2.2 Czynniki chłodnicze

Efekty chłodzenia oraz grzania ciepła z wykorzystaniem czynników chłodniczych są znane od 100 lat. Elementy cyklu dla grzania w pompach ciepła opierają się o cykl termodynamiczny obejmujący sprężanie par czynnika chłodniczego, i następujące po nim jego skroplenie w podwyższonym ciśnieniu roboczym. Układ tego typu zależy od miejsca, w którym zainstalowany jest wymiennik ciepła grzeje lub chłodzi. Oddawanie ciepła w skraplaczach powoduje efekty grzewczy, który jest wykorzystywany w pompach ciepła. Po skropleniu ciśnienie czynnika chłodniczego jest obniżane przez urządzenie rozprężające. Powstała w ten sposób mieszanina pary oraz cieczy jest następnie odparowywana pod niskim ciśnieniem z wykorzystaniem jednocześnie odbioru ciepła z czynnika i tym samym pobrania ciepła z otoczenia (efekt chłodzenia). Wykorzystanie cyklu tradycyjnego, w którym mogą być stosowane czynniki z grupy HFC lub HCFC, proces skraplania zachodzi w temperaturze niższej niż krytyczna dla czynnika, chłodniczego (proces podkrytyczny). Sytuacja ta wymaga, aby temperatura krytyczna czynnika była wyższa od temperatury czynnika, w którym następuje oddawanie ciepła. Skraplając pary, czynnik chłodniczy uzyskuje ciśnienie skraplania niższe od ciśnienia krytycznego czynnika chłodniczego. W takim cyklu ciśnienie oraz temperatura skraplania są ze sobą powiązane w sposób zależny od czynnika chłodniczego. Cykl nadkrytyczny procesu skraplania zachodzi powyżej ciśnienia krytycznego, parowanie zachodzi w ciśnieniu niższym od ciśnienia krytycznego. Historię rozwoju czynników chłodniczych można podzielić na trzy okresy według rysunku 19.



Rysunek 20 Umowny podział etapów rozwoju czynników chłodniczych

Okres od 1830 roku do 1930 roku stanowi umowną I erę czynników chłodniczych. Stosowana w tym czasie każdą dostępną substancję, która posiadała możliwość chłodzenia. Głównym kryterium wyboru czynnika chłodniczego była możliwość zastosowania go w urządzeniu. Właściwości dotyczące toksyczności, palności oraz wpływu na środowisko nie były uwzględniane podczas wyboru. Większość stosowanych w tamtych czasach czynników opierała się o substancje toksyczne i/lub łatwopalne. Stosowano wówczas rozpuszczalniki oraz ciecze lotne. Wraz z zwiększeniem dostępności układów grzewczo-chłodniczych oraz rozszerzaniem różnorodności zastosowań konieczne stało się zastosowanie nowych bezpieczniejszych rozwiązań. II era trwająca od 1931 roku do 1994 roku, charakteryzowała się szerokim stosowaniem czynników z grupy chlorofluorowęglowodorów oraz wodorochlorofluorowęglowodorów. Czynniki chłodnicze z tych grup spełniały wszystkie wymagania dotyczące stabilności, bezpieczeństwa oraz wydajności. Niestety czynniki opierały się o związki chlorowe, które ze względu na swoją budowę były bardzo stabilne. Ich długoterminowy wpływ na środowisko nie wpływał na ich zastosowanie dopiero do momentu częściowego zniszczenia warstwy ozonowej. Prace nad odbudowaniem warstwy ozonowej oparty się na uzgodnieniach dotyczących zastąpienia czynników chłodniczych nowymi o zmniejszonym stopniu szkodliwości środowiskowej.

III era datowana od 1994 roku to data, w której czynniki z grupy wodorofluorowęglowodorów wprowadzone zostały jako alternatywa dla szkodliwych chlorofluorowęglowodorów. Wskazane zmiany na przestrzeni lat przedstawiają podwójne zmiany w wykorzystaniu czynników chłodniczych. Obecnie czynniki stosowane na szeroką skalę opierają się substancje syntetyczne, a ich wpływ na środowisko będzie określony w dłuższej perspektywie czasowej. Kraje takie jak Dania wprowadziły na szczeblu lokalnym przepisy ograniczające stosowanie gazów syntetycznych, w związku z rosnącą świadomością ekologiczną społeczeństwa.

Jednym z najważniejszych kryteriów dotyczących czynnika chłodniczego jest jego punkt krytyczny. Właściwość ta odnosi się do parametrów, w których nie można odróżnić cieczy od pary podczas określonych wartości temperatury i ciśnienia. Czynniki chłodnicze są wybierane lub ich właściwości są tak modyfikowane, aby można je było skraplać za pomocą dostępnego medium. W przypadku samochodów medium, którym

jest powietrze. Wymaga to, aby ich temperatura krytyczna była znacznie powyżej temperatury skraplania medium chłodzącego. W instalacji natężenie przepływu czynnika chłodniczego jest regulowane przez urządzenie rozprężne, którymi mogą być rurki kapilarne, termostatyczne zawory rozprężne lub elektroniczne zawory rozprężne. Urządzenia te kontrolują wartość przegrzania na ssaniu sprężarki oraz zapewniają, że ciecz nie wydostaje się z parownika. Przepływ czynnika chłodniczego jest regulowany za pomocą elementu rozprężającego, aby uniknąć przenoszenia czynnika chłodniczego w stanie ciekłym na linię ssawną sprężarki. Punktem nastawnym urządzenia rozprężającego jest wartość przegrzania na linii ssawnej. Innymi rozwiązaniami pomp ciepła są układy nadkrytyczne oparte o naturalny czynnik R744. Temperatura krytyczna R744 wynosi około 31°C. W sytuacji wykorzystania powietrza do chłodzenia po stronie wysokiego ciśnienia w temperaturze powyżej 35°C nie będzie możliwości skroplenia czynnika chłodniczego. Układy nadkrytyczne odprowadzają czynnik schłodzony, jako ciecz w stanie nadkrytycznym, ponieważ proces zachodzi przy ciśnieniu wyższym niż ciśnienie krytyczne 74bary. Rozwiązanie pozwala odparować R744 przy ciśnieniu 30 bar a następnie jest sprężane do 120 barów oraz 120 °C. Główne cechy takiego rozwiązania to praca przy znacznie wyższych ciśnieniach niż w rozwiązaniu tradycyjnym. Wysokociśnieniowy czynnik chłodniczy nie jest skraplany, a jest schładzany w stanie nadkrytycznym.

Cykl podkrytyczny ciśnienia skraplania jest ustalany przez temperaturę skraplania, która zależy od wielkości skraplacza oraz natężenia przepływu cieczy chłodzącej. Cykl trans krytyczny wykorzystuje zwiększone ciśnienie oraz dodatkową chłodnicę gazu, przez co możliwa jest praca w różnych warunkach. Wartość ciśnienia ustalana jest przez urządzenie sterujące, w celu działania obiegu w optymalnych warunkach, osiągając wysoką sprawnością energetyczną. Sprawność energetyczną definiuje się, jako ilość energii użytecznej podzieloną przez ilość energii wejściowej. W trybie ogrzewania sprawność energetyczną, czyli sprawność definiuje się według wzoru (1).

$$\text{Efektywność pompy ciepła} = \frac{\text{moc górnego źródła ciepła [kW]}}{\text{moc pobierana przez sprężarkę [kW]}} \quad (1)$$

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Zestawienie przedstawiono w tabeli 6 poniżej wskazuje różnice konstrukcyjne w układach opartych o cykl podkrytyczny (tradycyjny) oraz trans krytycznym opartym o R744.

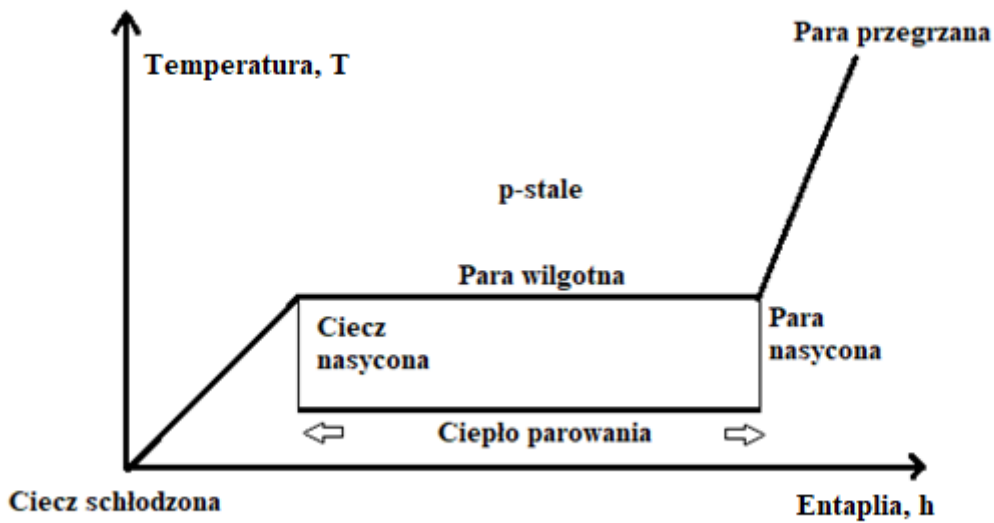
Tabela 6 Charakterystyka układów podkrytycznych oraz nadkrytycznych

Parametry cyklu	Podkrytyczny / tradycyjny	Nadkrytyczny
Chłodzenie		
wysokociśnieniowe - układ odprowadzania ciepła	Skraplacz	Chłodnica gazu
Ciśnienie na linii wyjściowej	Hydrofluorowęglowodory 10 do 40 bar	90 – 130 bar
Ciśnienie na linii ssawnej	Hydrofluorowęglowodory 2 – 9 bar	25 – 50 bar
Temperatura czynnika na linii wyjściowej	Poniżej 95°C	Powyżej 140 °C
Sterowanie rozprężaniem	Sterowanie przez nastawę przegrzania lub przez urządzenie do rozprężania o stałym przepływie	Sterowanie ciśnieniem
Ogranicznik ciśnienia	40 bar maksymalnie bez ogranicznika	Ogranicznik powyżej 130 bar
Stan czynnika	Stan ciekły, częściowo opary	Gaz (nadkrytyczny) powyżej 31°C, mieszanina pary i cieczy poniżej 31°C . Może stać się ciałem stałym po schłodzeniu poniżej 6 barów.
Ciśnienie przy wyłączonym systemie	Ciśnienie zależne od temperatury otoczenia	Minimum 74 bary w zależności od ilości w układzie i temperatury

Różnice pomiędzy czynnikami oraz rodzajami układów, w których pracują są kluczowym elementem podczas badań oraz testów. Jednakże producenci samochodów obecnie wybierają rozwiązania nie tylko ekologiczne, ale również o wysokim potencjalnie ekonomicznym. Obecnie stosowane układy opierają się głównie czynnik chłodniczy R1234yf. Badania przeprowadzone przez Lee i Jung [59] wskazały że temperatura wylotowa zmierzona za sprężarką jest o 6,7°C niższa niż w przypadku układu wykorzystującego R134a. Li i inni [60] zbadali temperatury zwłaszcza, w elektrycznych pojazdach mobilnych, w zimnym klimacie, wskazując że temperatura na wylocie sprężarki w układzie wykorzystującym R1234yf jest między 2,5°C a 3,5°C niższa niż w układzie wykorzystującym R134a. Niższa temperatura na wylocie sprężarki ogranicza zużycie oleju smarnego, wydłuża cykle pomiędzy wymianą oleju sprężarkowego, ogranicza koszty. Według Gaurava i Raja Kumara [61] mieszanina czynników chłodniczych R-1234yf może być stosowana jako czynnik alternatywny. Mieszaniny R-134a/R-1234yf/R-1234ze (40%/22%/38%) jest tylko jedną z opcji zastąpienia R-134a. Wynik ten pokazuje, że zamienność R-134a z mieszaniną R1234yf jest możliwa bez żadnych zmian w konstrukcji układu. R-1234yf charakteryzuje się niskim współczynnikiem potencjału globalnego ocieplenia wynoszącym 4. Wartość ta jest 350 razy niższa niż w przypadku R-134a. Dodatkową cechą R-1234yf jest to, że czas rozkładu R-1234yf wynosi 11 dni. Jest to znacząca przewaga nad R-134a, którego czas rozkładu wynosi 13 lat [62]. Liczba elementów wymaganych do przeprojektowania układu od etapu wstępnego hamuje diametralne zmiany w układach grzewczo-chłodniczych. Wybór czynnika chłodniczego podczas projektowania układów grzewczo-chłodniczych opiera się o wyniki badań, uwzględniając między innymi aspekty ekologiczne poszczególnych rozwiązań oraz ekonomiczne aspekty.

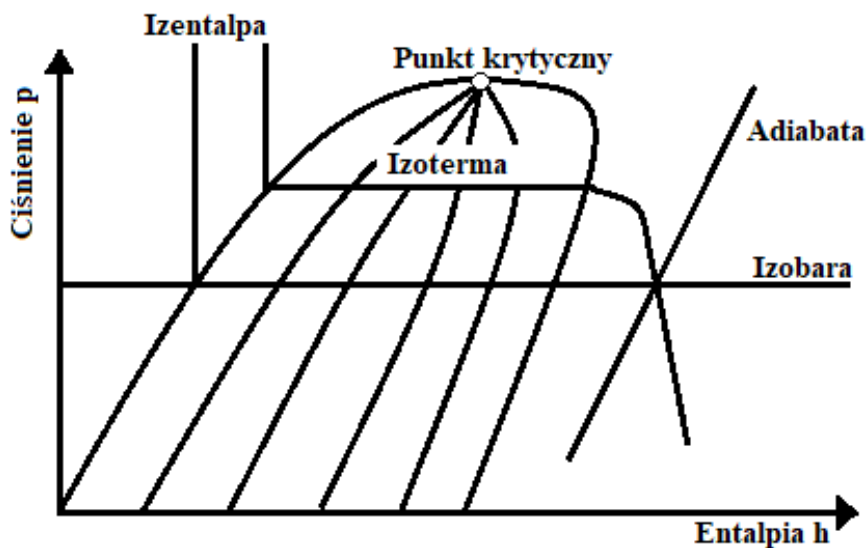
2.3 Przemiany termodynamiczne czynników roboczych

Zmiany stanu czynnika chłodniczego przebiegają przy stałej temperaturze. W celu odparowania czynnika chłodniczego należy dostarczyć do niego ciepło w celu odwrócenia procesu ciepło należy odprowadzić, zmiany przedstawione są na wykresie temperatury entalpii na rysunku 20.



Rysunek 21 Wykres temperatura-entalpia

Rysunek 21 przedstawia wykres logarytmiczny p-h.



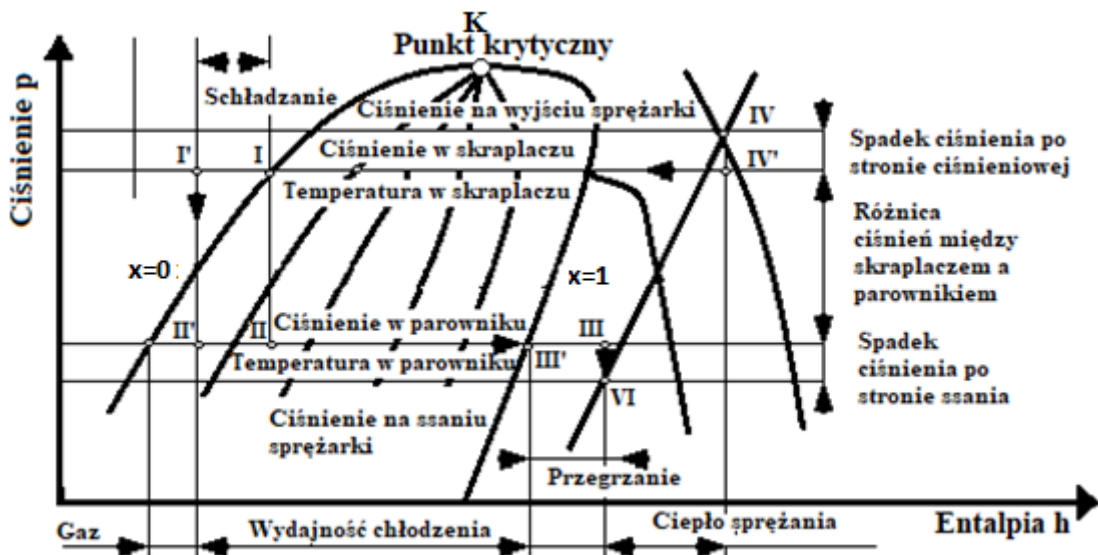
Rysunek 22 Wykres logarytmiczny p-h

Przebieg procesu może być regulowany wraz ze zmianami ciśnienia. Ilość ciepła wymagana do zmiany stanu czynnika zależy od ciśnienia. Wykres ciśnienie –entalpia daje możliwość całościowego przedstawienia wszystkich zmian i jest stosowany do przedstawiania zmian zachodzących podczas korzystania z czynników chłodniczych. Oś odciętych wskazuje zawartość ciepła (entalpią), z pionowo usytuowanym

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

izentalpami. Linia rzędnych wskazuje ciśnienie. Obszar pary wilgotnej ograniczony jest do linii $x = 0$ oraz $x = 1$ a zakres stanu płynnego ograniczony jest linia $x = 0$. Takie parametry ma ciecz nasycona, a $x = 1$ ogranicza zakres pary nasyconej. Układ jest ograniczony przez punkty krytyczny wyznaczający granicę powyżej której nie da się przekształcić odparowanego czynnika w ciecz. Izobary biegnące poziomo wyznaczają linie stałego ciśnienia. W zakresie pary wilgotnej przebiegają również izotermy wyznaczające linie stałej temperatury. Izotermy przebiegające pionowo wyznaczają obszar czynnika w fazie płynnej. W obszarze przy izotermie (przegrzanej) linie krzywe zbliżają się do linii pionowych. Sprężenie czynnika chłodniczego przebiega bez wymiany ciepła, w formie sprężania adiabatycznego. Wzrost entalpii uzyskuje się wraz z mechaniczną pracą podczas sprężania bez wymiany ciepła. Adiabaty na wykresach $p-h$ określane są przy pomocy prostych wznoszonych pod dużym kątem.

Odparowanie czynnika chłodniczego przy odpowiednim ciśnieniu zachodzi podczas pobrania ciepła (poziom ten określana wydajnością chłodzenia urządzenia). Składa się ona z utajonego ciepła parowania oraz z ciepła przegrzania danego czynnika chłodniczego. Przegrzanie pary czynnika chłodniczego (odcinek III – III') ma za zadanie ograniczyć przedostanie się czynnika w stanie płynnym do sprężarki. Spadki ciśnienia w przewodzie na wejściu do sprężarki są przedstawione na odcinku III' oraz VI, wraz z odcinkiem wzdłuż adiabaty VI – IV gdzie zachodzi sprężanie. Na rysunku 22 przedstawiono przebiegi procesów zachodzących w sprężarkowym urządzeniu chłodniczym.



Rysunek 23 Przebiegi procesów zachodzących w sprężarkowym urządzeniu chłodniczym

Odcinek IV – IV' przedstawia straty ciśnienia zachodzące po stronie wysokiego ciśnienia. Przejście do stanu płynnego następuje podczas obniżenia temperatur przegrzanej pary czynnika chłodniczego. Proces przebiega etapami:

- obniżenie temperatury poniżej sprężania do poziomu temperatury skraplania,
- odprowadzenie ciepła od przegrzanej pary,
- proces schładzania przebiegający przy stałej temperaturze (odprowadzenie utajonego ciepła skraplania).

Rozprężanie czynnika chłodniczego na wykresie przebiega na ograniczonym odcinku. Nie występuję na tym odcinku pobranie ciepła z zewnątrz wraz z oddaniem ciepła. Przebiega tam wyłącznie proces dławienia przy stałej entalpii. Odcinek I' oraz II,' wskazuje przebieg rozprężania czynnika chłodniczego związanego z spadkiem temperatury do poziomu określonego temperaturą parowania. Punkt II' leżący w obszarze pary wilgotnej oznacza odparowanie czynnika chłodniczego. Schładzanie czynnika chłodniczego związane jest z odpowiednio zaprojektowanym (odpowiednio większym) skraplaczem zapewniając w ten sposób wydajność chłodzenia parownika. Wskazane procesy w poszczególnych miejscach układu grzewczo-chłodniczego zwiększają zakres poziom skomplikowania układu.

3 Cel oraz tezy pracy

Celem pracy jest opracowanie metodyki badań systemów grzewczo-chłodniczych oraz ich poszczególnych elementów. Zapewniające uzyskanie wiarygodnych danych o rzeczywistych lub zbliżonych do rzeczywistych warunkach pracy, przy ograniczeniu liczby i czasu trwania pojedynczych testów. Dodatkowym celem pracy jest opracowanie koncepcji stanowiska badawczego do realizacji wspomnianych pomiarów.

Hipotezy pracy doktorskiej

-modyfikacja obecnie stosowanej metodyki badań pozwoli w uzyskać bardziej wiarygodne i wartościowe wyniki przy niższym nakładzie czasu, pracy i środków finansowych

-koncepcja stanowiska badawczego opierającego się o badania w warunkach eksperymentalnych zwiększy potencjał badawczo-rozwojowy.

4 Badania wybranych elementów układów grzewczo-chłodniczych

4.1 Charakterystyka materiałowa elementów składowych

Materiały wykorzystywane w układach grzewczo-chłodniczych spełniają zróżnicowane wymagania. Wszystkie elementy montowane w pojazdach, poza wymaganiami związanymi z ich przeznaczeniem, muszą spełniać wymagania dotyczące geometrii, oraz wpływu na pozostałe niezależne elementy w pobliżu. Takie zestawienie wymagań wpływa na poziom skomplikowania projektowanego układu. Elementy składowe układów grzewczo-chłodniczych również są elementem, który został ograniczony przez wymogi związane z rodzajem napędu pojazdu. W pojazdach napędzanych silnikami opartymi o paliwa kopalne wpływ masy elementów instalowanych we wnętrzu pojazdu był znikomy. W pojazdach opartych o silniki elektryczne czerpiące energię z baterii, producenci mają na celu ograniczenie masy pojazdu. Celem takich działań jest zwiększenie realnego zasięgu. Producenci komponentów do pojazdów elektrycznych wprowadzają rozwiązania, których celem jest ograniczenie masy. Materiały wykorzystywane przy produkcji przewodów do układów grzewczo-chłodzących muszą również spełniać wymagania dotyczące funkcjonalności. Takiego rodzaju wymagania są także zmieniane ze względu na rodzaje czynników chłodniczych (R134a, R1234yf, R744) oraz olejów (poliestrowy, glikoli polialkilenowy). Kluczowym elementem podczas doboru materiałów wykorzystywanych do produkcji elementów w układach grzewczo-chłodniczych są również możliwości montażowe. Zróżnicowana budowa pojazdów silnikowych ze względu na wielkość oraz przeznaczenie wpływa na wymagania dotyczące instalacji, serwisu oraz ewentualnej wymiany komponentów. Wybór materiałów opiera się na wielu parametrach np.: na podatność na gięcie, spawanie, lutowanie oraz odporność na czynniki zewnętrzne. Producenci komponentów posiadają szereg wymagań. Jednocześnie zróżnicowanie rynków europejskiego, azjatyckiego, indyjskiego oraz amerykańskiego wpływa na złożoność zagadnienia. Najbardziej wymagający rynek europejski wprowadzający rozwiązania mające na celu zmniejszenie wpływu na środowisko jest prekursorem zmian wpływających jednocześnie na produkt montowany w pozostałych częściach świata. Układy grzewczo-chłodnicze posiadają również zróżnicowanie ze względu na przewidziany czas pracy. Inaczej określane jest wykorzystanie pojazdu pełniącego

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

funkcje transportowe oraz indywidualnego zastosowania. Wpływa to również na krzyżowe zależności związane np. z wpływem ciężaru na zasięg w ciężarówkach elektrycznych. Rozwiązanie takie oparte są na materiałach, których głównym aspektem jest trwałość przy mniejszym nacisku na wagę układu (mniejszy udział masy elementów składowych układów grzewczo-chłodniczych do masy całkowitej pojazdu). Stosowanie przewodów giętkich w całości oraz krótkich odcinków łączeniowych wyraźnie zmniejsza wpływ drgań podzespołów układu. Ułatwia to także instalacje takiego rodzaju układów. Szereg wymagań spełniają obecnie przewody o charakterystyce wielowarstwowej. Na rysunku 23 przedstawiono przykładowy przewód gumowy stosowany do układów grzewczo-chłodniczych.



Rysunek 24 Przykładowy przewód gumowy stosowany do układów grzewczo-chłodniczych

Połączenie przewodów z podzespołami układu oparte jest na złączach. Połączenie z podzespołami może być realizowane za pomocą złącz z nakrętkami oraz połączeń kołnierzowych.

Układy grzewczo-chłodnicze produkowane są z wykorzystaniem różnego rodzaju:

- stopów stali,
- aluminium,
- elastomerów,
- tworzyw sztucznych.

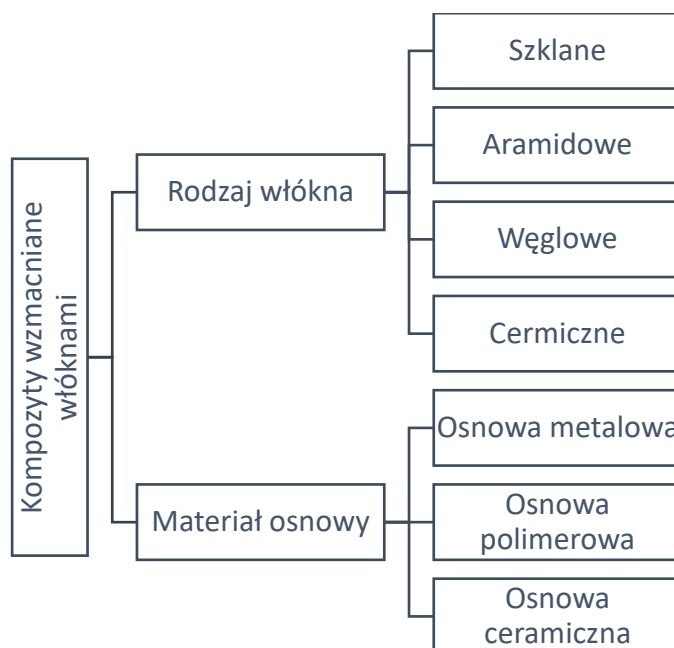
Wszystkie materiały wykorzystywane podczas produkcji elementów do układów grzewczo-chłodniczych posiadają określone parametry fizyko-chemiczne. Gotowy

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

produkt poddany jest skrupulatnym testom na różnych etapach. Testy odbywają się na przygotowanych:

- próbkach materiałowych,
- prototypowym produkcji,
- seryjnym produkcji,
- produkcji o charakterystyce specjalnej.

Przepisy z zakresu ochrony środowiska wpływają na zmiany dotyczące materiałów oraz procesu produkcyjnego. Przez ostatnie lata zwiększona uwaga na emisje CO₂ do atmosfery przełożyła się na stosowanie materiałów o niższej wadze oraz zwiększonej wytrzymałości. Układy grzewczo-chłodnicze z uwagi na coraz bardziej złożone funkcje wykorzystują również coraz więcej przestrzeni w pojazdach. Każdy element instalowany w pojazdach mechanicznych objęty jest wieloma ograniczeniami związanymi również z bezpieczeństwem podczas kolizji. Bezpieczeństwo podróżujących podczas testów zderzeniowych jest wynikiem zachowania wielu elementów w tym układu klimatyzacji. Zmieniające się czynniki chłodnicze oraz oleje sprężarkowe wpływają na zwiększenie wymagań również ze względu na odporność na substancje chemiczne. Obserwowane stosowanie materiałów kompozytowych w mało-seryjnych pojazdach jest związane z bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi przy dużo niższej masie właściwej (porównując do metali). Niższa waga daje możliwości produkcji lekkich elementów układu. Podział materiałów przedstawia rysunek 24.

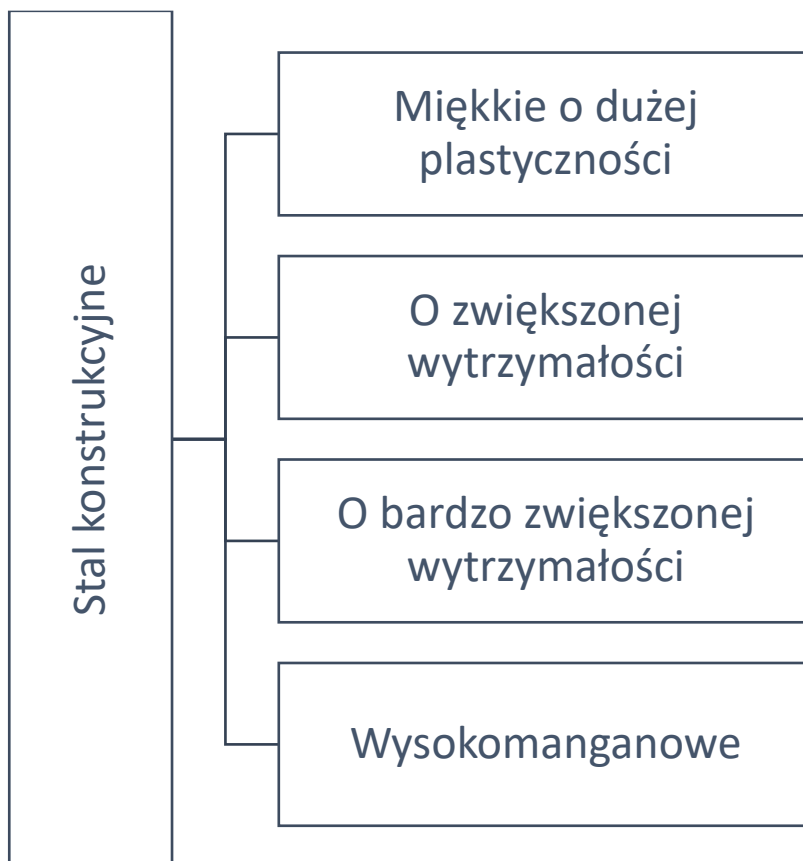


Rysunek 25 Charakterystyka kompozytów wzmocnianych włóknami

Kompozyty z osłona polimerową posiadają wysoką wytrzymałość. Do produkcji kompozytów elementem wzmacniającym jest włókno szklane oraz aramidowe. Wykorzystywane osnowy termoplastyczne oraz termoutwardzalne wykorzystywane są do produkcji elementów mocowań układów grzewczo-chłodniczych. Kompozyty termoplastyczne posiadają włókna krótkie o długości ok. 1 mm. Kompozyty samowzmacniające charakteryzują się zarówno materiałem wzmacniającym jak również osłoną. Wzmocnienie oraz osłona jest produkowana z tego samego materiału. Gęstość samowzmacniających się kompozytów posiada niższe parametry niż kompozytów wzmocnianych włóknem szklanym. Przykładem zastosowania kompozytów są osłony termiczne elementów mogących wpływać na układy grzewczo-chłodnicze. Kompozyty dzięki niższej wadze, łatwości obróbki oraz utrwaleniem posiadają wiele zalet. Cena włókna węglowego jest wyższa niż włókna szklanego ze względu na bardziej skomplikowany proces technologiczny oraz wysokie nakłady energetyczne podczas produkcji. Zalety oraz koszty przekładają się na zastosowanie tego rodzaju technologii w pojazdach klasy premium. Koszty produkcyjne wpływają na ograniczone wykorzystanie tego rodzaju materiałów w pojazdach niższej klasy. Układy grzewczo-chłodnicze ze względu na parametry materiałów oraz koszty produkcji opierają się głównie na stopach stali, aluminium oraz elastomerów.

4.1.1 Stal

Zastosowanie stali w branży motoryzacyjnej jest obserwowane od wielu lat. Elementy konstrukcyjne posiadają wymagania związane z bezpieczeństwem, wytrzymałością zmęczeniową oraz technologia obróbki. Stal znajduje zastosowanie w największym stopniu w elementach nadwozi oraz podwozi pojazdów silnikowych. Z uwagi na moduł sprężystości na poziomie 207GPa, oraz odpowiedni dostęp gotowych półfabrykatów jest głównym materiałem stosowanym w branży motoryzacyjnej. Odpowiednio dobrana stal o zwiększonej wytrzymałości pozwala zmniejszyć rozmiar części, nie wpływając na pogorszenie bezpieczeństwa. Podczas ostatnich kilkudziesięciu lat zmieniała się technologia obróbki, czego następstwem jest zwiększenie dostępności stopów o odpowiednich parametrach. Rozwój działań związanych z produkcją stali obejmują również analizy degradacji w różnych warunkach pracy, przez co możliwy jest precyzyjny dobór odporności korozyjnej zgodnie z zastosowaniem. Zgodnie z przeznaczeniem możliwe jest zwiększenie odporności korozyjnej przez nałożenie warstwy cynku np. Zn-Be, Zn-Ni. Podział stali ze względu na klasy przedstawia rysunek 25.



Rysunek 26 Charakterystyka stali konstrukcyjnych

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Stale niskowęglowe posiadają określone parametry związane z plastycznością. Głównym parametrem jest wytrzymałość na rozciąganie R_m na poziomie 300 MPa oraz wydłużeniem całkowitym na poziomie 30 % do 60 %. Stale o zwiększonej wytrzymałości posiadają wytrzymałości na rozciąganie R_m w przedziale od 300 do 700 MPa, z wydłużeniem całkowitym poniżej 30%. Stale o zaawansowanej zwiększonej wytrzymałości posiadają R_m w zakresie od 700MPa do 2000MPa oraz wydłużenie a 5 % - 30 %.

Zastosowanie stopów stali w układach grzewczo-chłodniczych podyktowane jest wymaganiami w szczególności związanymi z:

- odpornością korozyjną,
- warunkami pracy,
- wielkością poszczególnych odcinków,
- odpornością mechaniczną.

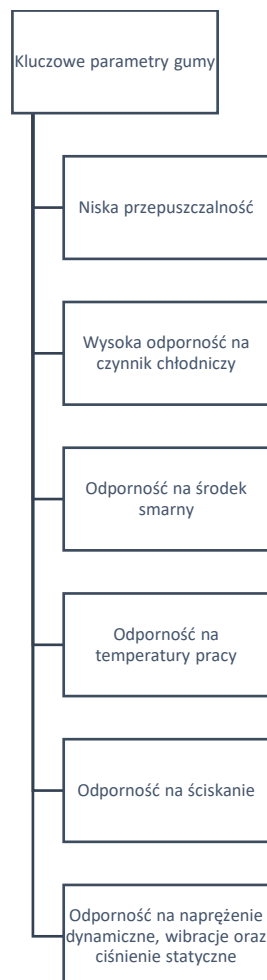
Zróznicowanie systemów klimatyzacyjnych ze względu na przeznaczenie pojazdu posiada również wpływ na dobór materiałów. Pojazdy ciężarowe z uwagi na odległości pomiędzy wymiennikami w układach grzewczo-chłodniczych posiadają zwiększone wymagania dotyczące odporności mechanicznej. Takie wymagania wpływają na zastosowanie stali podczas produkcji elementów łącznych. Eksploatacja pojazdów ciężarowych przede wszystkim obejmuje pracę w cięższych warunkach środowiskowych. Projektowane założenia dotyczące czasu pracy oraz narażenia związanego z ilością przebytych kilometrów w wielu przypadkach eliminują zastosowanie innych materiałów.

4.1.2 Elastomery

Rozwój elementów gumowych do systemów klimatyzacji (uszczelki oraz przewodów) jest skomplikowanym procesem pod względem technologicznym oraz produkcyjnym. Na początku lat dziewięćdziesiątych produkcja przewodów gumowych obejmowała kilka firm w Europie oferujących przewody gumowe do układów klimatyzacji. Przed 2000 rokiem liczba ta zwiększyła się do około 30 firm, które aktywnie uczestniczyły w produkcji oraz rozwoju elementów gumowych. Wraz ze zwiększeniem się liczby firm rozwinęła się konkurencja, która spowodowała obniżenie cen produktów

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

gumowych, czego efektem było stopniowe zmniejszanie zainteresowania tą gałęzią przemysłu. Protokół Montrealski wpłynął na wprowadzenie ograniczeń oraz przepisów regulujących wykorzystanie chlorofluorowęglowodorów stosowanych, jako czynniki chłodnicze. Substancje te w swoim składzie posiadały chlor, który w wyraźny sposób wpływał na rozpad ozonu w warstwach atmosfery. Zmiany czynników chłodniczych wpłynęły również na wykorzystywane do smarowania sprężarki oleje. Podczas wprowadzenia czynnika R-134a został wprowadzony glikol poliakilenowy, który posiadał wyższy zakres temperatury w porównaniu do poprzedniego czynnika R12 oraz oleju mineralnego, jako środka smarnego. Kolejne zmiany na czynnik R1234yf oraz R744 znacząco zmieniły podejście do produkcji mieszanek gumowych na całym świecie. Rysunek 26 przedstawia charakterystykę parametrów gumy.



Rysunek 27 Charakterystyka parametrów gumy

Guma stosowana do produkcji powinna cechować się odpornością na wszystkie wymienione warunki. Wszystkie etapy walidacji opierają się na ocenie końcowego produktu pod kątem przepuszczalności, badania starzeniowego w wyższych

temperaturach oraz badaniem dekompresji. Wszystkie analizy opierają się na określeniu mieszanki gumowej stosowanej w uszczelkach oraz przewodach klimatyzacji. Materiał musi wskazywać odpowiednie parametry przenikania czynnika chłodniczego. Parametr przenikania jest uważany za najważniejszą właściwość dla każdej części stosowanej w systemie klimatyzacji. Dodatkowym ważnym elementem jest określenie poziomu odporności starzeniowej w smarach nasyconych czynnikiem chłodniczym. Wprowadzenie na rynek czynnika R-134a rozpowszechniło wykorzystywanie węży elastomerowych wzmocnionych poliamidem. Niestety ze względu na zwiększoną sztywność materiału oraz w niskich temperaturach zwiększony stopień emisji dźwięku europejscy producenci przewodów do układów grzewczo-chłodniczych wprowadzili rozwiązania oparte o elastomerowy wąż z wewnętrzną częścią opartą o kauczuk nitrylowy uwodorniony a także z warstwa poliamidu. Dodatkowe warstwy posiadają zwiększone parametry odporności na przenikanie. Elastomery takie jak połączenia etylenu, propylenu oraz monomeru oraz kauczuków chloroprenowych wykorzystywane są przez różnych producentów. Japońscy producenci przewodów klimatyzacyjnych zastosowany wąż oparty na butylowej rurze wewnętrznej i osłonie z galogenobutylowej powłoki [63] Mieszanki gumowe wykorzystywane do produkcji na bazie polimerów, kauczuków halogenobutylowych posiadają doskonałą odporność na przenikanie R134a, zwiększoną odporność na tłumienie drgań oraz odporność na niskie temperatury. Producenci elementów gumowych dostosowują materiały do coraz bardziej skomplikowanych wymogów związanych również z ograniczeniami ekologicznymi. Dodatkowym aspektem związanym z parametrami materiału jest hałas w pojazdach elektrycznych, skutkuje to wyborem materiałów posiadających właściwości tłumiące. Przewody gumowe w różny sposób reagują w czasie na warunki pracy. Wraz z długotrwałym oddziaływaniem tlenu w połączeniu z wysoką temperaturą, przewód może ulegać rozerwaniu. Kruchość materiałów w połączeniu z ciśnieniem w instalacji oraz występowaniem drgań układu wpływa na żywotność układów. Takiego rodzaju elementy wpływają na wybór składowych samych przewodów. Przewody stosowane do pracy z czynnikiem R744 posiadają warstwę nieprzepuszczalną oraz utrzymującą ciśnienie. Takiego rodzaju przewody mogą posiadać również warstwę pośrednią wykonaną z kauczuku stabilizowanej termicznie gumy silikonowej. Materiał ten ma doskonałe właściwości starzenia w różnych temperaturach roboczych. Połączenia tego

typu w przeciwieństwie do węży gumowych posiadają zwiększoną trwałość. Niestety eksploatacja jest ograniczona przez zmęczenie materiału oraz korozję. Mechaniczne uszkodzenia są uwzględniane podczas etapu projektowania oraz walidacji układów.

4.1.3 Aluminium

Stopy aluminium są wykorzystywane w motoryzacji, energetyce oraz w lotnictwie. Aluminium cechuje się gęstością wynoszącą około 2700 kg/m³ (stal 8000kg/m³). Wielkości te są głównym powodem tak częstego stosowania tego rodzaju materiałów do budowy elementów, których waga wpływa na pracę układu. Niższa gęstość dodatkowo wpływa na obniżenie parametrów związanych z modułem sprężystości stopów aluminium oraz niższą wartością wytrzymałości zmęczeniowej. Stopy aluminium posiadają wysoką odporność na środowisko o pH między 4 a 9 [64]. Takiego rodzaju odporność jest poszukiwana w zróżnicowanym środowisku pracy pojazdów mechanicznych. Im szerszy zakres odporności tym niższe koszty związane z uszkodzeniem w skrajnych przypadkach użytkowania w niesprzyjającym środowisku. Układy grzewczo-chłodnicze wymagają odpowiedniego poziomu przewodnictwa cieplnego, które jest dobierane przez odpowiedni skład chemiczny. Ekonomicznym aspektem jest również możliwość recyklingu elementów wykonanych z aluminium.

Metalurgia aluminium opiera się na określeniu odpowiedniego składu stopu. Uzyskanie określonych właściwości użytkowych stopu umożliwiają dodatki stopowe. Wszystkie elementy wpływają na właściwości mechaniczne oraz plastyczne materiału. Kolejne procesy obróbki mechanicznej (gięcie, formowanie, lutowanie) wpływają na zmianę charakterystyki. Najważniejsze parametry fizyczne aluminium zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7 Właściwości fizyczne aluminium niestopowego

Właściwość	Jednostka	Wartość	Uwagi
Liczba atomowa Z		13	
Masa masowa A		26,98	
Typ sieci		A1	
Gęstość	kg/m ³	2698	
Temperatura topnienia	°C	660,37	

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Temperatura wrzenia	°C	2494	
Granica plastyczności Rm	MPa	70-120	W stanie wyżarzonym
Nominalna wartość granicy plastyczności Re	MPa	20-40	W stanie wyżarzonym
Granica plastyczności Rm	MPa	140-230	W stanie 60%-80% zgniotu
Nominalna wartość granicy plastyczności Re	MPa	120-180	W stanie 60%-80% zgniotu
Rezystywność p	Ωm	26,548 ¹⁰⁻⁹	W temperaturze 25°C
Przewodność cieplna	W/m^K	237	W temperaturze 27°C

Tabela 8 przedstawia klasyfikacje stopów aluminium według składu chemicznego.

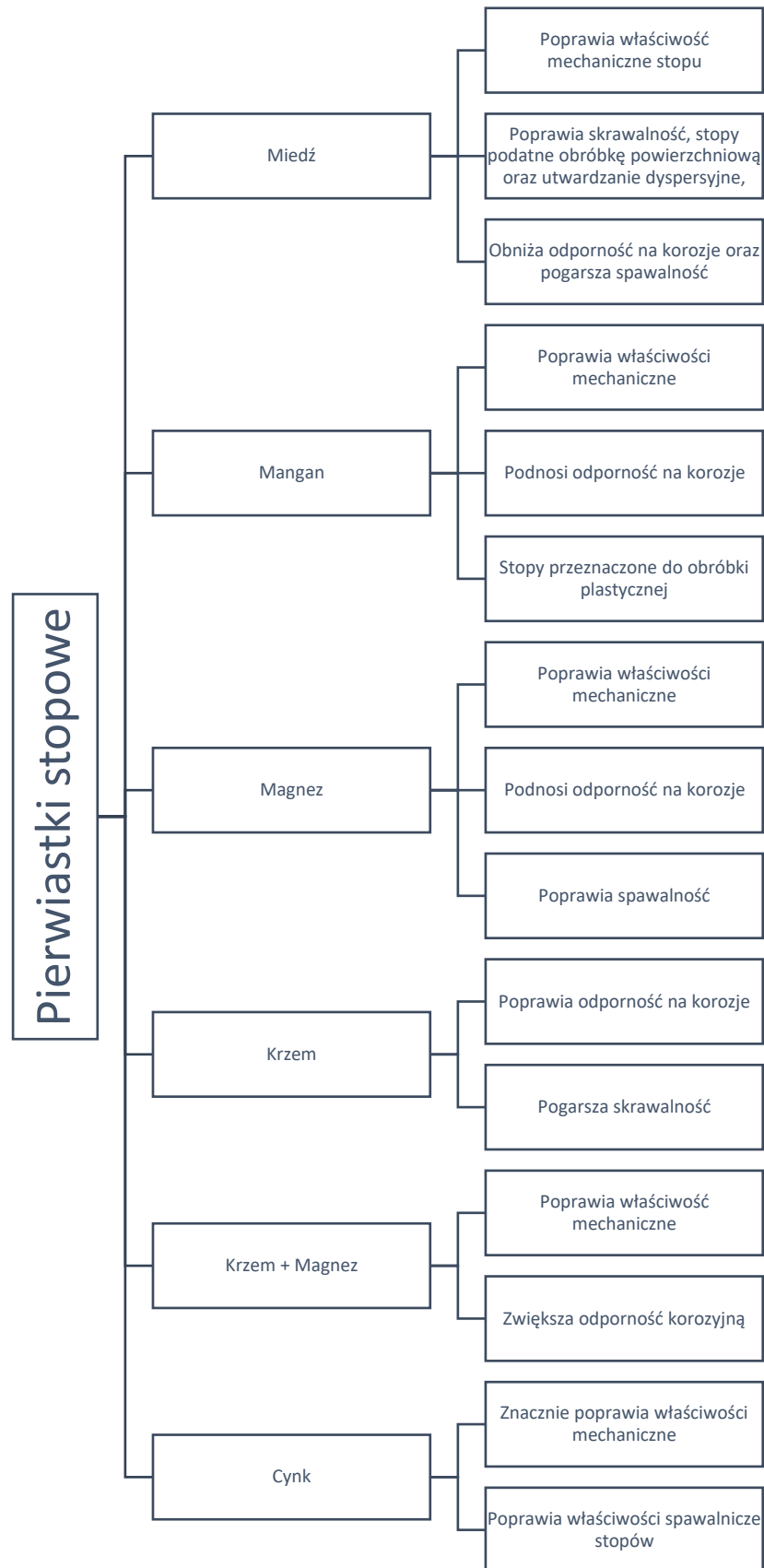
Tabela 8 Klasyfikacja stopów aluminium wg składu chemicznego [65]

Seria stopu aluminium	Główne dodatki stopowe	Charakterystyka
1xxx	Brak (zanieczyszczenia <1%)	Gatunki aluminium z serii 1xxx mają niskie właściwości wytrzymałościowe, zaś bardzo dużą plastyczność, dzięki czemu są podatne do obróbki plastycznej na zimno i na gorąco. Dzięki wysokiej czystości stopu, cechują się dużą odpornością na korozję, gdyż aluminium wykazuje powinowactwo do tlenu. Charakteryzują się także wysoką przewodnością cieplną oraz elektryczną.
2xxx	Cu	Dla stopów z serii 2xxx obserwuje się wzrost twardości w stosunku do 1xxx, jednak znacznie niższa jest odporność na korozję.
3xxx	Mn	Stopy należące do grupy 3xxx wykazują niską wytrzymałość, jednak są podatne do obróbki plastycznej. Są bardzo dobrze spawalne i odporne na korozję.
4xxx	Si	Stopy z serii 4xxx noszą nazwę <i>silumin</i> . Cechuje je wysoka wytrzymałość oraz odporność na korozję.
5xxx	Mg	Odporność na korozję jeszcze większa niż dla 4xxx.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

6xxx	Mg + Si	Stopy z serii 6xxx są odporne na korozję, posiadają dobrą plastyczność, średnią wytrzymałość mechaniczną.
7xxx	Zn + Mg	Seria 7xxx to twarde, wysokowytrzymałe stopy aluminium. Cechuje je najwyższa wytrzymałość spośród wszystkich stopów aluminium, jednak również niewysoka odporność na korozję.
8xxx	Pozostałe , brak klasyfikacji	Grupa 8xxx obejmuje stopy aluminium, których nie sklasyfikowano w poprzednich seriach.

Wpływ domieszek pierwiastków na właściwości stopów aluwiu jest podany na rysunku 27.



Rysunek 28 Charakterystyka pierwiastków stopowych.

Odpowiednio dobrane ilości stopów manganu, magnezu oraz krzemu skutkują zwiększeniem odporności korozyjnej. Jednakże odpowiadające za poprawienie właściwości mechanicznych miedź oraz cynk pogarsza odporność korozyjną. Materiały wykorzystywane podczas produkcji układów grzewczo-chłodniczych w pojazdach są poddawane podczas procesu produkcyjnego obróbce cieplnej. W przypadku stopów aluminium obróbka wpływa na właściwości mechaniczne, jest to walidowane podczas produkcji zróżnicowanych geometrii, średnic oraz połączeń. Parametry mechaniczne zmieniają się również podczas starzenia materiału. Dobór odpowiednich testów podczas produkcji odpowiada za potwierdzenie odpowiednich właściwości podczas planowanej użyteczności układu. Parametry testów oraz początkowy skład wpływa na użyteczność całego układu. Przemiany zachodzące w aluminium oraz ich mechaniczne zmiany podczas narażenia temperaturowego są symulowane na różnych etapach. Przeprowadzone badania ujawniają zmiany wytrzymałości na rozciąganie oraz przesunięcie granicy plastyczności w zależności od czasu narażenia na podwyższone warunki temperaturowe [66]. Tego rodzaju symulacje ograniczają problemy wynikające z wpływu urządzeń towarzyszących (silnika, chłodnicy, tarcz hamulcowych). Wymagania stawiane elementom układów grzewczo-chłodniczych związanych z odpornością korozyjną wpływają również na częsty wybór stopów aluminium, jako materiału do wykorzystania podczas produkcji przewodów do transmisji czynnika chłodniczego. W stopach aluminium korozja występuje w zależności od wielu czynników. W aluminium korozja lokalna pojawia się podczas przerwania warstwy pasywnej, czego następstwem jest pojawienie się korozji wżerowej. Charakterystyczną cechą tego rodzaju korozji jest nieregularny kształt uszkodzeń materiału. Tego rodzaju uszkodzenia pojawiają się podczas symulacji w warunkach nadmorskich. Uszkodzenia tego rodzaju są widoczne gołym okiem, wpływając dodatkowo na aspekt wizualny. Zróżnicowanie producentów pojazdów, rynków odbiorczych oraz klienta indywidualnego wprowadza różnego rodzaju dodatkowe wymagania w tym wizualne. Inne wymagania przewidziane są w pojazdach ciężarowych, a inne do pojazdów typu ekskluzywnych oraz sportowych gdzie aspekt wizualny stanowi ważny element. W ramach przeprowadzonych zestawień, porównań oraz badań pomiędzy różnymi materiałami stosowanymi do układów grzewczo-chłodniczych, wyraźnie najlepszymi parametrami charakteryzuje się aluminium. Również wyraźnym elementem jest niskie zainteresowanie oraz

wykorzystanie przez producentów stali oraz elastomerów do produkcji przewodów. Niewykluczone, że pojawienie się nowych materiałów o znacząco lepszych parametrach, niskiej cenie oraz odpowiedniej dostępności, zmieni ten rozkład ciężkości rynku.

4.2 Badania szczelności

Metody badań szczelności oparte są na badaniach nieniszczących. Od 1920 roku metody stosowane do testowania bez niszczenia obiektu znacząco się rozwinęły. Celem badań szczelności są:

- unikanie awarii, zapobieganie wypadkom,
- zwiększenie niezawodności produktu,
- zmniejszenie wad wpływających na nieszczelności,
- kontrolę procesu produkcyjnego,
- obniżenie kosztów,
- kontrolę jakości produktu.

Badania szczelności związane są z finansowymi aspektami dotyczącymi kosztów materiału, opłat za zanieczyszczenie oraz określonymi poziomami niezawodności. Dobór metodyki badawczej opiera się jednocześnie na określeniu zakresu badawczego. Koszty związane z materiałem wprost związane są analizą dotyczącą okresu użyteczności np. przewodu do układów grzewczo-chłodniczych. Badany element podczas eksploatacji nie powinien zwiększyć poziomu przepuszczalności od przewidzianego podczas doboru materiału. Ograniczenia związane z zanieczyszczeniem dotyczą również strat medium, które zasila układ. Skażenie czynnikiem chłodniczym może wpływać na pojazd, zagrażać zdrowiu pasażerów, bezpieczeństwu oraz zagrażać środowisku naturalnemu. Niezawodność wpływa na ocenę nieprawidłowości funkcjonowania systemu oraz zapobiega awarii.

Określanie nieszczelności opiera się na umiejętnościach oraz informacjach dotyczących produktu. Wszystkie nieszczelności niezależnie od wielkości określa się ze względu na:

- naprężenia wstępne, lokalne lub chwilowe wpływające na zwiększenie lub zmniejszenie nieszczelności

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

- temperaturę medium, temperaturę otoczenia lub temperaturę elementów niezwiązanych z układem (o znaczącym wpływie na układ),
- geometrię nieszczelności oraz jej zmian podczas drgań, temperatury, ciśnienia oraz kontaktu z substancjami chemicznymi.

Poziom nieszczelności opiera się w zależności od rodzaju badań na lokalnych lub sumarycznych poziomach. Przyjęcie poziomów powyżej założeń wpływa na koszty produkcyjne. Wpływ czynników chłodniczych na środowisko zwiększa nacisk na ograniczenie zużycia oraz emisji samoistnej poprzez przepuszczalność. Jednoczesna zmiana charakterystyki pojazdów oraz ograniczenie masowe ogranicza możliwości stosowania materiałów o mniejszej przepuszczalności. Złożoność układów grzewczo-chłodniczych oraz ich zróżnicowane funkcje zwiększają ryzyko awarii. Awaria systemu grzewczo-chłodniczego lub jego nieszczelność związana jest z kosztownymi pracami serwisowymi (lokalizacja nieszczelności w pojeździe jest skomplikowana ze względu na ograniczenia powierzchni). Nieszczelność układu lub pojedynczego elementu może wpłynąć na uszkodzenie kompresora (podatność na wilgoć). Pomiar całkowity nieszczelności jest metodą określającą poziom nieszczelności. Podczas testów układu określa się czy występuje nieszczelność, a następnie lokalizuje uszkodzenie. Pomiar poszczególnych punktów układu określa nieszczelność całkowitą obiektu jednakże należy uwzględnić wpływ rodzaju sondy pomiarowej na pomiar. Nieszczelność mierzona jest w jednostkach ilości gazu przepływającego przez dany przekrój układu. Określona jest liczba moli, cząsteczek lub masy w jednostce czasu (mol/s ; kg/s ; n/s ; Pam^3/s ; w ; g/a). Jednostką nieszczelności jest objętość 1 m^3 ciśnienia, które zmiana się o 1 Pa w ciągu 1 sekundy lub 1 mbar w ciągu 1 sekundy . W tabeli 9 została przedstawiona tabela przeliczeniowa jednostek nieszczelności.

Tabela 9 Tabela przeliczeniowe jednostek szczelności

Pa m ³ /s	g/a (R12,20°C)	Torr l/s	cm ³ /s	cm ³ /h	kg/h (0°C)	kg/h (20°C)	mbar l/s	
10	6,39*10 ⁻⁶	1,33	1,013	2,81*10 ⁻⁴	218	234	1	mbar l/s
4,28*10 ⁻²	-	5,70*10 ⁻³	4,33*10 ⁻³	1,20*10 ⁻⁶	0,932	1	4,28*10 ⁻³	kg/h (20°C)
4,59*10 ⁻²	-	6,12*10 ⁻³	4,65*10 ⁻³	1,29*10 ⁻⁶	1	1,073	4,59*10 ⁻³	kg/h (0°C)
35,54*10 ³	2,27*10 ⁻²	4737	3600	1	7,74*10	8,31*10 ⁵	3554	cm ³ /h
9,87	6,31*10 ⁻⁶	1,32	1	2,78*10 ⁻⁴	215	231	0,987	cm ³ /s
7,50	4,80*10 ⁻⁶	1,32	1	2,11*10 ⁻⁴	163	175	0,75	Torr l/s
1,56	1	2,08*10 ⁵	1,58*10 ⁵	44	-	-	1,56*10 ⁵	g/a (R12,20°C)
1	6,41*10 ⁻¹	1,33*10 ⁵	1,01*10 ⁵	28,10	21,8*10 ⁶	23,4*10 ⁶	1,00*10 ⁶	Pa m ³ /s

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Nieszczelność standardowa, jako wartość przepływu odniesienia jest stosowana do przepływu o różnicy ciśnienia 1 bar do próżni.

Próbki do badań zostały podzielone na odcinki:

- odcinek aluminiowy,
- opaska łączeniowa aluminium z odcinkiem elastycznym,
- odcinek elastyczny.

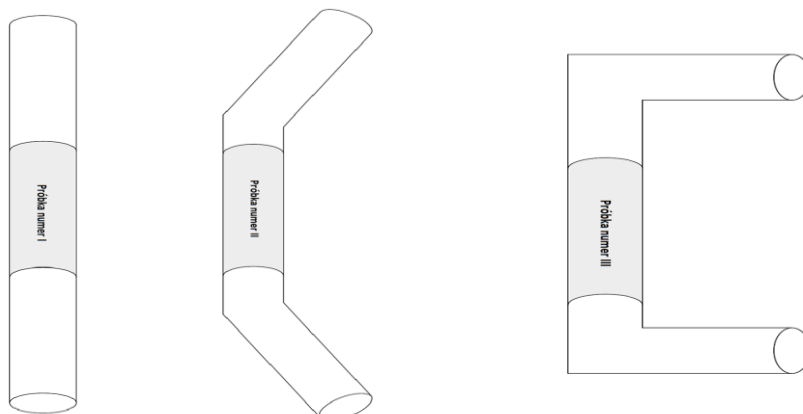
Badanie przeprowadzono w warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem próbek nowych. Proces produkcji odcinków aluminiowych ze względu na różnice w geometrii podlega różnym procesom gięcia.

Próbki do badań nieszczelności zostały zdefiniowane zgodnie z tabelą 10 przedstawiającą zestawienie próbek badawczych ze wskazaniem różnic w geometrii przewodu.

Tabela 10 Zestawienie próbek badawczych ze wskazaniem różnic w geometrii przewodu.

	Próbka I	Próbka II	Próbka III
Lokalizacja w układzie		Połączenie kompresora z skraplaczem	
Ciśnienie robocze dla układu R1234yf		9-17 bar	
Budowa		Odcinek aluminiowy + odcinek elastyczny	
Długość odcinka aluminiowego		15 cm	
Długość odcinka elastycznego	10cm	17cm	20cm
Kąt odcinka aluminiowego	0°	45°	90°

**Kształt próbki
badawczej**

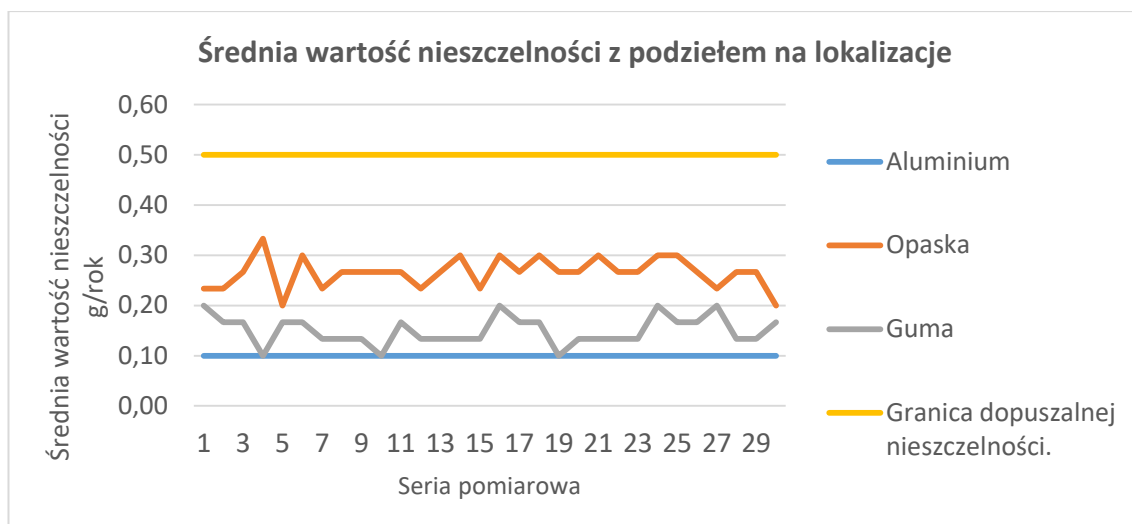


Badanie szczelności zostało przeprowadzone według standardowej procedury z wykorzystaniem czynnika R1324yf oraz wykrywacza nieszczelności przedstawionego na rysunku 29. Próbki badawcze zostały napełnione do poziomu 5 bar z wykorzystaniem czynnika chłodniczego R1234yf. Procedura standardowa definiuje badanie próbki powierzchniowo w celu potwierdzenia wartości nieszczelności poniżej poziomu 0.5g/rok. Wartości powyżej poziomu dopuszczalnego dyskwalifikują próbkę badaną. Przeprowadzone badanie zostało rozszerzone o własne niestandardowe analizy mapujące próbkę oraz przypisując wynik pomiaru do lokalizacji. Tabela 11 przedstawia wyniki pomiarów nieszczelności według niestandardowej metodologii.

Tabela 11 Wyniki pomiarów nieszczelności według niestandardowej metodologii.

Pomiar	Pomiar szczelności, gram/rok														
	Próbka I			Próbka II			Próbka III			Średnia					
	Aluminium	Opaska	Guma	Aluminium	Opaska	Guma	Aluminium	Opaska	Guma	Aluminium	Opaska	Guma			
1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,10	0,23	0,20
2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,10	0,23	0,17
3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,10	0,27	0,17
4	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,10	0,33	0,10
5	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,10	0,20	0,17
6	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,30	0,17
7	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,10	0,23	0,13
8	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,10	0,27	0,13
9	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,10	0,27	0,13
10	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,10	0,27	0,10
11	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,10	0,27	0,17
12	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,10	0,23	0,13
13	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,10	0,27	0,13
14	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,10	0,30	0,13
15	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,10	0,23	0,13
16	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,30	0,20
17	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,27	0,17
18	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,30	0,17
19	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,10	0,27	0,10
20	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,10	0,27	0,13
21	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,10	0,30	0,13
22	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,10	0,27	0,13
23	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,10	0,27	0,13
24	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,30	0,20
25	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,10	0,30	0,17
26	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,10	0,27	0,17
27	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,23	0,20
28	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,10	0,27	0,13
29	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,10	0,27	0,13
30	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,10	0,20	0,17
Srednia, gram/rok	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,10	0,27	0,15

Rysunek 28 przedstawia średnią wartość nieszczelności z podziałem na lokalizację.



Rysunek 29 Średnia wartość nieszczelności z podziałem na lokalizacje.

Uśredniona wartość nieszczelności według lokalizacji nie uwzględniona w standardowej procedurze badawczej wskazała poziomy

- opaska 0,3 gram/rok,
- odcinek elastyczny 0,2 gram/rok,
- aluminium 0,1 gram/rok.

Podczas przeprowadzania testów szczelności pojawiły się 3-krotne różnice w poziomach nieszczelności z wyraźnym podziałem według lokalizacji. Standardowe badania szczelności dla przewodu nowego, wskazały poziomy nieszczelności w granicy do 0,5 gram/rok wykazując poziom akceptowalny. Niestandardowa procedura opierająca się na dodatkowym mapowaniu przewodu pozwoli na modyfikację metodyki w celu:

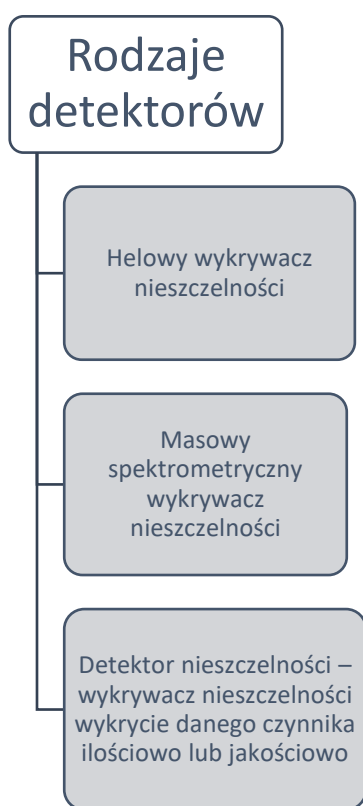
- wprowadzenia ekonomicznych krótkich testów szczelności wyłącznie w lokalizacjach o podwyższonym poziomie nieszczelności,
- wprowadzenia ekonomicznego monitoringu poziomu nieszczelności podczas eksploatacji zwiększy stabilność efektywności energetycznej podczas pracy układu,
- mapowanie lokalnych nieszczelności nowych przewodów do kolejnych testów laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych.

4.2.1 Charakterystyka przepuszczalności materiałów

Pomiar przepuszczalności materiałów zależy od wielu czynników:

- czas realizacji,
- dostępność urządzenia,
- dokładność pomiaru,
- warunki zastosowania.

Na rysunku 29 przedstawiono zestawienie rodzajów detektorów.



Rysunek 30 Zestawienie rodzajów detektorów

Detektory nieszczelności wykorzystywane podczas pomiaru są przyrządami lub systemami zdolnymi do wykrycia danego czynnika (ilościowo lub jakościowo). Na rysunku 30 przedstawiono wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000



Rysunek 31 Wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000

Wykrywacz nieszczelności Inficon HLD 6000, posiada charakterystykę kompaktowego urządzenia pomiarowego do stosowania w zróżnicowanych warunkach. Dwukanałowy system wlotowy porównuje stężenie tła oraz gazu pomiarowego, redukując błędne pomiary. Sonda pozwala na definiowanie punktowe nieszczelności w układach grzewczo-chłodniczych. System wykrywania oparty jest na pomiarze w podczerwieni, zwiększając czas reakcji podczas pomiaru. Zwiększając częstotliwość wykorzystania portu kalibracyjnego do porównania wskazań z gazem wzorcowym wpływa na ograniczenie błędów pomiarowych. Najmniejsza wykrywalna wartość nieszczelności dla sondy dedykowanej do pojedynczego gazu wynosi 1,0 g/rok, z sonda uniwersalną 0.5 g/rok. Ważnym aspektem jest reakcja na nieszczelność wynosząca poniżej 1 sekundy.

Urządzeniem posiadającym zwiększoną dokładność jest helowy wykrywacz nieszczelności. Ze względu na detekcje opartą o pomiar mas wodoru oraz helu urządzenie posiada zwiększoną dokładność. Minimalna wykrywalna nieszczelność jest parametrem niezbędnym w analizie. W celu ustalenia optymalnych warunków testu wybierana metoda posiada określoną dokładność. Celem dokładnego określenia nieszczelności wyspecyfikowane są parametry:

- maksymalnej nieszczelności,
- warunków ciśnienia oraz temperatury,
- warunków pomiarowych,
- metodyki pomiarowej nieszczelności.

4.3 Badania przepuszczalności materiałów

Metody wykrywania nieszczelności oparte są na specyfikacji układu grzewczo-chłodniczego. Inne metody zostaną dobrane do elementów mających na celu transmisję płynów chłodniczych oraz czynnika roboczego. Zestawienie w tabeli 12 przedstawia metody badania nieszczelności z podziałem na czułość.

Tabela 12 Zestawienie metod badania przepuszczalności materiałów

Metoda	Czułość, mbar l/s	Uwagi
Próba pęcherzykowa	$10^2 - 10^3$	Wysoki wpływ operatora, utrudnione utrzymanie geometrii, zredukowany wpływ temperatury.
Test spadku ciśnienia	$10^{-1} - 1$	Znaczący wpływ temperatury

Metoda gazu próbnego	$10^{-2} - 10^{-10}$	Wykorzystywane gazy to Hel, wodór
Spektrometry mas	$10^{-4} - 10^{-7}$	Metoda specjalistyczna
Helowy specjalizowany spektrometr	$10^{-14} - 10^{-8}$	

Dobór metody pomiaru nieszczelności związany jest z etapem produkcji poszczególnych elementów. Inne metody są stosowane podczas seryjnej produkcji komponentów (metody helowe), badania laboratoryjne gotowych komponentów wprowadzają dodatkowe warunki (ciśnienie, temperaturę). Diagnostyka kompletnego układu opiera się na pomiarze dedykowanego czynnika chłodniczego. Lokalizowanie wycieków często związane z widocznymi lokalnymi plamami oleju sprężarkowego jest metodą wstępną do dokładniejszego pomiaru. Lokalizowanie nieszczelności zabudowanego układu opiera się na napełnianiu układu dodatkowo płynem fluorescencyjnym, który dodany podczas napełniania do czynnika chłodniczego wypełnia układ. Płyn fluorescencyjny nie jest szkodliwy dla układu pracy. Ocena wycieku związana jest wykorzystaniem źródła światła ultrafioletowego oraz oceny wzrokowej. Jest to metoda stosowana również w warunkach laboratoryjnych do korelacji wyników wykonanych podczas użytkowania. Stosowaną metodą do określania nieszczelności w warunkach testowych jest próba ciśnieniowa z wykorzystaniem gazu np. azotu. Próba stosowana w pojazdach podczas oceny układu pozwala przez ocenę zmian ciśnienia w układzie w jednostce czasu określić poziom nieszczelności. Metoda pozwala również na porównanie w warunkach laboratoryjnych wyników uzyskanych w warunkach użytkowych.

W trakcie pracy przeprowadzono badania na trzech próbkach badawczych zgodnie przedstawionych w tabeli 10. Badania zostały przeprowadzone w analogiczny sposób dla

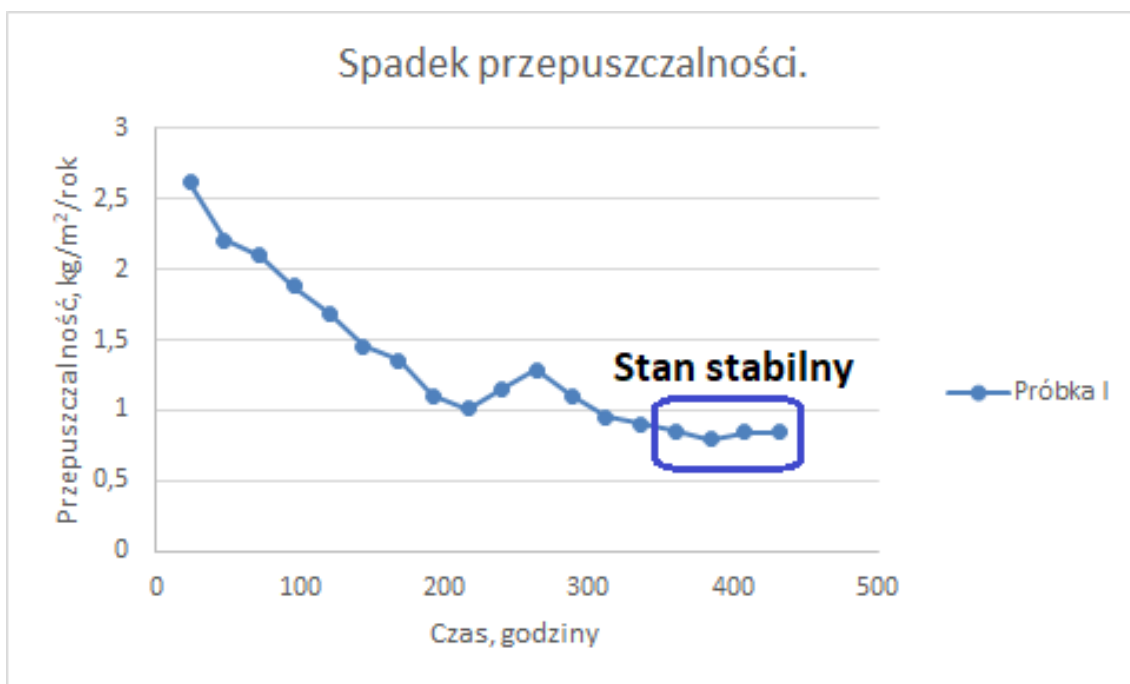
Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

każdej z próbek zgodnie z standardową procedurą. Próbki badawcze zostały napełnione R1234yf do 70% objętości następnie zważone i poddane narażeniu temperaturowemu w 80°C. Cykl narażenia temperaturowe wynosi 24godziny, następnie przeprowadzano pomiary wagowe ubytku czynnika. Poziom przepuszczalności określa się po ustabilizowaniu wyników do stanu stabilnego w którym cztery ostatnie pomiary zawierają się w granicy 10% najniższego. Wyniki pomiarów określone są na podstawie zmiany wagi przedstawiając wynik ekwiwalencie $\text{kg/m}^2/\text{rok}$ ubytku czynnika. Tabela 133 przedstawia wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki I.

Tabela 13 Wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki I.

Godziny	Próbka I	Granica stanu stabilnego	Wynik+10%	Stan stabilny			
24	2,62		2,72	NOK	NOK	NOK	NOK
48	2,21		2,31	NOK	NOK	NOK	NOK
72	2,10		2,20	NOK	NOK	NOK	NOK
96	1,88	1,98	1,98	OK	NOK	NOK	NOK
120	1,69	1,79	1,79	OK	NOK	NOK	NOK
144	1,45	1,55	1,55	OK	NOK	NOK	NOK
168	1,35	1,45	1,45	OK	NOK	NOK	NOK
192	1,10	1,20	1,20	OK	NOK	NOK	NOK
216	1,01	1,11	1,11	OK	OK	NOK	NOK
240	1,15	1,11	1,25	NOK	OK	OK	NOK
264	1,29	1,11	1,39	NOK	NOK	OK	OK
288	1,10	1,11	1,20	OK	NOK	NOK	OK
312	0,95	1,05	1,05	OK	NOK	NOK	NOK
336	0,90	1,00	1,00	OK	OK	NOK	NOK
360	0,85	0,95	0,95	OK	OK	NOK	NOK
384	0,79	0,89	0,89	OK	OK	NOK	NOK
408	0,84	0,89	0,94	OK	OK	OK	NOK
432	0,84	0,89	0,94	OK	OK	OK	OK

Rysunek 32 przedstawia wykres spadku przepuszczalności dla próbki I.



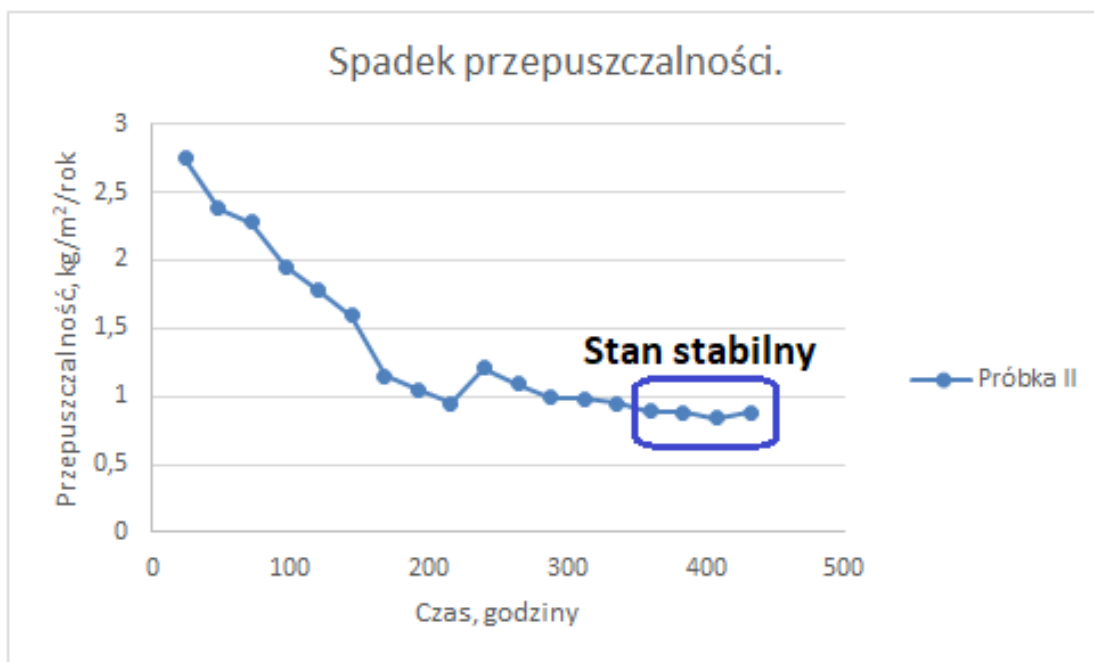
Rysunek 32 Wykres spadku przepuszczalności dla próbki I.

Tabela 14 Wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki II.

Tabela 14 Wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki II.

Godziny	Próbka II	Granica stanu stabilnego	Wynik+10%	Stan stabilny			
24	2,75		2,85	NOK	NOK	NOK	NOK
48	2,38		2,48	NOK	NOK	NOK	NOK
72	2,28		2,38	NOK	NOK	NOK	NOK
96	1,95	2,05	2,05	OK	NOK	NOK	NOK
120	1,78	1,88	1,88	OK	NOK	NOK	NOK
144	1,59	1,69	1,69	OK	NOK	NOK	NOK
168	1,15	1,25	1,25	OK	NOK	NOK	NOK
192	1,05	1,15	1,15	OK	NOK	NOK	NOK
216	0,95	1,05	1,05	OK	NOK	NOK	NOK
240	1,21	1,05	1,31	NOK	OK	NOK	NOK
264	1,09	1,05	1,19	NOK	NOK	OK	NOK
288	0,99	1,05	1,09	OK	NOK	NOK	OK
312	0,98	1,08	1,08	OK	OK	NOK	NOK
336	0,95	1,05	1,05	OK	OK	OK	NOK
360	0,89	0,99	0,99	OK	OK	OK	NOK
384	0,88	0,98	0,98	OK	OK	OK	NOK
408	0,84	0,94	0,94	OK	OK	OK	NOK
432	0,88	0,94	0,98	OK	OK	OK	OK

Rysunek 33 przedstawia wykres spadku przepuszczalności dla próbki II.



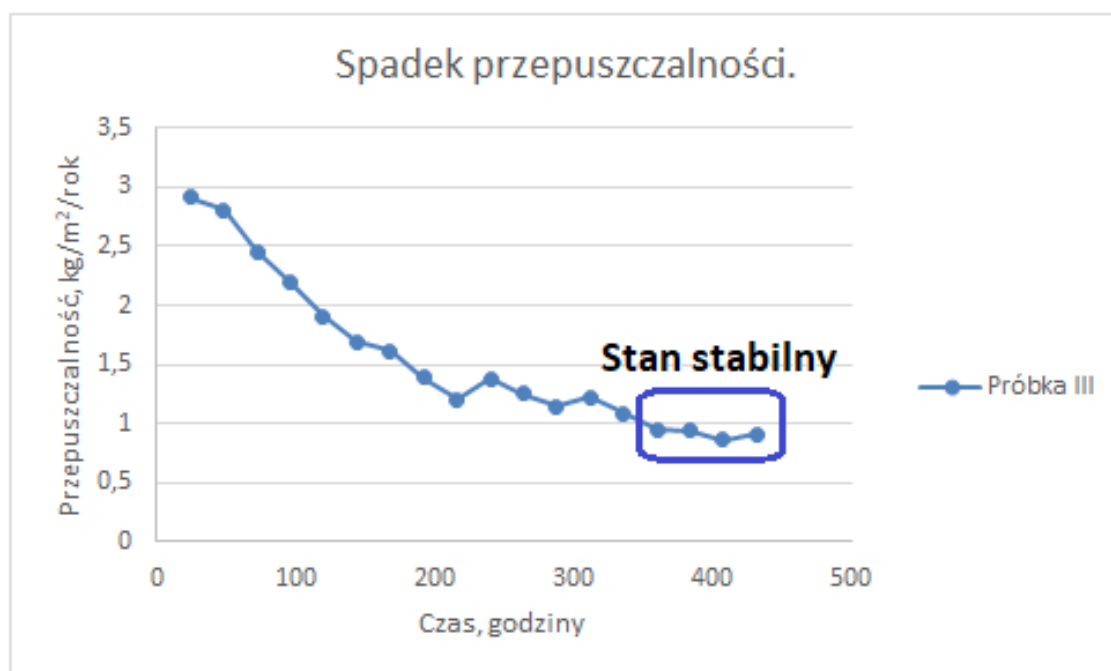
Rysunek 33 Wykres spadku przepuszczalności dla próbki II.

Tabela 15 Wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki III.

Tabela 15 Wyniki pomiarów przepuszczalności dla próbki III.

Godziny	Próbka III	Granica stanu stabilnego	Wynik+10%	Stan stabilny			
24	2,91		3,01	NOK	NOK	NOK	NOK
48	2,80		2,90	NOK	NOK	NOK	NOK
72	2,45		2,55	NOK	NOK	NOK	NOK
96	2,20	2,30	2,30	OK	NOK	NOK	NOK
120	1,91	2,01	2,01	OK	NOK	NOK	NOK
144	1,69	1,79	1,79	OK	NOK	NOK	NOK
168	1,61	1,71	1,71	OK	OK	NOK	NOK
192	1,39	1,49	1,49	OK	NOK	NOK	NOK
216	1,20	1,30	1,30	OK	NOK	NOK	NOK
240	1,38	1,30	1,48	NOK	OK	NOK	NOK
264	1,25	1,30	1,35	OK	NOK	OK	NOK
288	1,15	1,25	1,25	OK	NOK	NOK	OK
312	1,22	1,25	1,32	OK	OK	NOK	NOK
336	1,09	1,19	1,19	OK	NOK	OK	NOK
360	0,95	1,05	1,05	OK	NOK	NOK	NOK
384	0,94	1,04	1,04	OK	OK	NOK	NOK
408	0,86	0,96	0,96	OK	OK	OK	NOK
432	0,91	0,96	1,01	OK	OK	OK	OK

Rysunek 34 Wykres spadku przepuszczalności dla próbki III.



Rysunek 34 Wykres spadku przepuszczalności dla próbki III.

Wyniki badań pokazały że odcinki charakteryzują się przepuszczalności niższa od 1.5 kg/m²/rok spełniając wymagania standardowe. Bezpośrednio wskazując wpływ długości przewodu elastycznego na zużycie czynnika roboczego w ciągu roku. Metodologia przeprowadzonych badań pozwoliła ustalić:

- długość przewodu nie wpływa na czas po którym osiągnięty jest stan stabilny
- różnicowany proces produkcji przewodów o różnych geometriach nie wpływa na poziom przepuszczalności,
- zmniejszenie długości przewodu gumowego bezpośrednio wpływa na zużycie czynnika chłodniczego,
- brak badań przepuszczalności na przewodach po testach eksploatacyjnych,
- brak wyników z badań z przepuszczalności w zmiennych warunkach pracy.

Standardowa temperatura wykorzystywana do prowadzenia badań przepuszczalności na przewodach nowych może nie odzwierciedlać rzeczywistych warunków pracy układu grzewczo-chłodniczego.

4.4 Badanie odporności chemicznej elementów do transportu czynnika roboczego

4.4.1 Odporność korozyjna

Podczas pracy w różnych warunkach środowiskowych, przewody układów grzewczo-chłodniczych są narażone na występowanie korozji. Systemy ze względu na budowę, środowisko pracy oraz miejsce montażu są narażone w zróżnicowany sposób. Kluczowym etapem podczas procesu projektowania, walidacji oraz oceny końcowej produktu jest odpowiednia ocena środowiska wpływającego na rozwój korozji. Podczas projektowania przewodów stosowanych do pracy z czynnikiem R744 stale nierdzewne wskazują odporność na działanie czynnika chłodniczego, (CO₂) oraz olejów syntetyczny z glikolem polialkilenowym oraz olejów poliestrowych. Charakterystyka materiałowa pozwala zminimalizować poziom uszkodzeń związanych z wewnętrznym narażeniem na szkodliwe warunki pracy. W takich sytuacjach nie występuje korozja wewnętrzna (podczas poprawnego działania układu). Czas pracy wymagany dla układów grzewczo-chłodniczych obejmuje 15 lat lub 300 000 km. Konieczne jest projektowanie odporność na korozję zewnętrzną, której głównym powodem jest sól występująca w różnych warunkach użytkowania pojazdu. Podczas pracy w temperaturach roboczych od -40°C do 180°C, występują zróżnicowane rodzaje korozji. Wystarczającą odporność na korozję wykazują austeniczne stale nierdzewne o wysokiej zawartości chromu, niklu oraz molibdenu w węzłach metalowym oplocie oraz elementach łączących. Elementy metalowe są łączone za pomocą spawania laserowego. Technologia ta zmniejsza pobór ciepła i poprawia odporność na korozję w obszarze łączenia.

4.4.1.1 Urządzenia do prowadzenie badań korozyjnych

Materiały poddawane obciążeniom w komorach klimatycznych w zróżnicowanych warunkach ulegają procesowi zniszczenia spowodowanego korozją. Rodzaje korozji są również charakteryzowane ze względu na rodzaj czynnika wpływającego na materiał. Do czynników, które wpływają na korozję zalicza się:

- wilgotność powietrza,
- cząstki stałe w powietrzu,
- rozpylone związki chemiczne.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Ocena odporności korozyjnej elementów układów grzewczo-chłodniczych wykonywana jest podczas badań symulujących cykle eksploatacyjne, podczas których elementy układu poddawane są działaniu czynników atmosferycznych oraz ich obserwacji (badania eksploatacyjne). Z uwagi na koszty przeprowadzania takiego rodzaju badań, wykonywane są badania poszczególnych elementów w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem komór klimatycznych. Przeprowadzane próby odporności na działania różnych środowisk (np. dwutlenek siarki, mgła solna) wraz z ustalaniem stopnia skorodowania oraz szybkości korozji są znormalizowane. Badania eksploatacyjne dzielimy na:

- próby technologiczne,
- badania polowe.

Badania korozyjne można podzielić również ze względu na czas ekspozycji, w tym badania długotrwałe oraz przyspieszone. Krótkotrwałe badania opierają się na jednym lub kilku czynnikach korozyjnych, które zostają wzmocnione, aby proces korozyjny przebiegał odpowiednio szybciej niż w warunkach eksploatacyjnych. Próby tego rodzaju opierają się również na podwyższonej wilgotności względnej oraz temperaturze. Dodatkowym aspektem jest natrysk solanki, który odpowiada warunkom atmosferycznym w regionach morskich. Na rysunku 34 przedstawiono uniwersalną komorę do badań korozyjnych.



Rysunek 35 Komora do badań korozyjnych

Metody badań w komorach korozyjnych wskazują wielokrotnie szybsze rezultaty korozyjne, przez co znacząco wpływa na koszty tego rodzaju pomiarów. Obniżone koszty istotnie wpływają na wykorzystanie podczas wstępnej oceny możliwości stosowania opracowanych materiałów konstrukcyjnych, elementów dodatkowych oraz ochronnych. Badania w komorze solnej mają na celu ekspozycję elementów układów grzewczo-chłodniczych w całości lub konkretnych odcinków w atmosferze mgły uzyskiwanej przez rozpylanie wodnego roztworu o określonym stężeniu wraz z określoną temperaturą. Badane elementy zostają umiejscowione na rusztach w sposób ograniczający zbieranie się roztworów na powierzchni próbek, oraz wykluczający pokrycie próbki roztworem po kontakcie z inną próbką (ułożenie poziome). Roztwory wykorzystywane są jednokrotnie następnie są odprowadzane na zewnątrz komory. Najdłuższe testy korozyjne trwają 24 tygodnie, w tym czasie ekspozycja jest okresowo zmieniana. Wykorzystywane komory korozyjne wykonane są z materiału niereaktywnego z stosowanymi substancjami. Odpowiednia budowa komory korozyjnej nie eliminuje różnic w narażeniu ze względu na umiejscowienie w komorze. W celu skompensowania różnic, próbki tego samego typu umieszczone są w komorze klimatycznej według schematów dostarczanych przez klienta. Dodatkowo rozbieżności występują ze względu na rodzaj komory. Próbki w komorze zaleca się ustawić w pozycji pochyłej lub prostopadłej. Komory posiadające układy programujące mają możliwość stosowania ramp, które w zależności od potrzeb w określonym stopniu symulują warunki ekspozycji naturalnej. Sterowanie w cyklach trwających 30 minut, z wykorzystaniem dysz rozpylających pozwalają na uzyskanie warunków badań odpowiadającym całkowitemu zanurzeniu próbek w roztworze NaCl intensywnie mieszanym z powietrzem. Podczas próbek z silnym napowietrzeniem korozja przebiega około pięciokrotnie szybciej. Sterowanie temperaturą oraz wilgotnością pozwala na uzyskanie warunków przyspieszonego badania korozyjnego symulując np. zwiększone zasolenie.

Etapem oceny odporności korozyjnej są pobrane skośnie, poprzecznie lub podłużnie względem osi materiału zgłady metalograficzne. Próbki wykorzystywane są następnie do badań mikroskopowych oraz makroskopowych. Odpowiednie dobranie przekroju wpływa na obraz struktury w całym badanych elemencie. Ocena struktury metalu oraz stopu opiera się na badaniach metalograficznych, przy czym w zależności od stosowanego urządzenia oraz powiększenia badania podzielone są na grupy:

-makroskopowe, do ocen, których wykorzystywane są powiększenia nie większe niż 40-krotne z wykorzystaniem lupy lub nieuzbrojonego oka,

-mikroskopowe, z zastosowaniem mikroskopu metalograficznego optycznego powiększającego w przedziale 50 – 1500 razy oraz mikroskopu elektronowego przekraczającego powiększenie rzędu 100 000 razy.

Ocena badań odbywa się najczęściej na mikroskopie optycznym.

4.4.2 Metodyka badań korozyjnych

Metodą oceny jest procedura przyspieszonego badania korozyjnego, w którym cyklicznie natryskiwany jest wodny roztwór kwasu octowego oraz chlorku sodu, jako czynnika korozyjnego. Metoda ta jest znana, jako test wody morskiej z kwasem octowym. Końcowy etapem jest ocena opracowywana przy użyciu mikroskopu oraz zglądów metalograficznych (mikro-przekrojów poprzecznych). Badanie przeprowadzane jest w związku z obciążeniem korozyjnym od zewnątrz. Badanie rozpoczyna się próba szczelności, z określonym ciśnieniem. W celu wyeliminowania wpływu solanki na wewnętrzne warstwy przewodu, wszystkie otwory robocze zostają szczelnie zablokowane z wykorzystaniem odpornych na warunki testowe materiałów. Badanie przeprowadzane jest odpowiednio z analitycznie czystą solą kuchenną, wodą destylowaną oraz kwasem octowym. Celem ustalenia pH roztworu w granicy 2,8 do 3,0 stosuje się NaO. Narażenie odbywa się w ustalonej temperaturze 50°C, której stały monitoring jest zapisywany podczas testu. Badania symulujące narażenia korozyjne oparte są również na roztworach soli kuchennej z chlorkiem wapnia przy pH roztworu w zakresie 6,5 do 7,2 (ustalanego poprzez kwas chlorowodorowy). Badanie podzielone jest na cykle oraz sekwencje. Sekwencja przedstawiona jest w tabeli 16.

Tabela 16 Metodologia prób korozyjnych

Symulowane warunki	I cykl	I cykl	III cykl	IV cykl
--------------------	--------	--------	----------	---------

Środowisko kwasowe	Mgła solna	Narażenie termiczne oraz wilgotnościowe	Faza skraplanie / płukania	
Środowisko zasadowe	Mgła solna	Obniżenie temperatury wraz z wilgotnością	Faza starzenia w podwyższonej temperaturze oraz wysokiej wilgotności	
Środowisko zasadowe	Mgła solna	Narażenie termiczne oraz wilgotnościowe	Obniżenie temperatury	Narażenie termiczne oraz wilgotnościowe

Badania korozyjne determinowane specyfikacjami klienta nie obejmują jednak wszystkich możliwych warunków. Ocena końcowa badania korozyjnego wskazuje poziom odporności na szczególne warunki (środowisko zasadowe, środowisko kwaśne). Poziom odporności jest również oceniany w związku z obecnością substancji chemicznych wpływającymi bezpośrednio na rozwój korozji, jednakże w warunkach rzeczywistych mogą występować dodatkowe substancje. Obszarem badawczym powinny zostać objęte krzyżowe zależności substancji pojawiających się w miejscu instalacji układów grzewczo-chłodniczych. Odporność korozyjna jest elementem, który w trakcie użytkowania wpływa znacząco na:

- szczelność,
- odporność mechaniczną,
- aspekty wizualne.

Koncepcja badawcza opierająca się na zwiększeniu liczby substancji oraz uwzględnianiu różnych testów może prowadzić do produktu o charakterze uniwersalnym.

4.4.3 Kompatybilność z olejami oraz czynnikami roboczymi

Praca układów grzewczo-chłodniczych opiera się na obiegu czynnika chłodniczego oraz oleju sprężarkowego. Charakterystyka obiegu czynnika wpływa znacząco na mieszanie się oraz migrację czynnika oraz oleju pod wpływem ciśnienia oraz temperatury. Podczas pracy układów grzewczo-chłodniczych w układzie nie występuje czysty olej smarny oraz czysty czynnik chłodniczy. Zróżnicowanie ciśnień oraz temperatury w poszczególnych miejscach układu wpływa na skład mieszaniny. Odpowiednie poziomy mieszaniny oleju z czynnikiem jest zależne od ich wzajemnej rozpuszczalności w odpowiednim zakresie temperatur oraz ciśnienia roboczego. W układzie występuję szeroki zakres temperatur ze względu na zakresy pracy poszczególnych czynników. Ciśnienie robocze występujące w układzie związane jest zakresem pracy czynnika chłodniczego. Występują również szczególne przypadki związane z eksploatacją układów grzewczo-chłodniczych, podczas których parametry mogą odbiegać od ustalonych. Podczas rozruchu olej może gromadzić się w najniżej położonych punktach układu; takiego rodzaju sytuacja występuje podczas pracy chwilowo. Samochody wyposażone w systemy start – stop oraz sprężarkę mechaniczną wyłącznie zasilaną podczas pracy silnika, cykl rozruchu rozpoczynają wielorazowo. Określenie odpowiednich zakresów jest ważnym elementem wpływającym na dobór materiałów konstrukcyjnych.

Kompatybilność elementów łącznych oraz całego układu grzewczo-chłodniczego jest wynikiem pojedynczych testów oraz sekwencji testowych. Każdy test podczas trwania, którego występuje interakcja z czynnikiem chłodniczym lub z olejem smarnym może wskazywać wpływ substancji na układ. Zróżnicowanie branży motoryzacyjnej oraz polityki wewnętrznej producentów pojazdów wpływa w znaczący sposób na wskazywanie odpowiedzialności związanej również z kompatybilnością materiałową. Wysokie wymagania dotyczące układów grzewczo-chłodniczych wpływają również na wprowadzanie nowych wytrzymalszych oraz lżejszych materiałów. Zmiana elementów układu grzewczo-chłodniczego lub składu oleju smarnego sprężarki może wpływać na zależności bezpośrednie lub krzyżowe w połączeniu z materiałami.

Układy grzewczo-chłodnicze poza wymaganiami kompatybilności wewnętrznej warstwy powinny posiadać odporność na warunki zewnętrzne. Wszystkie substancje wpływające na przewody w warstwie zewnętrznej są odpowiednio podzielone:

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

-wpływ substancji oraz warunków na zewnątrz pojazdu,

-wpływ substancji oraz warunków wewnątrz pojazdu.

Podczas etapu sprawdzenia założeń projektowych układów grzewczo-chłodniczych powinien być zakończony etap precyzyjnego wykluczenia wszystkich negatywnych zależności. Zależności mogą zostać określone podczas:

-wewnętrznych analiz (możliwość badania wszystkich zależności),

-analizy testów, podczas których występuje ekspozycja na substancje (ograniczone zależności),

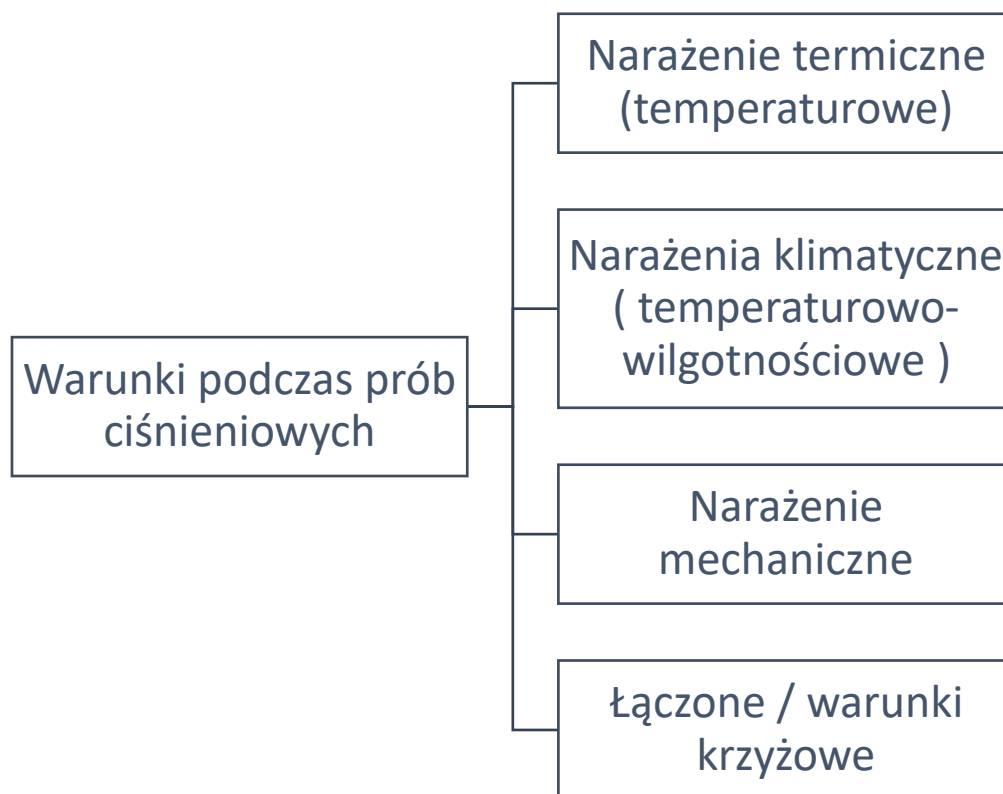
-spełnienia wymagań klienta (wymagania ogólne).

Zróżnicowanie metod badawczych oraz dokładność pomiarów pozwala na wyeliminowanie problemów w użytkowaniu końcowym układów grzewczo-chłodniczych.

4.5 Badania układów grzewczo-chłodniczych

Układy grzewczo-chłodnicze w związku z zróżnicowanymi warunkami panującym podczas pracy objęte są próbami ciśnieniowymi. Zespoły przewodów składających się z elementów zapewniających elastyczność oraz złączy, w szczególnością narażone są na wpływ ciśnienia. Występowanie nieszczelności oraz pęknięć jest większe w warunkach wysokiego ciśnienia oraz powtarzających się ruchów zginania oraz rozciągania. W celu zapewnienia bezpiecznej pracy układu należy opracować metodykę badawczą dla poszczególnych zastosowań. Metodyka związana będzie z określaniem wartości ciśnienia. Na rysunku 35 przedstawiono charakterystykę warunków podczas prób

ciśnieniowych.



Rysunek 36 Charakterystyka warunków podczas prób ciśnieniowych

4.5.1 Metodyka badań odporności na ciśnienie

Badania odporności na ciśnienie mogą uwzględniać próby z wykorzystaniem medium docelowego (oleju sprężarkowego, czynnika chłodniczego) lub gazu, oleju. Przewody giętkie muszą spełniać wymagania testów utrzymania ciśnienia w odpowiednim okresie czasu. Przeprowadzane próby ciśnieniowe mogą obejmować wiele krzyżowych narażeń zgodnie z tabelą 17.

Tabela 17 Zestawienie testów podczas prób ciśnieniowych

Temp min.	Temp max.	Profil	Wilgotność max.	Wilgotność min.	Profil	wilgotnościowy	Medium czynnik + olej	Medium gaz	obojętny	Medium olej	hydrauliczny
-----------	-----------	--------	-----------------	-----------------	--------	----------------	-----------------------	------------	----------	-------------	--------------

Wstępny							X	X	X
Badanie niszczące	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Badanie nieniszczą ce	X	X	X	X	X	X	X	X	X

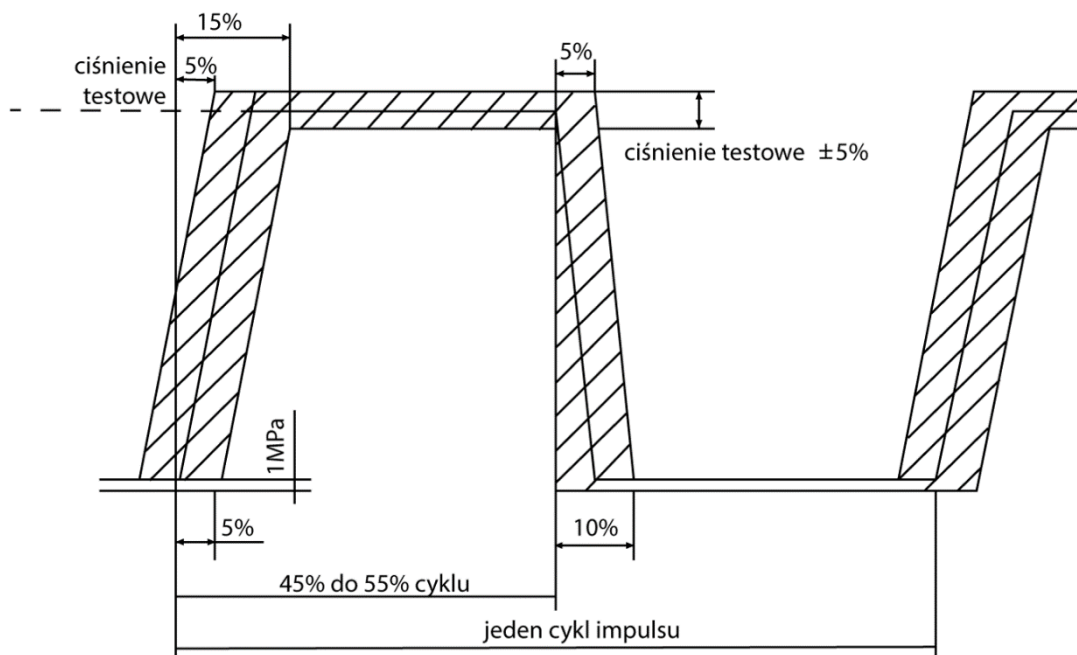
Dodatkowo występują próby ciśnieniowe w sekwencjach testowych. Charakterystyka takich testów może odbiegać poziomami narażeni, jednakże metodyka zostaje niezmienna. Element układu grzewczo-chłodniczego po przeprowadzonym teście ciśnieniowym nie może posiadać nieszczelności, ubytków lub innych zmian wizualnych.

4.5.2 Metodyka badań odporności na zmiany ciśnienia

Badanie odporności na zmiany ciśnienia jest symulacją realnych warunków panujących w układzie grzewczo-chłodniczym. Podczas eksploatacji, oprócz działania impulsów, węże są poddawane wibracjom oraz różnym warunkom klimatycznym. Impulsy ciśnienia hydraulicznego są znaną, krytyczną przyczyną uszkodzeń elementów hydraulicznych [67]. Impulsy te generowane są podczas pracy sprężarki.

Symulacja oparta jest o urządzenie, którego ciśnienie impulsowe jest wytwarzane przez wzmacniacz ciśnienie z napędem hydraulicznym. Agregat hydrauliczny wytwarza stałe ciśnienie powyżej 200 barów. Ciśnienie to napędza wzmacniacz ciśnienia za pośrednictwem zaworu regulacyjnego. Wykonywanie testów z bardzo wysoką częstotliwością oraz dokładna powtarzalność jest możliwa dzięki precyzyjnemu systemowi sterowania zaworem dynamicznym. Profil ciśnienia testowego jest na bieżąco mierzony oraz zapisywany za pomocą przetwornika ciśnienia. Zapisy te pozwalają na późniejszą ocenę, stabilności parametrów podczas badania. Dane z przetwornika pozwalają na kontrole ciśnienia w instalacji. Czynnikiem testowym jest olej o specyfikowanych parametrach. Dodatkowym elementem wpływającym na badanie jest podnoszenie temperatury oleju, które jest obsługiwane przez układ chłodzenia. System do przeprowadzania testu pozwala na monitorowanie zmian oraz

planowanie działań podczas ewentualnych uszkodzeń układu. Medium w większości przypadków opiera się o oleje sprężarkowe. Zawartość wilgoci w stosowanym oleju musi być określona oraz udokumentowana przez i po wykonaniu próby. Czas trwania badania jest uzależniony od ilości impulsów; np. 250 000 cykli oraz kształtu pojedynczego impulsu. Rysunek 36 przedstawia impuls ciśnienia podczas testów laboratoryjnych.



Rysunek 37 Impuls ciśnienia podczas testów laboratoryjnych

Badania impulsowe wykorzystywane są w krzyżowych badaniach wraz z temperaturą oraz wilgotnością. Standardowe badania impulsowe przeprowadzane są w uniwersalnych warunkach. Metodyka badawcza określa stosowanie medium oleju hydraulicznego ale również oleju sprężarkowego stosowanego w układzie docelowym. Uniwersalność metodologii może nie obejmować zakresów pojawiających się podczas eksploatacji w różnych stanach układu. Wprowadzenie dokładniejszych pomiarów układów grzewczo-chłodniczych wraz z definiowaniem granicznych ciśnień jest kluczowe dla wiarygodnych testów. Realne dane mogą również wpłynąć na zasadność przeprowadzania badań ograniczając w ten sposób intensywność testów lub ich ilość. Badania eksploatacyjne samochodów elektrycznych mogą bezpośrednio ograniczyć długość odcinków elastycznych lub zastąpić je odcinkami aluminiowymi. Narażenia impulsowe określające odporność odcinków elastycznych w sytuacjach ich braku mogą zostać wykluczone z sekwencji testowych wpływając bezpośrednio na koszt projektu.

4.6 Symulacja odporności wibracyjnej przewodów w układach grzewczo-chłodniczych

Układy grzewczo-chłodnicze są jednym z głównych źródeł hałasu oraz drgań w samochodach. Elementy układów mogą wytwarzać znaczny poziom drgań podczas pracy oraz przyczyniać się do powstawania hałasu. Pojawiające się wibracje elementów systemu mogą wpływać na inne komponenty, które mogą samoczynnie podlegać wzbudzeniu. Właściwości częstotliwościowe zależą od masy oraz sztywności elementów układu. Zmieniając odpowiednio elementy wpływające na te parametry możliwa jest zmiana odpowiedzi systemu. Obserwowany wpływ wibracji na poziom hałasu przekłada się na odczuwalny komfort pasażerów. Ma on wpływ na ocenę, jakości pojazdu przez pasażera [68]. Jak wskazuje Yoon i inni wibracje są przyczyną dyskomfortu i mogą pochodzić od elementów grzewczo-chłodniczych [69]. Dodatkowym aspektem jest kwalifikacja testów wibracyjnych, jako niezbędnych podczas walidacji układów grzewczo-chłodniczych. Specyfikacje producentów mają na celu sprawdzenie wytrzymałości mechanicznej pojedynczych komponentów układu oraz jego całości w warunkach wpływających na uszkodzenia zmęczeniowe. Sygnały testowe stosowane do testów układów grzewczo-chłodniczych są odpowiednio dobierane z uwzględnieniem narażenia od:

- silnika,
- kompresora,
- wymiennika ciepła,
- struktury jezdni.

Dostawcy wymagają opracowywania innowacyjnych rozwiązań o zwiększonej wytrzymałości, przez co konieczna jest solidna metodologia pozwalająca na łatwe określanie niezawodności. Badania przeprowadzane w celu określenia odporności wibracyjnej określają wytrzymałości w odniesieniu do wymagań klienta. Takie badania są przeprowadzane, jako główny test podczas walidacji jednakże dokładniejszym badaniem są sekwencje zawierające test wibracyjny. Badania wibracyjne opierają się na ocenie odporności mechanicznej na drgania określonych elementów. Spotykane są najczęściej w elementach metalowych, plastikowych, oraz połączeniowych. Elementy podlegające ciągłemu narażeniu wibracyjnemu mogą kumulować naprężenia

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

zmęczeniowe, czego skutkiem są uszkodzenia. Uszkodzenia tego rodzaju występują we wszystkich rodzajach testów. Pojawiające się narażenia losowe obejmują jednakże sytuacje odpowiadające rzeczywistym warunkom jazdy, w których element może ulec uszkodzeniu pod wpływem przejściowych wymuszeń. Graniczne wartości tych przejściowych stanów mogą powodować niedopuszczalne odkształcenia, które przekraczają wartości graniczne naprężeń. Określenie odporności w całym zakresie pracy jest kluczowym elementem walidacji. Elementy układu grzewczo-chłodniczego obejmują elementy posiadające zróżnicowane warunki pracy, masę oraz sztywność; wpływa to na różne poziomy sztywności mechanicznej. Powierzchnie, które występują pomiędzy stykającymi się powierzchniami w ruchu ciągłym również podlegają ocenie. Badania wibracyjne w zależności od etapu testowego obejmują próbki specjalne oraz gotowy produkt. Badania wibracyjne na przewodach specjalnych obejmują dla poszczególnych producentów ustandaryzowane testy (bez różnic ze względu na rodzaj czynnika lub napęd samochodu). Tabela 18 przedstawia zestawienie typów próbek podczas badań walidacyjnych.

Tabela 18 Zestawienie typów próbek podczas badań walidacyjnych

Próbka	Geometria	Długość próbki	Połączenie	Rodzaj narażenia
Specjalna	Brak	Według standardu	Według standardu	Według standardu
Gotowy produkt	Docelowa	Docelowa	Docelowe	Rzeczywiste

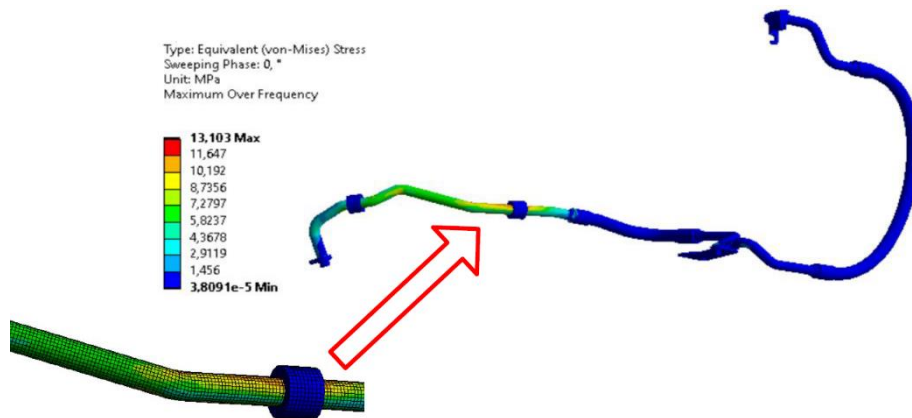
Badania przeprowadzane na próbkach specjalnych lub na gotowym produkcie również obejmują informacje o rodzaju produkcji (docelowa lub prototypowa).

Badania wibracyjne odpowiednio mogą być symulowane w warunkach rzeczywistych z uwzględnieniem temperatury, wilgotności oraz ciśnienia. Warunki mogą

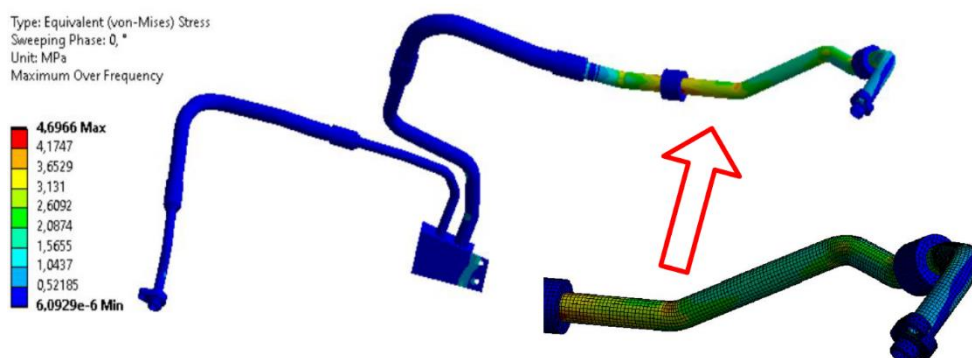
również być symulowane komputerowo z wykorzystaniem programów do obliczeń numerycznych.

4.6.1 Symulacje komputerowe

Symulacje komputerowe metodą elementów skończonych opierają się na metodach numerycznych służących do symulacji warunków brzegowych. Obliczenia znajdują zastosowania w pomiarach układów grzewczo-chłodniczych dzięki możliwości określenia wytrzymałości konstrukcji, symulowania odkształcenia naprężenia i przemieszczenia. Symulacje opierają się na modelach 3d układów grzewczo-chłodniczych, które są jednym z pierwszych etapów projektowania. 37 oraz 38 przedstawiona model 3d elementu układu grzewczo-chłodniczego po procesie siatkowania z wskazaniem naprężeń.



Rysunek 38 Wynik symulacji komputerowej przewodu do układów grzewczo-chłodniczych



Rysunek 39 Wynik symulacji komputerowej przewodu do układów grzewczo-chłodniczych

Nazwa metoda elementów skończonych pojawiła się po raz pierwszy w 1960 r., kiedy to została użyta przez Clougha [69] w pracy poświęconej problemom sprężystości płaskiej, idee analizy elementów skończonych sięgają znacznie dalej wstecz. Pierwsze próby wykorzystania funkcji ciągłej, pojawiły się w literaturze matematyki stosowanej wraz z pracą Couranta z 1943 roku [70]. Pierwsze komercyjne oprogramowanie do elementów skończonych pojawiło się w 1964 roku. Firma Control data Corporation sprzedawała się w środowisku współdzielenia czasu. Przygotowanie siatki było możliwe wyłącznie z wykorzystaniem fizycznej pracy inżynierów. W roku 1980 pojawienie się grafiki interaktywnej oraz komputerów osobistych o wystarczającej mocy do uruchomienia oprogramowania zapewniło narzędzie do rozwiązywania problemów. Obecnie stosowane oprogramowanie wykorzystuje wypracowane rozwiązanie jednakże schemat pozostaje niezmienny. Kluczowym elementem podczas prowadzenia symulacji komputerowych jest znajomość błędów związanych z metodą, ich zrozumienie pozwala na rzetelną ocenę wyników. Wszystkie metody numerycznej aproksymacji wprowadzają błędy podane w tabeli 19 przedstawiają błędy symulacji komputerowych opartych o metody numeryczne.

Tabela 19 Błędy symulacji komputerowych opartych o metody numeryczne

-
- Błędy związane z odwzorowaniem rzeczywistej geometrii oraz połączeń różnych elementów w modelu 3d.
-
- Błąd wartości współczynników (przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych cząstkowych i warunków brzegowych, czyli np. dane materiałowe, dane o interakcji obiektu ze światem zewnętrznym obarczone są błędem) Wskazywane do obliczeń warunki brzegowe mogą podlegać zmianom w różnych zakresach temperatury, czego oprogramowanie nie uwzględnia.
-
- Dokładność pomiaru jest ograniczona przez przyjętą wielkość siatki, wpływa to znacząco na dokładność wyników
-
- Błędy związane z aproksymacją wyników
-
- Błędy związane z ograniczoną dokładnością reprezentacji liczb w komputerze, rozwiązanie uzyskane programem komputerowym nie odpowiada rozwiązaniu przybliżonemu, które zostałyby otrzymane przy dokładnej reprezentacji liczb.
-

Badania opierające się na symulacjach komputerowych poddawane są walidacji w warunkach rzeczywistych. Zaletą badań jest możliwość wskazania rozwiązań dla obszarów o skomplikowanych kształtach na etapie projektowym bez kosztownych inwestycji w produkcję elementów. Zwiększanie dokładności pomiarów zwiększa zapotrzebowanie na moc obliczeniową komputera. Symulacje komputerowe posiadają również ograniczenia związane z dostępnością parametrów wejściowych. Otrzymanie odpowiednich wyników związane jest bezpośrednio z pomiarami w warunkach rzeczywistych, do których wymagane są produkty docelowe. Ważnym aspektem związanym z symulacjami komputerowymi są odpowiednio dobrane metody pomiarowe oparte na badaniach w warunkach rzeczywistych.

4.6.2 Badania przewodów na wzbudnikach drgań

Symulacje drgań na obiektach znane są od początku XX wieku. Podczas projektowania układów grzewczo-chłodniczych wymagany jest etap symulujący narażenie wibracyjne generowane podczas warunków eksploatacyjnych. Symulowanie odbywa się przez urządzenia umożliwiające wygenerowanie drgań mechanicznych o sterowalnych parametrach, takich jak częstotliwość czy amplituda. Urządzenie takiego rodzaju, których kluczowym elementem są generatory drgań mechanicznych posiadają zróżnicowane parametry:

- siły,
- przemieszczenia,
- zakresu częstotliwości,
- kierunku pracy.

Powstałe w latach 50-tych XX wieku pierwsze elektrodynamiczne wzbudniki drgań są oparte na ruchu elementu w polu magnetycznym. Wzbudniki elektrodynamiczne są liniowe w działaniu, jeżeli są używane w określonych granicach siły oraz ruchu. Konstrukcja przypomina w pewnym stopniu głośnik, ale jest cięższa i znacznie bardziej wytrzymała. Na rysunku 39 przedstawiono elektrodynamiczny wzbudnik drgań.

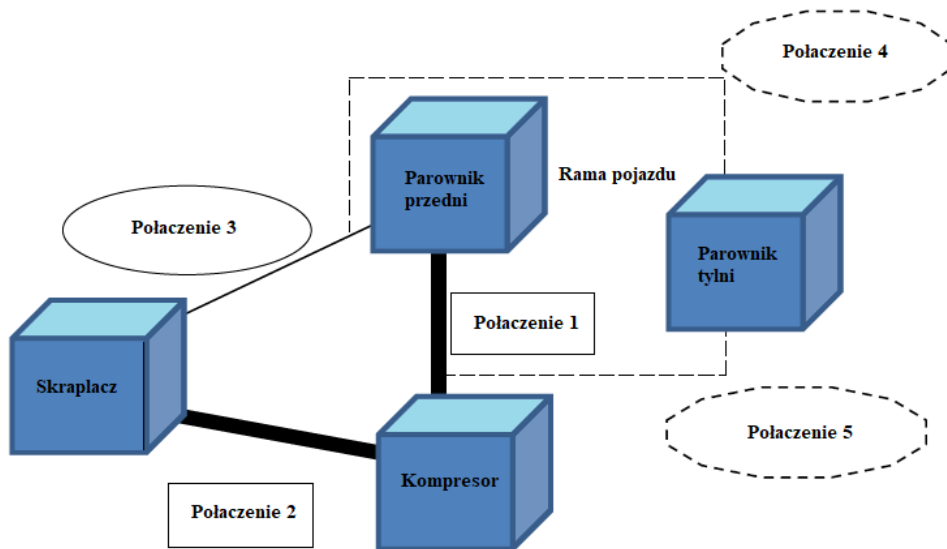


Rysunek 40 Elektrodynamiczny wzbudnik drgań Unholtz-Dickie

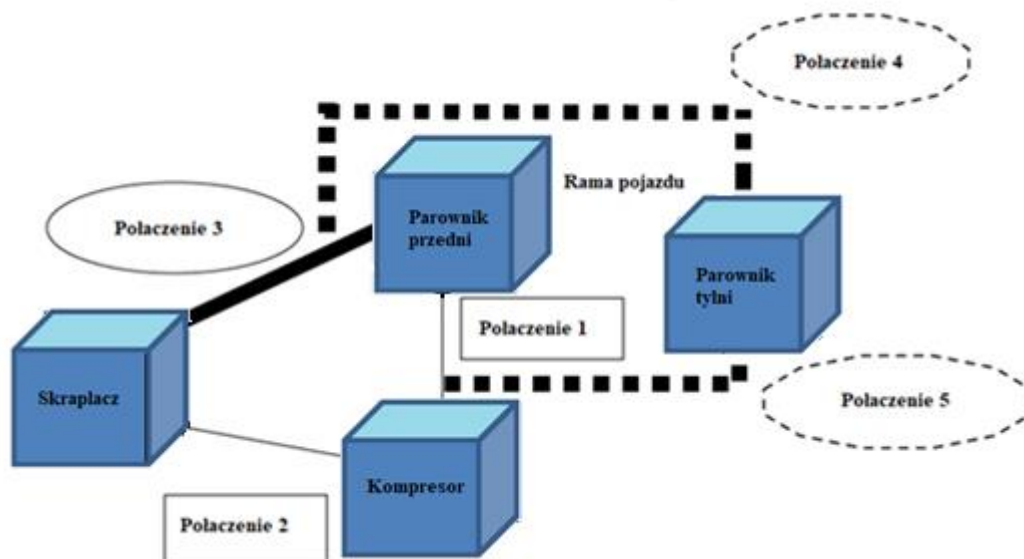
Wzbudnik oparty jest na wielowarstwowej cewce z drutu zawieszanej w promieniowym polu magnetycznym. Podczas gdy przez cewkę przepływa prąd wytwarzana jest siła wzdłużna proporcjonalna do natężenia prądu, która jest przenoszona na konstrukcję, stołu do którego mocowane są np. elementy układów grzewczo-chłodniczych. Wszystkie obecne systemy drgań łączy, dwie cechy; umożliwiają sterowanie oraz generowanie przemieszczenia oraz posiadają możliwość rejestracji odpowiedzi układu. Wzbudniki drgań mogą być napędzane sygnałami sinusoidalnymi losowymi lub przejściowymi sygnałami standardowymi. System napędzany jest przez wzmacniacz mocy sterujący układem w pętli otwartej lub zamkniętej. Pętla zamknięta posiada wejście do wzmacniacza sterującego, z wykorzystaniem którego odbywa się sterowanie serwomechanizmem. Sterowanie układem odbywa się w celu osiągnięcia drgań próbki badanej zgodnie z zdefiniowanym profilem. Drgania systemu są monitorowane poprzez zastosowanie czujników drgań, które odpowiadają za sterowanie układem. Takiego rodzaju sterowanie określane jest sterowaniem sprzężeniem zwrotnym. Badania przewodów układów grzewczo-chłodniczych definiowane są zgodnie z miejscem montażu. Podział ze względu na lokalizację

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

w układzie grzewczo-chłodniczym ilustruje rysunku 40 oraz rysunku 41.



Rysunek 41 Podział narażenia wibracyjnego ze względu na umiejscowienie (linia pogrubioną przewody narażane drganiami od kompresora)



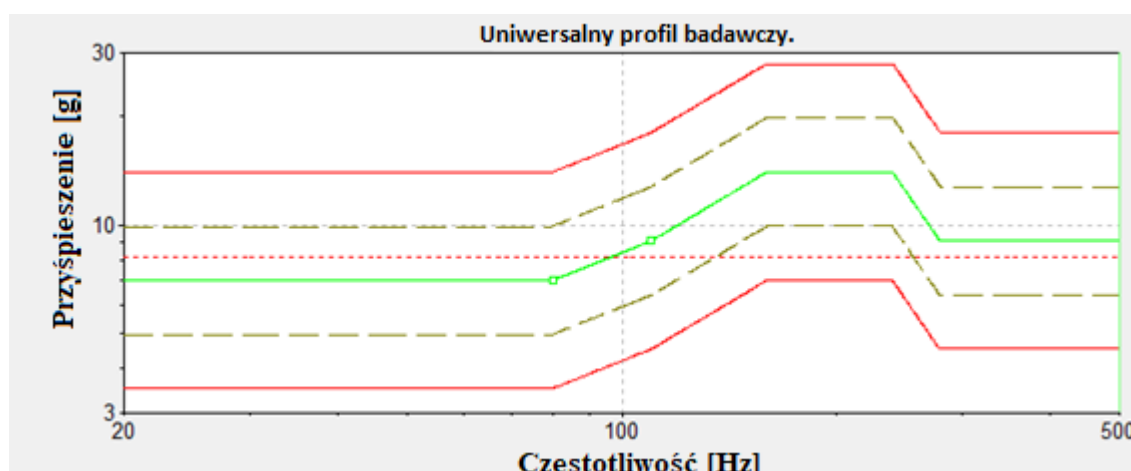
Rysunek 42 Podział narażenia wibracyjnego ze względu na umiejscowienie (linia pogrubiona przewody narażane drganiami od ramy pojazdu)

Tabela 20 przedstawia zestawienie połączeń przewodów grzewczo-chłodniczych oraz rodzaju narażenia.

Tabela 20 Zestawienie połączeń oraz rodzaju narażenia

Połączenie	Ciśnienie pracy	Połączenie układów	Sygnał narażenia	Źródło sygnału
1	Niskie	Parownik przedni – kompresor	Sygnał sinusoidalny	Silnik
2	Wysokie	Kompresor – skraplacz	Sygnał sinusoidalny	Silnik
3	Wysokie	Skraplacz – parownik	Stochastyczne / losowe	Skraplacz
4	Wysokie	Skraplacz – parownik tylni	Stochastyczne / losowe	Rama samochodu
5	Niskie	Tylni skraplacz - kompresor	Stochastyczne / losowe	Rama pojazdu

Badania części mocowanych do nadwozia w samochodach osobowych obejmują wszystkie przewody. Profile badań są przewidziane dla jednoosiowego wzbudnika drgań. Mogą obejmować wartości odpowiadające pomiarom wykonanym podczas pracy w warunkach zabudowy w samochodzie lub uśrednione wartości. Zestawienie na poniżej (Rysunek 43) przedstawia uśrednione narażenie dla różnych napędów ograniczone do krytycznego zakresu częstotliwości pracy układu grzewczo-chłodniczego.



Rysunek 43 Zestawienie profili wibracyjnych

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Badania definiowane są zgodnie z założeniami standardów międzynarodowych:

- PN-EN 60068-2-47 Badania środowiskowe -- Część 2-47: Próby -- Mocowanie wyrobów do prób wibracyjnych, udarowych i innych podobnych prób dynamicznych, [71]

-DIN EN 60068--2-- Badania środowiskowe -- Część 2-64: Próby -- Próba Fh: Wibracje przypadkowe szerokopasmowe i wytyczne, [71]

-PN-EN 60068-2-6:2008 Badania środowiskowe -- Część 2-6: Próby -- Próba Fc: Wibracje (sinusoidalne). [72]

Metodyka obejmuje warunki wytwarzania i montażu. Naprężenia wibracyjne pochodzą z pomiarów wykonywalnych na pojazdach. Jednokierunkowe wymuszenia wywierane są kolejno w trzech kierunkach X,Y i z silnika lub pojazdu, w kolejności malejącej wraz ze wzrostem poziomu wzbudzenia. Poziom naprężenia mierzony jest w różnych dedykowanych lokalizacjach m.in.:

- na sprężarce klimatyzacji,
- na ramie pojazdu.

Przeprowadzenie pomiarów wymaga określenia geometrii, materiałów, punktów mocowania (położenia, powierzchni nośnej, sztywności) oraz układu współrzędnych pojazdu. Dokręcenie części oraz elementów montażowych określone jest zgodnie z tolerancją momentu obrotowego. W celu zapewnienie dobrej reprezentatywności testu, możliwe jest połączenie narażenia wibracyjnego z symulacją warunków temperaturowo wilgotnościowych (badania wibracyjne w komorze środowiskowej). Jednoosiowy wzbudnik elektrodynamiczny z możliwością sterowania sygnałem sinusoidalnym, szerokopasmowym, impulsowym posiada możliwość:

- liniowego lub logarytmicznego przemiatania częstotliwości,
- zmiany amplitudy oraz przemieszczenia lub przyśpieszenia.

Pomiar odbywa się z wykorzystaniem czujników przyśpieszenia (akcelerometrów). Przyśpieszeniomierz kontrolny jest umieszczony wzdłuż osi badania w miejscu połączeń. Zakres pomiarowy oraz zakres szerokości pasma częstotliwości musi być określony z wysoką dokładnością. Akcelerometr z możliwością pomiarów w trzech kierunkach

wymagane jest, aby posiadał zakres pomiarowy oraz szerokość pasma obejmujący profil badań. Rysunek 44 przedstawia przyspieszeniomierze wykorzystywane do pomiarów przemieszczenie wzmacnienia oraz częstotliwości.



Rysunek 44 Przyspieszeniomierze wykorzystywane do pomiarów przemieszczenia, wzmacnienia oraz częstotliwości.

Częstotliwość własna układu powinna być większa niż maksymalna częstotliwość podczas badania. Maksymalna częstotliwość jest określana podczas każdego badania. Ustalenie charakterystyki częstotliwościowej przeprowadza się poprzez wzbudzenie układu badawczego z przyspieszeniem 10 m/s^2 w zakresie częstotliwości badawczej np. od 25 Hz do 500 Hz z częstotliwością 1 Hz/s. Sterowanie odbywa się na głowicy stołu wzbudnika drgań. Pomiar wykonywany jest w miejscu montażu układu grzewczo-chłodniczego w odpowiedniej liczbie punktów w celu precyzyjnego określenia największych wychyleń. Rezonans występuje, jeżeli między reakcją akcelerometru kontrolnego, a reakcją akcelerometru pomiarowego występuje różnica faz 90stopni oraz minimum dwukrotna różnica wskazań. Zmierzone przemieszczenie większe niż 1 mm determinuje również do wykonania próby w tym zakresie częstotliwości. Wybór częstotliwości rezonansowej dla próby zmęczeniowej związane jest z największym przemieszczeniem w danej częstotliwości.

Testy walidacyjne drgań są obecnie niezbędne dla producentów pojazdów oraz ich dostawców. Specyfikacje producentów samochodów mają na celu sprawdzenie

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

wytrzymałości mechanicznej nie tylko układów grzewczo-chłodniczych. Wszystkie elementy montowane w samochodach są narażone na liczne szkodliwe zjawiska:

- uszkodzenie zmęczeniowe,
- wstrząsy,
- wypadki,
- degradacje mechaniczna.

Sygnał stosowany w przemyśle motoryzacyjnych staje się coraz bardziej złożony obejmując różne zakresy częstotliwości. Dynamika branży motoryzacyjnej wymaga elastycznego podejścia do zmieniających się wymogów dotyczących nowych produktów, dlatego konieczna jest odpowiednia metodologia. Pozwala to na łatwe porównanie oraz określenie ciężkości specyfikacji drgań z punktu widzenia projektowania niezawodnych układów. Wskazane etapy sprawdzenia z wykorzystaniem wzbudników elektrodynamicznych mają na celu zilustrowanie skomplikowania walidacji wytrzymałości mechanicznej elementów układów grzewczo-chłodniczych poddawanych obciążeniom wibracyjnym.

Standardowe procedury badawcze obejmują szereg badań odzwierciedlających narażenia układów podczas pracy w samochodach z silnikami spalinowymi. Schemat postępowania podczas prowadzenia badań nie uwzględnia określenia zasadności przeprowadzania wskazanych kosztownych badań. Wskazywane różnicowanie napędów stosowanych obecnie oraz multi-funkcyjność układów grzewczo-chłodniczych wskazuje bezpośrednio potrzebę rozszerzenia metodyki badawczej i wprowadzenia niestandardowych metod dotyczących:

- dokładnych pomiarów podczas prób eksploatacyjnych występujących drgań lub ich braku
- eksploatacyjnych drgań poszczególnych elementów w celu określenia dedykowanego profilu (wykluczenie uśrednionych uniwersalnych profili)

Wymienione niestandardowe metody wprowadzone na etapie projektowym wskażą obszary do modernizacji przewodów. Wyniki pomiarów realnych drgań oraz wychyleń będą źródłem potencjalnych zmian w długości elastycznych odcinków.

Przedstawione wyniki pozwolą określić możliwość zmiany geometrii w badanych obszarach w celu zmniejszenia spadku ciśnienia. Odpowiednie postępowanie podczas prowadzenia badań wibracyjnym wraz z skutecznym zrozumieniem różnic podczas pracy układu pozwala na opracowywanie wytrzymalszych elementów układów grzewczo-chłodniczych.

4.7 Weryfikacja wybranych parametrów projektowych

4.7.1 Spadek ciśnienia

W dobrze zaprojektowanym i sprawnie działającym układzie grzewczo-chłodniczym spadek ciśnienia czynnika chłodniczego powinien dążyć do poziomu, w którym nie wpływa na efektywność całego układu. Spadek ciśnienia na przewodzie ssawnym zmniejsza wydajność systemu. Wydajność układu zależy od ilości nasyconego czynnika chłodniczego, który przedostaje się przez parownik. Im bardziej nasycony czynnik chłodniczy przechodzi ze stanu ciekłego w stan pary tym więcej ciepła jest pochłaniane przez parownik. Głównym elementem kontrolującym czynnik chłodniczego w obiegu jest sprężarka. Ilość czynnika chłodniczego krążącego w sprężarce zależy od gęstości czynnika chłodniczego powracającego do sprężarki. Zwiększenie gęstości czynnika powoduje wagowe zwiększenie ilości przepompowanej przez sprężarkę. Gęstość czynnika chłodniczego zależy od jego ciśnienia, wraz z jego zwiększeniem gęstość rośnie. Zmniejszenie ciśnienia czynnika chłodniczego w sprężarce powoduje zmniejszenie ilości czynnika w stosunku do masy. Odpowiedni poziom spadku ciśnienia na przewodzie cieczowym może spowodować, że przechłodzony czynnik chłodniczy opuszczający skraplacz przejdzie w stan nasycenia. Spowoduje to zmniejszenie ilości ciekłego czynnika chłodniczego podawanego do parownika przez element dozujący. Etap ten również wpływa na wydajność układu, ponieważ zmniejsza to ilość ciekłego czynnika chłodniczego w parowniku.

Spadek ciśnienia jest powodowany zmianą geometrii przewodu, która jest definiowana indywidualnie podczas każdego z projektów. Etap projektowy uwzględnia wymagania dotyczące przestrzeni możliwej do wykorzystania dla wymienników w układzie grzewczo-chłodniczym, ale również do przewodów do przepływu czynnika chłodniczego. Wszystkie kombinacje związane z geometrią, przewodu, długością oraz elementami układu stwarzają unikalne warunki przepływu czynnika chłodniczego.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Kluczowym elementem podczas testów elementów grzewczo-chłodniczych jest wyeliminowanie odcinków z wysokim spadkiem ciśnienia. Etapem akceptującym produkt są określone testy, definiowane przez klientów oraz wewnętrzne procedury projektowe.

Badanie spadku ciśnienia na częściach montowanych w obwodach klimatyzacji opiera się na dokładnych pomiarach różnic ciśnienia. Określone są również dokładności przepływomierzy określane procentowo, na poziomie nieprzekraczającym 1%. Pomiar spadku ciśnienia odbywa się z wykorzystaniem sprężonego powietrza. Przepływomierz może zostać zainstalowany w dowolnym miejscu układu grzewczo-chłodniczego, jednakże lokalizacja oraz sposób instalacji nie może zakłócać działania przepływomierza oraz zaburzać odczytu natężenia przepływu. Badanie przeprowadzane jest z wykorzystaniem powietrza. Podczas prób monitorowane jest ciśnienie robocze oraz następuje pomiar strumienia powietrza przepływającego przez odcinek. Określenie prawidłowego natężenia przepływu powietrza na stanowisku badawczym zależne jest również od odpowiedniego określenia warunków dla liczby Reynoldsa (Re).

$$Re_{\text{warunki rzeczywiste}} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

$$Re_{\text{warunki rzeczywiste}} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{qv \cdot D}{S \cdot \frac{\nu}{p}} = \frac{qv \cdot D}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\mu}{p}} = \frac{4 \cdot q \cdot v \cdot p}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (2)$$

$$Re_{\text{warunki rzeczywiste}} = \frac{4 \cdot \dot{q}m}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (3)$$

Współczynnik Re w warunkach stanowiska badawczego. Masowe natężenie przepływu oblicza się ze wzoru (4).

$$\dot{q}m_{\text{stanowiska}} = \dot{q}m_{\text{rzeczywisty}} \cdot \chi \frac{D_{\text{stanowiska}}}{D_{\text{rzeczywisty}}} = \frac{\mu_{\text{stanowiska}}}{\mu_{\text{rzeczywisty}}} \quad (4)$$

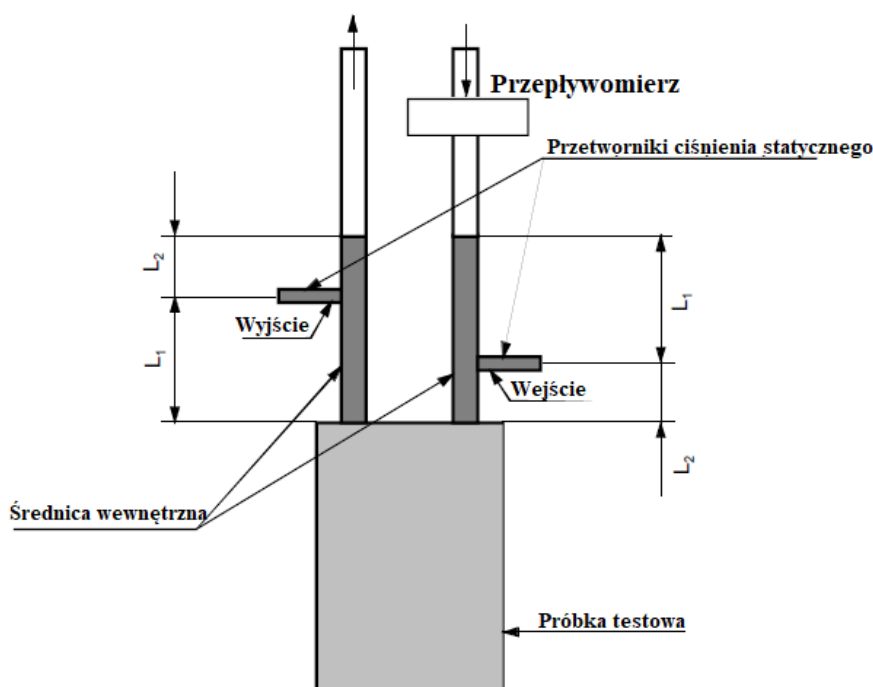
Dla każdego strumienia przepływu powietrza należy obliczyć równoważny przekrój poprzeczny Se zgodnie ze wzorem (5)

$$Se = \frac{\dot{q}m}{(2 \cdot p \cdot \Delta P)^{1/2}} \quad (5)$$

Aby uwzględnić stratę ciśnienia w badanym elemencie, należy obliczyć przekrój zastępczy z wykorzystaniem wzoru (6).

$$Se_{komponent} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Se_{komponent z przewodem}^2} - \frac{1}{Se_{przewod}^2}\right)^{0.5}} \quad (6)$$

Próbka badawcza z wykorzystaniem elementów dedykowanych nie wpływających na pomiar, podłączona zostaje do przepływomierza oraz czujników ciśnienia. Rysunek 45 przedstawia poglądowy schemat stanowiska do badania spadku ciśnienia.



Rysunek 45 Schemat poglądowy stanowiska do badania spadku ciśnienia

- Długość L1 równa dziesięciokrotnej średnicy wewnętrznej przewodu
- Długość L2 równa pięciokrotnej średnicy wewnętrznej przewodu

Elementy wpływające na dokładność pomiaru podczas przeprowadzania badania muszą podlegać dokładnemu sprawdzeniu. Wszystkie elementy układu na stanowisku badawczym należy instalować w sposób najbliższy geometrii w samochodzie.

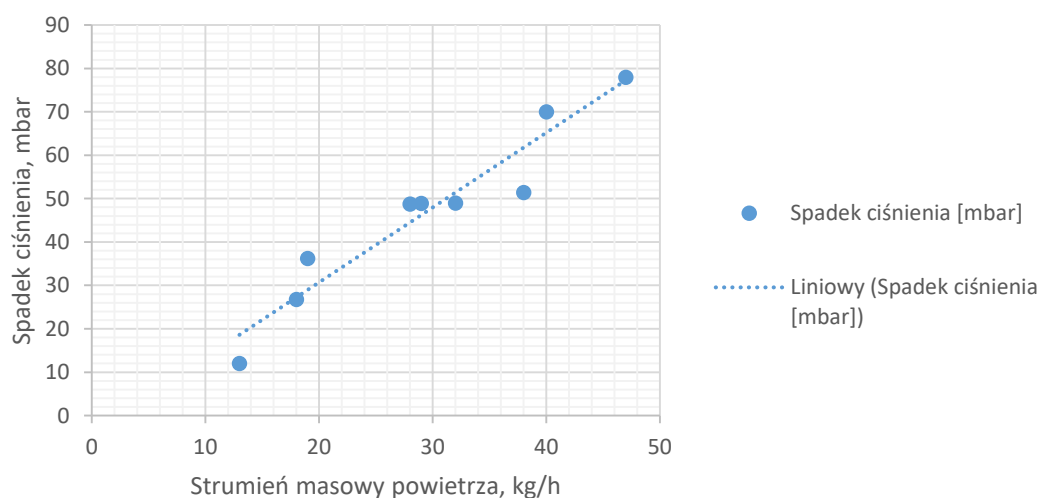
Przeprowadzane badania na zróżnicowanych obiektach badawczych wskazują wyraźny wpływ geometrii na wyniki. Przedstawione wyniki są opracowane metodami predykcyjnymi. Opis próbek do badań przedstawia tabela 21.

Tabela 21 przedstawia wyniki pomiarów wykonanych na próbce I.

Tabela 21 Wyniki badań dla próbki I.

Próbka_I / Geometria_I					
Przepływ masowy powietrza, kg/h	Temperatura medium, °C	Ciśnienie na wyjściu, mbar	Ciśnienie na wejściu, mbar	Spadek ciśnienia, mbar	Przekrój poprzeczny, mm ²
13	21	1078,0	1090,0	12,0	66,4
18	20	2138,0	2164,8	26,8	71,2
19	22	3127,7	3163,9	36,2	78,7
28	22	4017,6	4066,4	48,8	84,6
29	22	4017,9	4066,8	48,9	84,6
32	21	4018,1	4067,1	49,0	84,9
38	22	4500,1	4551,5	51,4	85,1
40	21	5012,8	5082,8	70,0	86,0
47	20	6015,4	6093,4	78,0	91,1

Wykres przedstawiony poniżej (Rysunek 46 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr I.) przedstawia spadek ciśnienia dla próbki nr I.



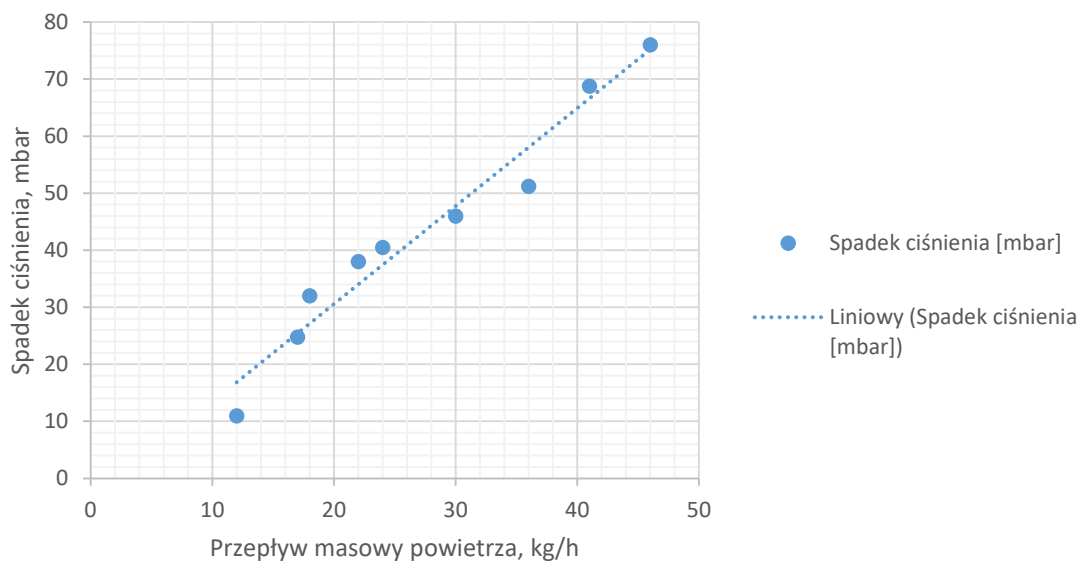
Rysunek 46 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr I.

Tabela 22 przedstawia wyniki badań spadku ciśnienia dla próbki II.

Tabela 22 Wyniki badań dla próbki II.

Próbka_II / Geometria_II					
Przepływ masowy powietrza, kg/h	Temperatura medium, °C	Ciśnienie na wyjściu, mbar	Ciśnienie na wejściu, mbar	Spadek ciśnienia, mbar	Przekrój poprzeczny, mm ²
12	20	1011,2	1022,2	11,0	66,2
17	21	2120,6	2145,4	24,8	70,8
18	22	3210,8	3242,8	32,3	76,2
22	21	3801,2	3839,2	38,3	82,5
24	22	3898,2	3938,7	40,5	84,6
30	22	4011,8	4057,8	46,7	87,8
36	20	4499,2	4550,4	51,2	88,0
41	21	4909,2	4978,0	68,8	89,9
46	20	6022,1	6098,1	76,5	91,8

Rysunek 47 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II. przedstawia wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II.



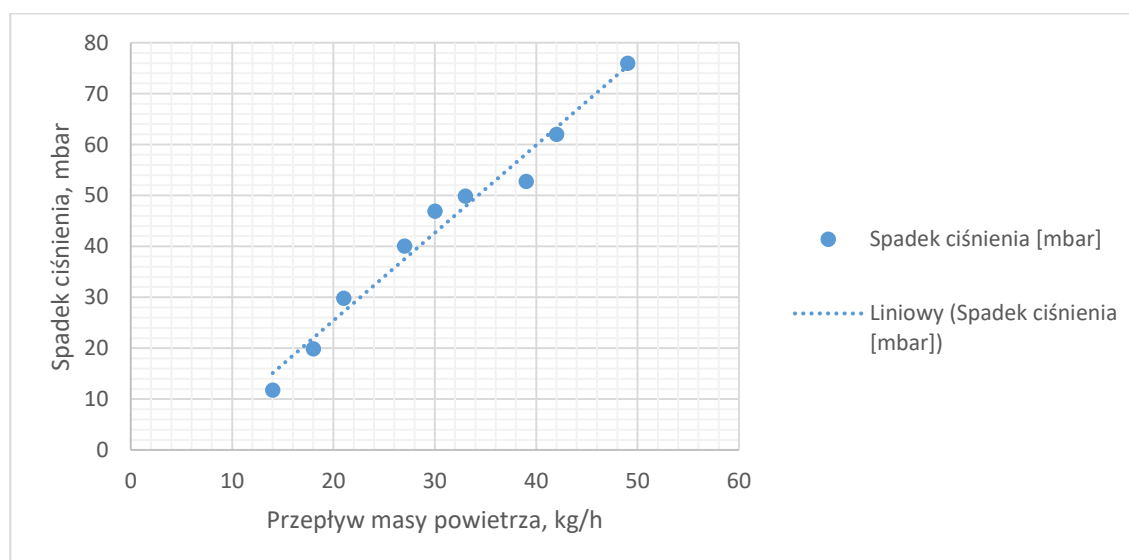
Rysunek 47 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr II.

Tabela 23 Tabela 23. Wyniki badań dla próbki III.

Tabela 23. Wyniki badań dla próbki III.

Próbka_III / Geometria_III					
Przepływ masowy powietrza, kg/h	Temperatura medium, °C	Ciśnienie na wyjściu, mbar	Ciśnienie na wejściu, mbar	Spadek ciśnienia, mbar	Przekrój poprzeczny, mm ²
12	20	1065,4	1047,3	18,1	66,2
16	21	2267,6	2239,0	28,6	70,8
19	22	3380,7	3344,8	35,9	76,2
21	21	4076,0	4033,9	42,1	82,5
26	22	4109,2	4064,0	45,2	84,6
33	22	4220,3	4171,5	48,8	87,8
39	20	4771,1	4718,9	52,2	88,0
44	21	5395,8	5323,3	72,5	89,9
45	20	6313,2	6232,9	80,3	91,8

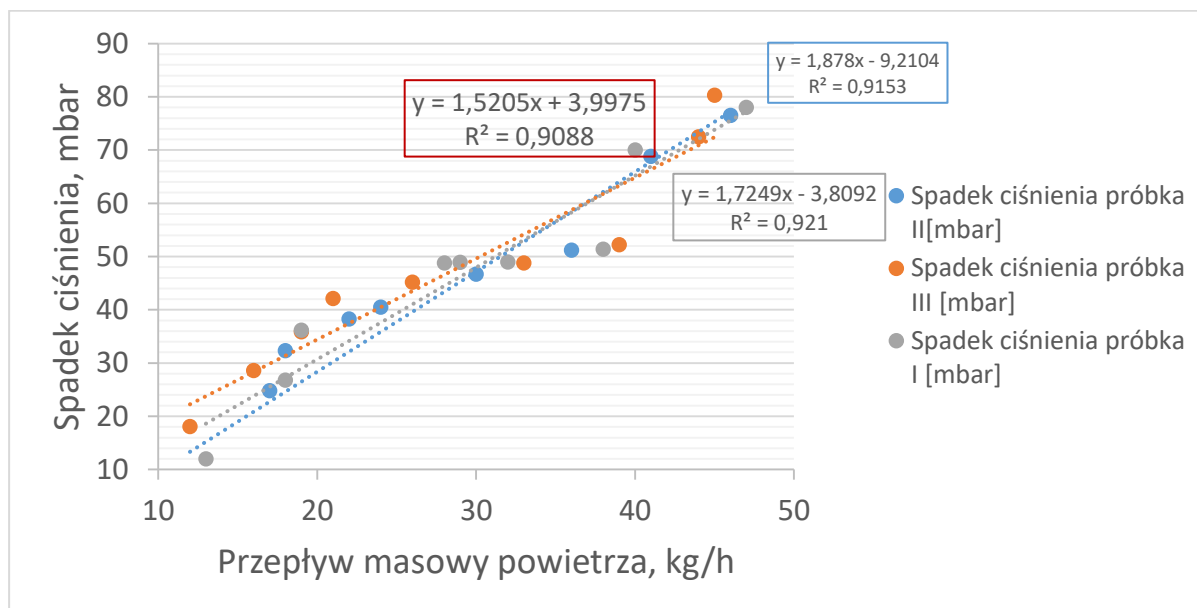
Rysunek 48 przedstawia wykres spadku ciśnienia dla próbki nr III.



Rysunek 48 Wykres spadku ciśnienia dla próbki nr III.

Podczas badania zostały przeprowadzone pomiary dla próbek testowych w tych samych warunkach. Badania zostały przeprowadzone na próbkach których parametry takie jak długość grubość ścianki oraz przekrój były jednakowe. Wyniki przedstawione wyżej (Rysunek 46, Rysunek 47, Rysunek 48) wskazują wyraźne różnice w spadku

ciśnienia spowodowane zmianą geometrii. 8 przedstawia wykres spadku ciśnienia dla badanych próbek.



Rysunek 49 Wykres spadku spadku ciśnienia dla badanych próbek.

Przeprowadzone badania według standardowej procedury wskazują wpływ geometrii przewodu na poziom spadku ciśnienia. Badania równocześnie wskazały wady metodologii. Standardowa metodologia prowadzenia badań wykazuje brak korelacji z warunkami eksploatacyjnymi. Studia literaturowe [71] wskazują bezpośrednio:

-wpływ geometrii na poziom oleju w poszczególnych odcinkach układu,

-wpływ oleju na spadek ciśnienia.

-badanie przeprowadzane na przewodach o tej samej geometrii wskazuje różnice w spadku ciśnienia ze względu na rodzaj wykorzystanego czynnika roboczego R1234yf lub R134a.

Własna koncepcja stanowiska badawczego obejmuje możliwość przeprowadzania badań spadku ciśnienia w zróżnicowanych warunkach pracy. Wprowadzenie niestandardowych metod badawczych na stanowisku koncepcyjnym na etapie projektowym pozwoli:

-zmienić geometrie w sposób ograniczający spadek ciśnienia na poszczególnych odcinkach,

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

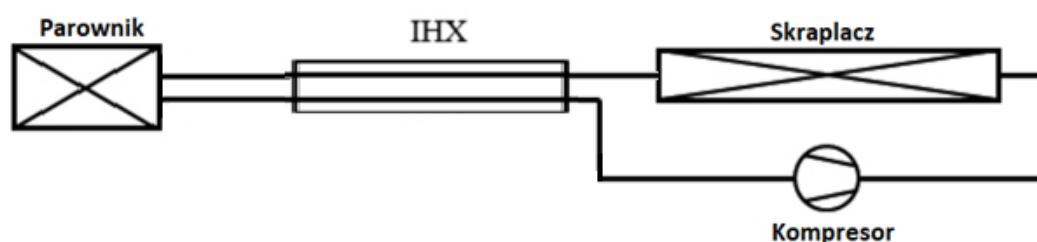
- przeprowadzić pomiary z wykorzystaniem docelowego czynnika chłodniczego przeprowadzając pomiary podczas eksploatacji,
- wskazać realne poziomy spadku ciśnienia.

Koncepcja własna stanowiska badawczego oraz proponowana metodyka niestandardowa pozwoli docelowo ograniczyć utrzymać wymagany poziom przepływu masowego na docelowym poziomie przy mniejszym zużyciu energii elektrycznej wymaganej do pracy sprężarki.

4.7.2 Badanie rurowych wymienników ciepła

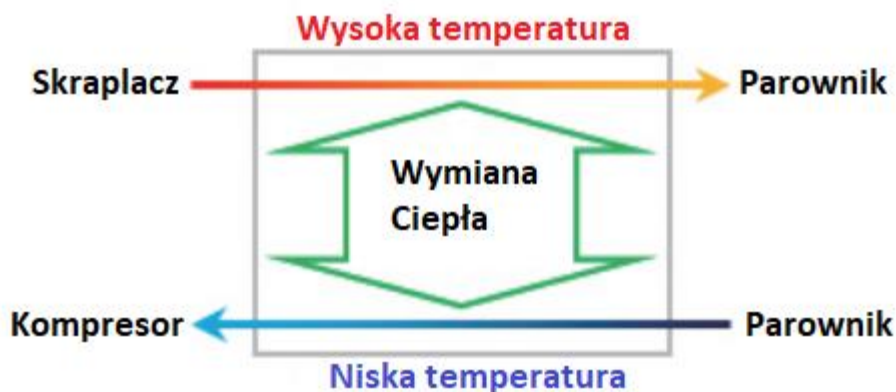
Ograniczenia wprowadzone na czynnik R134a oraz wprowadzanie czynnika R1234yf, wpłynęło znacząco na zwiększenie zainteresowania wewnętrznymi wymiennikami ciepła IHX (Internal Heat Exchanger). Rysunek 50 przedstawia cykl chłodzenia z zainstalowanym wymiennikiem wewnętrznym.

Dzięki wymianie ciepła między wysokotemperaturowym i wysokociśnieniowym ciekłym czynnikiem chłodniczym na wylocie ze skraplacza a niskotemperaturowym i niskociśnieniowym gazowym czynnikiem chłodniczym na wylocie z parownika, IHX może poprawić wydajność chłodniczą systemu grzewczo-chłodniczego.



Rysunek 50 Blokowy schemat działania wewnętrznego wymiennika ciepła

Rysunek 51 przedstawia schemat poglądowy obiegu ciepła zachodzącego wewnątrz wymiennika.



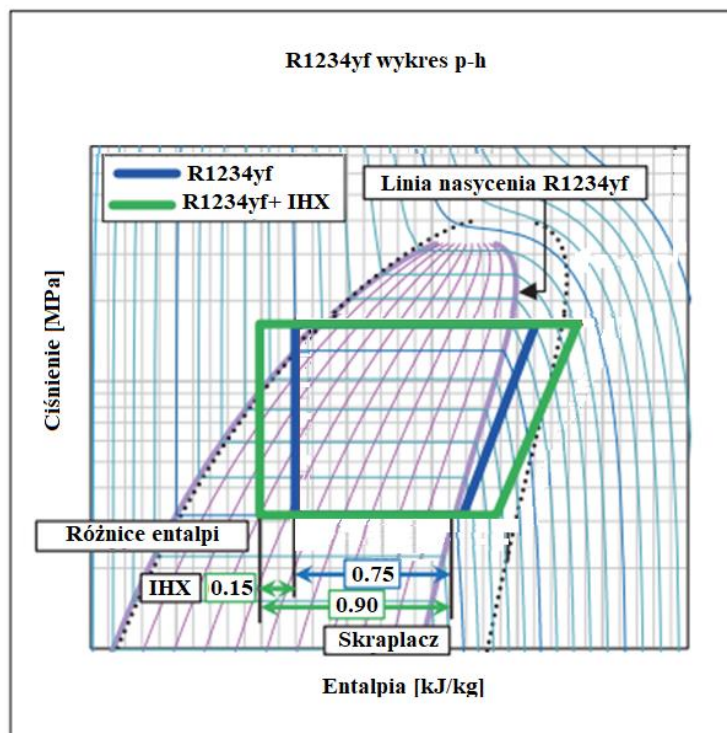
Rysunek 51 Schemat poglądowy obiegu ciepła

Przedstawiony mechanizm wskazuje w którym miejscu w układzie następuje zmiana temperatury ze względu na zastosowanie wymiennika. Aprea i inni [72] wskazali że zastosowanie wymiennika ma przewagę w związku z zwiększaniem efektywności układu. Klein i inni [73] przedstawili zalety stosowania wymiennika ciepła. Miedzy innymi wskazali redukcje cieczy zawierającej opary, które mogłyby uszkodzić kompresor. Mastrullo i inni [74] po przeprowadzeniu badań nad 19 różnymi czynnikami roboczymi wskazali, że spadek ciśnienia po stronie cieczy w wymienniku nie wpływa na wydajność systemu jednakże spadek po stronie pary ma znaczący wpływ. Dodatkowo wskazali wzrost spadku ciśnienia w układzie powoduje zmniejszenie efektywności całego systemu.

Tabela 24 Zestawienie różnic entalpii dla wewnętrznego wymiennika ciepła na przykładzie układu z czynnikiem R1234yf [75]

		Jednostka	R1234yf	R1234yf + IHX
Różnica entalpii	Parownik	kJ/kg	0,75	0,90
	Wymiennik wewnętrzny	kJ/kg	-	0,15
Przepływ czynnika chłodniczego		m ³ /s	1,20	1,11
Strumień ciepła	Parownik	kJ/kg	0,90	1,0
	Wymiennik wewnętrzny	kJ/kg	-	0,17

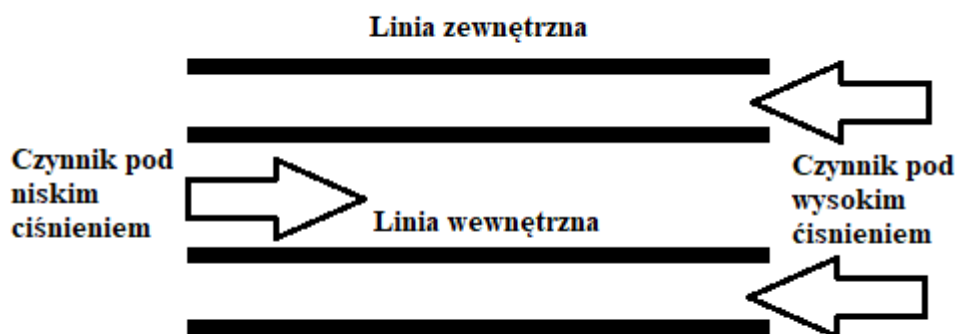
Tabela 24 przedstawia zestawienie różnic entalpi dla wewnętrznego wymiennika ciepła na przykładzie układu z czynnikiem R1234yf. Przedstawiono współczynnik różnicy entalpi pomiędzy wejściem i wyjściem z parownika, natężenie przepływu czynnika chłodniczego oraz wydajność chłodniczą zarówno samego R1234yf oraz z zastosowaniem wymiennika.



Rysunek 52 Wykres p-h dla R1234yf

Rysunek 51 przedstawia wykres Moliera na którym wskazano różnice entalpii nasycenia gaz-ciecz. Ponieważ wewnętrzny wymiennik rurowy zmniejsza entalpię przed parownikiem poprzez wymianę ciepła między wysokotemperaturowym i wysokociśnieniowym ciekłym czynnikiem chłodniczym przed zaworem rozprężnym a niskotemperaturowym czynnikiem chłodniczym o niskiej temperaturze i niskim ciśnieniu na wylocie z parownika. Następuje zwiększenie różnicy entalpii między wlotem i wylotem parownika. Wymiana ciepła przez wewnętrzny wymiennik rurowy między czynnikami chłodniczymi w tym samym cyklu wprowadza stan gdzie entalpia na ssaniu sprężarki staje się większa o wartość entalpii przed parownikiem. Ponieważ gęstość czynnika chłodniczego zasysanego przez sprężarkę jest mniejsza, zmniejsza się również natężenie przepływu czynnika chłodniczego. Wymienniki tego rodzaju są to elementy dwururowe w których niskociśnieniowy gazowy czynnik chłodniczy przepływa w rurze

wewnętrznej i wysokociśnieniowy ciekły czynnik chłodniczy przepływa w przestrzeni zewnętrznej. Rysunek 51 przedstawia schematyczny opis wewnętrznego wymiennika ciepła.



Rysunek 53 Schematyczny opis wewnętrznego wymiennika ciepła

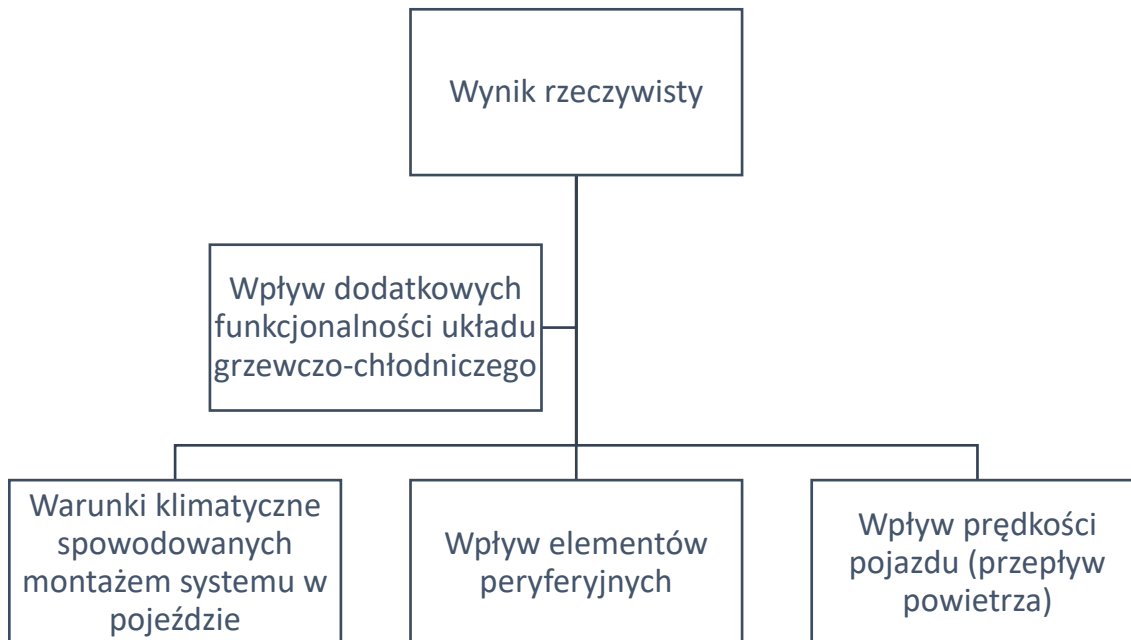
Podczas wymiany ciepła w IHX współczynnik przenikania ciepła niskociśnieniowego gazowego czynnika chłodniczego jest niski w porównaniu z współczynnikiem ciepłego czynnika chłodniczego pod wysokim ciśnieniem. Dlatego skuteczną poprawą współczynnika przenikania ciepła niskociśnieniowego gazowego czynnika chłodniczego jest najbardziej efektywnym sposobem zwiększenie wymiany ciepła w IHX. Mając na celu zwiększenie dokładności pomiarowej oraz symulowanie warunków rzeczywistych należy podczas prób pomiarowych zachować warunki jak najbliższe do rzeczywistych.

4.8 Koncepcja stanowiska badawczego

Stanowiska badawcze dla pomp ciepła są często oparte na czynnikach chłodniczych R134a, R1234yf i R744. Zróżnicowanie parametrów termodynamicznych czynników chłodniczych oraz elementów poszczególnych układów może wpływać na mnogość możliwych kombinacji samego obiektu badawczego, każde badanie opiera się na symulacji warunków rzeczywistych podczas pracy. Dodatkowo przeprowadzane są badania spadku ciśnienia z wykorzystaniem sprężonego powietrza, w celu odwzorowania warunków rzeczywistych. Wszystkie badania mające na celu potwierdzenie założeń projektowych dotyczących funkcjonalności, uwierzytelniają

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

skuteczność metodyki projektowej. Koncepcja stanowiska badawczego ma na celu zwiększenie dokładności pomiarowej. Wykorzystanie stanowiska w procesie produkcyjnym znacząco obniży liczbę problemów projektowych. Rysunek 53 przedstawia zestawienie elementów wpływających na wynik pomiarów.



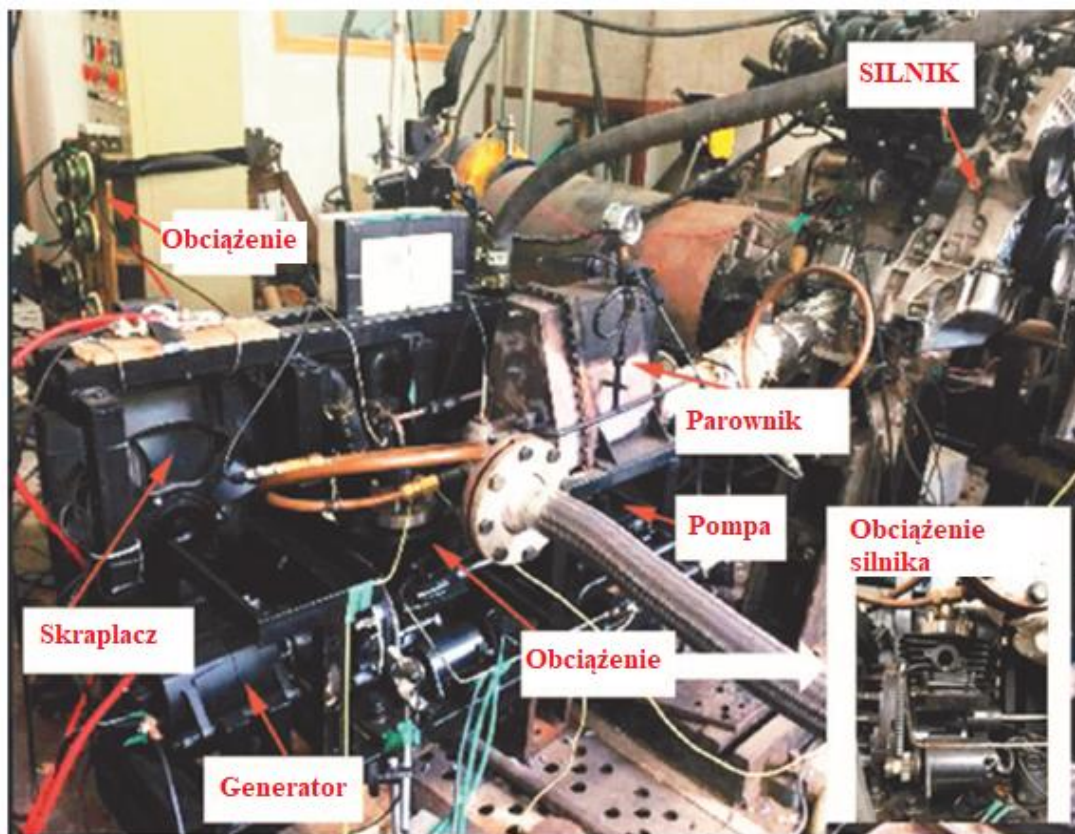
Rysunek 54 Zestawienie elementów wpływających na wynik

Zwiększenie ilości czynników podczas pomiarów będzie skutecznie wpływać na poszerzenie wiedzy dotyczącej funkcjonalności, efektywności oraz parametrów materiałowych. Przedstawione poniżej stanowiska badawcze dla pomp ciepła reprezentują systemy o wysokim stopniu zróżnicowane pod względem warunków zewnętrznych.



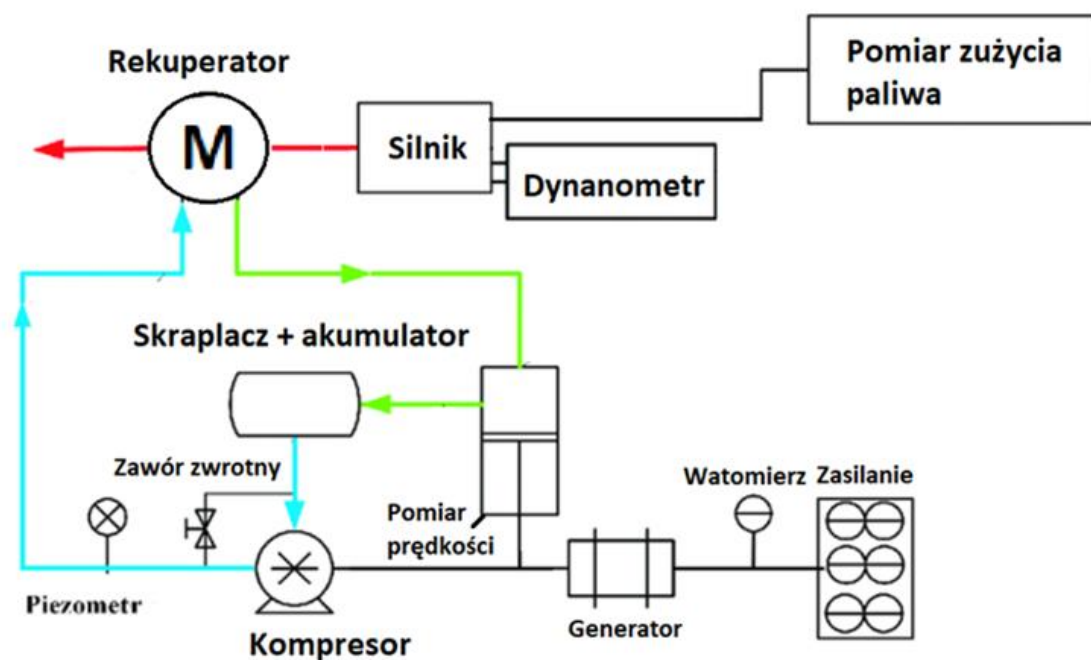
Rysunek 55 Stanowisko badawcze [76]

Stanowiska badawcze bazują na materiałach i komponentach prototypowych wspomagając etap badań laboratoryjnych, jednak podczas prac projektowych oraz walidacji warunki symulacji są ograniczone ze względu na możliwości stanowiska badawczego. Na rysunku 54 oraz 55 przedstawiono stanowiska badawcze wykorzystywane do symulowania ograniczonych warunków.



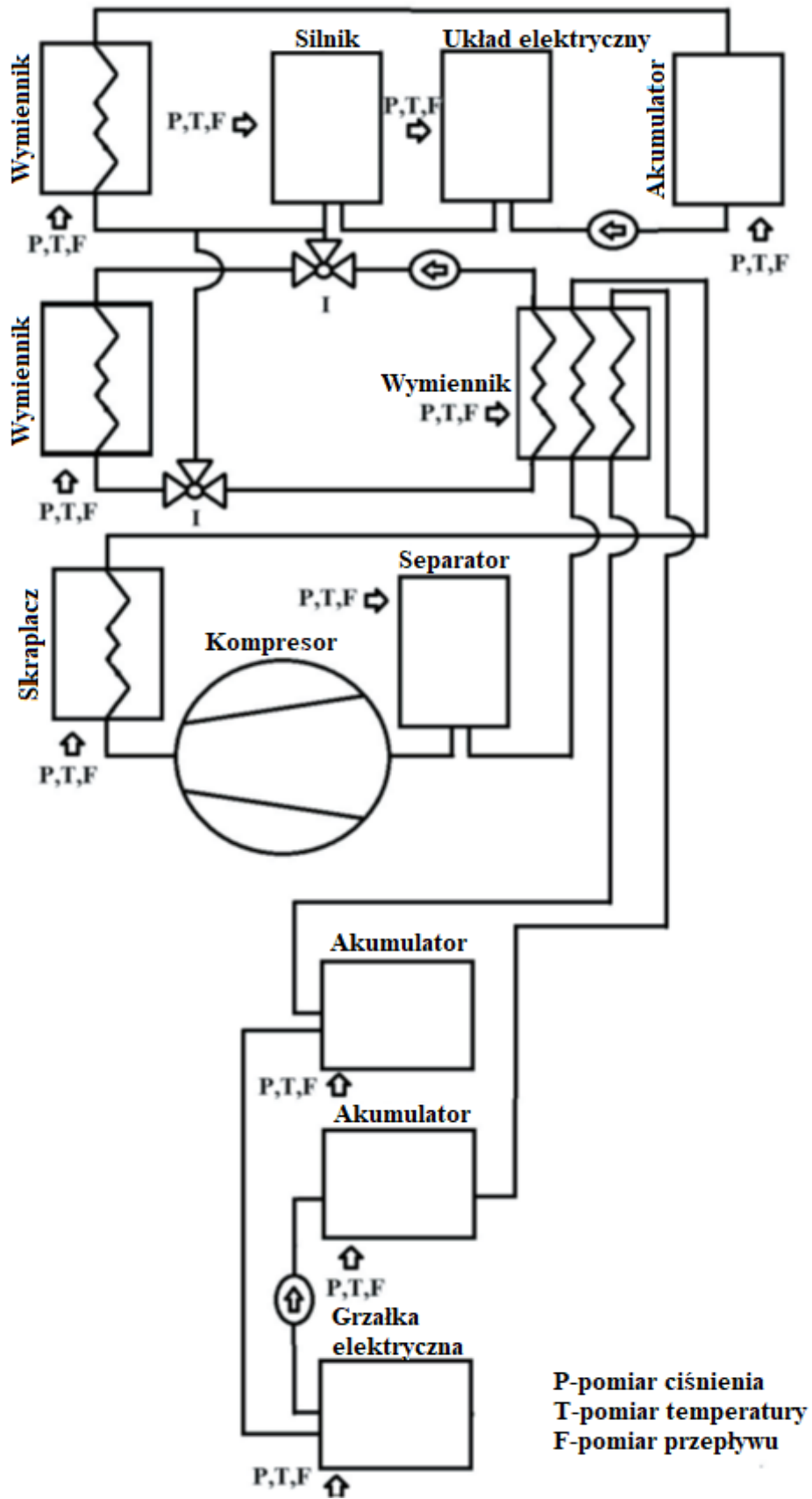
Rysunek 56 Stanowisko badawcze [77]

Stanowisko ma na celu pomiaru zużycia energii i charakterystyki cieplnej. Zestaw składa się z symulatorów przepływu powietrza w kabinie. System posiada grzałkę oporową do podgrzewania czynnika chłodniczego i symulowania ciepła z pojazdu, oraz ciepło pobierane z akumulatora pojazdu elektrycznego. Rysunek 52 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 56.



Rysunek 57. Schemat układu pomiarowego na stanowisku z rysunku 49.

Aby uzyskać warunki zbliżonych do rzeczywistych, stanowisko posiada model układu napędowego, oraz model układu magazynowania energii. Stanowisko w warunkach laboratoryjnych posiada ograniczenia związane z budową oraz zakresem prowadzonych badań. Badania przeprowadzane na stanowisku ograniczają się wyłącznie do pojedynczych odcinków układu. Układ rekuperatora, skraplacza oraz pozostałych elementów o charakterze uniwersalnym ogranicza odwzorowanie układu eksploatacyjnego.



Rysunek 58 Koncepcja układu badawczego opartego na systemie Mitsubishi i-MiEV.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 57 został zaprojektowany do zbierania danych w pojeździe Mitsubishi i-MIEV. Oparty jest na systemie zbierania danych z ciśnienia, temperatury, prędkości, i mocy wyjściowej.

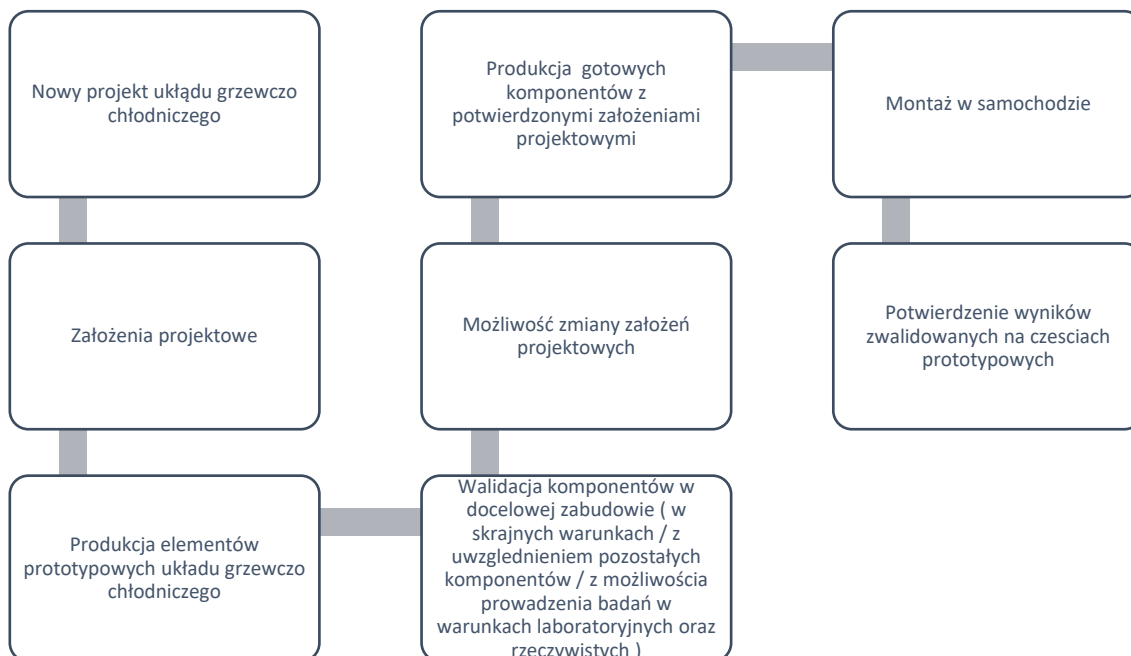
Układ ten umożliwia pomiar temperatury którego dokonują termopary wraz z czujnikami ciśnienia o wysokiej częstotliwości pomiarowej. Pomiar ciśnienia na rekuperatorze i wylocie czynnika wykonywany jest z wykorzystaniem czujników nadciśnienia. Miernik mocy wyjściowej mierzy moc z generatora. Koncepcja stanowiska badawczego opiera się na pomiarach wykonywanych w środowisku pracy samochodu. Rozwiązanie to pozwala przeprowadzić pomiary eksploatacyjne w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem komór temperaturowych, wentylatorów o odpowiednim przepływie, temperaturze i wilgotności. Koncepcja pozwala na przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych. Każdy element układu grzewczo-chłodniczego jest zabudowany w samochodzie testowym z wykorzystaniem pełnej funkcjonalności wszystkich komponentów, oraz z możliwością pomiaru ciśnienia, temperatury i przepływu. Ten rodzaj pomiarów pozwala na dokładne odzwierciedlenie warunków związanych z oddziaływaniem wszystkich warunków środowiskowych w samochodzie.

Koncepcja własna stanowiska pojawiła się w oparciu o problemy z już istniejącymi stanowiskami badawczymi. Przyjęto założenie, że zwiększenie precyzji pomiarowej oraz dokładności walidacji przyjętych parametrów projektowych pozwoli na tworzenie układów o zmniejszonym poborze energii.

Podstawowym problemem dotyczącym układów pomiarowych obecnie jest personalizowanie układu do poszczególnych pomiarów. W celu pomiaru spadku ciśnienia wykonuje się osobny układ z specjalnie zaprojektowanym układem dostarczającym medium. Pomiar wydajności wewnętrznego wymiennika ciepła zostaje wykonywany w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem próbki o ustandaryzowanej geometrii. Pomiary tego rodzaju nie uwzględniają wpływu pozostałych komponentów oraz innych elementów w pobliżu generujących ciepło lub przepływ powietrza. Badania przeprowadzane w ten sposób ograniczają się do warunków symulowanych podczas testu, bez możliwości wprowadzania dodatkowych zmiennych związanych np. z poruszaniem się w korku w niskiej temperaturze. W sytuacji

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

której mogą występować lokalne zmiany temperatury związane bezpośrednio z zabudową wszystkich elementów peryferyjnych wokół układu grzewczo-chłodniczego. Końcowa efektywność układu grzewczo-chłodniczego oparta jest o odpowiednio dobrane komponenty w tym również układy linii przesyłowych. Proces projektowania przewodów łączących elementy układów grzewczo-chłodniczych opiera się często o wymogi producenta. Poszczególne zmiany dotyczące geometrii, średnicy przewodu, materiału dobrane do produkcji oraz jego wpływu w różnych warunkach pracy powinny podlegać rzeczowej analizie. Schemat ideowy koncepcyjnego stanowiska badawczego obejmuje zmianę w metodologii obecnie stosowanej dotyczącej kształtu próbek w celu wprowadzenia pomiarów na geometrii docelowej. W celu opracowania dokładnych pomiarów nie wyklucza się możliwości prowadzenia pomiarów w różnych warunkach pracy nie tylko układu grzewczo-chłodniczego ale również samochodu. Koncepcja zakłada rozszerzenie układu pomiarowego w zabudowanym już pojeździe w celu przeprowadzania badań w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych. Rysunek 58 przedstawia etapy walidacji z wykorzystaniem koncepcyjnego stanowiska badawczego.



Rysunek 59 Etapy walidacji z wykorzystaniem koncepcyjnego stanowiska badawczego

Opracowanie stanowiska koncepcyjnego opartego o układy już docelowe pozwoli na zwiększenie dokładności pomiarów. Warunki brzegowe symulacji w warunkach

rzeczywistych nie będą ograniczone parametrami urządzeń typu komory klimatyczne, wentylatory oraz grzałki. Zwiększony potencjał badawczy umożliwi również równoległy rozwój elementów w celu zwiększania skuteczności co w przypadku układów grzewczo-chłodniczych wykorzystywanych w pojazdach elektrycznych przekłada się na zwiększony zasięg.

4.8.1 Potencjał badawczy prototypowego stanowiska

Rozwój elektro-mobilności stwarza nowe wyzwania w sektorze transportowym. Systemy klimatyzacji zmieniają swoje dotychczasowe funkcje, wkraczając w systemy zarządzania gospodarką temperaturową całego pojazdu. Kierunek rozwoju i zwiększający się zasięg samochodów elektrycznych muszą być uwzględniane podczas projektowania oraz walidowania układów grzewczo-chłodniczych. Wyraźny wpływ układów grzewczo-chłodniczych na zasięg pojazdu (spalinowego, hybrydowego, elektrycznego), jest obserwowany oraz podlega zwieszonemu zainteresowaniu. Aby osiągać sprawność układów grzewczo-chłodniczych należy uwzględniać podczas etapu projektowania metody badań w realnych warunkach pracy. Koncepcja stanowiska zainstalowana w nadwoziu pojazdu posiada charakter innowacyjny. Rozważenie tego typu zwiększa zakres możliwych do osiągnięcia warunków podczas prób badawczych zbliżając warunki podczas walidacji do warunków realnych. Opracowana koncepcja posiada potencjał badawczy oraz zwiększa możliwości podczas porównywania teoretycznych założeń z wynikami uzyskanymi w warunkach testowych na gotowym produkcie.

4.8.2 Zalety rozwiązań koncepcyjnych

Określając sprawność układu pompy ciepła posługujemy się pomiarami przy zmiennych parametrach eksploatacyjnych. różnic związanych z okrojonymi warunkami laboratoryjnymi należy uwzględniać stanowiska pomiarowe z jak najwyższym stopniem odwzorowania warunków rzeczywistych. Badanie na stanowisku koncepcyjnym możliwe jest do przeprowadzenia w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach rzeczywistych podczas poruszania się po drogach zamkniętych. Główną zaletą konstrukcyjną stanowiska jest umożliwienie symulacji w warunkach rzeczywistych. Przeprowadzone w ten sposób pomiary mogą zostać uwzględnione do walidacji stanowiska w warunkach laboratoryjnych ale również pozwala to na przedstawienie porównań do już istniejących

„tradycyjnych” stanowisk badawczych przeznaczonych do pomiarów układów grzewczo-chłodniczych. Główne zalety przedstawiono na rysunku 59.



Rysunek 60 Zalety stanowiska koncepcyjnego

Wadą koncepcji jest brak obecnie badań wstępnym etapie projektowym badań przeprowadzanych w już docelowym środowisku (w samochodzie) układów grzewczo-chłodniczych. Wraz z wzrostem zainteresowania pojazdami elektrycznymi oraz zwiększeniem uwagi na wpływ układów grzewczo-chłodniczych na zasięg. Możliwe jest w niedalekiej przyszłości zastosowanie koncepcji stanowiska. Kluczowym elementem wpływającym na zasadność wprowadzenia tego typu rozwiązania do walidacji jest aspekt ekonomiczny.

4.9 Metody oceny rozwiązań pomp ciepła

4.9.1 Sprawność Lorentza oraz współczynnik wydajności

Wpływ na efektywność układu grzewczo-chłodniczego ma temperatura dolnego źródła oraz górnego źródła. Efektywność ta nie obejmuje wpływu pozostałych elementów takich jak sprawność, rodzaj konstrukcji wymienników, rodzaj sprężarki, dodatkowe funkcje układu oraz czynnika chłodniczego. Wpływ dodatkowych elementów uwzględniany jest podczas obliczania rzeczywistej efektywności całego układu.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Sprawność Lorentza określana jest przez zestawienie rzeczywistego COP urządzenia do maksymalnego COP teoretycznego obiegu lewo bieżnego – Carnota wyrażona równaniem:

$$COP_C = \frac{T_g}{T_g - T_d} \quad (2)$$

Uwzględniając podczas obliczeń wymiennik idealny (przekazywanie ciepła odbywa się bez różnicy temperatur) opieramy się o scenariusz nie rzeczywisty. Rzeczywisty współczynnik COP wyraża się równaniem, uwzględniającym ciepła oddane w skraplaczu zmierzone z wykorzystaniem np. licznika ciepła oraz energii elektrycznej zużytej podczas pracy. Metoda ta pozwala uwzględnić wszystkie elementy pośrednio wpływające na wynik takie jak wentylatory, zawory, sterowniki, grzałki, sprężarkę itp.

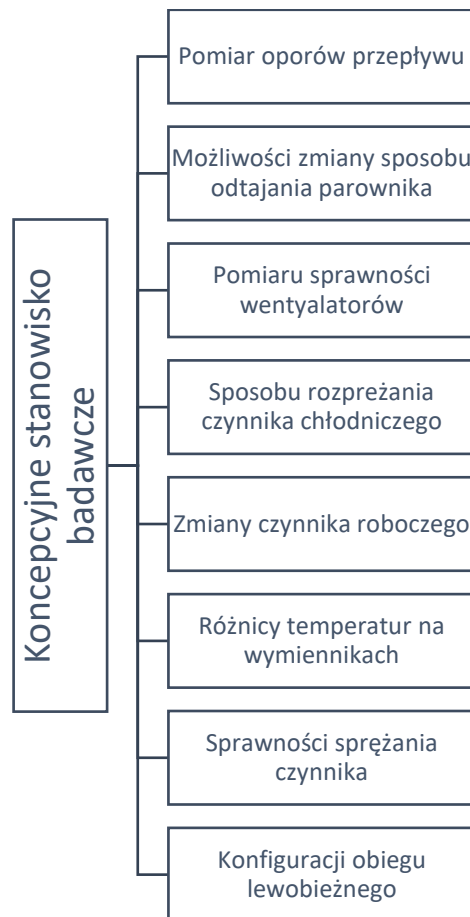
$$COP = \frac{\dot{Q}}{W} \quad (3)$$

$$COP_{ri} = \frac{\dot{Q}_{s-\Delta} \dot{Q}_{12}}{N_{els} + N_{wch} + N_p - T_d} \quad (4)$$

W celu osiągnięcia odpowiedniego poziomu dokładności wyników należy wprowadzić definicje sprawności obiegu idealnego Carnota oraz sprawność rzeczywista pompy ciepła. Takie założenie pozwoli na wykorzystanie możliwości zastosowania sprawności Lorentza (powszechnie rozumianej jako sprawność). Literatura wskazuje sprawność Lorentza jako odwracalnością obiegu a równocześnie sprawność egzergijną [77]. Bilans egzergii oraz jego zastosowanie do analizy ogranicza konieczność przyswojenia wiedzy, która jest powszechnie stosowana pomimo duży możliwości jakie daje zastosowanie tego pojęcia do analiz [19]. Sprawność Lorentza opisuje równanie:

$$n_l = \frac{COP}{COP_C} \quad (5)$$

Sprawność rzeczywista opiera się na mniejszej od sprawności niż występująca w obiegu Caranota. Zastosowanie tego wzoru pozwala na dokładniejsze pomiary. Tego rodzaju obliczenia wymagają stanowiska badawczego o precyzyjnych możliwościach. Rysunek 60 przedstawia podział koncepcyjnych stanowisk badawczych.



Rysunek 61 Podział koncepcyjnych stanowisk badawczych

Podczas pomiarów obiegu odwaracalnego Carnota przyjmuje się temperature skraplania oraz parowania jako temperature źródła ciepła. Układy grzewczo-chłodniczego oparte o pompe ciepła przekazują ciepło w wymiennikach, gdzie proces przebiega nieodwracalnie z różnicą temperatur w każdym z nich. Pomiar rzeczywistej sprawności pompy ciepła przyjmuje się, że COP obiegu Carnota będzie określany dla temperatur powietrza na zewnątrz pojazdu. Rozwiązanie to definiuje wielkość wymienników która jest projektowana wpływając w ten sposób na sprawność pompy ciepła oraz na jej wagę. Zakres sprawności w zależności od temperatury parownika jest uzależniony od parametrów danego czynnika chłodniczego. Wzrost sprawności Lorenzta wraz ze zmniejszającą się różnicą ciśnień na linii ssawnej a tłocznej wpływa na odbieganie od rzeczywistych wyników pomiarów. W celu określenia rzeczywistego poziomu efektywności energetycznej pompy ciepła należy przeprowadzić badania w warunkach rzeczywistych. Obecne metody badań pomp ciepła na stanowiskach badawczych posiadają przedstawione w pracy wady. Przedstawiona koncepcja

stanowiska badawczego ze względu na wykorzystanie docelowej zabudowy układu wykazuje możliwość badań w warunkach rzeczywistych.

5 Ekonomia

Aspekt ekonomiczny związany z układami grzewczo-chłodniczymi opiera się na badaniach produktowych oraz kosztach ponoszonych podczas produkcji elementów. Analiza opłacalności przedstawionej koncepcji stanowiska badawczego ma na celu wskazać poziom opłacalności inwestycji. Kalkulacja stanowiska koncepcyjnego, jako inwestycji długoterminowej obejmuje koszt uniwersalnych przyłączy możliwych do wykorzystania podczas różnych projektów. Obejmuje również zakup podczas realizacji pojazdu w całości lub jego części w celu odwzorowania warunków eksploatacyjnych. Zgodnie z przedstawionymi w pracy wnioskami należy uwzględnić podczas analizy wpływ koncepcji stanowiska na ograniczenie wykorzystania obecnych stanowisk. Wskazane wnioski przedstawiają możliwość zmian technologicznych wpływających bezpośrednio na:

- ograniczenie ubytku czynnika roboczego podczas eksploatacji
- redukcje spadku ciśnienia na podstawie realnych pomiarów w warunkach eksploatacyjnych
- ograniczenie długości elementów elastycznych

W tabeli 25 przedstawiono ekonomiczny aspekt stanowiska koncepcyjnego oraz obecnych badań laboratoryjnych.

Tabela 25 Ekonomiczny aspekt stanowiska koncepcyjnego oraz obecnych badań laboratoryjnych.

Typ badań	Badania laboratoryjne	Badania na stanowisku koncepcyjnym
Eksploatacyjne	Brak badań eksploatacyjnych	-redukcja kosztów modernizacji o 85%* -redukcja wykorzystania wzbudników drgań o mocy 77kW -ograniczenie kosztów badania spadku ciśnienia o 89%

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Badania całych układów	Brak badań całych układów	Obniżenie kosztów wybranych badań o 66%
Badania pojedynczych odcinków	Standard	Możliwe do przeprowadzenia w warunkach eksploatacyjnych

*zmiany konstrukcyjne samochodu lub elementów niezwiązanych z układami grzewczo-chłodniczymi mogą wpływać na koszt modernizacji.

Dla koncepcji stanowiska badawczego, jako inwestycji został przedstawiony rachunek efektywności inwestycji. Procedura obliczeniowa opierała się na oszacowaniu przychodów związanych kosztem badań na przestrzeni dwóch lat. Określeniu początkowych nakładów inwestycyjnych. Obliczenia zostały przeprowadzone zgodnie z wzorem na NPV

$$NPV = C_0 + \sum_{i=1}^t \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

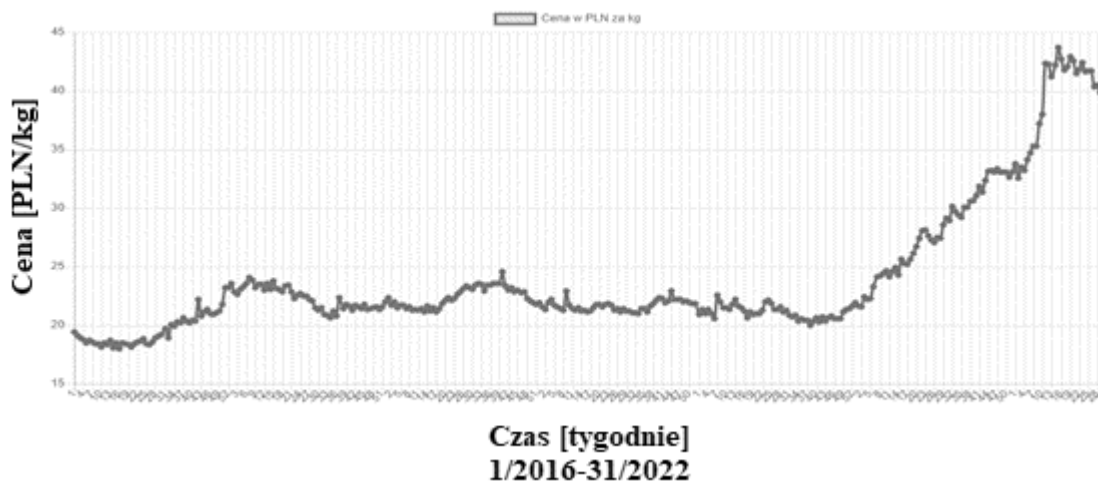
Podczas obliczenia wartości bieżącej netto inwestycji wskazano inwestycje początkowe oraz wpływy pieniężne poszczególnych lat. Wynik wskazał bezpośrednio wartość powyżej zera wskazując zasadność przeprowadzenia inwestycji.

Koszt układów opiera się również na materiałach wykorzystanych do produkcji. Układy grzewczo-chłodnicze produkowane są z różnych komponentów przez różnych dostawców. Jednakże obserwowane zmiany na cen surowców do produkcji elementów składowych wskazują znaczne zmiany na przestrzeni lat. Obserwowana konkurencyjność pomiędzy producentami oraz zmiany zachodzące w zasilaniu pojazdów kładą coraz większy nacisk na rozwiązania redukujące koszty. Rysunek 61 przedstawia ceny aluminium na przestrzeni lat 2016 do 2022.



Rysunek 62 Wykres cen aluminium na przestrzeni lat 2016-2022. [78]

Obserwowane wahanie cen aluminium od 1500 USD za tonę do 3700 USD za tonę wskazują wzrost cen o 150% na przełomie 2 lat. Rysunek 62 przedstawia wykres cen stali nierdzewnej na przestrzeni lat 2016 – 2022.

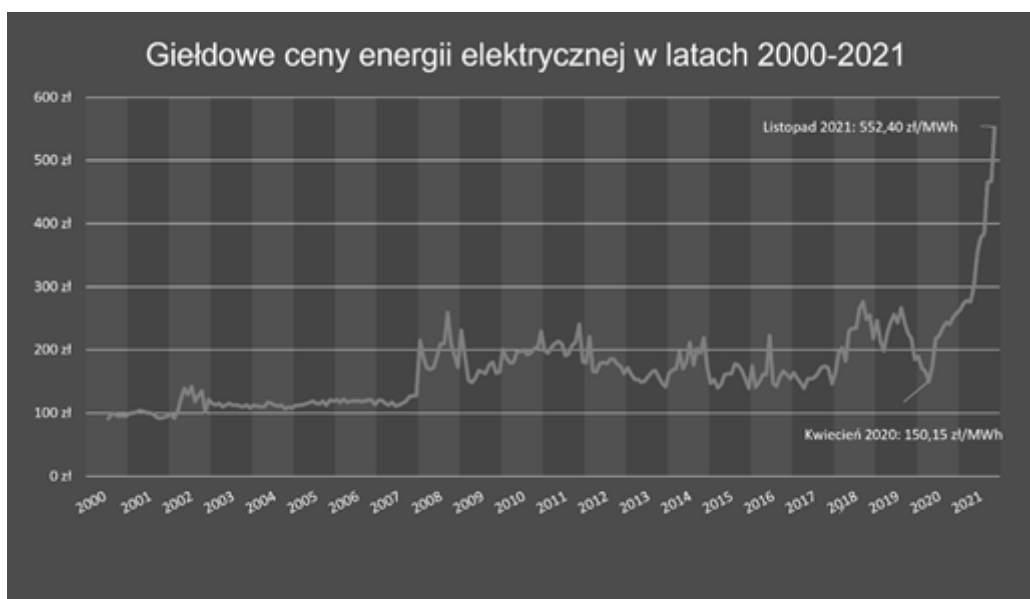


Rysunek 63 Wykres cen stali nierdzewnej na przestrzeni lat 2016-2022. [79]

Przedstawione ceny stali nierdzewnej wskazują wzrost kosztów o 150% na przełomie 5 lat. Wahania cen również wpływają na aspekt ekonomiczny. Dokładność oceny kosztów zależy od ilości informacji o projekcie. Metodą oszacowania rzędu wielkości kosztów, podczas budowy koncepcyjnej instalacji opierają się na opublikowanych danych wcześniej realizowanych przedsięwzięć podobnych rozwiązań.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

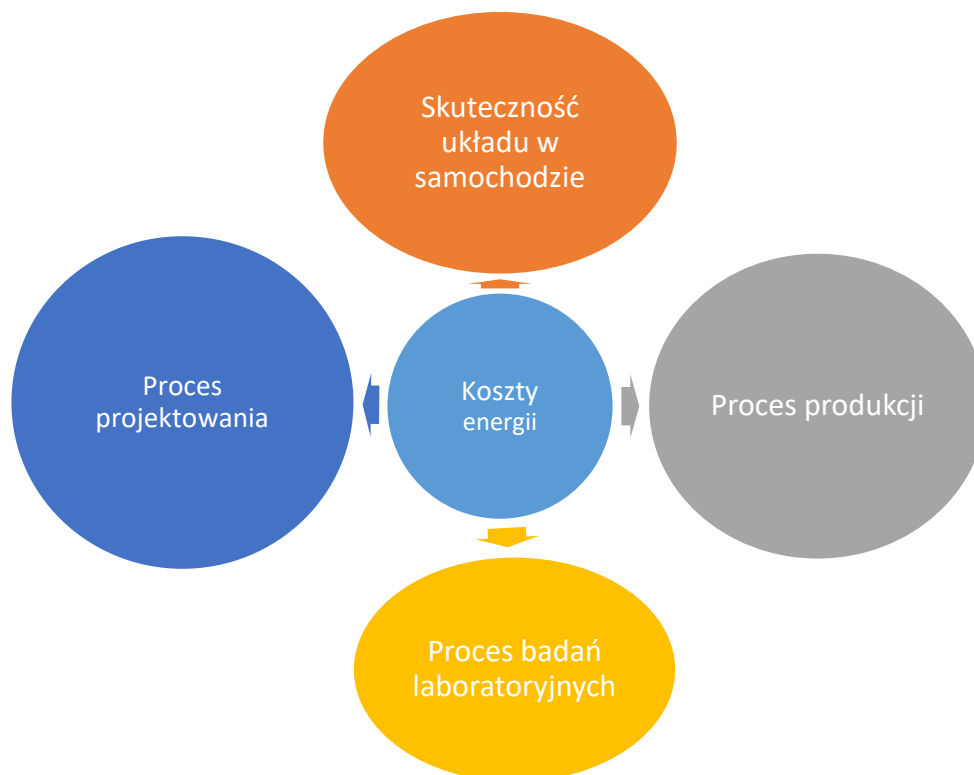
Taki szacunek wymaga jedynie informacji na temat przewidywalnej wielkości produkcji. Szacowanie kosztów na podstawie danych historycznych może odbywać się tylko w przypadku dostępności szczegółowych danych. Konceptyjne rozwiązania, bardzo zbliżone w budowie mogą posiadać innowacyjne rozwiązania, których koszty mogą być trudne do oszacowania. Dodatkowo w celu oszacowania kosztów stanowiska oraz jego ekonomicznego wpływu na produkt końcowy możemy wykorzystać metodę czynnikowa szacowania kosztów inwestycji opartą na szacunkowych cenach zakupu głównych elementów niezbędnych do budowy instalacji. Dokładność takiego rodzaju oceny będzie silnie zależała od stopnia zaawansowania projektu. W rozwiązaniu koncepcyjnym należy oszacować koszty na podstawie dokonanej specyfikacji głównych urządzeń projektowanego systemu. Wszystkie metody mające na celu szacowanie kosztów przyszłych inwestycji opierają się na danych historycznych. Zmiany obserwowane na rysunkach 57, 58 wskazują diametralne zmiany kosztów samych materiałów, co przekłada się na brak dokładności w szacowaniu całej inwestycji oraz czasu jej zwrotu. Związane z tym obliczenia oraz ich brak dokładności nie mogą wpływać bezpośrednio na ocenę samej koncepcji. Kluczowym aspektem związanym celowością pracy jest zużycie energii elektrycznej na każdym z etapów projektu. Rosnące ceny przedstawia rysunek 63 dotyczący giełdowych cen energii elektrycznej w latach 2000-2021.



Rysunek 64 Giełdowe ceny energii elektrycznej w latach 2000-2021. [81]

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Wszystkie etapy produkcyjne opierają się na zużyciu energii elektrycznej. Wprowadzenie metod laboratoryjnych o dokładniejszym niż zakładany stopniu wpłynie pośrednio na ograniczenie wad związanych z funkcjonalnością produktu końcowego. Wprowadzenie takich rozwiązań ograniczy zużycie energii elektrycznej podczas etapów przedstawionych na rysunku 64.



Rysunek 65. Zestawienie procesów których koszt związany jest bezpośrednio z zużyciem energii elektrycznej.

Ekonomiczny aspekt wiąże się również z funkcjonalnością produktu końcowego. Elementy układu grzewczo-chłodniczego o zwiększonym potencjale efektywności wpływają bezpośrednio na koszt pracy układu. Rosnące koszty energii zwiększają również koszty pracy układów grzewczo-chłodniczych. Koncepty stanowisk badawczych oraz odpowiednie dobranie metodyki pomiarowej wpłynie bezpośrednio na ograniczenie kosztów pracy układu.

Rosnące koszty energii elektrycznej również w sposób pośredni zwiększą koszt transportu bez emisyjnego pojazdów elektrycznych, którego układy grzewczo-chłodniczych są kluczowym elementem. Jednakże wpływając na zasięg również podlegają szczególnej uwadze producentów. Wprowadzając metody badawcze o zwiększonym potencjale badawczym zwiększa się również potencjał konkurencyjności.

Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania pomp ciepła w systemach ogrzewania i chłodzenia samochodów

Analiza ekonomiczna układu grzewczo-chłodniczego opierającego się o pompę ciepła wskazuje potencjał badawczy koncepcji. Prace opierające się na systemach poszerzających zakresy badawcze oraz opierających się na dokładniejszych pomiarach w warunkach rzeczywistych bezpośrednio wprowadzi układy pośrednio oszczędzające energię podczas produkcji oraz eksploatacji.

6 Wnioski

1. Międzynarodowa polityka dotycząca rozwiązań bez emisyjnych wpływa bezpośrednio na zwiększenie elektryfikacji w transporcie. Organizacje rządowe wraz z producentami zaangażowani są w politykę ograniczającą rynek samochodów napędzanych paliwami stałymi. Przedstawiona analiza wskazuje wyraźnie tendencje, rozwoju pojazdów elektrycznych wskazując związane z tym problemy. Układy grzewczo-chłodnicze wykorzystywane w pojazdach elektrycznych wyraźnie wskazują wpływ do 50% na zasięg w warunkach zwiększonego wykorzystania. Wskazane zależności wskazują cele technologiczne dla producentów układów grzewczo-chłodniczych na przestrzeni kolejnych lat.
2. Przedstawiona analiza układów napędowych samochodów wskazała skomplikowanie oraz mnogość kombinacji układów, które będą stosowane w samochodach. Przedstawione zestawienie wskazuje liczbę 2 miliardów samochodów do 2040 roku, w których układy grzewczo-chłodnicze będą zainstalowane. Techniczny przegląd układów opierających się w różnym stopniu na wykorzystaniu silnika elektrycznego został przedstawiony. Dynamiczne zmiany rynku oraz szeroka uwaga na rozwiązaniach hybrydowych oraz bez emisyjnych wskazały nowe cele stawiane producentom układów grzewczo-chłodniczych.
3. Przedstawione zostały przebiegi procesów zachodzących w układach grzewczo-chłodniczych. Przebiegi procesów regulujących zmiany stanu czynnika roboczego oraz jego zależności od ciśnienie oraz ilości ciepła. Rozprężenie czynnika roboczego zostało przedstawione na ograniczonych odcinkach. Ocena ta wskazuje bezpośredni związek długości samych przewodów z zachodzącymi reakcjami w całym systemie.
4. Materiały wykorzystywane do produkcji przewodów grzewczo-chłodniczych zostały przedstawione oraz opisane ich parametry. Szczegółowy techniczny opis testów przeprowadzanych oraz wyników z badania próbek wskazuje wyraźny wpływ badań na wstępny proces projektowy. Przedstawione wyniki badań na trzech próbkach o różnej geometrii, wskazały wyraźną korelację

geometrii oraz spadku ciśnienia. Wskazując bezpośrednio element wpływający na efektywność całego układu oraz wartość energii wykorzystywanej podczas pracy.

5. Przedstawiona koncepcja uniwersalnego stanowiska badawczego pracującego na czynnikach R134a, R1234yf oraz R744 wskazała bezpośrednio błędy w obecnych systemach. Przedstawiony układ posiada innowacyjny charakter a wprowadzenie koncepcji do realnego procesu produkcyjnego wpłynie pośrednio na zużycie energii elektrycznej w wielu procesach.

6. Standardowe badania wskazują ograniczenia obecnej metodologii. Wraz z pojawieniem się dodatkowych funkcjonalności układów grzewczo-chłodniczych wady metodologii wpływają na efektywność energetyczną systemu. Przeprowadzone badania podczas pracy wskazały ograniczenia związane z niskim poziomem odwzorowania warunków eksploatacyjnych. Obecne badania laboratoryjne nie wskazują obszarów podatnych na rozszczelnienie oraz innych wad produktu pojawiających się dopiero na etapie eksploatacyjnym. Modernizacje elementów układu w fazie rzeczywistej eksploatacji przez użytkownika wpływają na dodatkowe koszty. Zmiany konstrukcyjne na etapie produkcji przewodów docelowych związane jest również z możliwością kosztownych reklamacji.

7 Bibliografia

- [1] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), „Automobile emissions: An overview,„ w *EPA 400-F-91-007, Fact Sheet OMS-5,*, August 1994..
- [2] U. E. P. A. (EPA), „ Automobiles and ozone,„ w *EPA 400-F-92-006, Fact Sheet OMS-4,*, January 1993.
- [3] „BP Statistical Review of World Energy,„ w *Energy Exploration & Exploitation,* 2001.
- [4] E. H. Wakefield, „History of the Electric Automobile: Battery-only Powered Cars,„ w *Society of Automotive Warrendale, PA,* 1994.
- [5] E. H. Wakefield, *History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles,* Warrendale, PA, : Society of Automotive, 1998.
- [6] Powers, W. F. and Nicastri, P. P, *Automotive Vehicle Control Challenges in the 21st Century,*, tom 8(2000), *Control Engineering Practice,*, 1999, p. 605–618.
- [7] Sunday times driving, „CAR MAKERS ELECTRIC VEHICLE PLANS | a BRAND-„ 2021. [Online]. Available: <https://www.driving.co.uk/news/new-cars/current-upcoming-pure-electric-car-guide-updated/>. [Data uzyskania dostępu: 04 04 2022].
- [8] Reuters, „Reuters,„ 2020. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/climate-change-britain-factbox-idINKBN27Y19F>. [Data uzyskania dostępu: 25.04.2022].
- [9] Transportation, Internation Council on Clean, „The role of the European Union's vehicle CO2 standards in achieving the European Green Deal,„ [Online]. Available: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-vehicle->

- standards-green-deal-mar21.pdf. [Data uzyskania dostępu: 03 04 2022]
- [10] Association, American Automobile, „AAA ELECTRIC VEHICLE RANGE TESTING AAA proprietary research into the effect of ambient temperature and HVAC use on driving range and MPGe,” 2019. [Online]. Available: <http://www.aaa.com/AAA/common/AAR/files/AAA-Electric-Vehicle-Range-Testing-Report.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 03 04 2022].
- [11] EV-database, „[https://ev-database.uk/.](https://ev-database.uk/),” 2021. [Online]. Available: [https://ev-database.uk/.](https://ev-database.uk/)[Data uzyskania dostępu: 03 04 2022].
- [12] Sund, Bengt, „Chapter 6 - Thermal management of batteries,” *Hydrogen Batteries and Fuel Cells. Ed. by Bengt Sund_en. Academic Press,*, p. 93, 2019.
- [13] BatteryUniversity, „Charging at High and Low Temperatures”.
- [14] Larsson. J, Lindström. M, „Development and Evaluation of Internal PMSM Cooling for Electric Vehicles, MSc thesis,” Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2019.
- [15] Jandaud. P-O, Le Besnerais. J, „Heat transfer in electric machines”.
- [16] Doerr.J., Attensperger.T., Wittmann.L., „The New Electric Axle Drives from Audi.,” *ATZ Elektron Worldw*, p. 16, 2018.
- [17] „World Economic Forum,” 2016.
- [18] „7. World Energy Council, Global Transport Scenarios 2050”.
- [19] Outlook, OPEC World Oil, Organization of the Petroleum Exporting Countries Helderstorferstrasse, 17 A-1010 Vienna.
- [20] „9. Exxonmobil, Outlook for Energy: a view to 2040.,” 2017.

- [21] „10. United States Energy Information Administration, International Energy Outlook 2019,” 2019.
- [22] H. List, „ Future powertrains in a fast evolving global environment,” *Kuenftige Antriebssysteme im rasch veraenderlichen Globalen Umfeld. Germany, 2009.*
- [23] E. Fraidl.G., „Impact of electrification on the internal combustion engine,” 2009.
- [24] W. Steiger, „ twinDriveR—concept for electrification of powertrains,” *21st International Conference Engine & Environment, 10–11 September 2009.*
- [25] R. Najork, „Boosted range extender GETRAG’S concept for a highly flexible electric powertrain with ultra low CO2 emissionv,” *21st International Conference Engine & Environment, 10–11 September 2009.*
- [26] Goh, C.C.; Kamarudin, L.M.; Zakaria, A.; Nishizaki, H.; Ramli, N.; Mao, X.; Syed Zakaria, S.M.M.; Kanagaraj, E.; Abdull Sukor, A.S., „"Real-Time In-Vehicle Air Quality Monitoring System Using Machine Learning Prediction Algorithm",” Elham, 2021.
- [27] Shivani, P.; Julia, H.M.; Ekerm, Y.; Anya, A.; Sapan, H.M, „Physiology, Carbon Dioxide Retention;,” *StatPearls Publishing, 2021.*
- [28] Kambly, K.R.,Bradley,T.H., „Estimating the HVAC energy consumption of plug-in electric vehicles.,” *Journal of Power Sources, nr 259, p. 117–124, 2014.*
- [29] Cho, C.-W.; Lee, H.-S.; Won, J.-P.; Lee, M.-Y, „Measurement and Evaluation of Heating Performance of Heat Pump Systems Using Wasted Heat from Electric Devices for an Electric Bus,” *Energies, pp. 658-669, 2012.*

- [30] K. Y. Kim, S. C. Kim, and M. S. Kim, „Experimental studies on the heating performance and efficiency for electric vehicle,” *Proceedings of the KSAE Conference*, p. 1871–1876, 2010.
- [31] Bhatti, M. S., „Evolution of automotive heating riding in comfort: part I,” *ASHRAE Journal*, vol. 41, no. 8,, p. 51–57, 1999.
- [32] Domitrovic.R. E., MEi.V. C., Chen.F.C., „Simulation of an automotive heat pump,” *ASHRAE Transactions*, vol. 103, no. 2, p. 291–296, 1997.
- [33] Lee.D.Y., Cho.C.W.,Won.J.P.,Park.Y.C.,Lee.M. Y., „Performance characteristics of mobile heat pump for a large passenger electric vehicle,” 2013.
- [34] O. K. a. I.Horuz, „An experimental analysis of automotive air conditioning system,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 30, no. 2, p. 273–284, 2003.
- [35] Z. Qi, Y. Zhao, and J. Chen, „Performance enhancement study of mobile air conditioning system using microchannel heat exchangers,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, no. 2, p. 301–312, 2010.
- [36] X. Li, J. Chen, Z. Chen, W. Liu, W. Hu, and X. Liu, „A new method for controlling refrigerant flow in automobile air conditioning,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 7, p. 1073–1085, 2004.
- [37] T.Maruyama, S. Yamauchi, andN. Kagoroku,, „Capacity control of rotary type compressors for automotive air conditioners,” *Proceedings of the International Compressor Engineering Conference*, p. 1–9, 1982.
- [38] Li, C. Tian and X., „Numerical simulation on performance band of automotive air conditioning system with a variable displacement

- compressor,”” *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 17, pp. 2718-2738, 2005.
- [39] J. M. Jabardo, W. G. Mamani, and M. R. Ianella, „Modeling experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor,”” *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, no. 8, pp. 1157-1172, 2002.
- [40] M. H. a. H. M. Ertunc, „Artificial neural network analysis of an automobile air conditioning system,”” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 11-12, p. 1574–1587, 2006.
- [41] Ghodbane, M., „An Investigation of R152a and Hydrocarbon Refrigerants”. *Mobile Air Conditioning SAE Technical Paper 1999-01-0874*.
- [42] Lorentzen, G., Pettersen, J., „A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning,” *Int. J. Refrig.* 16 (1),, p. 4–12.
- [43] Cecchinato, L., Corradi, M., Fornasieri, E., et al, „Carbon dioxide as refrigerant for tap water heat pumps: a comparison with the traditional solution,” *Int. J. Refrig.* 28 (8),, p. 1250–1258, 2005.
- [44] Minetto, S., Cecchinato, L., Brignoli, R., et al, „Water-side reversible CO₂ heat pump for residential application,” *Int. J. Refrig.* 63,, p. 237–250.
- [45] Wang, D., Yu, B., Hu, J., et al., „Heating performance characteristics of CO₂ heat pump system for electrical vehicle in a cold climate,” *Int. J. Refrig.*, 2017.
- [46] Cichong, L., Yun, Z., Tianyuan, G., et al., „Performance evaluation of propane heat pump system for electric vehicle in cold climate,” *International Journal of Refrigeration*, pp. 51-60, November 2018.

- [47] Li, Z., Liang, K., Jiang, H., „Experimental study of R1234yf as a drop-in re- placement for R134a in an oil-free refrigeration system.,” *Applied Thermal Engineering*, pp. 646-654, 5 May 2019.
- [48] Zhang, Z., Wang, D., Zhang, C., „Electric vehicle range extension strate- gies based on improved ac system in cold climate –a review.,” *International Journal of Refrigeration*, pp. 141-150, April 2018.
- [49] Choi, Y.K., et al., „Performance evaluation of a vapor injection heat pump system for electric vehicles,” *International Journal of Refrigeration*, pp. 138-150, February 2017.
- [50] Zhang, Z., Li, W., Shi, J., Chen, J., „A Study on Electric Vehicle Heat Pump Systems in Cold Climates,” *Energies*, p. 881, October 2016.
- [51] Wang, H., Zhang, S., Kan, D., „Energy and exergy analysis of R1234yf heat pump system with inner heat exchanger,” *Chemical Engineering (China) 46 (05)*,, p. 42–47, 2018.
- [52] Navarro, J., Mendoza-Miranda, J.M., Mota-Babiloni, A., et al., „Experimental analysis of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in a vapor compression system.,” *International Journal of Refrigeration*, tom 3, pp. 870-880, 2013.
- [53] Qi, Z., „Experimental study on evaporator performance in mobile air conditioning system using HFO-1234yf as working fluid,” *Applied Thermal Engineering*, pp. 124-130, 29 April 2013.
- [54] D. L. Antonijević, „Carbon dioxide as the replacement for synthetic refrigerants in mobile air conditioning,” *Thermal Science*, tom 3, p. 55–64, 2008..
- [55] R. P. McEnaney, D. E. Boewe, J. M. Yin, Y. C. Park, and C. W. Bullard,, „Experimental comparison of mobile A/C systems when operated with transcritical CO₂ versus conventional R- 134a,” *Proceedings*

of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference,,
pp. 145-150, 1998.

- [56] Pettersen, A. Hafner, G. Skaugen, and H. Rekstad, „Development of compact heat exchangers for CO₂ air-conditioning systems,” *International Journal of Refrigeration*, tom 3, pp. 180-193, May 1998.
- [57] C. W. Bullard, J. M. Yin, and P. S. Hrnjak, „Transcritical CO₂ Mobile Heat Pump and A/C System Experimental and Mode Results,” *SAE Automotive Alternate Refrigerants Symposium*, 2000.
- [58] Lee, Y, Jung, D., „A brief performance comparison of R1234yf and R134a in a bench tester for automobile applications.,” *Applied Thermal Engineering*, pp. 240-242, March 2012.
- [59] Li, W, Liu, R, Liu, Y, Wang, D, Shi, J, Chen, J., „Performance evaluation of R1234yf heat pump system for an electric vehicle in cold climate.,” *International Journal of Refrigeration*, pp. 117-125, July 2020.
- [60] Gaurav, and Kumar, R., „Computational energy and exergy analysis of R134a R1234yf, R1234ze and their mixtures in vapour compression system.,” *Ain Shams Engineering Journal,,* tom 4, pp. 3229-3237, December 2018.
- [61] Calm, G., J. i Hourahan, „Refrigeration for Sustainable Development 23rd International Congress of Refrigeration ICR 2011.,” *Physical, Safety, and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants*, August 2011.
- [62] S. Kitami, S. Ozawa, J. Mito and K. Kimitsu, „CFC gas-escape-proof hoses for car air conditioners.,” *International Polymer Science and Technology*, p. 69, 1994.

- [63] Philip, A. S. P. E., and P. E. Schweitzer., "Fundamentals of corrosion: Mechanisms, causes, and preventative methods.", 2009.
- [64] Kevin Anderson, John Weritz, J. Gilbert Kaufman,, ASM Handbook, Volume 2A - Aluminum Science and Technology, 2018.
- [65] G.F. Dirras, P.Donnadieu, J. Douin, ,,, "Dislocation/precipitate interaction mechanisms in 6XXX aluminum alloys".
- [66] Foster, K.; Hannan, D, „Fundamental fluidborne and airborne noise generation of axial piston pumps.,” *Seminar on Quiet Oil Hydraulic Systems*, tom C257/77, 1977.
- [67] H. B. Huang, X. R. Huang, M. L. Yang, T. C. Lim, and W. P. Ding, „“Identification of vehicle interior noise sources based on wavelet transform and partial coherence analysis,”” *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 247-267, September 2018.
- [68] J. H. Yoon, I. H. Yang, J. E. Jeong, S. G. Park, and J. E. Oh, „“Reliability improvement of a sound quality index for a vehicle HVAC system using a regression and neural network model,”” *Applied Acoustics*, pp. 1099-1103, November 2012.
- [69] Clough, RW, „The finite element method in plane stress analysis.,” w *Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation*, Pittsburgh, 1960.
- [70] Courant, R, *Variational methods for the solutions of problems of equilibrium and vibrations*, 1943, pp. 1-23.
- [71] Aprea C., Ascani M., de Rossi, F., „A criterion for predicting the possible advantage of adopting a suction/liquid heat exchanger in refrigeration system.,” 1999.

- [72] Klein, S.A., Reindl, D.T., Brownell, K, „Refrigeration system performance using liquid-suction heat exchangers,” w *International Journal of Refrigeration*, 2000.
- [73] Mastrullo, R., Mauro, A.W., Tino, S., Vanoli, G.P. (, „A chart for predicting the possible advantage of adopting a suction/liquid heat exchanger in refrigerating system,” 2007.
- [74] Ohno, Shuji Kumamoto Hiroyuki, „Development of an Internal Heat Exchanger (IHX)”.
- [75] Lustbader J, Rugh J, Winkler J, Titov G, Chowdhury S, Leitzel L, et al, „Total Thermal Management of Battery Electric Vehicles (BEVs),” *National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)*, 2018.
- [76] Gao W, He W, Wei L, Li G, Liu Z., „Experimental and Potential Analysis of a Single-Valve Expander for Waste Heat Recovery of a Gasoline Engine,” *Energies*, p. 1001, 2016.
- [77] Szargut, J. i Petela, R., Egzergia, Warszawa: WNT, 1975.