

Rafał Setlak, Politechnika Śląska, Gliwice

Przemysław Kuś

Badawczy Ośrodek Samochodów Małolitrażowych BOSMAL, Bielsko-Biała

BADANIA CIEPLNE SILNIKA SPALINOWEGO SAMOCHODU OSOBOWEGO W ASPEKCIE ZASTOSOWANIA SYSTEMU NAPĘDOWEGO MILD HYBRID

THERMAL ANALYSIS IN COMBUSTION ENGINE COOLING CAR SYSTEM FOR USING MILD HYBRID DRIVE

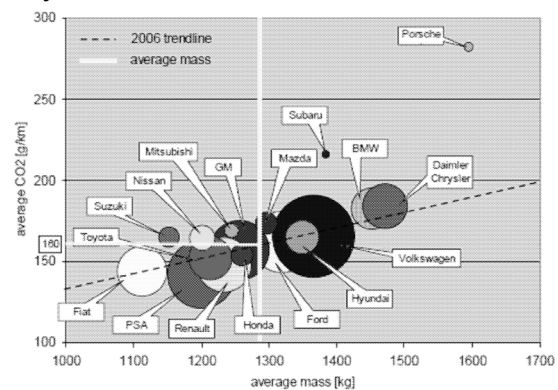
Abstract: : Main goal of article was project of automatic, preheating engine block system, which enable shortening duration of fuel injection after starting combustion engine. It will cause reduction of air pollution during catalyst heating-up phase. The automatic, preheating engine block system should have electric regulation of cooling water temperature, which is realized by electric cooling water pump. Independent control of pump speed and application extra heating-up of cooling water makes possible heating cooling water when engine is turn off and control engines temperature during engine running (admission of increase temperature to 110°C). Within the framework of this work, there have been done calculations, measurements and researches whose aim was to determine the real parameters of cooling system structure for researched engine Fiat Palio Weekend 1,2 8V. Temperature measurements have been done with the help of camera ThermaCam T400 Flir and thermocouples PT 100 whereas flow rate measurements have been done with the help of turbine flow-meter Vision 2008 4F 22 with Hall's converter. Measurements was repeated several times to get reliable results. The carried out measurements allowed us to create thermal maps and flow rate characteristics of researched engines.

1. Wstęp

Zanieczyszczenie powietrza szkodliwymi substancjami pochodzącymi ze źródeł motoryzacyjnych jest najbardziej uciążliwe w dużych miastach. Jednym ze sposobów zmniejszania emisji zanieczyszczeń oraz zużycia paliw ciekłych w pojazdach jest zastosowanie napędu elektrycznego EV (Electric Vehicle), czy hybrydowego HEV (Hybrid Electric Vehicle). Zalety takich napędów uwidaczniają się szczególnie w ruchu miejskim, kiedy występują częste hamowania, a co za tym idzie istnieje możliwość odzysku energii hamowania.

Ograniczenie zużycia paliwa i emisji CO₂ przez samochody jest obecnie przedmiotem intensywnych działań Komisji Europejskiej, co ma się przyczynić się do stymulacji badań i rozwoju, wzmocnienia konkurencyjności europejskiego przemysłu samochodowego. Ponadto Komisja przewiduje ograniczenie uzależnienia od importowanych paliw oraz poprawę jakości życia (za sprawą polepszenia składu powietrza) obywateli Europy. Kara za przekroczenie limitu będzie skorelowana z liczbą g/km, jaką pojazd przekracza pomnożoną przez sprzedany wolumen samochodów. Stawka wyliczona została na 20 EUR za g/km w pierwszym roku (2012),

i osiąga 30 EUR w 2013, 60 EUR w 2014 i 95 EUR w 2015. Na rysunku 1 przedstawiono położenie (na płaszczyźnie emisja CO₂ - masa pojazdu) producentów samochodów wyprodukowanych w 2006 roku.

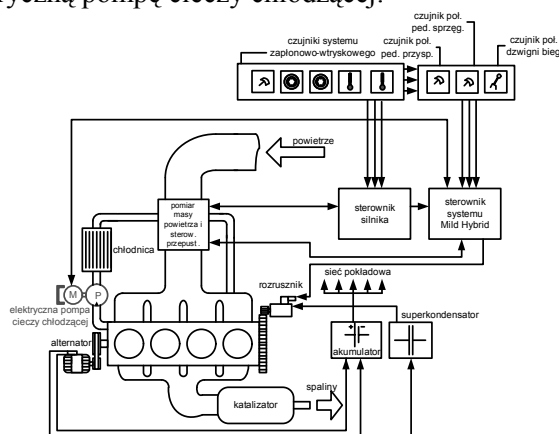


Rys. 1. Położenie na płaszczyźnie emisja CO₂-masa pojazdu producentów samochodów wyprodukowanych w 2006 roku [1]

2. Układ cieplny sytemu napędowego Mild Hybrid

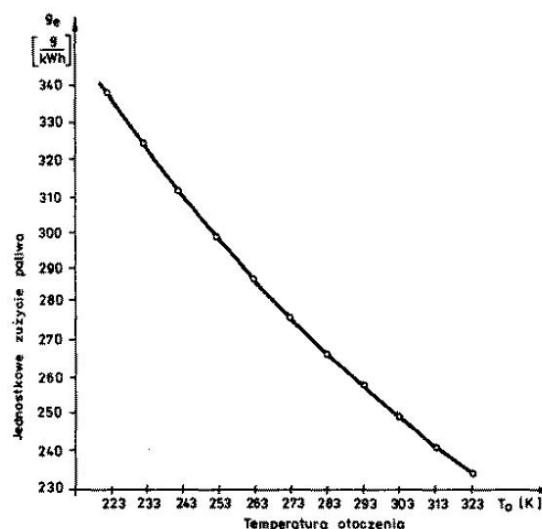
W odróżnieniu od stosowanych już powszechnie napędów hybrydowych zaprojektowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Politechniki Ślą-

skiej układ Mild Hybrid (rys. 2) wyposażony jest m.in. w autonomiczne ogrzewanie cieczy chłodzącej silnik i oleju smarującego oraz elektryczną pompę cieczy chłodzącej.



Rys. 2. Schemat blokowy ekologicznego układu Mild Hybrid z zaznaczoną nową, elektryczną pompą cieczy chłodzącej

We wszystkich samochodach (nawet hybrydowych) w fazie nagrzewania silnika spalinowego wtryskiwana mieszanka paliwowo-powietrzna jest wzbogacana (dłuższy czas wtrysku paliwa do tej samej części masy powietrza sterowanej kątem położenia przepustnicy). W tłokowym silniku spalinowym zaledwie 24÷40% zawartej w paliwie energii jest zamieniane na pracę użyteczną, pozostała część jest emitowana do otoczenia. Podgrzanie bloku silnika jeszcze przed jego uruchomieniem spowoduje skrócenie czasu wtrysku paliwa podczas rozruchu, a to z kolei wpłynie na obniżenie zużycia paliwa podczas uruchamiania silnika. Wynika to z faktu, iż stan cieplny silnika charakteryzujący temperatury ścian cylindrów, oleju smarującego oraz cieczy chłodzącej. W czasie pierwszego rozruchu ze stanu zimnego temperatury te mają zbliżoną wartość. Im niższe są te temperatury, tym większe są straty energii potrzebne na pokonanie oporów ruchu silnika, następuje wydłużenie czasu rozruchu oraz zwiększenie zużycia energii rozruchowej). Skrócenie czasu pracy zimnego silnika z wzbogacaniem mieszanki (dodatkowo silnik pracuje z otwartym sprzężeniem zwrotnym od tzw. Sondy Lambda) spowoduje zmniejszenie w cyklu jeżdżym NEDC zużycia paliwa i emisji CO₂. Przykładowy wpływ temperatury otoczenia na zużycie paliwa przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy wpływ temperatury na jednostkowe zużycie paliwa [6]

3. Cel badań

Celem obliczeń cieplnych było zaprojektowanie układu automatycznego, wstępnego podgrzewania bloku silnika, który będzie umożliwił w napędzie Mild Hybrid skrócenie czasu wtrysku paliwa po rozruchu silnika spalinowego, a co za tym idzie spowoduje zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w fazie nagrzewania katalizatora. Układ wstępnego podgrzewania wyposażony został w autonomiczną elektryczną regulację temperatury cieczy chłodzącej realizowaną przez elektryczną pompę cieczy chłodzącej. Niezależne sterowanie prędkością pompy oraz zastosowanie dodatkowego podgrzewania cieczy umożliwi nagrzewanie czynnika chłodzącego przy wyłączonym silniku spalinowym oraz regulację temperatury silnika w czasie jego pracy (dopuszczenie do zwiększenia temperatury do 110°C).

Analiza możliwości zastosowania elektrycznych pomp cieczy chłodzącej w układach chłodzenia systemu Mild Hybrid została przeprowadzona dla silnika spalinowego 178 B5.000 Fiata Palio Weekend.

4. Obliczenia cieplne silnika spalinowego 178 B5.000

Osiągi silników spalinowych są ograniczone przez ich obciążenia cieplne. Obciążeniem cieplnym nazywa się stan cieplny części silnika określany jednoznacznie wartościami temperatur i gradientami temperatury. Od obciążeń cieplnych zależą naprężenia termiczne, siły tarcia czy wytrzymałość materiałów, a te parametry wpływają bezpośrednio na trwałość

i prawidłowe działanie silnika. Każdy element, który otacza komorę spalania, czyli każdy element grupy tłokowo – cylindrowej zalicza się do obciążonej cieplnie części silnika. Przepływ czynnika chłodzącego w wymienniku ciepła badanego silnika 178 B5.000 następuje w kierunku poziomym. W całej powierzchni rdzenia przepływ chłodziwa jest jednokierunkowy. Rdzenie wodno-rurkowe posiadają uźbrowania, które zwiększają obszar wymiany ciepła. Chłodnica silnika posiada tzw. rdzeń rurkowo-płytkowy. W tabeli 1 przedstawiono dane badanej chłodnicy.

Tabela 1. Dane chłodnicy silnika 178 B5.000

Parametr	Chłodnica silnika 178 B5.000
Moc maksymalna silnika N_e [kW]	54
Typ	RP
Ilość rzędów	2
Wymiary (szer./wys./gr.) [mm]	522x359x34
Ilość rurek w jednym rzędzie i_r	19
Obwód wnętrza rurki O_w [m]	$26,6 \cdot 10^{-3}$
Powierzchnia przekroju rurki f_w' [m ²]	$56,5 \cdot 10^{-6}$

W ramach obliczeń wyznaczono między innymi ilość energii cieplnej rozproszonej przez wymiennik, ilość przepompowanego czynnika chłodzącego, ilość powietrza przekazywaną przez wentylator na wymiennik, wskaźnik przekroju poprzecznego wymiennika, prędkość przepływu czynnika chłodzącego w rurekach, jednostkowe natężenie przepływu czynnika chłodzącego w rurekach, współczynnik dławienia w rdzeniu wymiennika, współczynnik przenikania powierzchniowej wymiany ciepła, liczbę Reynoldsa dla czynnika chłodzącego, liczbę Reynoldsa dla powietrza, liczbę Prandtla dla czynnika chłodzącego, współczynnik wnikanía ciepła do rurek chłodnicy, współczynnik wnikanía ciepła ze ścianek do powietrza. Wyniki obliczeń zostały zestawione w tabeli 2.

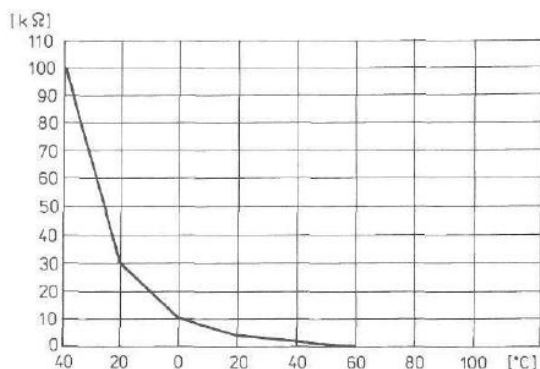
Niezbędną część układu chłodzenia silnika stanowi wentylator osiowy, którego zadaniem jest nadawanie powietrzu odbierającemu ciepło z chłodnicy odpowiedniej prędkości. Charakterystyczną cechą wentylatorów osiowych są promieniowe łopatki posiadające specyficzny kształt, wygięte tak, aby w czasie obrotu powo-

dować przepływ powietrza równoległy do osi wentylatora.

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów chłodnicy silnika 178 B5.000

Parametr	Jednostka	178 B5.000
Q	kW	59,4
G_w	kg/s	2,59
G_p	kg/s	$8,1 \cdot 10^{-3}$
F_k	m ²	0,187
V_r	m ³	$6,37 \cdot 10^{-3}$
f_k	dm ² /kW	0,35
F_w	m ²	7,48
f'	m ²	$1,07 \cdot 10^{-3}$
F	m ²	$2,14 \cdot 10^{-3}$
σ_p	m ² /m ²	3495
v_w	m/s	1,25
G_{ip}	kg/m ² ·s	0,043
G_{iw}	kg/m ² ·s	1210,3
p_s	m ² /m ²	1,43
G_{ir}	kg/m ² ·s	0,061
k	W/m ² ·°C	262
d_{hw}	m	$8,47 \cdot 10^{-3}$
d_{hp}	m	$2,36 \cdot 10^{-3}$
Re_w	-	30510
Re_p	-	5,48
Pr_w	-	2,28
α_w	W/m ² ·°C	9889,2
α_p	W/m ² ·°C	14,4

Konstrukcyjnie wentylatory silnikowe należą do grupy dmuchaw łopatkowych o wartości sprężu 1,0÷3,0. Sprawność oraz efektywność wentylatora zależy w dużej mierze od osłony średnicy zewnętrznej wentylatora. Efektywność wykorzystania obudowy jest charakteryzowana procentową wielkością luzu. Brak obudowy powoduje, iż praca wentylatora okupiona jest dużymi stratami wolumetrycznymi, dlatego w przypadku zainstalowanej obudowy dąży się by procentowa wielkość luzu e' miała wartość ok. 1%. Ważną cechą wentylatora jest kształt jego łopatek, a ściślej ich profil, od którego zależy sprawność wentylatora. Łopatki wentylatora w badanym silniku mają profil wypukło-łukowy i wykonane są z tworzywa sztucznego (obniżenie masy wentylatora, gładkość powierzchni znacząco wpływającej na przyrost sprawności hydraulicznej). W badanym silniku 175 B5.000 wentylator umieszczony jest na stronie chłodnicy, na której powietrze wypływa ogrzane. Czujnik temperatury cieczy chłodzącej silnika 175 B5.000 wykorzystuje rezystor NTC co pokazano na rys. 4.



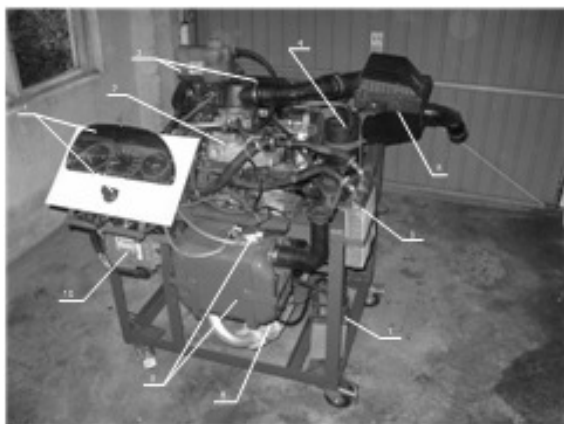
Rys. 4. Charakterystyka rezystancji w funkcji temperatury czujnika temperatury cieczy chłodzącej silnika 175 B5.000 [5]

Wyniki obliczeń badanego wentylatora samochodu Fiat zostały zestawione w tabeli 3

Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów wentylatora silnika 175 B5.000

Parametr	Jednostka	178 B5.000
u_z	m/s	30,6
g_p	kg/kW·s	0,0015
G_p'	m ³ /s	$75,6 \cdot 10^{-3}$
v_1	m/s	1,11
ω	-	0,036
φ	-	0,98
σ	-	26,7
e'	%	1,23
N_p	kW	0,042

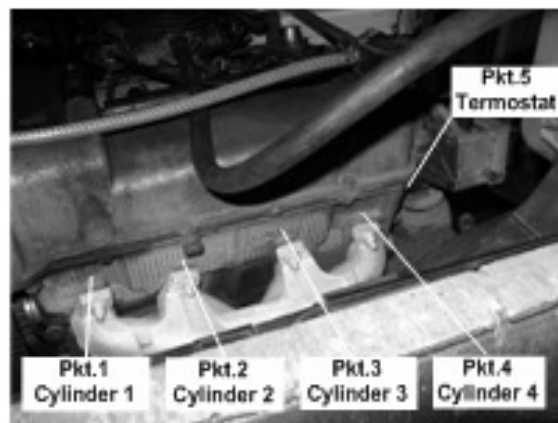
5. Badania termiczne silnika 178 B5.000



Rys. 5. Stanowisko badawcze silnika 178B5.000 widok z przodu, 1 - pulpit z zestawem wskaźników oraz stacyjką, 2 - silnik 178B5.000, 3 - chłodnica i zbiornik wyrównawczy, 4 - układ odprowadzania par paliwa, 5 - filtr powietrza, 6 - nagrzewnica, 7 - akumulator, 8 - katalizator, 9 - zbiornik i pompa paliwa, 10 - jednostka sterująca, 11 - tłumik końcowy, 12 - tłumik środkowy

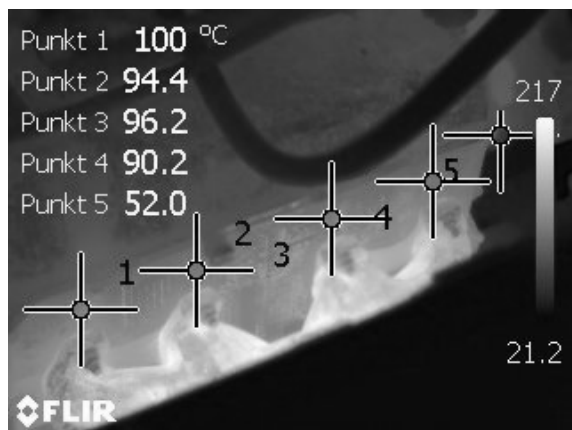
Celem badań termicznych było określenie gradientów temperatur w wybranych punktach silnika spalinowego, zarówno w fazie ich rozgrzewania jak i pracy z ustaloną temperaturą. W badaniach wykorzystywano kamerę termowizyjną firmy FLIR typu ThermoCam T400. W celu przeprowadzenia pomiarów termowizyjnych zostało zaprojektowane i zbudowane stacjonarne stanowisko badawcze wykorzystujące silnik 178B5.000 wyposażony w niezbędne do prawidłowej pracy silnika układy sterujące, wiązki przewodów, układ dolotowy i wydechowy (rys. 5).

Przed przystąpieniem do pomiarów wykonano kilka pomiarów wstępnych procesu nagrzewania silnika w celu określenia najbardziej reprezentatywnych obszarów cieplnych. Docelowo wybrano pięć punktów pomiarowych po jednym poniżej połączenia głowicy z kolejnymi cylindrami oraz jeden na obudowie termostatu (rys. 6).

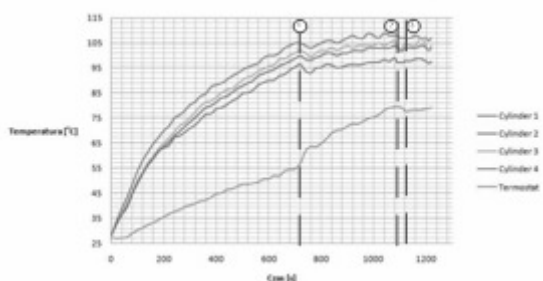


Rys. 6. Punkty pomiaru temperatury kamerą termowizyjną

Przykładowe obrazy termiczne z kamery ThermoCam T400 oraz mierzone wartości temperatur w wybranych punktach silnika 178 B5.000 podczas nagrzewania pokazuje rys. 7. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów temperatur wyznaczono charakterystyki nagrzewania silnika w funkcji czasu. Z charakterystyk odczytano wartości temperatur w punktach pomiarowych w danym czasie, jak również można zauważyć moment otwierania termostatu (1), czy włączenie (2) i wyłączenie się (3) wentylatora (rys. 8).

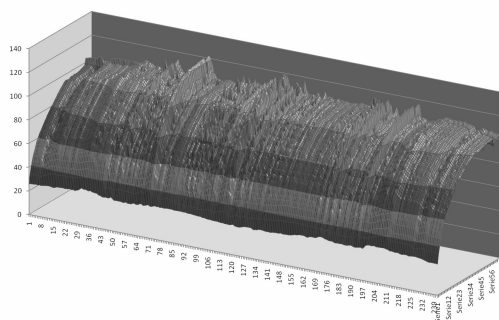


Rys. 7. Przykładowy rozkład temperatur w wybranych punktach pomiarowych silnika 178 B5.000 Fiata Palio Weekend w 10 minucie pomiaru



Rys. 8. Wyznaczona na podstawie pomiarów termowizyjnych charakterystyka nagrzewania silnika 178 B5.000

Na rysunku 9 zaprezentowano mapę termiczną procesu nagrzewania się badanego silnika.



Rys. 9. Mapa termiczna silnika 178 B5.000 Fiata mierzonego kamerą termowizyjną

6. Podsumowanie

Celem pomiarów było stworzenie mapy cieplnej wybranego silnika spalinowego podczas rozruchu. Wyniki badań posłużą do stworzenia elektrycznego układu napędowego pompy cieczy chłodzącej, której zadaniem będzie regulacja natężenia przepływu czynnika chłodzącego podczas fazy nagrzewania silnika oraz pracy

w zmiennych warunkach obciążenia. Podgrzewanie wstępne silnika poprzez umieszczenie dodatkowych elementów grzewczych w układzie chłodzenia, może zachodzić przy wyłączonej pompie cieczy chłodzącej, a po osiągnięciu zadanej wartości temperatury pompa może zostać załączona. Takie wstępne nagrzewanie cieczy chłodzącej będzie zachodziło przy zatrzymanym silniku spalinowym, a energia będzie wtedy pobierana z akumulatora PbPbO₂. Energia niezbędna dla ponownego rozruchu silnika spalinowego będzie pobierana z modułu superkondensatora, a nie akumulatora kwasowo-ołowiowego.

Literatura

- [1]. Biuletyn Europejskiego Prawa Ochrony Środowiska nr 16 z dnia 26.02.2007 r.
- [2] Komunikat Komisji do Rady i Parlamentu Europejskiego z dnia 07.02.2007 r. zawierający wyniki przeglądu wspólnotowej strategii na rzecz zmniejszenia emisji CO₂ pochodzących z samochodów osobowych i lekkich pojazdów dostawczych
- [3] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego i Rady: Ramy prawne podstawą dla zwiększenia konkurencyjności przemysłu motoryzacyjnego w XXI w. Stanowisko Komisji w sprawie sprawozdania końcowego grupy wysokiego szczebla CARS 21.
- [4]. Kozaczewski W.: *Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 2004
- [5]. Ogrodzki A.: *Chłodzenie trakcyjnych silników spalinowych*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 1974
- [6]. Ogrodzki A.: *Technika cieplna w pojazdach*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 1982
- [7] Rozporządzenie Parlament Europejskiego i Rady z dnia 19.12.2007 r. określające normy emisji dla nowych samochodów osobowych w ramach zintegrowanego podejścia Wspólnoty na rzecz obniżenia poziomów emisji CO₂ pochodzących z samochodów dostawczych
- [8] Wajand A.J., Wajand T.J.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. Wydaw. Naukowo techniczne Warszawa 1993, 2005
- [9] Zębiewicz J.: *Fiat Albea, Siena i Palio Weekend*. Wydaw. Komunikacji i Łączności 2002

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy

Autorzy artykułu zostali nagrodzeni Nagrodą Koncernu FIAT za najlepszą pracę pt: „*Analiza przydatności stosowania elektrycznych pomp cieczy w układach chłodzenia silników spalinowych*” realizowaną z tematyki techniki samochodowej w roku 2009.