

# KONKURS NA NAJLEPSZE PRACE DYPLOMOWE WIMiR

VII Konkurs Na Najlepsze Prace Dyplomowe Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki 2016/2017 – prace magisterskie



**Bartosz WRÓBEL**  
MiBM



## Analiza aerodynamiczna bolidu wyścigowego klasy Formula Student z wykorzystaniem pakietu ANSYS Aerodynamic Analysis of a Formula Student Racing Car

promotor: dr inż. Ireneusz Czajka – Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono projekt pakietu aerodynamicznego do bolidu wyścigowego AGH Racing na sezon 2016/2017 z wykorzystaniem pakietu ANSYS. Szczególną uwagę zwrócono na przygotowanie modelu numerycznego oraz wykorzystanie metody skończonych do przeprowadzenia analizy przepływu powietrza. Na wstępie omówiono wpływ sił aerodynamicznych na zachowanie pojazdu w różnych seriach wyścigowych oraz zasady ich powstawania a także ich wpływ na pracę zawieszania. Przeprowadzono analizę aktualnie stosowanych rozwiązań i możliwości ich adaptacji w bolidzie w odniesieniu do wymagań projektowo-konstrukcyjnych narzuconych przez regulamin zawodów. Projekt rozpoczęto od analizy 2D, w której wyznaczono ustawienie profili w spoilerach wielopłatowych w celu maksymalizacji siły docisku a następnie stworzono modele trójwymiarowe i odpowiednio je ukształtowano. Przygotowanie symulacji całego bolidu rozpoczęto od wprowadzenia uproszczeń geometrii względem modelu rzeczywistego i opracowania modelu matematycznego stanowiącego podstawę modelu numerycznego. Wykonano analizę jakości siatki numerycznej oraz dopasowanie jej parametry do wymagań przyjętego modelu turbulencji. Omówiono także ze sposobów wykorzystania komputerów do wykonania obliczeń numerycznych oraz technologii wykonania pakietu aerodynamicznego przy użyciu zaawansowanych materiałów kompozytowych. Najważniejszym etapem pracy jest analiza przepływu płynu dla różnych prędkości bolidu wyposażonego w pakiet aerodynamiczny oraz określenie rozkładu sił i położenia środka parcia. Następnie wykonano podobną analizę dla bolidu bez pakietu aerodynamicznego i porównano wyniki. Zaproponowano również specjalne ustawienie tylnego spoilera na konkurencję przyspieszenia.

### Wstęp

Pakiet aerodynamiczny to zespół elementów odpowiedzialnych za właściwe kierowanie strug powietrza wokół pojazdu w celu osiągnięcia pożądanych parametrów aerodynamicznych.

W bolidach wyścigowych najważniejsze jest opracowanie kompromisu pomiędzy wysokim współczynnikiem siły docisku, określonym przez negatywną wartość współczynnika siły nośnej  $C_L$ , który zapewnia większą przyczepność opon dla szybkiego pokonywania zakrętów a niskim współczynnikiem siły oporu  $C_D$  dla zapewnienia jak najwyższej prędkości maksymalnej.

### Cel i założenia projektu

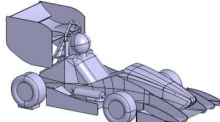
Celem pracy jest zaprojektowanie pakietu aerodynamicznego do bolidu klasy Formula Student na sezon 2016/2017, który pozwoli osiągnąć lepsze czas przejazdu bolidu podczas konkurencji dynamicznych. Aby zrealizować tak postawiony cel, konieczne było rozwiązanie szeregu problemów cząstkowych takich jak:

- opracowanie modelu numerycznego bolidu,
- dobór adaptacji profili lotniczych do zastosowania w bolidzie,
- zaprojektowanie poszycia, przedniego spoilera, tylnego spoilera oraz bocznych spoilerów,
- osiągnięcie balansu sił aerodynamicznych na poziomie 60% na tylny oś,
- wybór odpowiednich materiałów do budowy w celu redukcji masy elementów pakietu aerodynamicznego.

### Model geometryczny

Rzeczywisty model bolidu jest bardzo skomplikowany, dlatego też na potrzeby analizy numerycznej wprowadzono pewne uproszczenia geometrii, z których najważniejsze to:

- wypełnienie wnętrza kół oraz dodanie podstawek podkola,
- wypełnienie wnętrza kapturów kierowcy,
- zastąpienie obszaru wokół silnika,
- usunięcie obszaru powietrza pomiędzy fotelami a osłoną termiczną kierowcy,
- wypełnienie dobrane mocowania a także wszystkie połączenia kształtowe,
- krzywiznę spływu profili lotniczych zaakceptowano kłusom.



Rys.1. Model geometryczny bolidu wykorzystany w symulacjach

### Porównanie rozkładu ciśnienia statycznego dla bolidu z/bz pakietem aerodynamicznym



Rys.3. Rozkład ciśnienia statycznego przy prędkości 15 m/s dla bolidu z pakietem aerodynamicznym

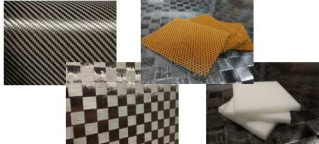


Rys.4. Rozkład ciśnienia statycznego przy prędkości 15 m/s dla bolidu bez pakietu aerodynamicznego

### Materiały kompozytowe

W sportach motorowych niezwykle ważną cechą pojazdu jest ich niska masa, ponieważ zmniejsza to inercję przez co są bardziej przewidywalne podczas jazdy. W tym celu do budowy pakietu aerodynamicznego wykorzystano zaawansowane materiały kompozytowe bazujące na włóknie węglowym oraz żywicę epoksydową. Odpowiednio dobrana liczba warstw oraz orientacja włókien pozwalają uzyskać właściwości wytrzymałościowe wykonanych elementów.

Każdy z elementów to kompozyt warstwowy, oznacza to, że pomiędzy warstwami włókien wykorzystano materiał przekładkowy. Dzięki temu uzyskano znacznie wyższą sztywność oraz wytrzymałość na zginanie. W zależności od użytego materiału przekładkowego, aramidowego włókna miodu lub pianki ROHACELL, elementy wykonano technologią laminowania ręcznego z dociskiem próżniowym lub metodą infuzji.



Rys.5. Tłusty węglowe oraz materiały przekładkowe wykorzystane w bolidzie

### Model matematyczny

Opis matematyczny przepływu jest wyrażony za pomocą podstawowych równań mechaniki płynów w ujęciu Eulera, polegających na wydzieleniu i przestrzeni pewnej objętości kontrolnej i badaniu przepływu w niej w domenie ze znanymi warunkami brzoowymi. Przepływ powietrza jako płynu newtonowskiego definiują równania:

$$\text{Zasada zachowania masy} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\text{Równanie Naviera-Stokesa} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g}$$

$$\text{Zasada zachowania energii} \\ \frac{Dh}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla_{\text{div}} \left( \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \vec{\tau} + \nabla \cdot \vec{q}) \right) + \frac{1}{\rho} \nabla_{\text{div}} \vec{q}$$

Turbulencje zostały zamodelowane z wykorzystaniem modelu  $k-\omega$  SST stąd dodatkowe równania opisujące energię kinetyczną turbulencji oraz właściwą energię dysypacji energii kinetycznej turbulencji:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla_{\text{div}} (\rho k \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \nabla_{\text{div}} (\rho \omega \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega}$$

### Model numeryczny

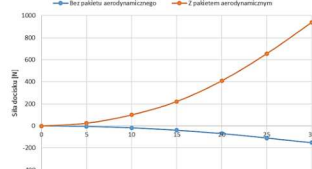
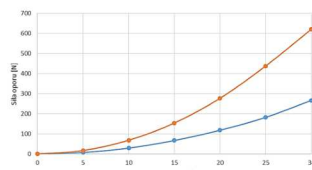
Podstawowa siatka numeryczna została zbudowana głównie na bazie elementów typu Tet4, wypełniających domenę obliczeniową oraz Wędy występujących w regionie warstwy przyściennej. Całkowita ilość komórek wynosi ok. 32,5 mln co stanowi ok. 10 mln węzłów. Maksymalny wymiar elementów w siatce wynosi 500 mm i znajduje się przy granicy domeny obliczeniowej. Jednak aby poprawnie wykonać obliczenia przepływu zastosowano strycy zagęszczenia siatki charakteryzujące się wielkością 250 mm i 50 mm. Dla zapewnienia łącznego przejęcia między strzemiłami ustalono szybkość wzrostu komórek na 10%. Z uwagi na skomplikowany kształt bolidu wysokość najmniejszego elementu ustalono na poziomie 1 mm.

Symulacje przepływu wykonano dla prędkości 15 m/s, ponieważ jest to średnia prędkość podczas jazdy na zawodach a następnie wykonano analizę rozwiązania ze względu na gęstość siatki numerycznej.

Liczba elementów	Liczba węzłów	Cl [-]	Cd [-]	Błęd względny Cl [%]	Błęd względny Cd [%]
31694474	9852374	-1,65	1,10	2,48	0,90
32594887	10014625	-1,61	1,11		
32624664	10017381	-1,61	1,11	0,00	0,00
42376365	11770000	-1,64	1,11	1,86	0,00
53009660	13658662	-1,60	1,13	0,62	1,80

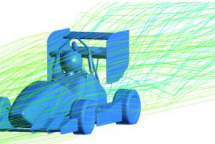
Tabela 1. Test niezależności rozwiązania od przyjętej siatki numerycznej

### Porównanie wartości sił aerodynamicznych



### Ustawienie specjalne „acc”

Jedną z konkurencji rozruchowych podczas zawodów jest próba przyspieszenia na odległość 75m. Aby osiągnąć jak najwyższą czas przejazdu określono specjalny kąt pochYLENIA łotki w tylnym spoilerze, dla którego opór aerodynamiczny bolidu jest najmniejszy. Otwarcie łotki spowodowało redukcję oporu o 42,65 N co stanowi spadek o 27,4%. Przechył łotki prz przyspieszenia zakłonył a zakrzywienie linii prz przyspieszenia tylko na dotychczas powierzchniach spólitern. Gradient ciśnienia a także kądy spływu jest na tyle mały, że występujące wtry są znacznie mniejsze.



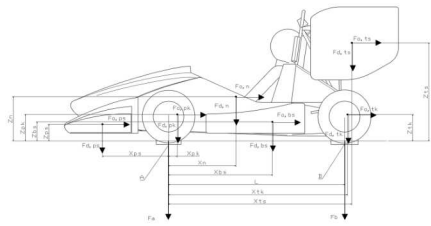
Rys.6. Rozkład linii prz przyspieszenia w ustawieniu „acc”



Rys.2. Bolid AGH Racing podczas zawodów na torze Circuit de Catalunya w Barcelonie z widocznymi liniami prz przyspieszenia

### Balans sił aerodynamicznych

Podczas projektowania poszczególnych spoilerów i analizie ich umiejscowienia w bolidzie wybrano konfigurację, która zapewniła osiągnięcie założonego, stałego balansu aerodynamicznego wynoszącego ok. 60% na tylny oś w całym zakresie prędkości. W wyniku tego środek parcia znajduje się za środkiem ciężkości przez co tylny oś jest bardziej dociężona. Balans sił aerodynamicznych został tak dobrany aby dopasować obciążenie osi pod projekt geometrii zawieszania.



Rys.7. Wymiary charakterystyczne oraz wektory sił aerodynamicznych zaznaczone w kodach ciśnienia niezbędne do określenia położenia środka parcia dla całego bolidu

### Podsumowanie

W ramach prezentowanej pracy udało się osiągnąć zdefiniowane cele. Zaprojektowano pakiet aerodynamiczny składający się z przedniego, tylnego oraz bocznych spoilerów, które skutecznie poprawiają trakcję bolidu. Do realizacji zadania wykorzystano zaawansowane oprogramowanie służące do modelowania brylowego oraz powierzchniowego - Catia V5 oraz profesjonalne oprogramowanie służące do obliczeń numerycznych przepływu z wykorzystaniem metody skończonych - ANSYS Fluent. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem infrastruktury PLGrid i superkomputera - Prometheus znajdującego się w ATK Cyfronet w Krakowie. Na przebadanie wszystkich rozważanych konfiguracji bolidu wykorzystano 199 505 godzin znormalizowanych.

Pakiet aerodynamiczny jest ważnym elementem całego projektu i wymaga konsultacji z innymi podzespołami aby prawidłowo wyznaczyć geometrię zawieszania oraz położenie chłodnicy. Znaczenie sił aerodynamicznych widac już podczas fazy koncepcyjnej gdzie za pomocą programu OptimumLap oszacowano jaka będzie różnica czasu przejazdu bolidu na przykładowym torze Formuly Student w zależności od współczynników sił aerodynamicznych. Bolid charakteryzuje się współczynnikiem siły nośnej wynoszącym -1,61 oraz współczynnikiem siły oporu 1,11. Dla bolidu bez pakietu aerodynamicznego współczynniki te wynoszą odpowiednio 0,36 oraz 0,61.

Niezwykle istotne jest odpowiednie rozłożenie sił aerodynamicznych (balans) w całym zakresie rozwijanych prędkości. Niedopasowanie sił aerodynamicznych do ustawień zawieszania bolidu będzie skutkowało nad- lub podsterownością. W przypadku bałku pakietu aerodynamicznego bolid generuje siłę nośną przypadającą w większości na przednią oś.

Rozwój informatyki i komputerów dużej mocy jest niezbędny do wykonania rzetelnych symulacji w przypadku rozwiązywania wielokrotnych problemów przepływowych jakimi są symulacje aerodynamiczne pojazdów. Każda symulacja numeryczna powinna zostać zweryfikowana na drodze eksperymentu. Najlepszą metodą oceny wyników symulacji są badania w tunelu aerodynamicznym. Z uwagi na wysokie koszty takich badań można wykorzystać potężne metody weryfikacji takie jak budowa modeli pomiarowej i złożonej ze statycznych rurek. Piłota i określenie rozkładu prędkości lub ciśnienia w dowolnym miejscu wokół bolidu lub pomiar ugięcia amortyzatorów podczas jazdy ze stałą prędkością.