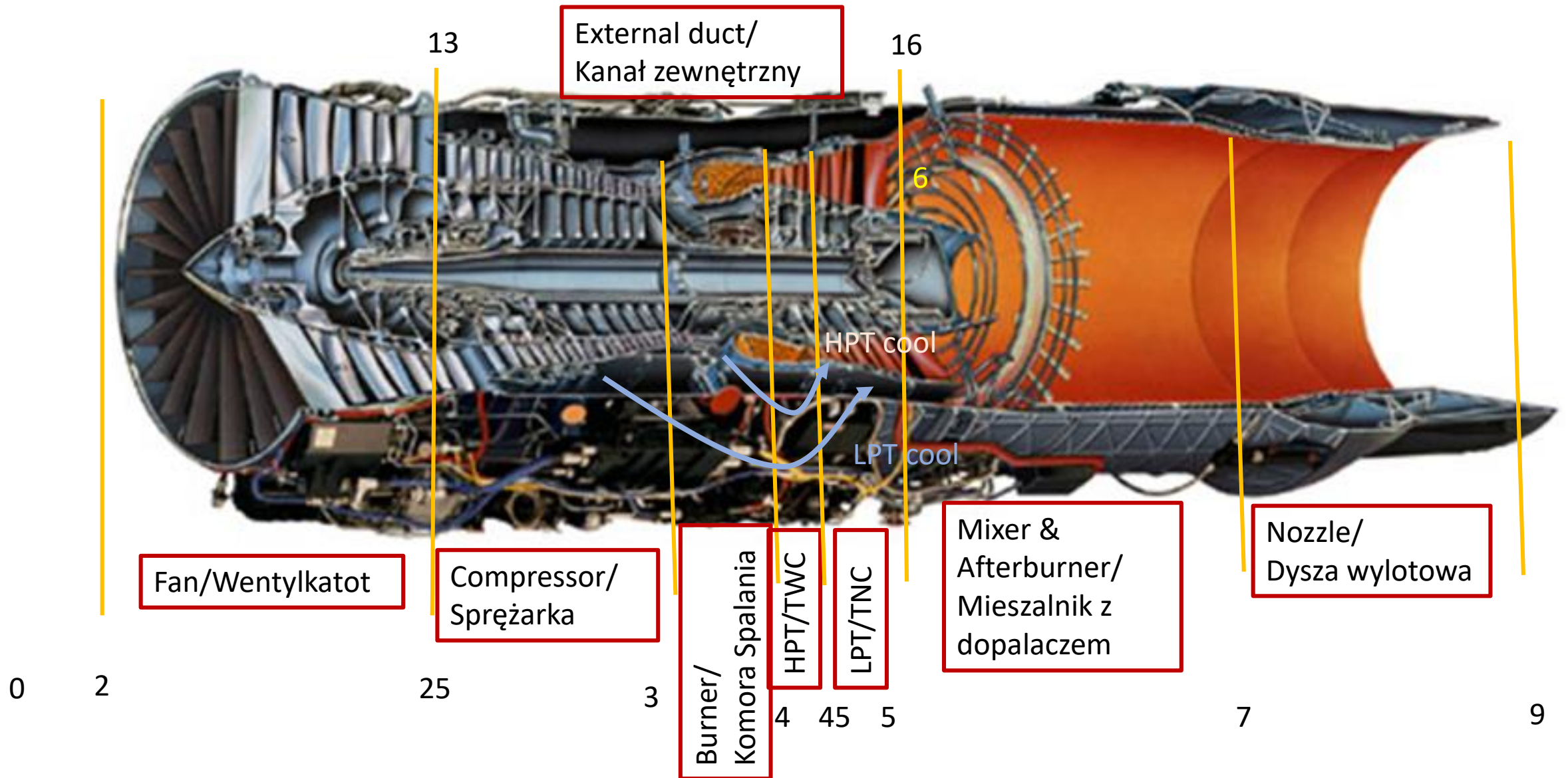


Modelowanie silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem i dopalaczem

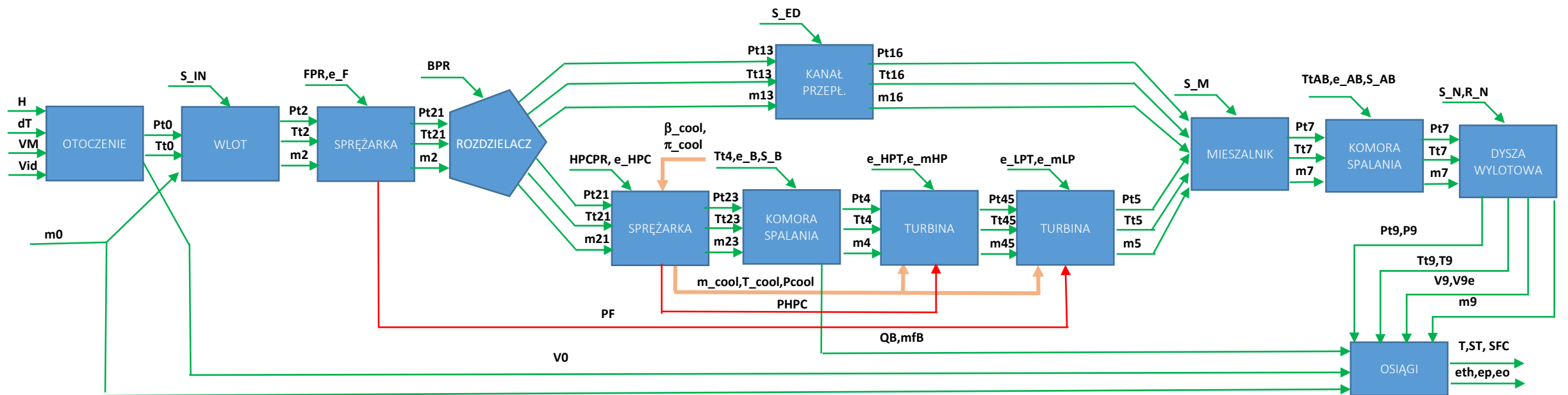
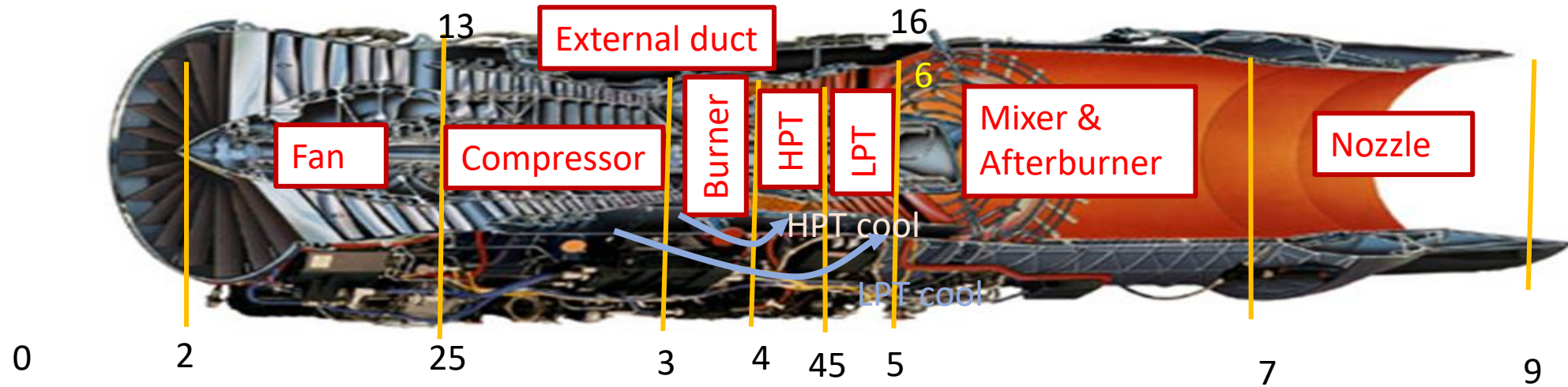
Dr inż. Robert JAKUBOWSKI

Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

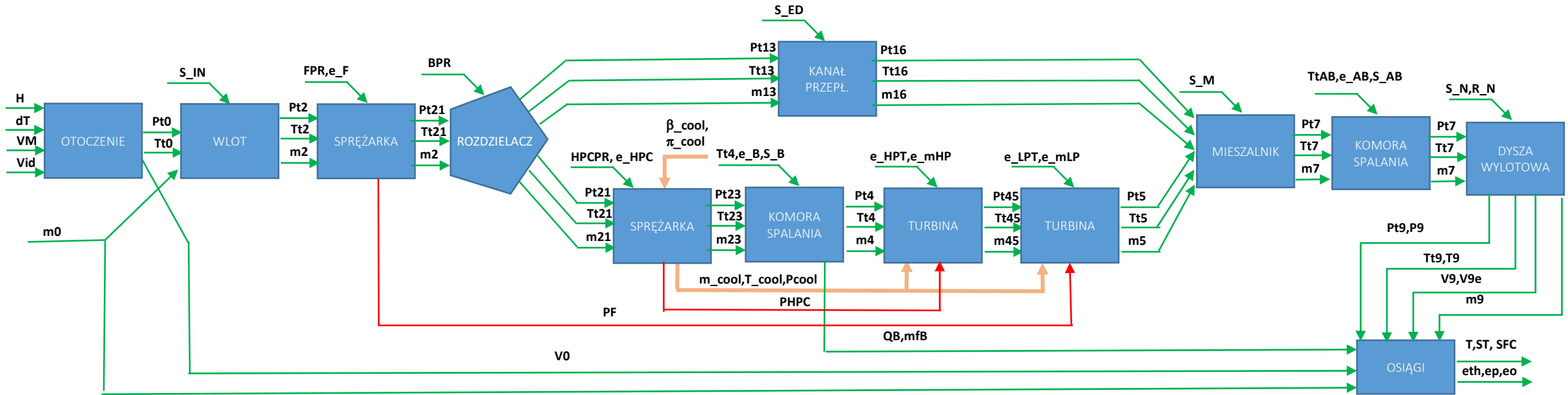
ANALIZA KONSTRUKCJI – ROZKŁAD NA BLOKI FUNKCJONALNE



MODEL SILNIKA DWUPRZEPŁYWOWEGO Z MIESZALNIKIEM



MODEL SILNIKA DWUPRZEPŁYWOWEGO Z MIESZALNIKIEM



`function [ST,SFC,T,mf,A9,Awdt,eth,ep,eo,TT,PP,SE] = silnik_dwuprz_mieszalnik...`

`(H,dT,VM,Vid,m0,BPR,FPC,HPC,Tt4,TtAB,sIN,eF,eHPC,sIN,sB,eB,eHPT,eLPT,sMix,eAB,sABem1,em2,sED,...`

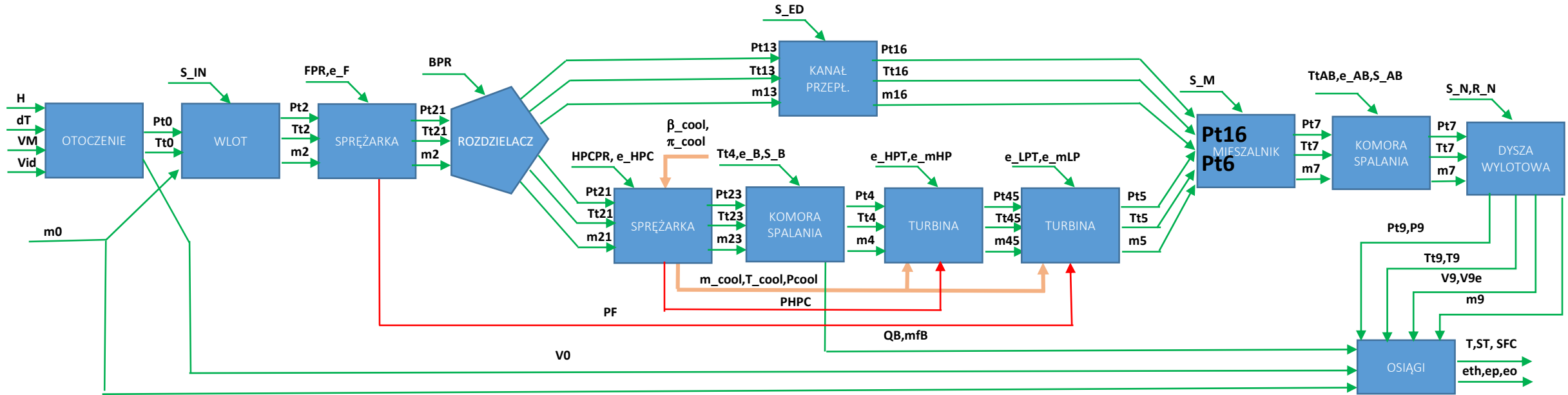
`sN,R_N,Bcool,Pi_cool)`

M_HPT_min i M_LPT_min – można ustawić wewnątrz programu jako stałe wartości

ANALIZA PROBLEMU OBLICZEŃ SILNIKA Z MIESZALNIKIEM I DOPALACZEM

- Dla pracy silnika z mieszalnikiem i dopalaczem proces mieszania i spalania następują równocześnie w tym samym miejscu. W przyjętej koncepcji zostaną te procesy rozdzielone i analizowane kolejno: najpierw mieszanie, a następnie spalanie w dopalczu.
- Dla poprawności pracy silnika z mieszalnikiem konieczny jest taki dobór parametrów gazodynamicznych silnika, aby ciśnienia spiętrzenia na wejściu do mieszalnika z obydwu kanałów były zbliżone. Przy wzroście różnicy ciśnień wpływających do mieszalnika jego sprawność pogarsza się, a gdy stosunek ten jest większy, to fizycznie taki silnik nie będzie pracował poprawnie. W tym celu z czterech podstawowych parametrów gazodynamicznych silnika FPR, HPCPR, BPR, TIT, jedynie tylko trzy mogą być założone, a czwarty parametr powinien być dobrany spełniając warunek $P_{t6} \sim P_{t16}$

MODEL SILNIKA DWUPRZEPŁYWOWEGO Z MIESZALNIKIEM W CELU DOBORU PARAMETRÓW OBIEGU



`function [ST,SFC,T,mf,A9,Awdt,eth,ep,eo,TT,PP,SE] = silnik_dwuprz_mieszalnik...`
 (H,dT,VM,Vid,m0,BPR,FPC,HPC,Tt4,TtAB,sIN,eF,eHPC,sIN,sB,eB,eHPT,eLPT,smix,eAB,sAB,em1,em2,sED,...
 sN,R_N,Bcool,Pi_cool)



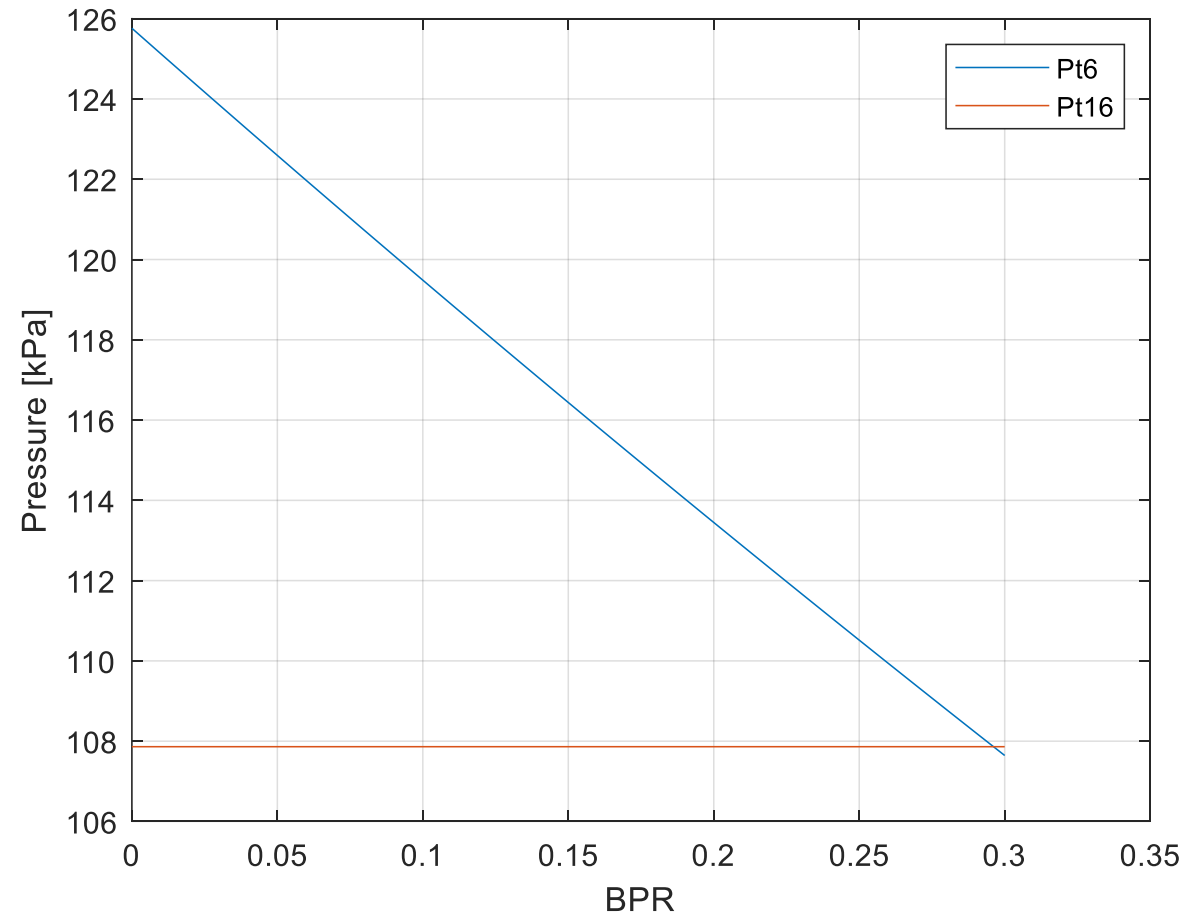
`function [P6,P16] = silnik_dwuprz_mieszalnik_P6_P16...`
 (H,dT,VM,Vid,m0,BPR,FPC,HPC,Tt4,TtAB,sIN,eF,eHPC,sIN,sB,eB,eHPT,eLPT,em1,em2,sED,Bcool,Pi_cool)

DOBÓR STOPNIA DWUPRZEPŁYWOWOŚCI BPR

Założone są parametry: FPR, HPCPR, TIT

- Przy założonym sprężu wentylatora ciśnienie w kanale zewnętrznym Pt16 będzie stałe niezależne od BPR
- Dobór BPR można realizować iteracyjnie zmieniając PBR:
 - Start od BPR=0.01
 - Zwiększanie BPR o 0.01
 - Prowadzimy kontrolę Pt16 względem Pt6
- Uwagi:
 - Jeżeli przy BPR = 0.01, $Pt6 < Pt16$, to znaczy, że inne parametry silnika zostały tak dobrane, że nie jest możliwe wyrównanie ciśnień w mieszalniku. Zalecenia to zwiększenie TIT albo obniżenie FPR

Przykładowe wyniki obliczeń dla doboru BPR



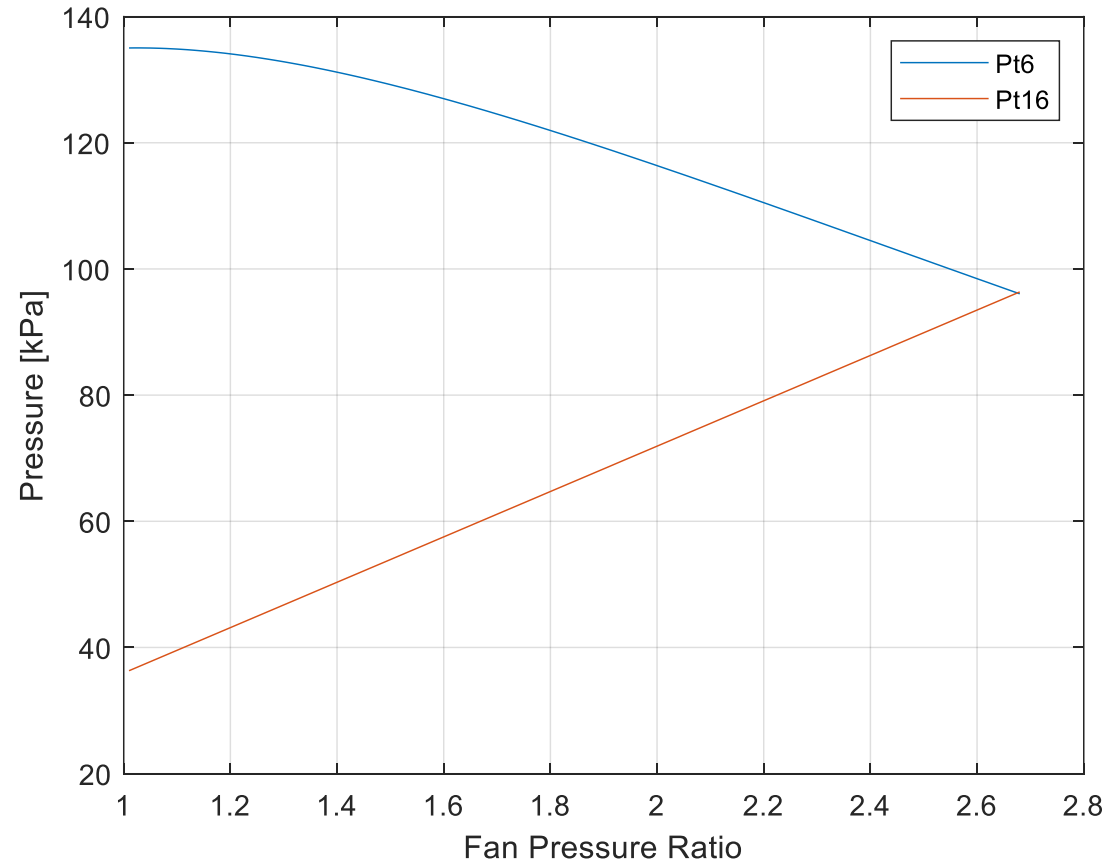
Analiza zmian Pt6 i Pt16 wskazuje, że dobrana wartość BPR = 0.3

DOBÓR SPRĘŻU WENTYLATORA FPR

Założone są parametry: BPR, HPCPR, TIT

- Przy zmianie sprężu wentylatora ciśnienie w kanale zewnętrznym Pt16 oraz w kanale wewnętrznym Pt6 będzie się zmieniać ze zmianą FPR
- Dobór FPR można realizować iteracyjnie zmieniając FPR:
 - Start od FPR=1.01
 - Zwiększanie FPR o 0.01
 - Prowadzimy kontrolę Pt16 względem Pt6
- Uwagi:
 - Jeżeli przy FPR = 1.01, $Pt6 < Pt16$, to znaczy, że inne parametry silnika zostały tak dobrane, że nie jest możliwe wyrównanie ciśnień w mieszalniku. Zalecenia to zwiększenie TIT, lub obniżenie HPCPR

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ DLA DOBORU FPR



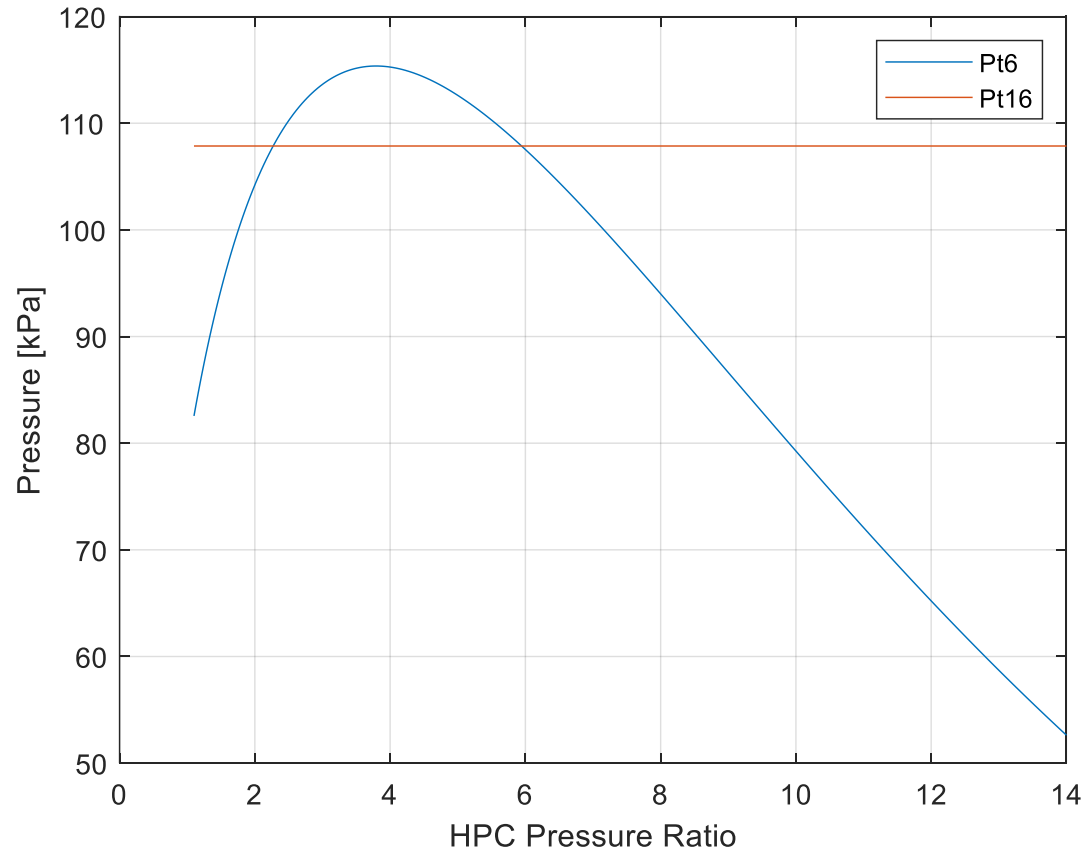
Analiza zmian Pt6 i Pt16 wskazuje, że dobrana wartość FPR = 2.65

DOBÓR SPRĘŻU SPRĘŻARKI HPCPR

Założone są parametry: BPR, FPR, TIT

- Przy zmianie sprężu sprężarki, a stałym sprężu wentylatora ciśnienie w kanale zewnętrznym Pt16 będzie stałe, a w kanale wewnętrznym Pt6 będzie się zmieniać ze zmianą HPCPR
- Dobór HPCPR można realizować iteracyjnie zmieniając HPCPR:
 - Start od HPCPR=1.01
 - Zwiększanie HPCPR o 0.01
 - Prowadzimy kontrolę Pt16 względem Pt6

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ DLA DOBORU HPCPR



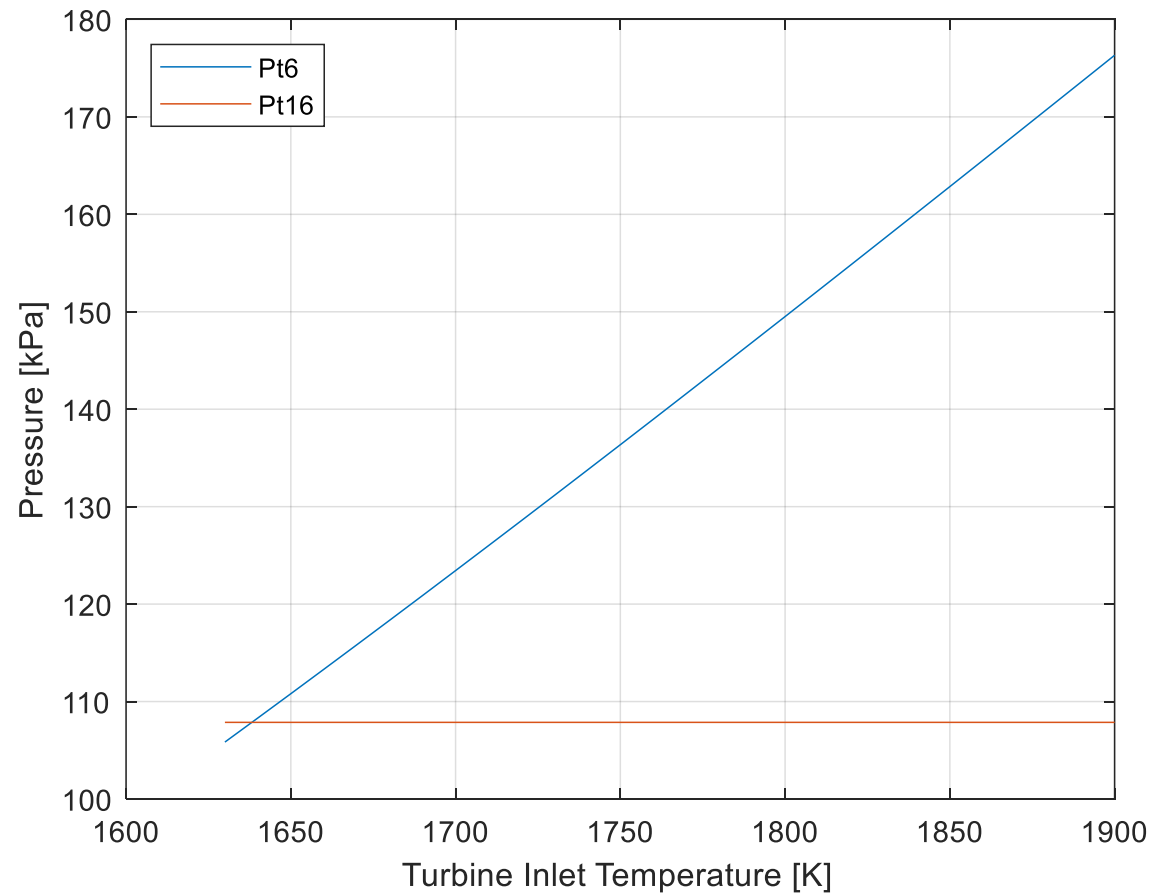
- Wyniki analizy pokazują, że dla dwóch wartości HPCPR otrzymuje się równe wartości ciśnień Pt6 i Pt16 - pierwsza wartość to nieco ponad 2, a druga to 6 (druga wartość jest korzystniejsza ze względu na lepsze osiągi silnika).
- W niektórych sytuacjach początkowe rozwiązanie otrzymuje się dla Pt6 większego od Pt16 – wtedy otrzymuje się tylko jeden punkt przy którym Pt6=Pt16
- Gdy w pierwszym kroku obliczeń otrzymuje się Pt6 mniejsze od Pt16 i w kolejnych krokach Pt6 się obniża, to znaczy, że inne parametry silnika zostały tak dobrane, że nie jest możliwe wyrównanie ciśnień w mieszalniku. Zalecenia to zwiększenie TIT albo obniżenie FPR lub BPR

DOBÓR TIT

Założone są parametry: BPR, FPR, HPCPR

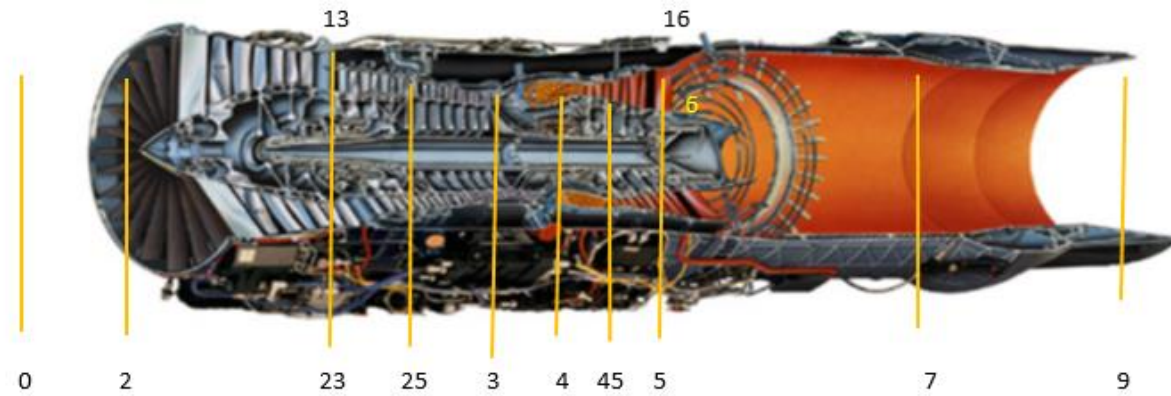
- Przy zmianie TIT, a stałym sprężu wentylatora ciśnienie w kanale zewnętrznym Pt16 będzie stałe, a w kanale wewnętrznym Pt6 będzie się zmieniać ze zmianą TIT
- Dobór TIT można realizować iteracyjnie zmieniając TIT:
 - Start od maksymalnej wartości TIT=TIT_max (np. 1900 K)
 - Zmniejszanie TIT o wartość np. 10 K
 - Prowadzimy kontrolę Pt16 względem Pt6
- Uwagi:
 - Jeżeli przy TIT_max, $Pt6 < Pt16$, to znaczy, że inne parametry silnika zostały tak dobrane, że nie jest możliwe wyrównanie ciśnień w mieszalniku. Zalecenia to zmniejszenie BPR lub FPR.

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ DLA DOBORU TIT



Analiza zmian Pt6 i Pt16 wskazuje, że dobrana wartość TIT = 1630 K

PRZYKŁAD ROZKŁADU PARAMETRÓW W PRZEKROJACH KONTROLNYCH SILNIKA



Przykład obliczeniowy dla:

$H=11$ km

$M_0=0,92$

$m_0=20$ kg/s

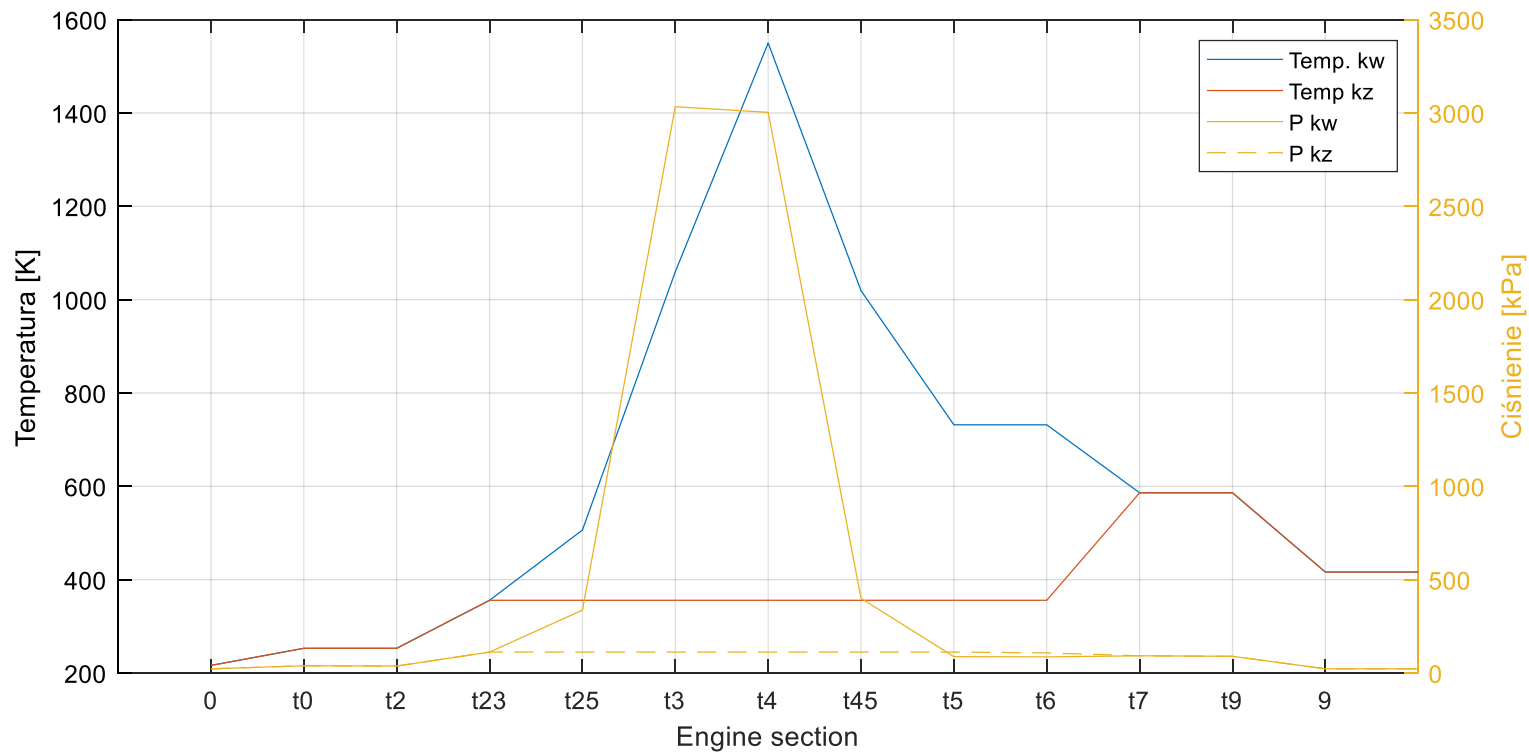
$BPR=0.7$

$FPR=3$

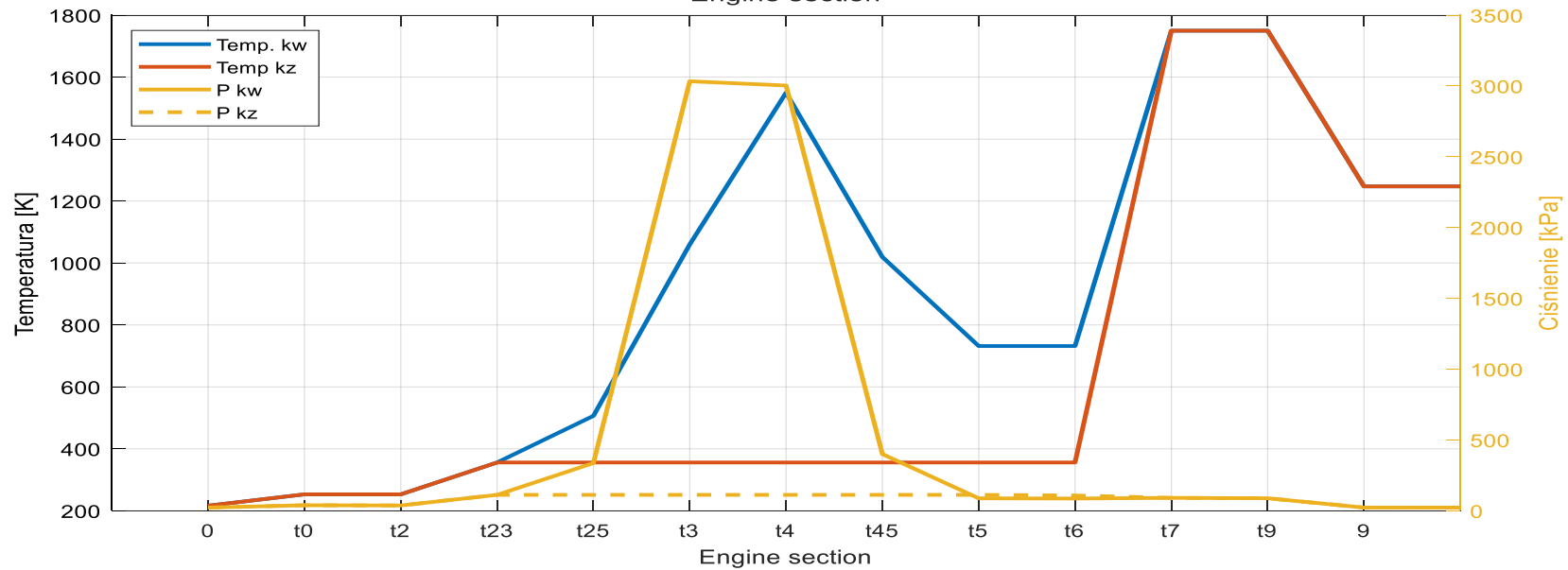
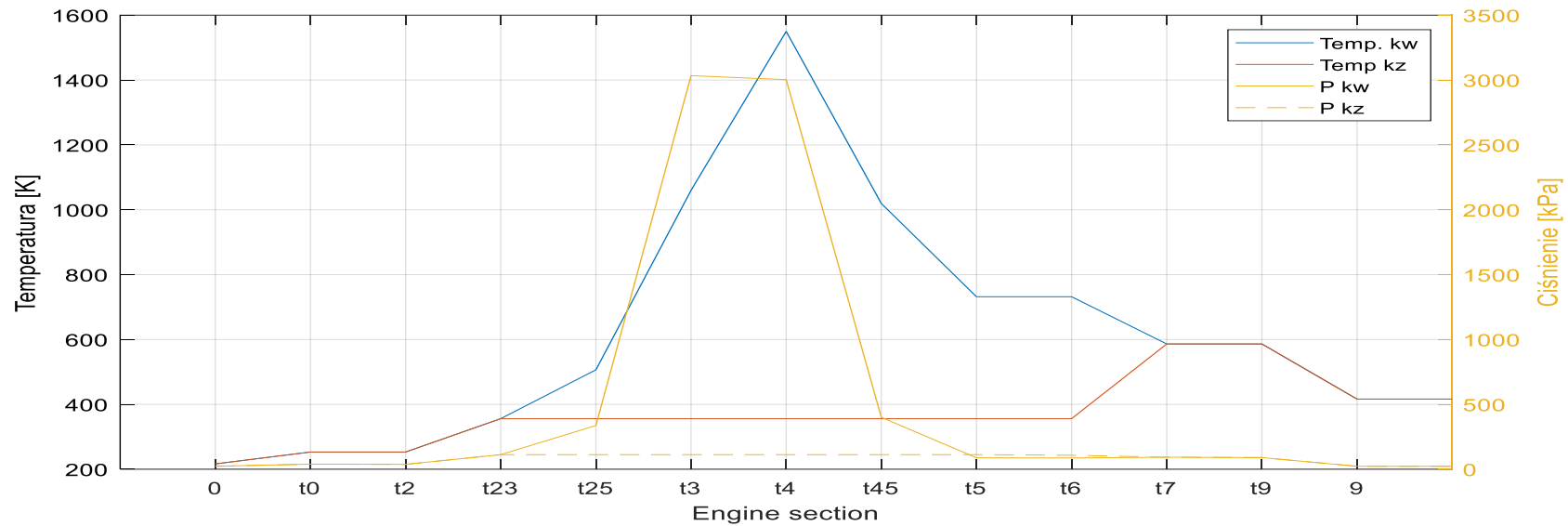
$LPC=3$

$HPC=9$

$TIT=1550$



PRACA SILNIKA Z WŁĄCZONYM DOPALACZEM



PRACA SILNIKA Z WŁĄCZONYM I WYŁĄCZONYM DOPALACZEM

DLA WŁĄCZONEGO DOPALACZA

- Ciąg silnika z włączonym dopalaczem jest ok. 2.5 raza większy
- Zużycie paliwa jest prawie 5 razy większe
- Jednostkowe zużycie paliwa jest prawie 3 razy większe
- Wszystkie sprawności są niższe
- Pole przekroju wylotowego i minimalnego dyszy uległo zwiększeniu

	Parameter	Unit	AB OFF	AB ON
1	'Thrust'	'kN'	7.3287	17.2902
2	'Specific Thrust'	'N*s/kg'	366.4375	864.5101
3	'fuel consumption'	'kg/s'	0.1396	0.8568
4	'Specific fuel consump'	'kg/N/h'	0.0686	0.1784
5	'therm. efficiency'	'-'	0.5503	0.3158
6	'prop. efficiency'	'-'	0.6020	0.4032
7	'overall efficiency'	'-'	0.3313	0.1273
8	'AWDT_HPT'	'm'	0.0036	0.0036
9	'AWDT_LPT'	'm'	0.0252	0.0252
10	'A_9min'	'm'	0.1363	0.2475
11	'A_9'	'm'	0.1701	0.3070

WYKORZYSTANIE FUNKCJI FSOLVE

- Podejście wymaga przygotowania funkcji na ciśnienia na wejściu do mieszalnika w postaci jednej zmiennej wyjściowej np.:

```
function [dP6P16] = silnik_dwuprz_mieszalnik_deltaP6P16...  
(H,dT,VM,Vid,m0,BPR,FPC,HPC,Tt4,TtAB,sIN,eF,eHPC,sIN,sB,eB,eHPT,eLPT,em1,em2,sED,Bcool,Pi_cool)
```

Gdzie zawrty jest kod funkcji jak dla obliczeń P6 i P16 i $dP6P16 = P6 - P16$

POSZUKIWANIE ROZWIĄZANIA DLA SPRĘŻU WENTYLATORA

```
[delta_P_KW_KZ]= @(x)silnik_dwuprz_miesz_deltaP6P16(H,dT,VM,Vid,m0,BPR,x,PiLPC,PiHPC_(i),Tt4,...  
sIN,eF,eLPC,eHPC,sB,eB,eHPT,eLPT,em1,em2,sKZ,sKW,Bup,Pis_up);
```

```
rozw1=fsolve(delta_P_KW_KZ,2,optimoptions('fsolve','Display','off'));
```

Rozwiązanie

Oczekiwane rozwiązanie

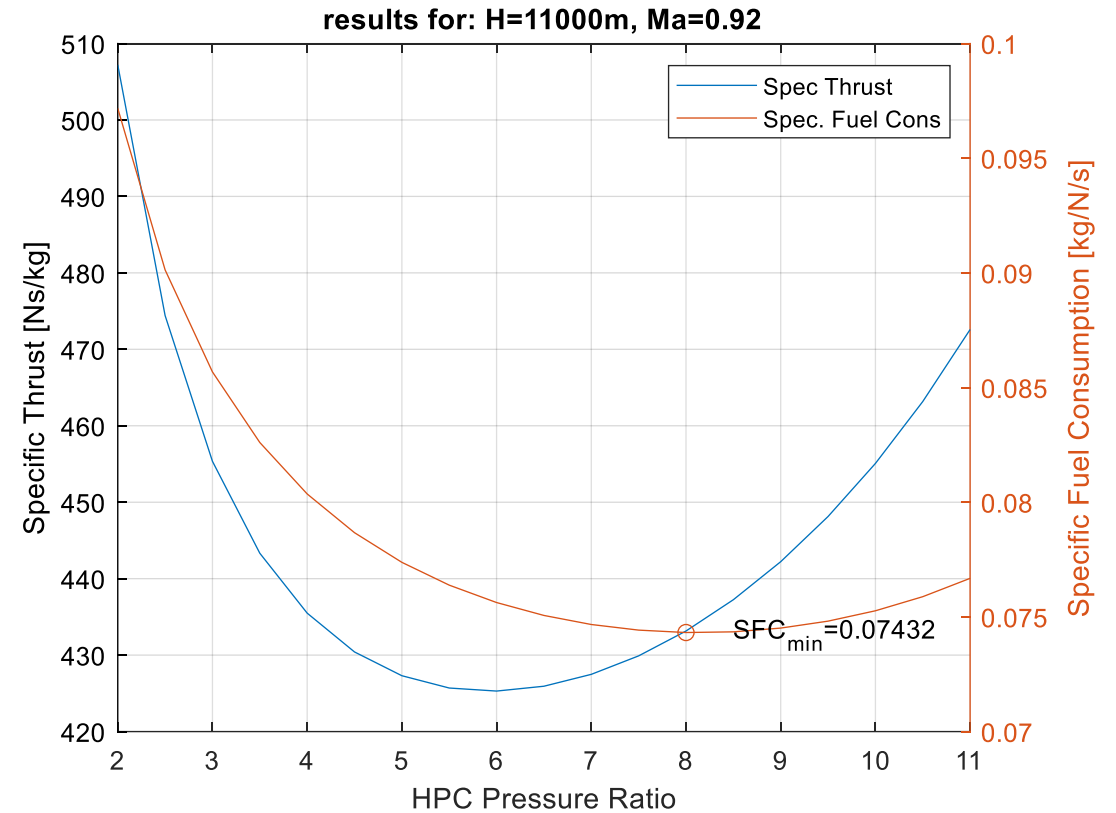
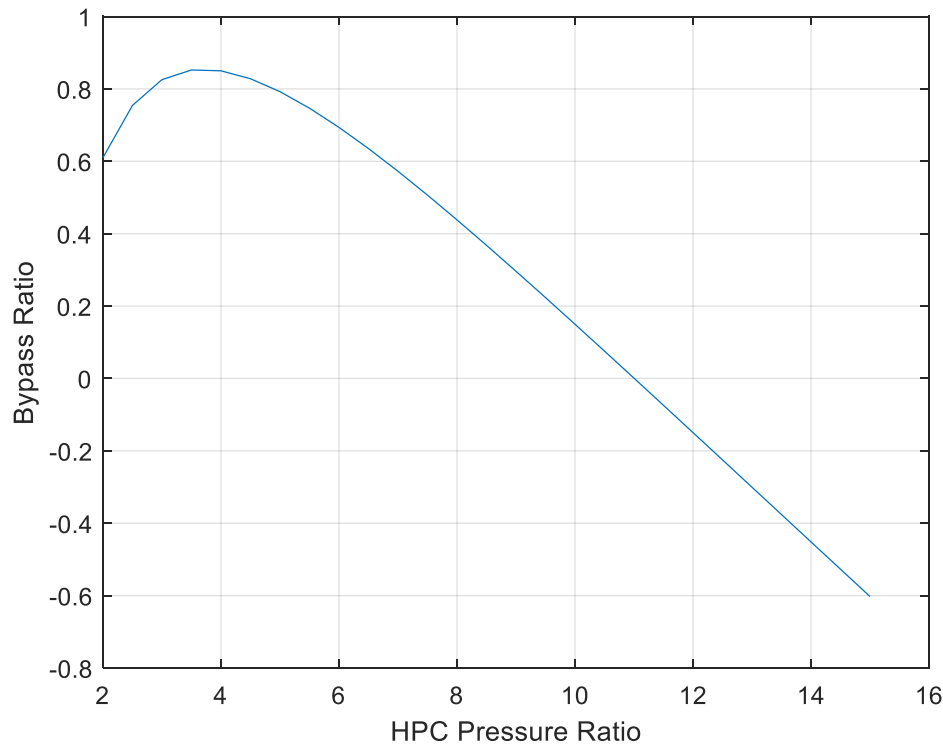
OPTYMALIZACJA OBIEGU

Analiza silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem bez włączonego dopalacza:

- Analizując wpływ wybranego parametru np. sprężu sprężarki
 - Wybiera się jeden parametr, który dobiera się aby zapewnić równość ciśnień w mieszalniku, przy stałych wartościach pozostałych parametrach
 - Wykonuje się obliczenia osiągow silnika dla zadanego parametru który się zmienia i drugiego parametru, który został dobrany oraz pozostałych stałych parametrów
- Poszukuje się ekstremów wybranych parametrów osiągowych silnika

Przykład optymalizacji obiegu silnika z mieszalnikiem w funkcji HPCPR, gdy BPR jest parametrem dobieranym dla wyrównania ciśnień

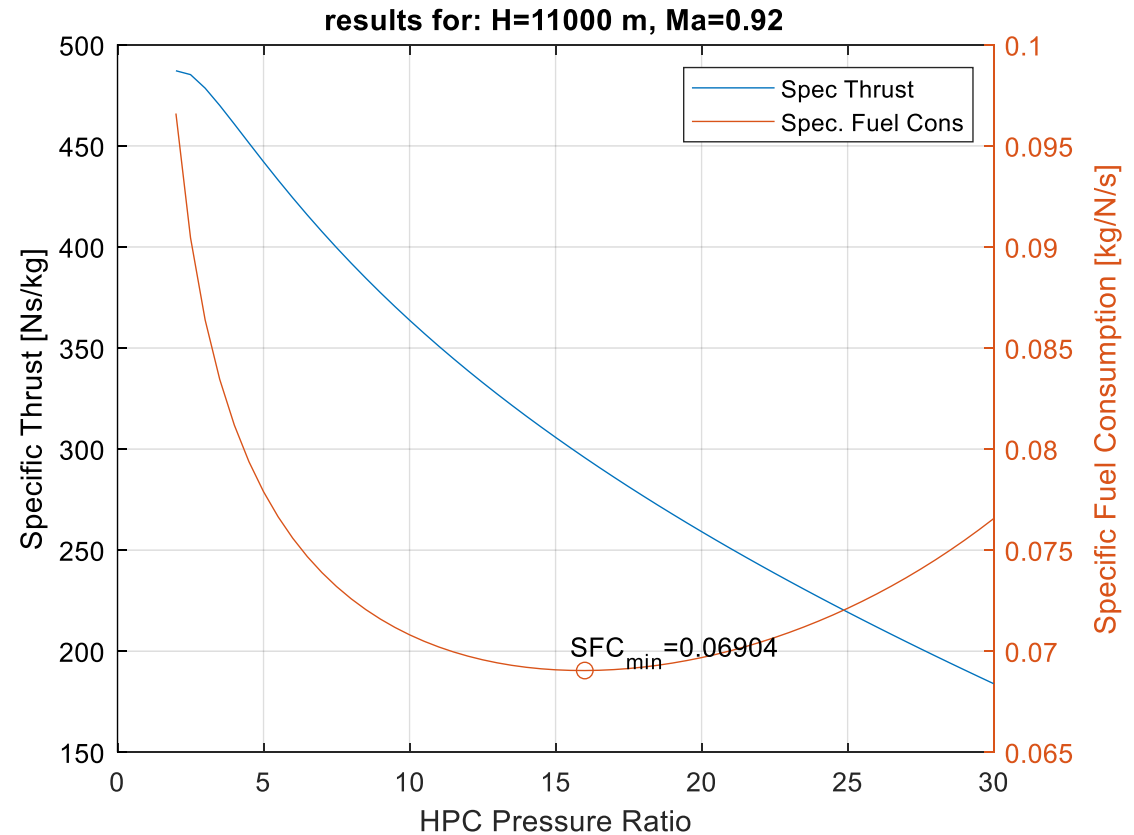
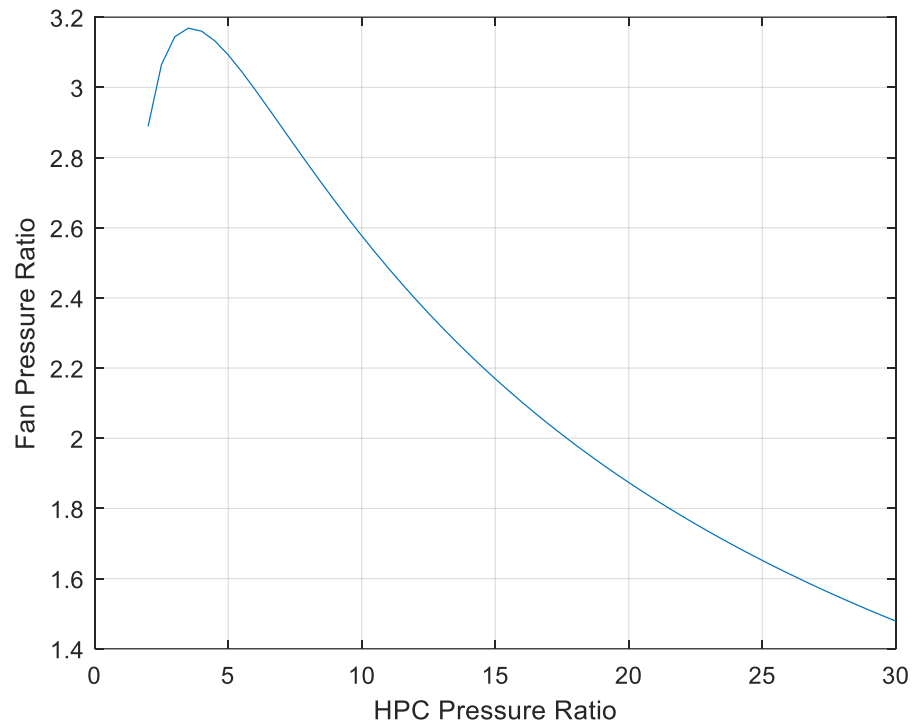
Przykład doboru BPR dla zmiany HPCPR, Pokazany przykład wskazuje, że analiza jest możliwa dla $HPCPR < 11$ ($BPR > 0$)



W takim przypadku otrzymano że:
SFC osiąga najniższą wartość przy $HPCPR=8$ ($BPR 0,4$)
ST maleje ze wzrostem sprężu i osiąga minimum przy $HPCPR=6$, następnie wzrasta.

Przykład optymalizacji obiegu silnika z mieszalnikiem w funkcji HPCPR, gdy FPR jest parametrem dobieranym dla wyrównania ciśnień

Przykład doboru FPR dla zmiany HPCPR,



W takim przypadku otrzymano że:

SFC osiąga najniższą wartość przy HPCPR=16 (FPR=2,1)

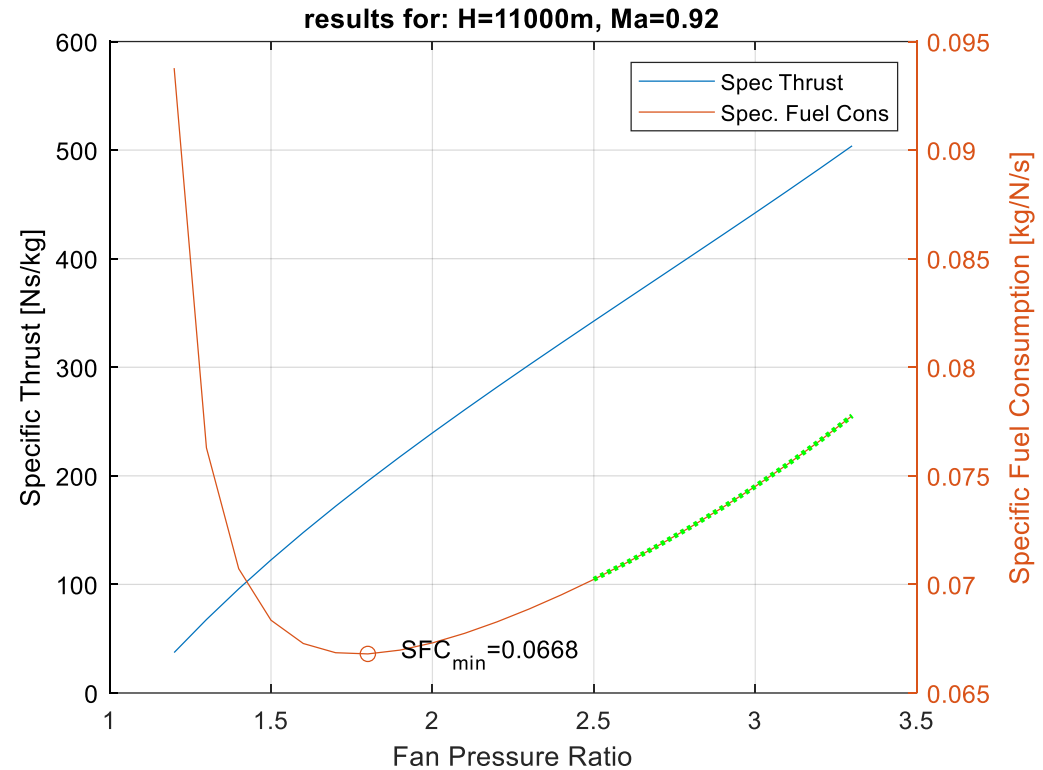
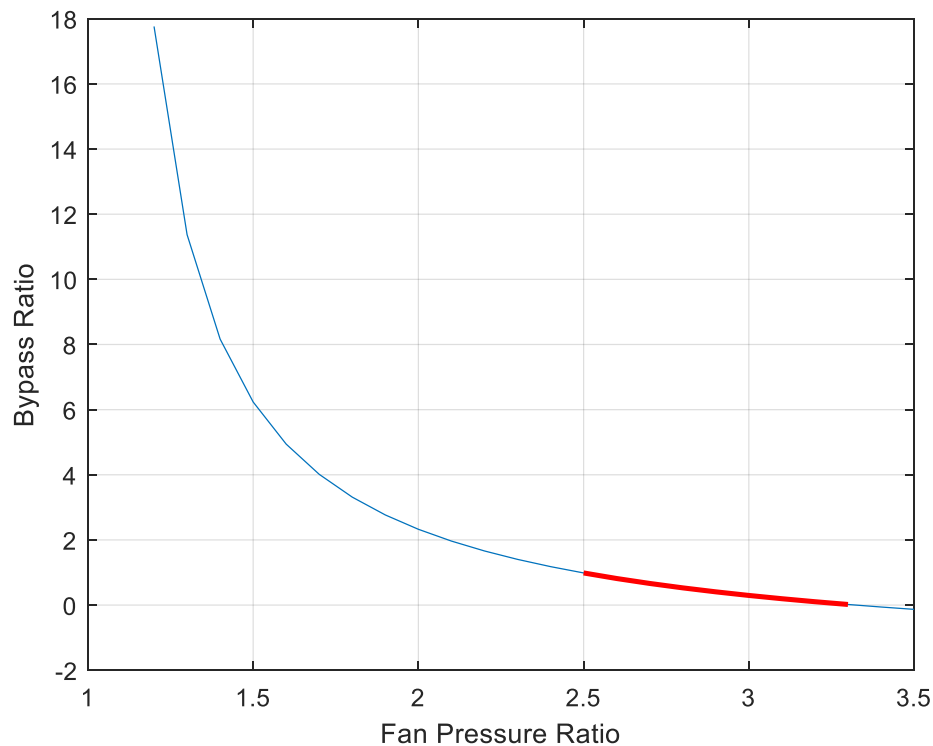
ST maleje ze wzrostem HPCPR w całym analizowanym przedziale.

Przykład optymalizacji obiegu silnika z mieszalnikiem w funkcji FPR, gdy BPR jest parametrem dobieranym dla wyrównania ciśnień

Przykład doboru BPR dla zmiany FPR,

Dla $FPR > 2.5$ wartość $BPR \leq 1$ jak dla klasycznych silników dwuprzepływowych z mieszalnikiem

Dla $FPR > 3,3$ $BPR < 0$ – co należy odrzucić z analizy



W takim przypadku otrzymano że:

SFC osiąga najniższą wartość przy $FPR=1,8$ ($BPR=3,3$)

ST rośnie ze wzrostem FPR w całym analizowanym przedziale – związane jest to ze spadkiem BPR w analizowanym przedziale.

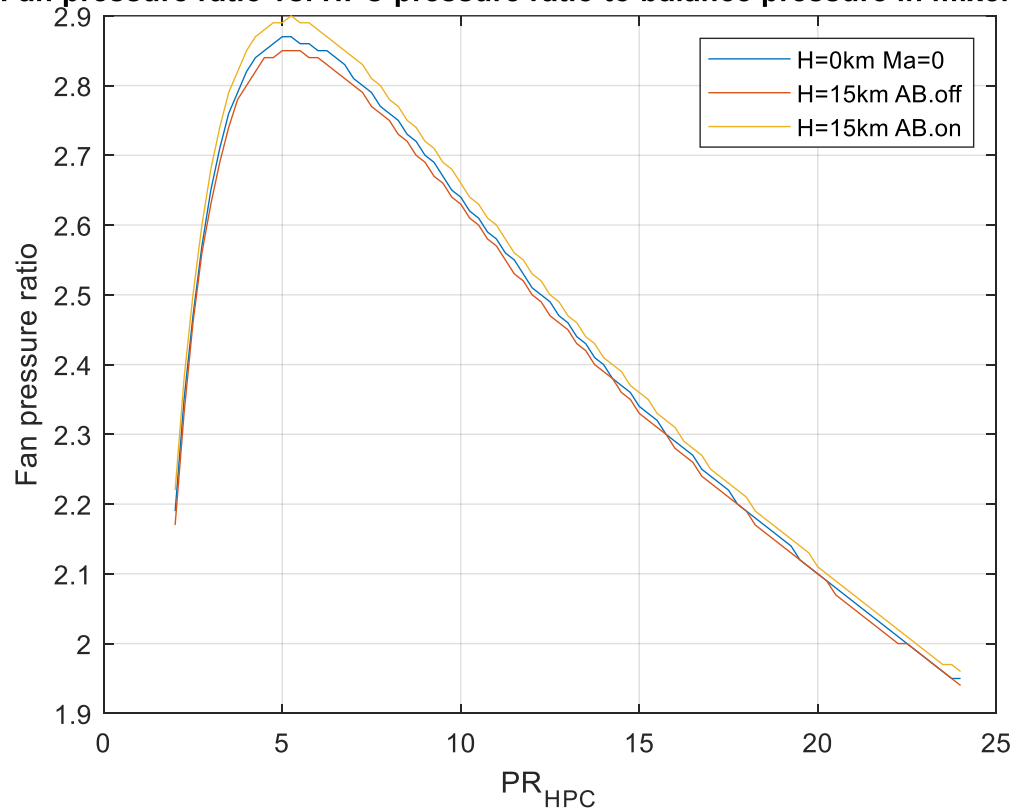
Otrzymane rozwiązanie optymalne jest dla silników do tzw. business jetów

OPTYMALIZACJA Z WYŁĄCZONYM I WŁĄCZONYM DOPALACZEM

- Warunki poszukiwania rozwiązania:
 - Warunki startowe z włączonym i wyłączonym dopalaczem
 - Warunki przelotowe 11 km prędkość 0,8 Ma – wyłączony dopalacz
 - Warunki przelotowe 11 km prędkość 1,8 Ma – włączony dopalacz
- Zagadnienie
 - Zdefiniowane TIT i BPR
 - Dobór FPR i HPCPR

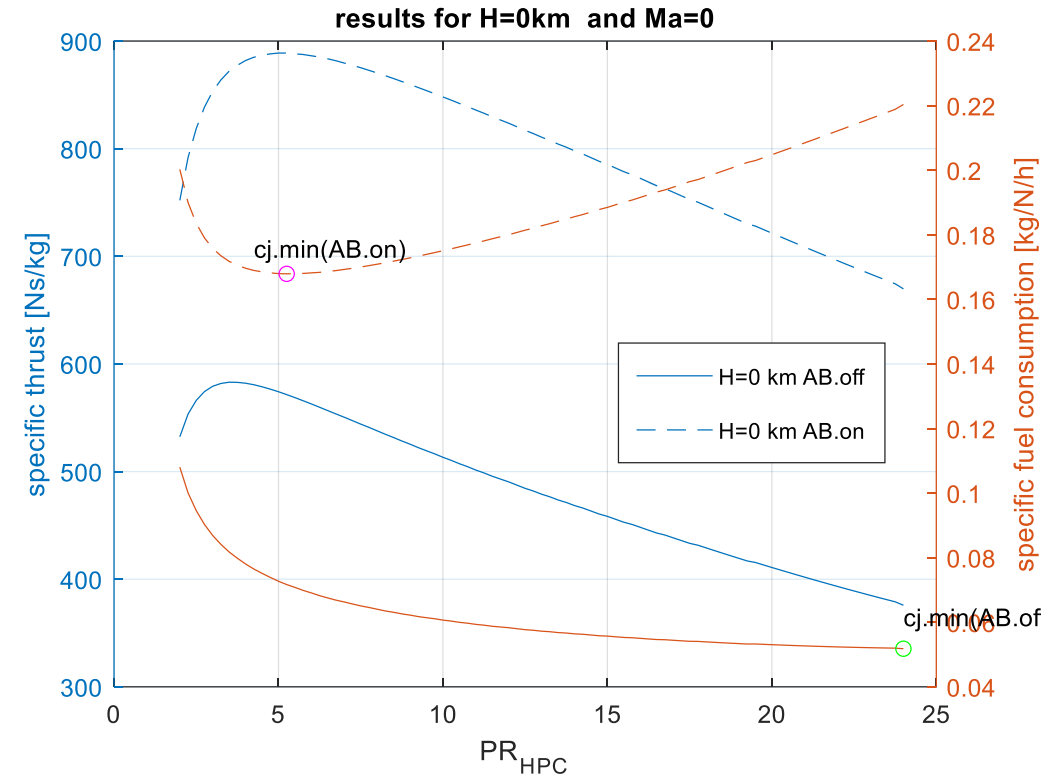
ANALIZA Z WŁĄCZONYM DOPALACZEM

Fan pressure ratio vs. HPC pressure ratio to balance pressure in mixer inlets



Przykład doboru FPR dla zmiany HPCPR dla wybranych parametrów lotu.

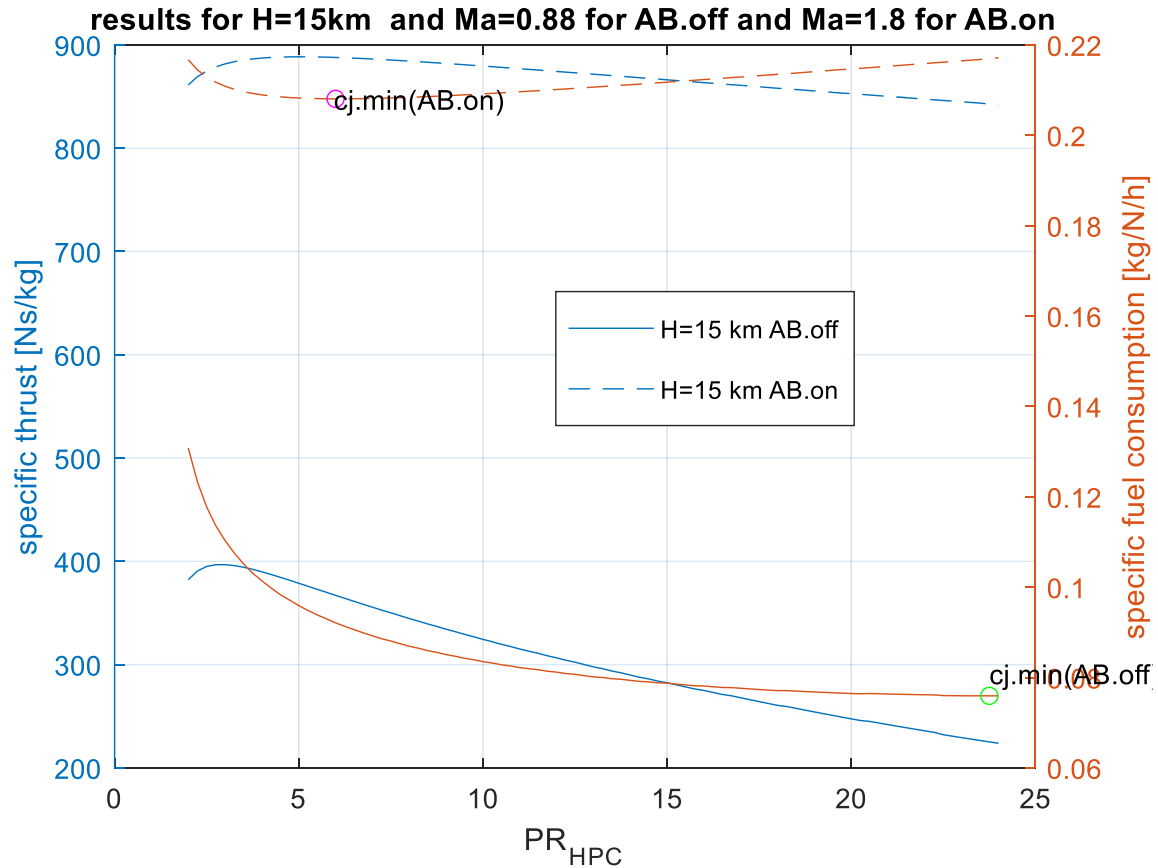
Analiza pokazała, że dla analizowanych stanów pracy silnika wybranym wartością HPCPR odpowiadają podobne wartości FPR



Analiza SFC i ST w tym układzie potwierdza że:

- Dla wyłączonego dopalacza maksimum ST i minimum SFC są dla całkowicie różnych CPR
- Dla włączonego dopalacza maksimum ST i minimum SFC są dla zbliżonych wartości HPCPR (ok.6)

ANALIZA Z WŁĄCZONYM DOPALACZEM H=15 km



Analiza SFC i ST dla dużych wysokości i prędkości lotu potwierdzają uzyskane wcześniej wyniki:

- Dla wyłączonego dopalacza maksimum ST i minimum SFC są dla całkowicie różnych CPR
- Dla włączonego dopalacza maksimum ST i minimum SFC są dla zbliżonych wartości HPCPR (ok.6-7)

Dziękuję za uwagę