

**Cieślakiewicz Waldemar**

CompuSim SA, Johannesburg, RPA

## **Process modelling and simulation in industrial systems using FLOWNEX SE software**

### **Modelowanie i symulacja procesów w instalacjach przemysłowych z wykorzystaniem oprogramowania FLOWNEX SE**

#### **Keywords / Słowa kluczowe**

modeling of dynamic systems, simulation, industrial processes and systems  
modelowanie systemów dynamicznych, symulacja, procesy i systemy przemysłowe

#### **Abstract**

The recent focus on reliability and safety of industrial systems has raised the need for system simulations and analysis. The intrinsic capabilities of modern computational software development have made it possible to predict trends in various system operations more exactly. The present simulation methodology also allows for the analysis of non-measurable numbers, like the Reynolds Number (Re), which hasn't been taken so often into consideration during past analyses. The main purpose of this article is to overview the system simulation methodology, focusing primarily on System Computer Fluid Dynamic (SCFD) method as the most effective approach to simulate the flow-thermal networks. This article makes use of system simulation models, which depict real industry problems.

#### **1. Wprowadzenie**

W projektowaniu procesów w zakładach przemysłowych wymagane są kompleksowe analizy ich instalacji. Ogólnie, klasyfikacje tych analiz, można dokonać z punktu widzenia wymiarowania instalacji (sieci) - analizy statyczne, a także analizy dynamiczne.

Pierwsza forma tej klasyfikacji odnosi się do projektu, gdzie przy założonych parametrach wstępnych (inwestycyjnych) dobiera się urządzenia (elementy systemu) tak, żeby ich charakterystyki pracy pasowały do wymaganych charakterystyk systemu. Na tym etapie przeprowadza się analizy hydrauliczne i termiczne mediów oraz analizy materiałowe sieci. Tej klasy analizy w danym projekcie są analizami statycznym (bez uwzględnienia zmiennej czasu). Na modelach systemów przeprowadza się analizy dla różnych wariantów pracy sprawdzając czy parametry instalacji są zgodne z założeniami inwestycyjnymi oraz czy wszystkie elementy systemu pracują

w dopuszczalnych zakresach zgodnych ze specyfikacją ich producentów.

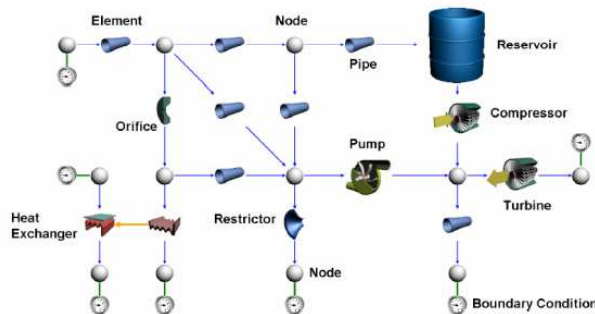
Bardziej złożone badania, należące do drugiej klasy analiz, są to symulacje dynamiczne, uwzględniające element czasu. W symulacjach tych przeprowadza się analizy stanów przejściowych uwzględniając dynamikę urządzeń lub mediów. W takim modelowaniu połączone są procesy przepływowo-termiczne z modelami systemów mechanicznych, elektrycznych, kontrolnych a nawet ostatnio modele reakcji i zachowań ludzkich.

Symulacje prowadzone na kompleksowych modelach umożliwiają bardziej wnikliwe analizy funkcjonalne, przydatne w ocenach niezawodności oraz bezpieczeństwa tych systemów. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie jednego z modeli symulacyjnych SCFD (*System Computer Fluid Dynamic*) [1] używając komercyjnego pakietu oprogramowania FLOWNEX SE [2].

## 2. Zagadnienia symulacji instalacji hydrauliczno-termicznej

Z definicji sieć, dla której przeprowadza się analizy hydrauliczno-termiczne (*Thermal-Fluid Network*) jest to instalacja zawierająca elementy hydrauliczno-termiczne połączone w dowolny sposób. Struktura sieci może przybierać bardzo różnorodne formy, począwszy od sieci zawierającej kilka elementów do sieci stu a nawet kilku tysięcy elementów (rys 1). Przykładami takich systemów są sieci gazowe, cieplne, wodne, parowe, wentylacyjne, sprężonych gazów czy powietrza w różnych zakładach przemysłowych, jak np.: rafinerie, elektrownie, zakłady hutnicze, itp.

Celem analiz hydrauliczno-termicznych sieci jest obliczanie parametrów przepływów, ciśnienia, temperatury dla wszystkich elementów w sieci. Każdy element w sieci musi spełniać wymagania całego systemu a zarazem funkcjonować właściwie, jako integralna część tego systemu. Obliczenia parametrów sieci nie zawsze możliwe są do osiągnięcia w prosty sposób. Złożoność tych analiz często spowodowana jest różnymi czynnikami, np: samą naturą przepływów fluidalnych.



Rysunek 1. Przykład hydrauliczno-termicznej sieci zamodelowanej w systemie FLOWNEX

Równanie opisujące przepływ płynów metodą DNS (*Direct Navier Stokesa*) do obliczenia przepływu przy liczbie Reynoldsa  $Re=10^5$  wymaga ilości elementów  $>10^{11}$ . Praktyczne wykonanie modelu opartego na tej metodzie jest niemożliwe, dlatego w modelowaniu zastosowano metody przybliżone oparte na metodzie RANS (*Raynolds Average Navier-Stokes*), zaproponowanej przez Reynoldsa w roku 1895. Podobnie przedstawia się zagadnienie związane z przepływem ciepła.

Ogólnie, w dziedzinie symulacji wyodrębnione zostały cztery różne kierunki, użyte do modelowania termiczno-przepływowych elementów sieci, sklasyfikowane, jako: *model empiryczny, semi-*

*empiryczny, semi-teoretyczny lub podstawowy (fundamental principle):*

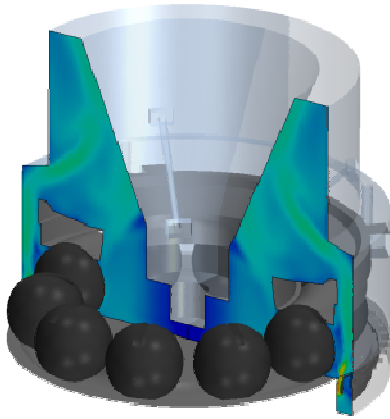
*Model empiryczny* nie uwzględnia praw fizyki. Może on być uważany, jako model, który jest tylko relacją parametrów wejścia i wyjścia. Dlatego model ten nie może przewidzieć zachowań systemu w innym zakresie niż ten dla którego pobrane zostały dane empiryczne. Model ten charakteryzują więc ograniczenia i może jedynie być stosowany na raczej wysokim poziomie studiów koncepcyjnych projektu. Przykładem takiego modelu jest charakterystyka wydajności pompy.

*Model semi-empiryczny* ma cechy modelu empirycznego z zastosowaniem pewnych praw fizyki. Model ten posiada mniejsze ograniczenia niż model empiryczny, ale w dalszym ciągu może być tylko stosowany na wysokim poziomie studiów koncepcyjnych projektu. Przykładem tego typu modelu może być element konwekcyjnego przenoszenia ciepła.

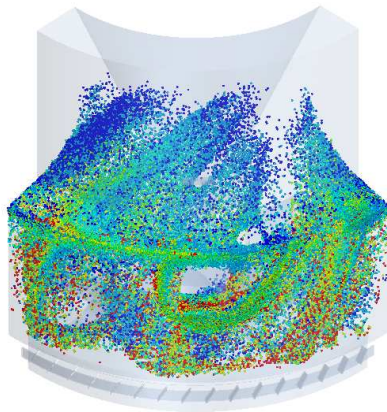
*Model semi-teoretyczny* zwykle jest komponentem. Model ten potrzebuje empirycznych danych, jako dane wejścia. W modelu tym są zastosowane prawa fizyki takie jak: zachowanie masy, momentów czy energii. Model ten może być użyty do obliczenia parametrów elementu w różnych warunkach jego pracy. Zaletą tego typu modelu jest to, że eliminuje on potrzebę analiz CFD (*Computer Fluid Dynamic*). Spełnia on zwykle bardzo dobrze swoje zadanie w projektowaniu i symulacji systemów (sieci) na etapie koncepcyjnym i szczegółowym, ale nie na etapie projektowania komponentu. Przykładem takiego modelu jest komponent typu rura.

*Model Podstawowy* jest prawie zawsze komponentem ze szczegółowymi analizami fizycznymi, uwzględnieniu praw zachowania masy, momentu i energii. W wielu wypadkach wymagane są w dalszym ciągu dane empiryczne do wypełnienia luk w rozważaniach teoretycznych. Tego typu model pozwala na symulacje urządzeń istniejących lub nowo projektowanych. Zwykle, model ten jest używany do symulacji komponentów systemu. Przykładem jest element przewodzenia ciepła.

Do symulacji instalacji przemysłowych używa się jedno-wymiarowy model typu SCFD. Znaczenie i konsekwencje stosowania tej metodologii są przedstawione poniżej. Kompleksowe przepływy cieczy i ciepła rozwiązywane są przy użyciu CFD (*Computer Fluid Dynamic*) komputerowych kodów, które wymagają 3-wymiarowych skomplikowanych siatek do odtworzenia geometrii model przedstawiono na *Ryunku 2* i *Rysunku 3*.



Rysunek 2. Model CFD przepływu gazów w kulowym młynie węglowym



Rysunek 3. Model CFD przepływu pyłów w młynie kulowym

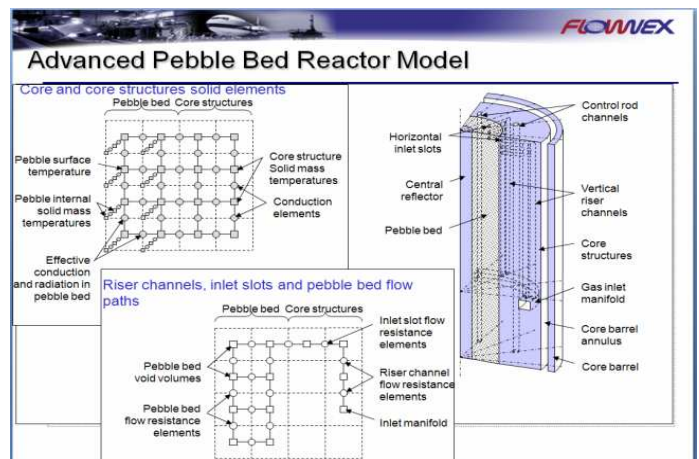
Na przykład, w celu otrzymania zadawalającej dokładności obliczeń w obliczeniach prostej rury w 3-wymiarowej przestrzeni, używając kodu CFD, wymagane jest czasami kilku tysięcy elementów. To nie jest praktyczne przy symulacji dużej sieci, zawierającej olbrzymią ilość, czasami bardzo kompleksowych elementów, szczególnie, kiedy wymagane są symulacje dynamiczne. Takie symulacje wymagają olbrzymiej mocy komputerowej i długiego czasu obliczeń (niekiedy kilka tygodni).

Jedno-wymiarowa metoda SCFD znacznie upraszcza problem, stosując średnie odpowiednie warunki przepływu w całym przekroju komponentu, to znaczy, że prędkość, temperatura, ciśnienie są równe wartościom średnim i tylko zmieniają się w kierunku przepływu. To założenie znacznie upraszcza procedurę obliczeń. Słabością tego założenia jest to, że nie możemy szczegółowo modelować przepływów w ramach jednego komponentu, ale to nie jest głównym celem symulacji sieci.

W symulacji dużej sieci istotą zagadnienia jest zależność między komponentami sieci. Dla modelowania złożonych komponentów takich jak

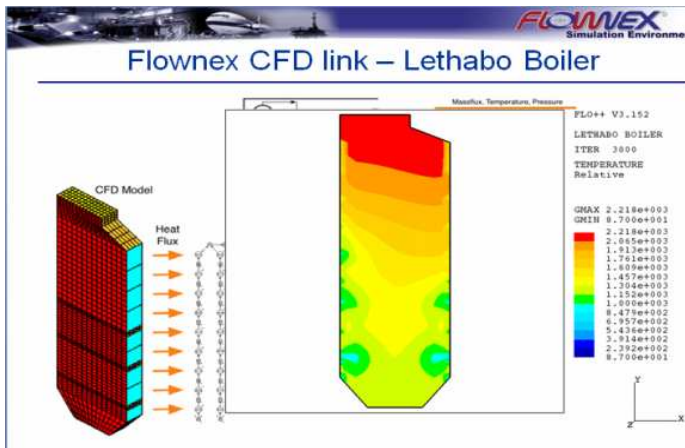
zawory, kompresory, turbiny jedno-wymiarowe, technika ta nie może być stosowana wprost. W systemie FLOWNEX jednowymiarowość odnosi się do interakcji modelu z parametrami wejścia i wyjścia jedno-wymiarowego elementu.

Przykładem jest model zbudowany do symulacji przepływu ciepła w rdzeniu reaktora gdzie użyto jedno-wymiarowego elementu. Model został zbudowany na bazie równań zachowania masy, momentów i energii dla płynu ściśliwego płynącego poprzez węzły (*nods*), jak również równania zachowania energii. Poprzez dokładne analizy, forma równań została zmieniona tak, żeby można było ją zastosować w kodzie FLOWNEX. W powyższej symulacji został użyty jedno-wymiarowy element do skonstruowania wielo-wymiarowego modelu reaktora (Rysunek 4).



Rysunek 4. SCFD model reaktora Pebble Bed w systemie FLOWNEX [3]

Trend w budowie symulatorów w miarę rozwoju techniki komputerowej, zmierza w kierunku łączenia różnych technik modelowania, na przykład FEM (*Finite Elements Method*) z CFD czy DMM (*Discrete Mathematical Model*). Rysunek 5 przedstawia połączenie modelu CFD kotła z modelem bloku elektrowni zbudowanym w systemie SCFD FLOWNEX SE.



Rysunek 5. Model CFD kotła elektrowni węglowej zintegrowany z modelem sieci FLOWNEX

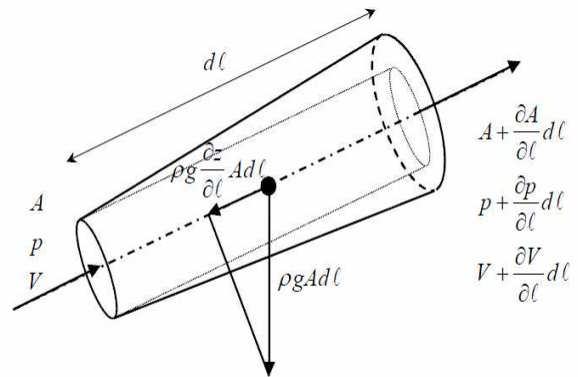
### 3. Teoretyczne podstawy obliczania sieci za pomocą modelowania SCFD

Analizy termiczno-przepływowych sieci rozwiązuje się za pomocą metod numerycznych równań dynamiki płynów i przenoszenia ciepła. W oprogramowaniu FLOWNEX rozwiązuje się równania różniczkowe cząstkowe podstawowych równań zachowania masy, momentów i energii, w celu otrzymania przepływów, ciśnień i temperatur w całej sieci. System ten modeluje płyny w dwóch stanach skupienia, poniżej przedstawiony jest w zarysie opis metody do analizy przepływu płynu w jednym stanie skupienia.

Fundamentalne prawa natury, zachowania masy, momentów i energii są opisane matematycznie za pomocą cząstkowych równań różniczkowych. Równania te, formowane są w układ równań, który jest rozwiązywany komputerowo za pomocą odpowiednich algorytmów. Bardzo ważnym elementem rozwiązywania tych równań jest założenie realnych warunków brzegowych w celu uniknięcia rozbieżności iteracyjnej.

Kiedy mówimy o obliczaniu równań ważnym elementem jest określenie układu odniesienia (*reference frame*). Ogólnie stosowane są dwa układy odniesienia: Lagrange'a i Eulera. W obliczeniach sieci stosuje się układ odniesienia Eulera, jako bardziej wygodny do obliczeń numerycznych.

Prawo zachowania masy, momentów i energii dla przepływu elementu jedno-wymiarowego zostanie przedstawione w zarysie za pomocą równań nawiązujących do jednowymiarowej objętości elementu (Rysunek 6).



Rysunek 6. Schemat nieskończenie małej jedno-wymiarowej objętości elementu.

#### Równanie zachowania masy

Równanie różniczkowe zachowania masy dla systemu może być napisane, jako  $dm/dt = 0$ , przy czym masa płynu w systemie pozostaje bez zmian w czasie. Następnie, używając równania Reynoldsa, równanie zachowania masy można przekształcić do następującej formy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\iiint \rho dV) + \iint \rho v dA = 0 \quad (1)$$

gdzie  $V$  jest objętością,  $v$  prędkością, natomiast  $A$  jest powierzchnią.

Równanie to przepisane w odniesieniu do elementu jedno-wymiarowego przyjmuje postać:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} (\rho v A) = 0 \quad (2)$$

#### Równanie momentów

Równanie różniczkowe zachowania momentów może być napisane jako  $\Sigma F = d(mv/dt)$ , które jest również znane jako druga zasada ruchu Newtona  $F = ma$ . Podobnie jak poprzednio, używając równania Reynoldsa, równanie to może być przekształcone do postaci:

$$\Sigma F = \frac{\partial}{\partial t} (\iiint \rho v dV) + \iint v (\rho v dA) \quad (3)$$

Równanie to w odniesieniu do elementu jedno-wymiarowego przyjmuje postać:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial p}{\partial l} + \rho g \frac{\partial z}{\partial l} + \frac{\Delta p_{ol}}{L} = 0 \quad (4)$$



### Równanie zachowania energii

Równanie różniczkowe zachowania energii może być napisane jako  $dE/dt = Q - W$ , gdzie  $E = m(u + 0.5v^2 + gz)$ . Energia całkowita zawiera energię wewnętrzną, energię kinetyczną i energię potencjalną.  $Q$  oznacza wprowadzenie energii cieplnej, a  $W$  jest pracą płynu. Równanie to, znane jest także, jako pierwsze równanie termodynamiki. Ponownie po przekształceniach, uwzględniając równanie ruchu Reynoldsa, otrzymujemy:

$$Q - W = \frac{\partial}{\partial t} \left( \iiint \left( u + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \rho dV \right) + \iint \left( h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \rho v dA \quad (5)$$

Równanie to przekształcone w odniesieniu do elementu jedno-wymiarowego przyjmuje postać:

$$\partial q - \partial w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_0 - p) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\rho v A (h_0 + gz)) \quad (6)$$

Przenoszenie energii cieplnej następuje poprzez przewodzenie, unoszenie i promieniowanie.

## 4. Przykłady symulacji SCFD systemów za pomocą oprogramowania Flownex SE

Poniżej przedstawiono kilka przykładowych zastosowań oprogramowania FLOWNEX SE, dzięki którym, zmniejszono prawdopodobieństwo awarii i zwiększono bezpieczeństwo eksploatacji systemów przemysłowych.

### 4.1. Przykład elektrowni Dominion Virginia Power USA

Dominion jest największym producentem energii elektrycznej w Stanach Zjednoczonych a Virginion Power w stanie Virginia posiada około 27000 MW mocy zainstalowanej, z czego 46% przypada na elektrownie węglowe, a 41% na elektrownie atomowe. Elektrownie te pracują w cyklu Rankina, gdzie wymienniki ciepła są powszechnie używane do wstępnego podgrzewania wody zasilającej kocioł. Woda ta jest podgrzewana parą upustową z turbin. Stosowane wymienniki są to wymienniki przeciwprądowe, gdzie woda płynie w rurkach, a para w płaszczu wymiennika. Przepływ w wymienniku posiada różnorodne systemy zabezpieczeń gwarantujące bezpieczeństwo pracy systemu. Końcowym urządzeniem zabezpieczającym jest PVR (ciśnieniowy zawór bezpieczeństwa), który jest zamontowany na płaszczu wymiennika w celu upustu pary do atmosfery w wypadku przekroczenia ciśnienia lub pęknięcia rury.

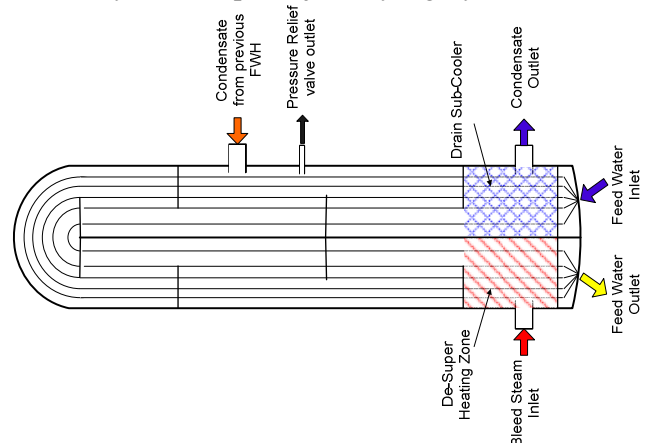
Elektrownia Dominion Virginia Power zainteresowana była przebadaniem scenariusza pęknięcia rury, w następstwie czego nastąpi otwarcie zaworu bezpieczeństwa i wypuszczenie pary do atmosfery. Modelowanie obejmowało również efekt przenoszenia się powstałej fali ciśnienia oraz parametry czynnika tuż przed otwarciem zaworu. Jako cel symulacji został wybrany podgrzewacz wody 2-go stopnia w bloku 6 elektrowni Chesterfield.



Rysunek 7. Elektrownia Chesterfield należąca do Consortium Dominion

### Fizyczny opis modelu

Badany wymiennik przedstawiono na rys. 8 poniżej. Woda zasilająca kocioł wchodzi do rurek wymiennika z prawej strony u dołu, płynie przez rurki i wychodzi z prawej strony u góry.



Rysunek 8. Wymiennik ciepła instalowany pionowo

Ciepło do wody jest przekazywane z pary przegrzanej, wchodzącej z prawej strony u góry i płynącej przeciwprądowo przez szereg przegród do kondensatu i wylotu z prawej strony u dołu. Para przegrzana jest ochładzana do temperatury skraplania w strefie *de-superheating*. Strefa ta charakteryzuje się przenoszeniem ciepła z pary do wody i para opuszczająca tą strefę jest parą moką,

która skrapla się w strefie kondensacyjnej. Obejmuje ona największą część wymiennika.

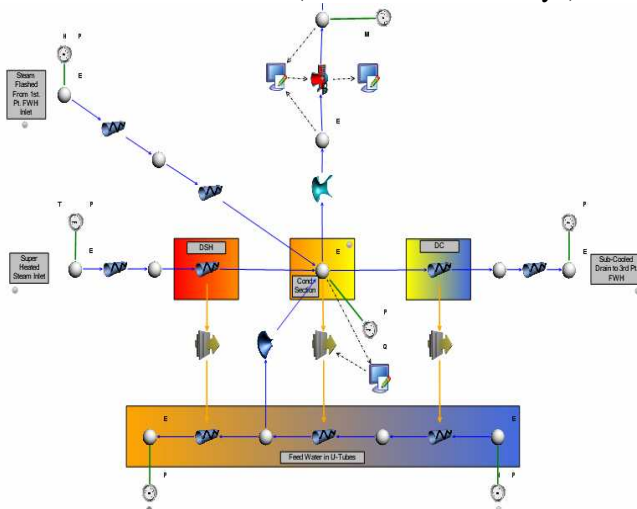
W celu zwiększenia sprawności systemu kondensatu z wyższej temperatury wymiennika może być pompowany do strefy kondensacyjnej. Kondensat dalej jest chłodzony w sekcji drenażowego chłodzenia, która charakteryzuje się wymianą ciepła woda-woda. Ostatecznie kondensat odprowadzony jest do zbiornika kondensatu.

Jak wcześniej wspomniano, system posiada wiele rodzajów zabezpieczeń, ale gdy one zawiodą ostatnim zabezpieczeniem jest ciśnieniowy zawór bezpieczeństwa, PVR.

#### Opis symulacji systemu i uzyskanych wyników

Poniżej przedstawiono model instalacji zbudowany w systemie FLOWNEX (rys 9). W celu właściwego zamodelowania systemu wymiennik FWH został podzielony na trzy oddzielne części: *de-superheating*, kondensacyjną i strefę drenażowo-chłodzącą. Zostało to wykonane z uwagi na bardzo różne współczynniki przenoszenia ciepła. Cała objętość wymiennika została zakumulowana w sekcji kondensacyjnej, w celu kontroli poziomu kondensatu w wymienniku podczas symulacji dynamicznej.

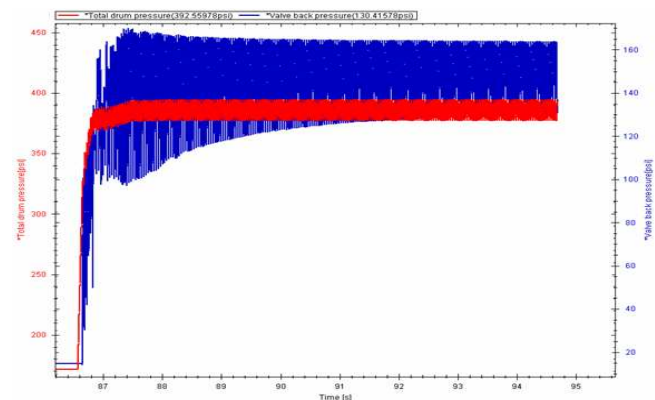
Pęknięcie rury jest symulowane za pomocą kryzy, która na początku symulacji jest zamknięta. Współczynnik przepływu jest założony równy 1, żeby uniknąć zjawiska odzyskania ciśnienia poza kryzą. Pęknięcie rury powoduje otwarcie rury z dwóch stron, czyli przy uszkodzeniu jednej rury są to dwie kryzy, a przy uszkodzeniu dwóch rur cztery kryzy. W modelu symulowane są dwa przypadki: uszkodzenie jednej rury (otwarcie dwóch kryz) i uszkodzenie dwóch rur (otwarcie czterech kryz).



Rysunek 9. Model systemu wody zasilającej wykonany dla celów symulacji

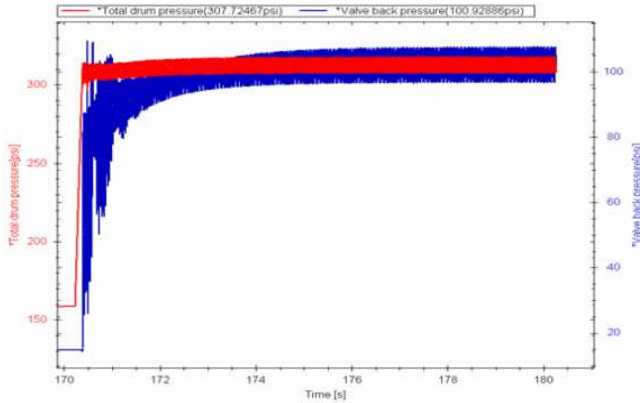
W wyniku symulacji otrzymano średni wypływ przy pękniętej jednej rurze równy 318000 lb/hr, a w przypadku dwóch rurach równy 627000 lb/hr. Temperatura przed zaworem zostały obliczone jako 363–367 °F przy ciśnieniu 312 – 393 psi. Płynem przed zaworem była woda, natomiast za zaworem para mokra o współczynniku jakości 0.16.

Następnie, w celu analizy zachowania się zaworu bezpieczeństwa przeprowadzono symulację dynamiczną. Symulacja ta do momentu otwarcia zaworu była podobna do sytuacji statycznej. Natomiast po otwarciu się zaworu przy ciśnieniu 300 psi, woda w rurze odprowadzającej, zaczęła odparowywać, tworząc mieszaninę wody i pary. Przepływ ten, zainicjował pulsacje ciśnienia i skomplikowane warunki przepływu płynu zmieniającego pulsacyjnie swój stan skupienia. Zjawisko to ma olbrzymi wpływ na prace zaworu i jest przedstawione na wykresach (Rysunek 10 i Rysunek 11).



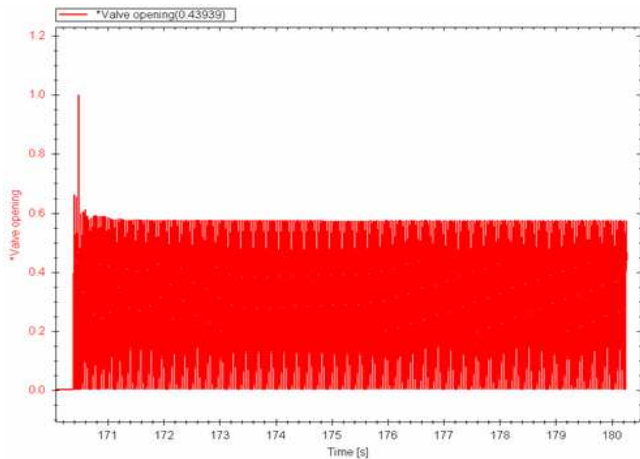
Rysunek 10. Wyniki oscylacji ciśnienia przy symulacji pęknięcia dwóch rur

Porównując dwa założone przypadki awarii widzimy, że ciśnienie w wymienniku jest dużo większe przy pęknięciu dwóch rur, co jest zrozumiałe z uwagi na wyższy przepływ. To samo zjawisko zauważa się, gdy chodzi o oscylacje ciśnienia zwrotnego. Ciekawym jest fakt, że zmiana ciśnienia zwrotnego nie ma efektu na ciśnienie w wymienniku.



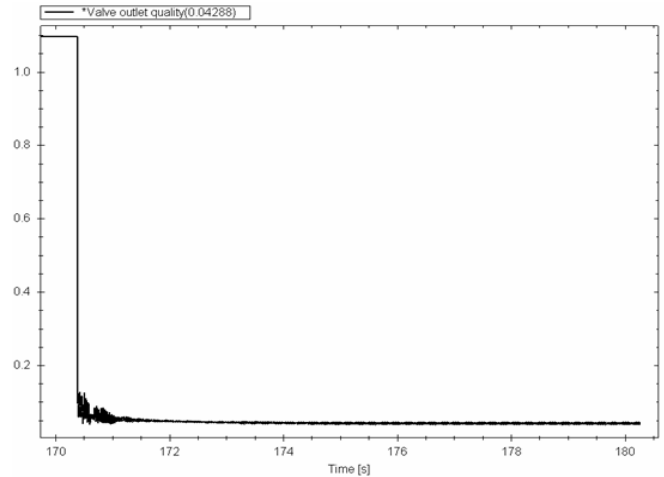
Rysunek 11. Wyniki oscylacji ciśnień przy symulacji pęknięcia jednej rury

Symulacja wykazała oscylacje zaworu ok. 24 Hz dla jednej rury i ok. 26 Hz dla dwóch rur. Otwarcie zaworu oscyluje w granicach 0-0.57 Dla jednej rury i 0.1-1 dla dwóch rur.



Rysunek 12. Wyniki oscylacji otwarcia zaworu przy symulacji pęknięcia jednej rury

Podsumowując wyniki modelu, stwierdzono, że w wyniku pęknięcia rur w wymienniku nastąpi kondensacja wszystkiej pary. Obecność w wymienniku tylko wody spowoduje brak bufora absorbującego oscylacje ciśnienia zaworu, powodując ostre skoki naprężeń w płaszczu wymiennika. Te oscylacje nastąpią przy otwarciu zaworu pomiędzy 0% i 88% dla przypadku pęknięcia jednej rury (Rysunek 12) i pomiędzy 24% i 100% dla dwóch rur. Ciśnienie w płaszczu wymiennika osiągnie 394 psi.



Rysunek 13. Wyniki oscylacji jakości pary przy symulacji pęknięcia dwóch rur

Ostateczny wniosek jaki został wyciągnięty jest taki, że analizowany zawór został niedowymiarowany i należy go zmienić w celu uniknięcia tragicznej w skutkach awarii instalacji.

#### 4.2. Analiza temperatur w zaworze regulacji ciśnienia w przykładowej elektrowni gazowej “Energy Industry”

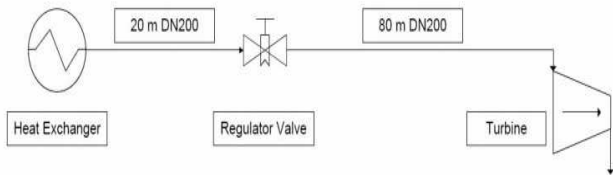
W elektrowniach gazowych stosuje się regulatory ciśnienia na przewodzie z podgrzewacza do turbiny. Ciśnienie redukuje się z maksymalnego poziomu 15MPa do około 3,5 MPa. Na podstawie efektu Joule-Thompson temperatura gazu może obniżyć się o około 55°C. Zakładając temperaturę zewnętrzną -6°C zawór regulacyjny będzie pracował w temperaturze -61°C. Według specyfikacji producenta zaworów, dopuszczalna temperatura pracy powinna wynosić nie mniej niż -20°C. Dla inżynierów elektrowni istotne było dokonanie analizy czasowej zaworu poddanego niskim temperaturom pracy, a szczególnie gniazda zaworu (O-ring), które mogło się zdegenerować przez skruszenie i późniejsze pęknięcie, powodując utratę szczelności zaworu. Celem symulacji pracy zaworu było podjęcie działań zapobiegawczych w celu uniknięcia awarii systemu.

##### Fizyczny opis modelu

Podczas normalnej pracy systemu gaz jest podgrzewany do temperatury +65°C przez wymiennik ciepła, znajdujący się przed zaworem regulacyjnym (rys. 14), co nie stanowi niebezpieczeństwa dla pracy zaworu. Problem zaczyna się przy rozruchu systemu, w czasie pierwszej minuty po starcie. W tym czasie przepływ gazu jest niewielki ok. 1.5Kg/s. Gaz znajdujący się pomiędzy wymiennikiem ciepła i zaworem mając początkowo niską temperaturę i wpływając do zaworu zostanie obniżony do bardzo niskiej



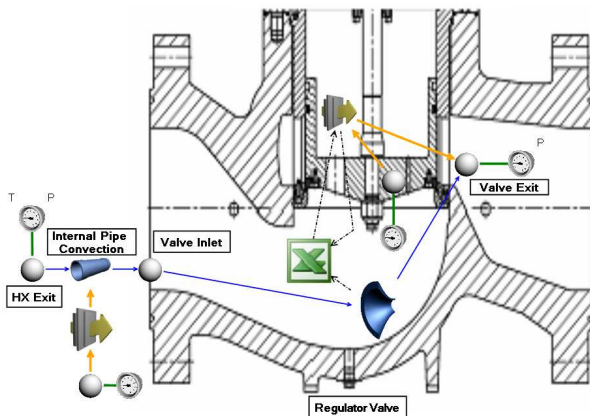
temperatury aż do momentu, kiedy ogrzany gaz dojdzie z wymiennika.



Rysunek 14. Schemat symulowanego systemu

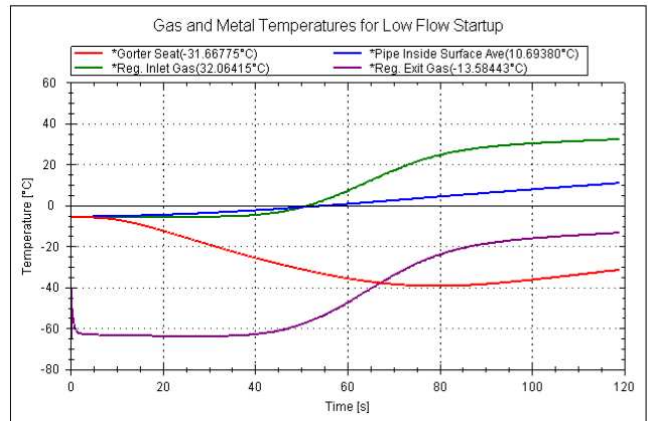
#### Opis symulacji systemu i uzyskanych wyników

Model zaworu zbudowany w systemie FLOWNEX SE (Rysunek 15) symuluje odcinek instalacji 20m od wyjścia z wymiennika do wyjścia z zaworu regulacyjnego. Odcinek rurociągu został podzielony na 20 mniejszych sekcji w celu uzyskania lepszej dokładności przepływu ciepła z gazu do ścianek rury. Przepływ został założony równy 1.5 kg/s przez otwarcie zaworu 9mm przez okres symulacji 60 sec. Liczba Reynoldsa w zaworze została obliczona przez program dla założonego przepływu i zmiennych parametrów gazu. Do obliczenia współczynnika przewodności ciepła zastosowano równanie Dittus-Boeltera.



Rysunek 15. Model 2D zaworu w systemie FLOWNEX®SE

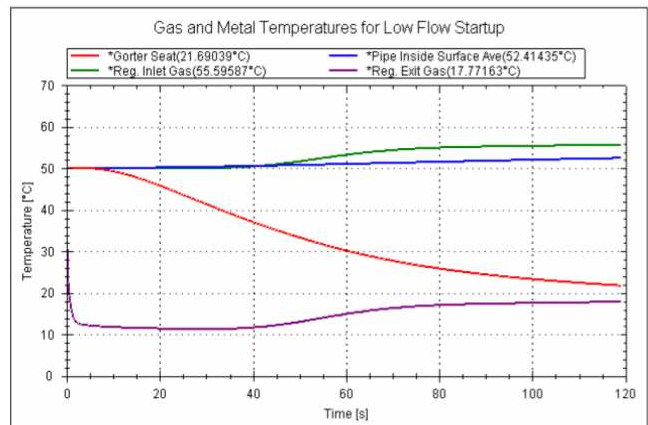
Początkowa temperatura instalacji i gazu została założona  $-6^{\circ}\text{C}$  przed wprowadzeniem gazu o temperaturze  $+60^{\circ}\text{C}$  z wymiennika. Wynikowe temperatury otrzymane z symulacji przedstawione są na Rysunek 16. Wyniki te udowadniają, że średnia temperatura gniazda zaworu obniży się do niedozwolonego poziomu temperatur  $-40^{\circ}\text{C}$  przez jakiś czas po starcie. Temperatura dopływającego gazu przez 40 s będzie utrzymywała się na poziomie  $-6^{\circ}\text{C}$  zanim dopłynie gaz z wymiennika.



Rysunek 16. Charakterystyki czasowe temperatur w zaworze

Wykres ten, przedstawia również temperaturę gazu wylotowego  $-63^{\circ}\text{C}$  przez okres ok. 40s zanim zacznie się podnosić, ale będzie ona poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  przez okres ponad 2 min. Te wyjątkowo niskie temperatury mogą mieć poważne konsekwencje dla zaworu i całej instalacji.

W wyniku analiz, zostało zaproponowane ocieplenie odcinka instalacji od wymiennika do zaworu. Ten sam model został użyty ponownie do przeprowadzenia obliczeń ale temperatura początkowa została założona  $+50^{\circ}\text{C}$ . Rysunek 17 przedstawia wyniki przeprowadzonych symulacji.



Rysunek 17. Charakterystyki czasowe temperatur w zaworze

Wykres ten wskazuje, że żadna z temperatur nie spadła poniżej granicy dopuszczalnej temperatury zaworu podanej przez producenta, czyli ocieplenie instalacji wystarczająco zabezpieczy zawór regulacyjny przed uszkodzeniem i zwiększy bezpieczeństwo całego systemu.

Senior Thermal & Process Engineer, Mr. Hannes van der Walt stwierdził po przeprowadzeniu licznych badań: "Każdy kto jest zaznajomiony z



dynamicznym przewodzeniem ciepła w sieciach przepływowych ze skomplikowaną geometrią musi przyznać, że tego typu analizy są poza zasięgiem wielu biur technologicznych. Oprogramowanie FLOWNEX® SE pozwoliło mi w ciągu krótkiego czasu osiągnąć zadowalające wyniki. Ponieważ potencjalny koszt awarii instalacji może sięgnąć dziesiątek milionów US\$ te interesujące rezultaty analiz uwiadcniają istotne znaczenie i korzyść wynikającą zastosowania w praktyce przemysłowej systemu FLOWNEX® SE”.

## 5. Wnioski końcowe

Symulacje prowadzone na kompleksowych modelach umożliwiają bardziej wnikliwe analizy funkcjonalne, przydatne w ocenach niezawodności oraz bezpieczeństwa procesów systemów przemysłowych.

W niniejszym artykule przedstawiono podstawy teoretyczne oraz przykładowe modele symulacyjne bazujące na systemie SCFD (*System Computer Fluid Dynamic*) zaimplementowanym w komercyjnym oprogramowaniu FLOWNEX SE.

## Literatura

- [1] Greyvenstein, G.P. (2006). The Application of System CFD (SCFD) to the Design and Optimization of High-Temperature Gas-Cooled Nuclear Power Plants, ASME POWER, Georgia World Congress, May 2-4, Atlanta, Georgia.
- [2] M-Tech (2010). Internal Company Materials, M-Tech International, South Africa.
- [3] PBMR (2007). Reactor Safety Analysis Report of the South-African Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR), Rev. E. Centurion, South Africa.

