

Warszawa, 24 wrzesień 2022 r.

dr hab. inż. Wojciech Bujalski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Ciepłej
ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa
email: wojciech.bujalski@pw.edu.pl

ADMINISTRACJA
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
Wpłynęło dnia..... 04 PAŹ. 2022.....
Nr... 1359..... szt.....

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Panasia pod tytułem „*Monitorowanie parametrów cieplno-przepływowych bloku energetycznego w celu określenia stopnia zanieczyszczenia kondensatora turbiny i jego wpływu na sprawność elektrowni*”

WPROWADZENIE

Praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Panasia podejmuje bardzo ważny problem, jakim jest identyfikacja wielkości strat wynikających ze zmiany warunków pracy kondensatorów turbin parowych. Warunki kondensatora zmieniają się w czasie, ponieważ wraz z eksploatacją następuje pogorszenie warunków wymiany ciepła w wyniku powstawania osadów na rurkach. Utrata zdolności wymiany ciepła przekłada się wprost na utratę sprawności bloku, a to wpływa na wynik ekonomiczny. Oczywistym jest, że wykonanie odpowiednio przeprowadzonego procesu czyszczenia może przywrócić większość z utraconych zdolności wymiany ciepła. Proces czyszczenia nie jest bezkosztowy. W związku z tym pojawia się pytanie, w jakim momencie i jak często należy ten proces przeprowadzić. Aby móc odpowiedzialnie podjąć decyzję o poniesieniu kosztów na czyszczenie kondensatora niezbędne jest posiadanie narzędzi, które w wiarygodny sposób wskażą ubytek sprawności bloku, a przez to będzie można wskazać ubytek efektywności ekonomicznej bloku. W związku z tym, że obecnie wiele turbin parowych jest eksploatowanych i przez wiele lat znaczna część energii elektrycznej będzie wytwarzana w turbinach parowych, uważam rozwiązanie tego zadania za bardzo cenny wkład w rozwój technologii generacji energii elektrycznej.

ZAWARTOŚĆ PRACY

W rozdziale pierwszym Autor szeroko przedstawił tło pracy i celowość analizy rozważanego zagadnienia. Wskazał stan badań nad zagadnieniem diagnozowania zabrudzenia skraplaczy. Pokazał szerszy kontekst konieczności podnoszenia sprawności, w tym podnoszenia efektywności energetycznej kondensatorów. Wskazał luki w dostępnych badaniach. Taki zestaw informacji był podstawą do sformułowania głównego celu badań, zakresu pracy oraz postawienia tez badawczych, które zawarte są w rozdziale drugim.

Rozdział trzeci zawiera analizę układu Rankine'a pod kątem termodynamicznym. Doktorant przedstawił w nim rozważania teoretyczne dotyczące sprawności obiegu, w tym zdefiniował sposób w jaki będzie określana sprawność, a raczej utrata sprawności bloku.

Kolejny rozdział poświęcony jest analizie skraplaczy stosowanych w obiegach siłowni parowych. W pierwszej kolejności omówiono konstrukcję typowych skraplaczy. Następnie zdefiniowano i opisano parametry charakteryzujące pracę skraplacza, takie jak krotność chłodzenia, czy poziom chłodzenia. W kolejnej części rozdziału czwartego dokonano analizy zanieczyszczeń mogących występować w skraplaczach. W pierwszej kolejności przedstawiono typy zanieczyszczeń występujące w skraplaczach zarówno po stronie parowej, jak również po stronie wody chłodzącej. Dalsza część rozdziału zawiera analizę sposobu minimalizowania efektów zanieczyszczenia. Przeanalizowano w tym rozdziale między innymi wpływ jakości wody oraz różne metody czyszczenia skraplaczy. Na końcu rozdziału przeanalizowano układy wody chłodzącej, opisując różne ich typy.

Rozdział piąty poświęcony jest obliczeniom cieplnym skraplacza. W pierwszej kolejności Doktorant przedstawił analizę wymiany ciepła z wykorzystaniem podstawowych praw wymiany ciepła, tj. konwekcji i przewodzenia. Wynikiem tych rozważań są odpowiednie współczynniki pozwalające na wykonanie bilansów wymiany ciepła, takie jak współczynnik wnikania ciepła. W dalszej części rozprawy Doktorant przeanalizował, jak teoretycznie (na podstawie wcześniej wyprowadzanych zależności) ulegną zmianie warunki wymiany ciepła w wyniku zabrudzeń. W tej części Autor przedstawił szereg analiz zmienności parametrów pracy skraplacza dla konkretnych rzeczywistych przypadków.

Rozdział szósty zawiera analizę pracy rzeczywistego skraplacza. Analizowany skraplacz stanowi element bloku energetycznego klasy 120 MW. W pierwszej kolejności Autor przedstawia parametry rozważanego bloku. W dalszej części przedstawia wyniki analiz zmienności oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła dla dwóch okresów.

Przepływ wody chłodzącej został przeanalizowany w rozdziale siódmym. Z tym zagadnieniem powiązany jest bardzo ważny problem w eksploatacji bloków energetycznych z turbinami parowymi, tj. brak możliwości zmierzenia stopnia suchości pary na wylocie z turbiny. W większości przypadków na wylocie z turbiny parowej para jest wilgotna, a to uniemożliwia określenie bezpośrednio bilansu turbiny. Określenie parametrów pary na wylocie z turbiny odbywa się poprzez wykonanie odpowiedniego bilansu skraplacza czy wymiennika ciepłowniczego na wylocie. Kluczowym elementem w tym zagadnieniu jest pomiar wydatku wody. Autor zajął się tym zagadnieniem szczegółowo. Przedstawił metody pomiaru oraz wskazał wady i zalety. Kolejna część rozdziału została poświęcona propozycji wykorzystania metody CFD do pomiaru. Autor zaproponował metodę pomiaru przepływu dla przypadków, w których odcinki proste sieci są zbyt krótkie, aby dokonać pomiarów przepływu tradycyjnymi metodami.

Rozdział ósmy poświęcony jest opisowi modelu bloku energetycznego w układzie kondensacyjnym i ciepłowniczym. Znaczna część rozdziału to opis modelu obliczania strat ciepła w kotle.

Kolejny rozdział to opis sposobu modelowania rozważanego bloku energetycznego w programie Epsilon Professional firmy Steag. Model ten zbudowano tak, aby możliwe było wyznaczanie strat wynikających z zabrudzenia kondensatora. Wskazano w nim sposób budowania modelu odniesienia (tzw. designe mode), jak również sposoby modelowania stanów zmienionych (off-designe mode).

Przedostatni dziesiąty rozdział poświęcony jest opisowi opracowanego narzędzia. W rozdziale tym przedstawiono kompletną procedurę obliczania utraty zysków w wyniku zanieczyszczenia kondensatora. W pierwszej kolejności przedstawiono sposoby wykorzystania zaproponowanych

modeli do wykonania symulacji technicznych. W kolejnej części rozdziału opisano sposoby wyliczeń ekonomicznych, a na końcu przedstawiono opis opracowanego narzędzia umożliwiającego automatyzację procesu.

Rozdział jedenasty to wnioski i uwagi końcowe.

OCENA ROZPRAWY

W pracy podjęto istotny temat jakim jest utrata sprawności bloków energetycznych w wyniku zanieczyszczania powierzchni wymiany ciepła. W sposób oczywisty niesie to za sobą efekt ekonomiczny, tj. zmniejszenie rentowności, ale również wpływa na efekt ekologiczny poprzez zwiększenie wielkości emisji. Temat zanieczyszczeń w kondensatorach jest ogólnie znanym zagadnieniem i dobrze opisanym w literaturze. Opisane w literaturze zagadnienia dotyczą raczej zagadnień cząstkowych. Przedstawiona przez Autora metoda ma charakter praktyczny i kompleksowy. Uważam, że jedną z ważniejszych wartości pracy stanowi zebranie kompletu wiedzy pozwalającej wykonać obliczenia techniczno-ekonomiczne bloku dla warunków zmienionych w wyniku zabrudzenia się kondensatora na podstawie rzeczywistych pomiarów.

Autor poruszył szereg tematów powiązanych z tym zagadnieniem. Jednym z ważniejszych wyzwań jest problem pomiaru wody chłodzącej. Wykonywane pomiary są bardzo trudne ze względu na bardzo duże średnice i przepływu. Jak wykazał Autor w niektórych przypadkach dokładność tego pomiaru może być kluczem do osiągnięcia wiarygodnych wyników. W związku z tym rozwiązanie tego problemu zostało zaproponowane przez Autora. Wykazał on, że zastosowanie metody CFD może być wykorzystane w tym celu. Ważnym aspektem jest również opracowana w ramach pracy doktorskiej bezinwazyjna metoda pomiaru strumienia masy wody chłodzącej kondensator z wykorzystaniem kolana segmentowego i modelowania CFD. Duże średnice powodują, że wymagane są długie odcinki prostej sieci, co może wręcz uniemożliwiać dokonanie pomiaru. W związku z tym zaproponowany układ pomiarowy pozwala znacząco poprawić dokładność uzyskiwanych wyników lub po prostu umożliwić pomiar w przypadku braku odcinków prostych.

Opracowane modele matematyczne mogą z powodzeniem zostać wykorzystane zarówno do monitorowania zanieczyszczenia kondensatorów turbin w trybie online jak i symulacji ich pracy. Pozwoli to na określenie kosztów związanych z narastającym zanieczyszczeniem oraz wyznaczenie optymalnego interwału czasowego dla czyszczenia kondensatora, co ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Opracowane w ramach pracy doktorskiej metody umożliwiają ocenę pracy skraplacza z bardzo wysoką dokładnością. Dokładność ta przekłada się na racjonalność podejmowanych decyzji o konieczności czyszczenia kondensatora.

Kompletność rozwiązania obejmuje również opracowanie analiz ekonomicznych, przedstawienie obliczeń dla rzeczywistego obiektu oraz opracowanie narzędzia wspomagającego wykonanie całości procesu szacowania utraty korzyści w wyniku zabrudzenia skraplacza.

Na uwagę zasługuje fakt, że praca ma charakter aplikacyjny, tj. została wykonana na podstawie rzeczywistych danych, a całość opracowanej procedury dostosowana jest do istniejących układów pomiarowych w elektrowniach.

UWAGI KRYTYCZNE I Dyskusyjne

Mimo bardzo dobrej jakości pracy Autor nie ustrzegł się pewnych drobnych uchybień. Listę uwag krytycznych i elementów do dyskusji przedstawiam poniżej:

- **Autor nie opisał sposobu walidacji używanych modeli w programie Epsilon Professional**
- **Brak jest jasno zdefiniowanego kryterium optymalizacyjnego stosowanego do optymalizacji procesu odstawień na potrzeby czyszczenia kondensatora**
- W pracy jest szereg opisów podstawowych zagadnień, takich jak opis obiegu Rankine'a – fragmenty te nie wnoszą wiele do przedstawionej rozprawy
- Sformułowanie „Kondensatory płaszczowo rurowe, stosowane są w obiegach z turbinami parowymi zarówno obiegów konwencjonalnych tj. węglowych, jak również elektrowniach jądrowych, obiegach gazowo-parowych oraz instalacjach termicznego przekształcania odpadów” – jest nieprecyzyjne. Wszystkie wymienione siłownie realizują obieg Rankine'a, a jedynie różnią się typem obiektu
- W rozdziale „4.2 PRZEGLĄD KONSTRUKCJI SKRAPLACZY” cenne byłoby przedstawienie schematu, który uprościłby opisy konstrukcji skraplacza
- Rysunek 4.1 Przedstawiono przebieg zmian temperatury wzdłuż skraplacza dla przypadku braku przechłodzenia kropli. Lepiej byłoby przedstawić przypadek z przechłodzeniem, ponieważ w akapicie poniżej definiowane jest przechłodzenie kropli
- Zależność 5-14 i kolejne zawierają nieprecyzyjny zapis ze względu na zmienność ciepła właściwego wraz z temperaturą. Wydaj się, że lepszym zapisem byłoby stosowanie entalpii.
- Opisy w rozdziale 6 są niejasne:
 - W rozdziałach 6.2.2, 6.2.3 i innych analizę przeprowadzono dla różnych okresów. Brak jest wyjaśnienia skąd wynikała różna długości okresów analiz czy dobór długości analizowanego okresu
 - Pomiary zbierano z dwóch bloków – nie jest jasno opisane kiedy i z którego bloku używane są pomiary do konkretnych celów.
- Tytuł rozdziału 7.1 *Sposoby pomiaru przepływu* wydaje się nieprecyzyjny. Jak wynika z treści pracy powinno być *Obecnie stosowane sposoby pomiaru przepływu wody chłodzącej w elektrowniach*, ponieważ w kolejnym rozdziale Autor proponuje nową metodę CFD do pomiaru
- W rozdziale 7.2.4 stwierdzono, że *pobór impulsu ciśnienia dokonywano z dwóch symulowanych króćców pomiarowych*. Sformułowanie niejasne.
- W rozdziale 7.2.4. konkluzje są bardzo ogólnikowe („*Ważne jest właściwe przygotowanie modelu numerycznego, w tym: wygenerowanie odpowiedniej siatki numerycznej i przyjęcie właściwych warunków brzegowych i początkowych*”). Wytyczne powinny być bardziej precyzyjne.
- Dla łatwiejszego zrozumienia treści pracy listingi kodu komputerowego powinny być umieszczane w załącznikach
- Rysunek 10-4 – brak jest opisu logiki rozgałęzień

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości pracy, są jedynie elementami pozwalającymi na polepszenie jakości publikacji opracowanych na podstawie przedstawionej rozprawy.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona praca zawiera szeroką i kompleksową analizę wpływu strat w blokach energetycznych wynikających z zanieczyszczania się kondensatorów turbin parowych. Zagadnienie jest istotne, ponieważ przekłada się na konkretne wyniki finansowe i wpływ na wielkość emisji zanieczyszczeń. Głównym osiągnięciem, jakie upatruję w tej pracy, jest kompletność rozwiązania dostosowana do warunków pomiarowych elektrowni. Ważnym elementem pracy jest również przedstawienie obliczeń dla rzeczywistego obiektu, co pozwala dobrze uświadomić sobie skalę zagadnienia.

Jestem przekonany, że wyniki pracy mogą być stosowane na innych obiektach tego typu i przyczynić się do zwiększenia efektywności pracy elektrowni i elektrociepłowni.

Podsumowując uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Panasia do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wojciech Bujalski