

Bestra Suka, 12 lipiec 2021

Recenzja

Rozprawy Doktorskiej Pana M.Sc. Artura Harutyunyana,
noszącej tytuł:

**“Analyses of thermodynamic parameters of gas turbines and combined cycle power plants
after repowering, working high above sea level”**

1. Informacje porządkowe.

Recenzja została zlecona przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Warszawskiej Pana Prof. Tomasza Wiśniewskiego. Promotorem rozprawy jest prof. Krzysztof Badyda a promotorem pomocniczym dr. Marcin Wołowicz. Rozprawa zawarta jest w manuskrypcie obejmującym 236 stron, 110 rysunków i wykresów, 103 pozycji literatury oraz 3 załączniki stanowiące integralną część pracy. Polski odpowiednik tytułu brzmi: „Termodynamiczna analiza parametrów pracy turbin gazowych i układów kombinowanych po ich adaptacji do pracy w warunkach górskich.”

Praca powstała w trakcie pobytu Doktoranta w Instytucie MEL kierowanym przez prof. Badydę, w oparciu w wiedzę tradycję i narzędzia tego renomowanego ośrodka; Recenzent miał okazję słuchać i dyskutować tezy i niektóre wyniki rozprawy na jednej z konferencji odbywającej się w roku 2018 w Gliwicach, byłem też recenzentem i redaktorem Jego pracy która ukazała się w *Transactions of IFFM*.

2. Nowoczesność tematyki rozprawy

Umieszczenie elektrociepłowni gazowo-parowej na dużych wysokościach rzędu 1-2 tys metrów prowadzi do konieczności ponownego gruntownego zbadania wpływu warunków otoczenia na pracę obiektu. Również ze względu na specyfikę temperatur powietrza górskiego konieczny jest repowering konwencjonalnych bloków gazowo-parowych dostosowanych do warunków nizin europejskich. Potrzebne jest również, czasami, dopalanie w kotle odzyskowym. Powstaje w tej sytuacji potrzeba wykonania eksperymentalnej i numerycznej analizy ustawienia parametrów termodynamicznych pracy bloku gazowo-parowego oraz badań wpływu warunków otoczenia na osiągi i parametry termodynamiczne turbin gazowych i układów gazowo-parowych po repoweringu. Jest to skomplikowany, ambitny naukowy problem, który winien być rozwiązany w oparciu o nowoczesne narzędzia badawcze – ich opanowanie i posługiwanie się z konieczną pewnością i płynnością jest wyzwaniem stojącym przed Doktorantem. Z drugiej strony złożoność zagadnienia, zwykle

rozwiązywanego przez duże zespoły, wymaga od Promotora i Promotora Pomocniczego dużego doświadczenia a nawet intuicji w trafnym ustaleniu kluczowych elementów projektu jako elementu gwarantującym sukces prac w sensownym czasie badań.

3. Oryginalność tematu rozprawy

Temat Rozprawy jest całkowicie oryginalny, występujący rzadko w tradycji europejskiej. Doktorant, w zasadzie, od początku, przeanalizował, w sposób termodynamiczny, koncepcję budowy bloku gazowo-parowego w przypadku warunków atmosferycznych i potrzeb kraju górskiego. Ustalił, iż dla takich warunków zasadne będzie zastosowanie turbiny parowej pracującej na parametry nadkrytyczne, zasadny będzie repowering i dopalanie paliwa w kotle odzyskowym. Sposób w jaki tego dokonał wymagał oryginalnych obliczeń, niewykonywanych przedtem w literaturze, kluczowym elementem stało się ustalenie optymalnej metody chłodzenia kondensatu, ustalenie optymalnej ilości turbin gazowych, oraz praca w częściowych obciążeniach. Te elementy Jego rozprawy są nowe w literaturze i stanowią o oryginalności rozprawy i innowacyjności jej tez.

4. Metodyka badawcza i użyte narzędzia

Obliczenia wykonano na przykładzie elektrociepłowni gazowo-parowej z dopalaniem, zasilanej gazem ziemnym, pracującej z turbiną parową na parametry nadkrytyczne, zainstalowanej na dużej wysokości nad poziomem morza. Badania koncentrowały się na różnych turbinach gazowych i obejmowały koncepcje różnych sposobów repoweringu (sprzęgnięcia) istniejących starych elektrowni parowych z dodaniem nowej turbiny gazowej oraz doбором właściwej/najbardziej odpowiedniej turbiny gazowej dla konkretnego wariantu repoweringu.

W recenzowanej pracy badano w sposób parametryczny wpływ warunków otoczenia (ciśnienie temperatura, wilgotność powietrza) na pracę układu gazowo-parowego w przypadku różnych metod chłodzenia kondensatu oraz w zależności od liczby jednostek turbin gazowych. Złożone, ze względu na szczegółowość aparatów, analizy i testy przeprowadzono przy użyciu kilku programów do modelowania matematycznego i symulatorów: GateCycleTM, Aspen HYSYS, EBSILON Profesional i SIPEP. W jednym przypadku, obliczone wyniki analiz porównano z pomierzonymi parametrami pracy przykładowej elektrowni. Te narzędzia pozwoliły również na oryginalną ocenę rozważanych schematów repoweringu nie tylko w nominalnych ale i częściowych obciążeniach turbin gazowych i układów gazowo-parowych. Stosując własne definicje, narzędzia te pozwalają na określenie sposobów poprawy sprawności turbin gazowych.

5. Cele rozprawy i jej zakres

Są przedstawione w **rozdziale pierwszym** na tle dokonań techniczno–naukowych w energetyce gazowo-parowej. Motywacją do pracy jest rzeczywisty blok gazowo-parowy Hrazdan-5 oparty na nadkrytycznej turbinie parowej pracujący w Armenii na wysokości 1724 m nad poziomem morza. Zakres obejmuje przebadanie kilkunastu sposobów repoweringu tego bloku.

6. Podstawy teoretyczne modelowania i obliczania numerycznego

Są przedstawiane w **rozdziale drugim**. Większość podrozdziałów skupia się na modelowaniu turbiny gazowej. Wprowadzono niezbędne definicje wizualizowane na rysunkach, w

szczegółności, postawiono i rozwiązano zagadnienie skorygowania definicji sprawności w układzie z dopalaniem paliwa. Wprowadzono diagram entropia-temperatura który jednak później w pracy nie jest używany. Również nie jest używana metoda projektowania kotła odzyskowego na tzw. pitch point i nie jest analizowany przynależny tej metodzie wykres.

7. Referencyjny (niezmodernizowany) obieg gazowo-parowy

Jest przedstawiony w **rozdziale trzecim**. Jest to pracujący od roku 2012-go, w Armenii. Nadbudowany blok parowy oparty jest na turbinie parowej K-300-240-3 opartej na parametrach nadkrytycznych i kotle węglowym TGMP-344AS oraz prądnicy TBB-320-2E. Pomierzone parametry pracy tego bloku, potraktowane są przez Doktoranta jako eksperymentalne, i służą w rozdziałach obliczeniowych do weryfikacji i kalibracji modeli obliczeniowych. Co jest ciekawym, pomierzone parametry są wyższe (lepsze) niż parametry wynikłe z symulacji. Czy Doktorant brał udział w pomiarach gwarancyjnych ? **(1)**.

Prezentacja nadbudowanego bloku jest profesjonalne i oddaje istotę modernizacji. Nie jest tylko jasnym czy przekrój kotła, pokazany na rys 3.3. zawiera już nowe elementy – czy można by je wyróżnić innym kolorem ? **(2)**.

8. Narzędzia obliczeniowe

Są przedstawione w **rozdziale czwartym**. Doktorant wykonał olbrzymią pracę aby zapoznać się z czterema kodami obliczeniowymi: GateCycleTM, Epsilon Professional, Aspen HYSYS oraz SIPEP (Siemens Performance Estimation Program). Brakuje podkreślenia, iż te kody obliczeniowe mają wspólny – jeśli nie identyczny – solver, a różnią się w pre- i post-procesorze. Mamy tu sytuację analogiczną jak z produkcją wielkich koncernów samochodowych gdzie poszczególne części wszystkich samochodów są te same i pochodzą od jednego producenta. Ważne jest aby każdy taki program posiadał nakładkę UDF pozwalającą na wprowadzenie własnych definicji sprawności (wzorów) oddających specyfikę rozpatrywanego zadania. Czy w przypadku niniejszej Rozprawy wzory wprowadzone przez Doktoranta przedstawione są wcześniej w rozdziale 2.6 ? **(3)**

9. Analiza możliwych sposobów repoweringu.

Jest wykonana w **rozdziale piątym**. Doktorant słusznie analizuje rynek energii zauważając, iż w ciągu ostatnich dwudziestu lat produkcja energii elektrycznej powiększyła się dwukrotnie a w tym udział energii z węgla wcale nie maleje a w ciągu ostatnich lat dwudziestu lat nawet wzrósł 2,5 krotnie. Oznacza to rozmijanie się „rzeczywistości” z „medialną informacją” o tym, iż świat (oprócz Polski) zaprzestał już używania węgla. Doniesienia o dobrowolnej likwidacji energetyki węglowej przez niektóre postępowe i demokratyczne kraje są fałszywe i mają na celu zniszczenie gospodarczych fundamentów sąsiadów – wojna gospodarcza nigdy się bowiem nie kończy.

Podziękować należy Doktorantowi z umieszczenie rysunków pozwalających obliczyć, które kraje należą do głównych trucicieli i niszczycieli naszego świata. To te kraje zwiększają produkcję energii, podwajając ją co dziesięciolecie, i przyczyniając się do kilkukrotnego (co rok) powiększenia emisji trujących gazów. Wprawdzie Doktorant nie podaje żadnych oszacowań dotyczących globalnego ocieplenia ale z przedstawionych danych wynikać może

że istnieje pewne niedoszacowanie tempa wzrostu temperatury Ziemi – wzrost o 1.5 stopnia możemy osiągnąć już za dziesięć lat a nie za 100 lat.

Repowering takiego kraju jak Polska czy Armenia ma opierać się na energetyce wiatrowej i fotowoltaicznej. Jeśli zgodnie z nakazami totalnej demokracji produkcja energii w naszym kraju ma się podwoić za dwadzieścia lat; to będzie oznaczać, iż w 2040 roku winniśmy mieć w kraju około 400 tysięcy wiatraków jednomegawatowych, podczas gdy dziś mamy ich około 1.5 tysiąca (mówimy o energetyce zawodowej). Takiego wyzwania energetyka zawodowa nie udźwignie, co oznacza, że produkcję energii w Polsce przejmą prywatne międzynarodowe koncerny, które postawią swoje ceny. Strategiczne cele wojny o energię są więc łatwe do poznania.

Repowering jaki omawia się w rozdziale 5-tym, w ogólności, polega na obmyśleniu sposobu w jaki można by zastąpić zniechęcone i pozbawione społecznej akceptacji „kotły węglowe”. Odrzuca się takie kryteria jak emisje NOx, COx, rtęci, SOx, etc. bowiem współczesne techniki oczyszczania są tak rozwinięte, iż nie ma praktycznie żadnej różnicy między spalinami bloków węglowych i gazowych. W dawnych czasach, gdy energetyka stała na zdrowych ekonomicznych podstawach, używaliśmy kryterium „sprawności energetycznej” – dzisiaj dopłaty UE tak bardzo psują ekonomię, iż to szacowne kryterium jest zdeprecjonowane. Więc jakim kryterium się dziś posługiwać? – jest to pytanie w zasadzie, do promotorów.

Sens ekonomiczny repoweringu polegającego na wymianie paliwa (np. z węgla na gaz) jest zasadny wtedy gdy droższe paliwo zamieniamy na tańsze. Gdy nowe paliwo jest siedem razy droższe od starego to nie pomogą nawet dopłaty – bilans ekonomiczny będzie jednoznacznie negatywny dla klientów. Należy więc zamieniać kosztowne paliwo na paliwo darmowe jakim jest energia wiatrowa i słoneczna. Tylko dlatego energetyka wiatrowa jest tak horrendalnie droga.

Rozdział piąty prezentuje historyczną wiedzę na ten temat – jest to wiedza ugruntowana i pewna – jednak rozwój cywilizacji pokazał, iż kotły węglowe, mimo swoich nieprzemijających ekonomicznych, energetycznych i eksploatacyjnych zalet, są nieuchronnie skazane na kasację. Recenzent przyznaje, iż nie rozumie dlaczego się tak dzieje.

10. Trzy przykłady repoweringu

Używając narzędzia w postaci kodu komercyjnego, **w rozdziale szóstym**, Doktorant dokonuje praktycznego, konkretnego repoweringu trzech bloków węglowych: typu 400 MW, 300 MW (blok w Armenii) i 200 MW. We wszystkich trzech przypadkach nadbudowuje kocioł węglowy odpowiednio dużą turbiną gazową.

W pierwszym przypadku nadbudowy bloku typu 400 MW Doktorant ustalając wielkość turbiny gazowej kieruje się zwiększonym zapotrzebowaniem na energię a nie jakimś innym kryterium pozwalającym ustalić zakres pracy bloku. Czyli maksymalna moc turbiny gazowej plus maksymalna moc kotła węglowego. Nie mniej ważna jest analiza parametrów pracy przy częściowym obciążeniu kotła i maksymalnej pracy turbiny gazowej. Jest to słuszne podejście od strony technicznej bowiem częściowe obciążenie od strony turbiny realizuje się zwykle

przez wyłączenie jednej z dwóch turbin. Analiza wpływu ilości wody zasilającej jest wartościowa.

W drugim przypadku nadbudowy bloku typu 300 MW, Doktorant bada aż pięć sposobów repoweringu – jednak nadbudowany blok gazowy ma skromną moc rzędu ~90 MW lub 120 MW. Powstaje pytanie dlaczego, chociażby teoretycznie, nie analizowano turbin gazowych w zakresie od 90 do 900 MW ? (4). Interesujący jest przypadek pełnego repoweringu, gdzie całkowicie usuwa się kocioł węglowy a turbina parowa zostaje i w to miejsce wstawia się kocioł odzyskowy bez dopalania. Podobny przypadek występuje w Gorzowie Wielkopolskim, w pierwszej w kraju elektrowni gazowo-parowej – gdzie jednak zrezygnowano z pełnego obciążenia turbiny parowej na jakie zaprojektowali ją konstruktorzy z ZAMECHu i moc TG ustawiono pod limitowaną ilość gazu zaazotowanego dostarczanego z kopalni ropy naftowej w Dębnie. W Gorzowie dopalanie w kotle odzyskowym służyło głównie celom ciepłowniczym oraz zamówionej produkcji pary.

Rysunek 6.2.7. przedstawia profesjonalne porównanie wszystkich pięciu sposobów z blokiem referencyjnym przed repoweringiem. Widać utrzymanie mocy parowej na stałym poziomie 300 MW, co, przy coraz większej turbinie gazowej, pozwala odciążać kocioł węglowy. W przypadku obniżenia mocy kotła węglowego aż do zera (przypadek pełnego repoweringu) cała moc parowa 300 MW pochodzi z kotła odzyskowego. Nie doczytałem jaki strumień gazu używany był na dopalanie – ale wnioskując z ostatniego przypadku naturalnego obiegu gazowo-parowego (bez dopalania, gdzie około 8-9 kg/s spalin wytwarza 1 kg/s pary), wnioskuję, że na dopalanie było przeznaczane 5 do 10 razy więcej gazu niż tego spalanego w turbinie gazowej. Czy się tutaj nie mylę ? (5)

Krytycznie muszę ustosunkować się do wniosku Doktoranta co do najwyższej sprawności w analizowanych 6 przypadkach.¹ Nie przeczę, że najwyższą wartość tak a nie inaczej definiowanej sprawności, uzyskano w przypadku maksymalnego dopalania, ale zasady pracy bloku gazowo-parowego mówią, iż dopalanie obniża sprawność bloku, tym bardziej większe dopalanie obniża bardziej a największe, o którym mówi Doktorant, obniża najbardziej. Tymczasem wniosek Doktoranta jest przeciwny. Czy mam rację ? (6) Podwyższenie sprawności samego dopalania można uzyskać prowadząc dopalanie tylko na części spalin w odpowiednio przebudowanym kotle, tak aby uzyskać lepszą karnotyzację kotła.

Częściowe obciążenie nowych bloków realizowano tylko przez zmianę ilości pary świeżej (również w parowym bloku referencyjnym). Wykresy są wartościowe i oryginalne i pozwalają na ustawienie parametrów. Jednak, abstrahując od bloku parowego to częściowe obciążenia bloku gazowo-parowego może są realizowane przy mniejszej stracie sprawności, zwykle przez wyłączenie jednej z turbin gazowych, lub np. tak jak to się dzieje w elektrociepłowni w Ostrołęce lub na bloku w Toruniu poprzez magazynowanie ciepła. Czy Doktorant ma swoje poglądy na temat sposobów realizacji częściowego obciążenia w bloku gazowo-parowym na przykładzie praca dzienna i praca nocna ? (7)

¹ Str 103. - *The highest efficiency was available in 60% load of total net cycle electrical power in complete repowering method with maximum supplementary firing, and was equal to 51.74%. In that case live steam mass flow was equal to 183.66 kg/s.*

W trzecim przypadku nadbudowy bloku typu 200MW potrzebującego 165 kg/s pary o parametrach 13 MPa i 535 °C Doktorant rozważał 9 rzeczywistych turbin gazowych od mocy 50 do 125 MW. Nawet bez skomplikowanych obliczeń widać, iż jedna turbina gazowa 125 MW nie wystarczy aby jej spaliny mogły wyprodukować tyle pary – trzeba tu zakładać, iż każdy kilogram pary potrzebuje około 10 kilogramów spalin. Obniżenie strumienia pary w turbinie typu 200 MW o połowę obniża jej sprawność wewnętrzną z 0.93 do 0.71 - co jest poważnym elementem, który powinien być uwzględniany w obliczeniach. Tymczasem, w większości komercyjnych kodów sprawność wewnętrzną turbiny nie jest funkcją strumienia masy pary. Jak jest to rozwiązane w przypadku obliczeń Doktoranta ? (8)

Nadbudowa bloku parowego coraz to większą turbiną gazową powoduje stopniowe zmniejszanie ilości spalanego węgla przy utrzymaniu niezmiennego potrzebnego strumienia pary $\dot{m}_{steam} = 165 = const.$ Zwiększanie udziału turbiny gazowej powoduje jednak spadek sprawności kotła, ale, z drugiej strony, większe turbiny gazowe mają coraz większe sprawności, stąd pytanie Doktoranta o takie dobranie turbiny gazowej aby sprawność całego bloku po repoweringu była jak największa. Czy jednak słuszny jest wniosek Doktoranta, iż największą sprawność uzyskuje się w sytuacji w której 40 % mocy pochodzi ze spalin turbiny gazowej a 60 % ze spalin węgla. Jest to chyba informacja liczbowa tego konkretnego przypadku a nie ogólny wniosek ?² (9)

Niemniej, badania tego rozdziału, w pomysłowy, czytelny, sposób przedstawione na wykresach, są niezwykle wartościowe dla konkretnych krajowych elektrowni wykorzystujących turbiny parowe typu 200 MW. W konkretnym przypadku bowiem nie tylko sprawności optymalne mogą decydować o inwestycji a również względy finansowe.

11. Studium literaturowe wpływu otoczenia

Wagę wpływu warunków zewnętrznych na pracę bloku gazowo-parowego analizuje się w **rozdziale siódmym** (stron 14).

To bardzo ciekawy rozdział, w którym Doktorant dyskutuje rozmaite uwarunkowania dla pracy turbin gazowych. Tytułem uzupełnienia można dodać **dwie sprawy** występujące w warunkach krajowych. Pierwsza to filtry powietrza, powszechnie stosowane na wlocie turbiny – mają one już tzw. czwarty poziom oczyszczania wychwytyjący nawet pyły ultra-drobne zagrażające ludzkim płucom. Stąd płyną żartobliwe uwagi inżynierów z elektrowni w Gorzowie Wielkopolskim iż elektrownia wprawdzie jest zlokalizowane w mieście co jest pewnego rodzaju uciążliwością, ale za to oczyszcza powietrza miejskiego z pyłów antropogennych.

Drugi element występujący w elektrowni gazowo-parowej to oblodzenie wlotu powietrza do którego nie można dopuścić. Inną dolegliwością jest lokalizacja czerpni tak niefortunna, iż latem zagarnia one dobrze wygrzane powietrze którego temperatura dochodzi do 35 °C. Powoduje to spadek mocy turbiny o 5 do 15 MW. W ogólności, rozpiętość mocy turbiny

² Str 117: *The highest efficiency* was available *in 60% boiler heat load*, and was equal to **43.8%**. In that case boiler heat load was **330 MW** and live steam mass flow equal to **148.54 kg/s**. This shows the advantage of Combined-Cycle power plants with direct hot wind-box repowering.

między zimą a latem jest „poważna” – kilkunastoprocentowa – stąd mamy kolejne uzasadnienie tematu niniejszej rozprawy.

Doktorant w szczególności bada zmiany ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza z zależności od wysokości usytuowania na poziomie morza. Ponieważ mamy do czynienia z poważną redukcją gęstości powietrza (z 1.3 [0 km] do 0.9 kg/m³ [2 km]) jedną z sensownych technologii zwiększenia gęstości powietrza staje się wtrysk zimnej wody lub pary – dla strumieni tego gęstego czynnika do 0.2 kg/s można nie stosować odzysku wody ze spalin – dla dużych strumieni, zwłaszcza przy braku wody w okolicznych studniach, trzeba stosować odzysk wody.

Ważne jest iż Doktorant odwołuje się do doświadczeń poszczególnych elektrowni zawartych w literaturze.

12. Parametryczne badania wpływu otoczenia na przykładzie turbiny GT13E2 oraz SGT5-PAC 2000E

Wstępne badania numeryczne wpływu otoczenia dla dobrze znanego przypadku turbiny GT13E2 i turbiny SGT5-PAC 2000E przedstawiono w **rozdziale ósmym** (stron 32). Ograniczono się do badań turbiny gazowej traktując średnie warunki jako: 0.822 bar ciśnienia otoczenia (lub 1724 m wysokości), 15 °C temperatura otoczenia and 60% względnej wilgotności. Badano wpływ zmienności temperatury i ciśnienia od -30 °C, 1050 mbar do +50 °C, 750 mbar. Osiągnięto ciekawy wpływ - najwyższa moc wynosi 181.03 MW (sprawność 39.39%) najniższa moc 117.95 MW (sprawność 31.98 %). Wpływ dużej czy małej wilgotności jest widoczny tylko latem przy wysokich temperaturach (więcej niż 30 °C).

Wykonano wiele oryginalnych rysunków, min. rys 8.5 pokazuje wpływ na temperaturę spalania w komorze - temperatura TIT waha się od 1055 (-30) do 1130 (+50). Doktorant wprowadził dla sprężarki ciekawy parametr którego poprzednio nie znałem - jest to wysokość politropowa (The Polytrophic Head), mierzona jako ilość energii (pracy mechanicznej) potrzebnej do sprężenia 1 kilograma gazu (1 kJ/kg \equiv 102.04 m).

Zawarte są również porównania mocy i sprawności politropowej obliczonych i pomierzonych – zgodność jest doskonała nawet więcej niezwykła.³ Pomysł aby obliczać sprawność politropową a nie izentropową jest dobry – zwłaszcza z handlowego punktu widzenia – jednak, zachodzi obawa czy Doktorant nie porównuje obliczonej sprawności politropowej z pomierzoną sprawnością izentropową ? **(10)**

Z naszych (Zakładu Konwersji Energii IMP PAN) doświadczeń nad obliczeniami obiegów kombinowanych wynika, iż zwykle dane pomierzone są nieco niższe niż te obliczane - w przypadku Rozprawy Doktoranta jest akurat odwrotnie. Skąd taki efekt ? – przeprowadziłem konsultacje w tej sprawie z kolegami pracującymi w biurze konstrukcyjnym fabryki w Elblągu

³ The official Performance Test on “Hrazdan 5” GT13E2 was carried out on 2011-12-09 and then after 2 years the repetition of the Performance Test was carried out on 2013-11-21

– oni zawsze mają oszacowania obliczeniowe od góry. Trzeba przyznać, że wyniki Doktoranta stoją po bezpiecznej stronie co jest ogromną zaletą w praktyce.

13. Wpływ parametrów otoczenia na pracę bloku gazowo-parowego.

Badania przedstawiono w **rozdziale dziewiątym** (stron 46). Użyto tych samych trzech obiegów jakie omawiano w rozdziale szóstym. Zakłada się iż warunki otoczenia nie mają wpływu na część parową. W rzeczywistości, z uwagi na moc potrzebną na młyny, smoczki i chłodnię kominową, różną latem i zimą, taki wpływ istnieje i wynosi 1-2 MW, jednak w stosunku do wpływu turbiny gazowej jest to wpływ pomijalny. Wpływ ciśnienia (wysokości) na terenie naszego kraju nie ma znaczenia.

Doktorant wykazuje że jednak w przypadku nadbudowy HWBR (hot wind-box repowering) również dla części parowej daje się zaobserwować wpływ wysokości umiejscowienia elektrowni na część parową (opartą na turbinie K300 produkcji LMZ). Wpływ wysokości 1724 m na spadek mocy turbiny parowej i gazowej wynosi około 3.4% oraz 19.5%, odpowiednio. Ten wpływ, jak po żmudnych obliczeniach pokazuje Doktorant Pan Harutyunyan, utrzymuje się również dla częściowych obciążeń (fig. 9.4).

Podobne rezultaty otrzymuje się dla nadbudowy typu FWRP. Przechodząc do badań wpływu temperatury otoczenia (zwłaszcza różnica dzień/noc) Doktorant stwierdza, iż wariant nadbudowy HWBR jest najwłaściwszy – wiele tu zależy jednak od typu zastosowanej turbiny i tak turbina GT13E2 ma spadek 0.413 MW na jednostopniowy wzrost temperatury powietrza, turbina GT11N2 0.587 MW a turbina V84.2 ma 0.528 MW. – jest to więc „bezcenna” informacja dla ekonomiki elektrowni.

Dla nadbudowy HWBR gdy temperatura powietrza spada z +50 0C do -30 0C, moc turbiny parowej wzrasta z 300.2 MW do 304.5 MW, zaś dla nadbudowy FWRP jest przeciwnie, moc turbiny parowej maleje 303.2 MW do 296.3 MW. Doktorant, w tym aspekcie, preferuje sposób HWBR – rysunek 9.10 pokazuje ilościowe wyniki w porównaniu z parowym obiegiem referencyjnym.

W podpunkcie 9.2 powtarza się badania punktu 9.1 ale dla turbiny SGT5-2000E oraz chłodzenia powietrznego i wodnego skraplacza turbiny parowej. Rozpatruje się też przypadek kompletnego repoweringu z dwiema turbinami gazowymi. Ta część stanowi jak gdyby osobny temat, mniej związany z rozpatrywanym rzeczywistym repoweringiem, nie mniej, wyniki są oryginalne i interesujące. Okazuje się, zaskakująco, że rodzaj systemu chłodzenia skraplacza nie ma aż tak dużego wpływu na moc bloku – jak wyliczył Doktorant, w przypadku chłodni wodnej moc jest tylko o 2.4 MW wyższa niż w przypadku chłodni powietrznej (przy 220 MW mocy całkowitej). Z uwagi na ilościowe, liczbowe, wyniki rezultaty obliczeń bloku gazowo-parowego opartego na turbinie SGT5-2000E są ważne dla inwestora, jednak jakościowe i naukowe wyniki dla turbiny SGT5-2000E (pełny repowering) nie różnią się od punktu poprzedniego (częściowy repowering). Również obliczenia z dwoma turbinami gazowymi i dwoma kotłami odzyskowymi (punkt 9.2.3.) mają już charakter techniczny. Autor obliczył, iż w tym przypadku występuje spadek mocy 0.685 MW na jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury powietrza przy wilgotności względnej 60%. Na rys. 9.22 pokazano pełny wpływ wilgotności powietrza i temperatury powietrza na sprawność układu. Okazuje

się że duża wilgotność zmniejsza sprawność bloku nawet o kilka procent. Dlaczego aż tak dużo? Jest to wynik dość trudny do intuicyjnego wytłumaczenia – jak ten wynik uzasadnia Doktorant? (11)

W kończącym ten rozdział punkcie 9.3, Doktorant wykonuje zestawienie spadku mocy bloku przypadające na jeden stopień podwyższonej temperatury powietrza dla wszystkich rozpatrywanych w pracy przypadków repoweringu (tab 9.9). Jest to wyjątkowo cenny rezultat rozprawy. Te spadki mają duży zakres i różnią się nawet czterokrotnie. Jest to więc nowy ważny element, który należy uwzględnić w ekonomice pracy bloku. Najmniejszą wrażliwość ma układ z dopalaniem paliwa, toteż należy pamiętać, że oprócz ewidentnych wad ma on również pewne przewagi nad innymi rozwiązaniami.

14. Podsumowanie wyników

Krótkie podsumowanie rozprawy zawiera **rozdział dziesiąty** (stron 6). Podsumowanie – jest to zadanie trudne z uwagi na bogactwo poruszanych tematów i różnych punktów widzenia. Jako najważniejsze stawia się sprawę wyboru rodzaju repoweringu – to jest zresztą celem pracy – znajdując obok klasycznych kryteriów wyboru również kryterium rozszerzone o wpływ warunków otoczenia – w tym głównie ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza. Dodatkowo, uwzględniono kryterium częściowego obciążenia, które nieczęsto występuje w praktyce wyboru rodzaju technologii. Otrzymano również, choć nie było to głównym celem, dane dla kryterium ekologicznego jakim jest emisja gazów CO_x. Na koniec rozprawy, Doktorant na podstawie własnych wyników, jednoznacznie wybiera najlepszy układ repoweringu wśród układów rozpatrywanych w pracy.

15. Krytyczne uwagi i zapytania

Praca w konsekwentny sposób realizuje postawione przez Promotora cele. Ale w pewien sposób, jej najwartościowsze strony mogą być traktowane, jako jej „przeszkadzający nadmiar” – chodzi mi tu o niezwykle bogactwo obliczeń oraz niespotykany nakład pracy i wysiłku twórczego. Raczej będę tu bronił Doktoranta, twierdząc, iż do realizacji takich celów zastosował właściwy zakres pracy.

Uwagi i pytania recenzenta są natury uzupełniającej – często przy nowatorskich wynikach i wykresach pojawiają się szczegółowe interpretacje czy wątpliwości wynikające raczej z braku intuicji Recenzenta. Te dyskusyjne kwestie zaznaczyłem w omówieniu rozprawy (w pogrubionych nawiasach).

16. Ocena Rozprawy

Praca zastała wykonana w ośrodku naukowym, który od lat specjalizuje się w badaniach bloków gazowo-parowych, pod kierunkiem promotora posiadającego olbrzymi dorobek i doświadczenie – stąd temat pracy i jego ustawienie nie budzą najmniejszych zastrzeżeń. Wartościowym jest oryginalny aspekt tego tematu, który związany jest z potrzebami ojczystego kraju Doktoranta. Wartościowym jest niezwykle zapał Doktoranta do poznawania termodynamiki obiegów; w tym narzędzi numerycznych. Jest wartościowym, iż Doktorant we wszystkich poruszanych zagadnieniach naukowych, które same w sobie były i pozostają

trudne, zawsze widzi aspekt praktyczny, jest to niezwykle cenna cecha charakteru, coraz rzadziej spotykana.

Doktorant spełnił postawione przed nim cele, uzyskał nowe, oryginalne, wyniki będące interesującym wkładem do nauki. Te wyniki równie ważne są dla energetyki, pozwalają, bowiem na praktyczne rozwiązywanie nowych wyzwań. Takie połączenie nauki z praktyką jest szczególnie wymagające; Doktorant wykazał się tu talentem badawczym, rzadko spotykaną rozległością wiedzy, oraz determinacją pozwalającą wykonywać pracochłonne badania. Udowodnił On doskonałe opanowanie wiedzy termodynamicznej, narzędzi badawczych, języka zawodowego. Rozwinął umiejętność analizowania i wnioskowania, o czym świadczą oryginalne wykresy niespotykane w literaturze przedmiotu. Z autopsji wiem, iż potrafi on świetnie prezentować wyniki swych prac oraz autentycznie ich bronić w dyskusji.

17. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą Pana mgr inż. Artura Harutyunyana i jego dorobku stwierdzam, iż zawiera ona oryginalny dorobek naukowy spełniający warunki ustawy o stopniach naukowych i dlatego moja opinia jest pozytywna. Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenia Rozprawy do publicznej obrony.

Jednocześnie, stwierdzam, iż recenzowana rozprawa jest wyróżniająca się. Następujące dwa elementy stanowią o mojej opinii:

1. Opracowania racjonalnej i pionierskiej metodyki badań dla nowych wyzwań energetyki gazowo-parowej
2. Wyróżniające się rozwiązanie pracochłonnego zagadnienia związanego ze złożonym i nietrywialnym modelowaniem rzeczywistego urządzenia.

Dlatego występuję do członków Rady Naukowej o wyróżnienie Rozprawy Artura Harutyunyana.

Janusz Badur

