UWAGA: treści przedstawione w tym dokumencie są objęte prawami autorskimi i stanowią własność firmy Horus-Energia Sp. z o.o.. Jakiekolwiek użycie całości bądź fragmentu bez zgody właściciela jest zabronione.

RAPORT Z REALIZACJI ETAPU PROJEKTU

wyciąg

NR ETAPU 4

W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INTELIGENTNY ROZWÓJ

Numer umowy POIR.01.01.01-00-0902/15-04

Tytuł projektu: *Agregat prądotwórczy dużej mocy zasilany gazami odpadowymi niskiej jakości z modułowym układem oczyszczania gazów*

2. CEL I ZAKRES PRACY

Zgodnie z założeniami IV etapu projektu, zasadniczym celem zrealizowanych prac było przetestowanie rozwiązań wypracowanych w poprzednich etapach w warunkach rzeczywistych oraz opracowanie prototypu układu generującego energię elektryczną z gazów odpadowych niskiej jakości. Najważniejszym elementem etapu IV było zintegrowanie technologii opracowanej w czasie etapów I i II dotyczących bezpośrednio agregatu oraz technologii opracowanej w etapie III dotyczącej oczyszczania i kondycjonowania gazu a następnie przetestowanie tak powstałego kompletnego układu.

Przeprowadzono badania obejmujące próby 200 godzinne na gazie niskokalorycznym oraz wysokokalorycznym oraz próbę 100 godzinną na standardowym gazie ziemnym. Zrealizowane badania pozwoliły na pełne przetestowanie opracowanych wcześniej elementów i stworzenie kompletnego zintegrowanego układu generacji energii elektrycznej i potencjalnie cieplnej z gazów odpadowych oraz opracowanie wymaganych kamieniem milowym wniosków.

Przeprowadzono badania na gazie niskokalorycznym o składzie 50% gaz ziemny wysokometanowy (GZ50) + 50% dwutlenek węgla. Wartość opałowa takiego gazu wynosi 17,9 MJ/Nm3. Jako gaz wysokokaloryczny użyto mieszaniny 25% propanu + 75% gaz ziemny wysokometanowy (GZ50). Wartość opałowa takiego gazu wynosi 50,1 MJ/Nm3. Wartość opałowa gazu ziemnego wysokometanowego (GZ50) wynosi 35,8 MJ/Nm3.

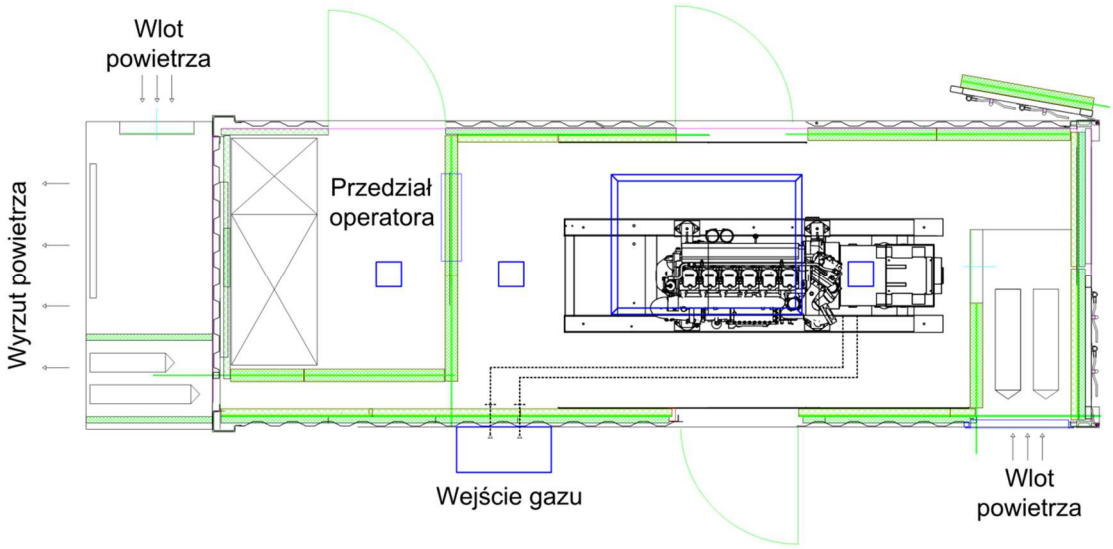
Adekwatnie do możliwości zastosowanych rozwiązań przystosowano szczegółowy program badawczy. Dla ograniczenia kosztów użyto opracowany w poprzednich etapach układ mieszania gazów. Do wprowadzania zanieczyszczeń węglowodorowych używano także układu do wprowadzania do gazu zanieczyszczeń wykonanego w III etapie.

Gaz niskokaloryczny zanieczyszczano mieszaniną węglowodorów symulujących smółki występujące np. w gazach ze zgazowania. Jako symulanta użyto mieszaniny toluenu, ksylenów i naftalenu w proporcjach objętościowych 65:13:1 Zawartość zanieczyszczeń w gazie wynosiła ok. 4500 ppm.

Gaz wysokokaloryczny zanieczyszczano frakcją węglowodorową C6-10. Zawartość zanieczyszczenia w gazie wynosiła ok. 2% obj.

Gaz ziemny zanieczyszczano siarką wprowadzaną jako H_2S. Zawartość siarkowodoru w gazie wynosiła ok. 1000 ppm

Zgodnie z założeniami etapu IV opracowano i wykonano kontenerowy badawczy moduł agregatowy. Oczywiście wykorzystano w tym celu agregat wykonany w I etapie.
Zabudowa kontenerowa posiada wymiary (dłg x szer x wys) 8,5 x 2,5 x 3,1 m. Poziom wyciszenia wynosi ok. 75 dB z 7 m. Ogólny schemat zabudowy przedstawiono na rysunku nr 1. Zabudowa została wyposażona w specjalny tłumik skrzyniowy który w odróżnieniu od klasycznych tłumików walcowych wystaje niewiele ponad dach kontenera i nie wymaga demontażu na czas transportu zespołu.



Rys. 1. Rozmieszczenie elementów badawczego kontenerowego agregatu prądotwórczego. Widok z góry

Rysunek 2. Widok ogólny (od strony wyrzutni) badawczego kontenerowego agregatu prądotwórczego z podłączoną obciążnicą elektryczną, w czasie prób

Testowano kompletną instalację tj. agregat w zabudowie kontenerowej podłączony do układu oczyszczania i kondycjonowania gazu. Jednym z elementów testowanej instalacji była pochodnia używana w czasie rozruchu układu oczyszczania i kondycjonowania gazu. Pochodnia zapewniała także możliwość awaryjnego zrzutu nadmiarowej ilości gazu niewykorzystywanego przez agregat prądotwórczy.

Uwzględniając sposób przeprowadzania prób końcowych oraz potwierdzone w poprzednich etapach bardzo duże zdolności adaptacyjne układu sterowania silnikiem określenie wstępnej mapy silnika realizowano na początku zasilania każdym rodzajem paliwa. W realizacji całego zadania korzystano także z map ustawień zapisanych podczas wcześniejszych prób w poprzednich etapach.

3. PROGRAM BADAŃ

W ramach etapu IV projektu badawczego zrealizowano program badań obejmujący testy kompletnego układu generującego energię elektryczną z gazów odpadowych. W czasie badań testowych wydzielono następujące zadania badawcze:

l.p.	Temat zadania
1.	**Optymalizacja ustawień emisyjno-sprawnościowych silnika agregatu prądotwórczego.** W czasie testów zgodnie z założeniami projektu mierzono emisję zanieczyszczeń w spalinach oraz dokonywano regulacji optymalizacyjnych. Przyjęto 4 stosowane rozłącznie kryteria optymalizacji: a. emisja NOx poniżej 500 mg/Nm3(obecnie najczęściej występujące wymaganie na rynku) b. emisja NOx poniżej 250 mg/Nm3(coraz częściej pojawiające się wymaganie klientów) c. minimalna do uzyskania w sposób trwały emisja NOx d. maksimum sprawności bez stosowania górnego limitu emisji NOx W dobie rosnących cen nośników energii oraz samej energii eksploatacja agregatu wg pkt d jest coraz częściej występującym oczekiwaniem klientów. Oszczędności oraz zwiększone przychody bardzo często bywają na tyle duże, że opłacalnym jest instalacja specjalnych katalizatorów typu SCR, których koszt potrafi się zwrócić w bardzo satysfakcjonującym dla użytkowników okresie (np. poniżej 2 lat vs minimum 8 letni okres eksploatacji agregatu). W czasie badań poza emisją NOx zgodnie z opisem projektu mierzono także emisję tlenku węgla (CO) oraz niedopalonych węglowodorów (CH). Pomiarowi podlegało także zużycie paliwa. Pomiarów i regulacji dokonywano w 6 pkt mocy: 100%, 90%, 75%, 50%, 25%, 0% obciążenia nominalnego. Dla każdego z paliw zasilających agregat uzyskał swoją moc nominalną. Zdecydowano, także uwzględniając charakter testów tj. sprawdzanie parametrów pracy w dłuższym okresie czasu - nie przekraczać poziomu mocy nominalnej tj. 200 kWe. W czasie eksploatacji komercyjnej przekraczanie mocy nominalnej, dla której jest określana trwałość i resursy serwisowe jest niedopuszczalne. Zgodnie z wymogami projektu dla ww. pkt pomiarowych mierzono także strumienie ciepła tj. ilości ciepła powstającego w układzie chłodzenia silnika, w intercoolerze oraz w spalinach. Pomiaru ciepła w spalinach dokonywano metodą pośrednią obliczeniową dysponując strumieniami masowymi gazu, zużywanego przez silnik powietrza oraz składem spalin. Badania optymalizacyjne ustawień sprawnościowo-emisyjnych silnika agregatu prowadzono dla 3 rodzajów paliwa: - niskokalorycznego (GZ50+CO_2, wartość opałowa 17,9 MJ/Nm3) - wysokokalorycznego (GZ50+C3H8, wartość opałowa 50,1 MJ/Nm3) - standardowego (GZ50, wartość opałowa 35,8 MJ/Nm3)
2.	**Określenie wydajności energetycznej całej instalacji.** Dla różnych stanów pracy całej instalacji mierzono zapotrzebowanie energetyczne modułu oczyszczania i kondycjonowania gazu odpadowego oraz zużycie energii na tzw. potrzeby własne prądotwórczego agregatu kontenerowego. Z punktu widzenia komercyjnego zastosowania opracowanych w projekcie instalacji to bardzo ważne zagadnienie. Wydajność netto instalacji decyduje o ekonomicznej opłacalności zastosowania wypracowanych rozwiązań wpływając bezpośrednio na możliwy do osiągnięcia przychód.
3.	**Badanie zdolności instalacji do przyjmowania zmiennych obciążeń.** Sprawdzono zdolność całej instalacji do przyjmowania dynamicznych zmian obciążenia. Całej instalacji tzn. agregatu zasilanego przez układ oczyszczania i kondycjonowania gazu. O ile zdolność przyjmowania dużych zmian obciążenia przez agregat została już potwierdzona w etapie I i II o tyle empirycznego potwierdzenia wymagała zdolność radzenia sobie z dynamicznymi zmianami obciążenia przez układ oczyszczania i kondycjonowania gazu. Badania przeprowadzono poprzez zadawanie skokowych zmian obciążenia odnotowując w tym czasie odpowiedź ciśnieniową bufora w sekcji S700 układu oczyszczania.
4.	**Badanie efektywności oczyszczania gazu z zanieczyszczeń.** W czasie powyższych badań wg pkt 1 wprowadzany do układu gaz był zanieczyszczany różnymi zanieczyszczeniami. Gazy zanieczyszczano odpowiednio: a. niskokaloryczny mieszaniną węglowodorów symulujących smółki.

	b. wysokokaloryczny frakcją węglowodorową C6-10. c. standardowy gaz ziemny siarką wprowadzaną jako H_2S. Przez cały okres wprowadzania zanieczyszczeń monitorowano efektywność oczyszczania. Rozszerzono badania efektywności oczyszczania gazu o zdolność do usuwania smółek. Znacznie dłuższy czas trwania testów pozwolił ponadto na zweryfikowanie działania układu oczyszczania gazu z frakcji węglowodorowej C6-10 i siarkowodoru określone w III etapie realizacji projektu.

Po badaniach zweryfikowano jakość oleju smarnego silnika.

4. WYNIKI BADAŃ INSTALACJI I ICH ANALIZA

Testy badawcze były prowadzone na kompletnej instalacji do produkcji energii elektrycznej (i potencjalnie cieplnej) z gazu odpadowego. Instalacja zgodnie z projektem składała się z agregatu w zabudowie kontenerowej podłączonej do układu oczyszczania i kondycjonowania gazu. Jednym z elementów układu oczyszczania gazu była pochodnia, która jest używana w czasie rozruchu układu oraz zapewnia możliwość awaryjnego zrzutu nadmiarowej ilości gazu niewykorzystywanego przez agregat prądotwórczy.

Rysunek 3. Widok ogólny instalacji w czasie prób. Po lewej widać fragment zabudowy kontenerowej agregatu, po prawej moduły układu oczyszczania. W centralnej części widać obciążnicę elektryczną i pochodnię.

4.1. Optymalizacja ustawień emisyjno-sprawnościowych silnika agregatu prądotwórczego.

W czasie testów dokonywano regulacji optymalizacyjnych stosując odpowiednio poniższe kryteria optymalizacji:

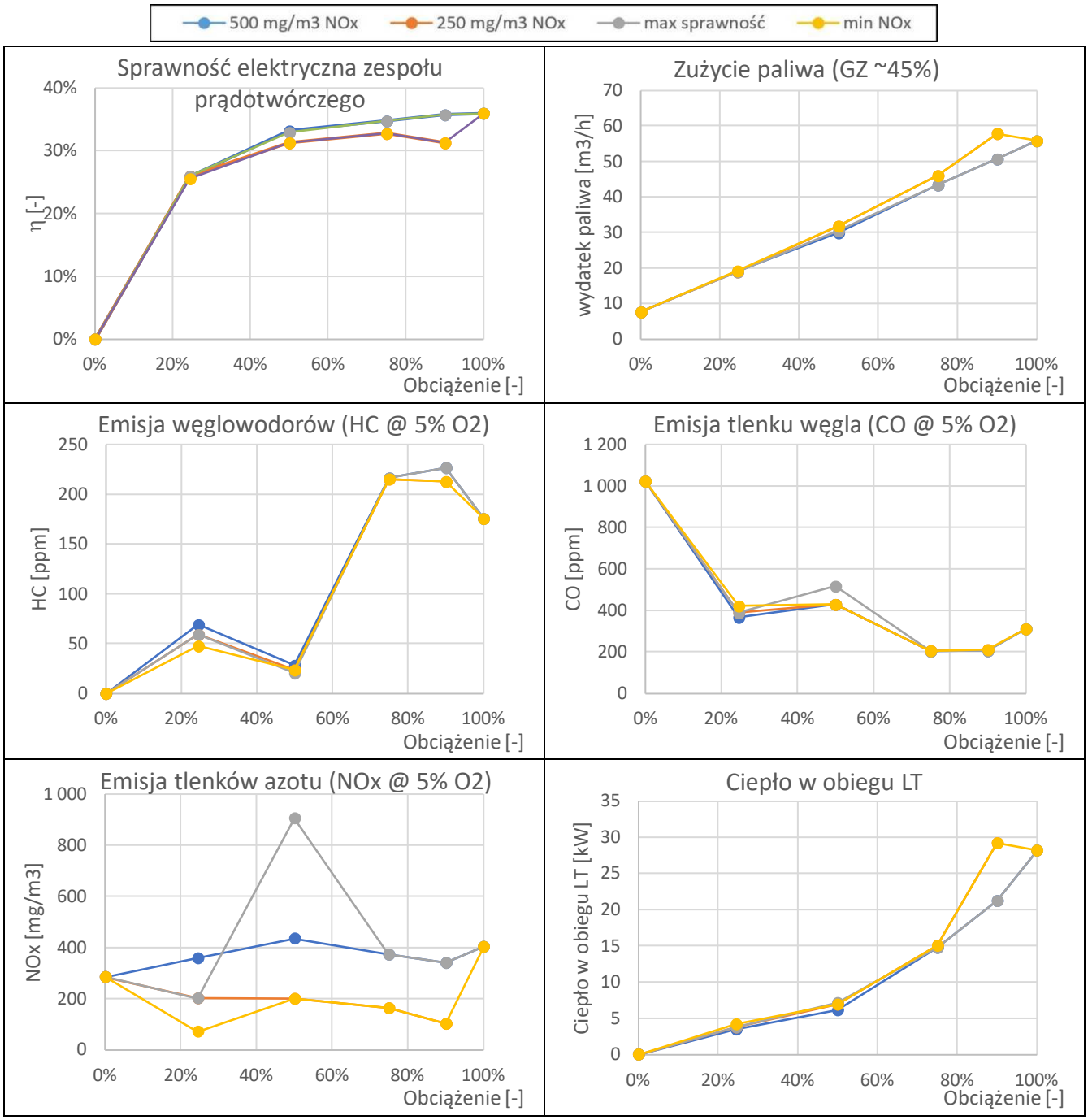
a. emisja NOx poniżej 500 mg/Nm3(obecnie najczęściej występujące wymaganie na rynku)
b. emisja NOx poniżej 250 mg/Nm3(coraz częściej pojawiające się wymaganie klientów)
c. minimalna do uzyskania w sposób trwały emisja NOx
d. maksimum sprawności bez stosowania górnego limitu emisji NOx

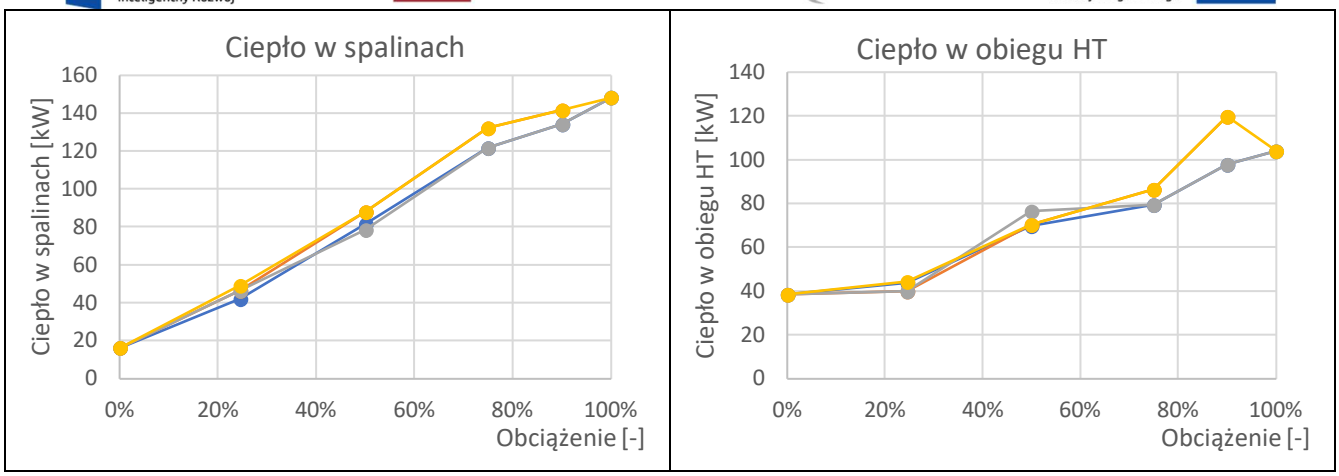
Badań zgodnie z przyjętym programem dokonano dla 3 różnych paliw:
- niskokalorycznego (GZ50+CO_2, wartość opałowa 17,9 MJ/Nm3)
- wysokokalorycznego (GZ50+C3H8, wartość opałowa 50,1 MJ/Nm3)
- standardowego(GZ50, wartość opałowa 35,8 MJ/Nm3)

<u>4.1.1 Wyniki pomiarów z gazem niskokalorycznym (GZ50 + CO_2)</u>

Badania zespołu prądotwórczego zasilanego gazem niskokalorycznym, których wyniki przedstawiono poniżej, realizowane były z użyciem paliwa będącego mieszaniną gazu ziemnego i dwutlenku węgla w proporcjach ~45% GZ50 i ~55% CO_2 (wartość opałowa 17,9 MJ/Nm3). Należy zaznaczyć, że w trakcie

prób występowały niewielkie zmiany składu gazu, podyktowane zmianami dynamiki przepływów przez stację mieszającą. Zmiany, o których mowa oscylowały w granicach +/- 3 p.%, co może mieć nieznaczny wpływ na przebiegi poszczególnych charakterystyk przedstawionych na poniższych wykresach.



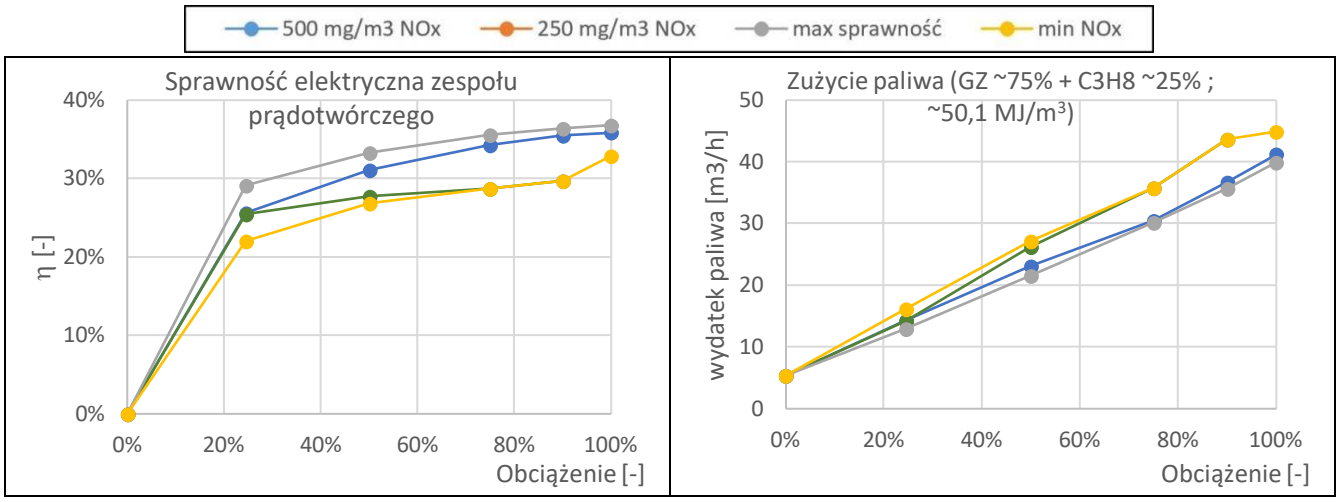


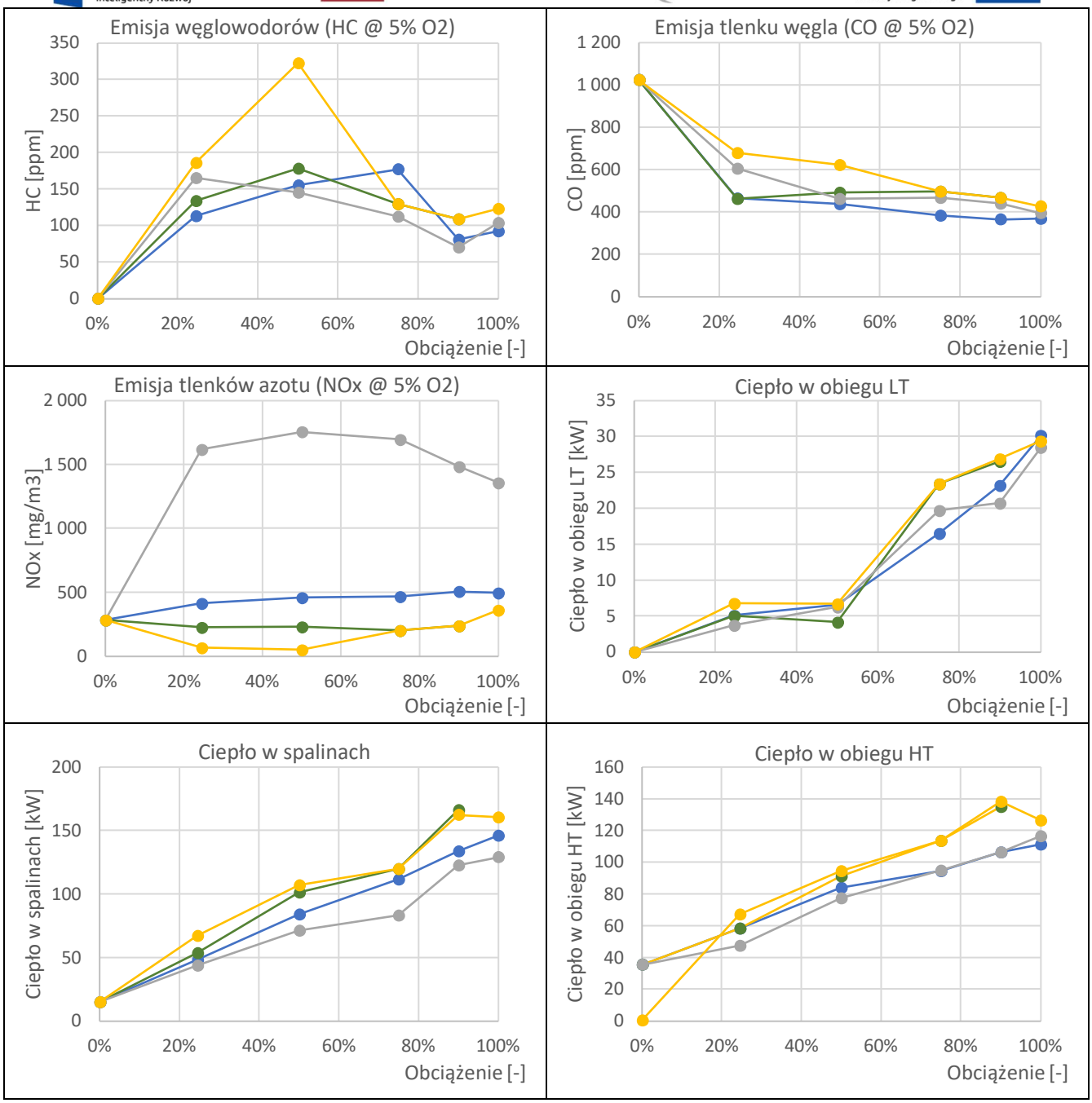
Rysunek 4. Wykresy sprawdzanych parametrów dla zasilania gazem niskokalorycznym (GZ50+CO_2).

Zastosowany gaz niskokaloryczny zawiera duże ilości stosunkowo ciężkiego gazu inertnego CO_2. W połączeniu z cechami indywidualnymi silnika powoduje to pewne ograniczenia w dostępnym zakresie regulacji szczególnie dla dużych obciążeń. Najlepiej jest to widoczne w załamaniu krzywej regulacji minimum NOx powyżej 90% mocy nominalnej, gdzie ograniczenia wynikłe z bezpieczeństwa podzespołów silnika nie pozwalają na osiągnięcie niskiej emisji tlenków azotu. Niektóre punkty w poszczególnych charakterystykach się pokrywają, co wynika z braku możliwości osiągnięcia lepszych parametrów sprawnościowych lub emisyjnych na drodze alternatywnego sterowania procesem spalania. W przypadku wyższych obciążeń i sterowaniu silnikiem z kryterium minimalnej emisji NOx, czynnikami najmocniej ograniczającymi okno regulacji było wypadanie zapłonów spotęgowane przez inertny dwutlenek węgla oraz wysoka temperatura spalin przed turbosprężarką

4.1.2 Wyniki pomiarów z gazem wysokokalorycznym (GZ50 + C3H8)

Badania przy zasilaniu gazem wysokokalorycznym, realizowane były z użyciem paliwa będącego mieszaniną gazu ziemnego oraz propanu technicznego w proporcjach ~75% GZ50 i ~25% CO_2 (wartość opałowa 50,1 MJ/Nm3). Podobnie jak w przypadku badań z gazem niskokalorycznym, w trakcie prób występowały niewielkie zmiany składu gazu, podyktowane zmianami dynamiki przepływów przez stację mieszającą. Zmiany te oscylowały w granicach +/- 3 p.%, co może mieć nieznaczny wpływ na przebiegi poszczególnych charakterystyk przedstawionych na poniższych wykresach.





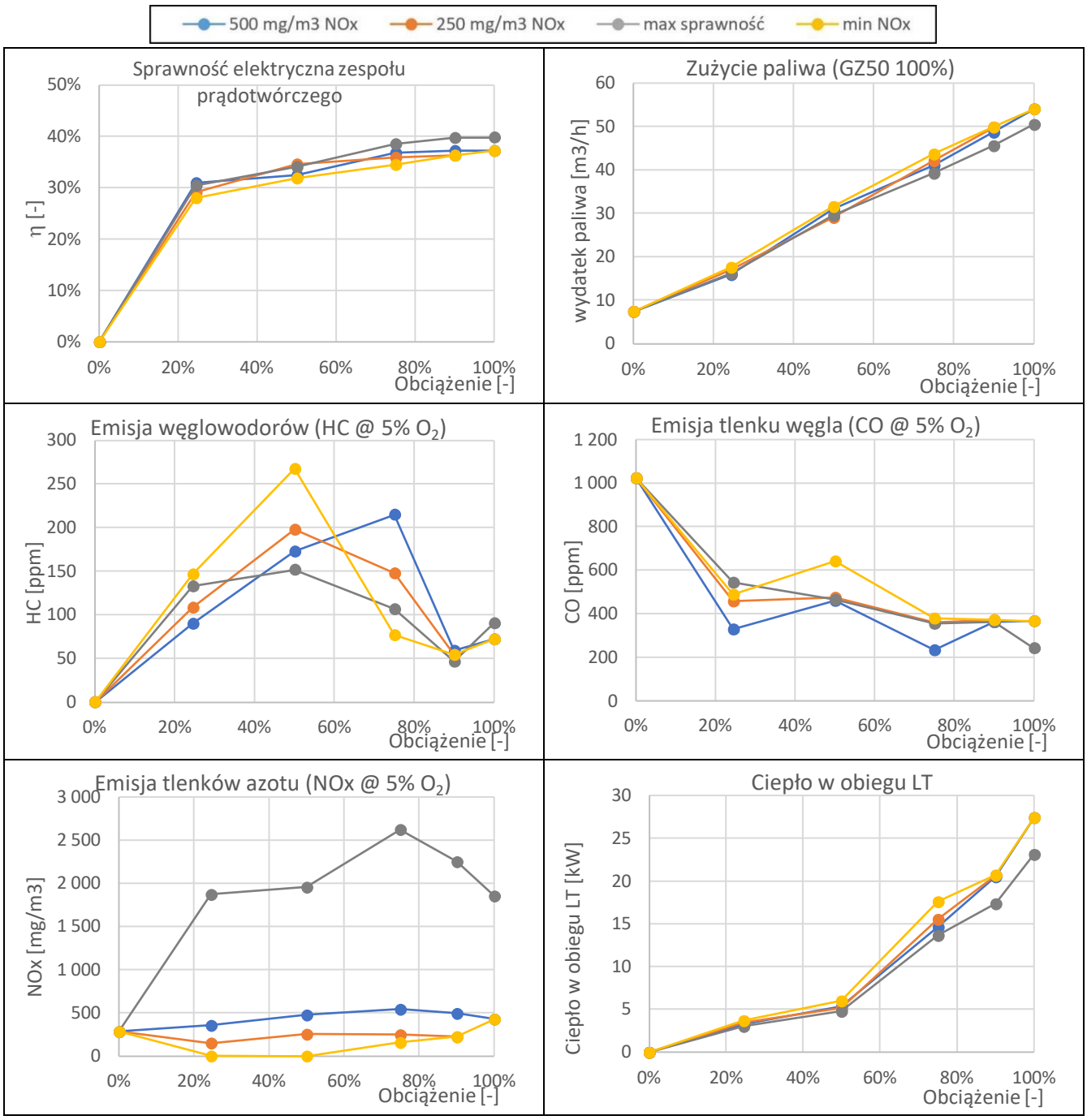
Rysunek 5. Wykresy sprawdzanych parametrów dla zasilania gazem wysokokalorycznym (~75% GZ50 + ~25% C3H8).

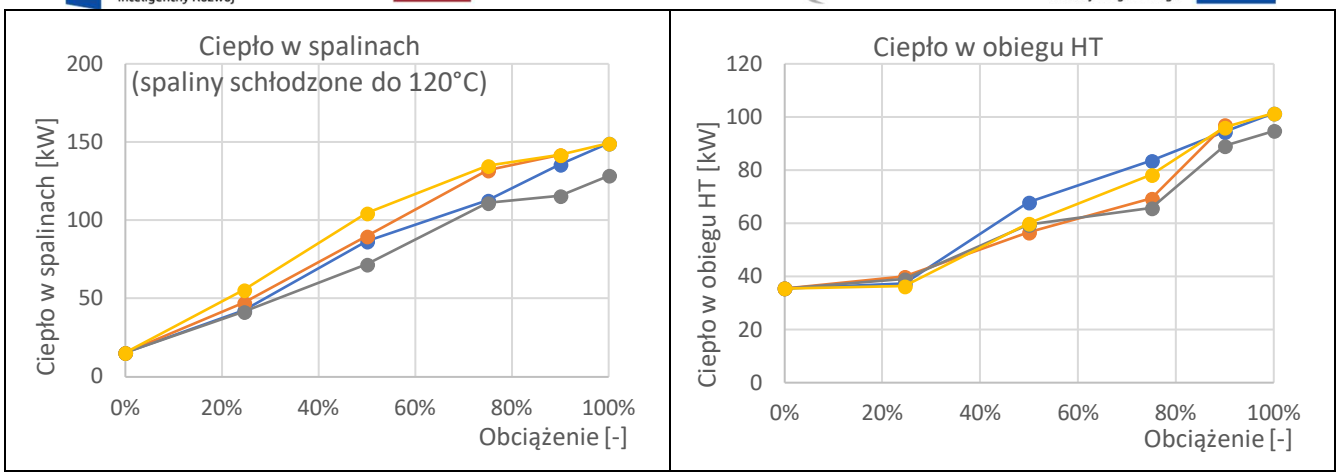
Gaz wysokokaloryczny w swoim składzie zawiera węglowodory wyższe, które mają znaczący wpływ na przebieg procesu spalania w silniku tłokowym. Każda, nawet niewielka zawartość takich węglowodorów, powoduje obniżenie liczby metanowej, charakteryzującej odporność paliwa na spalanie stukowe. Chcąc przeciwdziałać wystąpieniu anomalii spalania, należy odpowiednio skorygować sterowanie silnikiem, operując głównie współczynnikiem nadmiaru powietrza oraz kątem wyprzedzenia zapłonu. Z drugiej strony na silnik nakładane są ograniczenia emisji spalin. Te dwa aspekty powodują, że w porównaniu do zasilania silnika gazem ziemnym, znacząco zawęża się okno regulacji. Widoczne jest to szczególnie w przypadku sprawności elektrycznej zespołu, pracującego z kryterium utrzymania niskiej emisji tlenków azotu, gdy praktycznie w całym zakresie obciążenia, sprawność ta nie przekracza 30%. Porównując tę wartość do parametrów uzyskanych przy zasilaniu paliwem niskokalorycznym, bądź z pracą na czystym gazie ziemnym, widać wyraźne ograniczenie możliwości wykorzystania energii paliwa do produkcji energii mechanicznej/elektrycznej. Głównym

wnioskiem płynącym z powyższych wyników, jest wpływ niższej liczby metanowej na osiąganą maksymalną sprawność silnika. Innym rozwiązaniem tego zagadnienia byłoby zapewne zmniejszenie stopnia sprężania, jednak uwzględniając wyniki badań z II etapu ono także doprowadziłoby do spadku sprawności, dlatego zdecydowano o pozostaniu przy nominalnym stopniu sprężania.

4.1.3 Wyniki pomiarów z gazem ziemnym (100% GZ50)

Na drodze badań pracy agregatu zasilanego gazem przepływającym przez układ kondycjonowania gazu, bardzo interesującym jest zagadnienie, jaki wpływ ma sam ten układ na pracę agregatu. Z tego powodu przeprowadzono badania z wykorzystaniem gazu ziemnego. Gaz zanieczyszczano związkami siarki, testując skuteczność działania układu oczyszczania w długim okresie czasu. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach poniżej.





Rysunek 6. Wykresy sprawdzanych parametrów dla zasilania gazem GZ50.

Na drodze badań porównawczych z i bez układu kondycjonowania gazu, osiągnięto wyniki wskazujące na brak negatywnego wpływu układu oczyszczającego na uzyskiwane parametry energetyczne i emisyjne agregatu co jest kolejnym przyczynkiem do wyciągnięcia wniosku, że przyjęta na etapie projektowym konfiguracja instalacji jako całości jak i poszczególnych jej elementów jest prawidłowa i pozwala osiągnąć zamierzone rezultaty.

4.2. Określenie wydajności energetycznej całej instalacji.

Zapotrzebowanie energii elektrycznej całej instalacji determinuje ilość energii dostępnej netto tzn. możliwą do wykorzystania przez użytkownika. Ilość energii netto wpływa wprost na potencjalną opłacalność inwestycji w której byłyby komercyjnie wykorzystane elementy instalacji. To zużycie wpływa na całkowitą sprawność instalacji.
Instalacja oczyszczania gazu oraz potrzeby własne zespołu kontenerowego mogą być zasilane zarówno z zewnętrznego źródła jak i bezpośrednio z agregatu, zasilanego oczyszczonym gazem.

Sumaryczna moc zainstalowana wszystkich odbiorników energii elektrycznej, wchodzących w skład układu sterowania to 54,5 kW Taka moc byłaby pobierana przez instalację w przypadku pracy wszystkich odbiorników jednocześnie, z maksymalną mocą. Stanowi to 27,3% mocy testowanego agregatu prądotwórczego, co oznacza, że 72,7% energii produkowanej przez agregat pozostałoby do wykorzystania dla końcowego odbiorcy. Ze względu na charakter pracy instalacji nie wszystkie odbiorniki pracują jednocześnie. Dodatkowo moc pobierana jest zależna od punktu pracy i tak na przykład dla układu oczyszczania zależy od różnicy ciśnień między stroną ssawną a tłoczną (pobór przez pompy) oraz od kaloryczności paliwa (gazów mniej kalorycznych musi przez układ płynąć odpowiednio więcej dla uzyskania odpowiedniej mocy agregatu), a dla agregatu kontenerowego głównie od temperatury zewnętrznej.

Pomiary wykazały pobór mocy na poziomie 28,3kW przez układ oczyszczania przy równoczesnym poborze 4,6 kW przez zabudowę kontenerową. Pomiary realizowano podczas pracy agregatu pod obciążeniem 200kW, czyli ilość łączna pobieranej energii elektrycznej stanowi 16,15% mocy produkowanej przez agregat. Pomiary wykonano trójfazowym analizatorem jakości energii Fluke 435. Uwzględniając docelowy produkt projektu jakim ma być agregat dużej mocy przeanalizowano potencjalny pobór mocy dla agregatu 1 MW. Zapotrzebowanie na energię elektryczną nie rośnie proporcjonalnie do wydajności instalacji. W tabeli 2 zaprezentowano zużycie energii dla gazów nisko i wysokokalorycznych dla silnika 200 kW i prognozowane zużycie dla silnika 1000kW.

Tabela 2. Zmierzona i przewidywana wydajność instalacji w zakresie energii elektrycznej.

Moc agregatu [kW]	200	200	1000	1000
Energia w paliwie [MJ/Nm^3]	36	18	36	18
Energia w paliwie [kWh/Nm^3]	10	5	10	5
Zużycie w [Nm^3/h]	50	100	250	500
Zapotrzebowanie na energię elektryczną [kW]	28,3	34,3	79,9	125,9
Procent energii produkowanej przez agregat, zużywanej na potrzeby instalacji [%]	16,15	17,15	7,99	12,59

Z powyższej tabeli wynika, że wraz ze wzrostem mocy agregatu, sprawność instalacji (rozumiana jako stosunek użytecznej energii uzyskanej ze spalania gazu do energii w paliwie dostarczonej do układu) wzrasta znacząco.
Naturalnym jest, że sprawność maleje wraz ze spadkiem kaloryczności gazu. Z tabeli widać wyraźnie, że niezależnie od jakości paliwa, sprawność wzrasta wraz z mocą agregatu zasilanego przez stację kondycjonowania gazu.

4.3. Badanie zdolności instalacji do przyjmowania zmiennych obciążeń.

Sprawdzono zdolność całej instalacji do przyjmowania dynamicznych zmian obciążenia. Zdolność przyjmowania dużych zmian obciążenia przez agregat została już potwierdzona w etapie I i II i nie było uzasadnienia powtarzać tych badań. Obserwacja pracy agregatu podczas testów 4 etapu potwierdziła to założenie

Zmiana obciążenia agregatu zmienia pobór gazu co przekłada się na zmiany ciśnienia w buforach ciśnieniowych sekcji S700. Najistotniejszym elementem testów było zatem sprawdzenie odpowiedzi buforów zbiornikowych zainstalowanych w sekcji S700 układu oczyszczania. Badania przeprowadzono poprzez zadawanie skokowych zmian obciążenia dla agregatu zasilanego przez układ oczyszczania.
Sposób odpowiedzi układu jest ważny z dwóch głównych powodów:
- w przypadku wystąpienia dużych spadków ciśnienia na wyjściu przy wzroście obciążenia mogłoby powodować zaburzenia pracy agregatu w wyniku niedostatecznej ilości gazu doprowadzanego do silnika (duży spadek ciśnienia oznacza de facto małą ilość gazu)
- wystąpienie dużych wzrostów ciśnienia przy spadku obciążenia może skrajnie prowadzić do konieczności przekierowania części gazu na pochodnię co de facto powoduje straty energetyczne (oczyszczony gaz jest spalany bezproduktywnie)

Nieprawidłowo działająca regulacja ciśnienia w buforach sekcji S700 mogłaby ponadto prowadzić do zaburzenia procesów oczyszczania w poprzedzających ją sekcjach szczególnie w głównej sekcji oczyszczającej S100. Zachodzące procesy nie są procesami szybkozmiennymi i wprowadzanie w nie istotnych zaburzeń mogłoby się przekładać na skuteczność procesu oczyszczania.

Układ kondycjonowania gazu został przetestowany pod kątem reakcji na skokowe zmiany obciążenia. Gwałtowny skok obciążenia, a co za tym idzie skok zużycia gazu powodował nieznaczne zmiany ciśnienia w zbiorniku buforowym V704. Układ sterowania prawidłowo reagował na zmiany ciśnienia natychmiast stabilizując je do zadanej wartości. Taka reakcja pozwala na prawidłową pracę silnika zasilanego gazem oczyszczanym w testowanej instalacji, w przypadku zmiennego obciążenia (np. praca wyspowa). Wyniki testów przedstawiono tabeli 3

Tabela 3. Wyniki testów w czasie prób przyjmowania skoków obciążenia

	Skok 1	Skok 2	Skok 3	Skok 4	Skok 5	Skok 6
Skok obciążenia [kW]	0→50	50→100	100→200	200→150	200→100	200→0
Ciśnienie w sekcji V703 [bar(a)]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Ciśnienie w sekcji V704 [bar(a)]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Zmiana ciśnienia w buforze [bar]	-0,02	-0,02	-0,03	+0,02	+0,03	+0,06
Czas odbudowania ciśnienia [s]	3	4	6	2	4	6

W czasie testów nie odnotowano zaburzeń ciśnienia w sekcji S100 co świadczy o braku możliwości wpływu testowanych zmian na przebieg procesu oczyszczania co jest bardzo istotną informacją potwierdzającą poprawność działania całej automatyki układu i doboru wielkości elementów.

4.4. Badanie efektywności oczyszczania z zanieczyszczeń

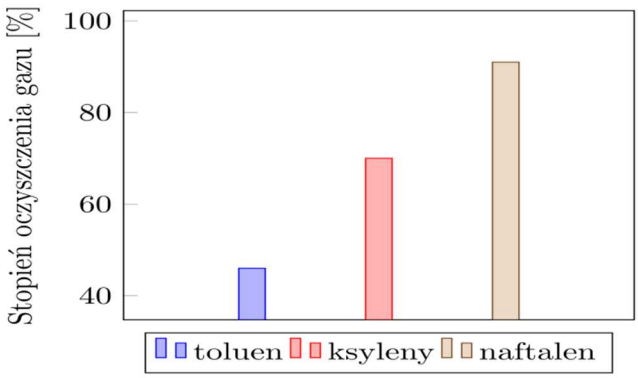
W czasie testów kompletnej instalacji wprowadzano do gazu zasilającego zaplanowane zanieczyszczenia.

a. Do gazu niskokalorycznego wprowadzano mieszaninę węglowodorów symulujących lekkie i średnie smółki. Użyto mieszaniny toluenu, ksylenów i naftalenu w proporcjach objętościowych 65:13:1 Zanieczyszczenia lekkimi i średnimi smółkami występują np. w gazach ze zgazowania. Zawartość zanieczyszczeń w gazie wynosiła ok. 4500 ppm
b. Do gazu wysokokalorycznego wprowadzano frakcję węglowodorową C6-10 uzyskaną z destylacji różniczkowej benzyny. Obecność węglowodorów C6-10 w zbyt dużych ilościach tj. powodujących kondensację w ścieżce gazowej silnika jest szkodliwa. Węglowodory takie występują w wielu gazach flarowych, szczególnie związanych z przetwórstwem i wydobyciem ropy naftowej. Zawartość zanieczyszczenia w gazie wynosiła ok. 2% obj.
c. Do gazu ziemnego wprowadzano siarkę w postaci H2S. Siarkowodór wprowadzano poprzez układ mieszania gazów (etap I i II). Zawartość siarkowodoru w gazie była utrzymywana na poziomie ok. 1000 ppm

Do wprowadzania zanieczyszczeń węglowodorowych użyto układu wykonanego w III etapie bazującego na wtrysku cieczy zanieczyszczającej.

Badania potwierdziły zdolność instalacji do oczyszczania gazu z wprowadzanych zanieczyszczeń.

a. Gaz niskokaloryczny (GZ50+CO_2).
Podczas wielogodzinnych testów gaz był skutecznie oczyszczany ze smółek lekkich i średnich symulowanych mieszaniną toluenu, ksylenów i naftalenu. Stopień oczyszczenia gazu z toluenu wyniósł 46%, ksylenów 70%, natomiast naftalenu 91%.



Rysunek 8. Stopień oczyszczania gazu z symulowanych smółek podczas testów.

b. Gaz wysokokaloryczny (GZ50+C3H8).
Długoterminowe badania potwierdziły zdolność instalacji do oczyszczania gazu z węglowodorów C_{6-10}. Analiza chromatograficzna wykazała, że na wyjściu z instalacji redukcja wyniosła 21%, w tym redukcje frakcji C_6, C_{7-8} i C_{9-10} wynosiły odpowiednio 1%, 12% i 83%. Uzyskany stopień czystości gazu na wyjściu z instalacji był porównywalny z czystością odpowiednich gazów na wyjściu z instalacji w toku badań ujętych w raporcie 3. Nie obserwowano wpływu obecności szerszej frakcji na stopień oczyszczenia gazu z węglowodorów o danej liczbie atomów węgla w cząsteczce.

c. Gaz ziemny standardowy (GZ50).
Długoterminowe badania potwierdziły zdolność instalacji do oczyszczania gazu z siarkowodoru. Analiza chromatograficzna wykazała, że na wyjściu z instalacji stężenie siarkowodoru waha się w zakresie 50÷75 ppm (średnio 60 ppm). Średnia wydajność usuwania siarkowodoru wynosi 94%.

4.5 Zagadnienia różne

Wykonana analiza silnikowego oleju smarnego wykazała poprawny stan oleju co świadczy o także o poprawnym sterowaniu silnikiem. Lekko podwyższone zawartości miedzi i żelaza są pozostałością w układzie smarnym po kilkukrotnych wymianach panewek w czasie przekładania tłoków w poprzednich etapach.

5. WNIOSKI

Przedstawione w niniejszym opracowaniu wyniki badań oraz obserwacje poczynione w ich trakcie pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przyjęta na etapie projektowym konfiguracja instalacji jako całości jak i poszczególnych jej elementów jest prawidłowa i pozwala osiągnąć zamierzone rezultaty. Wielogodzinne testy potwierdziły zdolność instalacji zbudowanej z układu oczyszczania i kondycjonowania gazu oraz kontenerowego agregatu napędzanego silnikiem wyposażonym w opracowany w projekcie układ sterowania do efektywnego działania.
2. Zdolność całej instalacji do przyjmowania dynamicznych zmian obciążenia okazała się prawidłowa. Pojemność i sposób sterowania ciśnieniami wewnątrz zaprojektowanych i wykonanych zbiorników buforowych sekcji S700 gwarantują poprawną pracę niezależnie od zmian obciążenia.
3. Długoterminowe badania potwierdziły zdolność instalacji do usuwania smółek, węglowodorów C6-10 oraz siarkowodoru. Skuteczność oczyszczania wyniosła odpowiednio 51%, 21% i 94%.
4. Analiza badanych parametrów gazu w połączeniu z doświadczeniem eksploatacyjnym Beneficjenta wskazuje, że dla całkowitej pewności w zakresie wyeliminowania jakiejkolwiek kondensacji cieczy w gazie należy rozważyć układ podgrzewania gazu bezpośrednio przed ścieżką gazową w kontenerze szczególnie w okresie zimowym dla długich połączeń pomiędzy sekcją końcową S700 a agregatem. Z podobnych przesłanek należy rozważyć wykonanie izolacji termicznej zbiorników buforowych sekcji S700.
5. Potwierdziło się prawidłowe działanie układu sterowania i zasilania silnika agregatu opracowane w poprzednich etapach. Testy optymalizacyjno-regulacyjne wykazały bardzo duże możliwości regulacyjne układu niezależnie od stosowanego paliwa – zrealizowano 4 kryteria regulacji silnika na każdym z założonych paliw. Potwierdzona tym samym została wszechstronność układu sterowania i zasilania silnika do stosowania różnorodnych gazów.
6. Dzięki umiarkowanym ilościom energii elektrycznej pobieranej do działania instalacji wydajność energetyczna kompletnej instalacji, szczególnie uwzględniając proces oczyszczania jest stosunkowo wysoka i wynosi ponad 80% dla mocy nominalnej agregatu 200 kWe. Wydajność energetyczna całej instalacji dla agregatu o mocy 1 MW powinna być wyższa i oscylować w okolicach 90%. Jako wydajność zdefiniowano udział energii elektrycznej netto w całkowitej produkcji energii elektrycznej wygenerowanej przez agregat prądotwórczy.