

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

RAPORT Z REALIZACJI ETAPU PROJEKTU

wyciąg

NR ETAPU 3

W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INTELIGENTNY ROZWÓJ

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

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

2. CEL I ZAKRES PRACY

Zasadniczym celem zrealizowanych badań było, zgodnie z założeniami etapu III opracowanie i wykonanie modułowego, uniwersalnego układu oczyszczania i kondycjonowania gazów odpadowych oraz określenie przez pomiary, obliczenia i ich analizę, właściwości nowego układu tj. skuteczności eliminacji zanieczyszczeń najbardziej niebezpiecznych z punktu widzenia silnika agregatu prądowórczego. Zgodnie z zapisami w projekcie jako reprezentatywnych zanieczyszczeń użyto związków siarki i chloru, węglowodorów C₆₊ oraz sprawdzano skuteczność układu w zakresie stabilizacji wilgotności gazu na dopuszczalnym poziomie (brak kondensacji w układzie dolotowym).

3. PROGRAM BADAŃ

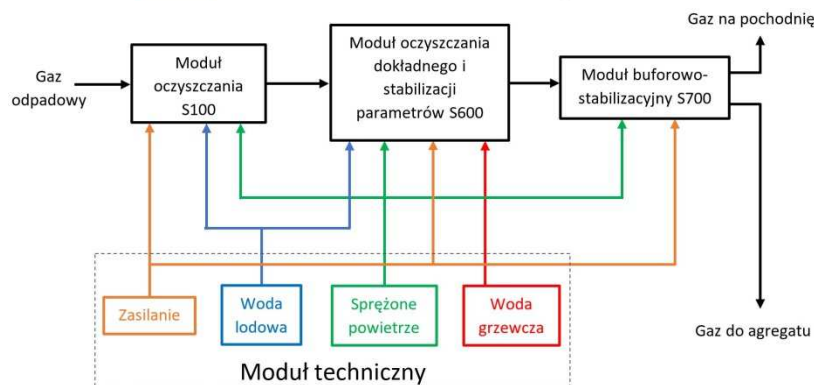
W ramach etapu III projektu badawczego zrealizowano następujący program badań:

| Lp. | Temat zadania |
|-----|---|
| 1. | <p>Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu z węglowodorów ciężkich przy różnych wydatkach gazu.</p> <p>Celem badań było określenie stopnia usunięcia węglowodorów C₆-C₁₀ z gazu oraz wpływu wartości strumienia gazu na stopień jego oczyszczenia. Modelowy gaz otrzymywano poprzez zanieczyszczanie gazu GZ-50 frakcjami węglowodorowymi C₆, C₇₋₈ oraz C₉₋₁₀.</p> <p>W każdym przypadku po każdej godzinie pracy instalacji pobierano próbki gazu do analizy chromatograficznej. Pracę instalacji kontynuowano do momentu uzyskania powtarzalnych wyników analizy. Analiza chromatograficzna obejmowała oznaczenie wybranych analitów, m.in. n-pentanu, n-heksanu, n-heptanu, n-oktanu, n-nonanu i n-dekanu.</p> |
| 2. | <p>Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu ze związków siarki przy różnych wydatkach gazu.</p> <p>Celem badań było określenie stopnia usunięcia H₂S z gazu przy różnych wydatkach gazu. Modelowy gaz zasilający sekcję 100 otrzymywano poprzez zanieczyszczanie gazu GZ-50 siarkowodorem z butli.</p> <p>Badania prowadzono na gazie zawierającym 2% siarkowodoru w gazie GZ-50. Całkowity strumień gazu przechodzący przez instalację wynosił 20, 40 i 60 Nm³/h. Po każdej godzinie pracy instalacji pobierano próbki gazu do analizy chromatograficznej zawartości siarkowodoru. Pracę instalacji kontynuowano do momentu uzyskania powtarzalnych wyników analizy.</p> |

| | |
|----|---|
| 3. | <p>Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu ze związków chloru.</p> <p>Celem badań było określenie stopnia usunięcia HCl z gazu. Modelowy gaz otrzymywano poprzez zanieczyszczanie gazu GZ-50 chlorowodorem wytwarzanym w trakcie prowadzenia badań zgodnie z reakcją:</p> $H_2SO_4 + NaCl \Leftrightarrow NaHSO_4 + HCl \uparrow \quad (3)$ <p>Badania skuteczności usuwania HCl prowadzono na gazie zawierającym ok. 0,3 - 0,5% chlorowodoru w gazie GZ-50. Całkowity strumień gazu przechodzący przez instalację wynosił 20 Nm³/h. Po każdym kwadransie pracy instalacji dokonywano pomiaru zawartości HCl w gazie z wykorzystaniem analizatora elektrochemicznego. Pracę instalacji kontynuowano do momentu uzyskania powtarzalnych wyników analizy.</p> |
| 4. | <p>Badanie skuteczności instalacji w stabilizowaniu zawartości wilgoci w gazie przy różnych wydatkach gazu.</p> <p>Celem badań było określenie zmienności zawartości wody w gazie wynikającej z różnej zawartości wilgoci w gazie wlotowym, z kontaktu gazu z wodnym roztworem roboczym oraz z przebiegiem procesu osuszania w sekcjach 100 i 600. Modelowy gaz zasilający sekcję 100 otrzymywano poprzez zanieczyszczanie gazu GZ-50 odparowywaną wodą.</p> <p>Badania prowadzono na gazie wlotowym zawierającym śladowe ilości oraz 4% pary wodnej w gazie GZ-50. Całkowity strumień gazu przechodzący przez instalację wynosił 20, 40 i 60 Nm³/h. Po każdej godzinie pracy instalacji pobierano próbki gazu do analizy chromatograficznej. Pracę instalacji kontynuowano do momentu uzyskania powtarzalnych wyników analizy.</p> |

4. TECHNOLOGIA OPRACOWANEGO UKŁADU.

Zgodnie z założeniami projektu III etap składał się z 2 głównych zadań. Pierwsze z nich to opracowanie uniwersalnego układu oczyszczania i kondycjonowania gazów odpadowych a drugie przeprowadzenie badań skuteczności jego działania. We współpracy z Partnerem naukowym, rozważano wiele różnych wariantów technologii oczyszczania i wynikających z tego modułów. Uwzględniając znane Beneficjentowi rodzaje zanieczyszczeń a także wspomniany w opisie projektu aspekt ekonomiczny mając na względzie maksymalną uniwersalność modułowego układu zdecydowano się na konfigurację składającą się z 3 modułów aktywnych i modułu technicznego. Uwzględniono także potwierdzone w poprzednich etapach zdolności adaptacyjne silnika wyposażonego w opracowany w projekcie układ sterowania i zasilania. Ww. 3 moduły to uniwersalny moduł oczyszczania, moduł oczyszczania dokładnego i stabilizacji parametrów gazu oraz moduł buforowo-stabilizujący. Układ zawiera także moduł techniczny zapewniający media do działania całego układu (sprężone powietrze, woda lodowa itd.). Ze względu na bardzo szerokie spektrum gazów przewidywanych do „używania” w układzie oraz oczekiwaną wysoką dokładność pomiarów składu gazów zgodnie z projektem technologicznym wykonanym przez Partnera naukowego etapu jako podstawowe urządzenie pomiarowe przyjęto chromatograf gazowy. Ogólny schemat blokowy przedstawiono na rys. nr 1.



Rysunek 1. Schemat blokowy modułowego układu oczyszczania i kondycjonowania gazu

Stanowiący główny element układu moduł oczyszczania (sekcja 100) jest przeznaczony do sprężania gazów odpadowych (flarowych) różnego pochodzenia i ich oczyszczania, w zależności od składu tych gazów, do usuwania wyższych węglowodorów, kondensatów naftowych, w przypadku obecności siarkowodoru, do jego zgrubnego usuwania, także oczyszczania gazów flarowych w rafineriach, w tym gazów zawierających olefiny, oleje, produkty oligomeryzacji i polikondensacji, oraz innych zanieczyszczeń np. związków chloru, śladowych ilości metali ciężkich, pyłów, itp.

Kolejny w układzie moduł oczyszczania dokładnego (sekcja 600) jest instalacją zbudowaną z części ciśnieniowego dokładnego oczyszczania gazu, układu redukcji ciśnienia gazu oraz części beciśnieniowego osuszania.

Do modułu buforowo-stabilizacyjnego S700 doprowadzane są strumienie gazów oczyszczonych z sekcji 600, oczyszczane w pozostałych poprzedzających sekcjach.

5. STANOWISKO BADAWCZE

Badania parametrów działania zbudowanego układu przeprowadzono w siedzibie Beneficjenta. W czasie badań użyto sieciowego gazu ziemnego GZ-50 z odpowiednio wprowadzanymi ww. zanieczyszczeniami symulując w ten sposób gazy występujące w realnych warunkach.

W badaniach wykorzystano chromatograf gazowy oraz elektrochemiczny analizator składu gazu będące częścią zbudowanego układu.

6. WYNIKI BADAŃ INSTALACJI I ICH ANALIZA

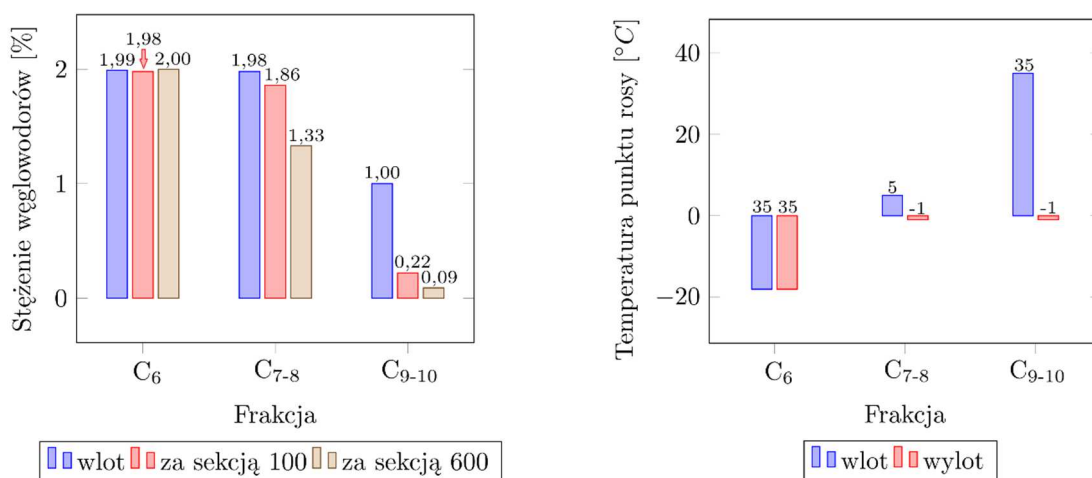
6.1. Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu z węglowodorów ciężkich przy różnych wydatkach gazu.

Zanieczyszczenia węglowodorowe wprowadzano do instalacji z wykorzystaniem układu odparowywania grzanego elektrycznie. Moc grzania sterowana była termostatem na podstawie ubytku objętości nieodparowanego wsadu węglowodorowego. Wykonano badania wpływu rodzaju frakcji zanieczyszczającej gaz GZ-50 i wartości strumienia całkowitego gazu na skuteczność jego oczyszczania.

W pierwszej części badań do gazu wprowadzano kolejno frakcje C₆, C₇₋₈ i C₉₋₁₀ w ilości odpowiednio 2%, 2% i 1% całkowitego strumienia gazu wynoszącego we wszystkich przypadkach 40 Nm³/h.

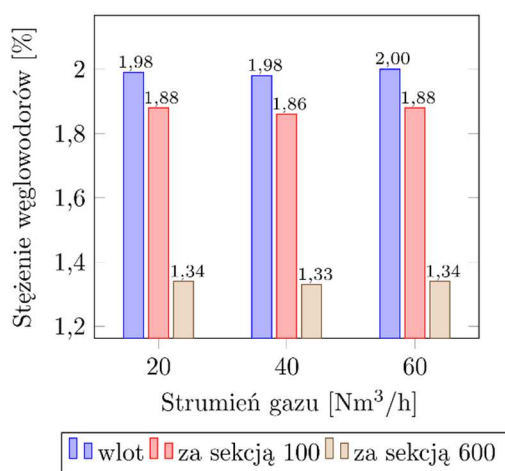
Wyniki analizy zawartości węglowodorów frakcji C₆ wskazują, że węglowodory tej frakcji nie są usuwane dla wprowadzanych zawartości procentowych. Węglowodory C₇₋₈ częściowo ulegają separacji. W sekcjach 100 i 600 wydzielane jest odpowiednio 6% i 27% węglowodorów

wchodzących do instalacji. Najwyższy stopień usunięcia węglowodorów uzyskano w przypadku frakcji C₉₋₁₀. Sumarycznie usunięto 91% węglowodorów.



Rysunek 5. Stężenia pary (po lewej) oraz odpowiednie punkty rosy (po prawej) węglowodorów frakcji C₆, C₇₋₈ i C₉₋₁₀. w różnych punktach pomiarowych przy całkowitym strumieniu gazu 40 Nm³/h.

Analiza odpowiednich punktów rosy wskazują, że instalacja obniża punkty rosy węglowodorów C₇-C₁₀. Najwyższa temperatura punktu rosy wyniosła -1°C. Na żadnym odcinku ścieżki gazowej między instalacją oczyszczania gazu i silnikiem nie występuje niższa temperatura. Usuwany jest tylko nadmiar węglowodorów stanowiących potencjalne trudności w użytkowaniu. Gaz nie jest głęboko odgazolinowany, w konsekwencji tracona jest najmniejsza możliwa ilość energii.



Rysunek 6. Stężenia węglowodorów frakcji C₇₋₈ w różnych punktach pomiarowych przy całkowitym strumieniu gazu 20, 40 i 60 Nm³/h.

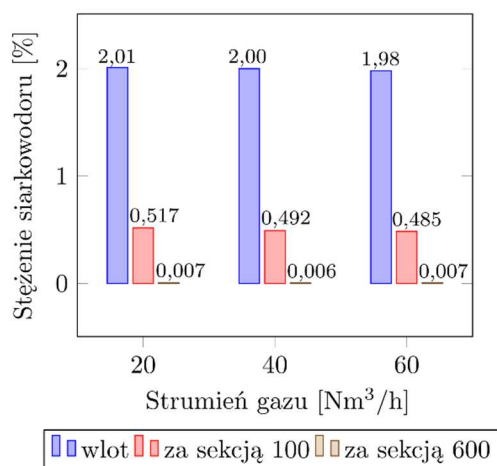
W drugiej części badań skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu z węglowodorów ciężkich określono wpływ całkowitego strumienia gazu przepływającego przez instalację na stopień jego oczyszczenia. Badania przeprowadzono dozując 2% frakcji C₇₋₈ do gazu ziemnego GZ-50 przy przepływach 20, 40 i 60 Nm³/h. Wyniki analiz chromatograficznych stężeń węglowodorów przedstawiono na rysunku 6.

Nie stwierdzono mierzalnej zmiany stężeń węglowodorów frakcji C₇₋₈ przy zmianie strumienia gazu w zakresie 20÷60 Nm³/h.

6.2. Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu ze związków siarki przy różnych wydatkach gazu.

Badania skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu z siarkowodoru prowadzono na gazie ziemnym GZ-50 zanieczyszczanym siarkowodorem z butli.

Do gazu wprowadzano 2% całkowitego strumienia gazu wynoszącego 20, 40 i 60 Nm³/h. Próbkę gazu do analizy chromatograficznej pobierano po każdej godzinie eksploatacji. Analizowano skład gazu na wejściu do instalacji, za sekcją 100 oraz za sekcją 600. Wyniki zestawiono na rysunku 7.



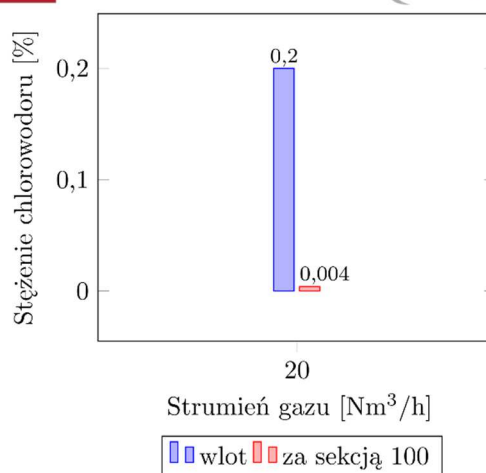
Rysunek 7. Stężenia siarkowodorów w różnych punktach pomiarowych przy całkowitym strumieniu gazu 20, 40 i 60 Nm³/h.

Usuwanie siarkowodoru w sekcji 100 ograniczało zawartość H₂S w gazie do wartości 0,485%÷0,517% z tendencją malejącą przy wzroście strumienia gazu. Usuwanie siarkowodoru w sekcji 600 pogłębiało stopień oczyszczenia do zbliżonego poziomu 60÷70 ppm. Taki stopień czystości gazu spełnia wymagania stawiane silnikom stosowanym w agregatach prądotwórczych Horus Energia.

6.3. Badanie skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu ze związków chloru.

Badania skuteczności instalacji w oczyszczaniu gazu z chlorowodoru prowadzono na gazie ziemnym GZ-50 zanieczyszczanym chlorowodorem otrzymywanym na bieżąco w wyniku wymiany jonowej anionu chlorkowego z jednoczesnym wydzieleniem gazowego HCl.

Do gazu wprowadzano 0,2% całkowitego strumienia gazu wynoszącego 20 Nm³/h. Stężenie HCl w gazie analizowano z wykorzystaniem analizatora gazu z ogniwnem elektrochemicznym do analizy stężenia HCl. Analizy wykonywano po każdym kwadransie eksploatacji. Analizowano skład gazu na wejściu do instalacji oraz za sekcją 100. Wyniki zestawiono na rysunku 8.

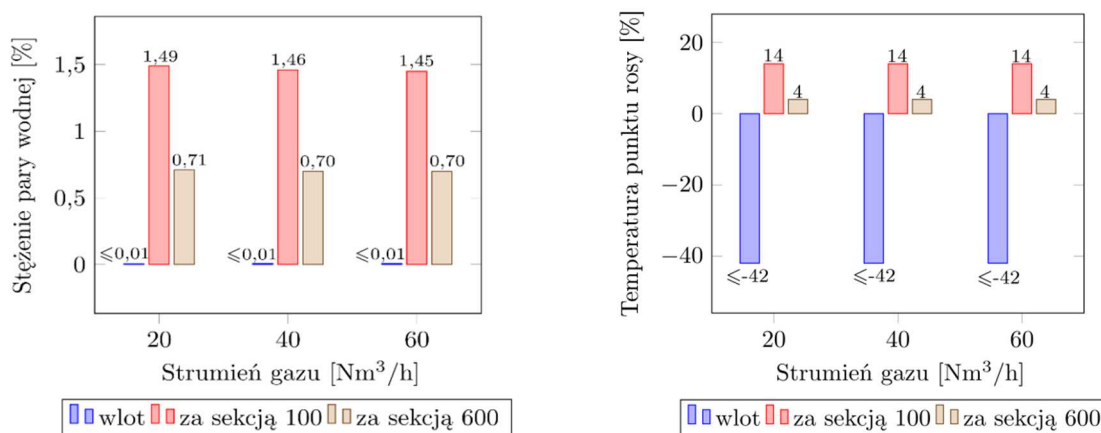


Rysunek 8. Stężenia chlorowodoru przed i za sekcją 100 przy całkowitym strumieniu gazu 20 Nm³/h.

Wyniki analizy zawartości HCl wskazują, że badana instalacja usuwała HCl redukując jego stężenie od 0,2% do 40 ppm. Osiągnięty stopień czystości gazu spełnia wymagania stawiane silnikom gazowym stosowanym w agregatach prądotwórczych Horus Energia, tj. stężenie HCl nie przekracza 60 ppm.

6.4. Badanie skuteczności instalacji w stabilizowaniu zawartości wilgoci w gazie przy różnych wydatkach gazu.

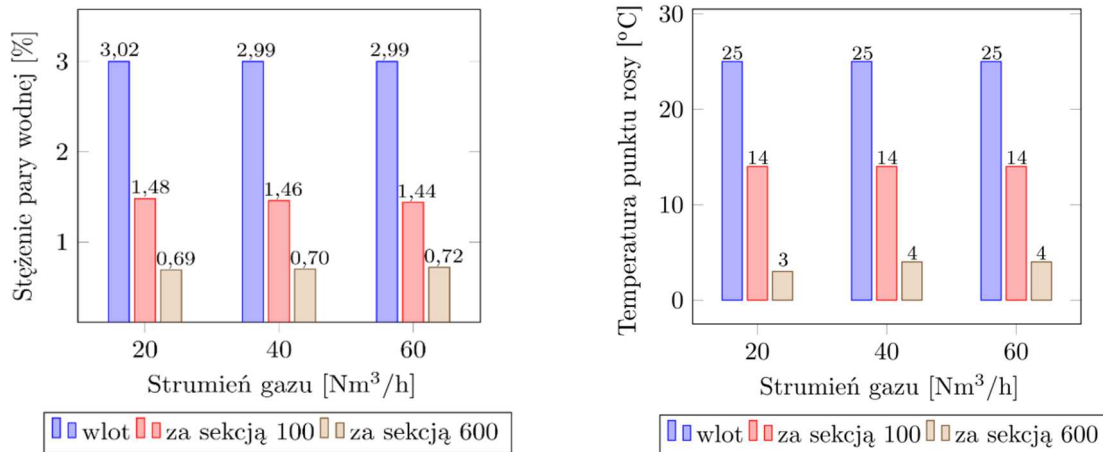
Badania skuteczności instalacji w stabilizowaniu zawartości wilgoci w gazie przy różnych wydatkach gazu prowadzono na gazie ziemnym GZ-50 oraz na gazie ziemnym GZ-50 zanieczyszczanym parą wodną. Wyniki analizy zawartości pary wodnej w pierwszym przypadku przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Stężenia pary wodnej (po lewej) oraz odpowiednie punkty rosy (po prawej) w gazie GZ-50 na wlocie do instalacji oraz za sekcjami 100 i 600.

Suchy gaz ziemny GZ-50 przepływając przez sekcję 100 nasyczał się wodnym roztworem obiegowym. Stężenie pary wodnej wzrastało od poniżej 0,01% do 1,45÷1,49%. Obserwowano bardzo delikatną tendencję obniżania zawartości wilgoci przy wzroście strumienia przepływającego gazu. Osuszanie ziębiczne w sekcji 600 obniżało zawartość wilgoci do wartości 070÷0,71% niezależnie od wartości strumienia gazu.

W drugiej części badań mierzono skuteczności instalacji w osuszaniu gazu z wysokiej zawartości wilgoci. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Stężenia pary wodnej (po lewej) oraz odpowiednie punkty rosy (po prawej) w gazie GZ-50 wzbogaconym parą wodną. Punkty pomiarowe umieszczone na wlocie do instalacji oraz za sekcjami 100 i 600.

Do gazu GZ-50 wprowadzano $3,00 \pm 0,02\%$ pary wodnej. Całkowity strumień gazu wynosił $20 \div 60 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Stwierdzono, że na wyjściu z instalacji 100 stężenie pary wodnej wyniosło $1,46 \pm 0,02\%$ z tendencją malejącą przy wzroście całkowitego strumienia gazu. Osuszanie żiębiczne w sekcji 600 obniżało zawartość pary wodnej w gazie do wartości $0,70 \pm 0,02\%$ z delikatną tendencją rosnącą. Odnosząc te wyniki do wyników badań przedstawionych na rysunku 10 zauważono, że zawartość pary wodnej w strumieniach gazu opuszczającego sekcje 100 i 600 nie zależy od zawartości pary wodnej w gazie zasilającym instalację.

Obliczeniowy punkt rosy pary wodnej gazu zasilającego instalację wynosił 25°C . Pozostałe wartości praktycznie nie różniły się od wartości zestawionych na rysunku 9. Przedstawione wyniki wskazują, że niezależnie od zawartości pary wodnej na wejściu na instalację gaz oczyszczany jest do takiej samej temperatury punktu rosy na wyjściu z obu sekcji.

7. WNIOSKI

1. Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań zbudowanej instalacji wskazują, że opracowany układ skutecznie usuwa zanieczyszczenia najczęściej występujące w gazach odpadowych.
2. Czynniki agresywne oraz ich prekursorzy, tj. związki siarki i chloru usuwane są w stopniu wystarczającym, ich zawartość w gazie na wyjściu z instalacji nie przekracza dopuszczalnych stężeń zalecanych przez producentów silników gazowych.
3. Każda z zastosowanych metod oczyszczania gazu w kolejnych sekcjach wykazywała niezależność stopnia oczyszczenia od zmiany strumienia przepływającego gazu w zakresie $20 \div 60 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Skuteczność oczyszczania całej instalacji także pozostała niezależna w zakresie ww. wydatku gazu.
4. Zanieczyszczenia węglowodorami C_{6+} są usuwane w stopniu wystarczającym, zapewniającym bezpieczne użytkowanie silnika gazowego. Jednocześnie, znikoma separacja węglowodorów C_6 oraz stosunkowo niski stopień separacji cięższych węglowodorów pozwala na optymalne energetyczne wykorzystanie oczyszczanego gazu. Usuwany jest tylko nadmiar węglowodorów stanowiących potencjalne trudności w użytkowaniu, w konsekwencji tracona jest najmniejsza możliwa ilość energii.
5. Układ stabilizuje wilgotność gazu w zakresie wymaganym od źródła zasilania silnika gazowego agregatu prądotwórczego. Zawartość pary wodnej w gazie wylotowym nie zależy od wilgotności gazu wchodzącego do instalacji.