

# Badania eksperymentalne turbiny gazowej Turbec T100 zasilanej gazem zaazotowanym

## Experimental research of a Turbec T100 gas turbine fed by nitrogen-rich gas

TOMASZ SUCHOCKI  
PIOTR LAMPART \*

Materiały z XX SKWPPWiE, Jurata 2016 r.  
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.195

Artykuł przedstawia opis stanowiska badawczego z turbiną gazową Turbec T100 (obecnie Ansaldo Energia Spa) o maksymalnej mocy 100 kW, przystosowanego do spalania paliw niskokalorycznych. Została przedstawiona koncepcja mieszalnika biogazowego, w którym powstaje mieszanka gazowa złożona z gazu wysokometanowego GZ50 – gazu miejskiego oraz dwóch gazów inertnych – dwutlenku węgla oraz azotu. W pracy przeprowadzono symulację spalania gazu zaazotowanego (5÷40% N<sub>2</sub>) w zakresie pracy turbiny wynoszącym 30÷90 kW. Wykonano analizy niektórych współczynników pracy turbozespołu, takich jak sprawność, współczynnik nadmiaru powietrza, oraz studium zmian składu spalin (CO, NO).

**SŁOWA KLUCZOWE:** turbina gazowa, gaz zaazotowany, emisja CO i NO, biogaz

*A paper provides an overview of the Turbec T100 microturbine test stand (at present Ansaldo Energia Spa.) with maximum electrical power of 100kW adopted to combustion low-caloric fuel. It was presented the concept of biogas mixing station that produces the gas mixture consisting of high-methane gas (GZ50) – gas from city grid, and two inert gases – carbon dioxide and nitrogen. The work was carried out simulations of combustion of nitrogen-rich gas (5-40% N<sub>2</sub>) with operating range of the turbine of 30-90kW. An analysis of selected operating parameters such as efficiency, fuel-air equivalence ratio and study of changes in the composition of the exhaust gases (CO, NO) were carried out.*

**KEYWORDS:** gas turbine, , nitrogen-rich gas, CO and NO emission, biogas

Rozwój cywilizacyjny powoduje ciągły wzrost zapotrzebowania na energię. To zapotrzebowanie zostaje głównie pokryte poprzez modernizację istniejących lub budowę nowych konwencjonalnych bloków energetycznych. Pomijając jednak energetykę opartą na paliwach kopalnych oraz jądrową, rozwijane są technologie związane ze źródłami odnawialnymi. Jednym z nośników energii odnawialnej jest paliwo gazowe pochodzące z różnych procesów przemysłowych, czyli tzw. biogaz. Skład biogazu zależy w głównej mierze od sposobu jego wytwarzania. W początkowej fazie badań zasymulowano mieszaninę gazu miejskiego (dawniej GZ-50) z domieszką azotu, która swoim składem obejmuje m.in. gaz zaazotowany typu Ls (dawniej GZ-35), oraz Lw (dawniej GZ-41.5) [1].

Udział turbin gazowych w tzw. miksie energetycznym w ostatnich latach stale rośnie. Jest to związane z postępowaniem technologicznym umożliwiającym podwyższenie temperatury spalin przed turbiną oraz nową konstrukcją komór spalania. Największy rozwój można zaobserwować, analizując kombinowane układy gazowo-parowe, które mają powstać w Polsce w ciągu najbliższych lat (tabl. I). Układy te wykorzystują entalpię spalin wylotowych z turbiny gazowej do wytworzenia pary w kotłach odzysknicowych na potrzeby turbin parowych.

TABLICA I. Planowane budowy układów gazowo-parowych w Polsce [2]

Lokalizacja	Moc el., MW	Inwestor
Skawina	430	CEZ
Grudziądz	S00÷S40	Energia i ESB
Głogów (Polkowice)	100	KGHM Polska Miedź
Gdańsk	400÷450	LOTOS S.A., Energa S.A. i PGNiG
Dolna Odra	2x430÷460	PGE
EC Pomorzany	240 (170 MWt)	PGE
EC Bydgoszcz	220÷270 lub 400÷450	PGE
EC Gorzów Wlkp.	100÷140	PGE
Puławy	800÷840	ZA Puławy i PGE
Włocławek	420÷490	PKN Orlen
Błachownia (Kędzierzyn Koźle)	800÷910	Tauron i KGHM Polska Miedź
Katowice	135 (90 MWt)	Tauron
Stalowa Wola	400÷440 (240 MWt)	Tauron i PGNiG
Częstochowa	ok. 1000	RWE

Oprócz dużych zdolności regulacyjnych, wysokiej sprawności konwersji energii (ponad 90% w kogeneracji) charakteryzują się niską emisyjnością, elastycznością w stosunku do stosowanego paliwa oraz wysoką skalowalnością mocy zainstalowanej.

Turbiny gazowe możemy podzielić na 3 główne typy w zależności od ilości produkowanej energii:

- turbiny przemysłowe i lotniczopochodne o mocy powyżej 1000 kW,
- mini turbiny o zakresie mocy 500÷1000 kW,
- mikro-turbiny gazowe o mocy poniżej 500 kW [3].

Na rynku dostępne są mikro-turbiny gazowe o mocy od 30 do 333 kW, co zaprezentowano w tabl. II.

TABLICA II. Parametry mikro-turbin gazowych [1]

Producent	Model	Moc el., kW	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej, %	Temperatura spalin, °C	Strumień spalin, kg/s
Capstone Turbine Corporation	C30,	30	26	276	0,31
	C60,	60	28	305	0,48
	C200	200	33	280	1,3
Ansaldo Energia SpA	T100	100	30	270	0,8
Bowmann Power System	TG80	80	30	280	–
Ingersoll Rand Energy System	MT250	250	30	242	2,13
Elliot Energy System	TA-100	100	29	279	–
Honeywell Power System	Parallon 75	75	27,5	–	–
Flex Energy	GT250S	250	30	265	2,13
	GT333S	333	33	256	2,3

\* Mgr inż. Tomasz Suchocki (tsuchocki@imp.gda.pl); dr hab. inż. Piotr Lampart, Prof. IMP PAN, (lampart@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Energetyki Ciepłej, Zakład Turbin

Spośród przedstawionych w tabl. II obecnie dostępne są produkty firm Ansaldo Energia SpA, Capstone Turbine Corporation oraz Flex Energy. Firmy te mają także w swojej ofercie turbiny przystosowane do spalania biogazów o niskiej wartości kalorycznej [2÷4].

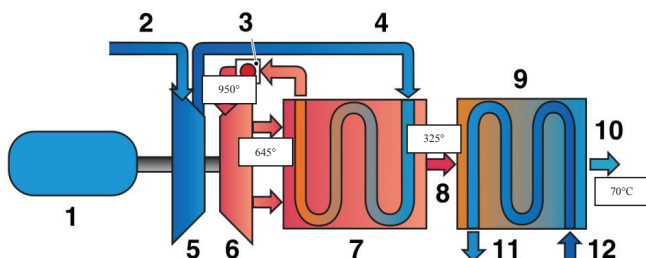
### Stanowisko badawcze

Przedmiotem analizy jest zespół turbiny gazowej Turbec T100 o mocy 100 kW (obecnie Ansaldo Energia SpA), której szczegółowe parametry techniczne zestawiono w tabl. III.

TABLICA III. Specyfikacja techniczna turbiny biogazowej Turbec T100 [2]

Rodzaj gazu	Biogaz
Wartość opałowa paliwa (LHV), MJ/m <sup>3</sup>	>14,5
Temperatura wody doprowadzonej, °C	50
Temperatura wody odprowadzonej, °C	70
Ciśnienie gazu	Minimalne ciśnienie źródła gazu (0,02±1,0 bar)
Moc czynna, kW	100 (±3)
Sprawność elektryczna, %	30 (±1)
Sprawność całkowita, %	80 (±1)
Moc cieplna, kW	165 (±5)
Moc w paliwie, kW	333
Strumień masowy spalin, kg/s	0,8
Temperatura spalin, °C	70
Hałas, dB (lm)	70
Objętościowa emisja spalin (15% tlenu, 100% obciążenia, 15 °C temp. pow. zew.), ppm	NO <sub>x</sub> < 15 CO < 15

Zasada działania turbiny opiera się na obiegu Braytona-Joule'a. Zastosowano regenerację ciepła poprzez podgrzewanie sprężonego powietrza przed komorą spalania gorącymi spalinami wychodzącymi z turbiny. Dla dodatkowego wzrostu sprawności układ turbiny gazowej został rozbudowany o wymiennik ciepła spaliny-woda, służący do podgrzewania wody w układach ciepłowniczych lub innych procesach technologicznych. Całkowita sprawność powyższego układu sięga 80%, przy 30% sprawności elektrycznej. Schemat obiegu oraz wartości temperatury w podstawowych punktach przedstawiono na rys. 1.



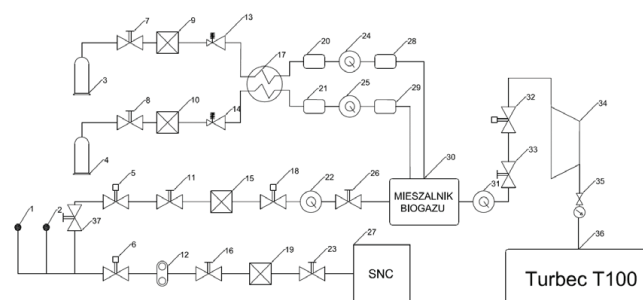
Rys. 1. Schemat Turbec T100: 1 – generator, 2 – wlot powietrza, 3 – komora spalania, 4 – rurociąg łączący kompresor z rekuperatorem, 5 – kompresor, 6 – turbina, 7 – rekuperator, 8 – spaliny, 9 – wymiennik ciepła spaliny/woda, 10 – wylot spalin, 11 – wylot wody [2]

W prezentowanych zakresach mocy turbiny gazowe są główną alternatywą dla silników spalinowych. W porównaniu z tą technologią mikroinstalacje gazowe charakteryzują się prostszą budową, mniejszą liczbą części mechanicznych oraz brakiem oscylacji sił masowych. Dodatkowym atutem są niższe koszty obsługi i emisji gazów (10x mniejsza emisja gazów cieplarnianych) [1, 5].

Turbina zasilana jest ze stacji mieszania gazów technicznych. Instalacja realizuje procedurę generowania mieszanin gazowych poprzez łączenie gazów technicznych (dwutlenku węgla, azotu) gromadzonych w wiązkach butlowych oraz gazu ziemnego pobieranego z sieci, na drodze wtryskiwania oraz mieszania ich w przestrzeni roboczej mieszalnika.

W zależności od udziałów poszczególnych substratów gotowa mieszanka paliwowa może się charakteryzować zmienną wartością opałową, regulując natężenie przepływu wymagane w pracy pod chwilowym obciążeniem.

Układ zasilania można podzielić na trzy zintegrowane sekcje. Pierwsza, obejmująca butle z gazami, oraz druga, w skład której wchodzi podgrzewacz, mieszalnik oraz armatura z urządzeniami sterująco-pomiarowymi, znajdują się na zewnątrz budynku w bezpośrednim jego sąsiedztwie. Trzecia część znajduje się w hali i stanowi przestrzeń dla turbiny i kompresora biogazu oraz aparaturę monitorująco-sterującą. Schemat połączeń poszczególnych elementów instalacji został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat instalacji biogazowej zasilającej turbinę Turbec T100. 1÷2 – linia gazowa GZ50 zasilająca inne instalacje, 3÷4 – butle gazowe – dwutlenek węgla, azot, 5÷8, 11, 13÷14, 16, 18, 23, 26, 32÷33, 37 – zawory ręczne, ZSZ, elektrozwory, 9÷10, 15, 19 – filtry gazów, 20÷21, 28÷29 – zbiorniki buforowe, 22, 24÷25, 31 – przepływomierze gazu, 17 – podgrzewacz gazu, 30 – mieszalnik biogazowy, 27 – stacja niskiego ciśnienia GZ50, 34 – sprężarka biogazu ADICOMP, 35 – zawór iglicowy, 36 – Turbec T100

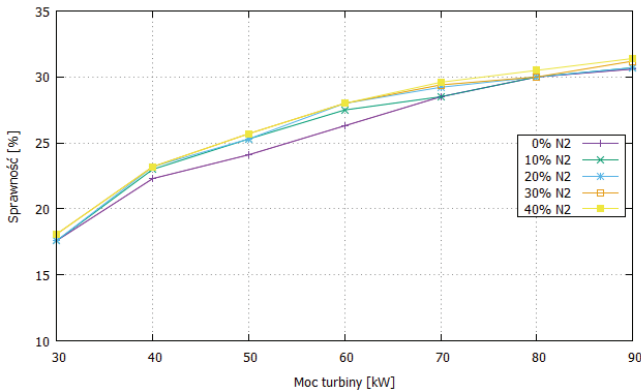
### Metodyka badań

Badania zostały przeprowadzone dla zakresu mocy turbiny od 30 do 90 kW. Zastosowano domieszkę azotu technicznego na drodze wtrysku do gazu dostarczanego z sieci miejskiej. Wartość opałową gazu miejskiego przyjęto na poziomie 36,3 MJ/m<sup>3</sup>, natomiast dla mieszaniny została przedstawiona w [7]. Substraty zostały dobrane objętościowo, przy czym ilość azotu zwiększała się o 5% całkowitej ilości biogazu. Wartość maksymalna została ograniczona pracą turbozespołu. Dla pełnego zakresu pracy turbiny przeprowadzono analizę składu spalin obejmującą monitorowanie tlenu azotu, tlenu węgla oraz współczynnika nadmiaru powietrza.

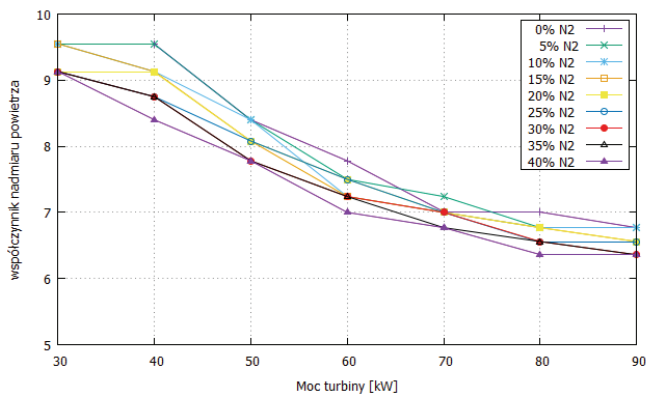
TABLICA IV. Wartość opałowa paliwa w zależności od udziału objętościowego azotu

Zawartość N <sub>2</sub> , %	Wartość opałowa, MJ/m <sup>3</sup>
0	36,36
5	34,542
10	32,724
15	30,906
20	29,088
25	27,27
30	25,452
35	23,634
40	21,816

## Wyniki i ocena rezultatów badań



Rys. 3. Wykres sprawności w funkcji mocy turbozespołu

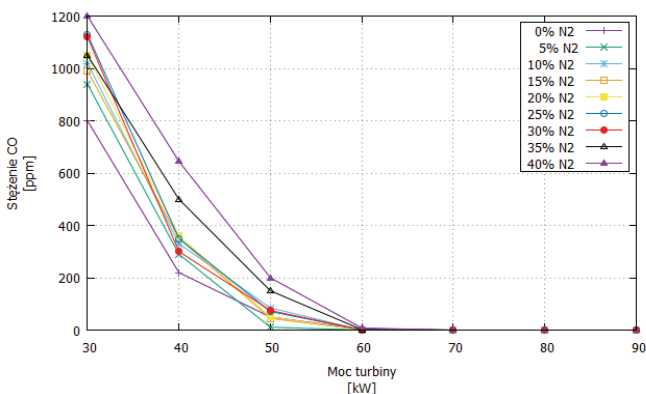


Rys. 4. Wykres współczynnika nadmiaru powietrza w funkcji mocy turbozespołu

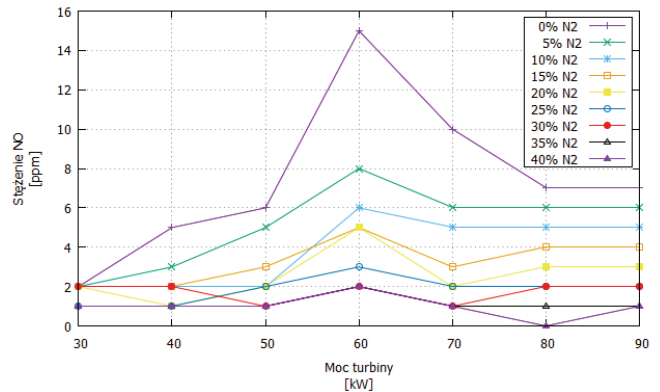
Wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów zależności parametrów turbiny oraz emisji dla mocy 30÷90 kW – rys. 3÷6. Pomiary były wykonywane dla temperatury 15 °C, dla której teoretyczna sprawność elektryczna powinna być zbliżona do znamionowej [1].

Sprawność osiągnięta podczas próby na stanowisku badawczym pokrywa się ze sprawnością zagwarantowaną przez firmę Turbec SpA [2]. Istotną informacją jest natomiast fakt wzrostu sprawności dla biogazu o wyższej wartości gazu inertnego – w tym przypadku azotu.

Sugeruje to, iż dla biogazu uzyskujemy stabilniejszą pracę komory spalania, co przekłada się na mniejsze spalanie mieszanki paliwowej. Potwierdzają się założenia producenta urządzenia, wg których urządzenie będzie działać stabilniej na paliwie o niższej wartości opałowej niż dla czystego paliwa na bazie metanu – uwarunkowuje to rozkład powietrza w przestrzeni roboczej komory spalania.



Rys. 5. Wykres emisji CO w funkcji mocy turbozespołu



Rys. 6. Wykres emisji NO w funkcji mocy turbozespołu

Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  jest typowy dla małych układów z turbiną gazową i podczas badania wyniósł od 9,5 do 6,4. Wartości osiągniętej emisji przedstawione na rys. 5÷6, są zgodne z przekazanymi przez producenta (dla pełnego obciążenia) [2]. Zależność tlenu azotu oraz tlenu węgla jest ściśle związane z temperaturą spalania w pierwotnej strefie komory spalania. Dla niskich wartości uzyskujemy wysokie stężenie CO i niskie NO, natomiast dla wysokiej temperatury jest odwrotnie. Wysokie stężenie tlenu węgla dla mocy 30 kW jest największe, co sugeruje wysoką temperaturę spalania w początkowej części komory spalania [2].

Wartości stężeń spadają wraz z dodatkiem azotu, co powinno przekładać się na osiągnięcie niższej temperatury i zwiększonej żywotności elementów najbardziej narażonych na wysoką temperaturę. Badania przewidywały pracę urządzenia z minimalną wartością opałową gwarantującą stabilną pracę urządzenia, równą 14,5 MJ/m<sup>3</sup> zgodnie z [2]. Niestety ze względu na skoki mocy, brak stabilnej pracy i awaryjne wyłączenie turbiny udało się pracować z wartością opałową wynoszącą minimalnie 22 MJ/m<sup>3</sup>, odpowiadającą 40% azotu w mieszaninie.

## Podsumowanie

W pracy przeprowadzono badania eksperymentalne spalania gazu zaazotowanego w mikroturbinie biogazowej Turbec T100. Podczas badań osiągnięto maksymalną sprawność 31,5 %, dla mocy 90 kW<sub>e</sub> przy zawartości azotu równej 40% całkowitego składu mieszaniny gazu. Wraz ze wzrostem zawartości azotu w paliwie rosła sprawność elektryczna od 0,5 do 2% w stosunku do badań z czystym gazem sieciowym. Minimalna wartość opałowa podczas badania wyniosła w przybliżeniu 22 MJ/m<sup>3</sup>. Zawartość tlenków azotu oraz tlenu węgla zbadana za pomocą analizatora spalin pokrywa się z danymi dostarczonymi przez producenta – poniżej 25 ppm.

W dalszej pracy przewidziane są badania spalania innego składu mieszanki paliwowej zawierającej dwutlenek węgla i azot.

## LITERATURA

1. www.pgnig.pl.
2. Kleszcz T. *Analiza porównawcza obiegów cieplnych elektrowni gazowo-parowych*, 2012.
3. Lepczyński S, Chmielniak T. *Turbiny gazowe w instalacjach zasilanych biogazem*, Gdańsk: Wydawnictwa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, 2015.
4. Ansaldo Energi, AE-T100B Micro Turbine Biogas. Genova.
5. www.flexenergy.com.
6. www.capstoneturbine.com.
7. Bohn D. *Micro Gas Turbine and Fuel Cell – „A Hybrid Energy Conversion System with High Potential.”* (2005):1÷46.
8. No D. *Maintenance Manual Turbec T100 Turbec T100*.
9. Głowacki P, Szczeciński S. „Turbinowy silnik odrzutowy jako źródło zagrożeń ekologicznych”. *Pr Inst Lotnictwa*. 2011; 213: 252÷257. ■