

Jędrzej BYLKA, Tomasz M. MRÓZ

INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

OCENA EGZERGETYCZNA KOMUNALNYCH SYSTEMÓW ZAOPATRZENIA W WODĘ

TEXERGY EVALUATION OF MUNICIPAL WATER SUPPLY SYSTEMS

Energy consumption has significant impact on evaluation of municipal water supply systems. Most of currently used criteria (indicators) of energy assessment have been created based on the first law of thermodynamics taking into account the flow of energy in terms of quantity only.

The article proposes a new evaluation index for municipal water supply systems based on exergy analysis. Exergy analysis takes into account the First (nothing disappears) and the Second Law of Thermodynamics (everything dissipates).

1. Wprowadzenie

W procesie wydobywania, uzdatniania oraz transportu cieczy w komunalnych systemach zaopatrzenia w wodę konieczne jest dostarczenie niezbędnej ilości energii, potrzebnej do zajęcia przemian fizycznych oraz chemicznych. Potocznie, twierdzi się iż energia ta jest zużywana w celu przeprowadzania procesów niezbędnych do spełnienia wymagań systemu - dostarczenia wody pod odpowiednim ciśnieniem i w odpowiedniej jakości. Z punktu widzenia fizyki, sformułowanie "zużycie energii" nie jest logicznie poprawne [1]. Energia jest niezniszczalna, w procesie zaopatrzenia w wodę nie "zużywa się energii" lecz jej zdolność do przemiany w inne postaci (np. zdolność przemiany energii elektrycznej w energię kinetyczną i potencjalną wody). Zdolność energii do przemiany w inne postaci (do wykonania pracy) jest wskaźnikiem nie ilościowym, lecz jakościowym.

W ocenie komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę stosuje się szereg wskaźników dotyczących energochłonności układów. Wśród stosowanych obecnie kryteriów (cech) oceny energetycznej dominują wskaźniki tworzone w oparciu o pierwszą zasadę termodynamiki ujmującą przepływ energii wyłącznie w aspekcie ilościowym. W artykule zaproponowano nowy wskaźnik oceny komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę oparty o analizę egzergetyczną uwzględniającą pierwszą (nic nie zanika) i drugą (wszystko dyssypuje) zasadę termodynamiki.

2. Egzergia

Zdolność przemiany energii w inne postaci, może być oceniana za pomocą wskaźnika egzergii. Poziom odniesienia dla tego wskaźnika jest określany przez źródło energii, które nie może służyć do napędów procesów (naturalne otoczenie procesu). Egzergię można definiować w następujący sposób [1]:

"Egzergia wyraża maksymalną zdolność rozpatrywanej porcji energii do wykonania pracy z wykorzystaniem ciepła pobranego z otoczenia oraz powszechnie występujących i wzajemnie niezależnych składników otoczenia"

W przeciwieństwie do energii, egzergia jest wielkością nie podlegającą prawu zachowania. Miarą nieodwracalności rzeczywistych procesów zachodzących w przyrodzie jest wewnętrzna strata egzergii, która opisana jest prawem Gouy'a-Stodoli – równanie (1):

$$\delta \dot{B} = T_0 \cdot \dot{S}_{gen} \quad (1)$$

gdzie:

- $\delta \dot{B}$ - (strumień) straty egzergii wewnętrznej w systemie termodynamicznym w chwili czasowej $d\tau$ [W],
- \dot{S}_{gen} - (strumień) przyrostu entropii w systemie termodynamicznym w chwili czasowej $d\tau$, [WK⁻¹]
- T_0 - temperatura otoczenia [K]

Straty egzergii można podzielić na straty wewnętrzne oraz zewnętrzne. Straty wewnętrzne to straty wynikające z przemian nieodwracalnych wewnątrz osłony kontrolnej układu, straty zewnętrzne wynikają z odprowadzenia do otoczenia produktów odpadów, mających dodatnią egzergię. Głównym zadaniem analizy egzergetycznej jest obliczenie strat egzergii - każda strata egzergii powoduje zwiększenie zapotrzebowania na środki napędowe oraz zmniejszenie użytecznych efektów procesów [2].

W sensie analizy egzergetycznej komunalne systemy zaopatrzenia w wodę można zaklasyfikować jak systemy dyssypacyjne, to znaczy systemy, w których całkowita egzergia napędowa wykorzystywana jest do pokrycia wewnętrznych strat egzergii – równanie (2):

$$\dot{B}_{in}^{drv} = \sum_i \delta \dot{B}_i \quad (2)$$

gdzie:

- \dot{B}_{in}^{drv} - strumień egzergii napędowej wprowadzanej do systemu termodynamicznego [W]
- $\delta \dot{B}_i$ - strumień całkowitych wewnętrznych strat egzergii [W]

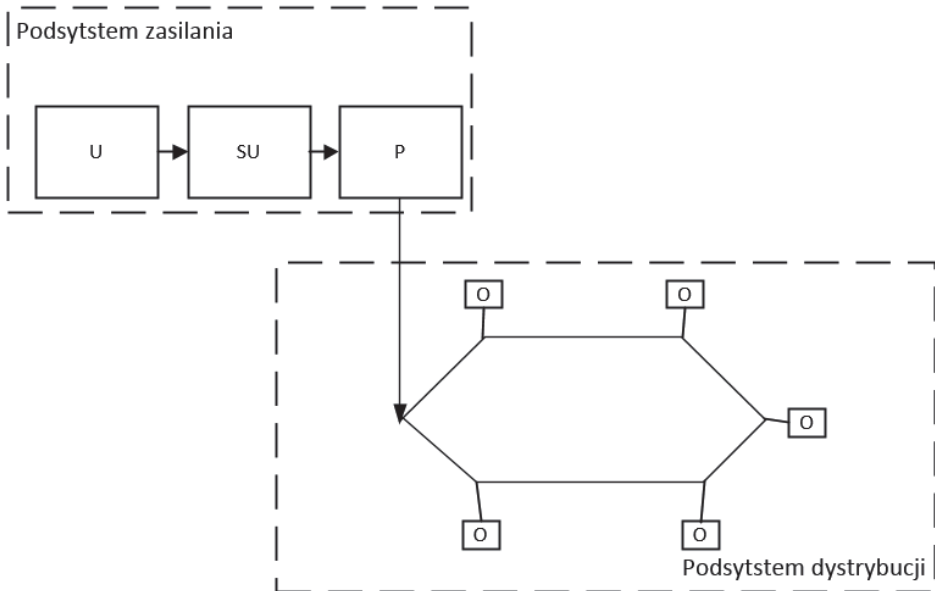
Każdemu rzeczywistemu procesowi zachodzącemu w przyrodzie, w tym procesom zachodzącym w komunalnych systemach zaopatrzenia w wodę, towarzyszy przyrost entropii.

Wyróżnia się sześć przyczyn powodujących nieodwracalność:

- reakcje chemiczne,
- wymiana ciepła przy skończonej różnicy temperatur,
- przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów,
- tarcie hydrauliczne,
- tarcie mechaniczne,
- dyfuzja (mieszanie) substancji.

3. Propozycja modelu strat egzergii komunalnego systemu zaopatrzenia w wodę

Komunalny system zaopatrzenia w wodę stanowi układ złożony z dwóch podsystemów: podsystemu zasilania oraz dystrybucji wody [3], [4]. Zadaniem podsystemu zasilania jest wydobycie i uzdatnienie wody, z kolei zadaniem systemu dystrybucji jest dostarczenie wody dla odbiorców końcowych (schemat systemu zaopatrzenia w wodę przedstawiono na rysunku 1).



Rys. 1. Schemat systemu zaopatrzenia w wodę
Fig. 1. Scheme of water supply system

W modelu powyższym można wyróżnić następujące elementy:

- Ujęcie wody surowej (powierzchniowe, podziemne lub infiltracyjne)
- Stacja uzdatniania wody,
- Systemy pompowe I stopnia,
- Sieć wodociągowa,
- Systemy pompowe II stopnia,
- Systemy pompowe III stopnia,
- Instalacje wewnętrzne odbiorców końcowych.

W każdym ze zidentyfikowanych elementów systemu następują procesy nieodwracalne powodujące wewnętrzne straty energii i w konsekwencji wzrost zużycia energii napędowej wymaganej dla funkcjonowania systemu jako całości. W tabeli 1 zestawiono procesy zachodzące w elementach komunalnego systemu zaopatrzenia w wodę wraz ze źródłami nieodwracalności (źródłami entropii) tych procesów.

Tabela 1. Nieodwracalność procesów w komunalnych systemach zaopatrzenia w wodę
 Table 1. Irreversibility of processes in municipal water supply systems

Element systemu	Proces	Źródło entropii
Ujęcie wody surowej	Wymuszenie przepływu i podnoszenie ciśnienia	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów
Stawy i rowy infiltracyjne (dodatkowo w ujęciach infiltracyjnych)	Filtracja	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Reakcje chemiczne Dyfuzja substancji Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów Zewnętrzna strata egzergii – straty wody do gruntu wymiana ciepła przy skończonej różnicy temperatur
Stacja uzdatniania wody	Filtracja Koagulacja Flokulacja Napowietrzanie Dezynfekcja ...	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Reakcje chemiczne Dyfuzja substancji Zewnętrzna strata egzergii – odprowadzenie wody zużytej na potrzeby stacji uzdatniania wody
Pompownie technologiczne	Wymuszenie przepływu i podnoszenie ciśnienia	Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów
System pompowy I stopnia	Wymuszenie przepływu i podnoszenie ciśnienia	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów
Sieć wodociągowa	Transport wody Mieszanie się wody z różnych źródeł	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Dyfuzja substancji Zewnętrzna strata egzergii – odprowadzenie zużytej wody wymiana ciepła przy skończonej różnicy temperatur
System pompowy II stopnia	Wymuszenie przepływu i podnoszenie ciśnienia w systemie	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów
System pompowy III stopnia	Wymuszenie przepływu i podnoszenie ciśnienia	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Przepływ prądu elektrycznego przy skończonej różnicy potencjałów
Instalacja wewnętrzna odbiorcy	Dostawa wody dla odbiorców końcowych	Tarcie hydrauliczne Tarcie mechaniczne Zewnętrzna strata egzergii – odprowadzenie zużytej wody

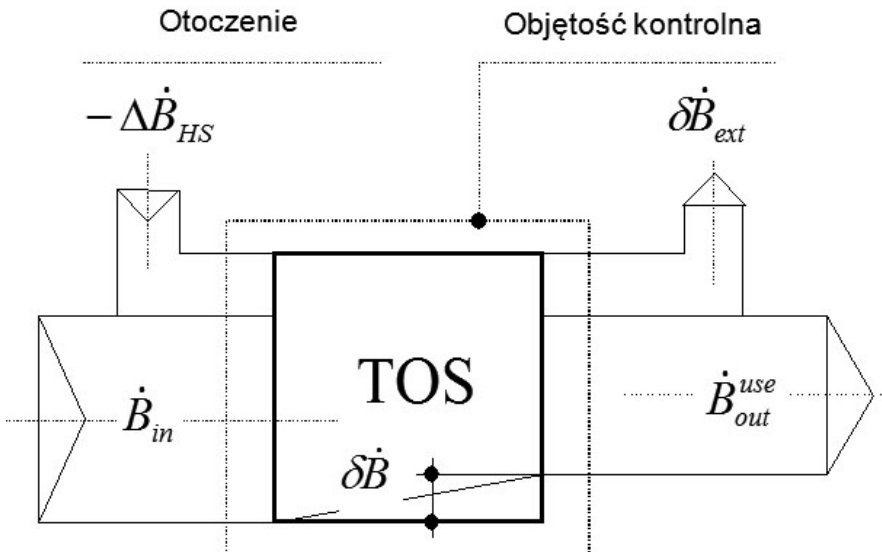
Ocena ilościowa wewnętrznych strat egzergii dla komunalnego systemu zaopatrzenia w wodę wymaga stworzenia bilansu egzergii dla każdego z wymienionych elementów systemu oraz procesów w nim zachodzących. Każdy z tych elementów traktowany jest w analizie jako system termodynamicznie otwarty, dla którego ogólne równanie bilansu egzergii w stanie ustalonym przyjmuje postać:

$$\dot{B}_{in} = \delta\dot{B} + \dot{B}_{out}^{use} + \delta\dot{B}_{ext} \pm \Delta\dot{B}_{HS} \quad (3)$$

gdzie:

- \dot{B}_{in} - strumień egzergii wpływającej do objętości kontrolnej w otwartym systemie termodynamicznym, [W]
- \dot{B}_{out}^{use} - strumień użytecznej egzergii opuszczającej objętość kontrolną w otwartym systemie termodynamicznym
- $\delta\dot{B}$ - strumień wewnętrznych strat egzergii w systemie otwartym [W]
- $\delta\dot{B}_{ext}$ - strumień zewnętrznych strat egzergii w systemie otwartym [W]
- $\Delta\dot{B}_{HS}$ - strumień zmiany egzergii zewnętrznego źródła ciepła będącego w kontakcie z otwartym systemem termodynamicznym [W]

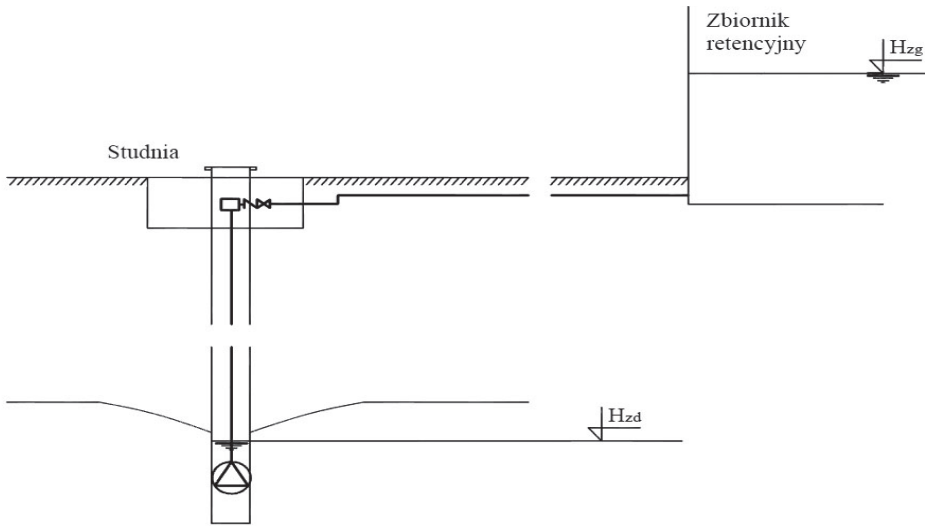
Równanie powyższe może być również przedstawione w postaci graficznej – wykres Grassmanna-Szarguta.



Rys. 2. Wykres Grassmanna-Szarguta bilansu egzergii
Fig. 2. Grassmann-Szargut graph of exergy balance

4. Bilans strat energii dla wybranego elementu systemu zaopatrzenia w wodę

Analizowano układ transportujący wodę ze studni głębinowej o swobodnym zwierciadle wody (wysokość zwierciadła wody w studni wynosi H_{zd}) do zbiornika retencyjnego wody surowej (wysokość zwierciadła w zbiorniku wynosi H_{zg}) - rysunek 3:



Rys. 3. Schemat analizowanego układu transportującego wodę
Fig. 3. Scheme of analyzed water transport system

Energia substancji wpływającej do objętości kontrolnej może być zapisana równaniem:

$$B_{sub} = m \cdot (b_{ph} + b_{ch} + \frac{w^2}{2} + g \cdot H) \quad (4)$$

gdzie:

- m - masa substancji [kg]
- b_{ph} - fizyczna energia właściwa substancji [J kg⁻¹]
- b_{ch} - chemiczna energia właściwa substancji [J kg⁻¹]
- w - prędkość przepływu substancji [m s⁻¹]
- H - Wysokość geometryczna w odniesieniu do poziomu odniesienia [m]

Egzergia substancji wpływającej do objętości kontrolnej może być zapisana równaniem:

Egzergię fizyczna substancji można wyznaczyć z wzoru:

$$b_{ph} = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (5)$$

gdzie:

- h - Entalpia właściwa substancji [J kg^{-1}]
- h_0 - Entalpia właściwa substancji w otoczeniu [J kg^{-1}]
- s - Entropia właściwa substancji [J kg^{-1}]
- s_0 - Entropia właściwa substancji w otoczeniu [J kg^{-1}]

Entalpię obliczano z wzoru:

$$h = \frac{U + pV}{m} \quad (6)$$

gdzie:

- U - Energia wewnętrzna układu [J]
- p - Ciśnienie [Pa]
- V - Objętość substancji [m^3]

Egzergia chemiczna zależy od składu chemicznego substancji. W analizowanym przykładzie nie zmienia się skład chemiczny substancji, dlatego nie uwzględniano zmian egzergii chemicznej.

Po przyjęciu założenia, że podczas przepływu nie zmienia się temperatura wody, w analizach zmiany egzergii można pominąć entropię oraz energię wewnętrzną wody. Po przyjęciu tego założenia równanie 4 przyjmuje postać:

$$B_{sub} = m \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} + g \cdot H \right) \quad (7)$$

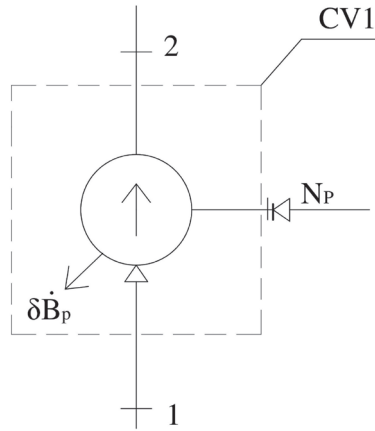
gdzie:

- ρ - Gęstość substancji [kg m^{-3}]
- p - Ciśnienie [Pa]
- V - Objętość substancji [m^3]

Ze względu na to, iż wartość $\frac{w^2}{2}$ jest wielokrotnie mniejsza niż wartość $\frac{p}{\rho}$ oraz gH ,

do celu obliczeń technicznych można pominąć człon równania związany z prędkością cieczy. Po przyjęciu ww. założeń wykonano analizę bilansu egzergii dla poszczególnych elementów układu transportującego wodę.

4.1. Bilans egzergii dla pompy zainstalowanej w studni



Rys. 4. Schemat obliczeniowy bilansu egzergii dla pompy w studni
Fig. 4. Calculation model of exergy balance of a pump in the well

$$\dot{B} = \dot{B}_{out} + \delta\dot{B}_p \quad (8)$$

$$\dot{B}_{in} = \dot{B}_1 + N_p \quad (9)$$

gdzie:

N_p - moc dostarczona do pompy [W]

$$\dot{B}_{out} = \dot{B}_2 \quad (10)$$

$$\delta\dot{B}_p = \dot{B}_1 - \dot{B}_2 + N_p \quad (11)$$

$$\delta\dot{B}_p = \dot{m} \cdot \left(\frac{p_1}{\rho} + g \cdot H_1 \right) - \dot{m} \cdot \left(\frac{p_2}{\rho} + g \cdot H_2 \right) + N_p \quad (12)$$

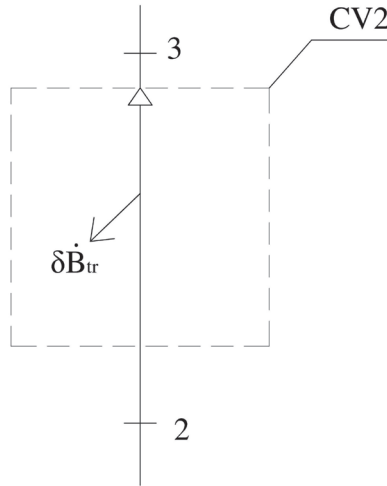
Po przyjęciu założenia $H_1 \approx H_2$ równanie (12) upraszcza się do postaci:

$$\delta\dot{B}_p = \dot{m} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho} + N_p \quad (13)$$

Ostatecznie, wykorzystanie zależności na moc pompy prowadzi do równania:

$$\delta\dot{B}_p = \dot{m} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \quad (14)$$

4.1. Bilans egzergii dla układu transportującego wodę ze studni do zbiornika wody surowej



Rys. 5. Schemat obliczeniowy bilansu egzergii dla rurociągów

Fig. 5. Calculation model of exergy balance of pipes

$$\dot{B}_{in} = \dot{B}_{out} + \delta\dot{B}_{tr} \quad (15)$$

$$\dot{B}_{in} = \dot{B}_2 \quad (16)$$

$$\dot{B}_{out} = \dot{B}_3 \quad (17)$$

$$\delta\dot{B}_{tr} = \dot{B}_2 - \dot{B}_3 \quad (18)$$

Wykorzystując równanie (4):

$$\delta\dot{B}_{tr} = \dot{m} \cdot \left(\frac{p_2}{\rho} + g \cdot H_2 \right) - \dot{m} \cdot \left(\frac{p_3}{\rho} + g \cdot H_3 \right) \quad (19)$$

oraz równanie Bernoulliego, otrzymujemy zależność:

$$\dot{m} \cdot \left(\frac{p_2}{\rho} + g \cdot H_2 \right) = \dot{m} \cdot \left(\frac{p_3}{\rho} + g \cdot H_3 \right) + \dot{m} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \left(\Sigma\xi + \lambda \cdot \frac{L}{d} \right) \quad (20)$$

Gdzie:

ξ - współczynnik strat miejscowych (straty na armaturze) [-]

λ - współczynnik strat liniowych [-]

L - długość przewodów [m]

d - średnica przewodu [m]

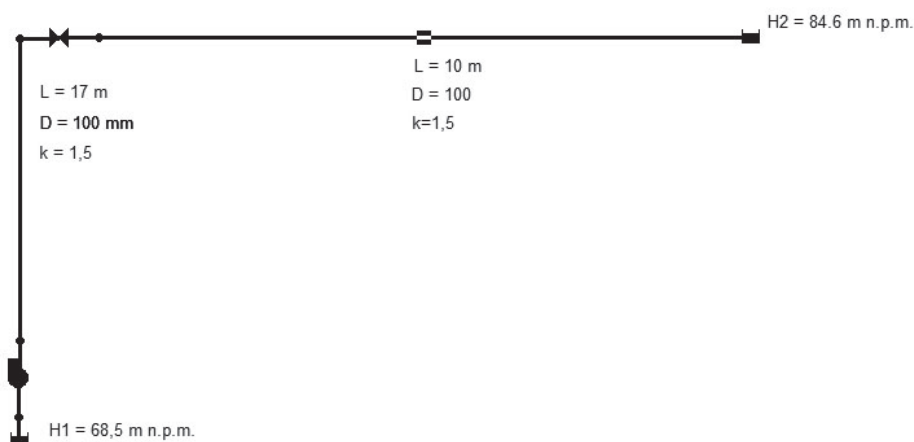
W konsekwencji zależność na strumień strat egzergii w układach transportujących wodę przyjmuje postać:

$$\delta\dot{B}_{tr} = \dot{m} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \left(\Sigma\xi + \lambda \cdot \frac{L}{d} \right) \quad (21)$$

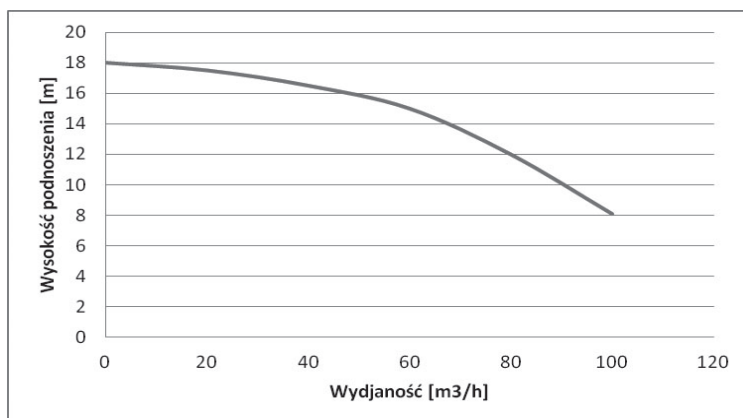
5. Obliczenia strat energii dla przykładowego układu transportującego wodę

5.1. Opis analizowanego przykładu

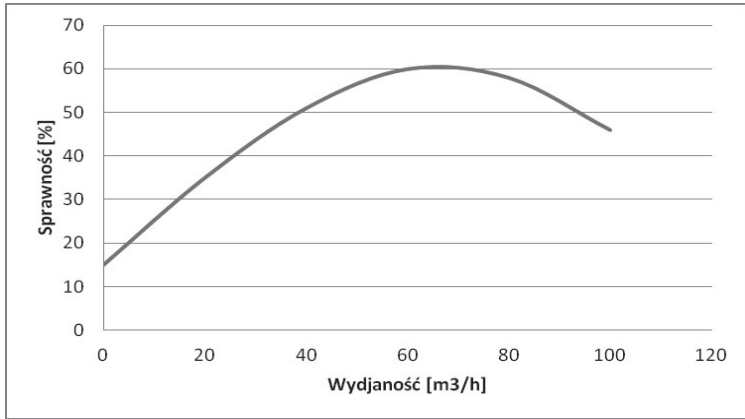
Obliczono straty energii dla układu transportującego wodę ze studni głębinowej o swobodnym zwierciadle wody do zbiornika retencyjnego zlokalizowanego na terenie stacji uzdatniania wody. W obliczeniach wykorzystano program Epanet 2 [5]. Przyjęte dane charakteryzujące układ przedstawiono na schemacie obliczeniowym (rysunek 6), charakterystyki sprawności oraz wydajności pompy przedstawiono na wykresach (rysunek 7 i rysunek 8).



Rys. 6. Schemat analizowanego układu - schemat obliczeniowy programu Epanet
Fig. 6. Scheme of analyzed water transport system - Epanet calculation model



Rys. 7. Przyjęta charakterystyka wydajności pompy
Fig. 7. Assumed performance characteristic of pump



Rys. 8. Przyjęta charakterystyka sprawności pompy

Fig. 8. Assumed efficiency characteristic of pump

5.1. Obliczenia strat egzergii

Obliczenia strat egzergii dla pompy, wykonano wykorzystując równanie 14:

$$\delta \dot{B}_p = \dot{m} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho} \cdot \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \quad (14)$$

gdzie:

p_1 - ciśnienie na wlocie do pompy (ciśnienie atmosferyczne - p_{at}) [Pa]

p_2 - ciśnienie na wylocie z pompy (suma ciśnienia atmosferycznego i nadciśnienia mierzonego za pompą - $p_{at} + p$) [Pa]

Obliczenia strat egzergii prowadzono korzystając z wyników obliczeń otrzymanych z wykorzystaniem programu Epanet:

$$p = 165,53 \text{ kPa}$$

$$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\eta = 44\%$$

$$\dot{m} = 8,46 \text{ kg/s}$$

$$\delta \dot{B}_p = 8,46 \cdot \frac{p_{at} - (p_{at} + 165,53)}{1000} \cdot \left(1 - \frac{1}{0,44} \right) = 1,85 \text{ kW}$$

Obliczono straty egzergii dla przewodu, wykonano wykorzystując równanie 21:

$$\dot{\delta B}_{tr} = \dot{m} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \left(\sum \xi + \lambda \cdot \frac{L}{d} \right) \quad (21)$$

Obliczenia strat egzergii prowadzono na korzystając z wyników otrzymanych z programu Epanet:

$$w = 1,08 \text{ m/s}$$

$\sum \xi = 3$ - przyjęto jako sumę strat dla armatury oraz wodomierza studziennego

$$\lambda = 0,044[-]$$

$$L = 27 \text{ m}$$

$$d = 0,1 \text{ m}$$

$$\dot{\delta B}_{tr} = 8,46 \cdot \frac{1,08^2}{2} \cdot \left(3 + 0,044 \cdot \frac{27}{0,1} \right) = 0,06 \text{ kW}$$

Obliczono sumę strat egzergii:

$$\sum \dot{\delta B}_i = \dot{\delta B}_p + \dot{\delta B}_{tr} = 1,85 + 0,06 = 1,91 \text{ kW}$$

5.1. Dyskusja wyników

W przykładzie obliczano straty egzergii w pompie oraz układzie transportującym wodę ze studni do zbiornika retencyjnego. Analiza egzergetyczna umożliwia obliczenie zagregowanych - sumarycznych wskaźników strat egzergii. Wskaźniki te mogą służyć do celów oceny całych układów transportujących wodę. Ocenia się zarówno sprawność pompy jak również rurociągi transportujące wodę. Wskaźnik strat egzergii może służyć do oceny istniejących systemów zaopatrzenia w wodę oraz rozwiązań projektowanych. W ramach oceny można porównywać obliczoną wartość egzergii, dla różnych wariantów przyjętych parametrów układu (np. średnic, chropowatości przewodów itp.).

Tabela. 2. Obliczenia egzergii dla różnych wariantów, parametrów układu.

Fig. 2. Exergy calculations for different variant of system parameters.

Wariant	d	\dot{m}	p	η	$\dot{\delta B}_p$	w	λ	$\dot{\delta B}_{tr}$	$\Sigma \dot{\delta B}$	$\Sigma \dot{\delta B}_j$
	[m]	[kg/s]	[kPa]	[%]	[kW]	[m/s]	[-]	[kW]	[kW]	[kWh/m ³]
1	0,1	8,46	165,53	44	1,85	1,08	0,044	0,06	1,91	0,063
2	0,08	5,85	169,25	35	1,83	1,16	0,048	0,07	1,91	0,091
3	0,125	10,69	162,32	49	1,80	0,87	0,041	0,04	1,85	0,048
Po zmianie chropowatości przewodu z $k=1,5$ na $k = 0,1$										
4	0,1	9,88	163,57	47	1,82	1,26	0,022	0,07	1,89	0,053

Dla analizowanego przykładu obliczano straty egzergii przy założonych różnych parametrach układu: różnych wielkościach średnic przewodów - wariant 1,2,3. Obliczono również wartość strat egzergii w przypadku, gdyby chropowatość przewodu zmieniała się z wartości 1,5 (przyjmowanej dla rur żeliwnych w użytkowaniu) na wartość 0,01 (przyjmowanej dla nowych rur z PE). Wyniki obliczeń zapisano w tabeli 2. Należy zwrócić uwagę, iż w przypadku zmiany średnicy zmieni się przepływ w rurociągu dłatego, wiarygodne do porównań są wartości jednostkowych strat egzergii (kWh/m^3).

Egzergia może być wskaźnikiem oceny jakościowej i ilościowej systemów zaopatrzenia w wodę. Wykorzystując wewnętrzne straty egzergii procesów jednostkowych w układach transportujących wodę można zidentyfikować najsłabsze ogniwa tych układów i poddać je wymaganej modernizacji. Straty egzergii w połączeniu z oceną ekonomiczną identyfikowanych wariantów modernizacji zmogą być podstawą wielokryterialnej oceny układów transportujących wodę.

6. Podsumowanie

Pojęcie egzergii odnosi się do zdolności wykonania pracy na skutek przemian termodynamicznych. Analiza egzergetyczna rozwinęła się głównie jako narzędzie do oceny efektywności procesów cieplnych [6]. W komunalnych systemach zaopatrzenia w wodę analiza ta była stosowana odnośnie przemian energii chemicznej w procesie oczyszczania ścieków [7]. W artykule zaproponowano zastosowanie analizy egzergetycznej do analizy wybranych obiektów komunalnego systemu zaopatrzenia w wodę.

W przykładzie równanie strat egzergii obliczano dla dwóch obiektów: pompy zainstalowanej w studni głębinowej oraz przewodu transportującego wodę ze studni do stacji uzdatniania wody. Źródłem entropii była niedoskonałość przemiany energii elektrycznej na energię kinetyczną i potencjalną wody (w pompie) oraz przemiany energii kinetycznej i potencjalnej wody na ciepło (wywołaną stratami tarcia mechanicznego i hydraulicznego w przewodach transportujących wodę). W przykładzie nie zmieniała się temperatura wody oraz jej skład chemiczny.

Metoda bilansu egzergetycznego pozwala na analizowanie innych przemian energii w systemach zaopatrzenia w wodę np. przemian energii chemicznej w procesie uzdatniania wody (np. w procesie napowietrzania, filtracji, koagulacji), czy obliczania zewnętrznych strat egzergii wywołanych stratami wody w sieci wodociągowej (wyciekami). Analiza egzergetyczna pozwala na obliczanie zagregowanych wskaźników strat egzergii.

Współcześnie zwraca się uwagę na to, iż sieć wodociągowa może stanowić np. źródło energii dla turbiny zainstalowanej w przewodzie (np. reduktor ciśnienia z odzyskiem energii [8]) lub też dolne źródło ciepła dla pompy ciepła. Analiza egzergetyczna może być przydatna jako uniwersalne narzędzie do oceny wszystkich rodzajów przemian energii zachodzących w systemach wodociągowych.

Bibliografia

- 1) Szargut, J. and Petela, R. Egzergia. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1965
- 2) Szargut, J. Analiza egzergetyczna procesów cieplnych. Biuletyn Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, 1996, 84 43–52
- 3) Urbaniak, A. Sterowanie złożonych obiektów systemu zaopatrzenia w wodę. Instal 2014, 9 56–60
- 4) Brodziak, R. and Bylka, J. Kryteria zrównoważonego rozwoju w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę, w: Innowacyjność, kreatywność i rozwój: Budownictwo a środowisko, Poznań, 2015
- 5) Rossman, L. Epanet 2 user manual. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000
- 6) Mróz, T. Energy management in built environment. Tools and evaluation procedures. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013
- 7) Salar Khosravi, M. H. P. Application of exergy analysis for quantification and optimisation of the environmental performance in wastewater treatment plants. International Journal of Exergy 2013, 12 119 – 138
- 8) Węgiel, T., Borkowski, D. and Łopata S. Ekoreduktor do odzysku nadwyżek energii wody sieciowej Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. 2013, 2 199-205.

