

Aspekty ekonomiczne w procesie projektowania instalacji odzysku ciepła – studium przypadku

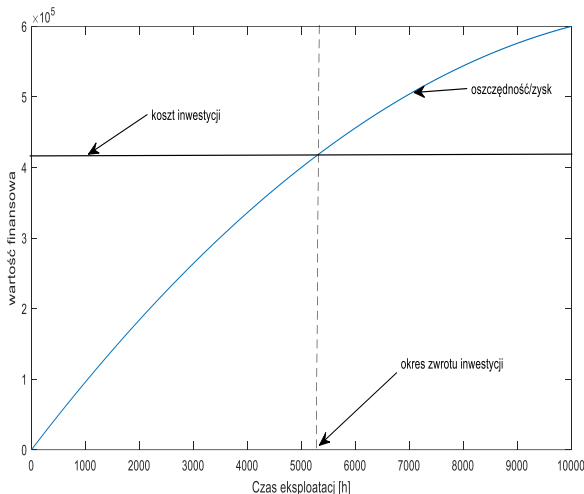
JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2019.063
Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania aspektów ekonomicznych w procesie optymalizacji konstrukcji rekuperatora. W proponowanym modelu uwzględniono koszt wytworzenia instalacji wymiennika ciepła oraz predykowane korzyści ekonomiczne w trakcie eksploatacji urządzenia z rekuperatorem. Predykowane korzyści obejmują wzrost efektywności energetycznej wynikający z liczby stosowanych modułów rekuperatora, spadek efektywności rekuperatora w trakcie eksploatacji, koszt wytworzenia ciepła, średnie temperatury w położeniu geograficznym oraz czas pracy. Przeprowadzono studium przypadku na przykładzie kabiny lakierniczej.

Słowa kluczowe: optymalizacja kosztów, odzysk ciepła, kabina lakiernicza

Wstęp

W analizie planowanej inwestycji w przedsiębiorstwie, rozpatrywane są przede wszystkim dwa elementy: całkowity koszt inwestycji oraz czas jej zwrotu. Na rysunku 1 przedstawiono wykres przedstawiający wstępne szacowanie opłacalności inwestycji. Należy mieć na uwadze fakt, że korzyści wynikające z poczynionej inwestycji nie są zawsze są stałe w trakcie eksploatacji przedmiotu inwestycji.



Rys. 1. Szacowanie okresu zwrotu inwestycji

Odzyskiwanie ciepła odpadowego w procesach przemysłowych stanowi podstawę wielu analiz ekonomicznych [1] zarówno dla istniejących instalacji przemysłowych jak i projektowanych nowych inwestycji [18].

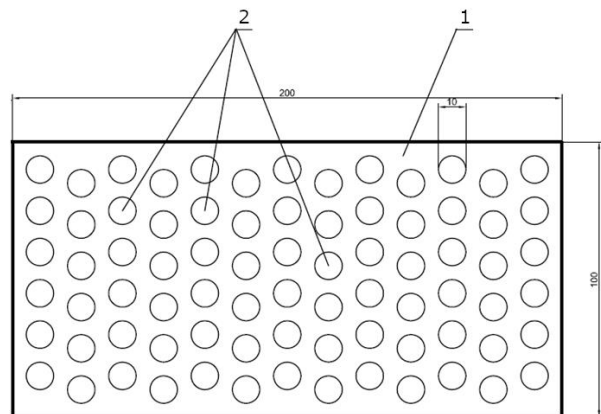
Dalsze rozważania przeprowadzono na przykładzie renowacyjnej kabiny lakierniczej. Celem poprawy efektywności energetycznej kabin lakierniczych stosowane są instalacje odzyskiwania ciepła odpadowego z wyrzucanego powietrza. Skoncentrowano się na optymalizacji liczby modułów innowacyjnego rekuperatora przeciwprądowego [12,13].

1. Koszty inwestycyjne oraz wartość oszczędności

Analiza sprawności wymiennika ciepła przedstawionego na rysunku 2 dotyczy przede wszystkim kanału nawiewnego z odzyskiem ciepła 1 oraz przewodów rurowych z ciepłym powietrzem 2, umieszczonych w kanale z nawiewnym z odzyskiem ciepła 1. Przyjęto prostokątny przekrój poprzeczny kanału nawiewnego z odzyskiem ciepła 1 o wymiarach wewnętrznych 1x2 [m]. Parametry dla kanałów ciepłego powietrza 3 umieszczonych w kanale nawiewnym z odzyskiem ciepła 1:

- przekrój wewnętrzny: $d_{r1}=100$ [mm],
- grubość ścianki stalowej: $\delta=1$ [mm],
- łączna ilość kanałów: $m_r=78$ szt.

Konstrukcję wymiennika ciepła stanowi rekuperator przeciwprądowy, przekrój poprzeczny przedstawiono na rysunku 2. Przyjęto budowę modułową wymiennika ciepła. Budowa modułowa pozwala na skalowalną wysokość konstrukcji wymiennika ciepła w zależności od potrzeb lub możliwości zastosowania wymiennika, na przykład ze względu na wysokość hali. Proponowana konstrukcja elementu do wymiany powietrza z odzyskiem ciepła powinna zastąpić istniejące kanały nawiewny i wywiewny w kabinie lakierniczej. W skład skalowalnej konstrukcji wymiennika ciepła wchodzi dwa podstawowe elementy: moduł dyfuzora, moduł konfuzora oraz umieszczone pomiędzy nimi moduły wymiany ciepła o wysokości 1 [m] każdy. Moduł wymiany ciepła stanowi zestaw rurowych kanałów ciepłego powietrza 2 umieszczonych w kanale nawiewnym 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny wymiennika ciepła

Całkowity koszt k_c inwestycyjny instalacji rekuperatora stanowi suma kosztu stałego k_{st} oraz n_r -krotności jednostkowego kosztu modułu wymiennika ciepła k_m , Przy czym n_r oznacza liczbę modułów rekuperatora.

$$k_c = k_{st} + n_r k_m \quad (1)$$

Koszt stały k_{st} obejmuje wartość zakupu dyfuzora i konfuzora oraz ich instalacji. Koszt zmienny związany jest z liczbą modułów wymiennika ciepła.

Oszczędności S wynikające z instalacji rekuperatora stanowią sumę chwilowych oszczędności s_t wynikających z odzyskiwanego ciepła.

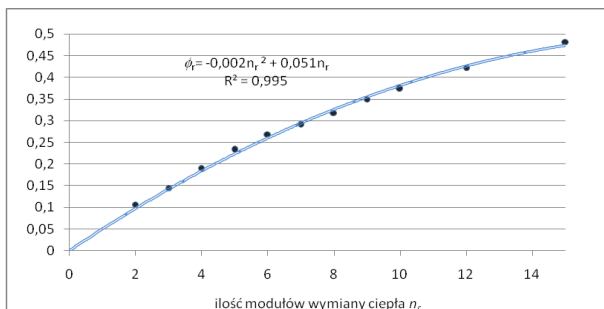
$$S = \int_0^t s_t (\Delta T_a) dt \quad (2)$$

Wartość chwilowa oszczędności s_t jest związana z przyrostem temperatury czerpanego powietrza ΔT_a stanowiącym efekt odzyskiwania ciepła w zainstalowanym rekuperatorze. Efektywność energetyczna analizowanego rekuperatora została opisana w pracy [14]. Łączna wartość oszczędności uzależniona jest nie tylko od całkowitego czasu pracy kabiny lakierniczej, lecz również od temperatury powietrza zewnętrznego.

Do określenia przyrostu temperatury ΔT_a przyjęto współczynnik zmiany temperatury ϕ [21], temperaturę powietrza usuwanego kabiny lakierniczej T_w oraz średnią roczną temperaturę powietrza T_a w lokalizacji geograficznej kabiny lakierniczej.

$$\Delta T_a = \phi_r (T_w - T_a) = (-0,002 n_r^2 + 0,051 n_r) (T_w - T_a) \quad (3)$$

Wartość współczynnika zmiany temperatury ϕ jest uzależniona od liczby modułów wymiennika ciepła n_r i nie jest ona liniowo zależna. Na rysunku 3 przedstawiono zmiany współczynnika ϕ [14].



Rys. 3. Zależność współczynnika zmiany temperatury ϕ od ilości modułów n_r

Wartość chwilowej oszczędności s_t jest równoważna z kosztem strumienia ciepła dQ/dt , który należałoby dostarczyć do doprowadzenia wzrostu temperatury powietrza o ΔT_a . Strumień ciepła obliczono z zależności:

$$\frac{dQ}{dt} = c_p \rho_p \frac{dV_A}{dt} (-0,002 n_r^2 + 0,051 n_r) (T_w - T_a) \quad (4)$$

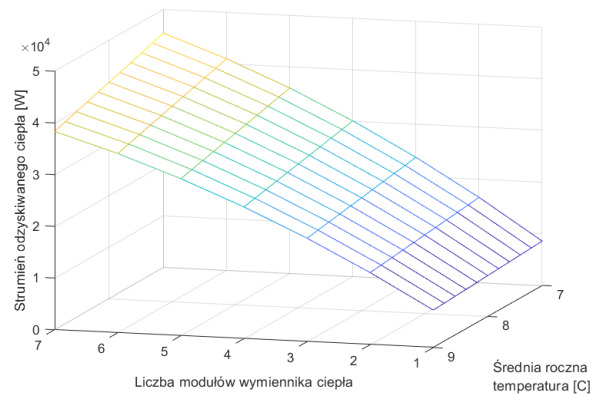
gdzie:

c_p – ciepło właściwe powietrza [Ws/(kg K)],

ρ_p – gęstość powietrza [kg/m³],

dV_A/dt – strumień masy powietrza [m³/s].

Na rysunku 4 przedstawiono zależność strumienia ciepła od liczby modułów wymiennika ciepła n_r oraz średniej rocznej temperatury T_a . Obliczenia przeprowadzono dla temperatury powietrza w kabynie lakierniczej $T_w = 20$ [C] i polskich warunków geograficznych, gdzie średnia roczna temperatura powietrza przyjmuje wartości od 7.3 [C] (Białystok) do 9.2 [C] (Opole) [25].



Rys. 4. Zależność strumienia odzyskiwanego ciepła od liczby modułów oraz średniej rocznej temperatury

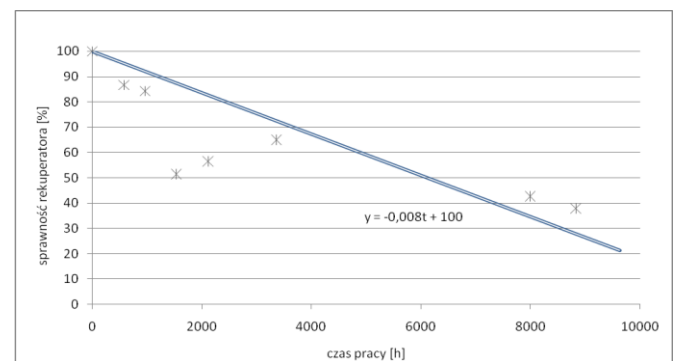
Koszt wytworzenia strumienia ciepła zależy jest również od rodzaju paliwa i sprawności źródła ciepła stosowanego w kabynie lakierniczej. Ceny paliw są bardzo zróżnicowane ze względu na ich wartość rynkową oraz marżę dostawców. W tabeli 1 przedstawiono średni koszt wytworzenia kilowatogodziny ciepła dla różnych źródeł ciepła [26].

Tab. 1. Koszt uzyskanej kWh w zależności od paliwa [26]

Rodzaj paliwa	Koszt uzyskanej 1 kWh
Gaz ziemny GZ 50 taryfa W3	0,23
Gaz płynny propan - butan	0,26
Olej opałowy Ecoterm Plus	0,26
Eko groszek (popiół 4%)	0,13
Energia elektryczna taryfa całodobowa	0,55
Pompa ciepła	0,14

2.Wpływ warunków eksploatacyjnych

W kabynie lakierniczej sprawność rekuperatora obniża się w funkcji całkowitego czasu jej eksploatacji. Przyczyną tego są osady lakiernicze odkładające się na kanałach wyrzutni [9, 10]. Oprócz ich wpływu na bezpieczeństwo pracy lakiernika [24], narastająca warstwa osadów na lamelach rekuperatora powoduje zmniejszenie strumienia wymianianego ciepła. Na rysunku 5 przedstawiono predykowane obniżenie sprawności rekuperatora wraz całkowitym czasem eksploatacji kabiny lakierniczej.



Rys. 5. Obniżenie efektywności rekuperatora w funkcji całkowitego czasu pracy kabiny lakierniczej.

Początkowa wartość 100% nie oznacza efektywności rekuperatora na poziomie stu procent, lecz jego nominalną sprawność określoną przez producenta

Według zależności przedstawionej na rysunku 5, strumień ciepła dQ/dt opisany równaniem (4) zależy jest od całkowitego czasu pracy kabiny lakierniczej t .

$$\frac{dQ}{dt} = c_p \rho_p \frac{dV_A}{dt} (-0,002n_r^2 + 0,051n_r)(20 - T_a)(-0,008t + 100) \quad (5)$$

Strumień ciepła dQ/dt stanowi podstawę do oszacowania oszczędności s_i

$$s_i = \frac{dQ}{dt} k_p \quad (6)$$

gdzie k_p stanowi jednostkowy koszt wytworzenia ciepła. Według tabeli 1, koszt jednostkowy ma znaczący wpływ na predykowane korzyści wynikające ze stosowania rekuperatora.

Podsumowanie

Dla odzyskiwania ciepła w kabinach lakierniczych przeprowadzono już kilka analiz [15, 16, 17] nie uwzględniały one jednak kosztów wytwarzania ciepła. Metodę szacowania oparto o średnią roczną temperaturę w geograficznej lokalizacji kabiny lakierniczej. W pracy [11] uwzględniono dobową zmienność temperatury powietrza [2] oraz tendencje zmiany temperatury [3, 7].

Przedstawiona metoda szacowania opłacalności inwestycji dotyczy studium przypadku technologii odzyskiwania ciepła w kabinach lakierniczych. W lakierni rozważa się również odzyskiwanie ciepła odpadowego z procesu sprężania powietrza [23].

Dla indywidualnych procesów, w których powstaje ciepło odpadowe, należy przeprowadzić analizę możliwych technologii odzyskiwania ciepła [4, 5, 6, 19, 20, 22] z zastosowaniem odpowiednich metod [8].

Bibliografia:

- Brückner S., Liu S., Miró L., Radspieler M. Cabeza, L., F., Lävemann E., Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy* 151 (2015) 157–167
- Ciebień M., Samborski A. S., Zmienność temperatury i wilgotności względnej powietrza w uprawach niektórych roślin, *Annales Umcs Agricultura*, Vol. LXX(2) 2015, 23:31,
- Górski T., Kozyra J., Agroklimatyczna norma średniej temperatury powietrza w Polsce na lata 2011–2020, *Polish Journal of Agronomy* 2011, 5, 21:28,
- Dong-Shang Chang, Kun-Ping Cheng, Rouwen Wang, Developing low temperature recovery technology of waste heat in automobile factory, *Energy Science & Engineering* 2018;6:460–474
- Huang F., Zheng J., Baleynaud J.M., Lu J., Heat recovery potentials and technologies in industrial zones, *Journal of the Energy Institute* 90 (2017) 951–961
- Jouhara H., Khordeghah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A., Waste heat recovery technologies and applications, *Thermal Science and Engineering Progress* 6 (2018) 268–289
- Michalska B., Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce, *Prace i Studia Geograficzne*, 2011, T. 47, ss. 67:75,
- Miró L., Brueckner S., McKenna R., Cabeza L., F., Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain, *Applied Energy* 169 (2016) 866–873
- Nikończuk P., Study of Heat Recovery in Spray Booths, *Metal Finishing* Vol. 111 (6) ,37:39,
- Nikończuk P., Preliminary analysis of heat recovery efficiency decrease in paint spray booths, *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 2014 VOL 92 NO 5, 235:237
- Nikończuk P., Prognoza zmniejszenia zapotrzebowania mocy w renowacyjnych kabinach lakierniczych w wyniku odzysku ciepła – studium przypadku, *Autobusy*,6/2016, 342:345,
- Nikończuk P., Zakrzewski B.: Urządzenie do wymiany powietrza z odzyskiem ciepła, zwłaszcza w komorach lakierniczych, patent PL 217481,
- Nikończuk P., Zakrzewski B., Device for exchanging air with heat recovery, especially in spray booths, patent EP2684613,
- Nikończuk P., Wybrane problemy projektowania i eksploatacji kabin lakierniczych, *Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie*, Szczecin 2018.
- Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Stempnakowski Z., Wstępna analiza korzyści ze stosowania innowacyjnego rozwiązania odzysku ciepła w kabinach lakierniczych, *Logistyka* 09/2014 ,4666:4672,
- Nikończuk P., Stempnakowski Z., Ślusarczyk R. Badanie otoczenia konkurencyjnego w układzie pięciu sił Portera na wybranym przykładzie, *TTS Technika Transportu Szynowego* 12-2015, 1112:1115,
- Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Stempnakowski Z., Wstępna analiza korzyści ze stosowania innowacyjnego rozwiązania odzysku ciepła w kabinach lakierniczych, *Logistyka* 09/2014 ,4666:4672,
- Plinta D., Więcek D., Szacowanie kosztów wytwarzania elementów maszyn z wykorzystaniem narzędzi wspomagających projektowanie procesów produkcyjnych, *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2011, 156-165.
- Panayiotou G. P., Bianchi G., Georgiou G., Aresti L., Argyrou M., Agathokleous R, Tsamos K. M., Tassou S. A., Florides G. Kalogirou S., Christodoulides P., Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries, *Energy Procedia* Vol. 123, (2017), 335-345
- Papapetrou M., Kosmadaki G., Cipollina A., La Commare U., Micale G., Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country, *Applied Thermal Engineering* 138 (2018) 207–216
- Recknagel, Sprenger, Honmann, Schramek.: *Poradnik ogrzewanie + klimatyzacja*, Gdańsk EWFE, 2008,
- Stijepovic M. Z., Linke P., Optimal waste heat recovery and reuse in industrial zones, *Energy* 36 (2011) 4019-4031
- Taheri K., Gadow R., Industrial compressed air system analysis: Exergy and thermoeconomic analysis, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, Vol. 18: 10-17
- Ubowska A., Niewińska E. Bezpieczeństwo w lakierniach samochodowych – zagrożenie ze strony substancji chemicznych. *Logistyka* 2014(5), 1596:1606,
- <http://www.pogodynka.pl/polska/daneklimatyczne/> - średnie temperatury dostęp 29.10.2018
- <http://www.instalacjebudowlane.pl/3742-23-40-porownanie-kosztow-ogrzewania-roznymi-mediami.html> - Porównanie kosztów ogrzewania różnymi mediami, aktualizacja: 04-04-2018, 09:05 – artykuł promocyjny, dostęp 29.10.2018

Economic aspects in the design process of heat recovery installations - case study

The paper presents a proposal of economic aspects application in the process of optimizing the construction of heat recovery unit. The proposed model includes the cost of heat exchanger installation and the predicted economic benefits during the operation of the device. The predicted benefits include an increase of energy efficiency resulting from the number of modules of heat recovery unit, decrease unit efficiency during operation, the cost of heat production, average temperatures in the geographical location and working time. A case study was carried out on the example of a spray booth.

Keywords: cost optimization, heat recovery, spray booth.

Autorzy:

Dr **Zbigniew Stempnawski** – Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk Ekonomicznych i Zarządzania,

Dr inż. **Piotr Nikończuk** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, e-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl