

Sebastian PATER, Włodzimierz CIESIELCZYK, Ilona BĘTKOWSKA

e-mail: sebpater@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Magazynowanie ciepła produkowanego przez cieczone kolektory słoneczne w zasobniku PCM

Wstęp

Niskotemperaturowa energia cieplna produkowana przez kolektory słoneczne, czy też pompy ciepła znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle [Wallerand i in., 2018; Farjana i in., 2018; Jia i in., 2018]. Około 13% ciepła zużywanego w procesach przemysłowych nie przekracza temperatury 100°C, a kolejne 27% osiąga maksymalną temperaturę 200°C [Mekhilef i in. 2011]. W przemyśle browarniczym podczas produkcji gorącej wody i pary, pasteryzacji, sterylizacji, mycia, ogrzewania pomieszczeń, itp. istnieje możliwość wykorzystania ciepła produkowanego z odnawialnych źródeł energii do procesów piwowarskich na każdym etapie produkcji napoju. Zasobniki z substancją zmiennofazową PCM (*Phase-Change Material*) ze względu na zmienny strumień energii dostarczanej przez kolektory słoneczne w ciągu roku, dnia, a nawet godziny istotnie zwiększają możliwość wykorzystania energii z tego typu urządzeń [Alva i in., 2018]. Kluczową zaletą tych akumulatorów ciepła jest możliwość zmagazynowania dużych ilości energii na stosunkowo niskim poziomie temperatur i przy małej objętości zbiornika (w porównaniu do tradycyjnych zbiorników wypełnionych wodą).

W pracy zaproponowano instalację do magazynowania w zasobniku PCM ciepła produkowanego przez system z płaskimi cieczowymi kolektorami słonecznymi w *Browarze Warka*. Zgromadzona energia ma służyć na potrzeby obecnie stosowanej metody mycia na miejscu CIP (*Cleaning in Place*), pozwalającej na mycie instalacji w obiegu zamkniętym i bez rozmontowywania jej na części [Grupa Żywiec, 2012]. Proces ten jest szeroko stosowany w przemyśle spożywczym, jednakże charakteryzuje się wysokim zapotrzebowaniem energetycznym i dużym zużyciem wody [Diakun, 2017].

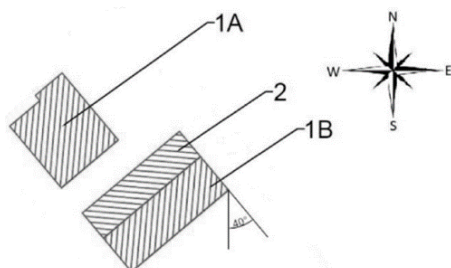
Charakterystyka instalacji

Założenia

W *Browarze Warka*, w 2016 roku zużyto 171 mln MJ energii pod postacią ciepła [Grupa Żywiec, 2017]. Założono, że około 30% ciepła, tj. 51,3 mln MJ jest konsumowane przez metodę CIP. Instalacja ma dostarczać ciepło do etapu mycia tankofermentatorów i zbiorników magazynujących w którym temperatura środków myjących nie przekracza 40°C [Eßlinger, 2009]. Ze względu na bardzo duże zapotrzebowanie na ciepło do tego procesu założono, że instalacja będzie działała wspomagająco i nie ma na celu całkowitego zastąpienia innych źródeł energii.

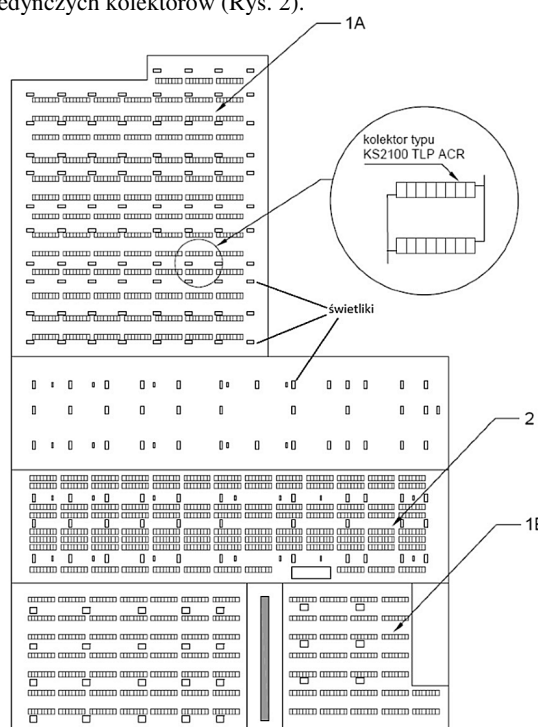
Kolektory słoneczne

W projektowanej instalacji do montażu kolektorów słonecznych wykorzystano istniejącą infrastrukturę tj. dach hali produkcyjnej i rozlewni o łącznej całkowitej powierzchni wynoszącej około 26 000 m² (Rys. 1).



Rys. 1. Wydzielone strefy powierzchni dachu *Browaru Warka*

Dach został podzielony na 3 strefy w zależności od kąta nachylenia połaci oraz ułożenia świetlików naświetlających wnętrze hali w ciągu dnia. Strefy 1A i 1B są dachami płaskimi, natomiast strefa 2 to dach o nachyleniu wynoszącym 20°. Dachy są odchyłone od orientacji południowej o kąt 40° w kierunku zachodnim. Do instalacji wybrano kolektory płaskie cieczone typu KS2100 TLP ACR firmy *Hewalex* o powierzchni absorbera wynoszącej 1,82 m², które można łączyć równoległe w baterie składające się maksymalnie z 8 pojedynczych kolektorów (Rys. 2).



Rys. 2. Rozmieszczenie baterii paneli słonecznych na dachu budynku *Browaru Warka*

Ze względu na to, iż dobrany optymalny kąt nachylenia kolektorów do poziomu dla instalacji pracującej całorocznie wynosi 35° konieczne jest zastosowanie dwóch różnych systemów mocujących: KSOL-1 i KSOL-2 dla kolektorów w obszarze 1A i 1B oraz uchwytów korekcyjnych w strefie 2. Ponieważ orientacja kolektorów względem stron świata wpływa na roczny uzysk ciepła w dalszych obliczeniach zastosowano współczynnik korekcyjny η_{ok} równy 0,98. Cieczą solarną będzie wodny roztwór glikolu propylenowego o stężeniu objętościowym 40%.

Na rys. 2 przedstawiono rozmieszczenie baterii na dachu browaru uwzględniające minimalne odległości między kolejnymi rzędami kolektorów i sąsiadującymi bateriami oraz istniejące elementy dachu. W tab. 1 zestawiono szczegółowe dane dotyczące poszczególnych stref dachu.

Tab. 1. Wyniki obliczeń projektowych dla poszczególnych obszarów dachu

Strefa	1A	1B	2	Suma
Liczba baterii kolektorów	94	79	102	275
Liczba kolektorów słonecznych	752	632	816	2200
Suma całkowitej powierzchni absorberów [m ²]	1369	1150	1485	4004

Teoretyczną sprawność kolektorów słonecznych w instalacji wyznaczono korzystając ze wzoru [Duffie i Beckman, 2013]:

$$\eta_i = \frac{\eta_o \eta_{ok}}{100} - \frac{\alpha_1 \Delta T}{E_g} - \frac{\alpha_2 (\Delta T)^2}{E_g} \quad (1)$$

gdzie:

E_g – natężenie promieniowania słonecznego, [W/m²],

$\alpha_1 = 3,247$ – współczynnik liniowych strat ciepła, [W/(m²K)]

$\alpha_2 = 0,02$ – współczynnik nieliniowych strat ciepła, [W/(m²K²)]

$\eta_o = 82,7$ – sprawność optyczna kolektora, [%]

ΔT – różnica temperatur między absorberem, a otoczeniem, [°C].

Przy założeniu średniej temperatury absorbera kolektora równej 60°C i średniej temperatury rocznej dla okolic Browaru Warka (dane stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie) wynoszącej około 8°C [MiIR, 2018] ΔT wynosi 52°C. Dla natężenia promieniowania słonecznego równego 800 W/m² sprawność kolektora słonecznego w projektowanej instalacji wynosi około 53%. Przy średnim rocznym nasłonecznieniu dla terenu miejscowości Warka wynoszącym 958 kWh/m² [MiIR, 2018] z instalacji można pozyskać około 508 kWh ciepła w przeliczeniu na m² powierzchni absorbera. W skali roku daje to łącznie około 7,3 mln MJ ciepła z całej instalacji z kolektorami słonecznymi, co stanowi 4,3% całkowitego zapotrzebowania browaru na ciepło i 14% zapotrzebowania w metodzie CIP.

Magazynowanie ciepła w zasobniku PCM

W ciągu roku, ze względu na największą dostępność energii promieniowania słonecznego w okresie letnim, dużą część ciepła będzie produkowana pomiędzy czerwcem a lipcem. Zasobnik PCM powinien być w stanie zmagazynować ilość energii cieplnej wyprodukowanej podczas typowego, letniego dnia, tj. 2,49 kWh z m² powierzchni absorbera (czyli 10 251 kWh z całej instalacji). Dodatkowo tę wartość pomniejszono o 10% (ze względu na zastosowany współczynnik η_i , który w warunkach rzeczywistych ma niższą wartość) uzyskując 9 226 kWh.

Mieszanie parafin należą do najczęściej stosowanych substancji organicznych w zasobnikach PCM. Są preferowane ze względu na stabilne właściwości fizyczne i chemiczne oraz szeroki zakres temperatur topnienia, zależny od długości łańcucha węglowego. Drugim typem medium są kwasy tłuszczowe, których główną zaletą jest naturalne występowanie. Związki nieorganiczne posiadają wyższe współczynniki przewodzenia ciepła i mogą pracować w wyższych temperaturach. [Konuklu i in., 2018].

Substancja zmiennofazowa wypełniająca zasobnik PCM musi charakteryzować się wysokimi wartościami ciepła przemiany fazowej, co pozwala na zgromadzenie dużych ilości energii przy małej objętości zbiornika. Równie istotnym parametrem jest temperatura przemiany fazowej. Na tej podstawie wybrano parafinę typu RT54HC firmy Rubitherm. Jej przemiana fazowa zachodzi w zakresie temperatur 46-61°C, przy maksymalnych wartościach ciepła utajonego w temperaturze 53-54°C [Rubitherm, 2016] co pozwala na podgrzanie substancji myjącej do etapu mycia tankofermentatorów i zbiorników magazynujących do temperatury 40°C. Substancja ta cechuje się wysoką pojemnością ciepła wynoszącą 200 kJ/kg (w zakresie temperatur 46÷61°C) [Rubitherm, 2016].

Masę parafiny w zbiorniku wyliczono dzieląc pomniejszony dzienny uzysk energetyczny w okresie letnim z instalacji z kolektorami słonecznymi przez pojemność cieplną parafiny w zakresie 46÷61°C. Uzyskaną wartość (164,8 Mg) podzielono przez gęstość parafiny w stanie ciekłym (800 kg/m³) otrzymując 206 m³, tj. minimalną objętość zasobnika PCM. Aby zasobnik z wodą mógł zmagazynować taką samą ilość ciepła jak zasobnik PCM wymagana jest prawie 2,8 razy większa jego objętość (około 540 m³).

Ze względu na złożoność procesu istotnym zagadnieniem jest sposób przekazywania i odbierania ciepła z zasobnika PCM. Przyjęto, że transport energii cieplnej z poszczególnych pól kolektorów (1A,

1B i 2) do zasobnika PCM będzie się odbywał dzięki zastosowaniu wymienników ciepła w postaci trzech węzłow主任 o takich samych wymiarach (ze względu na zbliżone wartości dziennego uzysku ciepła z poszczególnych pól kolektorów). Każda z węzłow主任 będzie posiadała pięć zwojów o różnej średnicy. Takie rozwiązanie umożliwi uzyskanie równomiernego rozkładu temperatur parafiny zarówno w przekroju poziomym jak i pionowym zasobnika. Natomiast odbiór i przekazywanie ciepła z parafiny do substancji myjącej odbywać się będzie dzięki systemowi pionowych rurek miedzianych. Ze względu na kompleksowość zagadnienia szczegółowe obliczenia dotyczące doboru wymienników ciepła zostaną przedstawione w osobnym artykule.

Podsumowanie

Zaproponowana w pracy instalacja z kolektorami słonecznymi w połączeniu z zasobnikiem PCM pozwoli na ograniczenie zużycia konwencjonalnych nośników energii do produkcji ciepła w Browarze Warka, a także przyczyni się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery.

Uzyskanie wyższego pokrycia zapotrzebowania na ciepło przez instalację do metody CIP (niż otrzymane w toku obliczeń 14%) jest utrudnione ze względu na ograniczoną powierzchnię dachu hali produkcyjnej i rozlewni, a także brak miejsca na terenie zakładu, w którym możliwe jest zamontowanie dodatkowej powierzchni instalacji z kolektorami słonecznymi.

Zastosowany w instalacji zasobnik PCM gwarantuje stałe dostawy energii do metody CIP i pozwala na skuteczne wykorzystanie zmiennej w czasie energii pochodzącej z kolektorów słonecznych. W takim zbiorniku można magazynować duże ilości energii o stosunkowo małej objętości.

Wraz z postępującym rozwojem technologicznym oraz ukierunkowaniem przemysłu energetycznego jak i spożywczego na ograniczanie zużycia paliw konwencjonalnych i stosowanie proekologicznych rozwiązań magazyny ciepła zapewne znajdą szerokie zastosowanie w utrzymaniu stałych dostaw energii w procesach technologicznych.

LITERATURA

- Alva G., Lin Y., Fang G., (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.037
- Diakun J., (2017). Możliwości uaktywnienia mechanicznego oddziaływania w procesie mycia metodą CIP. *Inż. Ap. Chem.*, 56(6), 193-195
- Duffie J. A., Beckman W. A., (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, New Jersey
- EBlinger H. M., (2009). *Handbook of brewing. Process, Technology, Markets*. WILEY-VCH, Weinheim
- Farjana S. H., Huda N., Mahmud M. A. P., Saidur R., (2018). Solar process heat in industrial systems – A global review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 82, 2270-2286. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.065
- Grupa Żywiec S.A., 2012. *Raport odpowiedzialności społecznej Grupy Żywiec za lata 2009-2011* (08.2018): http://raportyospoleczne.pl/wp-content/uploads/2013/09/dokument_1_20121025155921_882.pdf
- Grupa Żywiec S.A., 2017. *Raport wpływu grupy kapitałowej Żywiec za 2016 rok* (08.2018): <https://grupazywiec.pl/wp-content/uploads/2017/08/Wa-rzyny-Lepszy-%C5%9Awiat-Raport-wp-%C5%82ywu-Grupy-Kapita-%C5%82owej-%C5%BBywiec-za-2016-rok-16-sierpnia.compressed.pdf>
- Jia T., Huang J., Li R., He P., Dai Y., (2018). Status and prospect of solar heat for industrial processes in China. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 90, 475-489. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.077
- Konuklu Y., Sahan N., Paksoy H., (2018). Latent heat storage systems. *Comprehensive Energy Systems*, 2, 396-434. DOI: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00231-5
- Mekhilef S., Saidur R., Safari A., (2017). A review on solar energy use in industries. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15, 1770-1790. DOI: 10.1016/j.rser.2010.12.018
- MiIR, 2018. *Dane do obliczeń energetycznych budynków* (08.2018): <https://www.miir.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/charakterystyka-energetyczna-budynkow/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow-1/>
- Rubitherm, (2016). *PCM RT-LINE, Data Sheet: RT54HC*, (08.2018): https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT54HC_EN_31052016.PDF
- Wallerand A. S., Kermani M., Kantor I., Maréchal F., (2018). Optimal heat pump integration in industrial processes. *Appl. Energy.*, 219, 68-92. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.114