



Odzysk i zagospodarowanie niskotemperaturowego ciepła odpadowego w przemysłowej uprawie kiełków warzywnych

Recovery and utilization of low-temperature waste heat in the industrial cultivation of vegetable sprouts



**Dr hab. inż. Marcin Panowski,
prof. PCz.**

ORCID ID: 0000-0002-5773-9733

Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska
marcin.panowski@pcz.pl

Słowa kluczowe: ciepło odpadowe, pompa ciepła, ciepło z procesów wzrostu kiełków

Streszczenie

Wszystkim procesom technologicznym towarzyszy energia odpadowa, która najczęściej występuje w postaci ciepła, w szczególności ciepła niskotemperaturowego. W przypadku przemysłowej uprawy kiełków fasoli Mung, ciepło odpadowe pochodzi nie tylko z procesów technologicznych, ale także z procesów biologicznych. Podczas kiełkowania i wzrostu kiełków fasoli Mung wydzielane są znaczne ilości ciepła, które wraz z wodą schładzającą je podczas podlewania może być zmagazynowane i wykorzystane np. do podgrzania wody zużywanej podczas podlewania kiełków w trakcie uprawy. W pracy zaprezentowano koncepcję i wyniki implementacji systemu dwustopniowego odzysku i zagospodarowania niskotemperaturowego ciepła odpadowego z procesu uprawy kiełków fasoli Mung. Wykazano, że dzięki implementacji płytowego wymiennika ciepła oraz sprężarkowej pompy ciepła istnieje możliwość odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego generowanego przez wzrastające kiełki w ilości ok. 4,95 GJ na pojedynczą partię produkcyjną, co przekłada się na ok. 198 GJ/rok.

Keywords: waste heat, heat pump, heat from sprout growth processes

Abstract

All technological processes are accompanied by waste energy, which most often occurs in the form of heat, particularly low-temperature heat. In the case of industrial cultivation of mung bean sprouts, waste heat comes not only from technological processes but also from biological ones. During the germination and growth of mung bean sprouts, significant amounts of heat are released, which, together with the water used to cool them during irrigation, can be stored and utilized, for example, to heat the water used for irrigating the sprouts during cultivation. This paper presents the concept and results of implementing a two-stage system for the recovery and utilization of low-temperature waste heat from the mung bean sprout cultivation process. It has been shown that by implementing a plate heat exchanger and a compressor heat pump, it is possible to recover and utilize the waste heat generated by the growing sprouts in the amount of approximately 4.95 GJ per production batch, which leads to about 198 GJ per year.

Wstęp

Nieustannie rosnąca presja konkurencyjności firm produkcyjnych oraz coraz to bardziej restrykcyjne wymagania w zakresie oddziaływania ich działalności na środowisko wymuszają konieczność ciągłego dążenia do poprawy efektywności we wszystkich obszarach działalności. Zwykle uwaga skupia się na obszarach związanych z minimalizacją nakładów finansowych na realizację produkcji, a w tym na ograniczanie zużycia zasobów tj. w szczególności zużycia energii. Z jednej strony przekłada się to bezpośrednio na zwiększenie korzyści ekonomicznych, a z drugiej, przyczynia się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Rzadko jednak w tym kontekście rozważa się kwestie związane z odzyskiem i zagospodarowaniem ciepła odpadowego, szczególnie ciepła niskotemperaturowego, pomimo że każdemu procesowi technologicznemu towarzyszy emisja takiego ciepła do otoczenia.

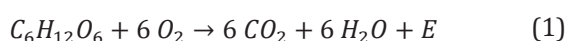
Panuje bowiem powszechne przekonanie, że ciepło odpadowe pochodzące z procesów technologicznych jest czymś naturalnym i skoro jest odpadowym, to nie ma ono żadnej wartości. W konsekwencji takiego podejścia, źródła ciepła odpadowego nie są identyfikowane, ewidencjonowane i analizowane pod kątem potencjału ich wykorzystania. Na zmianę takiego podejścia nie wpływa nawet fakt, że technologie odzysku ciepła (szczególnie niskotemperaturowego) są obecnie powszechne dostępne i wykorzystywane. Dobrym przykładem jest tutaj rynek pomp ciepła, które coraz częściej wykorzystywane są w ogrzewnictwie indywidualnym do przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz ogrzewania budynków. Urządzenia te wykorzystują dostępne ciepło niskotemperaturowe powietrza czy gruntu i poprzez podniesienie potencjału energetycznego ciepła niskotemperaturowego pozwalają na jego skuteczne zagospodarowanie. Co prawda ciepła, które niesie ze sobą powietrze lub jest zmagazynowane w gruncie nie traktuje

się jako ciepło odpadowe, jednak nie zmienia to faktu, że technologie te są dostępne, powszechnie stosowane i mogą być wykorzystane także w celu odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego w procesach przemysłowych.

Znaczenie wykorzystania energii odpadowej zostało zaznaczone przez Unię Europejską w dyrektywie 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, gdzie za „efektywny system ciepłowniczy i chłodniczy” uważa się taki, „w którym do produkcji ciepła lub chłodu wykorzystuje się co najmniej 50% ciepła odpadowego” (European Parliament and Council, 2018). Odzysk ciepła odpadowego cieszy się coraz większym zainteresowaniem, o czym świadczy ilość prac opublikowanych na ten temat w ostatnich latach. Obszar techniczny wykorzystania ciepła odpadowego jest bardzo szeroki, i obejmuje m.in. odzysk ciepła odpadowego w układach ORC (ORC – Organic rankine cycle) (Nematollahi et al., 2019, Uusitalo et al., 2017), w turbinie Tesli (Ji et al., 2019), silnikach Diesel (Baidya et al., 2019, Bombarda et al., 2010) czy też np. w przemyśle ceramicznym (Peris et al., 2017). Szereg badań dotyczy także odzysku ciepła w układach gazowo-parowych (Zhang et al. 2019), elektrowniach (Xu et al., 2018) czy elektrociepłowniach (Zarzycki et al., 2017, Zhang et al., 2019). Tymczasem podczas wielu tych procesów, w tym w szczególności w trakcie produkcji kiełków warzywnych powstają znaczne ilości ciepła, które mogłoby być wykorzystane np. do przygotowywania świeżej wody niezbędnej do podlewania kiełkujących nasion i wzrastających siewek. Odzysk ciepła odpadowego w produkcji kiełków warzywnych jest tym bardziej istotnym zagadnieniem, że w produkcji tej wykorzystuje się znaczne ilości ciepłej wody, a ponadto konieczne jest zapewnienie odpowiedniego środowiska termicznego do prawidłowego wzrostu kiełków. Wykorzystanie w tego rodzaju obiektach ciepła odpadowego może przyczynić się do uzyskania większej sprawności procesu, a co za tym idzie do ograniczenia wykorzystania konwencjonalnych źródeł energii w przedsiębiorstwie, zmniejszając koszty produkcji oraz przyczyniając się do ochrony środowiska naturalnego.

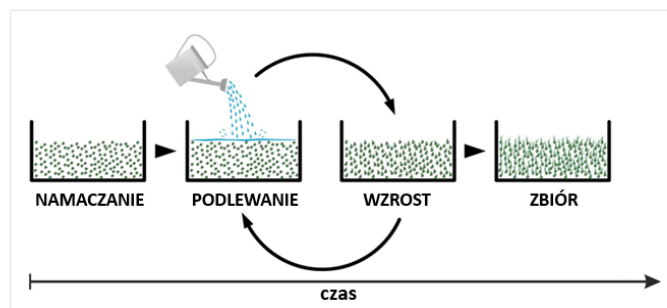
Przemysłowa uprawa kiełków fasoli Mung

Kluczowymi procesami w uprawie kiełków warzywnych na cele spożywcze są kiełkowanie i wzrost siewek. Kiełkowanie zachodzi wewnątrz nasion powodując ożywienie zarodka, a następnie jego wzrost i rozpoczyna się od pobierania wody przez nasiono, a kończy pojawieniem się korzenia (Bewley et al., 2013). W kiełkujących nasionach znajdują się nagromadzone substancje zapasowe, które łącząc się z tlenem powodują powstawanie dwutlenku węgla CO_2 , wody H_2O oraz uwolnienie energii E . Reakcję chemiczną zachodzącą podczas procesu oddychania wewnątrzkomórkowego można opisać sumarycznie równaniem (1) (Bewley, 1997, Bewley et al., 2013).



Według (Solomon et al., 1993) wydajność tego procesu wynosi około 38% w odniesieniu do całkowitej energii zmagazynowanej w nasionach. A zatem, ponad 60% energii E wiązań chemicznych zawartych w glukozie jest tracona pod postacią ciepła. Utworzone podczas utleniania glukozy ATP może dalej ulegać hydrolizie, podczas której rozrywa-

ne są wiązania chemiczne pomiędzy grupami fosforanowymi i uzyskiwana jest w ten sposób energia do tworzenia nowych wiązań. Również podczas tej reakcji część energii jest uwalniana do otoczenia w postaci ciepła (Solomon et al., 1993).

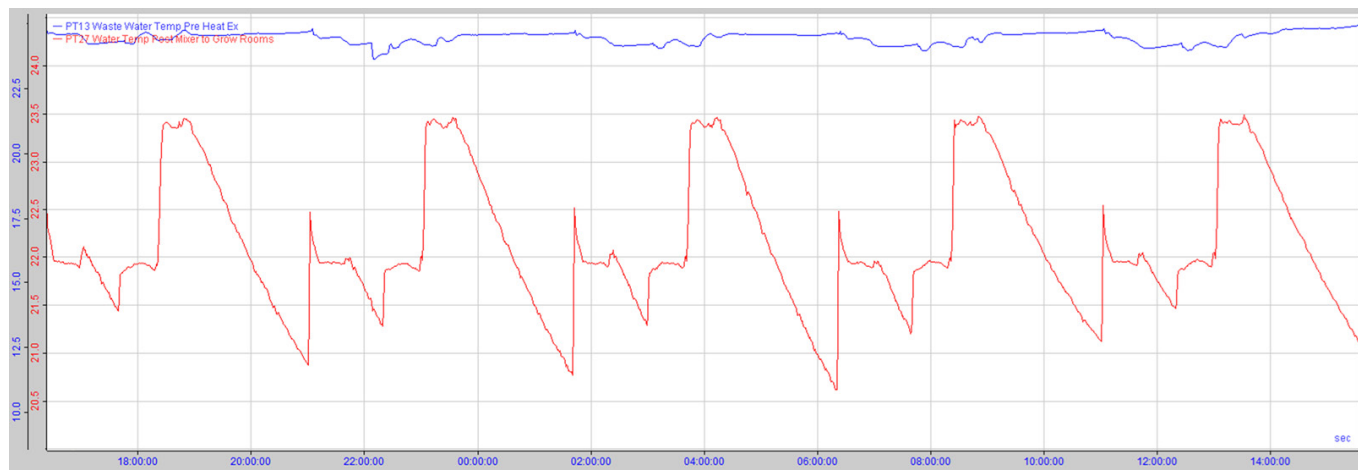


Rys. 1. Uproszczony schemat cyklu uprawy kiełków, Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Simplified diagram of the sprout cultivation cycle, Source: authors' own study

Na rys. 1. przedstawiono uproszczony schemat procesu przemysłowej uprawy kiełków warzywnych, który rozpoczyna się od namoczenia suchych nasion pobranych z magazynu, po którym następują cyklicznie etapy podlewania i wzrostu kiełków. Ponieważ kiełki zarówno podczas kiełkowania jak i późniejszego wzrostu wydzielają ciepło i na skutek tego ulegają podgrzaniu, dla prawidłowego ich rozwoju i nie dopuszczenia do przegrzania kiełków konieczna jest wysoka intensywność podlewania nasion i wzrastających kiełków oraz odpowiednia temperatura wody do tego celu wykorzystywanej. Nie powinna ona być zbyt niska, aby nie doprowadzić do zbyt szybkiego przechłodzenia wzrastających kiełków i jednocześnie nie narażać ich na tzw. szok termiczny. Ponadto, temperatura wody nie powinna być zbyt wysoka, ponieważ powodowałoby to konieczność częstszego podlewania i większe koszty produkcji. W zależności od rodzaju kiełków, woda do podlewania powinna mieć temperaturę w zakresie od ok. 18 do 28°C. Ponieważ woda pobierana z sieci wodno-kanalizacyjnej ma temperaturę ok. 14–15°C, a ze studni głębinowej około 8–9°C, niezbędne jest więc odpowiednie przygotowanie wody poprzez jej podgrzanie. Do tego celu w procesie technologicznym produkcji kiełków wykorzystywane jest zazwyczaj ciepło pochodzące ze spalania paliw konwencjonalnych, tj. gazu czy węgla, co jest kosztowne i negatywnie oddziałuje na środowisko naturalne. Ponieważ jednak ilość ciepła generowanego na skutek procesów biologicznych zachodzących podczas wzrostu kiełków jest znaczna i zazwyczaj energia ta tracona jest do otoczenia wraz z wodą odpadową z procesu podlewania, wykorzystanie jej w celu podgrzania wody zużywanej m.in. do podlewania wydaje się być uzasadnione ekonomicznie.

Z punktu widzenia potencjału odzysku generowanego przez wzrastające kiełki ciepła ważna jest jednak nie tylko ilość tego ciepła i jego rozkład w czasie, ale także poziom temperaturowy nośnika tego ciepła, którym jest woda odbierająca ciepło od kiełków w trakcie ich podlewania. W prezentowanym przypadku uprawy kiełków fasoli Mung, ze względu na praktycznie stałą wielkość strumienia masy zużywanej wody, temperatura wody podgrzanej od kiełków podczas podlewania kształtuje się na stabilnym poziomie ok. 24–25°C i z tego punktu widzenia, jest to



Rys. 2. Wyniki testów stabilności temperatury wody w zbiorniku ciepła odpadowego, Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Results of water temperature stability tests in the waste heat storage tank, Source: authors' own study

ciepło odpadowe o bardzo niskim potencjale energetycznym. Niemniej jednak, ponieważ woda świeża używana do podlewania czerpana jest ze studni głębinowej i charakteryzuje się stabilną temperaturą ok. 8–9°C, potencjał energetyczny ciepła odpadowego pochodzącego od wzrastających kiełków jest wystarczający do wykorzystania do podgrzania wody świeżej.

Koncepcja odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego

Kluczowymi parametrami dla określenia koncepcji odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego w uprawie kiełków fasoli Mung są temperatury wykorzystywanej w uprawie wody, a w szczególności wody świeżej czerpanej ze studni oraz wody odpadowej, stanowiącej magazyn ciepła odpadowego. Na rys. 2 przedstawiono wyniki wstępnych testów stabilności temperatury wody w zbiorniku ciepła odpadowego w czasie.

Testy stabilności przeprowadzono w zaprogramowanym eksperymencie badawczym, polegającym na pomiarze temperatury wody w magazynie ciepła odpadowego w zależności od temperatury wody wykorzystywanej do podlewania kiełków. Na rys. 2 przedstawiono wybrane rezultaty pomiarów temperatury wody w zbiorniku ciepła odpadowego oraz odpowiadający mu przykładowy przebieg temperatury wody używanej do podlewania kiełków w wybranej komorze wzrostowej. Z przeprowadzonych pomiarów i analiz wynika, że temperatura w zbiorniku ciepła odpadowego jest praktycznie stała i nie zależy ona od aktualnej temperatury wody jaką podlewane są wzrastające kiełki. To z kolei wynika z faktu, że ze względu na skalę produkcji kiełków, uprawa realizowana jest jednocześnie w sześciu komorach wzrostowych, które pracują z przesunięciem czasowym. Oznacza to, że cykl uprawy w każdej z komór rozpoczyna się z przesunięciem czasowym, a także kolejne cykle podlewania w komorach realizowane są w różnym czasie. Jeżeli zatem w jednej z komór kiełki znajdują się na początkowym etapie wzrostu i wykorzystywana jest w podlewaniu woda o wyższej temperaturze, to w krótkim czasie kolejne podlewanie realizowane jest w komorze wzrostowej, w której kiełki znajdują się na etapie końcowym wzrostu, w którym wykorzystuje się do podlewania wodę o temperaturze niższej. To powoduje naturalne uśrednienie temperatury wody w zbiorniku ciepła odpadowego, a ponieważ charakteryzuje się on dużą pojemnością (duża objętość i tym samym pojemność

cieplna), to wahania temperatury w zbiorniku ciepła odpadowego są niewielkie.

Ponieważ ilość generowanego przez wzrastające kiełki ciepła zmienia się istotnie w ciągu cyklu uprawy, konieczne jest zapewnienie dostaw używanej do podlewania wody o różnej temperaturze, na różnych etapach cyklu. Zakres zmienności jest tutaj dość duży i kształtuje się na poziomie ok. 10°C, w granicach 18–28°C. Ze względu na konieczną regulacyjność temperatury wody wprowadzanej podczas podlewania do komory wzrostowej, woda powinna być dostępna na dwóch poziomach temperatur (woda ciepła i woda chłodna). Zmieszanie w odpowiednich proporcjach wody o różnych temperaturach pozwala na dowolne kształtowanie ostatecznej temperatury wody wprowadzanej do komory wzrostowej.

Ostatecznie parametry temperaturowe wody wykorzystywanej w uprawie kiełków fasoli Mung zestawiono w tabeli 1.

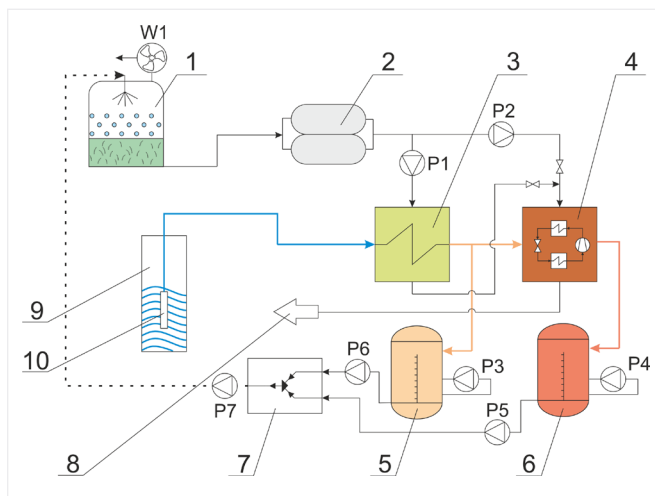
Tabela 1. Temperatury wody świeżej i brudnej (ciepła odpadowego) w uprawie kiełków fasoli Mung, Źródło: opracowanie własne

Table 1. Fresh water and wastewater (waste heat) temperatures in mung bean sprout cultivation, Source: authors' own study

Rodzaj wykorzystywanej wody	Temperatura (°C)
Woda świeża (ze studni głębinowej)	8–9
Woda brudna (ciepło odpadowe)	24–25
Woda chłodna (do mieszania)	18–21
Woda ciepła (do mieszania)	25–28

Zamieszczone w tabeli. 1 zakresy temperatury wody wskazują na istnienie technicznego potencjału odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego z procesów biologicznych zachodzących podczas kiełkowania nasion i wzrostu kiełków fasoli Mung. W konsekwencji występującej temperatury wody dostępnej i używanej w uprawie, a także konieczności zapewnienia niezbędnej regulacyjności temperatury wody wprowadzanej do komory wzrostowej, sformułowano schemat układu odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego w uprawie kiełków fasoli Mung, który zaprezentowano na rys. 3.

Zgodnie z zaprezentowaną koncepcją, woda wprowadzana do komór wzrostowych w trakcie podlewania wzrastających kiełków podgrzewa się, odbierając ciepło generowane na skutek procesów biologicznych zachodzą-



Rys. 3. Koncepcja układu odzysku i zagospodarowania ciepła odpadowego w uprawie kiełków fasoli Mung (Stanek et al., 2021) (1 – komory wzrostowe; 2 – zbiorniki wody brudnej/ ciepła odpadowego; 3 – wymiennik ciepła – pierwszy stopień podgrzewu; 4 – sprężarkowa pompa ciepła – drugi stopień podgrzewu; 5 – zbiornik wody chłodnej; 6 – zbiornik wody ciepłej; 7 – mikser; 8 – odprowadzenie do ścieków; 9 – studnia głębinowa; 10 – pompa głębinowa; P1–P7 – pompy wody; W1 – wentylator wyciągowy powietrza)

Fig. 3. Concept of a waste heat recovery and utilization system in mung bean sprout cultivation (Stanek et al., 2021) (1 – growth chambers; 2 – wastewater/waste heat storage tanks; 3 – heat exchanger – first-stage heating; 4 – compression heat pump – second-stage heating; 5 – cold water tank; 6 – hot water tank; 7 – mixer; 8 – discharge to sewer; 9 – deep well; 10 – deep-well pump; P1–P7 – water pumps; W1 – exhaust air fan)

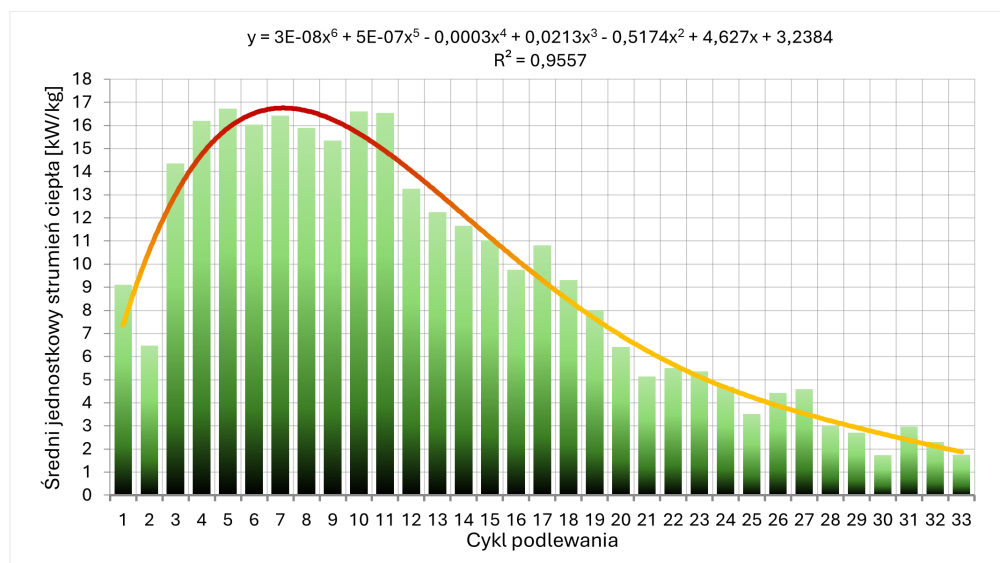
cych w kiełkach podczas ich wzrostu. Podgrzana woda (woda brudna – odpadowa) jest gromadzona w zbiorniku wody brudnej, będącym jednocześnie akumulatorem ciepła odpadowego. Ciepło odpadowe odzyskiwane jest w dwustopniowym procesie podgrzewu wody świeżej, w którym w pierwszej kolejności woda świeża czerpana ze studni podgrzewana jest w płytowym powierzchniowym wymienniku ciepła. Zastosowanie wymiennika płytowego pozwala na podgrzanie wody świeżej do poziomu 18–21°C i zmagazynowanie części wody w zbiorniku wody chłodnej. Pozostała (nie zmagazynowana w zbiorniku wody chłodnej) część wody kierowana jest na drugi stopień podgrzewu, gdzie dzięki zastosowaniu sprężarkowej pompy ciepła podnoszony jest jej potencjał energetyczny, a woda osiąga temperaturę w zakresie 25–28°C. Zastosowanie pompy ciepła jest niezbędne dla osiągnięcia odpowiedniej regulacyjności temperatury wody używanej do podlewania, ponieważ temperatura wody w magazynie energii jest zbyt niska do zastosowania wyłącznie wymiennika ciepła.

Przy tej okazji należy zwrócić uwagę na istotny fakt odróżniający eksploatację sprę-

żarkowych pomp ciepła w warunkach przemysłowych (tj. głównie powietrznych pomp ciepła) od ich eksploatacji w ciepłownictwie indywidualnym do ogrzewania i przygotowania CWU w budynkach jednorodzinnych. W warunkach przemysłowych bowiem, ciepło odpadowe zwykle charakteryzuje się dużą stabilnością temperaturową nośnika, co jest niezwykle korzystne dla efektywnej eksploatacji pomp ciepła. Dzięki stabilności temperatury nośnika ciepła odpadowego, pompy ciepła mogą pracować w trybie ciągłym z praktycznie stałym współczynnikiem COP, a ponadto pompy ciepła zaprojektowane dla takich warunków charakteryzują się znacznie wyższym współczynnikiem COP. W prezentowanym układzie odzysku ciepła z procesów biologicznych zachodzących podczas wzrostu kiełków fasoli Mung, zaimplementowana i zoptymalizowana pod kątem odzysku ciepła pompa charakteryzuje się wartością $COP \approx 7,5$, podczas gdy nawet dla pomp ciepła z wymiennikiem gruntowym, COP kształtuje się na poziomie $COP \approx 5\text{--}5,5$. Uzyskanie tak wysokiego współczynnika wydajności cieplnej COP było także możliwe dzięki zastosowaniu glikolowego bufora cieplnego o stałej temperaturze. Pozwoliło to w jeszcze większym stopniu ustabilizować warunki pracy pompy ciepła, choć wymagało zabudowania dodatkowego wymiennika ciepła glikol-woda, umożliwiającego przekazanie ciepła, generowanego przez pompę ciepła, wodzie wykorzystywanej w uprawie.

Odzysk i zagospodarowanie ciepła odpadowego w warunkach rzeczywistych

W celu określenia dostępnej ilości ciepła odpadowego pochodzącego z procesów biologicznych zachodzących podczas wzrostu kiełków przeprowadzono pomiary eksperymentalne na rzeczywistej instalacji. Pomiary zrealizowano dla pojedynczej komory wzrostowej, a wyznaczone na ich podstawie wartości średniego jednostkowego strumienia ciepła generowanego przez wzrastające kiełki fasoli Mung podczas pełnego cyklu uprawy, odniesiono do 1 kg suchych nasion i zaprezentowano na rys. 4.



Rys. 4. Średni jednostkowy strumień ciepła odbieranego przez wodę od masy biologicznej, Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Average specific heat flux absorbed by water from the biological mass, Source: authors' own study

Rozkład ciepła generowanego przez kiełki w trakcie całego cyklu produkcyjnego nie jest jednorodny. Na początku uprawy ilość generowanego ciepła intensywnie wzrasta, a po osiągnięciu maksimum w okolicy $\frac{1}{4}$ cyklu produkcyjnego zaczyna stopniowo spadać. Taki charakter przebiegu jest konsekwencją sposobu realizacji procesu uprawy, który prowadzony jest w całkowitej ciemności, a w jej trakcie wzrost masy biologicznej odbywa się wyłącznie dzięki substancjom odżywczym zmagazynowanym w nasionach. Na początku cyklu produkcyjnego gęstość energii odniesiona do masy nasion jest duża, a procesy wzrostowe dynamiczne, co przekłada się na wzrost nie tylko ilości masy kiełków, ale także generowanego ciepła. W dalszych etapach cyklu produkcyjnego procesy wzrostowe są mniej dynamiczne, większość energii zużywanej przez kiełki zostaje przekształcona w masę kiełków, a nie w ciepło i konsekwentnie gęstość energii maleje. Należy mieć na uwadze, że zmienna w czasie ilość generowanego ciepła nie wpływa na stabilność temperatury w zbiorniku wody brudnej, tj. magazynie ciepła odpadowego, ze względu na zmienną temperaturę wody zużywanej do podlewania oraz pracę komór wzrostowych z przesunięciem czasowym.

Odzysk i zagospodarowanie ciepła odpadowego z procesów biologicznych w warunkach rzeczywistych został zrealizowany zgodnie z zaprezentowaną koncepcją. Pierwszy stopień podgrzewu świeżej wody ze studni głębinowej realizowany jest przez przeciwprądowy wymiennik ciepła (HE1), a uzyskiwany na nim przyrost temperatury wody świeżej kształtuje się na średnim poziomie ok. 10–11°C. Wymiennik HE1 osiąga maksymalną moc na poziomie 583 kW, co stanowi 58,3% jego nominalnej mocy. To „przewymiarowanie” wymiennika HE1 wynika z wyników przeprowadzonych wcześniej symulacji numerycznych, w których analizowano różne scenariusze produkcyjne, m.in. skutkujące większym zapotrzebowaniem na ciepło odpadowe (scenariusze z większym zapotrzebowaniem na wodę do podlewania).

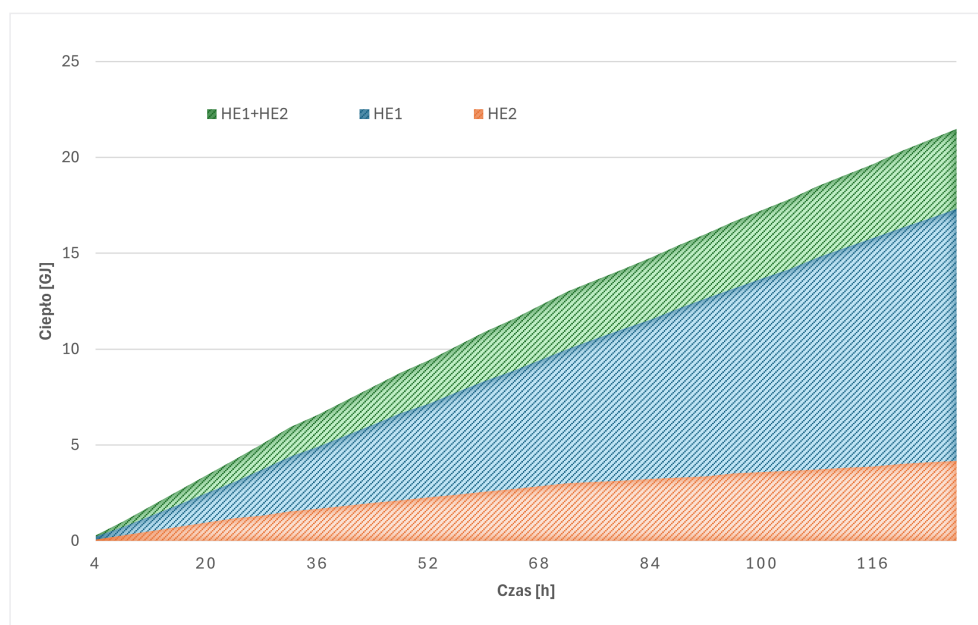
Drugi stopień podgrzewu wody realizowany jest przez

sprężarkową pompę ciepła zintegrowaną z glikolowym magazynem ciepła oraz wymiennikiem ciepła HE2 typu glikol-woda. Do tego układu kierowana jest część wody świeżej z wymiennika HE1, gdzie za pośrednictwem wymiennika HE2 podgrzewana jest ona do założonego poziomu. Średni przyrost temperatury wody świeżej w wymienniku HE2 kształtuje się na poziomie ok. 7,5°C, a pompa ciepła stabilnie zasila bufor glikolowy, w którym temperatura kształtuje się na praktycznie niezmiennym poziomie 50°C. Wymiennik ciepła HE2 osiąga maksymalną moc na poziomie 227,5 kW i jego średnia moc jest o ponad połowę mniejsza od mocy wymiennika HE1. Wynika to bezpośrednio z faktu znacznie mniejszego natężenia przepływu wody świeżej przez tę część instalacji, a także mniejszego poziomu jej podgrzania.

Podsumowanie

Przedstawione rezultaty implementacji systemu odzysku i zagospodarowania niskotemperaturowego ciepła odpadowego, pochodzącego z procesów biologicznych zachodzących podczas kiełkowania i wzrostu kiełków fasoli Mung wskazują, że nawet niskotemperaturowe ciepło odpadowe może być z powodzeniem odzyskiwane i zagospodarowywane. W zaprezentowanym przykładzie, całkowita ilość energii odpadowej odzyskanej i zagospodarowanej w pełnym cyklu uprawy kiełków fasoli Mung wyniosła ok. 22,18 GJ. Skumulowany wykres odzyskanego i zagospodarowanego ciepła odpadowego zaprezentowano na rys. 5.

Całkowita ilość energii odzwierciedla pełne zapotrzebowanie partii produkcyjnej (jednej komory wzrostowej) na ciepło niezbędne dla podgrzania wody zużywanej do podlewania kiełków w trakcie pełnego cyklu produkcyjnego. Na pierwszym stopniu podgrzewu odzyskiwane jest ok. 17,87 GJ, a na drugim – ok. 4,31 GJ. Ciepło odzyskane na pierwszym stopniu podgrzewu stanowi więc ok. 80,6% wartości całkowitej. Jak wynika z rys. 5, przebieg zmiany ilości ciepła odzyskiwanego przez wymiennik HE2 ulega spłaszczeniu w drugiej części cyklu produkcyjnego, co związane jest z niższą temperaturą wody wymaganej do podlewania roślin. Biorąc pod uwagę ilość energii potrzebnej do podgrzania wody świeżej do wymaganej temperatury (22,18 GJ) oraz rzeczywistą ilość energii generowanej z procesów wzrostowych możliwą do odzyskania z kiełków (ok. 4,95 GJ z pojedynczego cyklu uprawy, tj. ok. 198 GJ/rok (Słomczyńska et al., 2023)) wyraźnie widać, że nie ma możliwości przygotowania wody do podlewania roślin tylko przy wykorzystaniu ciepła odpadowego z produkcji kiełków i konieczne jest wykorzystanie innych źródeł ciepła. W zaprezentowanym przykładzie ciepło odpadowe pochodzi z 6 pracujących komór wzro-



Rys. 5. Skumulowana ilość energii odzyskanej i zagospodarowanej w pełnym cyklu uprawy, Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Cumulative amount of energy recovered and utilized over the full cultivation cycle, Source: authors' own study

stowych, a zatem całkowita ilość odzyskanego ze wszystkich komór ciepła (z procesów biologicznych) wynosi ok. 29,7 GJ. Stąd bezpośrednio wynika, że ciepło odzyskane z 5 komór wzrostowych pozwala pokryć zapotrzebowanie na ciepło jednej komory wzrostowej.

Bibliografia

Baidya, D., de Brito, M. A. R., Sasmito, A. P., Scoble, M., & Ghoreishi-Madiseh, S. A. (2019). Recovering waste heat from diesel generator exhaust; an opportunity for combined heat and power generation in remote Canadian mines. *Journal of Cleaner Production*, 225, 785-805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.340>

Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The plant cell*, 9(7), 1055. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>

Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy (3rd ed.). *Springer New York*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4> (Dostęp z dnia 15.01.2026)

Bombarda, P., Invernizzi, C. M., & Pietra, C. (2010). Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. *Applied thermal engineering*, 30(2-3), 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.08.006>

European Parliament and Council. (2018). Directive (EU) 2018/2002 of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Official Journal of the European Union, L 328, pp. 210–230). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32018L2002> (Dostęp z dnia 15.01.2026)

Ji, F., Bao, Y., Zhou, Y., Du, F., Zhu, H., Zhao, S., ... & Ding, S. (2019). Investigation on performance and implementation of Tesla turbine in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 179, 326-338. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.071>

Nematollahi, O., Hajabdollahi, Z., Hoghooghi, H., & Kim, K. C. (2019). An evaluation of wind turbine waste heat recovery using organic Rankine cycle. *Journal of Cleaner Production*, 214, 705-716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.009>

Peris, B., Navarro-Esbrí, J., Molés, F., & Mota-Babiloni, A. (2015). Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. *Energy*, 85, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.065>

Słomczyńska, K., Mirek, P., & Panowski, M. (2023). Analysis of the Potential for Reducing the Energy Consumption of a Vegetable Sprouts Production Using Flownex Simulation Software. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 17(5). <https://doi.org/10.12913/22998624/170944>

Solomon, E. P., Villee, C. A., Berg, L., & Martin, D. W. (1993). Biology (3rd ed.). *Saunders College Pub.* <https://archive.org/details/biology00solo> (Dostęp z dnia 15.01.2026)

Stanek, M., & Panowski, M. (2021). Sposób przygotowania świeżej wody na potrzeby podlewania w uprawie kiełków warzywnych, w szczególności kiełków fasoli Mung (Patent RP nr 243296). *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*.

Uusitalo, A., Honkatukia, J., & Turunen-Saaresti, T. (2017). Evaluation of a small-scale waste heat recovery organic Rankine cycle. *Applied Energy*, 192, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.088>

Xu, Z. Y., Mao, H. C., Liu, D. S., & Wang, R. Z. (2018). Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps. *Energy*, 165, 1097-1105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.052>

Zarzycki, R., & Panowski, M. (2017). Wykorzystanie ciepła odpadowego w procesie skojarzonego wytwarzania energii. *Mechanik*, 03/2017. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.45>

Zhang HongSheng, Z. H., Zhao HongBin, Z. H., & Li ZhenLin, L. Z. (2019). Waste heat recovery and water-saving modification for a water-cooled gas-steam combined cycle cogeneration system with absorption heat pump. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.051>

Zhang, Q., Gao, J., Wang, Y., Wang, L., Yu, Z., & Song, D. (2019). Exergy-based analysis combined with LCA for waste heat recovery in coal-fired CHP plants. *Energy*, 169, 247-262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.017>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Certyfikacja kwalifikacji zawodowych PZITS

PZITS prowadzi proces **certyfikacji serwisantów małych oczyszczalni ścieków**, obejmujący weryfikację wiedzy i umiejętności przed komisją. Pozytywna ocena skutkuje wpisem na oficjalną listę certyfikowanych specjalistów.

Szczegóły: www.pzits.pl/mos