

Koordynator: Artur WYRWA

Marian BANAŚ (4), Andrzej BIEŃ (5), Rafał BUCZYŃSKI (2), Grzegorz BRUS (1), Elżbieta FORNALIK-WAJS (1), Andrzej GOŁDASZ (5), Marek JASZCZUR (1), Wojciech KALAWA (5), Ryszard KLEMPKA (5), Paweł KWASNOWSKI (8), Łukasz LIS (5), Piotr MICHALAK (7), Łukasz MIKA (3, 5), Tadeusz PAJĄK (4), Ewelina RADOMSKA (6), Karol SZTEKLER (5)

I. Efektywność wytwarzania i użytkowania energii

Abstrakt: Artykuł prezentuje wybrane działania badawcze trzech wydziałów AGH w obszarze efektywności wytwarzania i użytkowania energii, ze szczególnym uwzględnieniem energetyki rozproszonej. Opisano w nim zagadnienia związane z procesami spalania, chłodzenia, zarządzania energią w budynkach oraz integracją OZE i magazynów energii. Uwzględniono również rozwój metod oceny inteligencji energetycznej budynków (SRI) oraz modelowanie systemów hybrydowych. Prace wspierają transformację energetyczną i rozwój nowoczesnych rozwiązań lokalnych.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, transport ciepła, masy i pędu, procesy spalania, chłodzenie przemysłowe, odzysk ciepła, odnawialne źródła energii (OZE), magazyny energii, odsalanie wody, inteligentne budynki, wskaźnik SRI

W obliczu dynamicznie postępującej transformacji energetycznej coraz większego znaczenia nabiera efektywność wytwarzania i użytkowania energii. To właśnie ona – rozumiana nie tylko jako sprawność procesów technicznych, ale również jako optymalne gospodarowanie zasobami i energią końcową – staje się fundamentem dla budowy nowoczesnych, zdecentralizowanych systemów energetycznych. Artykuł ten stanowi przegląd aktualnych kierunków badań i wdrożeń w obszarze efektywności energetycznej, realizowanych w zespołach badawczych trzech wydziałów Akademii Górniczo-Hutniczej: Wydziału Energetyki i Paliw, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej oraz Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Obejmują one zarówno naukowe podstawy transferu ciepła i masy, jak i zastosowania przemysłowe oraz rozwiązania kierowane

do sektora komunalnego i budynków. W artykule przedstawiono przykłady działań ukierunkowanych na poprawę sprawności procesów spalania, optymalizację zużycia energii w przemyśle, innowacyjne systemy chłodzenia kopalń oraz ocenę inteligencji energetycznej budynków z wykorzystaniem wskaźnika SRI. Uwzględniono również zagadnienia związane z odnawialnymi źródłami energii, w szczególności z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego, oraz ich integracją z technologiami magazynowania i modelowaniem systemów hybrydowych.

1. Nauka jako wsparcie rozwoju efektywności energetycznej

Efektywność energetyczna, będąca jednym z filarów transformacji energetycznej, wymaga nie tylko innowacyjnych rozwiązań technologicznych, ale także solidnej bazy naukowej. Badania podstawowe, ukierunkowane na zrozumienie mechanizmów transportu ciepła, masy i pędu, stanowią fundament dla rozwoju nowoczesnych systemów energetycznych. Poniżej omówiono rolę badań podstawowych w kształtowaniu efektywnych i niskoemisyjnych technologii oraz przedstawiono wybrane przykłady z działalności naukowej prowadzonej w Katedrze Podstawowych Problemów Energetyki.

1.1. Badania podstawowe dla efektywnej energetyki

Wśród krajowych jednostek aktywnie prowadzących badania podstawowe na potrzeby energetyki wyróżnia się Katedra Podstawowych Problemów Energetyki na Wydziale Energetyki i Paliw AGH. Misją jednostki jest badanie mechanizmów transportu ciepła i masy oraz opracowywanie rozwiązań pozwalających wykorzystać zdobytą wiedzę w praktyce przemysłowej i naukowej. Katedra dysponuje nowoczesną infrastrukturą obliczeniową umożliwiającą prowadzenie symulacji CFD od poziomu *reynolds-averaged navier-stokes* i *large eddy simulation* aż po bezpośrednie odwzorowanie turbulencji metodami DNS. Równolegle rozwijane są laboratoria PIV, silnych pól magnetycznych oraz zaawansowanych pomiarów termicznych, co pozwala łączyć precyzyjne eksperymenty z walidacją modeli numerycznych. Takie podejście sprzyja transferowi wyników do przemysłu – od branży HVAC do budynków nZEB – a także rozwijaniu koncepcji przyszłościowych wysokotemperaturowych układów reaktorów jądrowych.

1.2. Opis działań naukowych

Jeden z kierunków badań Katedry dotyczy symulacji numerycznych DNS. Wieloletnie prace nad bazą danych DNS dla turbulentnego przepływu z cząstkami w ogrzewanym kanale umożliwiły walidację modeli LES/RANS stosowanych dziś w komercyjnych i open-source'owych solverach CFD (Jaszczur 2014). Zgromadzone wyniki stały się punktem odniesienia przy bilansowaniu dyspersji i opracowaniu korekt modeli podsiatkowych, co przekłada się na dokładniejsze prognozy procesów przepływowych występujących w energetyce i ochronie środowiska.

Innym obszarem zainteresowań są badania nad strugami, zwłaszcza uderzającymi (od pojedynczej po układy wielu strug), prowadzone z wykorzystaniem zaawansowanych modeli turbulencji (ζ -f, k- ω , k-e, SST *kato-launder*, RNG, *intermittency transition*). Pozwoliło to wyznaczyć miarę intensywności wymiany ciepła

dla różnych modeli RANS (Gurgul et Fornalik-Wajs 2024) oraz wskazać wpływ geometrii (powierzchni płaskich, wklęsłych i wypukłych) na lokalny rozkład liczby Nusselta (Gurgul et al. 2020, Kura et al. 2021). Wyniki posłużyły do analizy prototypowego cylindrycznego wymiennika MJHE oraz płytowego minikanalowego wymiennika dla mikroturbin gazowych pracujących z powietrzem o temperaturze ~ 1000 °C (Wajs et al. 2019, 2022).

Unikatowe badania prowadzone w Katedrze dotyczą magnetycznej kontroli konwekcji płynów jedno- i wielofazowych (nanopłynów). W silnych statycznych polach magnetycznych analizowano zarówno konwekcję naturalną, jak i wymuszoną. Ustalono, że siła magnetyczna może zwiększyć od 5 do 15 razy transport strumienia ciepła w sześciennym grzonym, nawet przy stabilnym nagrzewaniu od góry (Kenjeres 2020). W nanopłynach zaobserwowano modyfikację struktury przepływu wskutek współdziałania gradientów temperatury i pola magnetycznego (Fornalik-Wajs et al. 2020). Analizy konwekcji wymuszonej w warunkach bez grawitacji wykazały poprawę transportu ciepła dzięki wpływowi silnego pola magnetycznego, któremu mogą towarzyszyć modyfikacje struktury przepływu zapobiegające sedymentacji cząstek stałych (Pleskacz et al. 2020).

Kolejnym podejmowanym przez Katedrę tematem badawczym jest termohydraulika reaktorów wysokotemperaturowych. W ramach programu GOSPO-STRATEG-HTR przeprowadzono analizę numeryczną procesów transportu energii w rdzeniu reaktora jądrowego typu HTGR o mocy 40-MW z wykorzystaniem Ansys Fluent, a następnie porównano ją z analizami wykonanymi za pomocą programu MELCOR, identyfikując ograniczenia i zakres wzajemnej komplementarności obydwu podejść (Gurgul et al. 2022). Jednostka prowadzi również zaawansowane analizy termodynamiczne systemów energetycznych. Przykładem takich działań może być analiza układu z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym HTR sprzężonym z układem turbin gazowych i parowych (GTCC). Jej wyniki posłużyły do opracowania strategii sterowania i oceny bezpieczeństwa w warunkach awaryjnych

oraz do oceny efektywności hybrydowego cyklu GTCC, w którym sprawność układu przekracza 50% (Jaszczur et al. 2019b).

Jako nowe kierunki badawcze w Katedrze rozwijane są badania z zakresu systemów OZE, HVAC oraz magazynowania energii w gruncie. Opracowano prototyp przeciwprądowego wymiennika ciepła i wilgoci zaprojektowany na potrzeby wentylacji budynków nZEB. Zaproponowane rozwiązanie uzyskuje sprawność temperaturową $> 80\%$ przy $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, bez ryzyka oszronienia (Kleszcze et al. 2023). Równolegle wykonano model górotworu do oceny długoterminowego potencjału gruntowych wymienników ciepła, uwzględniający parowanie i strumień geotermiczny – elementy kluczowe dla wymienników o głębokości ponad 100 m (Jaszczur et al. 2017, Jaszczur et al. 2013). Z kolei badania nad zanieczyszczeniami modułów PV w warunkach miejskich wykazały spadek mocy rzędu 2,1% przy osadzie 300 mg/m^2 oraz potencjalne zjawisko wzrostu transmisyjności dla cienkich warstw pyłu (Jaszczur et al. 2019a).

Innym interesującym zagadnieniem są zjawiska zachodzące podczas produkcji monokryształów metodą Bridgmana. Badania konwekcji naturalnej ujawniły przejście od struktur stabilnych do termosyfonowych wraz ze wzrostem liczby Rayleigha, a tym samym wyjaśniły nierównomierności struktury ziaren krzemu (Szmyd et al. 2002). Uzyskane wyniki dostarczyły wiedzy niezbędnej dla przemysłu półprzewodnikowego i dla projektowania procesów wysokotemperaturowych.

Jednym z najnowszych kierunków badań rozwijanych w Katedrze są zaawansowane modele numeryczne opisujące zjawiska transportu w mikroskali i degradację mikrostruktur elektrod ogniów paliwowych typu SOFC oraz przebieg reformingu metanu. Wykorzystują one m.in. metodę pól fazowych (Prokop et al. 2024), tomografię FIB-SEM i topologiczną analizę danych (Pawłowski et al. 2023, Szemer et al. 2025), a także algorytmy ewolucyjne do wielokryterialnej optymalizacji reaktorów katalitycznych (Pająk et al. 2021, 2023) i CFD przy projektowaniu reaktorów membranowych do metanizacji CO_2 (Sato et al. 2024).

Równolegle badacze łączą klasyczne modele z sieciami neuronowymi w układy *grey-box*, podnosząc dokładność symulacji przy mniejszej liczbie danych eksperymentalnych (Buchaniec et al. 2021, Gnatowski et al. 2023). Dzięki temu holistycznemu podejściu – łączącemu metody numeryczne, optymalizacyjne i sztuczną inteligencję – zespół oferuje narzędzia do projektowania i analizy procesów energetycznych od skali mikrostrukturalnej po procesową.

1.3. Podsumowanie

Katedra Podstawowych Problemów Energetyki działa w pełnym cyklu badawczym – od podstawowych analiz eksperymentalnych i numerycznych po projektowanie i walidację prototypowych urządzeń energetycznych. Synergia zaawansowanego modelowania komputerowego, unikatowych laboratoriów i współpracy międzynarodowej przekłada się na rozwiązania służące poprawie sprawności i bezpieczeństwa systemów energetycznych. Wyniki uzyskane w ramach prac Katedry zyskały uznanie w gremiach międzynarodowych i przyczyniły się do powstania nowych technologii energetycznych. Podejście interdyscyplinarne oraz ciągła aktualizacja metod pomiarowych i obliczeniowych pozwalają skutecznie odpowiadać na dynamiczne wyzwania sektora energii, co staje się szczególnie ważne w kontekście trwającej transformacji energetycznej.

2. Efektywność w energetyce i przemyśle koksowniczym

Jednym z kierunków rozwoju technologii energetycznych w przemyśle, w tym w energetyce i koksownictwie, jest wdrażanie zaawansowanych metod spalania o podwyższonej efektywności energetycznej i obniżonej emisji zanieczyszczeń. Przykładem takich rozwiązań są technologie niskogradientowego spalania (inaczej spalanie bezpłomieniowe – *low-gradient combustion*, HiTAC, FLOX, MILD, CDC czy *distributed combustion*).

2.1. Spalanie bezpłomieniowe

Proces spalania w reżimie bezpłomieniowym jest wywołany przez podgrzew utleniacza (powietrze, tlen) powyżej temperatury samozapłonu paliwa oraz wymuszenie intensywnej recyrkulacji spalin do strefy płomienia (reakcji). Można to osiągnąć poprzez wprowadzenie powietrza z dużą prędkością do komory spalania, w odpowiednim miejscu i pod odpowiednim kątem. Istnieje także możliwość zewnętrznej recyrkulacji, z wykorzystaniem odpowiedniego urządzenia (np. wentylatora). Dodatkowo można zastosować także dobrze znany rozdział powietrza i paliwa (Buczyński et al. 2022). Precyzyjne dostosowanie tych rozwiązań do rodzaju paliwa i warunków spalania (np. współczynnika nadmiaru powietrza czy stopnia odbioru ciepła z komory spalania) pozwala znacząco obniżyć temperaturę płomienia oraz ograniczyć emisję szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), a także obniżyć hałas. Ze względu na wspomnianą już recyrkulację spalin ewentualny odbiór ciepła z komory spalania również ulega zauważalnej intensyfikacji. Stwarza to perspektywę na wymierną poprawę sprawności cieplnej procesu. Cechą charakterystyczną reżimu niskogradientowego jest równomierny rozkład temperatury i stężeń reagentów w całej objętości komory spalania. Skutkuje to eliminacją lokalnych stref, w których panują wysokie temperatury (tzw. *hot spots*). Odpowiednie dopasowanie wszystkich wspomnianych wcześniej parametrów determinujących efektywność technologii niskogradientowej do konkretnego układu spalania wymaga zastosowania odpowiedniego podejścia. Zamiast kosztownych i czasochłonnych badań można zastosować odpowiednio dobrane metody numeryczne. Precyzyjna optymalizacja procesu spalania, zarówno w skali przemysłowej, jak i laboratoryjnej, możliwa jest dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod obliczeniowych. Techniki symulacyjne wykorzystujące jako bazę numeryczną mechanikę płynów (*computational fluid dynamics*), a dodatkowo czerpiące z modeli spalania, turbulencji, transportu ciepła, promieniowania itp.,

pozwalają szczegółowo przewidzieć rozptyw strug powietrza i paliwa wewnątrz reaktora, proces ich mieszania i spalania oraz tworzenie się szkodliwych związków chemicznych. Uprozczone modele procesowe, np. specjalne modele zero- i jednowymiarowe (np. w postaci sieci hydraulicznej), to kolejny sposób na optymalizację procesów związanych z konwersją paliw. Takie podejście umożliwia szybkie analizowanie wielu wariantów konstrukcyjnych i operacyjnych dla różnego rodzaju rozwiązań technologicznych, a także znacząco przyspiesza i ułatwia projektowanie i sterowanie procesem. Dzięki wykorzystaniu obu strategii modelowania możliwe staje się projektowanie i wdrażanie rozwiązań technologicznych, które łączą wysoką sprawność z minimalnym wpływem na środowisko naturalne. Zespół Modelowania i Optymalizacji Komputerowej w Katedrze Technologii Paliw AGH zajmuje się badaniem nowoczesnych technologii przemysłowych oraz opracowywaniem precyzyjnych (szczegółowych) modeli komputerowych i modeli procesowych służących do sterowania procesami technologicznymi i ich optymalizacji.

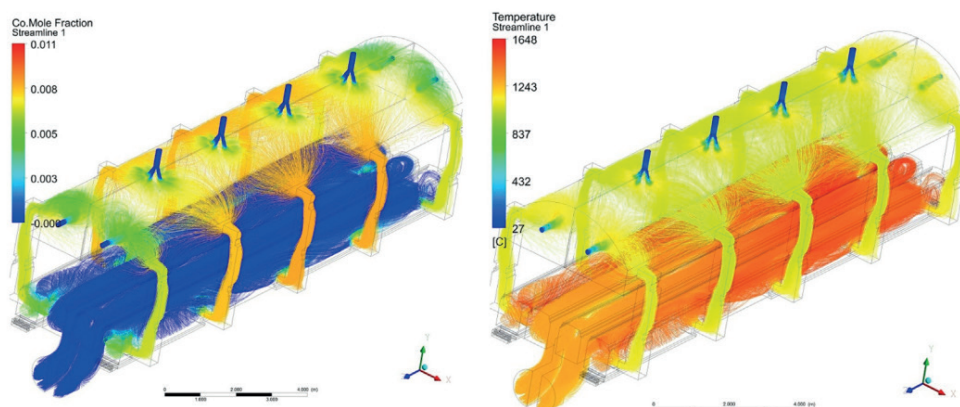
2.2. Przykładowe wyniki

Poniżej pokazano przykładowe wyniki symulacji numerycznych prowadzonych w celu optymalizacji procesu spalania w koksowniach dwuproduktowych (Rys. 1–2) i konwencjonalnych (Rys. 3). Szczegóły analiz można znaleźć w artykułach przygotowanych przez zespół (Buczyński et al. 2022a, 2022b, Buczyński et al. 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2018a, 2018b).

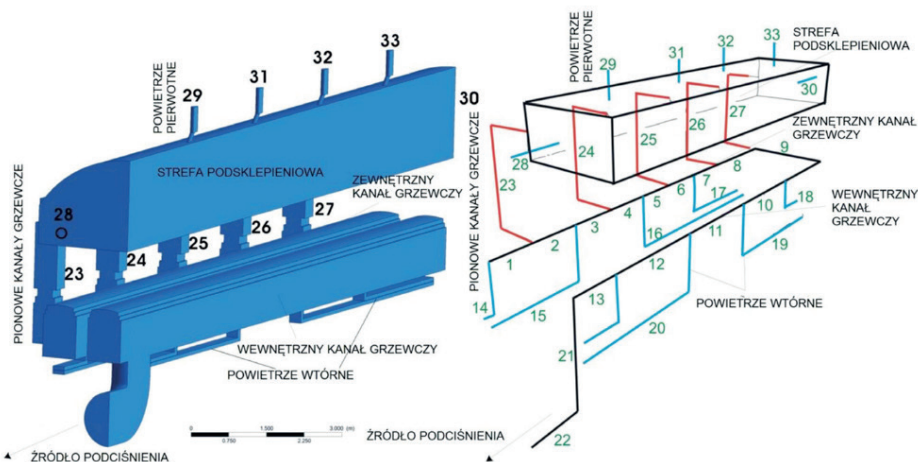
Modele opracowane dla koksowni dwuproduktowej pozwoliły na optymalizację procesu spalania i wprowadzenie elementów spalania niskogradientowego. Dzięki temu wyeliminowano występowanie stref przegrzanych, które mogłyby uszkodzić wymurówkę instalacji. Fakt ten spowodował, że wydłużyło się znacznie żywotność i niezawodność jednostek tego typu. Ponadto udoskonalono sposób nagrzewania się wsadu węglowego od poziomych kanałów grzewczych. Model procesowy bazujący na sieci

hydraulicznej (patrz Rys. 2, prawa strona) pozwolił na uzyskanie kontroli nad procesem koksowania poprzez

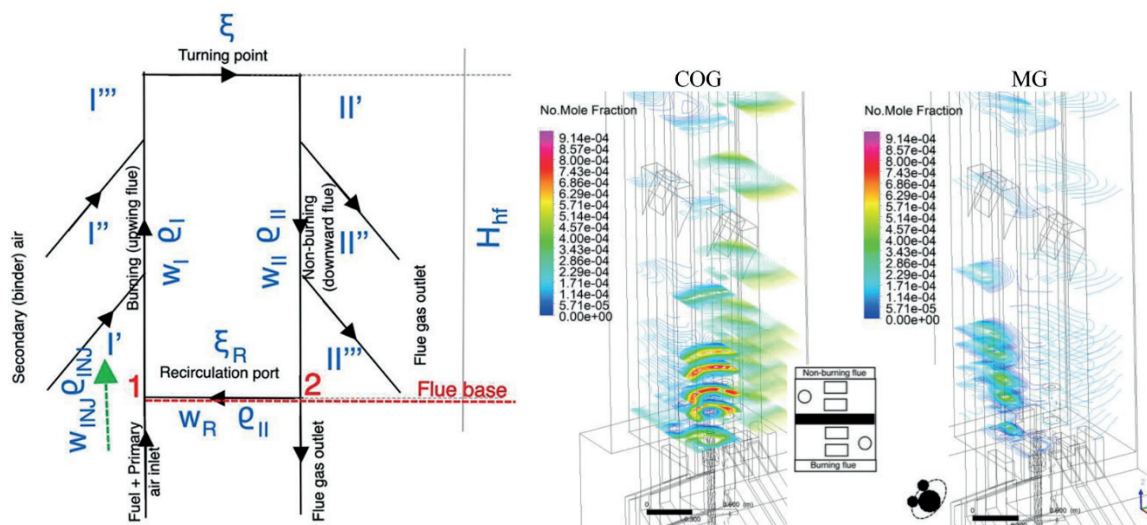
jego odpowiednie sterowanie (Buczyński et al. 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2018a, 2018b).



Rys. 1. Przykładowe wyniki symulacji szczegółowych przeprowadzonych dla pieca dwuproduktowego: po lewej rozkład CO, po prawej temperatura. Linie prądu obrazują kierunek przepływu gazu (Buczyński et al. 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2018a, 2018b)



Rys. 2. Porównanie geometrii opracowanej dla obliczeń szczegółowych (strona lewa) i procesowych (prawa strona)



Rys. 3. Modele szczegółowe (po prawej) i procesowe (po lewej) opracowane dla kanałów grzewczych koksowni konwencjonalnych

Modele dla koksowni konwencjonalnych (Rys. 3) pozwoliły na identyfikację stref tworzenia się tlenków azotu oraz minimalizację ich emisji. Ponadto możliwa stała się optymalizacja profilu temperatury i nagrzewania się wsadu węglowego. Model procesowy (również bazujący na sieci hydraulicznej) umożliwił znalezienie najkorzystniejszych warunków pracy kanałów grzewczych i monitorowanie stopnia recyrkulacji spalin. W tym rozwiązaniu także zaproponowano modyfikacje zbliżające proces spalania do warunków niskogradientowych (Buczyński et al. 2022a, Buczyński et al. 2022b).

2.3. Podsumowanie

Modelowanie numeryczne jest użytecznym i skutecznym sposobem optymalizacji różnorodnych technologii przemysłowych, wdrażania nowoczesnych rozwiązań oraz sterowania procesami technologicznymi. Modele szczegółowe i procesowe umożliwiły, jak do tej pory, wdrożenie do przemysłu koksowniczego elementów spalania niskogradientowego, obniżając w sposób znaczący emisję NO_x i optymalizując proces produkcji koksu. Modyfikacje zaproponowane przez pracowników zespołu są stosowane na całym świecie. Oprócz opisanych badań wykonywane są projekty związane z optymalizacją m.in. odpylaczy cyklonowych, kotłów energetycznych czy zaworów.

3. Efektywność energetyczna w przemyśle górnictwym

W kopalniach węgla kamiennego z czasem dochodzi do znacznego oddalenia obszarów wydobywczych od szybów transportowych. Jeżeli kopalnia posiada centralny system chłodzenia powietrza, wydłużeniu ulegają też rurociągi transportujące wodę lodową do chłodnic powietrza w rejonach wydobywczych. Pomimo izolacji termicznej wydłużanie tych instalacji powoduje coraz większe straty ciepłne, które skutkują wzrostem temperatury wody lodowej dostarczanej do chłodnic w obszarach wydobywczych. Jeżeli

temperatura wody lodowej na wejściu do chłodnic rośnie, to spada wydajność chłodnic powietrza i coraz trudniej osiągać wymaganą temperaturę w miejscu wydobywania. Poniżej przedstawiono innowacyjny sposób zwiększenia ilości chłodu możliwej do przesłania z wykorzystaniem dostępnej infrastruktury. Rozwiązanie polega na wykorzystaniu zawiesziny lodowej zamiast wody lodowej w istniejącym już systemie chłodzenia kopalni. Opisany w pracy przypadek dotyczy uruchomionego w 2021 r. pierwszego na świecie centralnego układu chłodzenia powietrza w kopalni LW Bogdanka SA, w którym zawieszina lodowa przepływa w układzie zamkniętym, od miejsca jej wytwarzania na powierzchni do podziemnych chłodnic powietrza w obszarach wydobywania. System ten został zaprojektowany przy wsparciu Wydziału Energetyki i Paliw AGH.

3.1. System chłodzenia kopalni wykorzystujący płynną zawieszinę lodową

Przed rozbudową centralny układ chłodzenia kopalni LW Bogdanka SA bazował na wytwarzaniu wody lodowej o temperaturze około $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na powierzchni i jej przesyłaniu siecią rurociągów pod ziemię, do chłodnic powietrza w rejonach eksploatacyjnych. Woda schłodzona w powierzchniowej stacji klimatyzacyjnej (PSK), w ilości około $264\text{ m}^3/\text{h}$, przepływała przez izolowane rurociągi szybowe, a następnie przez podajnik trójkomorowo-rurowy (PES) dalej w kierunku chłodnic przodkowych i ścianowych. Rurociąg powrotny przesyłał wodę o temperaturze około $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez PES oraz powrotny rurociąg szybowy z powrotem do PSK. W PSK woda powrotna znowu była schładzana do temperatury około $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ za pomocą urządzeń chłodniczych i ponownie (w zamkniętym obiegu) przesyłana przez PES do dołowych odbiorników chłodu pod ziemią na głębokości 990 m. Moc chłodnicza tego systemu klimatyzacyjnego wynosiła około 6 MW. W projekcie nowego systemu chłodzenia wykorzystano możliwość zastosowania lodu wodnego, który w połączeniu z wodą lodową o obniżonej

temperaturze z istniejącego systemu chłodzenia jest obecnie nośnikiem chłodu w kopalni.

Do starego systemu chłodzenia o wydajności około 6 MW dołożono podczas modernizacji system do produkcji zawiesziny lodowej. W tym celu na powierzchni dobudowano drugą halę maszyn, w której zainstalowano próżniową wytwornicę drobinek lodu, jego koncentrator z podajnikiem taśmowym, mieszalnik oraz system pomp. Do chłodzenia wytwornicy drobinek lodu zastosowano amoniakalny agregat chłodniczy, a do zrzutu ciepła odpadowego – wieże chłodnicze umieszczone na dachu nowej hali. Uzupełnieniem systemu są układy automatycznego oczyszczania wody zasilającej wytwornicę oraz sterowania zaworami. Sam układ do produkcji drobinek lodu składa się z próżniowego generatora VIM 850 i koncentratora drobinek lodu, mieszalnika, podajnika taśmowego i systemu pomp oraz układu filtrującego wodę zasilającą wytwornicę.

Generator VIM850 posiada maksymalną wydajność chłodniczą 3,1 MW i nominalnie produkuje 1120 ton/dobę lodu o 75-procentowej zawartości drobinek o wymiarach 0,5–1 mm. Zawiesina jest wypompowywana z generatora do koncentratora, który oddziela wodę od kryształków lodu. Drobinki są dostarczane z koncentratora do mieszalnika za pomocą podajnika taśmowego. Ponieważ mają mniejszą gęstość niż woda, wypływają w koncentratorze do góry, skąd są mechanicznie zgarniane na podajnik taśmowy.

Oddzielona w koncentratorze woda jest z powrotem pompowana do generatora VIM. Dostarczone do mieszalnika podajnikiem taśmowym drobinki lodu są mieszane z wodą lodową o temperaturze 1,5 °C. Mieszalnik ma kształt walcowy i zawiera mechaniczne mieszadło. Takie rozwiązanie umożliwia automatyczne odłączenie nowego układu do produkcji drobinek lodu i pracę układu klimatyzacji na samej wodzie lodowej w przypadku małych potrzeb chłodniczych kopalni lub np. przy pracach serwisowych dotyczących systemu produkcji zawiesziny lodowej.

Modernizacja systemu klimatyzacji kopalni w LW Bogdanka SA spowodowała wzrost mocy chłodniczej układu do 9,1 MW. Obniżono też temperaturę

medium na wlocie do rurociągów szybowych z 1,5 °C (w przypadku wody lodowej) do 0 °C (zawieszina lodowa). W rejonach chłodnic uzyskano obniżenie temperatury medium z 8–12 °C do 0–2 °C. Układ został dodatkowo wyposażony w różnego rodzaju systemy monitorujące i zabezpieczenia, np. system automatycznego awaryjnego wytapiania drobinek lodu z rurociągów czy system automatycznego odłączania produkcji drobinek lodu, który umożliwia powrót do trybu pracy na wodzie lodowej nawet w przypadku braku zasilania elektrycznego nowej hali, pełny monitoring bieżącego zużycia energii elektrycznej rozbudowanego systemu (łącznie z oświetleniem i wentylacją) oraz zdalny nadzór nad produkcją zawiesziny lodowej (brak konieczności obecności w nowej hali pracowników nadzorujących).

3.2. Działanie układu

Strumień wody w ilości ok. 264 m³/h o temperaturze 1,5 °C na wyjściu z PSK zostaje skierowany do nowej hali i jest rozdzielany na dwie części. Mniejsza (40–47 m³/h, w zależności od bieżących parametrów pracy układu) jest kierowana na zasilanie generatora drobinek lodu VIM. Na wyjściu z generatora VIM oraz koncentratora lodu uzyskuje się strumień o masie 40–47 ton/h lodu o 75-procentowym udziale drobinek. Drobinki lodu przesyłane są podajnikiem taśmowym do mieszalnika. Tam następuje zmieszanie wyprodukowanych w generatorze VIM drobinek lodu oraz wody o temperaturze 1,5 °C (około 214 m³/h). W konsekwencji dochodzi do ochłodzenia całej wody w mieszalniku i ustabilizowania jej temperatury w okolicach 0 °C. Po zmieszananiu zawieszina lodowa jest pompowana do rurociągów szybowych. Jeśli strumień całkowity mieszaniny (wody lodowej i drobinek lodu) wynosi 264 ton/h, to – uwzględniając szacowane straty ciepła oraz straty mieszania – zawartość masowa drobinek lodu w mieszaninie wynosi na wlocie do rurociągu szybowego około 10%. W okresie letnim, na skutek strat ciepła w rurociągu szybowym, za podajnikiem PES, czyli na wlocie do dołowego rurociągu poziomego w kierunku rejonów wydobywczych

na głębokości około 990 m, udział drobinek lodu w mieszaninie wynosi około 8%. Ponieważ w wodzie znajdują się drobinki lodu, które stabilizują jej temperaturę w rurociągu na poziomie 0 °C, to można uzyskać niską temperaturę medium na zasilaniu większości chłodziń powietrza w rejonach wydobywczych w kopalni. W przypadku wcześniejszej pracy układu z wodą lodową temperatura w najbardziej oddalonych miejscach rurociągu wynosiła powyżej 8 °C.

Po rozbudowie układu chłodzenia kopalni znacznie poprawiła się efektywność chłodzenia we wszystkich rejonach wydobywczych. Wyniki pomiarów pokazują, że efektem zastosowania zawiesziny lodowej jest uzyskanie znaczącego obniżenia temperatury powietrza kopalnianego w wyrobiskach, nawet do poziomu ok. 20 °C. W niektórych rejonach wydobycia, przy wykorzystaniu tej samej liczby chłodziń co w przypadku wody lodowej, możliwe było podniesienie odbieranego chłodu i zwiększenie ilości powietrza wentylacyjnego o ok. 30%. Spowodowało to spadek temperatury powietrza w tym rejonie kopalni prawie o 6 °C względem pracy układu z wodą lodową (nawet przy wyłączeniu dodatkowego chłodzenia lokalnymi agregatami sprężarkowymi). Zdecydowanie korzystniej wypada porównanie parametrów medium zasilającego chłodzińce powietrza dla układów z zawiesiną lodową niż dla układów z wodą lodową. Wiąże się to z bardzo wysoką zdolnością drobinek lodu w zawieszynie do magazynowania chłodu. Przykładowo, aby w odległych rejonach kopalni na zasilaniu chłodziń powietrza osiągnąć temperaturę wody lodowej ok. 3 °C zamiast 8 °C, w tradycyjnym układzie konieczne byłoby kilkukrotne zwiększenie strumienia wody lodowej w rurociągu (czyli również wymiana rurociągów na większe), a co za tym idzie – rozbudowanie dotychczasowej PSK, tak by kilkukrotnie zwiększyć jej moc (szacuje się, że 3–4 krotnie).

3.3. Wnioski

Po dokonanej w 2021 r. przebudowie systemu chłodzenia LW Bogdanka SA jest pierwszą i jak dotąd jedyną na świecie kopalnią, która zastosowała płynną

zawiesinę lodową w zamkniętym systemie rurociągów do chłodzenia powietrza w kopalni. Użycie zawiesziny lodowej w instalacjach eksploatowanych dotąd przy użyciu wody lodowej może przynieść wymierne korzyści. W sytuacji, gdy bez rozbudowy rurociągów nie da się zwiększyć ilości chłodu możliwej do przesłania przy użyciu wody lodowej, z powodzeniem można zastosować zawiesinę lodową. Taka zmiana wymaga jedynie dobudowania nowej części systemu odpowiedzialnego za produkcję drobinek lodu i przygotowania zawiesziny lodowej. Rozwiązanie wykorzystujące zawiesinę lodową wydaje się szczególnie korzystne w układach chłodzenia powietrza w kopalniach podziemnych, ale może być stosowane również w innych instalacjach chłodzących, także niezlokalizowanych pod ziemią.

4. Efektywność energetyczna w gospodarce komunalnej

Instalacje termicznego przekształcania odpadów komunalnych, funkcjonujące w Polsce od około dekady, stanowią przykład rozwiązań poprawiających efektywność energetyczną w gospodarce komunalnej poprzez odzysk energii chemicznej z frakcji nie nadających się do recyklingu. Jako element sektora *waste-to-energy* (WtE) pełnią podwójną rolę – z jednej strony wspierają nowoczesne systemy gospodarki odpadami, z drugiej zaś dostarczają lokalnie wytwarzaną energię elektryczną i ciepło. Udział tych instalacji w unijnej produkcji energii elektrycznej wynosi średnio 2%, a w zakresie ciepła sieciowego przekracza 10%, osiągając w niektórych krajach nawet poziom 50% (CEWEP 2023), co dowodzi ich rosnącego znaczenia jako źródeł stabilnej i suwerennej energii komunalnej. Prognozy wskazują, że do 2035 r. europejskie zakłady WtE mogą dostarczać 189 TWh energii rocznie (co pod względem energetycznym odpowiada 19,4 mld m³ gazu ziemnego), zatem możliwe jest zwiększenie efektywności energetycznej systemów komunalnych w skali lokalnej i regionalnej (Poretti et Stengler 2022).

4.1. Instalacje waste-to-energy w Polsce

W aspekcie udziału instalacji WtE w systemach zarządzania gospodarką odpadami komunalnymi Polska nie należy do wiodących krajów UE, ale jest liderem wśród tych państw, które przystąpiły do UE w maju 2004 r. Dominujący etap rozwoju WtE

w Polsce przypadają na lata 2007–2013, kiedy przy istotnym wsparciu europejskiego Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013 dofinansowano budowę spalarni odpadów w dużych miastach Polski (Komisja Europejska b.r.a). Położenie i opis techniczny analizowanych dalej instalacji WtE przedstawia Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie potencjału Polski w zakresie WtE – stan na rok 2025

Lp.	Nazwa spalarni	Data uruchomienia	Wydajność [Mg/a]	Rodzaj spalanych odpadów	Technologia, uwagi
1.	ZUOK Białystok	grudzień 2015	120 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	1 linia, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
2.	ZTPOK Bydgoszcz	luty 2016	180 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	2 linie, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
3.	ZTUOK Konin	grudzień 2015	94 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	1 linia, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
4.	ZTPO Kraków	czerwiec 2016	240 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	2 linie, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem, planowana trzecia linia 100 tys. Mg/a
5.	ITPOK Poznań	grudzień 2016	230 000	odpady komunalne o kodzie 200301	2 linie, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
6.	ZTUO Szczecin	styczeń 2018	150 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	2 linie, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
7.	ITPOE Rzeszów	grudzień 2018	100 000	odpady o kodzie 200301 oraz 191212 (RDF)	1 linia, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem druga linia w budowie 80 tys. Mg/a
10.	ITPO Olsztyn	luty 2025	110 000	wyłącznie odpady o kodzie 191212 (RDF)	1 linia, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
11.	ZTPO Gdańsk	marzec 2025	160 000	wyłącznie odpady o kodzie 191212 (RDF)	1 linia, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
12.	ZUSOK 2 Warszawa	planowany: wrzesień 2025	265 000	wyłącznie odpady o kodzie 191212 (RDF)	2 linie, ruchomy ruszt zintegrowany z kotłem
Sumaryczny potencjał polskich spalarni odpadów komunalnych, stan na rok 2025			1,65 mln Mg/a		

4.2. Efektywność energetyczna spalarni odpadów – formuła R1

Według podstawowej definicji zawartej w prawie UE: „efektywność energetyczna oznacza stosunek uzyskanych wyników, usług, towarów lub energii do wkładu energii” (Directive EU 2023/1791). W przypadku spalarni odpadów komunalnych poziom efektywności energetycznej świadczy o jej technologicznej zdolności do wygenerowania określonej dawki energii podczas spalania odpadów, co definiowane jest w sposób ogólny jako:

$$\text{Efektywność energetyczna} = \frac{\text{Energia cieplna} + \text{Energia elektryczna}}{\text{Energia chemiczna zawarta w odpadach}} \quad (1)$$

Zależność określona wzorem (1) może zostać użyta jedynie w celu elementarnego porównania spalarni odpadów z jakąkolwiek inną instalacją umożliwiającą pozyskiwanie energii cieplnej bądź elektrycznej z energii chemicznej zawartej w danym paliwie. Ponieważ proces wytwarzania energii z odpadów jest bardziej skomplikowany niż z konwencjonalnych źródeł energii, opracowano specjalną formułę R1, która służy do obliczania efektywności energetycznej danej spalarni odpadów komunalnych, co obrazuje wzór (2):

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)} \quad (2)$$

Objaśnienia do wzoru (2) przyjęto za wytycznymi określonymi w dokumentach Komisji Europejskiej (Komisja Europejska 2008, 2018)

E_p – ilość energii produkowanej rocznie jako energia cieplna lub elektryczna; oblicza się ją, mnożąc ilość energii elektrycznej przez 2,6, a ilość energii cieplnej wyprodukowanej w celach komercyjnych przez 1,1 [GJ/rok],

E_f – ilość energii wprowadzanej rocznie do systemu, pochodzącej ze spalania paliw biorących udział w wytwarzaniu pary [GJ/rok],

E_w – roczna ilość energii zawartej w przetwarzanych odpadach, obliczanej przy zastosowaniu dolnej wartości opałowej odpadów [GJ/rok],

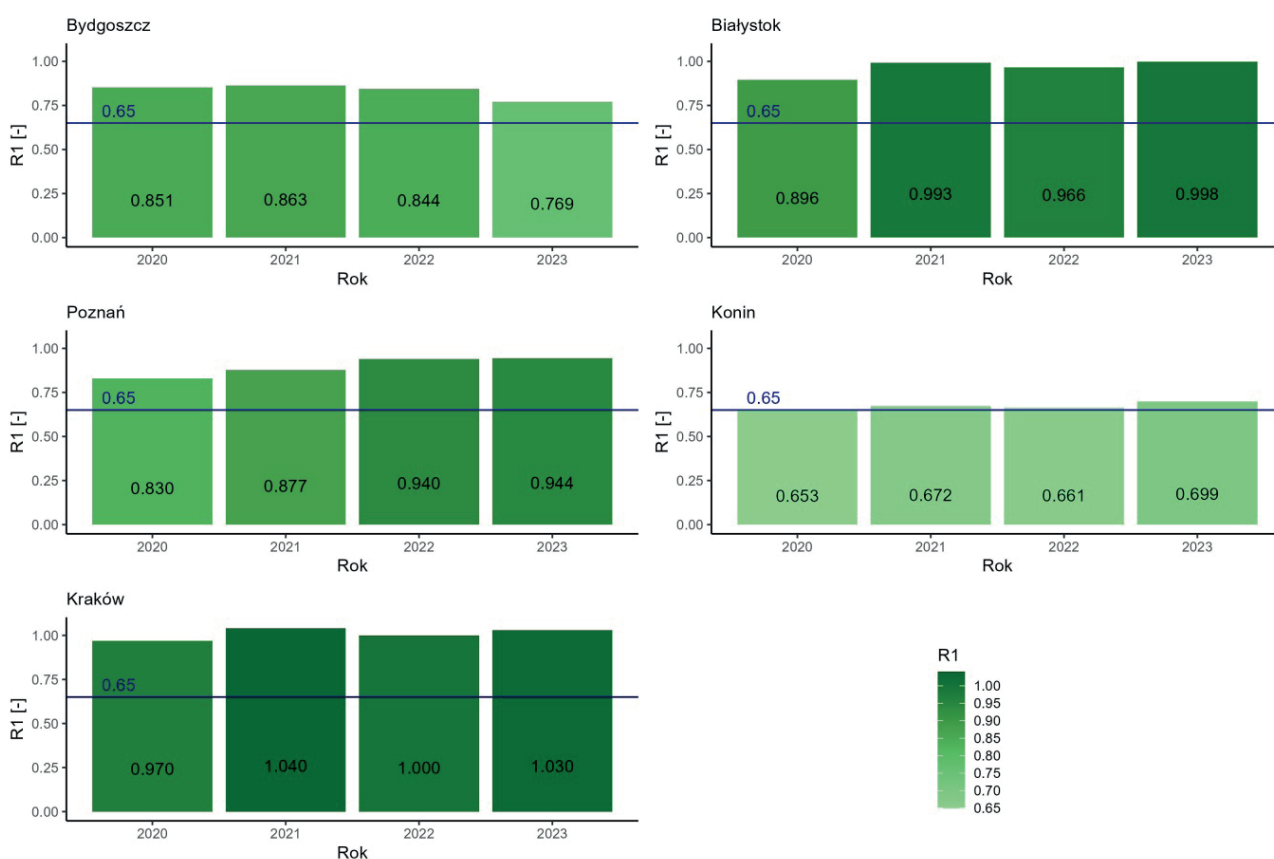
E_i – roczna ilość energii wprowadzanej z zewnątrz z wyłączeniem energii E_w oraz energii E_f [GJ/rok], 0,97 jest współczynnikiem uwzględniającym straty energii przez popiół dennny i promieniowanie.

4.3. Wyznaczenie wartości współczynnika R1 dla polskich spalarni

Wartości współczynnika R1 dla polskich zakładów WtE, w latach ich eksploatacji (2020–2023), wyznaczono dla następujących podmiotów:

- ZUOK Białystok,
- ZTPOK Bydgoszcz,
- ZTUOK Konin,
- ZTPO Kraków,
- ITPOK Poznań.

W celu uzyskania finalnej wartości współczynnika R1, z badanych spalarni zebrano odpowiednie dane i wyznaczono wartości współczynników składowych E_p , E_f , E_w i E_i . W dalszej części artykułu przedstawiono graficznie wyniki tych badań. Zestawienie wartości współczynnika R1 dla każdej z badanych spalarni w okresie eksploatacji ilustruje Rys. 4.



Rys. 4. Zestawienie średniorocznych wartości współczynnika R1 dla badanych spalarni

Analiza średniorocznych wartości współczynnika R1 dla polskich spalarni prowadzi do następujących wniosków.

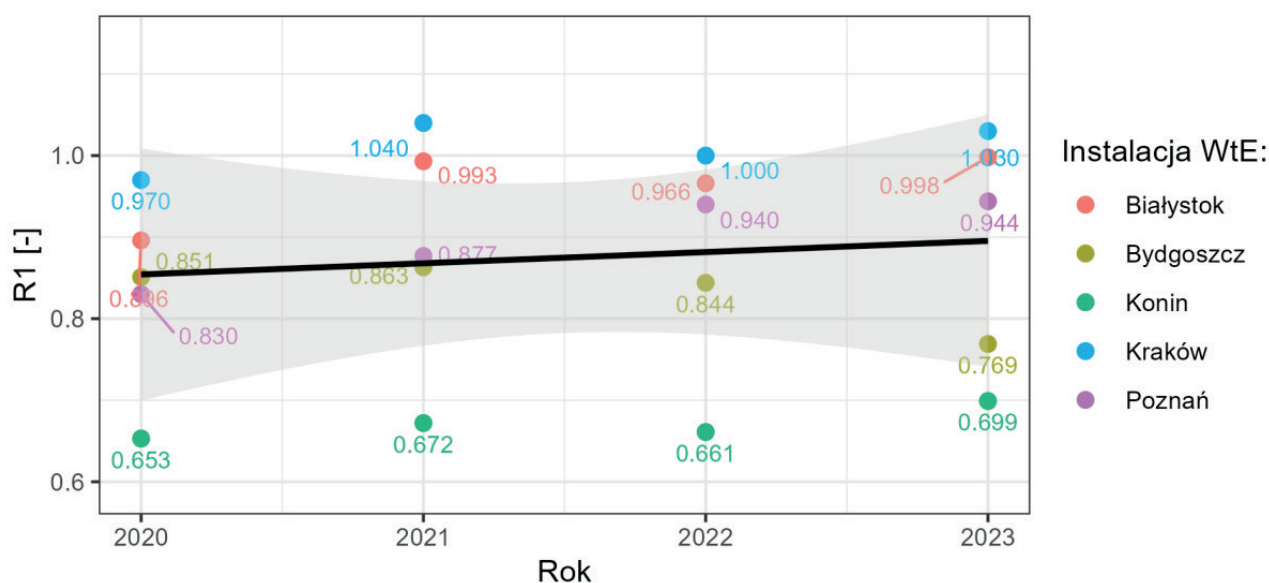
- Każdy z tych obiektów spełnia podstawowe kryterium procesu *recovery*, tzn. w każdym roku eksploatacji ich współczynnik R1 jest większy od 0,65, co ustawowo stanowi podstawowy warunek zaklasyfikowania instalacji jako prowadzącej odzysk energii (a nie unieszkodliwianie odpadów) (Komisja Europejska 2018).
- Różnice wartości współczynnika R1 wynikają przede wszystkim z trybu pracy danej spalarni, a konkretnie zależą od relacji między kogeneracyjnym wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła.
- Interesujący przypadek wzrostu wartości współczynnika R1 pojawił się w ITPOK Poznań, gdzie od 2020 r. w trybie pracy kogeneracyjnej następował systematyczny wzrost sprzedaży ciepła sieciowego na potrzeby ogrzewania, a w sezonie letnim na potrzeby uzyskania ciepłej wody użytkowej w Poznaniu.
- Najwyższa wartość współczynnika R1 pojawia się w ZTPO Kraków. To efekt modernizacji spalarni poprzez dobudowę instalacji odzysku ciepła ze skraplania wilgoci zawartej w spalinach.

Dodatkowa generacja ciepła podnosi wartość parametru E_p , a parametr E_w pozostaje niezmienny, co powoduje wzrost wartości współczynnika R1.

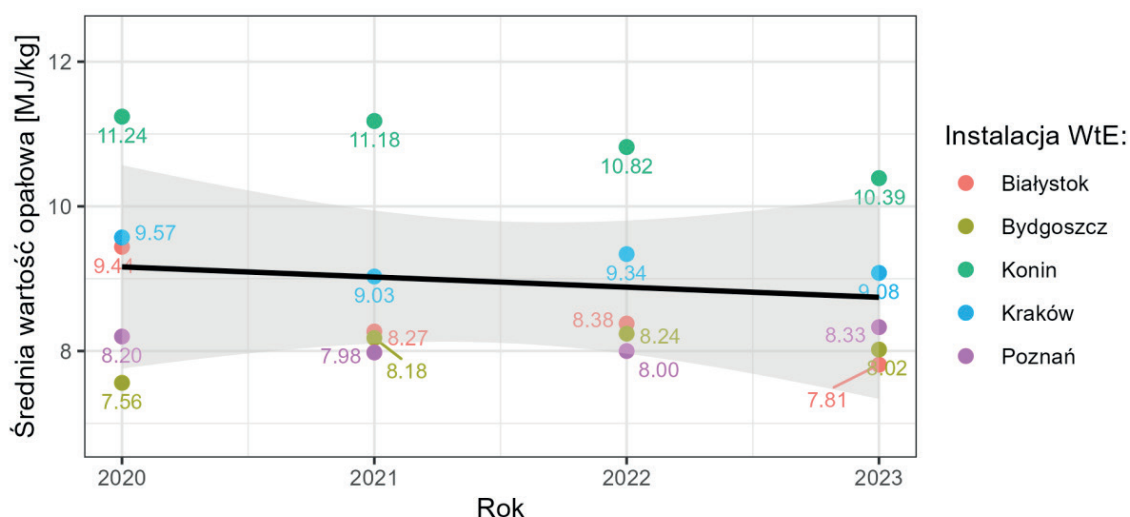
Rys. 5 pokazuje sumaryczne porównanie wartości współczynnika R1 dla badanych WtE plants, wraz z linią trendu wartości współczynnika oraz przedziałem ufności.

Rys. 5 potwierdza wszystkie wnioski z zależności przedstawionych na Rys. 4. Interesująca jest linia trendu wzrostowego wartości współczynnika R1, który jest efektem wzrostu produkcji i sprzedaży ciepła wytwarzanego w polskich spalarniach wskutek odzysku energii chemicznej zawartej w odpadach. Kolejną ilustracją analizowanych wyników badań efektywności energetycznej polskich spalarni jest Rys. 6 prezentujący zakres zmian średniorocznej wartości opałowej odpadów spalanych w latach 2020–2023 wraz z trendem zmian tej wartości.

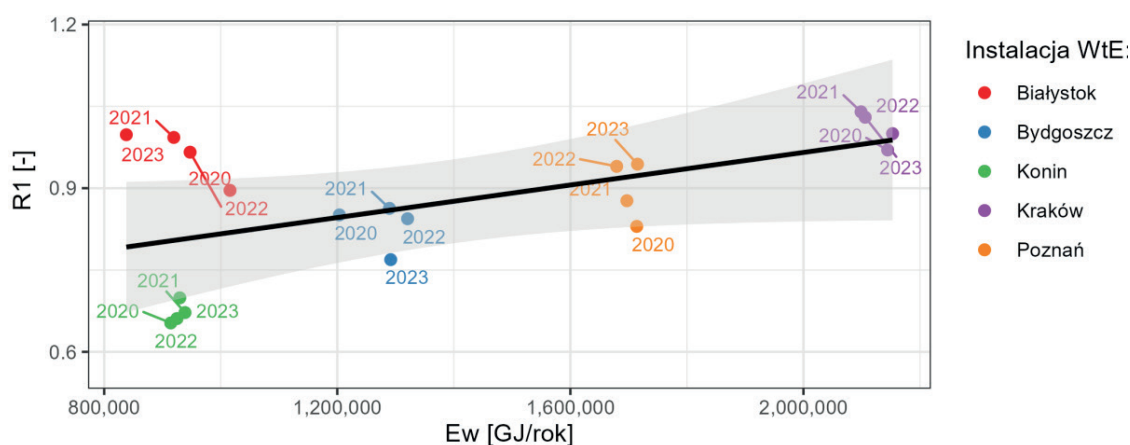
Przedstawiony w zakończeniu niniejszego wątku Rys. 7 wnosi dodatkowe spojrzenie na analizowane wartości współczynnika R1 dla polskich spalarni. Obrazuje on zależność współczynnika R1 od wartości E_w , a jednocześnie uwzględnia stopień kogeneracji danej spalarni.



Rys. 5. Zestawienie zmian wartości współczynnika R1 dla badanych spalarni oraz linia trendu wartości współczynnika R1



Rys. 6. Linie zmian LHV odpadów spalanych w polskich spalarniach oraz linia trendu zmian LHV



Rys. 7. Zależność wartości współczynnika R1 od wartości określonej parametrem E_w

Zauważalny wzrostowy trend wartości współczynnika R1 w funkcji parametru E_w jest wynikiem zróżnicowanych udziałów ciepła wytwarzanego w kogeneracyjnym trybie pracy analizowanych polskich spalarni odpadów komunalnych.

4.4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza efektywności energetycznej polskich instalacji waste-to-energy (WtE) w latach 2020–2023, bazująca na współczynniku R1, pozwoliła na ocenę ich zdolności do odzysku energii z odpadów komunalnych. Wszystkie badane instalacje spełniły minimalne kryterium kwalifikacji procesu jako odzysku energii, a zróżnicowanie wartości R1

wynika głównie z trybu pracy kogeneracyjnej oraz zastosowanych technologii odzysku ciepła. Szczególnie korzystne wyniki uzyskano w przypadku instalacji w Krakowie i Poznaniu, co potwierdza znaczenie modernizacji i optymalizacji pracy spalarni w kontekście poprawy efektywności energetycznej systemów komunalnych.

5. Systemy wytwarzania i magazynowania energii z OZE

Odnawialne źródła energii odgrywają kluczową rolę w transformacji energetycznej, oferując niskoemisyjne i lokalnie dostępne źródła wytwarzania energii

elektrycznej. Wśród technologii OZE coraz większym zainteresowaniem cieszy się fotowoltaika, której dynamiczny rozwój prowadzi do poszukiwania nowych lokalizacji dla instalacji PV. Jednym z innowacyjnych rozwiązań są pływające elektrownie fotowoltaiczne (*floating PV*, FPV), które stanowią odpowiedź na ograniczoną dostępność gruntów oraz potrzebę zwiększania efektywności przestrzennej systemów energetycznych. Technologia FPV rozwija się globalnie od 2007 r. i obecnie wykorzystywana jest w wielu krajach, m.in. Japonii, Korei Południowej, USA, Chinach i państwach UE, osiągając poziom setek megawatów mocy zainstalowanej w pojedynczych projektach. Pływające instalacje PV umożliwiają nie tylko wytwarzanie energii elektrycznej z OZE, ale także przynoszą dodatkowe korzyści środowiskowe, takie jak redukcja parowania wody ze zbiorników czy ograniczenie zakwitu glonów, dzięki zacienieniu powierzchni i obniżeniu temperatury wody. Badania wskazują, że potencjał technologiczny FPV przy częściowym zapełnieniu powierzchni zbiorników wodnych może sięgać globalnie nawet 4,5 TWp, a w krajach UE 157 GW, co pozwoliłoby pokryć do 6% rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną. W szczególności atrakcyjne są zbiorniki powstałe w wyniku rekultywacji nieczynnych kopalń węgla brunatnego. Mimo licznych zalet technologia FPV, podobnie jak inne źródła OZE, charakteryzuje się zmiennością generacji w czasie doby i roku, co stanowi istotne wyzwanie dla stabilności systemów elektroenergetycznych. Rozwiązaniem tego problemu jest integracja systemów FPV z technologiami magazynowania energii. W ramach przeprowadzonych analiz porównano trzy alternatywne systemy magazynowania współpracujące z FPV: produkcję wodoru, magazynowanie energii w postaci sprężonego powietrza oraz wykorzystanie klasycznych akumulatorów elektrochemicznych. Celem badań przeprowadzonych przez zespół pracowników Katedry Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii (WEAiIB) oraz Katedry Maszyn Ciepłych i Przepływowych (WEiP) było określenie, który z analizowanych wariantów zapewnia najmniejsze straty energii i najwyższą efektywność całego systemu.

5.1. Koncepcja układu

Przedmiotem analizy był układ obejmujący pływającą instalację fotowoltaiczną zlokalizowaną na zbiorniku antropogenicznym i wyposażoną w linie bezpośrednie, zintegrowaną z systemem magazynowania energii. Rozważono trzy warianty magazynowania: produkcję „zielonego” wodoru, magazynowanie energii w sprężonym powietrzu oraz w systemach bateryjnych. Dla każdego wariantu przeprowadzono analizę ekonomiczną.

Pierwszym krokiem było określenie maksymalnej powierzchni, na jakiej posadowiona będzie farma fotowoltaiczna. Wzięto pod uwagę wytyczne zawarte w opracowanym raporcie środowiskowym oraz topografię terenu. Analizie poddano również mapy barymetryczne oraz warunki pogodowe, uwzględniając obciążenie śniegiem oraz prędkość i kierunek wiatru. Sprawdzone powierzchnię, którą można objąć zabudową, i określono maksymalną moc farmy. W ramach prowadzonych prac dobrano panele fotowoltaiczne, falowniki oraz przekroje kabli łączących, a także ustalono sposób połączenia z operatorem linii energetycznej.

Główne prace skupiły się jednak na opracowaniu konstrukcji pływającej. Moduł ten składa się z pływaków, ramy nośnej, podestu technicznego, ramy montażowej, okuć oraz ciągów kablowych. Wykonanie wszystkich elementów konstrukcyjnych, z pominięciem okuć oraz koryt kablowych, zaplanowano z materiałów sztucznych, takich jak HDPE (pływaki) oraz laminat szklany (pozostałe elementy konstrukcyjne).

Moduł pływający jest skalownym elementem konstrukcyjnym przystosowanym do montażu 12 paneli fotowoltaicznych. Może być łączony z innymi modułami w dowolnych konfiguracjach, co pozwala elastycznie projektować układy elektryczne oraz stopniowo zabudowywać powierzchnię zbiornika wodnego. Część modułów przystosowana jest do montażu dodatkowego obciążenia w postaci falowników. Moduł falownika posiada dodatkowy ponton zwiększający jego wyporność oraz mocowania przystosowane do zawieszenia falownika pod konstrukcją paneli. Zaprojektowano również łącznik pontonów umożliwiający skalowność proponowanego rozwiązania.

Wymiary sekcji falowników oraz strefy buforowej pozwoliły na zamontowanie 130 falowników na powierzchni jeziora. Połączenia elektryczne pomiędzy sekcjami falowników a brzegiem odbywać się będą za pomocą pływaków rurowych oraz rur osłonowych. Aby umożliwić zamocowanie pływającej konstrukcji do dna, proponuje się zastosowanie martwych kotwic, które zapewniają zabezpieczenie pomostu w płaszczyźnie poziomej, przy jednoczesnym zachowaniu jego zdolności do poruszania się w górę i w dół wraz ze zmianą poziomu wody. Połączenie pomiędzy kotwicą a obiektem pływającym odbywa się przy pomocy łańcuchów lub lin stalowych. Głębokość zbiornika wodnego w tym przypadku nie ogranicza możliwości kotwienia.

5.2. Produkcja i magazynowanie energii

Przeprowadzone badania obejmowały analizę możliwości produkcyjnych energii elektrycznej z wykorzystaniem danych zawartych w Fotowoltaicznym Systemie Informacji Geograficznej udostępnionym przez Komisję Europejską (Komisja Europejska b.r.b). Pobrano dane z 10 lat, uwzględniono kąt pochylenia oraz orientację paneli i na tej podstawie określono możliwą do uzyskania ilość energii elektrycznej. Na szczególną uwagę zasługuje kwestia kąta nachylenia paneli – od tego parametru w dużej mierze zależy bezpieczeństwo instalacji posadowionych na wodzie. Wprawdzie analizowana lokalizacja charakteryzuje się stosunkowo dużym zagłębieniem w stosunku do terenów sąsiadujących, nie stanowi jednak pełnego zabezpieczenia przed porywami wiatru oraz gwałtownymi burzami związanymi z ociepleniem klimatu. Zdaniem naukowców z Newcastle University do końca XXI wieku w Europie aż 14-krotnie częściej niż do tej pory będą pojawiały się silne burze, poruszające się powoli lub niemal nieruchome. Z literatury dotyczącej instalacji PV wynika, że zalecane kąty nachylenia instalacji PV na południu Polski to 20–30°, natomiast na północy 25–35°. W opracowanym rozwiązaniu zaleca się zastosowanie kąta nachylenia 25°. Biorąc pod uwagę warunki panujące w planowanej lokalizacji, szacuje się, że można uzyskać ok. 241,03 kWh/m² energii elektrycznej.

Pierwszym brany pod uwagę sposobem magazynowania wyprodukowanej energii było zastosowanie sprężonego powietrza zatłaczanego pod powierzchnię ziemi. Kluczowym elementem przy rozważaniu wykorzystania jakiejkolwiek formacji geologicznej do celów CAES (*compressed air energy storage*) jest przeprowadzenie szczegółowych badań geologicznych i inżynierskich. Powinny one obejmować ocenę szczelności formacji, ryzyko sejsmiczne, potencjalne wpływy na środowisko naturalne i wodne, a także aspekty techniczne i ekonomiczne realizacji projektu. W Polsce, podobnie jak w innych krajach, tego typu inicjatywy mogą wymagać uzyskania odpowiednich pozwoleń środowiskowych i górniczych. Zespół badawczy zaproponował wykorzystanie magazynu energii elektrycznej w sprężonym powietrzu z odzyskiem ciepła sprężania i magazynem ciepła, które będzie wykorzystane do podgrzewania powietrza rozprężanego. Do oszacowania pojemności zbiornika przyjęto sprawność systemu CAES na poziomie 40% oraz gęstość energii typową dla sprężonego powietrza przechowywanego w podziemnych formacjach geologicznych – równą 7 kWh/m³.

Kolejnym rozpatrywanym systemem było magazynowanie wyprodukowanej energii w wodorze. Analizowany przypadek obejmuje produkcję wodoru poprzez wykorzystanie elektrolizera zasilanego energią elektryczną, która pochodzić będzie z pływającej farmy fotowoltaicznej. Wodór zostanie sprężony do zadanego ciśnienia za pomocą układu sprężarek, a następnie zmagazynowany w zbiornikach naziemnych. Do zasilania systemów takich jak układ sprężania, elektrolizer oraz instalacje pomocnicze będzie wykorzystywana energia elektryczna ze źródeł OZE. Zmagazynowany wodór będzie następnie wykorzystywany do zasilania ogniwa paliwowego. Sprawność procesu określono na poziomie 22%, dobrano urządzenia oraz opracowano CAPEX i OPEX proponowanych rozwiązań.

W przypadku magazynowania energii elektrycznej w akumulatorach przyjmuje się, że magazyn będzie miał możliwość przechowywania 100% energii elektrycznej z farmy PV. Należy jednak starannie

przemysłu dobór wielkości magazynu energii, który powinien być skalowany zarówno do poziomu auto-konsumpcji, jak i do możliwego wolumenu sprzedaży energii elektrycznej do systemu elektroenergetycznego. W takim przypadku należy uwzględnić sprawność energetyczną magazynu energii. Jest ona deklarowana przez producentów na poziomie 80%, natomiast prowadzone badania i eksperymenty na istniejących obiektach oceniają ją na 55–60%. Zimą ten poziom będzie jeszcze niższy. Analizie poddano magazyny energii o pojemności 100–250 MWh, przy czym znaczącą barierą są koszty inwestycyjne na poziomie nawet 1000 mln zł.

5.3. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano koncepcję pływającej instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej na zbiorniku antropogenicznym, zintegrowanej z trzema wariantami systemów magazynowania energii: sprężonym powietrzem, wodorem oraz akumulatorami. Wykazano, że dobór paneli fotowoltaicznych powinien bazować na jak najwyższej sprawności modułów, a niekoniecznie na ich mocy maksymalnej, z uwagi na ograniczoną powierzchnię zbiornika oraz konieczność zapewnienia dostępu serwisowego. Rekomenduje się zastosowanie stacji pogodowej monitorującej warunki atmosferyczne oraz parametry pracy instalacji, co pozwala na prognozowanie produkcji energii i ocenę wydajności systemu.

W odniesieniu do technologii magazynowania, wariant bazujący na sprężonym powietrzu wymaga szczegółowych badań geologicznych i uzyskania odpowiednich pozwoleń, co ogranicza jego praktyczną stosowalność. System wodorowy, choć teoretycznie atrakcyjny, cechuje się bardzo niską sprawnością całkowitą (ok. 22%) i wysokimi kosztami operacyjnymi, co z kolei negatywnie wpływa na jego rentowność. Najwyższą sprawność techniczną osiąga magazyn bateryjny (do 90%), jednak jego opłacalność finansowa w modelu arbitrażu cenowego jest obecnie ograniczona. Inwestorzy myślący o takiej inwestycji muszą poszukiwać dodatkowych źródeł przychodów. Przy

obecnych regulacjach rynek mocy poprawia sytuację, ale nie na tyle, by uznać, że projekty będą rentowne w oparciu o te dwa źródła przychodów. Proponowane przez rynek zmiany w zakresie wykorzystania magazynów o krótszych czasach dostaw mogą nieco poprawić wyniki. Dopiero uzyskanie przychodów z rynku bilansującego lub z rynku usług elastyczności może sprawić, że taki projekt stanie się opłacalny.

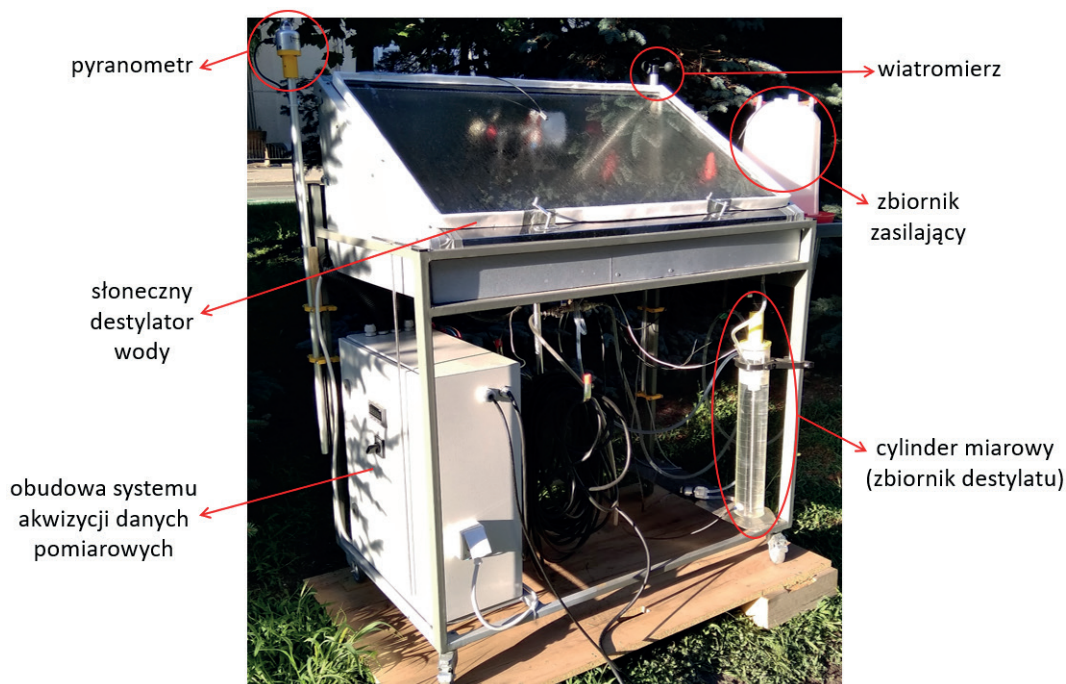
6. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do odsalania wody

Ograniczony dostęp do wody słodkiej, niezbędnej w każdej dziedzinie życia, jest nieustannie pogłębiającym się problemem, z którym zmaga się coraz więcej społeczeństw na całym świecie. Jednym z działań zmierzających do minimalizacji tego stanu jest odsalanie wody słonej zawartej w morzach i oceanach. Technologia przyjazną dla środowiska i bliską zeroemisyjności jest odsalanie wody w pasywnych słonecznych destylatorach, które zasilane są wyłącznie energią promieniowania słonecznego.

W niniejszej części przedstawiono wyniki badań dotyczące parametrów pracy słonecznego destylatora wody w polskich warunkach klimatycznych. Zbadano, jaki wpływ na wydajność urządzenia mają zasolenie wody zasilającej oraz parametry meteorologiczne, takie jak natężenie promieniowania słonecznego, temperatura powietrza i prędkość wiatru.

6.1. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym (Rys. 8) składającym się ze słonecznego destylatora wody, odpowiednich urządzeń oraz systemu akwizycji danych pomiarowych. Do kluczowych urządzeń pomiarowych należą: pyranometr, wiatromierz i czujniki temperatury. Badania prowadzone były w okresie maj–wrzesień 2022 r. na terenie Wydziału Energetyki i Paliw AGH w Krakowie.



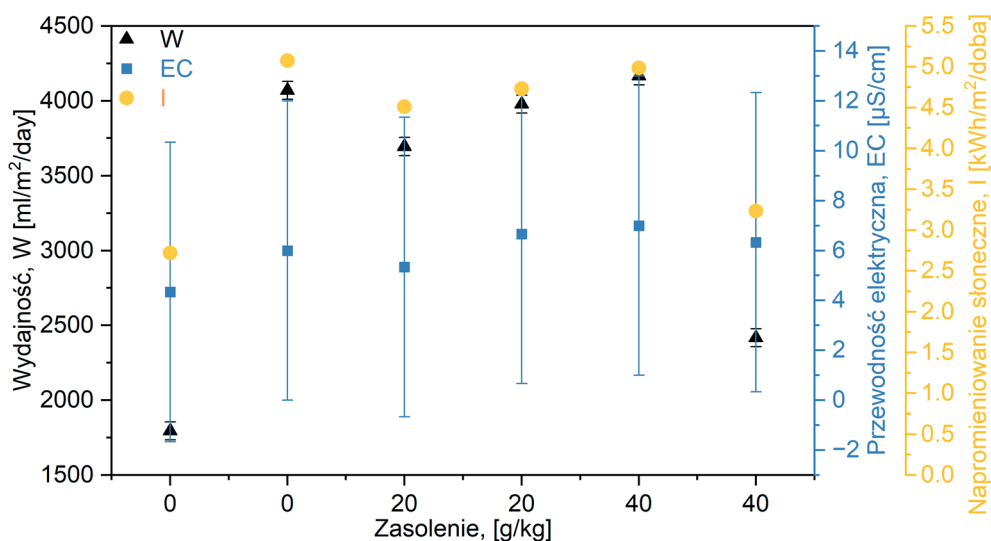
Rys. 8. Zdjęcie stanowiska pomiarowego

Odpowiednio przygotowany destylator transportowano na zewnątrz budynku, nalewano do niego 10 kg wody (wodociągowej lub słonej), zamykano pokrywę i rozpoczynano pomiary. Każde badanie trwało 23 godziny, przy czym o godzinie 19:00 transportowano urządzenie do wnętrza budynku w celu ochrony np. przed gradem lub osobami postronnymi, nie przerywano jednak pomiarów. Dodatkowo w przypadku części badań wewnątrz destylatora umieszczano zbiorniki z 1 kg, 2,5 kg lub 5 kg materiału zmiennofazowego (*phase change*

material, PCM). Po zakończonych pomiarach czyszczono urządzenie i przygotowywano całe stanowisko do kolejnych pomiarów.

6.2. Wyniki i dyskusja

W pierwszym etapie badań określono wpływ zasolenia wody zasilającej oraz poziomu napromieniowania słonecznego na wydajność destylatora oraz przewodność elektryczną destylatu. Wyniki przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9. Wpływ zasolenia wody zasilającej oraz napromieniowania słonecznego na wydajność i przewodność elektryczną destylatu

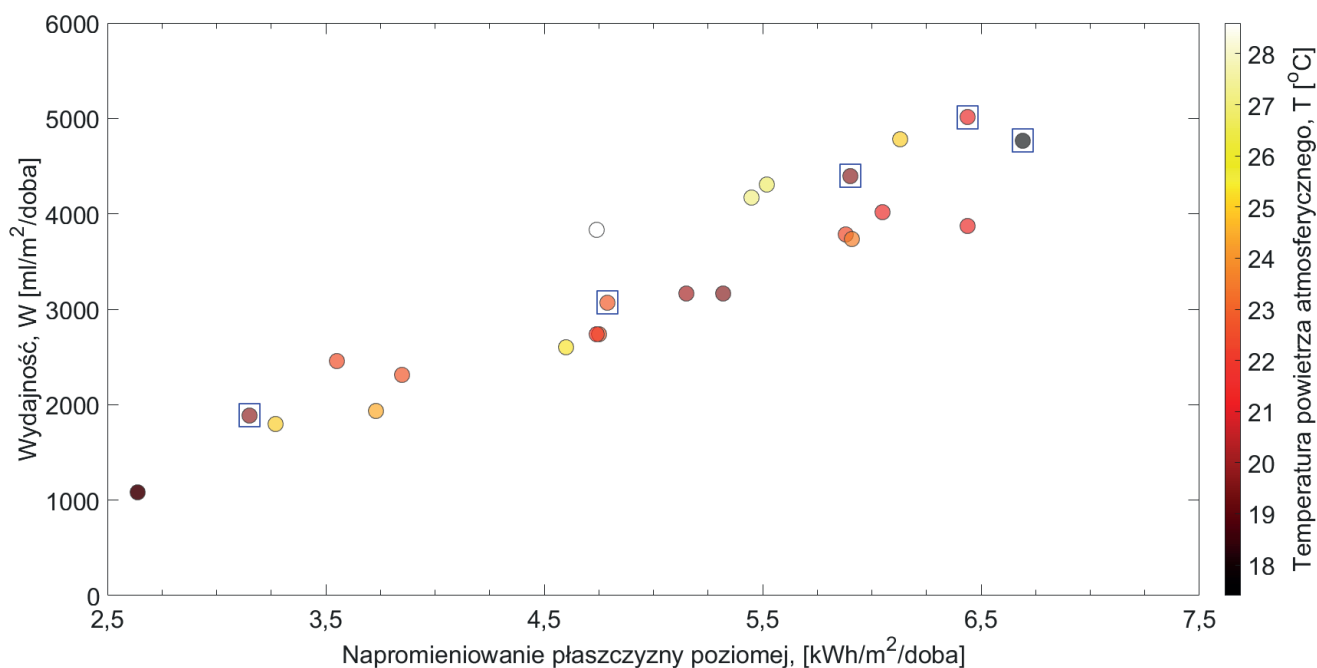
Wydajność destylatora zmienia się od 1796 ml/m²/doba do 4167 ml/m²/doba, przy czym nie zaobserwowano korelacji pomiędzy zasoleniem wody zasilającej i wydajnością destylatora. Widoczne jest jednak, że wydajność destylatora wzrasta wraz z rosnącym napromieniowaniem słonecznym. Dla najniższego zaobserwowanego napromieniowania, tj. 2,72 kWh/m²/doba, wydajność destylatora wynosi 1796 ml/m²/doba, natomiast przy najwyższym napromieniowaniu, na poziomie 5,08 kWh/m²/doba, wydajność destylatora wynosi 4070 ml/m²/doba. Przeprowadzone badania pokazują również wysoką skuteczność odsalania wody, o czym świadczy niska (4,3–7,0 µS/cm) przewodność elektryczna destylatu, uzyskana niezależnie od zasolenia wody zasilającej.

W drugiej serii badań określono wydajność słonecznego destylatora wody w polskich warunkach klimatycznych w okresie maj–wrzesień 2022 r. W czasie tych badań sprawdzano również, jak zastosowanie materiałów zmiennofazowych wpłynie na wydajność destylatora. Wyniki badań zobrazowano na Rys. 10.

Wydajność słonecznego destylatora wody w okresie maj–wrzesień 2022 r. w Krakowie wynosi od 1084

ml/m²/doba do 5014 ml/m²/doba, ze średnią arytmetyczną na poziomie 3288 ml/m²/doba. Widoczna jest zależność pomiędzy wzrostem wydajności destylatora a rosnącym napromieniowaniem słonecznym płaszczyzny poziomej. Warto również podkreślić, że maksymalna osiągnięta w destylatorze temperatura wody wynosi od 52,8 °C do 80,4 °C, co ma istotne znaczenie dla oczyszczania biologicznego wody, np. bakterie E.Coli, rotawirusy i bakterie Salmonella ulegają dezaktywacji już w temperaturze 60 °C (Ray et Jain 2011).

Przeprowadzone badania, oprócz eksperymentalnego określenia parametrów pracy słonecznego destylatora wody w polskich warunkach klimatycznych, pozwoliły również na opracowanie i walidację modelu matematycznego. Pozwala on na wyznaczanie zmian temperatur poszczególnych komponentów destylatora, a także na obliczanie jego wydajności w zależności od natężenia promieniowania słonecznego, temperatury powietrza i prędkości wiatru. Szczegółowy opis modelu wraz z jego walidacją można znaleźć w następujących publikacjach: Mika et Radomska 2025, Radomska et Mika 2023, Radomska et al. 2021, 2023, 2024.



Rys. 10. Wydajność destylatora w zależności od napromieniowania słonecznego płaszczyzny poziomej i temperatury powietrza. Wyniki zaznaczone niebieskimi kwadratami oznaczają pomiary bez zastosowania materiałów PCM

6.3. Wnioski

Zaprezentowane wyniki badań dowodzą skuteczności stosowania słonecznego destylatora wody w polskich warunkach klimatycznych i pokazują jego duży potencjał. Niemniej jednak wymagane są dalsze prace rozwojowe w zakresie zwiększania wydajności urządzenia. Kierunki przyszłych badań mogą obejmować np. metody zwiększania ilości energii doprowadzonej do destylatora poprzez zastosowanie koncentratorów promieniowania słonecznego.

7. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w sektorze budownictwa

Budynki odpowiadają za około 30% konsumpcji energii na świecie. Oznacza to, że jej racjonalne wykorzystanie w tym sektorze ma istotne znaczenie gospodarcze. W związku z tym w ostatnich latach obserwuje się nasilenie działań zmierzających do obniżenia zużycia energii w budynkach. W krajach takich jak Polska, leżących w strefie klimatu umiarkowanego, gdzie dominujące są potrzeby związane z ogrzewaniem budynków, jest to zagadnienie o istotnym znaczeniu. Skutkiem tego, w obiekcie o dobrej izolacyjności cieplnej, istotna staje się kwestia strat ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego dostarczanego do budynku.

Zmniejszenie tych strat i wynikająca z tego poprawa efektywności energetycznej budynku wymagają podgrzania powietrza wentylacyjnego nawiewanego do wnętrza w okresie jesienno-zimowym. W tym celu można zastosować gruntowe wymienniki ciepła wykorzystujące ciepło zakumulowane w gruncie do podgrzewania powietrza zewnętrznego podczas jego przepływu przez wymiennik w okresie zimowym oraz do ochładzania go w okresie letnim. Gruntowe wymienniki ciepła dzieli się na przeponowe i bezprzeponowe. Pierwsze rozwiązanie zawiera przeponę oddzielającą media wymieniające ciepło, czyli grunt i powietrze. W drugim przypadku powietrze przepływa bezpośrednio przez przygotowaną warstwę gruntu.

Pierwsza z wymienionych konstrukcji jest najprostszą, a jej głównym elementem jest rura PCV ułożona w gruncie i zakończona czerpnią powietrza zlokalizowaną powyżej poziomu gruntu. Zastosowanie tego rozwiązania w warunkach polskich było analizowane w ramach prac badawczych prowadzonych w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska.

7.1. Metodyka badań

Funkcjonowanie instalacji wentylacyjnej budynku z wykorzystaniem gruntowego wymiennika ciepła w warunkach polskich zostało przeanalizowane w pracy (Michalak 2022). Do rozważań przyjęto wymiennik zbudowany z rury PCV o średnicy zewnętrznej 0,20 m, długości 50 m i ułożonej z wymaganym spadkiem na średniej głębokości 1 m w gruncie gliniastym. Założono prędkość powietrza w rurze wynoszącą 1,6 m/s. Obiekt został zlokalizowany w południowej części województwa małopolskiego. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o dane meteorologiczne dla Nowego Sącza, według normy PN-EN 16798-5-1:2017 w kroku godzinowym dla pełnego roku (8760 godzin). Temperatura gruntu na głębokości wynika z zależności:

$$T_{gnd} = T_{e;mn;an} + (T_{e;max;m} - T_{e;mn;an}) \times e^{-\xi} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t_{an}}{8760} - \xi - f_t\right) \quad (3)$$

gdzie współczynnik ξ jest określony jako:

$$\xi = z \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho_{gnd} \cdot c_{gnd}}{\lambda_{gnd} \cdot 8760 \cdot 3600}} \quad (4)$$

zaś współczynnik przesunięcia czasowego f_t :

$$f_t = \pi \left(\frac{2 \cdot t_{an;min}}{8760} + 1 \right) \quad (5)$$

W powyższych wzorach T_g oznacza temperaturę gruntu, T_e – temperaturę zewnętrzną, $T_{e;mn;an}$ – średnią roczną temperaturę powietrza zewnętrznego, $T_{e;max;m}$ – maksymalną średnią miesięczną temperaturę powietrza, t_{an} – bieżącą godzinę ($t_{an} = 0$ h na początku roku), oraz $t_{an;min}$ – czas w roku, gdy miesięczna

temperatura powietrza zewnętrznego jest najmniejsza. Parametry gruntu określa jego gęstość (ρ_{gnd}), ciepło właściwe (c_{gnd}) oraz współczynnik przewodzenia ciepła (λ_{gnd}).

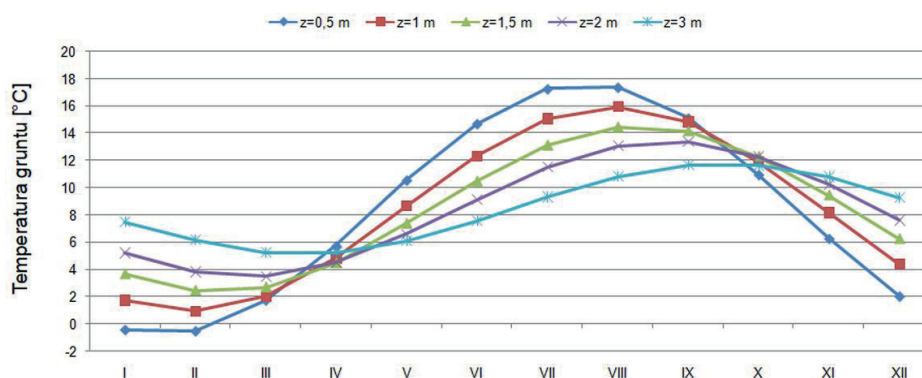
7.2. Wyniki obliczeń wymiennika gruntowego

Dla zobrazowania analizowanego zjawiska na Rys. 11 przedstawiono wyniki obliczeń wartości średniej miesięcznej temperatury gruntu w ciągu roku dla różnych głębokości dla Nowego Sącza.

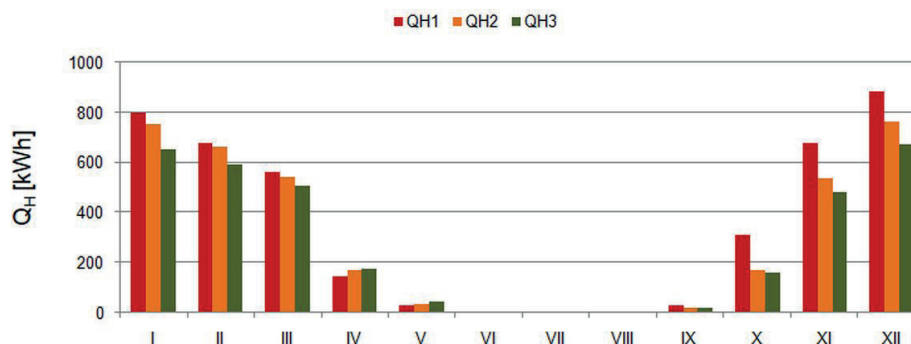
W dalszej części założono, że analizowany wymiennik podgrzewa powietrze wentylacyjne dostarczane do budynku mieszkalnego jednorodzinnego o powierzchni ogrzewanej 132 m² oraz kubaturze 311 m³ i zamieszkałego przez pięć osób.

Symulację godzinowego zapotrzebowania budynku na ciepło przeprowadzono w oparciu o model ciepło-elektryczny opisany w pracy (Narowski 2008). Przyjęto stałe (300 W) wewnętrzne zyski ciepła podczas

obecności użytkowników w budynku, tj. w dni robocze z wyjątkiem czasu od 8:00 do 16:00, w weekendy z wyjątkiem czasu od 8:00 do 16:00 od maja do września oraz 24 h/dobę w pozostałe weekendy od października do kwietnia. Założono stały przepływ powietrza wentylacyjnego o wartości 150 m³/h aktywny tylko podczas obecności mieszkańców w budynku. Roczne projektowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku wynosi 4116 kWh, a na Rys. 12 oznaczono je jako wariant 1 (QH1). Zastosowanie zaproponowanego wymiennika ciepła (wariant 2 obliczeń – QH2) spowodowało zmniejszenie wartości tego zapotrzebowania do 3656 kWh, tzn. o 459 kWh, czyli o ponad 11%. Umieszczenie tego samego wymiennika na głębokości 2 m (wariant 3 – QH3) skutkuje zmniejszeniem zapotrzebowania cieplnego do wartości 3300 kWh, czyli niemal o 20% względem wariantu bazowego. Wymagać to jednak będzie kosztowniejszych prac ziemnych, co należy uwzględnić na etapie projektowania takiego systemu.



Rys. 11. Temperatura gruntu uzależniona od głębokości – obliczenia dla Nowego Sącza



Rys. 12. Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku

Obliczenia dla wariantu 1 wykazały, że podczas ogrzewania budynku wentylacja była aktywna przez 3167 godzin. Praca wentylatora nawiewnego o mocy 50 W i wydajności 200 m³/h wymaga w tym czasie dostarczenia 158 kWh energii. Ta wartość również powinna być wzięta pod uwagę na etapie projektowania i oceny efektów ekonomicznych rozpatrywanego rozwiązania.

7.3. Podsumowanie

Dostarczanie do budynku świeżego powietrza wentylacyjnego z zewnątrz, wymagane ze względów higienicznych, w okresie zimowym wiąże się z koniecznością jego podgrzania i wynikającymi stąd nakładami energetycznymi i finansowymi. Dla ich ograniczenia możliwe jest zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła wykorzystującego ciepło zakumulowane w gruncie. Niemniej jednak jego wykorzystanie powinno być poprzedzone szczegółową analizą uwzględniającą nie tylko odzyskiwane ciepło, ale także energię konieczną do zasilania urządzeń pomocniczych, np. silników wentylatorów. Stanowi ona bowiem istotny, niepomijalny element bilansu energetycznego każdego z przedstawionych rozwiązań. Przedstawione rezultaty obliczeń wskazują na dodatni efekt energetyczny takiego rozwiązania w polskich warunkach.

8. Wpływ inteligencji budynków na ich właściwości energetyczne – wskaźnik SRI

Transformacja energetyczna dotyczy z jednej strony przekształcenia miksu energetycznego w celu ograniczenia efektu cieplarnianego powodowanego przez wykorzystanie energii pochodzącej ze spalania paliw kopalnych, a z drugiej strony ograniczenia zapotrzebowania na energię przez odbiorców. Proces ten oddziałuje praktycznie na wszystkie dziedziny życia i jest motywacją do wielokierunkowych badań i opracowywania narzędzi analitycznych

w projekcie „Obserwatorium Transformacji Energetycznej (OTE) jako narzędzie wspierania rozwoju społeczno-gospodarczego w Polsce” realizowanym w latach 2023–2025 przez konsorcjum, w skład którego wchodzi: Akademia Górniczo-Hutnicza, Ministerstwo Klimatu i Środowiska (MKiŚ) oraz Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ). Projekt jest prowadzony w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Jednym z kierunków badań podjętych w ramach OTE jest opracowanie krajowej metodyki oceny gotowości budynków do wykorzystania inteligentnych rozwiązań za pomocą wskaźnika gotowości do inteligencji SRI (*smart readiness indicator* – SRI). Działania te doprowadziły do włączenia Polski w 2024 r. do europejskiej fazy testów metodyki ewaluacji wskaźnika SRI realizowanej pod egidą Dyrekcji Generalnej ds. Energii Komisji Europejskiej (DG ENER).

8.1. Zasoby budowlane a transformacja energetyczna

Zasoby budowlane są największym konsumentem energii w Unii Europejskiej. Budynki w UE odpowiadają za około 40% całkowitego zużycia energii, ponad 1/3 emisji gazów cieplarnianych oraz około 80% zapotrzebowania na energię potrzebną do zapewnienia komfortu w budynkach mieszkalnych. Sytuacja ta praktycznie nie uległa zmianie od czasu opublikowania w 2002 r. pierwszej Dyrektywy w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (*Energy Performance Buildings Directive* – EPBD). Remedium na ten stan jest postawienie w trzeciej aktualizacji dyrektywy EPBD w roku 2018 wymagania, aby instalacje techniczne budynków były wyposażane w inteligentne rozwiązania. W dyrektywie EPBD 2018 zdefiniowano również szczegółowo wymagania stawiane współczesnym budynkom, dzięki którym nastąpi ograniczenie zapotrzebowania na energię i ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Wymagania te obejmują siedem właściwości zgrupowanych w trzech obszarach: budynek, użytkownik, zasilanie. Do obszaru **budynek** przypisano właściwości związane bezpośrednio z funkcjonowaniem budynku, takie jak efektywność energetyczna i pewność działania. Do obszaru **użytkownik** przypisano właściwości związane z obsługą użytkownika, takie jak zapewnienie komfortu, wygody, właściwych warunków zdrowotnych i dobrego samopoczucia oraz informacji o działaniu budynku i kosztach jego eksploatacji. Do obszaru **zasilanie** przypisano właściwości związane ze współpracą budynku z inteligentnymi sieciami zasilającymi oraz lokalnymi źródłami energii odnawialnej i magazynami energii. Warto zauważyć, że wymagania powyższe nie są skupione wyłącznie na efektywności energetycznej budynków, ale uwzględniają ich właściwości użytkowe oraz elastyczność energetyczną. W celu określenia poziomu spełniania przez budynki tych właściwości w EPBD 2018 zdefiniowano wskaźnik gotowości budynków do inteligencji. W Rozporządzeniu delegowanym Komisji Europejskiej Nr 2020/2155 z 14 października 2020 r., stanowiącym *de facto* uzupełnienie dyrektywy EPBD z 2010 r., opisano metodykę obliczania tego wskaźnika. Szczegóły badań, które doprowadziły do opracowania metodyki ewaluacji wskaźnika, Komisja Europejska przedstawiła w 2020 r. w dokumencie *Final Report on the Technical Support to the Development of a Smart Readiness Indicator for Buildings* (Verbeke et al. 2020). Metodyka ewaluacji wskaźnika SRI jest aktualnie przedmiotem badań w wielu ośrodkach europejskich. Celem badań jest jej zweryfikowanie przed wdrożeniem jako obowiązkowego modelu oceny gotowości do inteligencji określonych typów budynków w państwach członkowskich Unii Europejskiej w drugiej połowie 2027 r. Obowiązek wdrożenia został zapowiedziany w aktualizacji dyrektywy EPBD z 2024 r. w odniesieniu do budynków niemieszkalnych o zapotrzebowaniu na moc dla instalacji ogrzewania, chłodzenia i wentylacji powyżej 290 kW. Z tego właśnie powodu tematyka została podjęta przez zespół OTE. Istotnym celem stosowania ewaluacji wskaźnika SRI dla budynków

jest możliwość precyzyjnej identyfikacji, które instalacje techniczne wymagają modernizacji w ramach planowanej renowacji budynku. W ramach fazy testów metodyki w państwach członkowskich Unii Europejskiej udostępniony został doświadczalny arkusz kalkulacyjny Excel SRI_calculator_sheet_v4.5 (Ma et al. 2023) do obliczania wartości wskaźnika, wraz z instrukcją użytkownika. Utworzone zostały także ramy organizacyjne wsparcia testów przez DG ENER i wymiany doświadczeń pomiędzy zespołami realizującymi testy w poszczególnych państwach UE. Faza testów ma na celu zweryfikowanie metodyki ewaluacji oraz dostarczenie pierwszych danych dotyczących wartości wskaźnika SRI w zasobach budowlanych UE. Trzon metodyki bazuje na europejskiej normie EN 15232 z 2007 r. (na temat wpływu systemów automatyki instalacji technicznych na efektywność energetyczną budynku) wraz z późniejszymi aktualizacjami (2012, 2017), przekształconej w 2021 r. w normę międzynarodową ISO 52120.

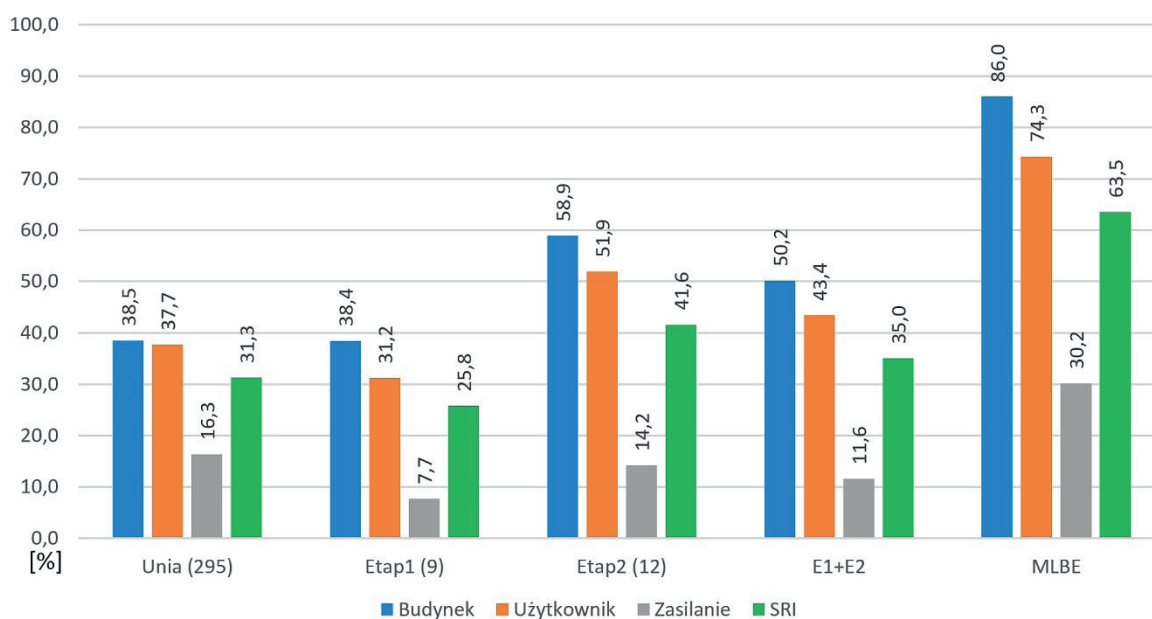
8.2. Testowanie metodyki ewaluacji wskaźnika gotowości budynków do inteligencji (SRI) w Polsce w ramach europejskiego programu testów

Tematyka inteligentnych budynków została zainicjowana w Katedrze Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii WEAlIB AGH w drugiej połowie lat 90. ubiegłego wieku. Pierwszym efektem prowadzonych badań było wdrożenie pilotażowej instalacji automatyki budynku w pawilonie B1 AGH oraz opracowanie koncepcji zintegrowanego systemu automatyki i bezpieczeństwa budynku. Cel integracji polegał na wykorzystaniu synergii pomiędzy systemami technicznymi stosowanymi w budynku do sterowania odbiornikami energii w poszczególnych pomieszczeniach w zależności od obecności użytkowników. Idea ta została przyjęta i zastosowana m.in. we wszystkich budynkach nowego kampusu Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie – Ruczaju oddanych do użytkowania

w latach 2001–2017, budynku Centrum Energetyki AGH (2014), a także w Małopolskim Laboratorium Budynków Energooszczędnych (MLBE) Politechniki Krakowskiej (2014). Wejście Polski do fazy testów metodyki ewaluacji wskaźnika SRI dało możliwość uczestnictwa w działaniach DG ENER, a także pozwoliło na obiektywną ocenę wspomnianych rozwiązań. Inteligencja budynku (*smartness of a building*) jest rozumiana jako współdziałanie wszystkich instalacji technicznych w celu spełniania wymagań stawianych budynkom. Podstawę tej synergii muszą stanowić inteligentne rozwiązania i nowoczesne technologie. Poziom zastosowania w budynku takich rozwiązań określa się jako „gotowość do inteligencji” (*smart readiness*). Podstawowymi kryteriami oceny gotowości budynku do inteligencji są wymagania stawiane współczesnym budynkom zdefiniowane w aktualizacji dyrektywy EPBD z 2018 r. Metodyka polega na wielokryterialnej ważonej ocenie wpływu poszczególnych branżowych instalacji technicznych budynku (nazywanych domenami) na spełnienie tych wymagań. Wynik oceny zależy od sposobu sterowania i współdziałania poszczególnych instalacji technicznych budynku

odpowiedzialnych za wykorzystanie energii, obsługę użytkowników oraz elastyczność energetyczną. W metodyce wyselekcjonowano 54 funkcjonalności instalacji technicznych, nazywane usługami technicznymi, które mogą podlegać pięciu różnym sposobom sterowania, określanym jako poziomy funkcjonalności usług. Ewaluacja wartości wskaźnika SRI wymaga identyfikacji istniejących w budynku instalacji technicznych, usług technicznych w każdej instalacji oraz poziomów funkcjonalności tych usług. Po wprowadzeniu danych do arkusza kalkulacyjnego SRI_calculaton_sheet_v4.5 otrzymuje się zarówno wynik SRI dla całego budynku oraz wyniki cząstkowe wpływu poszczególnych instalacji technicznych na każdą wymaganą właściwość budynku, jak i całkowitą wartość poziomu spełnienia każdej wymaganej właściwości.

Dotychczas w fazie testów w Polsce przebadano łącznie 22 budynki. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 13. Widoczne są tam średnie wartości wskaźnika SRI oraz jego składników dla określonych grup budynków. Budynku MLBE nie włączano do średniej w Polsce ze względu na jego charakter i wysoką wartość wskaźnika.



Rys. 13. Porównanie wyników testów średniej wartości wskaźnika SRI w Polsce i UE, Etap1 – pierwsze 9 budynków przebadanych w Polsce, Etap2 – 12 budynków nowego Kampusu UJ

8.3. Wnioski

Badania potwierdzają efektywność metodyki, która prawidłowo różnicuje ocenę budynków w zależności od poziomów funkcjonalności instalacji technicznych. Jednocześnie przeprowadzone testy wykazały, że koncepcja wszechstronnej integracji systemów technicznych budynków w celu wykorzystania synergii pomiędzy nimi, zaproponowana pod koniec lat 90., znalazła potwierdzenie zarówno w dokumentach unijnych, jak i w wynikach ewaluacji budynków, w których ją zastosowano. Warto zauważyć, że chociaż budynki Kampusu UJ zostały zbudowane jeszcze przed opublikowaniem dyrektywy EPBD 2018, w której zapowiedziano ideę wskaźnika SRI, to uzyskały wyższą średnią poszczególnych parametrów niż średnia liczona po ewaluacji 295 budynków w Unii Europejskiej. W trakcie badań metodyki zidentyfikowano także problemy wynikające z niedopasowania katalogu usług technicznych do rozwiązań spotykanych we współczesnych budynkach. Spostrzeżenia te są zbieżne z wnioskami przedstawionymi przez zespoły realizujące fazę testową w innych państwach członkowskich UE. Aktualnie rozpoczęły się prace nad dostosowaniem katalogu usług do współczesnych budynków (na podstawie: „Energetyka Rozproszona” 12/2024).

Bibliografia:

- Buchanec S., Gnatowski M., Brus G. (2021), *Integration of Classical Mathematical Modeling with an Artificial Neural Network for the Problems with Limited Dataset*, „Energies” 14 (16): 5127.
- Buczyński R., Kim R. (2022a), *On Optimization of the Coke Oven Twin-Heating Flue Design Providing a Substantial Reduction of Nox Emissions. Part I: General Description, Validation of the Models and Interpretation of the Results*, „Fuel” 323: 124194.
- Buczyński R., Kim R. (2022b), *On Optimization of the Coke Oven Twin-Heating Flue Design Providing a Substantial Reduction of Nox Emissions. Part II: Optimized Designs for COG- And MG-Fired Units as Well as Operating Characteristics of the New Heating Flues*, „Fuel” 323: 124193.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2016a), *One-Dimensional Model of Heat-Recovery, Non-Recovery Coke Ovens. Part I: General Description and Hydraulic Network Sub-Model*, „Fuel” 181: 1097–1114.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2016b), *One-Dimensional Model of Heat-Recovery, Non-Recovery Coke Ovens. Part II: Coking-Bed Sub-Model*, „Fuel” 181: 1115–1131.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2016c), *One-Dimensional Model of Heat-Recovery, Non-Recovery Coke Ovens. Part III: Upper-Oven, Down-Comers and Sole-Flues*, „Fuel” 181: 1132–1150.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2016d), *One-Dimensional Model of Heat-Recovery, Non-Recovery Coke Ovens. Part IV: Numerical Simulations of the Industrial Plant*, „Fuel” 181: 1151–1161.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2018a), *Investigation of the Heat-Recovery/Non-Recovery Coke Oven Operation Using a One-Dimensional Model*, „Applied Thermal Engineering” 144: 170–180.
- Buczyński R., Weber R., Kim R., Schwöppe P. (2018b), *One-Dimensional Model of Heat-Recovery, Non-Recovery Coke Ovens. Part V: Coking-Bed Sub-Model Using an Inverse Procedure*, „Fuel” 225: 443–459.
- Buczyński R., Uryga-Bugajska I., Tokarski M. (2022), *Recent Advances in Low-Gradient Combustion Modelling of Hydrogen Fuel Blends*, „Fuel” 328: 125265.
- CEWEP (2023), *Industry Barometer Waste-to-Energy 2023*, <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2023/11/Industry-Barometer-Waste-to-Energy-2023.pdf> [dostęp: 17.02.2024].
- Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on Energy Efficiency and Amending Regulation (EU) 2023/955 (recast), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791> [dostęp: 17.02.2024].
- Fornalik-Wajs E., Roszko A., Donizak J. (2020), *Nanofluid Flow Driven by Thermal and Magnetic Forces – Experimental and Numerical Studies*, „Energy” 201: 117658.
- Gnatowski M., Buchanec S., Brus G. (2023), *The Prediction of the Polarization Curves of a Solid Oxide Fuel Cell Anode with an Artificial Neural Network Supported Numerical Simulation*, „International Journal of Hydrogen Energy” 48 (31): 11823–11830.
- Gurgul S., Kura T., Fornalik-Wajs E. (2020), *Numerical Analysis of Turbulent Heat Transfer in the Case of Minijets Array*, „Symmetry” 12 (11): 1785.
- Gurgul S., Fornalik-Wajs E. (2024), *Understanding of RANS-Modelled Impinging Jet Heat Transfer Through Turbulence Kinetic Energy, Momentum and Energy Budgets*, „Archives of Thermodynamics” 45 (3): 13–30.
- Gurgul S., Fornalik-Wajs E., Skrzypek E., Skrzypek M., Cetnar J. (2022), *Temperature Distribution in the Pre-Concept Research HTGR*, [w:] W. Stanek (red.), CPOTE 2022: 7th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering: Towards Sustainable & Decarbonized Energy System, Warsaw, Poland, 20–23 September 2022 (conference proceedings), Politechnika Śląska, Gliwice: 321–322.
- Jaszczur M. (2014), DNS, „Journal of Physics: Conference Series” 530 (1): 012022.
- Jaszczur M., Śliwa T. (2013), *The Analysis of Long-Term Borehole Heat Exchanger System Exploitation*, „Computer Assisted Methods in Engineering and Science” 20: 227–235.
- Jaszczur M., Polepszyc I., Sapińska-Śliwa A., Gonet A. (2017), *An Analysis of the Numerical Model Influence on the Ground Temperature Profile Determination*, „Journal of Thermal Science” 26 (1): 1–7.
- Jaszczur M., Teneta J., Styszko K., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., Łopian N. (2019a), *The Field Experiments and Model of the Natural Dust Deposition Effects on Photovoltaic Module Efficiency*, „Environmental Science and Pollution Research” 26 (9): 8402–8417.
- Jaszczur M., Dudek M., Kolenda Z. (2019b), *Thermodynamic Analysis of High Temperature Nuclear Reactor Coupled with Advanced Gas Turbine Combined Cycle*, „Thermal Science” 23 (Suppl. 4): 1187–1197.
- Kenjeres S., Fornalik-Wajs E., Wrobel W., Szmyd J.S. (2020), *Inversion of Flow and Heat Transfer of the Paramagnetic Fluid in A Differentially Heated Cube*, „International Journal of Heat and Mass Transfer” 151: 1–14.
- Kleszcz S., Jaszczur M., Pawela B. (2023), *An Analysis of the Periodic Counterflow Heat Exchanger for Air-To-Air Heat Recovery Ventilators*, „Energy Reports” 9: 77–85.

- Komisja Europejska (2008), *Guidelines on the Interpretation of the R1 Energy Efficiency Formula for Incineration Facilities Dedicated to the Processing of Municipal Solid Waste According to Annex II of Directive 2008/98/EC on Waste*, <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance.pdf> [dostęp: 17.02.2024].
- Komisja Europejska (2018), *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance)*, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj> [dostęp: 17.02.2024].
- Komisja Europejska (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal*, COM/2019/640/final, Bruksela, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> [dostęp: 17.02.2024].
- Komisja Europejska (2023), *Commission Welcomes Completion of Key 'Fit For 55' Legislation, Putting EU on Track to Exceed 2030 Targets*, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754 [dostęp: 17.02.2024].
- Komisja Europejska (b.r.a), *Operational Programme Infrastructure and Environment 2007–2013*, <https://trimis.ec.europa.eu/programme/operational-programme-infrastructure-and-environment-2007-2013> [dostęp: 17.02.2024].
- Komisja Europejska (b.r.b), *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis_en [dostęp: 10.03.2025].
- Kura T., Fornalik-Wajs E., Wajs J., Kenjeres S. (2021), *Curved Surface Minijet Impingement Phenomena Analysed with Z-F Turbulence Model*, „Energies” 14 (7): 1–23.
- Ma Y., Verbeke S., Protopapadaki Ch., Dourlens-Quaranta S. (2023), *Assessment Package: Practical Guide SRI Calculation Framework v4.5*, <https://green-with-it.de/wp-content/uploads/2024/08/Practical-Guide-SRI-calculation-framework-v4.5.pdf> [dostęp: 10.12.2024].
- Michalak P. (2022), *Hourly Simulation of an Earth-to-Air Heat Exchanger in a Low-Energy Residential Building*, „Energies” 15 (5): 1898.
- Mika Ł., Radomska E. (2025), *Solar Energy to Water Desalination: Long-Term Experimental Studies of Solar Still in Poland*, „Energies” 18 (5): 1070.
- Narowski P. (2008), *Podstawy uproszczonej metody godzinowej obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków*, „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce” 3: 77–84.
- Pajak M., Buchaniec S., Kimijima S., Szmyd J.S., Brus G. (2021), *A Multiobjective Optimization of a Catalyst Distribution in a Methane/Steam Reforming Reactor Using a Genetic Algorithm*, „International Journal of Hydrogen Energy” 46 (38): 20183–20197.
- Pajak M., Brus G., Kimijima S., Szmyd J.S. (2023), *Coaxial Multi-Criteria Optimization of a Methane Steam Reforming Reactor for Effective Hydrogen Production and Thermal Management*, „Energy and AI” 13: 100264.
- Pawłowski P., Buchaniec S., Prokop T., Iwai H., Brus G. (2023), *Microstructure Evolution of Solid Oxide Fuel Cell Anodes Characterized by Persistent Homology*, „Energy and AI” 14: 100256.
- Pleskacz L., Fornalik-Wajs E., Gurgul S. (2020), *Magnetically Influenced Forced Convection in the Asymmetrically Heated Pipe – Heat Transfer and Flow Structure Analysis*, „Symmetry” 5 (4): 1–19.
- Poretti F., Stengler E. (2022), *The Climate Roadmap of the European Waste-to-Energy Sector. The Path to Carbon Negative*, [w:] *Proceeding of the 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-16)*, 23–24 October 2022, Lyon, France. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4284664 [dostęp: 17.02.2024].
- Prokop T.A., Buchaniec S., Szmyd J., Brus G. (2024), *A Parametric Analysis of the Long-Term Performance of a Solid Oxide Fuel Cell Anode*, „International Journal of Heat and Fluid Flow” 110: 109583.
- Radomska E., Mika Ł. (2023), *Long-Term Modeling of the Performance of a Solar Still with Phase-Change Material*, „Applied Thermal Engineering” 235 (July): 121339.
- Radomska E., Mika Ł., Sztekler K., Kalawa W. (2021), *Experimental Validation of the Thermal Processes Modeling in a Solar Still*, „Energies” 14 (8): 2321.
- Radomska E., Mika Ł., Sztekler K., Kalawa W., Lis Ł., Pielichowska K., Szumera M., Rutkowski P. (2023), *Experimental and Theoretical Investigation of Single-Slope Passive Solar Still with Phase-Change Materials*, „Energies” 16 (3): 1188.
- Radomska E., Mika Ł., Boruta P., Bujok T. (2024), *The Performance of Solar Still in Continental Climates: A Case Study in Poland*, „Heat Transfer Engineering”: 1–13.
- Ray C., Jain R. (Eds.) (2011), *Drinking Water Treatment. Focusing on Appropriate Technology and Sustainability*, Springer Netherlands.
- Sato Y., Moździerz M., Berent K., Brus G., Nomura M. (2024), *Unveil Carbon Dioxide Recycling Potential Throughout Distributor-Type Membrane Reactor*, „Journal of CO₂ Utilization” 82: 102763.
- Szemer M., Buchaniec S., Prokop T., Brus G. (2025), *Topology-Informed Machine Learning for Efficient Prediction of Solid Oxide Fuel Cell Electrode Polarization*, „Energy and AI” 20: 100495.
- Szmyd J.S., Jaszczur M., Ozoe H. (2002), *Numerical Calculation of Spoke Pattern in Bridgman Top Seeding Convection*, „Numerical Heat Transfer, Part A: Applications” 41 (6–7): 685–695.
- Verbeke S., Aerts D., Reynnders G., Ma Y., Waide P. (2020), *Final Report on the Technical Support to the Development of a Smart Readiness Indicator for Buildings*, European Commission, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f9e6d89d-fbb1-11ea-b44f-01aa75ed71a1> [dostęp: 10.02.2025].
- Wajs J., Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Bajor M. (2019), *High Performance Tubular Heat Exchanger with Minijet Heat Transfer Enhancement*, „Heat Transfer Engineering” 40 (9–10): 772–783.
- Wajs J., Kura T., Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Mikielwicz J. (2022), *Numerical Analysis of High Temperature Minichannel Heat Exchanger for Recuperative Microturbine System*, „Energy” 238: 121683.

Efficiency of energy generation and use

Abstract: This chapter presents selected research activities of three faculties of AGH University related to the efficiency of energy generation and use, with a particular focus on distributed energy systems. It covers combustion and cooling processes, energy management in buildings, and the integration of renewable energy sources with storage technologies. The development of methods for assessing smart readiness of buildings (SRI) and modelling of hybrid energy systems is also addressed. The work supports the energy transition and the implementation of modern local solutions.

Keywords: energy efficiency, heat, mass and momentum transfer, combustion processes, industrial cooling, heat recovery, renewable energy sources (RES), energy storage, water desalination, smart buildings, SRI indicator

dr hab. inż. Artur Wyrwa, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Energetyki i Paliw
awyrwa@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Nauka jako wsparcie rozwoju efektywności energetycznej

prof. dr hab. inż. Marek Jaszczur,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

dr hab. inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Grzegorz Brus,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

2. Efektywność w energetyce i przemyśle koksowniczym

dr hab. inż. Rafał Buczyński, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

3. Efektywność energetyczna w przemyśle górniczym

dr hab. inż. Łukasz Mika, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

4. Efektywność energetyczna w gospodarce komunalnej

dr hab. inż. Marian Banaś, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Tadeusz Pająk, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH

5. System wytwarzania i magazynowania energii z OZE

dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej AGH
dr hab. inż. Andrzej Gołdasz, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

dr hab. inż. Ryszard Klempka, prof. AGH,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr hab. inż. Łukasz Mika, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

dr hab. inż. Karol Sztekler, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Wojciech Kalawa,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Łukasz Lis,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

6. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do odsalania wody

dr inż. Ewelina Radomska,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

7. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w sektorze budownictwa

dr inż. Piotr Michalak,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH

8. Wpływ inteligencji budynków na ich właściwości energetyczne – wskaźnik SRI

Paweł Kwasnowski,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej AGH