



POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WSPÓLNA SZKOŁA DOKTORSKA
KATEDRA MASZYN I URZĄDZEŃ
ENERGETYCZNYCH



Dyscyplina

Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Optymalizacja procesu produkcji szkła
opakowaniowego mająca na celu zmniejszenie zużycia
mediów energetycznych oraz ograniczenie emisji
zanieczyszczeń

Praca doktorska
mgr inż. Przemysław DEC

Promotor
Prof. dr hab. inż. Anna SKOREK-OSIKOWSKA

Opiekun branżowy
mgr inż. Aleksandra GÓZDŹ

Gliwice, 2023

Żonie, Rodzicom, Rodzinie i Przyjaciółom

Za wsparcie i obecność.

Składam najserdeczniejsze wyrazy wdzięczności Prof. dr hab. inż. Annie Skorek-Osikowskiej za opiekę naukową, życzliwość i poświęcony mi czas, które przyczyniły się do powstania mojej pracy doktorskiej.

Podziękowania kieruję także do współpracowników Huty Szkła w Orzeszu, a w szczególności opiekunowi branżowemu mgr inż. Aleksandrze Gózdź Kierownicze Projektu ds. środowiskowych oraz swojemu przełożonemu, Kierownikowi Działu Zarządzania Projektem mgr inż. Bartoszowi Myszkiewiczowi.

*Praca ta powstała w ramach Doktoratu Wdrożeniowego, finansowanego przez
Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa w Polsce.*

STRESZCZENIE

Tematem rozprawy doktorskiej jest optymalizacja procesu produkcji szkła w kontekście redukcji zużycia mediów energetycznych oraz emisji do środowiska. W pierwszej części pracy przedstawiony został proces produkcji szkła, z podziałem na poszczególne działy, w celu zwiększenia świadomości odbiorcy jak złożony proces miałby zostać optymalizowany w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego. Została również zaprezentowana analizowana huta szkła, w której pracuje doktorant prowadzący badania do rozprawy doktorskiej w programie doktoratu wdrożeniowego. Pierwsza część pracy kończy się przeglądem istniejących lub też innowacyjnych metod usprawniających w przemyśle ciężkim, w tym również przemyśle szklarskim. Przegląd ten stanowił bazę wiedzy i doświadczeń wspierających w decyzjach o podjęciu poszczególnych przedsięwzięć udoskonalających.

Druga część pracy zawiera opis wdrożonych rozwiązań w analizowanej hucie szkła. W toku prowadzonego doktoratu wdrożeniowego w hucie szkła, wykonano wiele prac związanych z przeprowadzeniem przedsięwzięć mających na celu zmniejszenia zużycia mediów energetycznych w procesie produkcji szkła. Rozpoczęto od podstawowych rozwiązań, takich jak implementacja Systemu do Zarządzania Mediami Energetycznymi, modernizacja oświetlenia czy też wymiana sterowania silnikami wentylatorów, wymagających niedużych nakładów inwestycyjnych, mniejszego zaangażowania pracowników wyspecjalizowanych w procesie topienia masy szklanej i skutkujących jak najmniejszym efektem redukcji zużycia mediów i emisji do środowiska. Następnym krokiem było przejście do rozwiązań dużo bardziej strategicznych, ingerujących w proces topienia szkła oraz angażujących wiele działów i pracowników huty szkła, takich jak zastępowanie stłuczka szklaną tradycyjnych surowców zawartych w zestawie szklarskim kierowanym do wytopienia masy szklanej oraz wdrożenie systemu odzysku ciepła odpadowego. Te dwa działania mają największy wpływ na osiągnięcie zmniejszenia zużycia mediów energetycznych i ograniczenia emisji zanieczyszczeń. Szczegółowo opisano wdrożone rozwiązanie odzysku ciepła odpadowego oparte na kotła odzyskowych, ekonomizerach, turbinie parowej oraz sprężarce promieniowej. Wykonano bilanse energetyczne zainstalowanego bloku odzysku ciepła. Obliczono oszczędności energetyczne dla huty szkła.

Pracę doktorską zwieńczono analizą ekologiczną i ekonomiczną wszystkich przeprowadzonych rozwiązań w celu weryfikacji ich efektu oraz dyskusją i wnioskami.

ABSTRACT

The subject of the doctoral thesis is the optimization of the glass production process in the context of reducing energy consumption and emissions to the environment. The first part of the doctoral thesis presents the glass production process, with a breakdown into each individual department, to increase the public awareness of how complex the process was to be optimized during the implementation doctorate. The glassworks under analysis, where the doctoral student was conducting the research for the doctoral thesis works in the implementation doctorate program, is also presented. The first part of the work ends with a review of existing or innovative optimization methods in heavy industry, including the glass industry. This review served as a knowledge and experience base to support decisions on undertaking individual optimization initiatives.

The second part of the work contains a description of the implemented optimization solutions in the analyzed glassworks. During the implementation doctorate conducted in the glassworks, many works related to conducting activities aimed at optimizing the glass production process were performed. It started with basic solutions, such as the implementation of the Energy Media Management System, modernization of lighting or replacing fan motor control, requiring small investment outlays, less involvement of specialized employees in the glass melting process, and the smallest effect of reducing media consumption and emissions to the environment. Then moving on to much more strategic solutions, interfering with the glass melting process and involving many departments and employees of the glassworks, such as replacing by cullet traditional raw materials contained in the glass set directed to the melting of glass mass and implementing a waste heat recovery system. These two optimization solutions have the greatest impact on achieving a reduction in energy consumption and limiting pollution emissions. The implemented waste heat recovery solution based on recovery boilers, economizers, steam turbine, and radial compressor was described in detail. Energy balances of the installed heat recovery block were performed. Energy savings for the glassworks were calculated.

The doctoral dissertation was concluded with an ecological and economic analysis of all implemented solutions to verify the effect of the performed optimizations and a discussion and conclusions.

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
2. Cele, zakres i tezy rozprawy doktorskiej	10
2.1. Cel rozprawy doktorskiej.....	10
2.2. Zakres rozprawy doktorskiej	10
2.3. Tezy rozprawy doktorskiej	10
3. Opis produkcji szkła	12
3.1. Składowanie i przygotowanie surowców do sporządzenia zestawu szklarskiego	12
3.2. Proces topienia szkła w piecach szklarskich	15
3.3. Formowanie szkła.....	17
3.4. Uszlachetnianie na gorąco	19
3.5. Odprężanie szkła.....	20
3.6. Uszlachetnianie na zimnym końcu	21
3.7. Kontrola jakości.....	22
3.8. Pakowanie i magazynowanie.....	23
4. Prezentacja analizowanej huty szkła.....	25
5. Prezentacja sylwetki doktoranta wdrożeniowego	28
6. Przegląd wybranych metod zwiększania efektywności energetycznej i zmniejszania oddziaływania na środowisko	30
6.1. Popularne rozwiązania optymalizacyjne stosowane w przemyśle	31
6.1.1. Wdrożenie systemu zarządzania zużyciem energii	31
6.1.2. Modernizacja oświetlenia.....	33
6.1.3. Instalacja wysokowydajnych silników	33
6.1.4. Wykorzystanie przemienników częstotliwości	34
6.1.5. Modernizacja instalacji sprężonego powietrza	35
6.1.6. Odzysk ciepła odpadowego.....	36
6.1.7. Odnawialne Źródła Energii	42
6.2. Rozwiązania optymalizacyjne stosowane w przemyśle szklarskim.....	45
6.2.1. Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w topieniu szkła	45
6.2.2. Podgrzew stłuczki lub zestawu szklarskiego	47
6.2.3. Zastosowanie palników tlenowych do opalania pieca szklarskiego	48
6.2.4. Zmniejszenie masy produkowanych butelek szklanych	50

7.	Wybrane wdrożenia rozwiązań optymalizacyjnych mające na celu zmniejszenie zużycia energii oraz negatywnego wpływu na środowisko huty szkła	52
7.1.	Wprowadzenie	52
7.2.	System Zarządzania Mediów Energetycznych.....	52
7.3.	Modernizacja oświetlenia w hucie szkła	72
7.4.	Wymiana układów gwiazda-trójkąt na przemienniki częstotliwości w szafach silników wentylatorów pieca szklarskiego	74
7.5.	Zwiększenie udziału topionej stłuczki szklanej w procesie topienia masy szklanej .	76
7.6.	Wdrożenie systemu odzysku ciepła odpadowego	85
8.	Wdrożenie odzysku ciepła odpadowego w badanej hucie szkła.....	89
8.1.	Wprowadzenie	89
8.2.	Budowa systemu Odzysku Ciepła Odpadowego	90
8.2.1.	System kotłów odzyskowych	90
8.2.2.	System turbiny-kompresora	98
8.2.3.	System ciepłowniczy	109
8.2.4.	Systemy pomocnicze.....	112
8.3.	Bilans cieplny wdrożonego Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego.....	118
8.3.1.	Analiza termodynamiczna - bilanse cieplne.....	118
8.3.2.	Pomiar i obliczenia zmniejszenia zużycia energii	130
9.	Analiza ekologiczna i ekonomiczna wdrożonych rozwiązań optymalizacyjnych.....	135
9.1.	Wprowadzenie	135
9.2.	Analiza ekologiczna	135
9.2.1.	Redukcja emisji CO ₂ dzięki zmniejszeniu zużycia energii elektrycznej.....	136
9.2.2.	Redukcja emisji CO ₂ dzięki zmniejszeniu zużycia gazu ziemnego	137
9.2.3.	Redukcja emisji CO ₂ dzięki zmniejszeniu zużycia tradycyjnych surowców w wytopie szkła	138
9.2.4.	Sumaryczna redukcja emisji CO ₂ dzięki wszystkim przeprowadzonym optymalizacjom.....	140
9.3.	Analiza finansowa	140
9.3.1.	Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia zużycia energii elektrycznej	141
9.3.2.	Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia zużycia gazu ziemnego	141
9.3.3.	Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zwiększenia udziału stłuczki w zestawie do wytopu masy szklanej	142

9.3.4.	Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia emisji dwutlenku węgla	143
9.3.5.	Sumaryczne oszczędności ekonomiczne wynikające z wszystkich przeprowadzonych optymalizacji	143
10.	Dyskusja.....	144
11.	Wnioski	148
12.	Bibliografia	150
13.	Spis tabel.....	155
14.	Spis rysunków.....	156

1. Wprowadzenie

W świetle obecnej polityki klimatyczno – energetycznej krajów Unii Europejskiej, mającej na celu zmniejszenie zużycia mediów energetycznych i emisji szkodliwych substancji do środowiska, w przedsiębiorstwie zainteresowano się kluczowym aspektem w procesie produkcyjnym jakim jest konsumpcja mediów oraz energii, i związanymi z tym konsekwencjami, jak na przykład emisyjność procesu [1].

Badania w trakcie doktoratu wdrożeniowego powadzono w hucie szkła. Działalność przedsiębiorstwa polega na produkcji szkła gospodarczego, w szczególności butelek spożywczych. Zakład wykorzystuje trzy regeneracyjne piece szklarskie opalane gazem ziemnym z dogrzewem elektrycznym. Wanny szklarskie mają za zadanie wytopienie z zestawu surowcowego masy szklanej, wyklarowanie jej i ujednorodnienie oraz schłodzenie do temperatury dostosowanej do formowania wyrobów. Wanny, tzw. piece szklarskie, pracują w sposób ciągły, w związku z czym zużycie energii jest nieustanne, tj. 24 h na dobę przez 7 dni w tygodniu. Piece stawiane w zakładzie powstawały kolejno w 2005, w 2012 i w 2016 roku. Po ustabilizowaniu procesu technologicznego ostatniej wanny i skoordynowaniu wspólnej pracy wszystkich pieców zaproponowano w spółce podjęcie działań mających na celu analizę i usprawnianie procesu produkcji szkła opakowaniowego, co jest głównym celem niniejszego projektu doktorskiego. Projekt doktorski ma na celu zbadanie możliwości oraz podjęcie nowych wdrożeń w procesie produkcji szkła w celu zmniejszenia zużycia mediów energetycznych oraz emisji zanieczyszczeń do środowiska, co ma bezpośredni wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstwa.

Dla przedsiębiorstwa istotnym jest dążenie do zminimalizowania zużycia mediów energetycznych, usprawniania procesu, zwiększania jego efektywności i opłacalności ekonomicznej, co ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń odprowadzanych do powietrza atmosferycznego.

Proces topnienia prowadzi się w sposób ciągły. Do wanien zasypuje się zestaw z tak dobraną częstotliwością, aby poziom masy w basenie utrzymywał się na tej samej wysokości. Każda wanna wyposażona jest w trzy automaty formowania szklarskiego, w których następuje formowanie wyrobów – opakowań szklanych dla przemysłu spożywczego.

Topienie surowców na masę szklaną jest wieloetapowym procesem, który wymaga ustawienia i kontroli wielu parametrów, które definiują jakość wyrobu końcowego.

Charakterystyczne wielkości, takie jak ilość dostarczonego powietrza, ilość dozowanego gazu ziemnego oraz ilość wykorzystanej energii elektrycznej w dogrzewie, powodują ustalenie temperatury, która inicjuje zjawiska fizykochemiczne zachodzące w wannach szklarskich podczas przetopów surowców.

Oprócz surowców w postaci składników mineralnych oraz mediów energetycznych w produkcji używa się również stłuczkę szklaną, dodawaną do masy zestawu. Istnieje zależność między ilością wykorzystanej stłuczki w zestawie, a ilością zużycia mediów i tradycyjnych surowców. Mając to na uwadze w niniejszym projekcie doktorskim została przeprowadzona analiza procesu topienia masy szklanej przy zwiększonym udziale stłuczki szklanej oraz zaproponowane i wdrożone zostały rozwiązania, które pozwoliły na utrzymanie osiągniętego poziomu udziału stłuczki w zestawie szklarskim w sposób ciągły.

Obecna polityka klimatyczna oraz silny wzrost cen uprawnień do emisji CO₂, które według prognoz będą stale rosły, wymuszając na przedsiębiorstwie konieczność przeanalizowania i podjęcia działań umożliwiających ograniczenie emisji tego gazu w kontekście ochrony środowiska i ochrony klimatu [2]. Dlatego też w projekcie doktorskim została przeprowadzona analiza wpływu poszczególnych rozwiązań optymalizacyjnych procesu produkcji na emisje CO₂, a także perspektywy ich ograniczenia.

Jak już wspomniano, topienie szkła jest procesem wysokotemperaturowym i wymaga dużych nakładów energii z paliwa. Sprawdzona została możliwość odzysku ciepła z procesu topienia szkła.

W pracy doktorskiej została również przeprowadzona analiza wyników monitoringu zużycia paliwa gazowego i energii elektrycznej oraz wpływu produkcji szkła na emisję szkodliwych substancji do środowiska. Do realizacji zadania były wykorzystywane takie narzędzia jak panele kontrolno – pomiarowe procesu topienia oraz systemy monitoringu, systemy akwizycji i analizy danych, arkusze kalkulacyjne oraz współpraca doświadczonych współpracowników przedsiębiorstwa, jako jeden z aspektów wdrożeniowych w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego.

Efektem końcowym projektu doktorskiego jest opracowanie i wdrożenie rozwiązań optymalizacyjnych procesu produkcji szkła przy minimalnym możliwym zużyciu mediów energetycznych, zwiększonym udziale stłuczki szklanej oraz emisji zanieczyszczeń do środowiska. Szczegółowo zostało opisane rozwiązanie o największym potencjale w oszczędności energii i redukcji emisji do środowiska.

Przez specyfikę procesu produkcji szkła i braku bezpośrednich analogii w innych sektorach przemysłu, jak na przykład w energetyce, przeprowadzenie badań doskonalenia

procesu topienia poprzez analizę wpływu poszczególnych czynników nakładających się na całą pracę pieca szklarskiego pozwoliło uchwycić pełen zakres zależności pomiędzy ilością użytego surowca, a w szczególności powietrza, gazu ziemnego i energii elektrycznej, a produktami końcowymi oraz emisjami. Pozwoliło to tym samym podejmować świadome decyzje skutkujące zwiększeniem efektywności procesu. W efekcie zwiększono również konkurencyjność przedsiębiorstwa na tle innych działających już w tak specyficznej branży.

Zbadanie metod pierwotnych usprawniania procesu pozwala również przynieść korzyści nie tylko w zmniejszeniu zużyciu mediów energetycznych czy też emisji do środowiska, pozwalając osiągnąć pewne zyski ekonomiczne, ale umożliwia zwiększenie świadomości i wiedzę pracowników przedsiębiorstwa zajmujących się procesem, co jest istotną wartością dodaną dla pracy zakładu [3].

Projekt jest ściśle związany z celami polityki naukowej, naukowo-technicznej, innowacyjnej i społecznej państwa, ponieważ jego głównym efektem jest wdrożenie innowacyjnych rozwiązań oraz doskonalenie procesów technologicznych mających na celu zmniejszenie energochłonności sektora hutniczego, zmniejszenie zużycia paliw kopalnych oraz zmniejszenie wpływu procesu produkcji na środowisko (poprzez zmniejszenie emisji dwutlenku węgla i innych szkodliwych substancji do otoczenia). Wyniki oraz wnioski wyciągnięte z projektu doktorskiego mogą zostać wykorzystane w innych pracach naukowych, instytutach czy też zakładach sektora produkcyjnego, dając tym samym możliwość zastosowania podobnych rozwiązań w procesie produkcyjnym. Docelowo pozytywne rezultaty pozwalają na wykorzystanie podobnych rozwiązań w sektorze produkcji szkła.

Podobnie jak w przypadku powiązania projektu doktorskiego z celami polityki naukowej, naukowo – technicznej, innowacyjnej i społecznej państwa, rozprawa nad działaniami mającymi na celu zmniejszenie zużycia mediów energetycznych i emisyjności zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego poprzez poprawę procesu produkcji szkła charakteryzującym się własną specyfiką funkcjonowania, nie mającą analogii w innych sektorach przemysłu, ma znaczenie dla gospodarki poprzez minimalizację zużycia mediów energetycznych oraz emisji zanieczyszczeń w tym mające znaczenie globalne emisja dwutlenku węgla (CO₂) oraz innych zanieczyszczeń. Wyniki oraz wnioski wyciągnięte z projektu doktorskiego mogą zostać wykorzystane w innych zakładach tego sektora produkcyjnego, dając tym samym możliwość zastosowania podobnych rozwiązań w procesie produkcyjnym. Innowacyjność wyników projektu doktorskiego polega na rozwiązaniu problematyki zużycia surowców naturalnych, nie będącą w wystarczającym stopniu rozpoznaną w procesie produkcji opakowań szklanych.

2. Cele, zakres i tezy rozprawy doktorskiej

2.1. Cel rozprawy doktorskiej

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest optymalizacja procesu produkcji szkła w celu zmniejszenia zużycia mediów energetycznych oraz ograniczenia emisji do środowiska. W szczególności rozprawa koncentruje się na przedstawieniu i analizie wdrożonych rozwiązań, które mają za zadanie poprawić efektywność energetyczną huty szkła. Jako kluczowe rozwiązanie omawiany jest proces odzyskiwania ciepła odpadowego wykorzystując nowoczesne technologie, takie jak kotły odzyskowe oraz turbiny i sprężarki.

2.2. Zakres rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska została podzielona na kilka głównych sekcji. Pierwsza z nich przedstawia ogólną koncepcję rozprawy mającej na celu analizę wdrażanych rozwiązań poprawy procesu produkcji szkła w kontekście efektywności energetycznej. Następnie szczegółowo opisany został proces produkcji szkła opakowaniowego oraz zaprezentowana została huta szkła, w której dokonuje się modernizacji w poczet doktoratu wdrożeniowego.

Kolejne sekcje skupiają się na metodach optymalizacyjnych oraz na analizie i ocenie poszczególnych rozwiązań wdrożonych w hucie szkła w trakcie trwania doktoratu. Najważniejszą część rozprawy stanowi szczegółowa prezentacja i analiza wykorzystania kotłów odzyskowych oraz układu turbiny parowej i sprężarki w kontekście ich wpływu na efektywność energetyczną huty poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin pochodzących z wanien szklarskich wytapiających masę szklaną.

Zakończenie pracy to syntetyczna analiza ekonomiczna i ekologiczna wdrożonych rozwiązań, której celem jest przedstawienie ich wpływu zarówno z perspektywy kosztów, jak i korzyści środowiskowych. Dyskusja oparta jest na literaturze naukowej, doświadczeniach branżowych oraz analizach w kontekście globalnych trendów w przemyśle ciężkim. Ostateczne wnioski z pracy stanowią podsumowanie oraz rekomendacje dla dalszych działań w zakresie udoskonalania procesów w hutach szkła.

2.3. Tezy rozprawy doktorskiej

Wprowadzenie innowacyjnych technologii w przemyśle szklarskim nie tylko przynosi korzyści ekonomiczne, ale także ma potencjał do przyspieszenia transformacji sektora w kierunku bardziej zrównoważonej i ekologicznej produkcji. Wdrożenie nowoczesnych

technologii może znacząco przyczynić się do ulepszenia procesu i redukcji zużycia mediów energetycznych.

Zwiększenie wykorzystania stłuczki szklanej zamiast tradycyjnych surowców w zestawie szklarskim w procesie produkcji szkła prowadzi do obniżenia zużycia energii, redukcji śladu węglowego i zwiększa efektywność recyklingu surowców w przemyśle szklarskim.

Wdrożenie nowoczesnych technologii w procesie produkcji szkła, takich jak kotły odzyskowe oraz układ turbiny parowej i sprężarki, może znacząco poprawić efektywność energetyczną huty, prowadząc do redukcji zużycia mediów energetycznych oraz emisji zanieczyszczeń do środowiska, przyczyniając się tym samym do bardziej zrównoważonej i ekologicznej produkcji szkła.

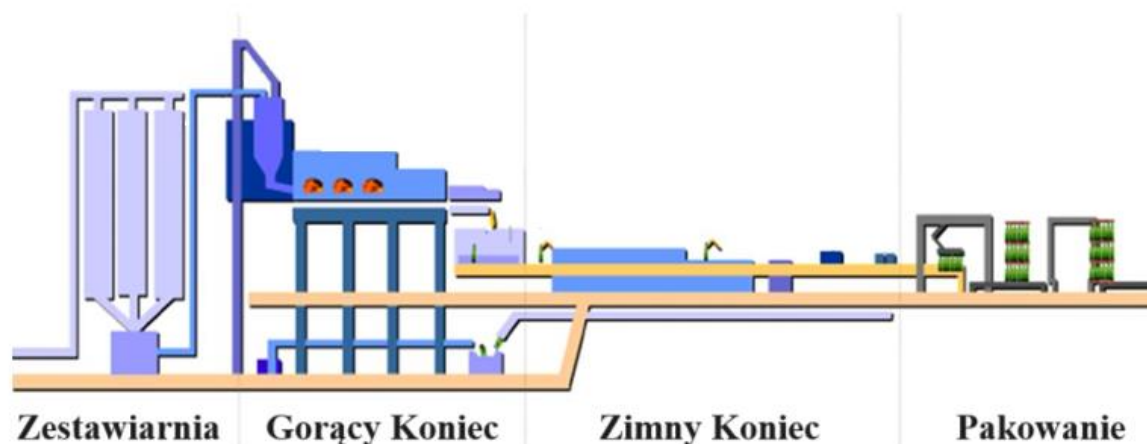
Efektywny odzysk ciepła, zwłaszcza w połączeniu z innymi innowacyjnymi technologiami, może stać się kluczem do realizacji bardziej zrównoważonej i ekologicznie odpowiedzialnej produkcji szkła w przyszłości i ma potencjał do rewolucjonizowania procesów energetycznych w hucie szkła.

3. Opis produkcji szkła

Niniejszy rozdział stanowi szczegółową analizę procesu produkcji butelki szklanej, uwzględniając kolejne etapy. Badanie tego procesu pozwoliło na lepsze zrozumienie wymagań i wyzwań związanych z wytwarzaniem wysokiej jakości butelek szklanych.

Proces wytwarzania wyrobów szklanych przebiega w różny sposób dla różnych wyrobów, można jednak znaleźć cechy wspólne dla wszystkich procesów wytwarzania szkła. Najogólniej przebieg procesu produkcji szkła można przedstawić według następującego schematu ujmującego poszczególne jego etapy: 1) składowanie surowców; 2) przygotowanie surowców; 3) sporządzenie zestawu; 4) topienie; 5) formowanie wyrobów; 6) odprężanie wyrobów; 7) wykańczanie wyrobów; 8) kontrola jakości; 9) pakowanie wyrobów, magazynowanie i ekspedycja [4].

Rysunek 1 prezentuje główny ciąg technologiczny produkcji szkła opakowaniowego podzielonego na cztery obszary: zestawianię (etap 1, 2 i 3), gorący koniec (na który składa się topienie oraz formowanie wyrobów), zimny koniec (czyli odprężanie, wykańczanie oraz kontrola jakości wyrobów) oraz pakowanie.



Rysunek 1 Główny ciąg technologiczny produkcji szkła opakowaniowego [10]

Zrozumienie poszczególnych etapów procesu produkcji butelki szklanej pozwala na lepsze poznanie wyzwań związanych z tą dziedziną.

3.1. Składowanie i przygotowanie surowców do sporządzenia zestawu szklarskiego

Proces produkcji szklanych butelek rozpoczyna się od składowania i przygotowania surowców, które są niezbędne do uzyskania odpowiedniej jakości i składu masy szklanej.

Składowanie surowców oraz dokładne przygotowanie ich do dalszego procesu są czynnikami mającymi wpływ na jakość ostatecznych wyrobów.

Składowanie surowców w hutach szkła jest procesem, który ma istotne znaczenie dla utrzymania stabilności składu chemicznego i jakości surowców. Surowce mogą być dostarczane w różnych postaciach i mogą wymagać odpowiedniego przygotowania przed użyciem. Zależnie od tego, czy surowce są dostarczane w formie wymagającej dalszej obróbki czy też są gotowe do sporządzenia zestawu, ich składowanie może odbywać się w różnych miejscach i zasobnikach. Magazynowanie surowców odbywa się przeważnie w zbiornikach o przekroju kołowym z dnem stożkowym, z których pobór odbywa się przez zasypniki w dnie połączone z rynnami wibracyjnymi.

Surowce, które są dostarczane w formie wymagającej dalszej obróbki, takiej jak odpowiednie suszenie, przesiewanie czy czyszczenie, są przechowywane w specjalnych składach. Te składy są zaprojektowane w taki sposób, aby zapewnić odpowiednie warunki przechowywania surowców, takie jak temperatura, wilgotność czy ochrona przed zanieczyszczeniami zewnętrznymi [5]. Natomiast surowce, które są bezpośrednio przydatne do sporządzenia zestawu, a także surowce po odpowiednim przygotowaniu, są składowane w bezpośrednim sąsiedztwie zestawieni. Miejsca składowania są starannie zaprojektowane i utrzymane w odpowiednich warunkach, aby zapewnić optymalne przechowywanie surowców.

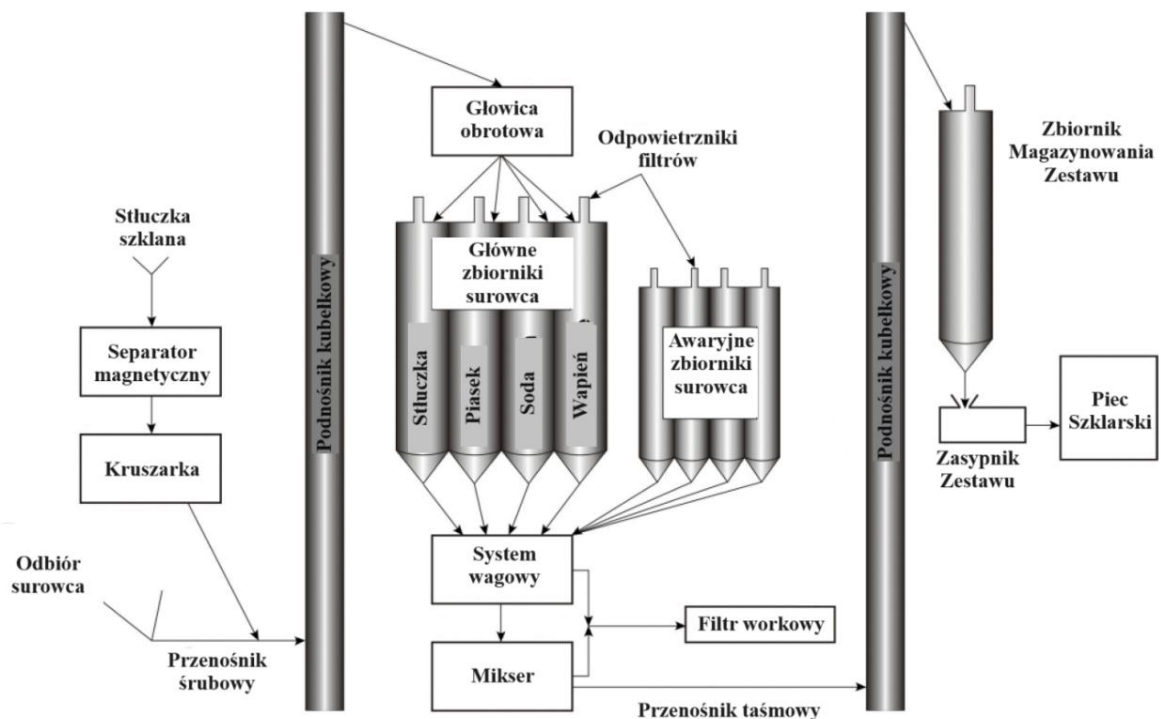
Przygotowanie surowców w procesie produkcji szklanych butelek ma na celu przede wszystkim minimalizację niezbędnej obróbki surowców w hucie. Konieczność dostarczenia surowców w gotowej do użycia postaci jest wynikiem osiągnięcia celu zwiększenia efektywności produkcji i utrzymania stałości składu chemicznego surowców. Niemniej jednak, niektóre operacje przygotowawcze nadal są nieodzowne w procesie produkcyjnym.

Jedną z takich operacji jest suszenie piasku, który jest podstawowym składnikiem masy szklanej. Suszenie piasku jest konieczne w celu utrzymania stałego składu chemicznego szkła, ponieważ magazynowany piasek może mieć zmienną wilgotność. Aktualnie nie istnieje szybka i dokładna metoda kontroli wilgotności piasku, dlatego suszenie jest niezbędnym procesem zapewniającym utrzymanie stałej zawartości danego surowca w zestawie.

Kolejną operacją przygotowawczą jest przesiewanie piasku, które jest stosowane w przypadku, gdy kopalnia nie może dostarczyć piasku o żądanym uziarnieniu. Przesiewanie piasku pozwala na wyselekcjonowanie odpowiednich frakcji ziaren, które będą używane w procesie produkcji szkła.

Dodatkowo, istnieje konieczność mycia i przebierania stłuczki obcej, która jest dostarczana. Stłuczka obca może zawierać zanieczyszczenia takie jak metalowe odpadki, kamienie czy porcelana, które nie powinny znajdować się w zestawie szklarskim, ponieważ mogą zanieczyszczać otrzymaną masę szklaną. Mycie i przebieranie stłuczki obcej mają na celu usunięcie tych niepożądanych elementów.

Przygotowaniem zestawu, czyli odpowiedniej mieszanki surowców, z dodatkiem stłuczki, zajmuje się oddział huty zwany zestawianią. Procesy zachodzące w zestawiaśni obejmują szereg operacji, takich jak odważanie (dozowanie) poszczególnych surowców, transport odważonych surowców do mieszarek, wymieszanie zestawu oraz dostarczenie go do pieca. Rysunek 2 prezentuje schemat zestawiaśni dla huty szkła.



Rysunek 2 Schemat zestawiaśni w hucie szkła [7]

Podstawowymi elementami zestawiaśni są magazyny przejściowe na piasek i stłuczkę, zasobniki na wapień i sodę, zasobniki dolomitu, skalenia oraz urządzenia ważące i transportujące zestaw szklarski [6].

W hutach szkła o masowej produkcji, gdzie produkowane są duże ilości szkła płaskiego czy opakowań szklanych, stosuje się zestawiaśnie zmechanizowane, a nawet całkowicie zautomatyzowane, pracujące w sposób ciągły. W tych przypadkach surowce są przyjmowane i przechowywane w odpowiednich zasobnikach, następnie odpowiednio dozowane i odważane, mieszane i transportowane w formie gotowego zestawu automatycznie do specjalnych

pojemników kubełkowych lub na przenośnik taśmowy, a następnie transportowane do pieców. Przy tworzeniu zestawu szklarskiego operuje się również stłuczką obcą lub własną, czyli stłuczką z gospodarki obiegowej (skruszony produkt nie spełniający jakości wyrobu końcowego).

W procesie produkcji szklanych butelek kluczowe znaczenie ma opracowanie odpowiednich receptur, czyli precyzyjnych proporcji i składu surowców szklarskich. Receptury muszą uwzględniać wymagania dotyczące jakości, wytrzymałości, przezroczystości i innych właściwości, które mają być osiągnięte w ostatecznych wyrobach. Dlatego ważne jest przeprowadzanie systematycznej kontroli jakości surowców przyjmowanych do huty. Kontrola ta może obejmować wizualne oględziny, pomiary wymiarów geometrycznych czy określenie pewnych właściwości fizycznych i chemicznych, takich jak współczynnik rozszerzalności czy odporność chemiczna [7].

3.2. Proces topienia szkła w piecach szklarskich

Topienie szkła jest kluczowym, najważniejszym etapem procesu produkcji wyrobów szklanych, w którym z surowców szklarskich powstaje masa szklana gotowa do dalszej obróbki. Proces ten odbywa się w piecach szklarskich, które zapewniają odpowiednie warunki termiczne i chemiczne potrzebne do przemian fizycznych i chemicznych surowców w wysokiej temperaturze, takich jak rozpuszczanie się składników, odgazowanie, klarowanie i ujednorodnianie masy szklanej.

Podczas topienia surowców szklarskich w piecach szklarskich zachodzą różne procesy reakcyjne. W fazie stałej dochodzi do reakcji między poszczególnymi składnikami surowców, takimi jak powstawanie soli podwójnych, krzemianów lub glinokrzemianów. Dodatkowo, dochodzi również do dysocjacji (rozkładu) węglanów oraz powstawania łatwo topliwych eutektyk i stopów krzemianów oraz glinokrzemianów. W trakcie topienia, nierozpuszczone ziarna piasku (SiO_2) rozpuszczają się w powstałym roztopie, co przyczynia się do powstania jednorodnej masy szklanej. Procesy te są wzajemnie powiązane i nakładają się na siebie w trakcie topienia szkła.

Temperatura topienia jest kluczowym parametrem w procesie topienia szkła. W przypadku produkcji butelek, temperatura topienia szkła zazwyczaj wynosi około 1500°C . Wysoka temperatura jest niezbędna do przeprowadzenia procesów reakcyjnych i utworzenia jednorodnej masy szklanej. Dla uzyskania optymalnej jakości masy szklanej, konieczne jest utrzymanie stabilnej temperatury przez określony czas, aby surowce zostały dokładnie przetopione i uzyskano jednorodną strukturę szkła.

Czas topienia może się różnić w zależności od wielu czynników, takich jak rozmiar pieca, skład surowców, wydajność produkcji i inne. Czas topienia ma istotne znaczenie dla zapewnienia odpowiedniego przetopienia surowców i uzyskania jednorodnej masy szklanej. Dłuższy czas topienia może być konieczny, zwłaszcza przy większych ilościach surowców, aby zapewnić dokładne przetopienie i homogeniczność szkła. Zbyt krótki czas topienia może prowadzić do niedokładnego przetopienia surowców i wpływać na jakość otrzymanej masy szklanej [8].

W produkcji butelek stosuje się różne rodzaje pieców szklarskich w zależności od rodzaju produkcji, wymagań technologicznych i wydajności. W przypadku topienia szkła w piecach periodycznych, takich jak piece donicowe, proces topienia odbywa się w jednym cyklu, a następnie piec jest opróżniany i ponownie ładowany. Piece te mogą być jedno-, dwu- lub wielodonkowe, co zależy od ilości szkła produkowanego w jednym cyklu. Piece donicowe są stosowane głównie w mniejszych produkcjach butelek, gdzie elastyczność produkcji i różnorodność rodzaju topionego szkła są ważne.

W przypadku produkcji dużej liczby butelek stosuje się piec wannowy, który jest rodzajem pieca ciągłego. Piece wannowe są znane również jako wanny zmianowe i umożliwiają ciągłą produkcję dużych ilości szkła jednego rodzaju. Wanny zmianowe są bardziej wydajne pod względem czasu i zużycia paliwa, co przyczynia się do oszczędności w procesie produkcji butelek. Konstrukcja i wielkość pieców wannowych są różne, zależą od żądanej wydajności, rodzaju topionego szkła i sposobu formowania wyrobów z masy szklanej.

Piece szklarskie można opalać różnymi źródłami ciepła, zależnie od lokalnych warunków, dostępności i efektywności. Tradycyjnie w piecach szklarskich stosowano drewno lub węgiel jako paliwo stałe. Obecnie jednak, w wielu hutach szkła, paliwo stałe zostało zastąpione przez gaz ziemny lub ropę naftową, które są bardziej ekonomiczne i bardziej przyjazne dla środowiska. Gaz ziemny jest szczególnie popularny ze względu na swoje korzystne właściwości palenia i kontrolowalne parametry spalania, które zapewniają stabilność procesu topienia szkła [9].

W niektórych przypadkach, piec szklarski może być ogrzewany za pomocą energii elektrycznej, która jest wykorzystywana jako źródło ciepła do topienia szkła. Energia elektryczna jest potencjalnie czystym źródłem energii i pozwala na precyzyjną kontrolę temperatury w piecu. Jednak wykorzystanie energii elektrycznej do topienia szkła może być kosztowne i nie zawsze ekonomicznie opłacalne.

Wykorzystanie energii elektrycznej jako dodatkowego źródła energii w konwencjonalnych piecach opalanych paliwami kopalnymi nazywane jest dogrzewem

elektrycznym. Elektrody mogą być umieszczone poziomo przez boczne ściany zbiornika lub pionowo przez dno pieca. Systemy wzmacniania można podzielić na trzy grupy w zależności od ich zastosowania.

- Dogrzew topienia (ang. melting booster) - system wzmacniania w obszarze topienia dostarcza dodatkową energię bezpośrednio do masy szkła, co prowadzi do zwiększenia zdolności topienia,
- Dogrzew przegrody (ang. barrier booster) - instalacja wzmacniacza elektrycznego wokół gorącego miejsca wzmacnia prądy konwekcyjne, co zwiększa temperaturę na dnie masy szkła. Ma to pozytywny wpływ na jakość szkła. Ponadto, dodatkowa energia jest dostarczana do masy szkła, a temperatura szkła płynącego z gorącego miejsca do obszaru topienia jest wzmacniana.
- Dogrzew lokalny (ang. local booster) - tutaj elektrody są wyposażone w celu podgrzewania konkretnego obszaru masy szkła np. w obszarze wypływu szkła z wanny szklarskiej [10].

Podsumowując, proces topienia szkła w piecach szklarskich jest kluczowym etapem produkcji butelek. Proces ten obejmuje różne procesy reakcyjne, odpowiednią temperaturę i czas topienia oraz wybór odpowiedniego rodzaju pieca i źródła opalania. Zapewnienie stabilnych warunków topienia i uzyskanie jednorodnej masy szklanej są niezbędne dla produkcji wysokiej jakości butelek.

3.3. Formowanie szkła

Proces formowania wyrobów szklanych składa się z dwóch faz: zasilania urządzenia masą szklaną oraz uformowania przedmiotu szklanego na rzędowych automatach szklarskich. Po wyjściu z pieca, masa szklana musi być transportowana do maszyn formujących w odpowiednich warunkach. Transport ten jest realizowany za pomocą tzw. zasilaczy, które dbają o to, aby płynna masa szklana utrzymała stałą temperaturę i właściwości podczas transportu. Zasilacze są odpowiedzialne za utrzymanie stałej temperatury i płynności masy szklanej (kondycjonowanie), co jest konieczne dla zachowania jej właściwości i umożliwienia skutecznego formowania. Zadaniem zasilaczy jest pobór stopionej masy szklanej z wanny, doprowadzenie jej do odpowiedniej lepkości i jednorodności oraz uformowanie i odcięcie kropli szkła o odpowiednim kształcie i ciężarze.

Zasilacze to kluczowe urządzenia w procesie produkcji butelek szklanych. Ich zadaniem jest dostarczenie odpowiedniej ilości masy szklanej do maszyn formujących w odpowiednim

czasie i z odpowiednią częstotliwością. Nawet niewielkie fluktuacje w ilości dostarczanego surowca mogą wpływać na jakość finalnych produktów.

Odcinanie kropli szkła następuje na samym końcu zasilacza, gdzie znajduje się misa wraz z oczkami oraz mechanizmem wytłaczającym. Gdy szkło swobodnie wypływa z oczka, wytłocznik opuszczając się w dół wzmagą wypływ szkła, wskutek czego kropla szkła przewęża się, a nożyce ją odcinają. Następnie odcięta kropla dystrybuowana jest rynną ślizgową na wolną sekcję automatu szklarskiego. Po przetransportowaniu masy szklanej do form, odbywa się proces formowania butelek na automatach szklarskich. Automaty szklarskie to zaawansowane urządzenia mechaniczne, które umożliwiają automatyczne i precyzyjne formowanie butelek z płynnej masy szklanej [11].

Proces formowania na automatach szklarskich składa się z kilku etapów. Pierwszym etapem jest wstępne formowanie, w którym masy szklanej jest nadawany wstępny kształt, zazwyczaj w postaci cylindrycznej. Następnie, w kolejnym etapie, odbywa się rozdmuchiwanie, w którym płynna masa szklana jest wdmuchiwana do formy za pomocą sprężonego powietrza. To powoduje rozprężenie masy szklanej i nadanie jej ostatecznego kształtu butelki.

Automaty szklarskie są wyposażone w szereg mechanicznych elementów, które umożliwiają precyzyjne wykonanie operacji formowania. Zazwyczaj składają się z cylindra formującego, tłoczyska, dyszy rozdmuchiwania, systemu chłodzenia i innych elementów sterujących. Automaty są również wyposażone w systemy automatycznego pomiaru i kontroli, które monitorują i utrzymują odpowiednią temperaturę, ciśnienie i czas formowania.

W trakcie formowania na automatach szklarskich istotne jest utrzymanie odpowiednich parametrów procesu. Temperatura masy szklanej, ciśnienie powietrza, czas formowania oraz chłodzenie są czynnikami kluczowymi wpływającymi na jakość i wygląd finalnych butelek. Precyzyjna kontrola tych parametrów zapewnia równomierne i dokładne formowanie butelek.

Automaty szklarskie są również wyposażone w systemy odrzutu, które identyfikują i usuwają wady butelek, takie jak pęknięcia, nierówności czy inne defekty. Systemy wizyjne i czujniki pomagają w identyfikacji wad i automatycznym odrzuceniu butelek nie spełniających określonych standardów jakościowych.

Współczesne automaty szklarskie są coraz bardziej zaawansowane technologicznie, wykorzystując innowacyjne rozwiązania, takie jak sterowanie numeryczne, systemy wizyjne, sensory i technologie optyczne. To pozwala na jeszcze większą precyzję, efektywność i jakość produkcji butelek [10].

Proces produkcji butelek obejmuje kluczowy etap transportu masy szklanej oraz formowania na automatach szklarskich. Zasilacze umożliwiają precyzyjne i kontrolowane dostarczanie masy szklanej do form, podczas gdy automaty szklarskie wykonują precyzyjne operacje formowania, nadając masie szklanej ostateczny kształt.

Właściwe funkcjonowanie zasilaczy i automatów szklarskich jest kluczowe dla utrzymania wysokiej jakości produktu. Precyzyjna kontrola parametrów procesu, takich jak temperatura, ciśnienie i czas formowania, pozwala na uzyskanie jednorodnych, dokładnych i estetycznych butelek [12].

3.4. Uszlachetnianie na gorąco

Uszlachetnianie szkła na gorąco jest procesem stosowanym w hutach szkła, mającym na celu poprawę jakości i właściwości szkła oraz dostosowanie go do różnorodnych zastosowań. Ten proces polega na nakładaniu specjalnych powłok na gorącą powierzchnię szkła, zwykle w zakresie temperatury od 450°C do 600°C. Uszlachetnianie szkła na gorąco odgrywa kluczową rolę w produkcji pojemników szklanych, butelek, naczyń oraz innych wyrobów szklanych używanych w przemyśle spożywczym, napojowym i farmaceutycznym.

Proces uszlachetniania szkła na gorąco zwykle odbywa się na etapie produkcji, tuż po formowaniu i przed wygrzewaniem. Istnieje kilka metod stosowanych do uszlachetniania szkła na gorąco, z których najpopularniejszą jest osadzanie chemiczne z fazy gazowej (ang. CVD - Chemical Vapor Deposition). Proces ten polega na parowaniu związków chemicznych, takich jak tlenek cyny, w powietrzu i ich kontaktowaniu się z gorącą powierzchnią szkła. W wyniku reakcji chemicznej tworzy się cienka warstwa powłoki na powierzchni szkła, poprawiając jego wytrzymałość, odporność na ścieranie oraz zapewniając gładki przepływ w procesach inspekcji, napełniania i pakowania.

Podczas procesu uszlachetniania szkła na gorąco, komory powlekające są umieszczone w odpowiedniej sekcji linii produkcyjnej. Gorące szkło przechodzi przez te komory, gdzie następuje aplikacja powłoki za pomocą parowania chemicznego. Powierzchnia szkła jest dokładnie monitorowana podczas procesu, aby zapewnić równomierne i skuteczne nałożenie powłoki. Proces ten odbywa się w bardzo krótkim czasie, zazwyczaj trwającym od 2 do 3 sekund. W rezultacie tworzy się cienka warstwa tlenku cyny o grubości około 10 nm, która doskonale przylega do powierzchni szkła.

Wizualnie, proces uszlachetniania szkła na gorąco może obejmować specjalne komory lub tunele, przez które przechodzi szkło. Powietrze zawierające pary wodne i związki chemiczne jest dostarczane do tych komór, zapewniając odpowiednie warunki dla procesu

osadzania powłoki. Wytwarzane są strugi powietrza o odpowiedniej temperaturze i prędkości, które umożliwiają precyzyjne i równomierne nałożenie powłoki na powierzchnię szkła [13].

Uszlachetnianie szkła na gorąco ma wiele celów i korzyści. Oto niektóre z głównych celów tego procesu:

- Poprawa wytrzymałości szkła – Powłoka tlenku cyny na powierzchni szkła zwiększa jego wytrzymałość, co jest szczególnie istotne w przypadku szklanych pojemników, butelek i naczyń używanych w przemyśle spożywczym i napojowym.
- Zwiększenie odporności na ścieranie – Powłoka chroni szkło przed zarysowaniami, ścieraniem i uszkodzeniami mechanicznymi, co sprawia, że produkty szklane są bardziej trwałe i estetyczne.
- Ułatwienie procesów produkcji i pakowania – dzięki odpowiedniemu smarowaniu zapewnianemu przez powłokę, szkło ma gładką powierzchnię, co ułatwia przepływ w procesach inspekcji, napełniania i pakowania produktów.
- Zabezpieczenie przed korozją – Odpowiednio dobrana powłoka na gorąco zapobiega korozji szkła, co jest szczególnie istotne w przypadku butelek i pojemników używanych w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym [14].

3.5. Odprężanie szkła

Proces odprężania butelek jest etapem, w którym butelki poddawane są kontrolowanemu schładzaniu w celu zredukowania wewnętrznych naprężeń, poprawy wytrzymałości mechanicznej i zwiększenia stabilności. Odprężanie odbywa się w specjalnych urządzeniach nazywanych odprężarkami, które pozwalają na precyzyjne kontrolowanie temperatury i czasu procesu.

Odprężarki składają się z kilku głównych elementów, w tym z komory odprężającej, systemu chłodzenia, systemu kontroli temperatury i czasu, a także mechanizmów do umieszczania i usuwania butelek. Komora odprężająca jest wykonana z wysokotemperaturowego materiału, który jest odporny na działanie wysokich temperatur i ciśnienia generowanych w trakcie procesu odprężania.

Proces odprężania butelek rozpoczyna się od umieszczenia butelek w komorze odprężającej. Następnie stopniowo obniża się temperaturę komory przy jednoczesnym utrzymaniu określonego ciśnienia. Obniżanie temperatury odbywa się w sposób kontrolowany i zgodnie z określonymi parametrami, takimi jak czas i temperatura, aby zapewnić równomierne schładzanie butelek.

W trakcie odprężania butelek, wewnętrzne naprężenia, które powstały podczas formowania i szybkiego stygnięcia, zostają stopniowo rozproszone i zmniejszone. Proces ten pozwala na poprawę wytrzymałości butelek i zmniejszenie ryzyka ich pęknięcia pod wpływem nacisku zewnętrznego lub zmian temperatury. W rezultacie, odprężane butelki charakteryzują się większą trwałością i odpornością na różnego rodzaju obciążenia mechaniczne.

W procesie odprężania butelek w odprężarkach nie są zazwyczaj stosowane dodatkowe substancje chemiczne. Proces ten opiera się głównie na kontrolowanym schładzaniu butelek w odpowiednich warunkach temperaturowych i czasowych.

Odrężarka używana w hutach szkła jest specjalnym urządzeniem, które umożliwia precyzyjne odprężanie butelek. Jej wygląd i skład mogą się różnić w zależności od konkretnej konstrukcji i technologii stosowanej w danej hucie szkła [15].

3.6. Uszlachetnianie na zimnym końcu

W przeszłości, gdy pojemniki szklane były cięższe, a prędkości linii produkcyjnych niższe, nie było potrzeby uszlachetniania powierzchni szkła. Jednak obecnie, gdy butelki stają się coraz lżejsze, a prędkości produkcji znacznie się zwiększyły, konieczność ochrony powierzchni staje się kluczowa.

Uszlachetnianie szkła na zimnym końcu odbywa się po etapie odprężania butelek i przed pakowaniem wyrobów szklanych. Najpopularniejszą metodą jest stosowanie emulsji polietylenowych na bazie wody. Proces ten polega na aplikacji rozcieńczonych emulsji na powierzchnię szkła za pomocą systemu rozpylania równoległego. Powłoka polietylenowa tworzy ochronną warstwę na powierzchni szkła, zapewniającą ochronę przed zarysowaniami, uszkodzeniami mechanicznymi i korozją.

Podczas procesu uszlachetniania szkła na zimnym końcu, maszyna stosująca emulsje polietylenowe jest umieszczana na linii produkcyjnej. Rozcieńczony materiał jest aplikowany na powierzchnię szkła za pomocą systemu rozpylania, zwykle zaczynając od ramienia butelki w dół. Ważne jest odpowiednie dostosowanie proporcji koncentratu powłoki i wody, aby uzyskać jak najlepsze parametry aplikacji. Zbyt duża koncentracja powłoki może prowadzić do osłabienia wyglądu wyrobów szklanych, a zbyt mała nie zapewni wystarczającej ochrony.

Uszlachetnianie szkła na zimnym końcu ma na celu zapewnienie ochrony powierzchni szkła, poprawę trwałości, estetyczny wygląd oraz odporność na korozję. Proces ten ma za zadanie zabezpieczyć szkło przed zarysowaniami, uszkodzeniami mechanicznymi i korozją. Poprzez zastosowanie emulsji polietylenowych na bazie wody, możliwe jest utworzenie ochronnej warstwy, która poprawia wygląd i wytrzymałość wyrobów szklanych.

Uszlachetnianie szkła na zimnym końcu jest elementem procesu produkcji szkła, pozwalającym na dostarczenie klientom wysokiej jakości i atrakcyjnych produktów szklanych [13].

3.7. Kontrola jakości

Proces kontroli jakości w hucie produkującej butelki szklane jest kluczowym elementem zapewnienia wysokiej jakości i zgodności z normami. Kontrola jakości obejmuje różnorodne procedury i narzędzia, takie jak wizualna inspekcja, automatyczne systemy detekcji wad, pomiary laboratoryjne oraz testy wytrzymałościowe. Wszystkie te działania mają na celu wykrycie wad, monitorowanie parametrów jakościowych i zapewnienie zgodności z wymaganiami klientów i normami branżowymi.

Kontrola jakości butelek odbywa się na różnych etapach produkcji, począwszy od kontroli surowców i topienia szkła, przez formowanie, odprężanie i uszlachetnianie, aż po finalną kontrolę jakości gotowych butelek. Każdy etap procesu podlega szczegółowej analizie i ocenie, aby zapewnić wysoką jakość produktu.

Kontrola jakości rozpoczyna się od etapu przygotowania surowców do topienia. W celu kontroli surowców przeprowadza się analizę chemiczną i fizyczną składników używanych w produkcji szkła. Z surowców pobierane są próbki, które są badane pod kątem zawartości substancji niepożądanych, takich jak zanieczyszczenia metalowe czy związki o szkodliwym wpływie na jakość szkła. Dodatkowo przeprowadza się testy wytrzymałości surowców, aby upewnić się, że są one odpowiednie do produkcji butelek o żądanych właściwościach fizycznych i chemicznych.

Przy formowaniu butelek przeprowadza się regularne badania wymiarów, grubości ścianek, pojemności i kształtu butelek. Dodatkowo, kontroluje się również jakość powierzchni butelek, eliminując wszelkie wady, takie jak rysy, nierówności czy wtrącenia. W tym celu stosuje się techniki wizualne i automatyczne systemy detekcji wad. Dodatkowo sprawdza się wytrzymałość mechaniczną odprężonych butelek, wykonując testy wytrzymałościowe, takie jak test oporu na złamanie, testy zmienności objętości, testy odkształcalności i inne badania, które pozwalają na określenie, czy butelki są wystarczająco wytrzymałe i odporne na różne warunki eksploatacji [16].

W celu zwiększenia efektywności i dokładności kontroli jakości, w hucie szkła stosuje się również automatyczne systemy detekcji wad. Te zaawansowane technologie wykorzystują kamery, optyczne czujniki i algorytmy analizy obrazu do identyfikacji i klasyfikacji wad na

podstawie ustalonych kryteriów. Systemy te są w stanie wykryć nawet najmniejsze wady, które mogą umknąć wizualnej kontroli.

Personel odpowiedzialny za kontrolę jakości butelek składa się z wykwalifikowanych kontrolerów jakości, którzy przeprowadzają inspekcje wizualne, korzystają z zaawansowanych systemów detekcji wad, wykonują pomiary laboratoryjne i testy wytrzymałościowe. Laboratorium jakości pełni również istotną rolę w procesie kontroli jakości, przeprowadzając bardziej zaawansowane badania i analizy butelek.

Dzięki procesowi kontroli jakości, huta produkująca butelki szklane jest w stanie zapewnić spójność, niezawodność i wysoką jakość swoich wyrobów. Eliminacja wad, monitorowanie parametrów i zgodność z normami przyczyniają się do satysfakcji klientów, ochrony reputacji firmy i ciągłego doskonalenia procesu produkcyjnego [17].

3.8. Pakowanie i magazynowanie

Po opuszczeniu linii produkcyjnej butelki muszą zostać odpowiednio upakowane, aby spełnić wymagania producenta i klienta. Celem paletyzacji jest zapewnienie łatwego transportu i ochrony przed zanieczyszczeniami atmosferycznymi oraz ciałami obcymi.

W zależności od zastosowania butelek i miejsca docelowego, można zastosować dwa rodzaje paletyzacji: sypką i modułową. Paletyzacja sypka polega na układaniu butelek w warstwy o rozmiarze odpowiadającym paletcie, a następnie ustawianiu ich w odpowiednią wysokość i zabezpieczeniu osłoną. Natomiast paletyzacja modułowa polega na pakowaniu mniejszych grup butelek w paczki takie jak kartony, tacki, paczki cegielkowe lub skrzynie. Każdy z tych rodzajów opakowań jest następnie umieszczany na paletcie i układany w wymaganą wysokość.

Do paletyzacji butelek szklanych wykorzystuje się różne systemy, począwszy od półautomatycznych po w pełni automatyczne. Współczesne paletyzatory są w stanie obsługiwać nawet najbardziej nietypowe produkty o trudnych kształtach. Urządzenia te przenoszą warstwy butelek na paletę, używając różnych technik, takich jak przeciąganie, działanie podciśnienia lub specjalnie zaprojektowane głowice. Zapewniają one efektywne i precyzyjne paletyzowanie butelek szklanych, minimalizując ryzyko uszkodzeń i zapewniając stabilność układanych warstw.

Po paletyzacji butelek szklanych następuje etap pakowania, który ma na celu zapewnienie dodatkowej ochrony i stabilności opakowania. Istnieją dwie główne metody pakowania: owijanie folią termokurczliwą i owijanie folią stretch.

Owijanie folią termokurczliwą polega na pokryciu palety z butelkami specjalną folią, która jest następnie poddana działaniu wysokiej temperatury, co powoduje jej kurczenie się i szczelne oplatanie opakowania. Ten proces zapewnia nie tylko stabilność, ale także dodatkową ochronę przed czynnikami zewnętrznymi, takimi jak wilgoć i zanieczyszczenia atmosferyczne.

Owijanie folią stretch polega na owinięciu palety z butelkami elastyczną folią stretch, która jest naciągana i dokładnie przylega do opakowania, zapewniając pewne utrzymanie i stabilność. Ten proces jest bardziej ekonomiczny i oszczędza miejsce w porównaniu do owijania folią termokurczliwą, jednak zapewnia nieco mniejszą ochronę [18].

Po odpowiednim zapakowaniu butelek szklanych na palecie, następuje etap transportu do magazynu huty szkła. Transport odbywa się zazwyczaj za pomocą wózków widłowych lub systemów przenośnikowych. Ważne jest, aby podczas transportu utrzymać stabilność palet i zapobiec uszkodzeniom butelek. Podczas transportu butelek szklanych ważne jest również zachowanie ostrożności i dbałość o ochronę przed zanieczyszczeniami. Palety z butelkami powinny być odpowiednio zabezpieczone przed możliwością dostania się ciał obcych lub uszkodzenia podczas manipulacji.

Po dotarciu do magazynu huty szkła, palety z butelkami są starannie ustawiane i przechowywane w wyznaczonych strefach. W magazynie stosuje się odpowiednie procedury i kontrole w celu zapewnienia ochrony przed uszkodzeniami, zanieczyszczeniami oraz utrzymania prawidłowej rotacji zapasów.

Każda paleta otrzymuje oznaczenie lub kod umożliwiający łatwe zlokalizowanie i śledzenie zapasów. Ważne jest również regularne sprawdzanie integralności opakowań i ochrona przed insektami oraz zanieczyszczeniami folii termokurczliwej lub stretch.

W przypadku wykrycia jakichkolwiek uszkodzeń, utraty integralności lub innych problemów z opakowaniem, palety z butelkami są odrzucane i poddawane ponownej obróbce lub przepakowaniu.

Proces paletyzacji, pakowania, transportowania i magazynowania butelek szklanych w hucie szkła wymaga precyzji, dbałości o jakość i odpowiednich procedur. Niezbędne jest odpowiednie zapakowanie butelek na palecie, zabezpieczenie przed uszkodzeniami i zanieczyszczeniami, a także skuteczne zarządzanie magazynem, dla zapewnienia bezpiecznego i efektywnego przepływu ostatniego etapu produkcji butelek szklanych [19].

4. Prezentacja analizowanej huty szkła

Teren, na którym zlokalizowana jest analizowana huta szkła jest eksploatowany przemysłowo od co najmniej XIX wieku. W wieku XIX znajdowała się tam huta żelaza „Maria”. W 1875 r. na jej terenie założono hutę szkła, która została unowocześniona w 1914 r. Od tego czasu na terenie prowadzona jest wyłącznie produkcja szkła, a huta była wielokrotnie rozbudowywana i przebudowywana.

Od 1992 r. Pol-Am-Pack S.A. działa w strukturze grupy kapitałowej CANPACK. W wyniku działań zmierzających do uproszczenia struktury grupy, usprawnienia zarządzania, koncentracji na podstawowych działaniach produkcyjnych oraz regulacji zatrudnienia, w marcu 2003 r. działalność produkcyjna w zakresie produkcji opakowań stalowych została przekazana do spółki CANPACK S.A., która przejęła także większość pracowników Pol-Am-Pack S.A.

Pol-Am-Pack S.A. w ramach strategii zarządzania Grupą CANPACK stała się spółką holdingową, realizująca funkcje zarządzania oraz finansowania spółek zależnych, należących do Grupy CANPACK.

W związku z podjęciem decyzji o dywersyfikacji asortymentowej Grupy CANPACK i rozszerzeniu oferty o opakowania szklane, w dniu 16 czerwca 2005 r. Pol-Am-Pack S.A. nabyła od syndyka masy upadłościowej przedsiębiorstwo Huta Szkła Orzesze w Orzeszu (HSO). Po nabyciu huty przeprowadzona została restrukturyzacja i modernizacja technologiczna, których celem było przekształcenie huty w producenta nowoczesnych opakowań szklanych, zdolnego do konkurencyjności na rynku krajowym. Etap ten został pomyślnie zakończony.

Huta Orzesze w momencie zakupu posiadała przestarzałą technologię i nie była wyposażona w urządzenia do kontroli jakości wyrobów. Nie będąc w stanie sprostać rosnącym wymaganiom jakościowym na rynku, traciła klientów.

Inwestycja w HSO polegała na przebudowie wanny szklarskiej (pieca szklarskiego), zakupie jednego i modernizacji dwóch posiadanych automatów formujących oraz kompletnym wyposażeniu linii produkcyjnych w urządzenia kontroli jakości. W celu poprawienia jakości formowania wyrobów został stworzony warsztat przygotowania i remontu form szklarskich. Wdrożono procedury jakościowe oraz zasady ładu korporacyjnego obowiązujące w Grupie CANPACK.

Wdrożono także nową technologię cienkościenną NNPB (ang. narrow neck press and blow) dla butelek i PB (ang. Press and Blow) dla słoików, co pozwoliło na zmniejszenie ilości

masy szklanej w wyrobach gotowych z zachowaniem ich niezmiennych parametrów użytkowych. Stworzono nowoczesną infrastrukturę niezbędną do uruchomienia produkcji: stacje kompresorów i wentylatorów chłodzenia form oraz instalacje zasilania w energię elektryczną i sprężone powietrzem.

W wyniku przeprowadzonych inwestycji w ofercie handlowej HSO pojawiły się nowe produkty, a jakość wyrobów uległa znacznej poprawie. Profil produkcji Huty Szkła „Orzesze” obejmuje produkcję opakowań szklanych, a w szczególności butelek spożywczych o pojemnościach od 40 ml do 1000 ml. Produkowane wzory opakowań mogą być wykonywane ze szkła bezbarwnego lub kolorowego, głównie ze szkła brązowego i zielonego. Efektem modernizacji było uzyskanie przez Pol-Am-Pack S.A. dostępu do nowoczesnej technologii produkcji szkła cienkościennego oraz wdrożenie nowoczesnej technologii kontroli jakości, spełniającej wymagania klientów korporacyjnych.

W październiku 2007 r. oddział Huta Szkła Orzesze pozytywnie przeszedł audyt certyfikujący w zakresie wdrożenia procedur zintegrowanego systemu zarządzania jakością – normy ISO 9001:2000 oraz normy ISO 2200:2005 i HACCP w oparciu o normę ISO 22000.

Po przeprowadzonej modernizacji HSO osiągnęła:

- wydajność i parametry produkcyjne odpowiadające aktualnym standardom przemysłowym w branży,
- jakość produktów odpowiadającą wysokim wymaganiom klientów korporacyjnych,
- bardzo dobre wskaźniki kosztów bezpośrednich produkcji oraz kosztu własnego odpowiadające najlepszym wskaźnikom konkurencji.

W 2015 roku zmieniona została nazwa spółki Pol-Am-Pack S.A. na CP Glass S.A.

Odpowiadając na rosnące wymagania największych producentów piw, napojów spirytusowych i napojów bezalkoholowych, CP Glass S.A. dostarcza obecnie butelki do 15 krajów Europy, a co trzecia butelka na półkach sklepowych w Polsce pochodzi właśnie z Orzesza.

Obecnie huta posiada trzy wanny szklarskie oraz dziewięć linii produkcyjnych. Hutę szkła w Orzeszu dzieli się na trzy hale, tzw. wydziały:

- W-1 o wydajności 180 – 240 Mg/dobę,
- W-2 o wydajności 300 – 360 Mg/dobę,
- W-3 o wydajności 280 – 400 Mg/dobę

Obszar HSO położony jest w północnej części gminy Orzesze, w bezpośrednim sąsiedztwie drogi krajowej nr 925, tuż przy północnej granicy gminy. Gmina Orzesze położona jest w powiecie mikołowskim, w województwie śląskim. Obszar zakładu od północy otaczają zabudowania huty szkła, za którą dalej na północ znajduje się ulica Hutnicza i granica gminy Orzesze i Ornontowice (tereny użytkowane rolniczo i rozproszona zabudowa jednorodzinna). Od wschodu znajduje się zbiornik wodny i ciek Bierawka, a w dalszej odległości nasyp linii kolejowej. Od zachodu teren ogranicza droga wojewódzka nr 925, będącą główną osią komunikacyjną gminy, natomiast od północy teren ograniczony jest ulicą Szklarską, w otoczeniu tereny zabudowy mieszkaniowej i obiekty handlowo-usługowe.

5. Prezentacja sylwetki doktoranta wdrożeniowego

Obecnie sprawuję rolę Kierownika Projektu w Dziale Inwestycyjnym w CP Glass S.A. Oddział Huta Szkła „Orzesze”, w którym zajmuje się przedsięwzięciami inwestycyjnym, od etapu tworzenia koncepcji lub rozwiązania technologicznego, przez etap poszukiwania, negocjacji i wyboru wykonawców, po realizację projektu, aż do odbioru inwestycji i przekazania do eksploatacji.

W 2018 roku zatrudniłem się w CP Glass S.A. na stanowisku specjalisty do spraw procesów energetycznych, na którym zajmowałem się rozliczeniem huty szkła z dostawcami mediów energetycznych, tworzeniem raportów energetycznych, bieżącym i doraźnym prowadzeniem obliczeń z zakresu zużycia energii, optymalizacji układów i systemów energetycznych, współpracą z pracownikami działów produkcji i utrzymania ruchu w celu osiągnięcia redukcji zużycia mediów energetycznych oraz oceną efektywności energetycznej planowanych inwestycji. Moim pierwszym dużym przedsięwzięciem jako specjalista ds. procesów energetycznych była realizacja projektu, w ramach poprawy warunków energetycznych, wdrożenie Systemu Zarządzania Mediami Energetycznymi w latach 2018-2019.

Równocześnie w roku 2019 wzięłem udział w naborze do III edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”, organizowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa wraz z uczelniami wyższymi, zgłaszając realizację pracy doktorskiej pt. Optymalizacja procesu produkcji szkła opakowaniowego mająca na celu zmniejszenie zużycia mediów energetycznych oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń, wpisująca się w obowiązki specjalisty ds. procesów energetycznych i realizowane projekty w hucie szkła.

W trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego dzięki zdobytej wiedzy, doświadczeniu i udziału w realizacji projektów inwestycyjnych zostałem awansowany na stanowisko Kierownika Projektu. Nowa rola jaką pełnię w spółce pozwoliła mi na zarządzanie i realizację przedsięwzięć mających na celu redukcję zużycia mediów energetycznych i ograniczenie emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Dzięki zgromadzonemu doświadczeniu i umiejętnościom, dostrzegłem potrzebę systematyzacji zdobytej wiedzy i praktyk stosowanych w przemyśle szklarskim. Uznałem, że wartość naukowa i technologiczna przeprowadzanych modernizacji była na tyle istotna, że warto przekształcić ją w treść pracy doktorskiej. Moim celem było nie tylko podzielenie się zdobytą wiedzą z sektorem przemysłowym, ale także przyczynienie się do rozwoju naukowego w dziedzinie energetyki w branży szklarskiej. Będąc na stanowisku specjalisty ds. procesów

energetycznych oraz Kierownika Projektu, miałem bezpośredni dostęp do danych, mogłem nadzorować wprowadzane zmiany oraz przeprowadzić niezbędne analizy i kalkulacje. Dzięki temu moja praca doktorska ma nie tylko teoretyczne podstawy, ale przede wszystkim praktyczne zastosowanie, które posłuży zarówno przemysłowi, jak i nauce.

6. Przegląd wybranych metod zwiększania efektywności energetycznej i zmniejszania oddziaływania na środowisko

Rozdział ten ma na celu omówienie praktyk i technologii zwiększających efektywność energetyczną i zmniejszających negatywne oddziaływania na środowisko w przemyśle. Zastosowanie metod zwiększających efektywność energetyczną i zmniejszających negatywne oddziaływania na środowisko w przemyśle, stanowi kluczowy element globalnej strategii ograniczania emisji gazów cieplarnianych, jednocześnie zwiększając konkurencyjność przemysłową poprzez zmniejszanie kosztów energetycznych. Przyglądając się tym aspektom, należy wziąć pod uwagę kontekst polityki klimatycznej, która coraz bardziej nakłania do poszukiwania zrównoważonych, wydajnych rozwiązań energetycznych.

Polityka klimatyczna odgrywa ważną rolę w kształtowaniu zachowań i decyzji przemysłu w kwestii zarządzania energią. Światowe porozumienia wyznaczają ambitne cele dotyczące redukcji emisji CO₂. Równocześnie, regulacje na poziomie krajowym i międzynarodowym coraz częściej zmuszają sektor przemysłowy do ograniczenia zużycia energii i zwiększenia jej efektywności. Przyjęcie odpowiednich praktyk w tej dziedzinie staje się nie tylko etycznym imperatywem, ale także koniecznością ekonomiczną i strategiczną [20].

Wraz ze wzrostem cen energii, które często są bezpośrednim skutkiem polityki klimatycznej, przemysł znajduje się pod coraz większą presją, aby zminimalizować swoje zużycie energii. Wydajniejsze wykorzystanie energii przekłada się na bezpośrednie oszczędności finansowe, co ma kluczowe znaczenie w dzisiejszym konkurencyjnym świecie biznesu. Efektywność energetyczna jest więc nie tylko kwestią odpowiedzialności środowiskowej, ale także praktycznym narzędziem zarządzania finansowego.

Jednak zmniejszanie zużycia energii nie wystarczy, jeśli chcemy sprostać wyzwaniom klimatycznym. Przemysł musi również zintensyfikować wysiłki na rzecz wykorzystania energii odnawialnej, co również przekłada się na zwiększoną efektywność energetyczną. Takie praktyki umożliwiają nie tylko ograniczenie emisji CO₂, ale także zwiększenie konkurencyjności poprzez dywersyfikację źródeł energii, co staje się coraz bardziej istotne w obliczu rosnącej niepewności związanej z tradycyjnymi źródłami paliw kopalnych.

Warto zauważyć, że temat efektywności energetycznej jest nierozzerwalnie związany z innowacją. Nowe technologie i rozwiązania, takie jak inteligentne sieci, energetyka prosumencka, czy nowoczesne systemy zarządzania energią, otwierają nowe możliwości dla

przemysłu, aby stać się bardziej wydajnym i zrównoważonym. Stąd też analiza metod zwiększających efektywność energetyczną nie może obyć się bez spojrzenia na najnowsze osiągnięcia technologiczne i trendów w sektorze [21].

W poniższych podrozdziałach wyszczególnione zostały rozwiązania mające na celu zwiększenie efektywności energetycznej, punkt 6.1. omawia te wykorzystane w różnych gałęziach przemysłu, natomiast punkt 6.2. opisuje możliwości stricte w przemyśle szklarskim.

6.1. Popularne rozwiązania optymalizacyjne stosowane w przemyśle

6.1.1. Wdrożenie systemu zarządzania zużyciem energii

Podstawową możliwością poprawy efektywności energetycznej w firmach jest wdrożenie Systemu Zarządzania Energią. Jest to oprogramowanie umożliwiające monitorowanie zużycia mediów energetycznych w czasie rzeczywistym (np. prądu, gazu, sprężonego powietrza, wody i innych). Taki system pozwala również na rozwijanie wiedzy o procesie na podstawie danych historycznych oraz na wyciąganie wniosków dotyczących zużycia mediów energetycznych w określonych warunkach produkcyjnych i tworzenie najlepszych praktyk.

Optymalne zużycie energii wynika nie tylko z potrzeby redukcji kosztów produkcji. Powszechnie obowiązujący międzynarodowy standard ISO 50001 dotyczący efektywnego zarządzania energią jest stosowany na całym świecie, w tym w przedsiębiorstwach produkcyjnych. W zależności od wielkości firmy i jej celów, najwyższe kierownictwo może zdecydować się na utworzenie zespołu zajmującego się zadaniami związanymi z energią, działającego na stałe. Zespół ten ma ciągłe obowiązki w zakresie wsparcia zarządzania energią i musi zapewnić niezbędne zasoby. Wspomniany system zarządzania energią doskonale wpisuje się w taką politykę firmy pod każdym względem [22].

Warto studiować i wdrażać dalsze systemy regulacji procesów, redukować zużycie energii i wpływ na środowisko, jednocześnie zwiększając ich znaczenie i konkurencyjność w przemyśle. Optymalizacja procesów oraz zapewnienie zastosowania najbardziej produktywnych technologii są kluczowe dla osiągnięcia oszczędności energii w przemyśle. Koordynacja ich efektywności i działania jest konieczna, aby zapewnić realizację oszczędności energetycznych.

Systemy zarządzania energią są systemami, które łączą zdolność do gromadzenia i przetwarzania dużych ilości informacji z obszarów produkcyjnych, przeprowadzania analiz

oraz wykorzystywania modeli, zgromadzonych danych i wiedzy do reprezentowania złożonych problemów podejmowania decyzji. W takim systemie zawarte są bazy wiedzy i narzędzia sztucznej inteligencji, wraz z oprogramowaniem do przetwarzania ilościowego oraz miernikami, czujnikami i metrykami. Jest to dojrzała technologia dostępna w przystępnej cenie, która dostarcza informacji w czasie rzeczywistym dotyczących parametrów indywidualnego zużycia mediów przez komponenty wyposażenia zakładu. Informacje z analizatorów są interesujące nie tylko ze względu na pomiar zużycia, ale także ze względu na parametry związane z rzeczywistymi warunkami pracy urządzeń i instalacji, które również ujawniają przedwczesne awarie lub nietypowe zachowanie maszyn [23].

Narzędzie takie jak System Zarządzania Energią, skonfigurowane w odpowiedni sposób, wspiera pracę kierowników, inżynierów, specjalistów i operatorów na poziomie ekspertów. Baza danych jest jednym z najważniejszych źródeł informacji na temat działającego procesu i wspiera jego zarządzanie. Informacje gromadzone przez system dotyczące niezawodności, łatwości konserwacji i zużycia energii urządzeń mogą stanowić kluczowy element procesu podejmowania decyzji. System otrzymuje istotne informacje do przewidywania sytuacji nietypowych, co znacznie redukuje liczbę nieplanowanych przestojów oraz koszty wynikające z ciągłych awarii sprzętu, zwłaszcza koszty energii. Współdzielona wiedza znacząco zwiększa również bezpieczeństwo zakładu zarówno z perspektywy środowiskowej, jak i przemysłowej. Wskaźniki energetyczne, samodzielnie lub w połączeniu z innymi parametrami charakterystycznymi dla operacji lub procesu, dostarczają informacji dotyczących zużycia energii oraz awarii maszyn, pomagając wykrywać możliwe awarie maszyn na wczesnym etapie. Może być także wykorzystywany do porównywania i kontrolowania zużycia energii w firmie. Benchmarking odgrywa istotną rolę w zarządzaniu kluczowymi nośnikami energii i śledzeniu wykonywanych działań.

System może przedstawiać zużycie dla poszczególnych obszarów lub działów, linii produkcyjnych oraz dla poszczególnych zamówień, przedmiotów i ilości produkcyjnych, co pomaga w obliczaniu rzeczywistych kosztów produkcji. Korelacja z danymi produkcyjnymi pozwala na pełną analizę i przejrzystość rzeczywistych kosztów produkcji. Monitorowanie aktywne wspomaga wykrywanie wycieków i marnotrawstwa mediów, które mogą łatwo umknąć uwadze, a równie łatwo zostać naprawione. Taki system pozwala również na rozwijanie wiedzy na podstawie danych historycznych oraz wyciąganie wniosków dotyczących zużycia mediów energetycznych dla określonych warunków produkcji i tworzenie najlepszych praktyk. Nawet oszczędzanie niewielkich ilości energii w danym czasie, kontynuowane przez dłuższy okres, może mieć o wiele większy efekt niż droższe ulepszenia technologiczne [24].

6.1.2. Modernizacja oświetlenia

Oświetlenie w przemyśle jest nieodłącznym elementem procesu produkcyjnego, wpływającym na bezpieczeństwo pracy, wydajność oraz jakość produkcji. Jednak tradycyjne systemy oświetlenia często zużywają nieproporcjonalnie dużą ilość energii, co wpływa na ekologiczny odcisk przemysłu oraz generuje wysokie koszty operacyjne. W związku z tym modernizacja oświetlenia staje się jedną z podstawowych inwestycji w celu zwiększenia efektywności energetycznej.

Do głównych metod modernizacji oświetlenia należy zastosowanie nowoczesnych technologii świetlnych, takich jak diody elektroluminescencyjne (LED) lub lampy fluorescencyjne typu T5. Te technologie charakteryzują się wyższą efektywnością świetlną, długim okresem eksploatacji oraz możliwością precyzyjnego sterowania natężeniem światła.

Dobór odpowiednich technologii oświetleniowych powinien być poprzedzony audytem energetycznym, pozwalającym zidentyfikować obszary o największym potencjale oszczędności oraz określić wymagania dotyczące natężenia i jakości światła.

Modernizacja oświetlenia przemysłowego przekłada się na szereg korzyści, zarówno w zakresie efektywności energetycznej, jak i poprawy warunków pracy. Oszczędności energii wynikają z niższego zużycia energii przez nowoczesne technologie oświetleniowe oraz możliwości efektywnego sterowania oświetleniem. Poprawa jakości światła może przyczynić się do zwiększenia wydajności pracy, zmniejszenia ryzyka wypadków oraz poprawy jakości produkcji [25].

6.1.3. Instalacja wysokowydajnych silników

Silniki elektryczne są nieodłącznym elementem każdego zakładu przemysłowego, napędzając szereg procesów od podstawowych systemów do skomplikowanych linii produkcyjnych. Szacuje się, że zużywają one aż 70% całkowitego zapotrzebowania na energię w typowym zakładzie przemysłowym. Z tego powodu, wymiana standardowych silników na wysokowydajne może przynieść znaczne korzyści pod kątem efektywności energetycznej.

Silniki wysokowydajne charakteryzują się wyższym stopniem sprawności, zazwyczaj przekraczającym 90%. To oznacza, że większy procent energii elektrycznej jest przekształcany w energię mechaniczną, co przekłada się na mniejsze zużycie energii do wykonania tej samej pracy. Dodatkowo, silniki te charakteryzują się dłuższą żywotnością i mniejszym zużyciem części, co z kolei przekłada się na mniejsze koszty utrzymania i obsługi.

Zastosowanie silników wysokowydajnych może przynieść oszczędności energetyczne sięgające nawet 10-40% w porównaniu do tradycyjnych silników. W skali całego zakładu przemysłowego, te oszczędności mogą przekładać się na znaczne obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Dodatkowo, redukcja zużycia energii przyczynia się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, co jest zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Choć początkowy koszt zakupu silników wysokowydajnych jest wyższy, w porównaniu do zakupu standardowych lub mniej wydajnych silników, to z uwagi na oszczędności energii, długowieczność i mniejsze koszty utrzymania, inwestycja ta zwraca się zazwyczaj w ciągu kilku lat. Wiele badań pokazuje, że okres zwrotu z inwestycji w silniki wysokowydajne zazwyczaj wynosi od 1 do 6 lat, w zależności od skali operacji i intensywności użytkowania silników [26].

Wymiana silników na wysokowydajne jest jedną z najprostszych i najbardziej efektywnych metod optymalizacyjnych. Nie tylko przyczynia się do oszczędności energii, ale również pozwala na zwiększenie wydajności procesów przemysłowych. Dzięki większej sprawności, silniki te są w stanie dostarczyć więcej mocy przy mniejszym zużyciu energii, co pozwala na zwiększenie wydajności produkcji.

Wymiana silników na wysokowydajne to inwestycja, która ma potencjał przynieść znaczne korzyści zarówno pod względem ekonomicznym, jak i środowiskowym. Poprzez oszczędność energii, zmniejszenie kosztów utrzymania i zwiększenie wydajności, silniki te stanowią kluczowy element strategii zwiększania efektywności energetycznej zakładów przemysłowych. Wymiana silników jest nie tylko metodą zmniejszania energochłonności, ale również ważnym krokiem w kierunku zrównoważonego rozwoju przemysłu.

6.1.4. Wykorzystanie przemienników częstotliwości

Przemienniki częstotliwości, znane również jako przemienniki częstotliwości prądu, stanowią istotne narzędzie dla zakładów przemysłowych dążących do usprawniania procesów i zwiększenia efektywności energetycznej. Umożliwiają kontrolę i regulację prędkości silników elektrycznych, co przekłada się na znaczną oszczędność energii, szczególnie w systemach o zmiennym obciążeniu.

Przemienniki częstotliwości są wykorzystywane do regulowania prędkości obrotowej silników prądu zmiennego (AC) poprzez sterowanie napięciem i częstotliwością dostarczaną do silnika. Dzięki temu można dokładnie dostosować wydajność silnika do aktualnych potrzeb operacyjnych, zamiast utrzymywać silnik na stałych, najwyższych obrotach, co zwykle prowadzi do niepotrzebnego zużycia energii.

Zastosowanie przemienników częstotliwości może prowadzić do znacznych oszczędności energetycznych. Dla systemów o zmiennym obciążeniu, takich jak pompy i wentylatory, oszczędność energii może wynosić od 30% do nawet 50% [27].

Choć przemienniki częstotliwości są stosunkowo drogie w porównaniu do tradycyjnych starterów, zwrot z inwestycji często jest bardzo korzystny. Dzięki znacznej oszczędności energii, koszt przemiennika może zostać zrekompenzowany już po kilku latach. Dodatkowo, przemienniki częstotliwości mogą znacznie wydłużyć żywotność silników, co przekłada się na mniejsze koszty konserwacji i wymiany sprzętu.

Przemienniki częstotliwości to przydatne narzędzie dla zakładów przemysłowych dążących do zwiększenia efektywności energetycznej. Dzięki oszczędnościom energetycznym, poprawie kontroli procesów i wydłużonej żywotności sprzętu, przemienniki częstotliwości mogą przyczynić się do znacznego wzrostu zysków i konkurencyjności firmy. Pomimo początkowych wyższych kosztów, inwestycja w przemienniki częstotliwości często zwraca się w krótkim czasie, czyniąc je wyjątkowo atrakcyjnym rozwiązaniem dla przemysłu [27].

6.1.5. Modernizacja instalacji sprężonego powietrza

Sieci sprężonego powietrza pełnią kluczową rolę w wielu aspektach współczesnego przemysłu, choć są często ignorowane ze względu na złożoność zarządzania ich efektywnością energetyczną. Sprężone powietrze jest wysokoenergetycznym nośnikiem, który generuje znaczne koszty w procesie produkcji, przygotowania i przesyłu. Sprężarki, które są niezbędne do produkcji sprężonego powietrza, są napędzane energią elektryczną lub paliwem wytworzonym z naturalnych źródeł, co stanowi około 73% ogólnych kosztów eksploatacji.

Oszczędzanie energii w sieciach sprężonego powietrza staje się niezwykle ważne, aby ograniczyć koszty i zwiększyć ogólną wydajność energetyczną procesów. Jest to szczególnie istotne w systemach, które wykorzystują sprężarki o dużej mocy, gdzie straty energetyczne mogą być znaczne. Istnieje wiele strategii, które można zastosować do zwiększenia efektywności energetycznej sieci sprężonego powietrza, obejmujące różne aspekty systemu, od generacji i przesyłu do kontroli i użytkowania [23].

W zakresie zwiększania efektywności energetycznej sieci sprężonego powietrza można wyróżnić szereg środków, które mają na celu ograniczenie strat. W przypadku sieci sprężonego powietrza jednym z kluczowych obszarów jest redukcja wycieków powietrza, co można osiągnąć poprzez zastosowanie szczelnych złączek i wysokiej jakości szybkozłącz. Konieczne jest również podzielenie systemu na strefy z regulowanym ciśnieniem, z wykorzystaniem zaworów odcinających. Dopełnieniem tych działań jest zastosowanie metod odwadniających,

które umożliwiają usuwanie kondensatu, nie powodując przy tym strat powietrza. Inne środki mogą obejmować instalację pomocniczych zbiorników w bliskim sąsiedztwie odbiorników o zmiennym zapotrzebowaniu na powietrze, oraz minimalizację strat ciśnienia poprzez zastosowanie instalacji w formie zamkniętej (pierścienia), a także przez zmianę średnic przewodów instalacji pneumatycznej.

Drugim obszarem skupiającym uwagę w kontekście oszczędności energii są zespoły przygotowania powietrza. Tutaj również istnieje szereg działań, które można podjąć. Po pierwsze, zaleca się zastosowanie zespołów przygotowania powietrza, które są dostosowane do konkretnych odbiorników. Istotna jest również naprawa lub wymiana wszelkich nieszczelnych elementów lub urządzeń przygotowania powietrza. W przypadku wyłączenia odbiornika, zaleca się odłączenie dopływu powietrza do zespołów przygotowania powietrza, co również przyczynia się do oszczędności energii. Ostatnim, ale nie mniej ważnym aspektem jest weryfikacja i optymalizacja zespołów przygotowania powietrza, na przykład poprzez zastosowanie specjalnych regulatorów ciśnienia. Z kolei podczas fazy użytkowania sprężonego powietrza, mogą być zastosowane różne środki, aby zwiększyć efektywność energetyczną. Na przykład mogą być używane zespoły przygotowania powietrza, które są dostosowane do specyficznych potrzeb odbiornika, a nieszczelne elementy mogą być naprawione lub wymienione.

Systemy sterowania napędów pneumatycznych mogą również zostać zoptymalizowane na końcu procesu. Mogą to być metody sterowania ciśnienia roboczego, metody sterowania z akumulacją energii sprężonego powietrza, a nawet zastosowanie systemów mikroelektromechanicznych, które są znane ze swojej efektywności energetycznej.

Kluczowym elementem zwiększania efektywności energetycznej w sieciach sprężonego powietrza jest ocena możliwości zastosowania takich środków służących do oszczędności energii. Przeprowadzenie audytu sieci sprężonego powietrza, który uwzględnia wszystkie etapy procesu, od wytwarzania przez dystrybucję do użytkowania, pozwala na identyfikację potencjalnych obszarów do poprawy, a także na opracowanie planu działań w celu realizacji tych poprawek [28].

6.1.6. Odzysk ciepła odpadowego

Odzysk ciepła odpadowego stał się jednym z istotnych obszarów zainteresowania w dziedzinie efektywności energetycznej w przemyśle, ponieważ pozwala na zwiększenie wydajności procesów oraz oszczędność energii. Ciepło odpadowe to energia, która jest tracona w postaci ciepła podczas różnych procesów przemysłowych. Ta energia, jeśli zostanie

właściwie wykorzystana, może znacznie przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej danego procesu, a także zmniejszyć emisję szkodliwych gazów cieplarnianych [29].

Wymienniki Ciepła

Wymienniki ciepła są jednym z najpopularniejszych i najbardziej uniwersalnych urządzeń stosowanych do odzysku ciepła. Przeponowe wymienniki ciepła są urządzeniami wykorzystywanymi do transferu ciepła pomiędzy dwoma czynnikami, które są w różnych temperaturach, ale nie mieszają się ze sobą bezpośrednio. W praktyce oznacza to, że ciepło jest przekazywane przez ściankę wymiennika od medium o wyższej temperaturze do medium o niższej temperaturze. Wymienniki ciepła znajdują szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, gdzie odgrywają kluczową rolę w procesach grzewczych, chłodniczych i wentylacyjnych.

Istnieje wiele różnych typów wymienników ciepła, z których każdy jest specjalnie zaprojektowany do różnych zastosowań. Poniżej przedstawiam kilka najpopularniejszych typów:

- Wymienniki Ciepła Płytowe – są składane z wielu cienkich, płaskich płyt, które zwiększają powierzchnię kontaktu z medium i tym samym zwiększają efektywność wymiany ciepła. Są one stosowane w wielu przemysłach, w tym w przemyśle spożywczym, chemicznym i HVAC (ang. Heating, Ventilation and Air Conditioning).
- Wymienniki Ciepła Rurowe – w tych urządzeniach jedno medium przepływa przez rurki, podczas gdy drugie medium przepływa wokół rurek w przestrzeni zwanej płaszczem. Wymienniki ciepła rurowe są powszechnie stosowane w przemyśle energetycznym, naftowym i chemicznym.
- Wymienniki Ciepła Spiralne – w tym przypadku dwa przeciwbieżne strumienie płynu przepływają wzdłuż spiralnej ścieżki, co zapewnia skuteczną i równomierną wymianę ciepła. Często są stosowane w przemyśle spożywczym i chemicznym.
- Wymienniki Ciepła Regeneracyjne – są to wymienniki, które wykorzystują to samo medium do ogrzewania i chłodzenia, co przekłada się na bardzo wysoką efektywność energetyczną. Stosowane są np. w systemach wentylacyjnych z rekuperacją ciepła.

Sprawność wymienników ciepła zależy od wielu czynników, takich jak typ wymiennika, właściwości medium, różnica temperatury między medium, prędkość przepływu medium, materiał, z którego wykonany jest wymiennik, oraz jego konstrukcja i czystość.

Wymienniki ciepła są nieodzownym elementem wielu procesów przemysłowych i mają kluczowe znaczenie dla poprawy efektywności energetycznej. Poprzez odzysk i ponowne wykorzystanie ciepła, które inaczej byłoby stracone, wymienniki ciepła pomagają firmom oszczędzać energię, zmniejszać koszty operacyjne i ograniczać emisję gazów cieplarnianych [30].

Kogeneracja (Systemy CHP)

Kogeneracja, znana również jako systemy jednoczesnego produkcji ciepła i energii (CHP, ang. combined heat and power), to technika, która jednocześnie produkuje energię elektryczną i ciepło z jednego źródła paliwa, na przykład gazu ziemnego, biomasy lub węgla. Kogeneracja może znacząco poprawić efektywność energetyczną i zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych, dzięki czemu jest to atrakcyjna opcja dla różnych sektorów przemysłu i budynków użytku publicznego.

Podstawowa zasada kogeneracji polega na efektywnym wykorzystaniu ciepła, które normalnie jest marnowane podczas produkcji energii elektrycznej w konwencjonalnych elektrowniach. W systemach CHP, ciepło odpadowe z produkcji energii elektrycznej jest wykorzystywane do produkcji ciepła użytkowego - na przykład do ogrzewania budynków, produkcji pary przemysłowej lub podgrzewania wody. W ten sposób, energia pierwotna jest wykorzystywana w maksymalnym stopniu, zwiększając efektywność energetyczną i redukując emisję szkodliwych substancji.

Kogeneracja może być stosowana w różnych sektorach, w tym w przemyśle, w budynkach komercyjnych i mieszkalnych, w elektrociepłowniach, a także w rolnictwie. W przemyśle kogeneracja jest często wykorzystywana w branżach takich jak przemysł chemiczny, papierniczy, spożywczy, gdzie istnieje duże zapotrzebowanie na ciepło procesowe i parę. W budynkach komercyjnych i mieszkalnych, systemy CHP mogą dostarczać energię elektryczną i ciepło do ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania wody.

Sprawność systemów CHP jest zazwyczaj znacznie wyższa w porównaniu do tradycyjnych (rozdzielonych) metod produkcji energii, ponieważ wykorzystują one ciepło, które inaczej byłoby stracone.

Ogólnie rzecz biorąc, kogeneracja jest jednym z ważnych narzędzi w walce ze zmianą klimatu, poprawiając efektywność energetyczną i redukując emisje CO₂. Ponadto, systemy CHP mogą pomóc zapewnić niezawodność dostaw energii, co jest szczególnie istotne w kontekście rosnącego zapotrzebowania na energię na całym świecie [31].

Organiczne Cykle Rankine'a

Organiczne Cykle Rankine'a (ORC) to zaawansowana technologia odzysku ciepła, której działanie jest podobne do tradycyjnego cyklu Rankine'a stosowanego w elektrowniach parowych. Różnica polega na tym, że w ORC, zamiast wody, stosuje się substancje organiczne o niskiej temperaturze wrzenia, takie jak freony, pentany lub siloksany.

Podstawowa zasada działania ORC opiera się na czterech podstawowych etapach:

- Parowanie: Ciecz robocza (substancja organiczna) jest podgrzewana za pomocą ciepła odpadowego do temperatury, przy której przechodzi ona w stan parowy.
- Ekspansja: Para jest kierowana do turbiny, gdzie jej energia cieplna jest przekształcana w energię mechaniczną, która napędza generator elektryczności.
- Kondensacja: Para opuszczająca turbinę jest skierowana do skraplacza, gdzie jest chłodzona i wraca do stanu ciekłego.
- Pompowanie: Ciecz robocza jest ponownie pompowana do parownika, co rozpoczyna cykl od nowa.

Zarówno odnośnie do użytej substancji organicznej, jak i do konkretnych parametrów cyklu (takich jak temperatury i ciśnienia w różnych punktach cyklu), istnieje wiele różnych konfiguracji ORC. Wybór substancji organicznej zależy od dostępnej temperatury ciepła odpadowego - do niskotemperaturowych zastosowań często wykorzystuje się czynniki chłodnicze, takie jak R134a, podczas gdy do zastosowań o wyższej temperaturze mogą być stosowane węglowodory, takie jak pentan.

Technologia ORC jest szczególnie przydatna w przemyśle, gdzie dostępne są źródła ciepła odpadowego o umiarkowanie wysokiej temperaturze, które są trudne do wykorzystania za pomocą tradycyjnych metod odzysku ciepła. Można je znaleźć w takich sektorach jak przemysł chemiczny, celulozowo-papierniczy, metalurgiczny, spożywczy i wiele innych. ORC jest także często stosowany w energetyce odnawialnej.

Warto również wspomnieć, że ORC jest skuteczne nie tylko w skali przemysłowej - mniejsze systemy ORC mogą być wykorzystywane do lokalnego odzysku ciepła w budynkach komercyjnych czy szpitalach, gdzie ciepło z klimatyzacji lub innych procesów można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej [32].

Systemy Adsorpcyjne

Systemy adsorpcyjne są technologią, która wykorzystuje ciepło odpadowe do napędzania procesów chłodzenia. Ciepło odpadowe jest używane do odparowania czynnika

chłodzącego w generatorze. Czynnik chłodzący jest następnie skraplany i zasysany przez absorbent, tworząc chłodne powietrze.

Podstawowy cykl pracy systemu adsorpcyjnego składa się z adsorpcji, gdzie para czynnika chłodzącego (najczęściej woda) jest adsorbowana na powierzchni adsorbentu (najczęściej zeolitu, krzemionki lub węgla aktywnego), powodując wydzielanie ciepła. Następnie w procesie desorpcji, za pomocą dostarczonego ciepła (np. ciepła odpadowego), adsorbent jest regenerowany, co powoduje wydzielenie pary czynnika chłodzącego. Para czynnika chłodzącego jest skraplana, wydzielając ciepło, które może być odzyskane. Skroplony czynnik chłodzący jest rozprężany do niskiego ciśnienia i wraca do początkowego stanu jako chłodny czynnik parowy gotowy do ponownej adsorpcji.

Główną różnicą między różnymi systemami adsorpcyjnymi jest rodzaj użytego adsorbentu. Zeolity są często używane ze względu na ich wysoką pojemność adsorpcyjną i dobre właściwości termiczne. Węgiel aktywny, krzemionka i inne materiały mogą być również używane, w zależności od szczegółowych wymagań systemu.

Systemy adsorpcyjne są używane w różnych zastosowaniach, od małych systemów klimatyzacyjnych w domach i biurach, do dużych systemów przemysłowych. Jednym z głównych zastosowań jest odzysk ciepła odpadowego, co pozwala na zwiększenie efektywności energetycznej systemu. Ciepło wygenerowane przez adsorpcję może być również wykorzystane do ogrzewania wody lub powietrza.

Sprawność systemu adsorpcyjnego zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj adsorbentu, temperatura ciepła odpadowego i projekt systemu. Dzięki możliwości odzysku ciepła odpadowego, systemy te są często bardziej efektywne energetycznie niż tradycyjne systemy klimatyzacyjne. Systemy adsorpcyjne stanowią interesującą alternatywę dla tradycyjnych systemów klimatyzacyjnych i grzewczych [33].

Systemy Absorpcyjne

Systemy absorpcyjne bazują na idei wykorzystania ciepła w postaci nieużytecznej, zwanego dolnym źródłem. Wykorzystując ciepło w postaci pary lub gorącej wody o temperaturze przekraczającej 100°C, jako energię zasilającą (górne źródło), zamieniają to ciepło na formę użyteczną. W tych systemach głównym czynnikiem roboczym jest wodny roztwór bromku litu (LiBr), który jest nietoksyczny, podczas gdy woda pełni funkcję czynnika chłodniczego.

Działanie systemu opiera się na kilku krokach. W generatorze, dzięki dostarczonemu ciepłu, odparowuje się para wodna z rozcieńczonego roztworu bromku litu. Ten proces

odparowywania jest możliwy dzięki temu, że ciśnienie w generatorze jest znacząco niższe od atmosferycznego. Następnie czysta para wodna kierowana jest do skraplacza, gdzie zostaje skondensowana. Uzyskana w ten sposób woda przenoszona jest przez układ dławiący do parownika. Tam, odparowując w warunkach wysokiej próżni, odbiera ciepło nieużyteczne. W kolejnym etapie, para wodna powstała w parowniku jest absorbowana w absorberze przez stężony roztwór bromku litu, co utrzymuje wysoką próżnię w systemie i niską temperaturę wrzenia.

Absorpcja to proces silnie egzotermiczny, co oznacza, że podczas jego trwania wydzielane jest dużo ciepła. Po absorpcji, roztwór znowu się rozcieńcza, a potem jest ponownie przepompowywany do generatora, gdzie cykl zaczyna się od nowa. Kluczowe dla funkcjonowania systemów absorpcyjnych jest dostarczenie ciepła w postaci pary czy gorącej wody do generatora oraz ciepła niskotemperaturowego do parowacza. Wymagane jest również niewielkie zasilanie elektryczne dla systemu automatyki oraz pomp obiegowych.

Zaletą systemów absorpcyjnych jest to, że znacząco zwiększają sprawność wytwarzania energii cieplnej w porównaniu z konwencjonalnymi systemami. Dzięki nim możliwe jest odzyskanie ciepła, które normalnie uległoby rozproszeniu. Oznacza to, że takie systemy nie tylko zwiększają moc cieplowniczą, ale robią to przy takim samym zużyciu paliwa. Wykorzystując jednostkę dostarczonej energii, system absorpcyjny może odzyskać dodatkowe 0,67 jednostki energii z ciepła odpadowego, co prowadzi do wyprodukowania 1,67 jednostki ciepła użytecznego [34]. Dzięki zastosowaniu tych systemów możliwe jest również ograniczenie pracy urządzeń pomocniczych w systemie chłodzenia oraz odparowanie wody w chłodniach kominowych, co przynosi dodatkowe korzyści zarówno ekologiczne, jak i ekonomiczne.

Stosowanie systemów absorpcyjnych w elektrociepłowniach prowadzi również do znaczącego wzrostu sprawności produkcji energii elektrycznej. Dzięki temu więcej pary może zostać wykorzystane do produkcji energii elektrycznej. Jednak systemy te mają swoje ograniczenia, zwłaszcza związane z temperaturami odzyskiwanego ciepła, wymaganymi temperaturami ciepła użytecznego oraz temperaturą pary zasilającej. Warto też zwrócić uwagę na odpowiednie działanie roztworu LiBr, szczególnie z uwagi na obecność inhibitorów korozji, jak molibdenian litu. Jednak mimo tych ograniczeń, modernizacja systemów energetycznych za pomocą systemów absorpcyjnych staje się coraz bardziej popularna na świecie.

Jednak, mimo licznych korzyści, istnieją również wyzwania związane z odzyskiem ciepła odpadowego. Wiele systemów odzysku ciepła wymaga dużych inwestycji początkowych, co może być barierą dla niektórych przedsiębiorstw. Ponadto, nie wszystkie

procesy przemysłowe generują ciepło odpadowe o odpowiednio wysokiej temperaturze, co może ograniczyć efektywność niektórych technologii odzysku ciepła [35].

Podsumowując, odzysk ciepła odpadowego jest kluczowym elementem zwiększania efektywności energetycznej w przemyśle. Istnieje wiele technologii i strategii, które mogą być zastosowane do odzysku ciepła odpadowego, zależnie od specyficznych warunków i potrzeb danego procesu przemysłowego. Jest to obszar, który będzie nadal rozwijał się w przyszłości, w miarę jak rosną naciski na zwiększenie efektywności energetycznej i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Możliwości technologiczne odzysku ciepła odpadowego rosną, a stale rosnące ceny energii oraz naciski na redukcję emisji CO₂ sprawiają, że jest to obszar, który będzie nadal intensywnie rozwijany. Odzysk ciepła odpadowego jest jednym z kluczowych elementów zrównoważonego rozwoju przemysłu, pozwalającym na osiągnięcie wyższej efektywności energetycznej, zmniejszenie emisji CO₂ i ograniczenie kosztów operacyjnych [29].

6.1.7. Odnawialne Źródła Energii

Odnawialne źródła energii (OZE) odgrywają istotną rolę w przemyśle, przyczyniając się do zwiększenia efektywności energetycznej, obniżania kosztów i poprawy zrównoważonego rozwoju. Przemysł ciężki, charakteryzujący się dużym zużyciem energii, stanowi znaczący obszar zainteresowania dla stosowania technologii odnawialnych źródeł energii. Obejmują one szeroką gamę technologii, które wykorzystują naturalne źródła energii, takie jak słońce, wiatr, woda i biomasa [36].

Jednymi z najbardziej efektywnych i obiecujących technologii OZE są instalacje fotowoltaiczne i kolektory słoneczne. Instalacje fotowoltaiczne (PV), które konwertują promieniowanie słoneczne na energię elektryczną, są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle ciężkim, zarówno na dużą, jak i małą skalę. Przemysł stalowy, cementowy czy chemiczny, gdzie zapotrzebowanie na energię jest olbrzymie, może zainstalować systemy PV na swoich budynkach, parkingach czy nieużytkach. Pozwala to na generowanie energii, którą można wykorzystać bezpośrednio do zasilania maszyn, oświetlenia i innych procesów, co przyczynia się do znaczących oszczędności. Kolektory słoneczne, które konwertują energię słoneczną na ciepło, są również coraz częściej wykorzystywane w przemyśle ciężkim, szczególnie w procesach, które wymagają ciepła. W przemyśle chemicznym, ciepło generowane przez kolektory słoneczne może być wykorzystywane do suszenia, destylacji i innych procesów, które wymagają podgrzewania [37].

Kolejnym źródłem energii odnawialnej są pompy ciepła, jako jedno z zaawansowanych rozwiązań technologicznych, stają się coraz bardziej popularne w sektorach komercyjnych i przemysłowych. Pompa ciepła to urządzenie, które przekazuje ciepło z ośrodka o niższej temperaturze (źródło dolne) do ośrodka o wyższej temperaturze (górne źródło) poprzez cykl termodynamiczny. Pompy ciepła wykorzystują niskotemperaturowe źródła ciepła, takie jak powietrze, woda lub grunt, do produkcji ciepła o wyższej temperaturze. W przemyśle ciężkim, można je wykorzystać do odzyskiwania ciepła odpadowego z procesów przemysłowych i ponownego wykorzystania go do podgrzewania surowców, parowania rozpuszczalników, suszenia produktów, podgrzewania wody w procesach mycia, a nawet do ogrzewania pomieszczeń [38].

Energia wiatrowa stanowi atrakcyjną alternatywę dla przemysłu ciężkiego w kontekście oszczędności energetycznych. Zastosowanie energii wiatrowej ma również pozytywne skutki dla obrazu firmy w przemyśle ciężkim, często postrzeganego jako dużego emitenta CO₂. Turbiny wiatrowe generują energię elektryczną, która może być wykorzystywana bezpośrednio na miejscu. Oznacza to ograniczenie zależności od sieci energetycznej i niestabilnych cen energii. Ponadto, instalacje wiatrowe na dużą skalę mogą korzystać z mechanizmów wsparcia dla energii odnawialnej, takich jak certyfikaty zielonej energii lub umowy na zakup energii, które mogą dalej zwiększyć oszczędności finansowe. Wraz z ciągłym rozwojem technologicznym i rosnącym naciskiem na zrównoważone praktyki biznesowe nie tylko oferuje obniżenie kosztów operacyjnych, ale także możliwość poprawy wizerunku firmy jako odpowiedzialnego gracza w dziedzinie zrównoważonego rozwoju. Pomimo potencjalnych korzyści, zastosowanie energii wiatrowej w przemyśle ciężkim wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Przede wszystkim, jest to zależność od warunków pogodowych. Brak wiatru może ograniczyć dostępność energii, wymagając dodatkowych źródeł energii lub magazynowania energii. Drugim problemem jest potrzeba dużych powierzchni do instalacji turbin wiatrowych, co może być wyzwaniem, zwłaszcza w obszarach gęsto zaludnionych lub o wysokich cenach gruntów [39].

Energia geotermalna, wykorzystująca naturalne ciepło Ziemi, jest jednym z odnawialnych źródeł energii, które nabierają na znaczeniu w kontekście zrównoważonej energetyki przemysłowej. Pomimo intensywności energetycznej, przemysł ciężki może skorzystać z geotermii na wiele sposobów. Geotermia może dostarczać ciepło procesowe, a także energię elektryczną. Ciepło geotermalne jest wykorzystywane w przemyśle stalowym do suszenia i przegrzewania, a w przemyśle cementowym do suszenia surowców i pomocy w procesie wypalania. Energia elektryczna generowana z geotermii może być wykorzystywana

do zasilania maszyn i oświetlenia. Oszczędności wynikające z geotermii są związane z obniżeniem kosztów energii, zmniejszeniem zależności od paliw kopalnych i potencjalnymi korzyściami podatkowymi wynikającymi z zastosowania odnawialnych źródeł energii. Ponadto, wykorzystanie geotermii przyczynia się do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, co jest kluczowe dla przemysłu ciężkiego w kontekście zobowiązań dotyczących zmian klimatu [40].

Energia wodna, generowana przez przepływ lub opad wody, jest jednym z najstarszych źródeł energii odnawialnej wykorzystywanych przez ludzkość. Technologie wykorzystujące energię wodną obejmują elektrownie wodne (zarówno duże, jak i małe), elektrownie pływowe i elektrownie falowe. Elektrownie wodne, zwłaszcza małe elektrownie wodne, są często uważane za najbardziej odpowiednie dla zastosowań przemysłowych. Są one nie tylko stosunkowo tanie w budowie i eksploatacji, ale także wysoce skalowalne, umożliwiając dostosowanie ich do specyficznych wymagań energetycznych poszczególnych obiektów przemysłowych [41].

Wykorzystanie biomasy jako źródła energii nie jest nowym zjawiskiem. Jednakże, jej potencjał jako alternatywy dla paliw kopalnych w przemyśle ciężkim jest coraz częściej uznawany, zarówno pod kątem ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, jak i z punktu widzenia ekonomicznej efektywności. Biomasa, w postaci odpadów rolnych, przemysłowych i komunalnych, jest powszechnie dostępna i może przyczynić się do znacznej redukcji zapotrzebowania na tradycyjne źródła energii. W przemyśle ciężkim, gdzie zapotrzebowanie na energię jest ogromne, biomasa może być wykorzystana do generowania zarówno ciepła, jak i energii elektrycznej. Wiele procesów przemysłowych wymaga dużych ilości ciepła, które może być generowane przez spalanie biomasy. Biomasa może dostarczyć energię do procesów wysokotemperaturowych, redukując tym samym zużycie paliw kopalnych. Ponadto, biomasa może być również wykorzystana do produkcji biogazu poprzez proces fermentacji anaerobowej. Biogaz może być następnie wykorzystany do wytwarzania energii. Przemysł ciężki, tak jak przemysł chemiczny, może wykorzystać odpady organiczne z produkcji jako surowiec do produkcji biogazu, tworząc w ten sposób zamknięte obiegi materiałowe [42].

Przemysł ciężki, ze względu na swoje intensywne zapotrzebowanie na energię, stanowi ważny sektor w kontekście globalnych strategii redukcji emisji dwutlenku węgla i zrównoważonego rozwoju. Mimo, że odnawialne źródła energii, takie jak słońce, wiatr, woda, grunt i biomasa, nie zawsze mogą pokryć całe zapotrzebowanie energetyczne takich podmiotów, ich rosnące zastosowanie przynosi szereg potencjalnych korzyści zarówno ekonomicznych, jak i środowiskowych.

Z ekonomicznego punktu widzenia, OZE stanowią atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych paliw kopalnych, które są coraz częściej obciążone dodatkowymi kosztami związanymi z ich wpływem na środowisko. Zastosowanie OZE pozwala na stabilizację kosztów energii, co jest szczególnie istotne w obliczu fluktuacji cen na rynkach energii. Ponadto, systemy oparte na OZE często kwalifikują się do otrzymania certyfikatów energii odnawialnej lub ulg podatkowych, co dodatkowo zwiększa ich atrakcyjność ekonomiczną [43].

Z perspektywy środowiskowej, zastosowanie OZE przyczynia się do obniżenia emisji dwutlenku węgla, co jest kluczowym elementem strategii przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Dodatkowo, zastosowanie OZE wspiera ideę zrównoważonego rozwoju i odpowiedzialności biznesowej, co z kolei przekłada się na wzrost prestiżu firmy w oczach interesariuszy, w tym klientów, partnerów biznesowych i społeczności lokalnych.

Pomimo pewnych wyzwań, takich jak potrzeba znacznych inwestycji początkowych czy techniczne ograniczenia związane z dostępnością i przewidywalnością OZE, rosnące zastosowanie tych źródeł energii w przemyśle ciężkim wydaje się być nieuniknione. Dlatego też potrzebna jest kontynuacja badań i rozwoju technologicznego, aby zwiększyć efektywność i ekonomiczną atrakcyjność OZE. Tym samym, przemysł ciężki będzie mógł odgrywać kluczową rolę w globalnej transformacji energetycznej, prowadzącej do bardziej zrównoważonego i niskoemisyjnego modelu gospodarczego [44].

6.2. Rozwiązania optymalizacyjne stosowane w przemyśle szklarskim

6.2.1. Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w topieniu szkła

Jednym z kluczowych elementów w procesie produkcji szkła jest stłuczka szklana, znana również jako kruszywo. Znajduje ona zastosowanie we wszystkich sektorach przemysłu szklarskiego, zarówno jako surowiec, jak i w formie dodatków do procesu wytopu, jako jednego z kluczowych komponentów w procesie produkcji szkła, co jest coraz częściej zauważane i doceniane w kontekście ekologicznym, jako że używanie stłuczki szklanej w produkcji szkła może zmniejszyć potrzebę wydobycia nowych surowców oraz energii potrzebnej do produkcji nowego szkła. Wykorzystanie coraz większej ilości stłuczki w zestawie szklarskim przetwarzanym do masy szklanej znacząco wpływa na redukcję zużycia energii i surowców, a także na ograniczenie emisji szkodliwych dla środowiska gazów. Szkło ma nieograniczony potencjał recyklingu, jego ponowne użycie jako kruszywo promuje zrównoważony rozwój i zwiększa efektywność procesu produkcji [45].

Stłuczka szklana jest nieodłącznym elementem procesu produkcji szkła, stanowiąc około 20% materiałów, które są do tego celu wykorzystywane. Wielu producentów wykorzystuje od 10% stłuczki własnej, która jest recyklingowana podczas procesu produkcyjnego, do ponad 90% stłuczki zewnętrznej pochodzącej z rynku wtórnego jako stłuczka zewnętrzna, czy też obca. Podczas produkcji szklanych opakowań nie wszystkie wytworzone pojemniki są zadowalającej jakości (wtrącenia w butelce, wady na szyjkach butelek, pęcherze na ściankach butelek itp.), i nie mogą być dostarczone do klienta. Wszystkie te odrzucone szklane pojemniki są zbierane i kruszone, a następnie ponownie używane jako surowiec. Wykorzystanie stłuczki, zarówno pochodzącej z odpadu procesu produkcyjnego, jak i zdobytej z zewnętrznych źródeł, pozwala na wytopienie około 100 kg szkła ze 100 kg stłuczki. Jest to wyraz niespotykanej efektywności procesu recyklingu, wynoszącej niemal 100% [45].

Zaletą wykorzystania stłuczki szklanej jest możliwość redukcji zużycia surowców naturalnych (piasek kwarcowy, soda, wapń, dolomit, itp.). Zamiast wykorzystywać minerały, które wymagają wydobycia i przetwarzania, możliwe jest zastosowanie stłuczki, co minimalizuje negatywny wpływ na środowisko. Jest to znaczące, biorąc pod uwagę, że proces wydobywczy związany z surowcami do produkcji szkła jest energochłonny i powoduje znaczącą emisję gazów cieplarnianych.

Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w procesie produkcji przynosi szereg korzyści. Po pierwsze, proces przetwarzania stłuczki na szkło jest mniej energochłonny niż produkcja z surowców pierwotnych, co przekłada się na oszczędności energetyczne. Oszczędności te są jednak częściowo obniżone przez zapotrzebowanie energetyczne związane z kruszeniem, czyszczeniem, sortowaniem i transportem stłuczki. Mimo to, w wielu przypadkach, zwiększenie procentowego udziału szkła pochodzącego z recyklingu może mieć pozytywny wpływ na zużycie energii w zakładzie i ogólne koszty, a także na redukcję wprowadzanych surowców i emisji. Według badań, zwiększenie udziału stłuczki o 10% (na podstawie wagi) redukuje netto zużycie energii o 2 - 3,5% [46]. Zwiększając ilość obcego kruszywa w surowcach, można oszczędzić energię w pierwszych dwóch wskazanych obszarach: przetwarzanie surowców i proces topienia. Produkcja szkła przy użyciu stłuczki oszczędza energię, ponieważ ponowne topienie kruszywa nie wymaga energii na egzotermiczne reakcje topnienia, skracając także czas topienia, a tym samym zwiększając wydajność pieca. W rezultacie, wykorzystanie stłuczki szklanej przekłada się na redukcję emisji NO_x, spowodowaną mniejszym zużyciem paliwa, a także na redukcję emisji SO_x, dzięki niższemu zużyciu siarczanu sodu [47].

Dodatkowo, wykorzystanie stłuczki szklanej wpływa na wydłużenie żywotności pieców do wytopu szkła. Stłuczka szklana topi się w niższych temperaturach w porównaniu do temperatury topienia tradycyjnych surowców, co skutkuje mniejszym obciążeniem termicznym pieców, a zatem ich dłuższym okresem użytkowania (nawet o 30%) [48].

Na świecie obserwuje się rosnącą tendencję do wykorzystania stłuczki szklanej. Wzrost ten wynika zarówno z rosnącej świadomości ekologicznej, jak i z ekonomicznej opłacalności wykorzystania stłuczki szklanej. Coraz większa liczba producentów szkła korzysta ze stłuczki zewnętrznej, co przekłada się na korzyści ekologiczne i ekonomiczne [4].

6.2.2. Podgrzew stłuczki lub zestawu szklarskiego

Podgrzewanie partii surowców i stłuczki szklanej stało się w ostatnich latach kluczowym obszarem badań i innowacji w przemyśle szklarskim. Głównym celem tych wysiłków jest poprawa efektywności energetycznej procesu wytwarzania szkła, co przekłada się na znaczne oszczędności zarówno finansowe, jak i ekologiczne.

Podgrzewanie partii surowców i stłuczki szklanej polega na odzyskiwaniu odpadowego ciepła z procesu spalania i wykorzystywaniu go do podgrzewania surowców wprowadzanych do pieca szklarskiego. Podgrzewanie to następuje przed bezpośrednim wprowadzeniem surowców do pieca, co pozwala na oszczędność energii potrzebnej do ich podgrzewania w piecu. Tradycyjnie, surowce te wprowadzane są do pieca bez dodatkowego podgrzewania, co generuje znaczące zapotrzebowanie na energię. Dzięki podgrzewaniu, energia odzyskana jest bezpośrednio i ponownie wykorzystana w procesie topienia szkła, co przekłada się na znaczne oszczędności. Technologia ta jest zgodna z istniejącym łańcuchem produkcji szkła, co oznacza, że może być wdrożona bez konieczności przerywania bieżącego procesu produkcji [49].

Podgrzewanie partii surowców i stłuczki szklanej daje znaczne korzyści. Po pierwsze, pozwala na oszczędność energii w zakresie od 12 do 20 procent, co przekłada się na proporcjonalne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla (CO₂) i tlenków azotu (NO_x) [23]. Po drugie, podgrzewanie surowców pozwala na zwiększenie efektywności pieca, co oznacza, że więcej szkła może być wyprodukowane bez konieczności zwiększania ilości używanej energii. Dodatkowo, system podgrzewania surowców i stłuczki szklanej pomaga w redukcji temperatury ścian pieca, co zmniejsza ryzyko uszkodzeń strukturalnych. Inne korzyści to możliwość odzyskiwania cennych składników, takich jak selen, a także możliwość oczyszczania gazów spalinowych z takich związków jak SO, HCl i HF.

Oprócz tych korzyści, podgrzewanie partii surowców i stłuczki szklanej przynosi również znaczące oszczędności finansowe. Czas zwrotu inwestycji w tę technologię wynosi zazwyczaj od 2 do 3 lat, a jej okres eksploatacji wynosi około 20 lat. Oznacza to, że po początkowym okresie, technologia ta przynosi zysk dla producentów szkła [50].

Pomimo licznych korzyści, technologia podgrzewania partii surowców i stłuczki szklanej nie jest pozbawiona wyzwań. Jednym z głównych problemów jest konieczność minimalizacji zawartości wody w surowcach i stłuczce, aby uniknąć problemów z odwodnieniem wodorowęglanu sodu, które mogą prowadzić do tworzenia się grudek materiału, blokujących przepływ surowców przez podgrzewacz. Dodatkowo, istnieje ryzyko zwiększonego przenoszenia pyłu przez gazy z procesu spalania, które mogą osiadać na powierzchni regeneratora, powodując zanieczyszczenie. Ponadto, wymagania przestrzenne dla systemu podgrzewania są duże, a korozja i wysokie temperatury mogą prowadzić do pogorszenia struktury podgrzewacza.

W tej chwili na rynku dostępne są różne typy systemów podgrzewania partii surowców i stłuczki szklanej, które są dostosowane do specyficznych potrzeb producentów szkła. Wśród nich znajdują się podgrzewacze bezpośrednie, pośrednie oraz mieszane. Wszystkie te systemy mają swoje unikalne zalety i wady, które muszą być starannie rozważone przez producentów szkła przed ich zastosowaniem.

Mimo istniejących wyzwań, podgrzewanie partii surowców i stłuczki szklanej jest obiecującym obszarem dla przemysłu szklarskiego, który ma potencjał do znacznej poprawy efektywności energetycznej procesu produkcji szkła. Rozwój technologii w tym obszarze nadal jest intensywnie prowadzony, a przyszłe innowacje mogą przynieść jeszcze większe oszczędności energetyczne i finansowe dla przemysłu szklarskiego [51].

6.2.3. Zastosowanie palników tlenowych do opalania pieca szklarskiego

Metoda zastosowania palników tlenowych do opalania pieca szklarskiego opiera się na zastąpieniu spalania mieszanki paliwa z powietrzem spalaniem mieszanki paliwa z czystym tlenem (czystość powyżej 90%). Usunięcie azotu z mieszanki do spalania w palnikach pieca szklarskiego zmniejsza objętość spalin o 75-80%, w zależności od czystości używanego tlenu. Wynikiem jest oszczędność energii, ponieważ nie ma konieczności podgrzewania w procesie spalania atmosferycznego azotu do temperatury płomienia. Skala osiągniętych wyników zależy od porównywanych pieców. Istotne jest również znaczne zmniejszenie powstawania tlenków

azotu (NO_x). Nawet stosunkowo niskie stężenia N_2 w mieszance powietrzno-paliwowej mogą prowadzić do ogromnych emisji tlenków azotu.

Spaliny mają stosunkowo wysoką temperaturę, około 1200-1300°C, i zazwyczaj wymagają schłodzenia. Ze względu na wysoką zawartość wody i stężenie substancji mogących powodować korozję, schładzanie zwykle odbywa się za pomocą powietrza. Palnik do wymuszonego tlenowego podmuchu powinien mieć specjalną konstrukcję, różniącą się od tradycyjnych systemów paliwowo-powietrznych. Obecnie stosuje się tylko wysoko wyspecjalizowane palniki, specjalnie zaprojektowane do produkcji szkła, o niskim współczynniku powstawania NO_x . Oto główne cechy komercyjnych systemów:

- Długi i szeroki płomień o dużym nasileniu świetlnym, zapewniający głębszy i bardziej jednolity transfer ciepła,
- Płaskie płomienie o szerokim zakresie pokrycia,
- Opóźnione wymieszanie paliwa i tlenu w celu zmniejszenia szczytowych temperatur płomienia w strefie wysokiego stężenia O_2 ,
- Nie wymagają chłodzenia wodą,
- Płomień można dostosować pod kątem pojemności i kształtu pieca szklarskiego,
- Można stosować różne rodzaje paliwa [52].

Oszczędności energetyczne mogą przekraczać 50% dla małych jednostek, które mają małą wydajność z punktu widzenia termicznego pieców [52]. Dla średnich pieców rekuperacyjnych, bez stosowania specjalnych środków oszczędzania energii, standardowego poziomu izolacji i korzystania tylko ze słuczki własnej, przejście na wymuszony tlenowy podmuch zmniejszy zużycie energii o 50%. Jednak dla dużych pieców regeneracyjnych o optymalnej wydajności termicznej oszczędności będą znacznie mniejsze i potencjalnie dążące do zera. W takim przypadku koszt tlenu będzie znacznie wyższy niż zysk z jego wykorzystania.

Spalanie w środowisku tlenowym zapewnia wyższą temperaturę płomienia i w niektórych przypadkach może zapewnić wyższą wydajność wytapiania szkła. Jest to szczególnie istotne, gdy trzeba zwiększyć objętość produkcji. Brak podgrzewanego powietrza przyczynia się również do ogólnej wydajności tej metody. W niektórych przypadkach spalanie tlenowe ułatwia również zarządzanie procesem topienia i podnosi jakość szkła. Jednak wysoka zawartość tlenu i pary wodnej w atmosferze płomienia może wpływać na chemię szkła, co może powodować zmiany w składzie zestawu szklarskiego [53].

Ważnym elementem, który determinuje efektywność ekonomiczną tej metody, jest brak konieczności podgrzewania powietrza i odpowiadające zmniejszenie kosztów kapitałowych w porównaniu do tradycyjnych pieców regeneracyjnych i rekuperacyjnych. Może to być ważny argument przy budowie nowych pieców, gdy można całkowicie uniknąć kosztów podgrzewania powietrza w tradycyjnych rozwiązaniach. Większość nowoczesnych palników do spalania tlenowego jest zwykle droższa niż podobne palniki do spalania mieszanki z powietrzem, a koszt instalacji doprowadzającej tlen do spalania może być dość duży. Jednak dla większości pieców dodatkowe koszty dostarczenia tlenu są znacznie niższe niż oszczędności związane z brakiem podgrzewanego powietrza. Ze względu na potencjalny wpływ wysokich temperatur na trwałość materiału ogniotrwałego, może być konieczne zastosowanie droższego materiału ogniotrwałego do pieca, co znacznie zwiększy koszty inwestycyjne. Regeneratory pieców można częściowo przebudować od momentu instalacji pieca na danym miejscu. Chociaż oszczędności będą mniejsze niż przy budowie nowego pieca, to brak konieczności stosowania regeneratorów będzie znaczący. Ogólnie rzecz biorąc, redukcja kosztów kapitałowych pieca przy użyciu palników tlenowych wynosi 30 – 40% w porównaniu do nowych pieców regeneracyjnych i około 20% w porównaniu do pieców rekuperacyjnych [54].

Oceniając efektywność środowiskową spalania paliwa w atmosferze tlenu, należy uwzględnić negatywny wpływ procesu uzyskiwania tlenu. Zasadniczo jest on determinowany przez wpływ produkcji energii elektrycznej, który jest trudny do zmierzenia bez konkretnych danych dotyczących sprawności produkcji energii elektrycznej.

Jedną z istotnych kwestii jest utylizacja nadmiaru ciepła spalin. Ten efekt może mieć ogromny potencjał w poprawie wydajności topnienia szkła za pomocą oxy-spalania. Wysoka temperatura gazu zwiększa możliwości recyklingu, ale wiąże się z pewnymi trudnościami. Aby zapewnić prawidłową pracę urządzeń ochrony środowiska, konieczne jest schłodzenie napływających spalin. Skład spalin również ogranicza możliwość bezpośredniej wymiany ciepła ze względu na stężenie cząstek skroplonych i korozję. Te problemy są wzmacniane przez udział tlenu. Potencjalnie najskuteczniejszym sposobem pozbycia się nadmiaru ciepła jest wykorzystanie systemu grzewczego, który podgrzewa stłuczkę i zestaw do wytapiania szkła [55].

6.2.4. Zmniejszenie masy produkowanych butelek szklanych

Rozważanie zagadnienia zmniejszania masy butelek szklanych to analiza jednego z kluczowych kierunków, jakimi podąża współczesny przemysł szklarski. To podejście,

skupiające się na redukcji masy produkowanego opakowania, przekłada się na szereg korzyści zarówno dla producentów, jak i dla środowiska.

Należy rozpocząć od zrozumienia, że każdy gram szkła, który uda się zaoszczędzić, ma rzeczywiste i wymierne skutki. Przemysł szklarski jest bardzo energochłonny, a szkło jest materiałem wymagającym dużych ilości surowców do produkcji. Badania pokazują, że zmniejszenie masy butelki szklanej o 10% może przynieść oszczędności na poziomie 3-5% w zużyciu energii i surowców. Każde oszczędzone kilogramy szkła przekładają się na oszczędność energii potrzebnej do produkcji, a także na redukcję emisji CO₂ o około 0,67 kg [52].

Jednak zmniejszanie masy butelek nie jest prostym zadaniem. Wymaga to przeprojektowania butelki i wprowadzenia zmian w procesie produkcyjnym, aby utrzymać trwałość i bezpieczeństwo produktu. Również z punktu widzenia użytkownika końcowego, butelka musi spełniać określone kryteria – nie może być zbyt lekka, ponieważ może to wpłynąć na odczucie wartości produktu [56].

Mimo to, przemysł szklarski odnosi sukcesy w dziedzinie redukcji masy butelek szklanych. Przykładowo, jedna z wiodących europejskich firm szklarskich zdołała zredukować masę swojej standardowej butelki do piwa o pojemności 330 ml z 180 do 165 gramów, co stanowi redukcję o 8,3%. Taka oszczędność na poziomie jednej butelki przekłada się na znaczące oszczędności w skali całego procesu produkcyjnego.

Dodatkowo, zmniejszanie masy butelek szklanych jest wspierane przez regulacje prawne, zwłaszcza w Unii Europejskiej. Unia zobowiązała się do realizacji ambitnych celów w zakresie zmniejszenia emisji CO₂ i zwiększenia efektywności energetycznej, co stanowi dodatkowy bodziec dla producentów szkła do podejmowania działań w kierunku redukcji masy swoich produktów.

Jednak prawdziwy potencjał zmniejszania masy butelek szklanych leży w długoterminowych korzyściach dla środowiska. Większa efektywność w produkcji oznacza mniej zużytych surowców i mniejszą emisję szkodliwych gazów, takich jak CO₂, NO_x i SO_x. Na przykład, jeśli przemysł szklarski byłby w stanie zredukować masę wszystkich produkowanych butelek o 10%, mogłoby to przynieść roczną redukcję emisji CO₂ o miliony ton.

Wreszcie, każde działanie w kierunku zwiększenia efektywności i zmniejszenia wpływu na środowisko przekłada się na korzyści dla wszystkich z nas. Zmniejszanie masy butelek szklanych to tylko jeden z aspektów, ale ma ogromny potencjał. Przez zaoszczędzenie każdego grama szkła, oszczędzamy surowce, energię i pomagamy chronić naszą planetę [57].

7. Wybrane wdrożenia rozwiązań optymalizacyjnych mające na celu zmniejszenie zużycia energii oraz negatywnego wpływu na środowisko huty szkła

7.1. Wprowadzenie

Rozdział ten poświęcony jest analizie i prezentacji wdrożonych rozwiązań optymalizacyjnych w czasie trwania doktoratu wdrożeniowego, mających na celu zminimalizowanie zużycia energii i emisji związków szkodliwych w procesie produkcji szkła. Wybrane innowacje są rezultatem badań i analiz przeprowadzonych w ramach niniejszego doktoratu wdrożeniowego.

Dzięki połączeniu naukowego podejścia z praktycznymi doświadczeniami, ten rozdział dostarcza kompleksowego przeglądu nowoczesnych metod zwiększania wydajności w procesie produkcji szkła, podkreślając ich znaczenie zarówno dla przemysłu, jak i dla globalnych celów zrównoważonego rozwoju.

7.2. System Zarządzania Mediów Energetycznych

W trakcie trwania pierwszego roku doktoratu wdrożeniowego w hucie szkła wdrożono System do Zarządzania Mediami Energetycznymi (ang. Energy Management System, EMS), służący do rozliczania i nadzoru dystrybucji mediów energetycznych. W hucie szkła pojawiało się rosnące zapotrzebowanie na system, który mógłby efektywnie monitorować oraz śledzić zużycie mediów – takich jak energia, woda czy gaz. Taka kontrola była niezbędna nie tylko do precyzyjnego rozliczania kosztów, ale także do optymalizacji procesów produkcyjnych i poszukiwania możliwości oszczędności. Zarządzanie zużyciem mediów w tak specyficznym środowisku jak huta szkła wymagało precyzyjnego i niezawodnego systemu. Pojawienie się takiego rozwiązania dawało możliwość lepszego zrozumienia, które elementy procesu są najbardziej energochłonne i gdzie można wprowadzić usprawnienia. W kontekście realizacji wdrożenia systemu zarządzania mediami energetycznymi, doktorant, pełniący wówczas funkcję specjalisty do spraw procesów energetycznych, odegrał kluczową rolę. Jego specjalistyczne wykształcenie, doświadczenie oraz zrozumienie specyfiki branży hutniczej stanowiły nieocenione wsparcie dla całego przedsięwzięcia. Wdrożenie systemu było odpowiedzią na istniejące wymagania zarządzania mediami energetycznymi, dążenie do oszczędności oraz kontroli i usprawnienia procesów w hucie szkła.

System do Zarządzania Mediami Energetycznymi to zaawansowany zestaw narzędzi i technologii, który ma na celu kontrolę zużycia energii w różnych instalacjach i procesach. Dzięki monitorowaniu i analizie zużycia energii, system pozwala identyfikować obszary, gdzie można zredukować zużycie bez wpływu na wydajność procesów. To nie tylko prowadzi do obniżenia kosztów operacyjnych, ale również do redukcji emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń, co jest zgodne z globalnymi celami ochrony środowiska. Ponadto, EMS może wprowadzić usprawnienia w procesach produkcyjnych, zwiększając ich wydajność i jakość oraz pomagając w spełnieniu wymagań prawnych i regulacyjnych dotyczących zużycia energii i emisji zanieczyszczeń. W oparciu o swoją wiedzę, doktorant miał znaczący wkład w identyfikację potrzeb, wymagań oraz cele wdrożenia. Jego zdolność do analizy procesów energetycznych pozwoliła na przemyślane zaprojektowanie systemu zarządzania.

System do Zarządzania Mediami Energetycznymi postanowiono wdrożyć mając na uwadze takie powody jak rosnąca świadomość ekologiczna klientów i presja społeczna na zrównoważony rozwój, coraz surowsze regulacje dotyczące zużycia energii i emisji zanieczyszczeń, oraz możliwości obniżenia kosztów operacyjnych poprzez efektywniejsze zarządzanie energią.

Wdrożony system cechuje się dedykowanym rozwiązaniem mające na celu poprawę efektywności procesów produkcji, dopasowane do potrzeb huty szkła z uwzględnieniem technologii, procesu i jego sterowania, organizację pracy oraz potrzeby i wymagania koncernowe. Rozwiązanie było współtworzone z pracownikami zakładu, zarówno na szczeblu menedżerskim jak i operatorskim, dzięki czemu system jest używany i jego wdrożenie gwarantuje realizację założonych celów. Integracja w jednym systemie wielu rozwiązań obszarów procesu produkcji szkła, wspiera pracę poszczególnych działów. Dostęp do systemu zagwarantowano poprzez przeglądarki Web z dowolnego komputera bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania. Interfejs jest intuicyjny, obrazujący dane w postaci wizualizacji, wykresów, tabel, wskaźników i raportów. Ponadto System Zarządzania Mediami Energetycznymi jest skalowalny, umożliwiając rozbudowę i przeniesienie systemu na kolejne maszyny, linie i zakłady produkcyjne.

System automatycznego rozliczania i nadzoru dystrybucji mediów (EMS) realizuje następujące funkcjonalności i zadania:

- W systemie centralną rolę pełni serwer systemu EMS wskazany przez hutę szkła (maszyna wirtualna), który odpowiada za akwizycję, przetwarzanie oraz udostępnianie gromadzonych danych,

- Rozproszony system akwizycji danych oparty o sieć TCP/IP, umożliwiający łatwą rozbudowę,
- Serwis WWW jest podstawowym interfejsem, za pośrednictwem którego użytkownicy systemu mogą przeglądać historię wszystkich pomiarów, generować raporty, konfigurować parametry. Dostęp do serwisu ma każdy posiadający odpowiednie uprawnienia pracownik firmy, z dowolnego komputera podłączonego do wewnętrznej sieci zakładu za pośrednictwem dowolnej, spełniającej aktualne standardy sieciowe, przeglądarki internetowej,
- Funkcje bilansujące, automatyczne tworzenie wyciągów i rozliczeń z możliwością exportu danych do programu MS Excel,
- Funkcje monitoringu zużycia mediów tj.: energii elektrycznej, gazu, wody, dla całego zakładu produkcyjnego, a także dla poszczególnych działów (linii) produkcyjnych oraz zaplecza biurowego z możliwością wyliczenia kosztów mediów według ustalanych wskaźników,
- Funkcje strażników mocy dla energii elektrycznej oraz gazu,
- Funkcje rozliczające zużycia energii elektrycznej ze wskazanych, liczników w celu odzysku akcyzy,
- Monitoring parametrów dostarczanych oraz wytwarzanych mediów,
- Moduł monitoringu produkcji oraz rozliczania zużycia mediów na dana partię produktu,
- Funkcje pobierania danych z systemu SAP, przetwarzania ich oraz porównywania z danymi z systemu EMS,
- Alarmowanie obsługi zakładu o usterkach maszyn, przekroczeniach wartości dopuszczalnych zużycia mediów lub ich parametrów poprzez serwis WWW w postaci ekranów synoptycznych, statystyk, tabeli danych oraz raportów.

System na bieżąco monitoruje zużycie mediów w wybranych, kluczowych punktach ich przepływu bądź poboru, w celu ich bilansowania, precyzyjnego rozliczania oraz informowania o przekroczeniach i stratach. Wśród monitorowanych mediów znajdują się:

- energia elektryczna,
- gaz ziemny,
- sprężone powietrze,
- woda,
- liczba wyprodukowanych butelek.

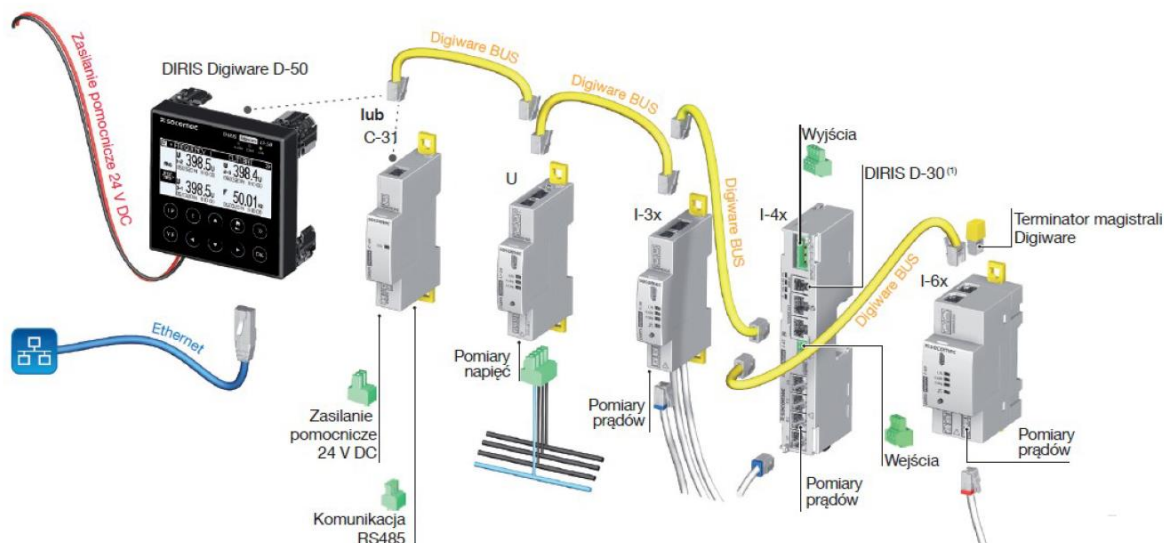
Pod nadzorem doktoranta dokonano instalacji urządzeń pomiarowych we wszystkich punktach rozptywu mediów energetycznych. Zajmował się on również koordynacją działań związanych z budową serwera, tworzeniem bazy danych i zapewnieniem komunikacji między urządzeniami, a serwerem. Współpracując z zespołem IT, przyczynił się do efektywnego zapisu danych oraz projektowania bazy.

Wdrożenie systemu umożliwia wyodrębnienie/podział zużycia energii bezpośrednio na produkcję - wanny szklarskie, linie technologiczne, obszary, w celu udokumentowania wartości zużycia energii na potrzeby kalkulacji zużycia na wytopione tony szkła lub etapy procesu technologicznego. Wdrożony system EMS posiada szerokie możliwości wyodrębniania, grupowania pomiarów oraz tworzenia zbiorczych raportów.

Pomiary energii elektrycznej zrealizowano przez układy pomiaru pół-pośredniego z wykorzystaniem przekładników prądowych, zastosowane układy pomiarowe są zgodne z klasą dokładności pomiarów 0,5S i posiadają możliwość zamontowania przy załączonym napięciu. Moduły pomiarowe i przetworniki instalowane blisko mierzonego odpływu w istniejących rozdzielniach energii elektrycznej, dzięki kompaktowym modułom napięcia, prądu i komunikacyjnych oraz niewielkim wymiarom przetworników pomiarowych. Rysunek 3 przedstawia schemat połączenia opomiarowania energii elektrycznej w szafach zasilających w hucie szkła.

Wybrano najbardziej optymalne zestawienie urządzeń pomiarowych zawierające:

- Interfejs komunikacyjny C-32,
- Moduł napięciowy U-30,
- Moduły prądowe I-30 oraz I-60,
- Przekładniki prądowe z rozpinanym rdzeniem TR oraz TF,
- Dedykowane przewody łączeniowe.



Rysunek 3 Schemat pomiaru energii elektrycznej przy użyciu liczników Diris Digiware

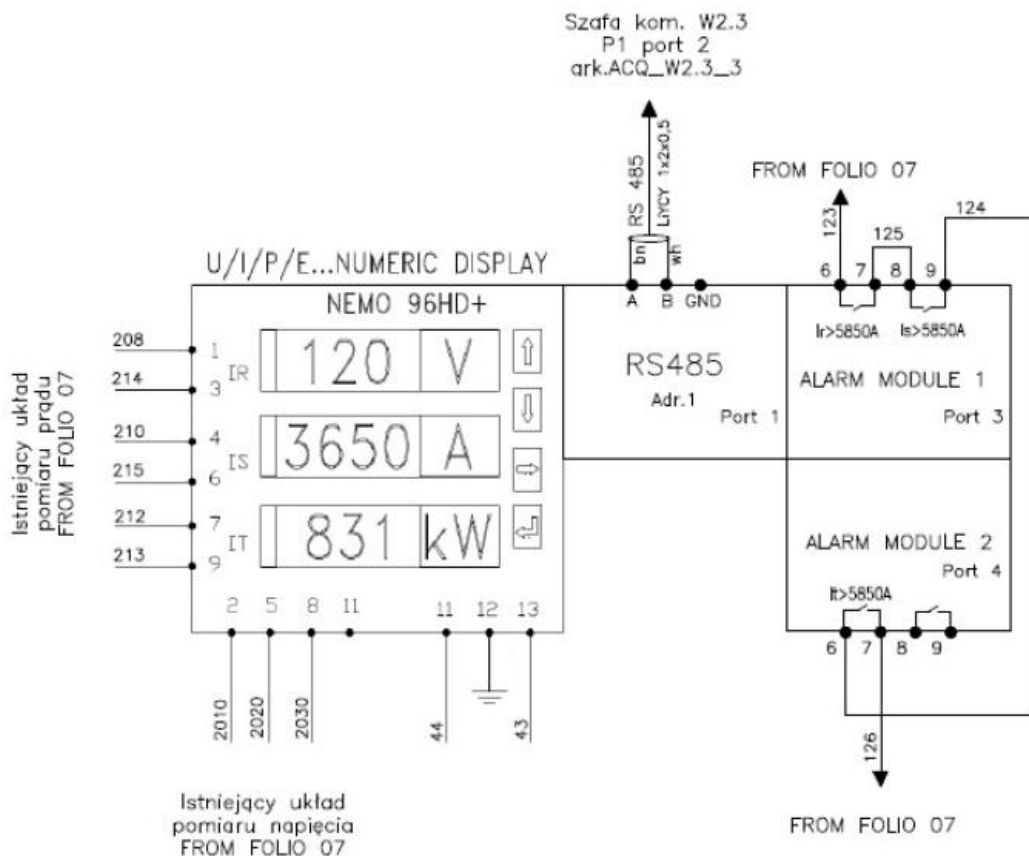
Dodatkowo do każdej rozdzielni przewidziano zabezpieczenie obwodów napięciowych oraz zasilacz 24 V DC.

- Pomiar transformatorów po stronie niskiej, do pomiaru zasilania sekcji rozdzielni NN wykorzystano mierniki PM5111 z MID (Rysunek 4).



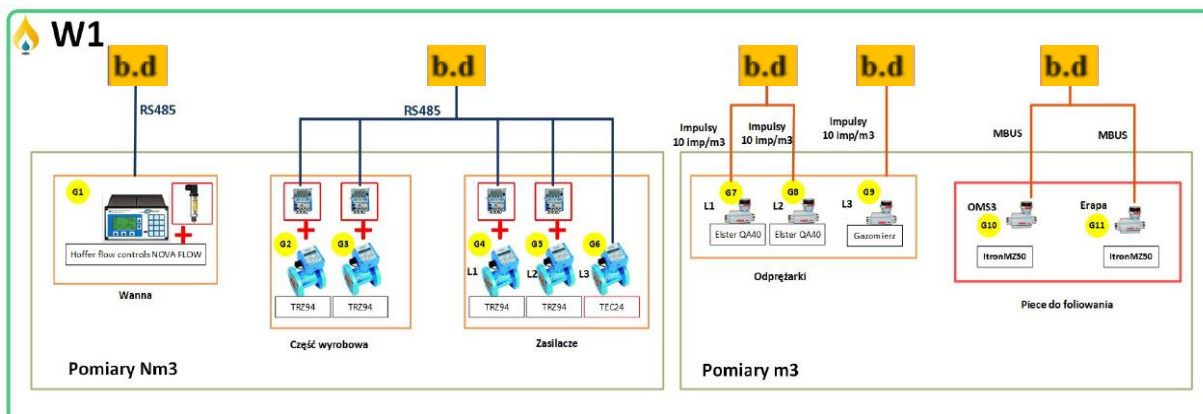
Rysunek 4 Miernik PM5111 z MID

- Układ pomiarowy transformatorów w hucie szkła zmodyfikowano poprzez demontaż analogowych mierników prądu, w ich miejsce zamontowano analizator NEMO 96HD+ wg. schematu przedstawionego na Rysunku 5.

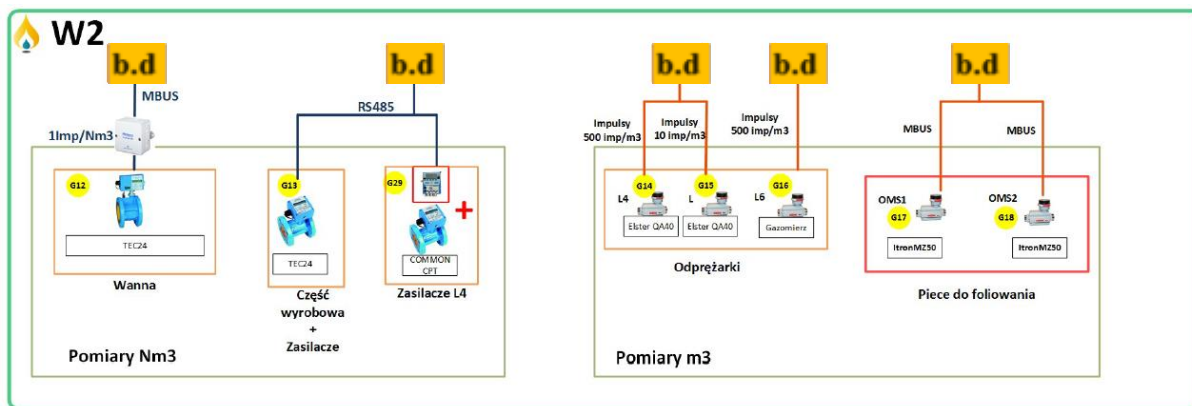


Rysunek 5 Schemat układu pomiarowego jednego z transformatorów w analizowanej hucie

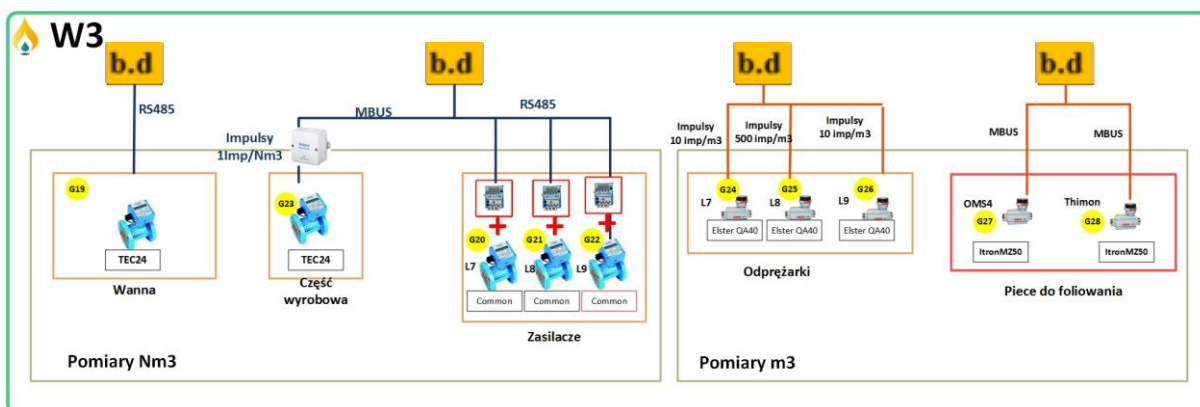
Realizację pomiaru zużycia gazu naturalnego w hucie szkła zrealizowano odczytując dane do bazy danych (b.d) z przepływomierzy za pomocą komunikacji RS485, MBus lub na zasadzie konwertowania impulsów, zgodnie z poniższym schematami dla poszczególnych hal na rysunkach: Rysunek 6 dla hali W1, Rysunek 7 dla hali W2 oraz Rysunek 8 dla hali W3.



Rysunek 6 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W1



Rysunek 7 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W2



Rysunek 8 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W3

Do pomiaru strumienia sprężonego powietrza wykorzystane zostały przepływomierze sprężonego powietrza ze zintegrowanym czujnikiem ciśnienia i temperatury. W celu kontroli pracy sprężarek dla każdej z nich zamontowano osobny układ pomiarowy (o ile parametry rurociągów umożliwiały montaż; w przypadku gdy nie było spełnionych warunków poprawnego pomiaru przepływomierz zamontowano dla kilku sprężarek). Zdecydowano się na wybór danego rodzaju przepływomierza, ponieważ:

- Metodyka pomiaru wiąże się z ingerencją w rurociąg poprzez sondę zanurzeniową montowaną przez wykonane króćce pomiarowe.
- Cyfrowa transmisja danych (protokół Modbus RTU) wartości uzyskiwanych z przepływomierzy jednocześnie,
- Wartości chwilowej przepływu w Nm^3/min lub Nm^3/h , ciśnienia w barach, temperatury w $^{\circ}\text{C}$ oraz sumatora m^3 zużytego powietrza. Przepływ sprężonego powietrza mierzony w normalnych metrach sześciennych jest zawsze związany jednocześnie z jego ciśnieniem, temperaturą i przepływem, dlatego dla uzyskania informacji wartościowej

dla użytkownika i analizy przepływu powietrza należy mierzyć przynajmniej te 3 parametry.

- Wszystkie przepływomierze mają wyjścia cyfrowe w otwartym protokole Modbus RTU,
- Większość przepływomierzy ma wymienne sondy, których nie trzeba kalibrować, tylko zamieniać na kalibrowane, co bardzo upraszcza i obniża koszty procesów kalibracji.

W EMS zostały użyte przepływomierze z rurką spiętrzającą. Rysunek 9 przedstawia przykładowy wykorzystany przepływomierz na rurociągach sprężonego powietrza w hucie szkła.



Rysunek 9 Przepływomierz z rurką spiętrzającą do pomiaru przepływu sprężonego powietrza

Do zdalnych pomiarów zużycia wody zostały wykorzystane ultradźwiękowe wodomierze firmy Kamstrup w wersji Wired M-Bus. Wodomierze dobrano dla odpowiednich średnic rurociągów i wielkości przepływu wody. Wodomierze nie posiadają elementów ruchomych co sprawia, że są odporne na zanieczyszczenia w wodzie.

Pomiar wielkości produkcji został oparty o zamontowane czujniki na końcach linii produkcyjnych. Czujniki zostały zamontowane w miejscach, gdzie gotowy produkt przeszedł wszystkie testy kontroli jakości oraz przed procesem paletyzacji. Liczenie produkcji zostało oparte o czujniki optyczne.

W systemie główną rolę pełni serwer systemu EMS wskazany przez hutę szkła, z którego pobierane i wizualizowane są wszystkie zakumulowane w bazach serwera dane w przygotowanym serwisie www do którego ma dostęp każdy posiadający odpowiednie uprawnienia pracownik huty. Mając na uwadze potrzeby użytkowników, czyli pracowników huty, doktorant brał udział w projektowaniu przyjaznego dla użytkownika interfejsu systemu. Jego zrozumienie zarówno technicznego, jak i użytkowego aspektu było kluczem do tworzenia

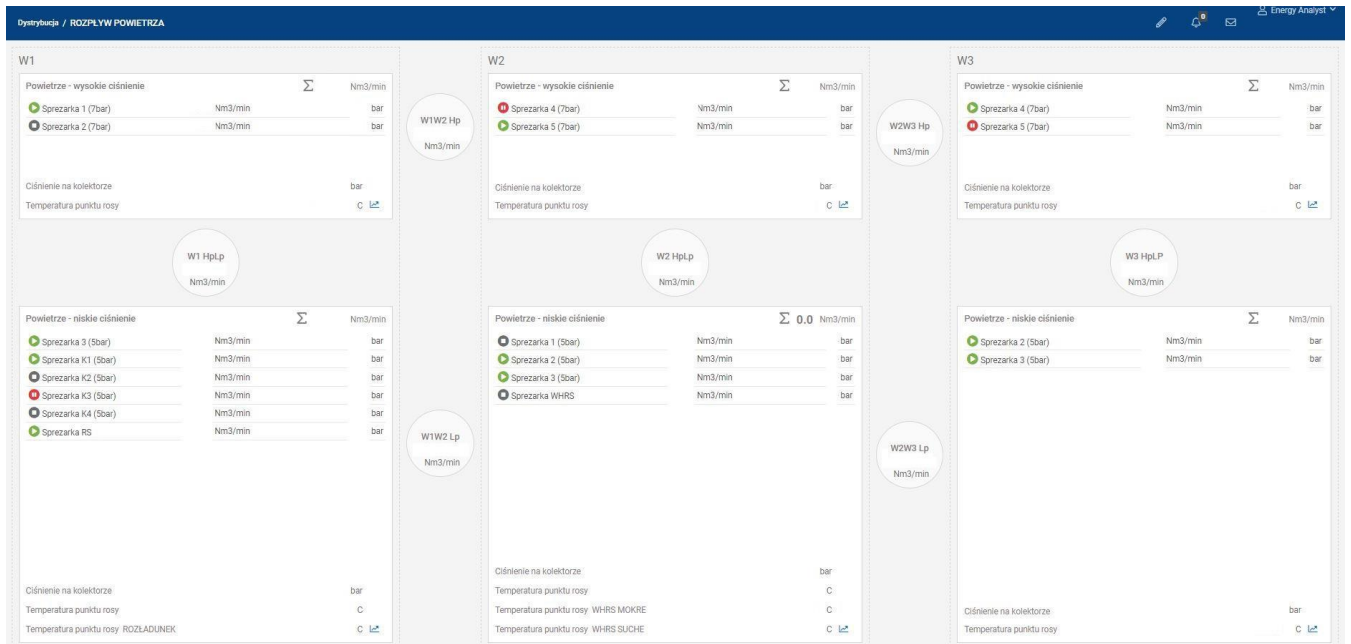
intuicyjnej i funkcjonalnej platformy. Poniżej zaprezentowano trzy z kilkunastu sekcji i zarazem funkcjonalności systemu EMS.

Pierwszą, dostępną z poziomu menu głównego sekcją jest Energy Performance Dashboard. Przedstawiony na Rysunku 10 screen ekranu głównego został podzielony na dwie główne części. Panel górny składa się z pięciu okien zawierających informacje o zużyciu, po jednym dla każdego spośród analizowanych mediów. Są to kolejno: energia elektryczna, gaz, powietrze – niskie ciśnienie, powietrze – wysokie ciśnienie, woda. Wybór konkretnego okna spowoduje uzupełnienie wykresów znajdujących się w dolnej części ekranu o dane o odpowiadającym mu medium. Na rysunku, wykres w górnej części głównego ekranu ilustruje zużycie bezwzględne zakładu, tzn. zużycie bez podziału na hale oraz proces i ilość wytopionych ton szkła, poniżej mieści się wykres przepływu – natomiast po prawej zlokalizowany jest rozkład zużycia obszarów produkcji odniesiony do poszczególnych hal zakładu.



Rysunek 10 Screen głównego ekranu systemu EMS - Energy Performance Dashboard

Drugą z sekcji jest ekran rozptyłu powietrza (rysunek 11), który obrazuje przepływ powietrza pomiędzy halami W1, W2, W3 oraz wydzielonymi w ramach nich sekcjami wysokiego i niskiego ciśnienia. Ponadto w obrębie poszczególnych hal zakładu przedstawiono znajdujące się w nich sprężarki, a także zilustrowano stan pracy wraz z aktualnym przepływem powietrza.



Rysunek 11 Screen ekranu - Rozpływ powietrza

Trzecią kartą, jaka zostanie zaprezentowana jest tzw. Strażnik Mocy (rysunek 12), nadzorujący i alarmujący o poborach mocy czynnej, tak, żeby nie doprowadzać do przekroczeń mocy umownych, za które dostawca energii elektrycznej zgodnie z umową nakłada kosztowne kary finansowe. Dla każdego ze strażników przedstawione są jedynie najistotniejsze informacje – bieżące wskazanie licznika, moc zamówiona, moc przewidywana oraz wykres strażnika mocy.



Rysunek 12 Screen ekranu - Energia - Zestawienie Strażników Mocy

W ramach funkcjonalności systemu zarządzania mediami energetycznymi (EMS) w hucie szkła, istotną rolę odgrywa możliwość wygenerowania szczegółowych raportów z danymi z bazy danych. Współczesne systemy oferują szeroką gamę opcji raportowania, dostosowanych do różnych potrzeb zarządzania zakładem.

Wiedza doktoranta na temat procesów energetycznych pozwoliła na skuteczne przemyślenie, zaprojektowanie oraz stworzenie raportów energetycznych, które byłyby adekwatne do potrzeb zarządzania i monitorowania w hucie szkła. Dodatkowo, zaplanował mechanizmy ich generowania i dystrybucji. Dzięki temu, zarówno pracownicy, jak i kierownictwo mogą szybko i wygodnie analizować zużycie energii, wykrywać nieprawidłowości oraz podejmować świadome decyzje dotyczące procesów produkcyjnych. Jedną z kluczowych funkcji jest zdolność do automatycznego, lub też przez użytkownika, tworzenia wyciągów i rozliczeń z możliwością eksportu danych do popularnych formatów, takich jak MS Excel.. Rysunek 13 prezentuje jeden z przykładowych wygenerowanych raportów przez System Zarządzania Mediami Energetycznymi.

Raport zużycia liczników	
Okres od:	01.01.2020 06:00
Okres do:	01.02.2020 06:00
Medium	Woda
Suma z Przyrost	Etykiety kolumn
Etykiety wierszy	Woda formowanie W1 [M³]
01.01.2020 06:00	2,51
02.01.2020 06:00	2,21
03.01.2020 06:00	2,18
04.01.2020 06:00	2,04
05.01.2020 06:00	2,17
06.01.2020 06:00	2,01
07.01.2020 06:00	2,12
08.01.2020 06:00	2,08
09.01.2020 06:00	2,17
10.01.2020 06:00	2,11
11.01.2020 06:00	1,98
12.01.2020 06:00	2,05
13.01.2020 06:00	2,05
14.01.2020 06:00	2,01
15.01.2020 06:00	1,72
16.01.2020 06:00	2,21
17.01.2020 06:00	2,01
18.01.2020 06:00	2,13
19.01.2020 06:00	2,42
20.01.2020 06:00	2,17
21.01.2020 06:00	2,33
22.01.2020 06:00	2,03
23.01.2020 06:00	2,23
24.01.2020 06:00	2,02
25.01.2020 06:00	2,22
26.01.2020 06:00	2,09
27.01.2020 06:00	2,26
28.01.2020 06:00	2,36
29.01.2020 06:00	2,48
30.01.2020 06:00	2,31
31.01.2020 06:00	2,14
Suma końcowa	66,82

Rysunek 13 Przykładowy raport wygenerowany przez System Zarządzania Mediami Energetycznymi - zużycie wody w procesie formowania hali W1

Nowoczesny EMS w hucie szkła oferuje zaawansowane funkcje alarmowania, które są kluczowe dla bezpieczeństwa i wydajności operacji. Obsługa zakładu może zostać natychmiast poinformowana o wszelkich usterkach maszyn, przekroczeniach wartości dopuszczalnego zużycia mediów lub innych krytycznych parametrach poprzez serwis WWW. Na ekranach

synoptycznych, statystykach, tabelach danych oraz raportach, personel może uzyskać natychmiastowy dostęp do najważniejszych informacji, umożliwiając szybką reakcję i interwencję w przypadku problemów.

Te zaawansowane funkcje raportowania i alarmowania nie tylko zwiększają wydajność i bezpieczeństwo operacji, ale także znacznie ułatwiają zarządzanie procesami energetycznymi w hucie szkła. Dzięki zintegrowanym narzędziom, które można dostosować do indywidualnych potrzeb zakładu, EMS staje się kluczowym narzędziem w realizacji celów oszczędności energii i zrównoważonego rozwoju.

Dzięki rozległemu opomiarowaniu, zaawansowanej wizualizacji, starannie utworzonej bazie danych i możliwości generowania różnorodnych raportów, system EMS w hucie szkła staje się niezwykle cennym narzędziem pomiarowym. Te cechy czynią go szczególnie przydatnym w kontekście wdrażania nowoczesnych rozwiązań, takich jak te, które były przedmiotem badań na poczet doktoratu wdrożeniowego.

Tak zaprojektowane i wdrożone opomiarowanie umożliwia precyzyjne śledzenie wszelkich kluczowych aspektów zużycia energii i parametrów operacyjnych, podczas gdy wizualizacja i raportowanie dostarczają przejrzyste i zrozumiałe prezentacje tych danych. Integracja tych funkcji tworzy spójny i wszechstronny obraz procesów energetycznych w hucie, co jest kluczowe dla analizy, badania i wdrażania innowacyjnych rozwiązań.

Wdrożenie Systemu Zarządzania Energią pozwoliło hucie szkła na zbieranie danych o zużyciu mediów na serwerach ze wszystkich obszarów produkcji. Ponadto, System umożliwia analizę porównawczą danych i ustalenie, czy wszystkie maszyny zużywają wymaganą ilość energii. EMS izoluje tryby pracy urządzeń, indywidualnie ocenia poziom zużycia i wskazuje możliwości optymalizacji. Generowanie raportów o zużyciu energii oraz dostęp do bazy danych pozwala obliczyć ilość energii potrzebnej do wyprodukowania produktu, w przypadku huty szkła - roztopionego szkła.

Po wdrożeniu systemu, doktorant pełni utrzymuje stały nadzór nad działaniem EMS. W miarę rozwoju huty i pojawienia się nowych maszyn czy rozplwów, doktorant jest kluczową osobą w zakresie rozbudowy systemu i dostosowywania go do nowych wymagań.

System EMS obecnie służy nie tylko do śledzenia zużycia mediów czy predykcji awarii, ale także jako narzędzie badawczo-pomiarowe, które wspiera doktoranta w jego badaniach naukowych.

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej doktorant wdrożeniowy opracował również metodę przewidywania zużycia energii w procesie topienia szkła w piecach za pomocą Systemu Zarządzania Energią wraz z bazą danych i udziałem specjalistów działu topienia szkła. EMS

zapewnia ciągle śledzenie zużycia mediów energetycznych w czasie rzeczywistym, podczas procesu. Łącząc tę funkcjonalność z doświadczeniem pracowników oraz danymi z procesu topienia, zebrane od początku kampanii pieca szklarskiego, takimi jak wielkość wyciągu szkła, udział stłuczki szklanej, poziomów temperatury, zużycie gazu ziemnego i energii elektrycznej, można zacząć przewidywać intensywność energetyczną procesu w zależności od panujących warunków. Opisana metoda polega na użyciu analizy regresji liniowej wielokrotnej. Analiza Regresji Liniowej Wielokrotnej została użyta, ponieważ jest niezawodną techniką do przewidywania przyszłych wartości na podstawie wcześniej zebranego zestawu danych określającego zmienne wpływające na zużycie energii w procesie topienia szkła, w dodatku regresja liniowa jest prostym narzędziem statystycznym. Za pomocą jednego z najczęściej używanych narzędzi do obliczeń, MS Excel z zainstalowanym dodatkiem Analiza Danych, pracownicy mogą wykorzystać wyznaczone przez doktoranta równanie regresji. Równanie regresji liniowej wygląda następująco:

$$y = A + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad [1]$$

Gdzie y oznacza całkowite zużycie energii, stała A jest punktem przecięcia osi y w równaniu regresji oraz x_1, x_2 oznaczają szybkość wyciągu i udział kruszywa, gdzie odpowiednio b_1, b_2 są współczynnikami dla obu wartości z wygenerowanego równania regresji. W bardziej skomplikowanych analizach i prognozach dodawane są kolejne zmienne i ich współczynniki [9].

Tabela 1 przedstawia podsumowanie wyników wygenerowanego równania regresji liniowej wielokrotnej w programie MS Excel w procesie topienia szkła w zależności od szybkości wyciągu i udziału kruszywa (x_1, x_2) używanych do obliczeń prognozy zużycia energii.

Tabela 1 Podsumowanie wyników wygenerowanego równania regresji liniowej wielokrotnej w dodatku "Analiza Danych" w programie MS Excel

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,838
R kwadrat	0,702
Dopasowany R kwadrat	0,701
Błąd standardowy	10,024
Obserwacje	836,000

ANALIZA WARIANCJI

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	2	196796	98398	979	0
Reszkowy	833	83699	101		
Razem	835	280495			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%	Dolne 95%	Górne 95%
Przecięcie	111,54	4,12	27,05	0,00	103,45	119,6	103,5	119,63
Dzienny wyciąg szkła, t/d	0,77	0,02	41,22	0,00	0,74	0,81	0,74	0,81
Śr. udział stłuczki, %	66,51	4,72	14,08	0,00	75,78	57,24	75,78	57,24

Gdzie w analizie wariancji:

df – stopnie swobody,

SS – suma kwadratów odchyień,

MS – średni kwadrat odchyień,

F – wartość statystyki testowej.

Aby zweryfikować znaczenie wdrożenia systemu zarządzania mediami energetycznymi i użycia analizy regresji liniowej wielokrotnej do przewidywania intensywności energetycznej topienia szkła w piecu szklarskim, dane historyczne z dzienników operacji topienia szkła porównano z danymi zebranymi w bazach danych systemu. Dla obu tych zestawów danych doktorant przygotował tabele z rzeczywistym zużyciem energii oraz zużyciem obliczonym na podstawie równania wielokrotnej regresji liniowej.

Tabela 2 przedstawia fragment danych o produkcji i zużyciu mediów oraz obliczone na podstawie regresji przybliżenie zużycia energii z analizowanego pieca przed wdrożeniem Systemu Zarządzania Energią. Tabela 3 przedstawia ten sam zestaw danych, ale z okresu po wdrożeniu EMS.

Tabela 2 Fragment danych procesu topienia szkła w piecu szklarskim przed wdrożeniem systemu zarządzania energią oraz zużycie energii jako wynik regresji.

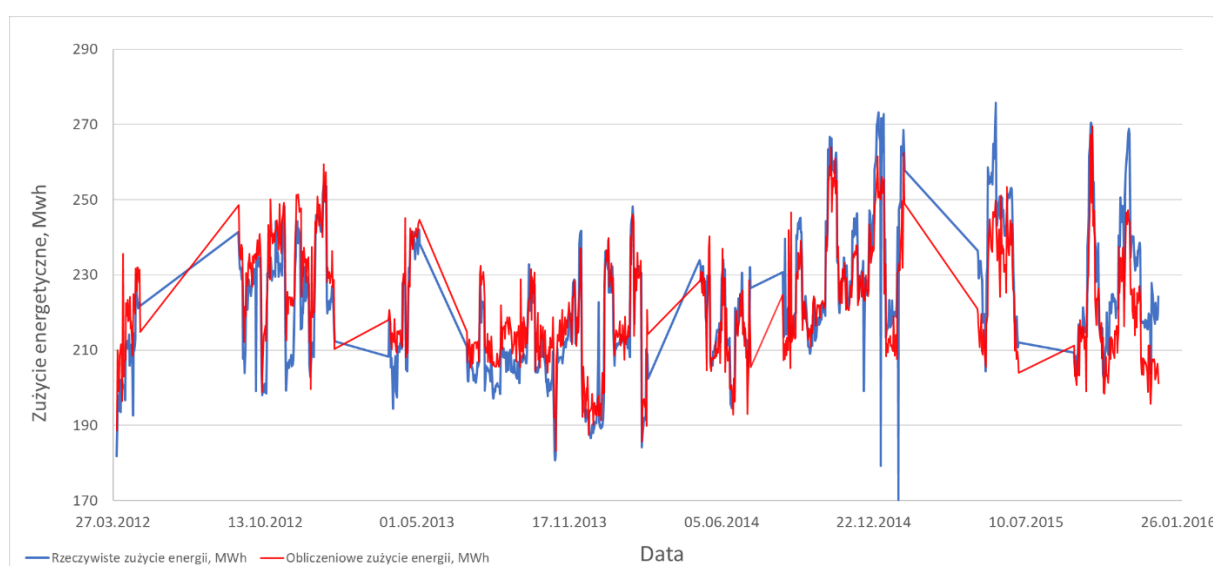
Data	Dzienny wyciąg, t/d	Udział stłuczki, %	Rzeczywiste zużycie energii, MWh	Obliczeniowe zużycie energii, MWh
01.04.2012	141,2	0,48	181,76	188,68
02.04.2012	165,4	0,44	196,92	210,04
03.04.2012	152,9	0,46	197,87	199,05
04.04.2012	160,3	0,49	193,86	202,77
05.04.2012	170,5	0,52	202,09	208,66
06.04.2012	174,3	0,52	193,54	211,59
07.04.2012	174,3	0,52	202,17	211,59
08.04.2012	155,5	0,53	201,76	196,4
09.04.2012	206,2	0,53	199,87	235,57
10.04.2012	164,9	0,54	200,70	203,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
22.12.2015	161,4	0,45	227,85	206,28
23.12.2015	158,0	0,39	224,42	207,65
24.12.2015	156,3	0,38	222,14	207,00
25.12.2015	156,2	0,37	219,51	207,59
26.12.2015	155,5	0,38	216,98	206,38
27.12.2015	153,6	0,42	222,66	202,25
28.12.2015	156,8	0,43	218,04	204,06
29.12.2015	158,5	0,43	218,15	205,37
30.12.2015	158,9	0,42	219,56	206,35
31.12.2015	152,2	0,42	224,21	201,17

Tabela 3 Fragment danych procesu topienia szkła w piecu szklarskim po wdrożeniu systemu zarządzania energią oraz zużycie energii jako wynik regresji.

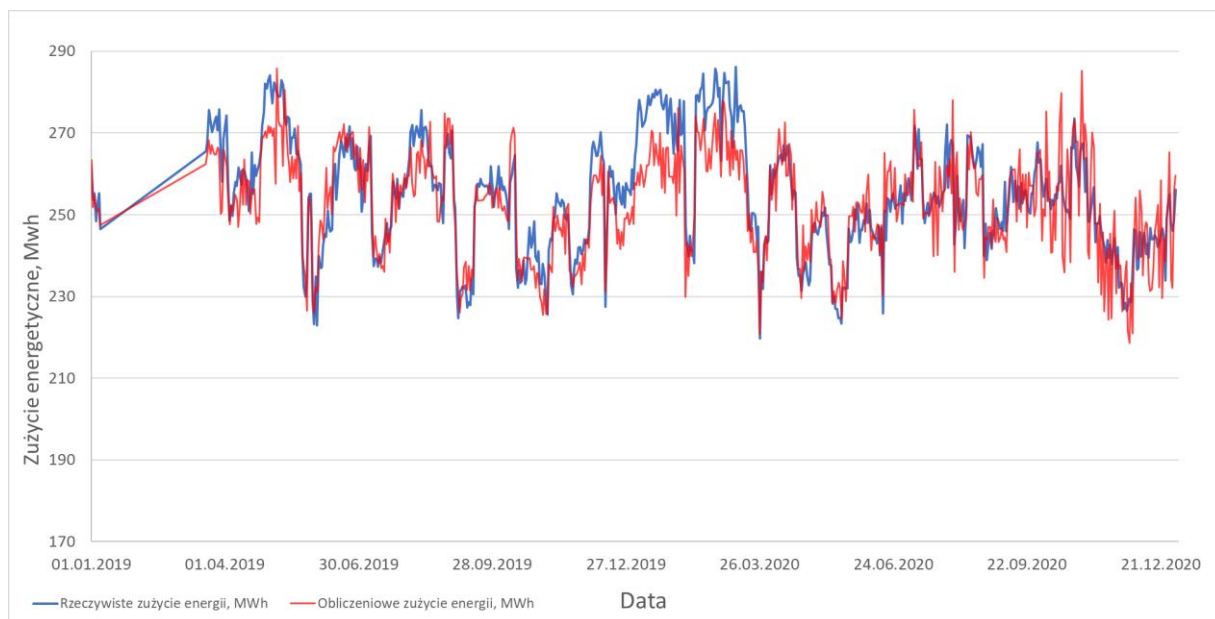
Data	Dzienny wyciąg, t/d	Udział stłuczki, %	Rzeczywiste zużycie energii, MWh	Obliczeniowe zużycie energii, MWh
01.01.2019	111,6	0,32	186,52	186,95
02.01.2019	105,7	0,30	190,2	183,08
03.01.2019	140,5	0,33	210,68	211,04
04.01.2019	197,7	0,29	260,74	262,2
05.01.2019	198,7	0,37	268,22	258,39
06.01.2019	207,0	0,43	257,82	261,98
07.01.2019	201,7	0,44	257,66	256,88
08.01.2019	199,4	0,42	251,46	256,08
09.01.2019	168,5	0,46	227,83	227,37
10.01.2019	168,5	0,46	216,97	227,37
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

22.12.2020	184,3	0,56	246,68	229,55
23.12.2020	183,0	0,56	244,69	244,26
24.12.2020	180,2	0,55	233,92	238,47
25.12.2020	184,4	0,55	249,00	247,56
26.12.2020	184,4	0,55	252,14	254,06
27.12.2020	176,0	0,55	255,00	265,26
28.12.2020	192,7	0,54	247,62	234,14
29.12.2020	184,3	0,54	246,06	232,04
30.12.2020	180,1	0,55	248,73	256,25
31.12.2020	180,1	0,55	256,15	259,63

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono porównanie rzeczywistego zużycia energii i zużycia wynikającego z obliczeń przed i po wdrożeniu EMS.



Rysunek 14 Porównanie rzeczywistego zużycia energii ze zużyciem z obliczeń przed wdrożeniem systemu zarządzania energią.



Rysunek 15 Porównanie rzeczywistego zużycia energii ze zużyciem z obliczeń po wdrożeniu systemu zarządzania energią.

Ponieważ wykresy przedstawiające rzeczywiste i wynikające z obliczeń zużycie energii w procesie wytopu szkła przed i po wdrożeniu Systemu Zarządzania Energią są niewystarczające do porównania wpływu systemu zarządzania zużyciem energii na realną konsumpcję mediów energetycznych obliczono i przedstawiono na rysunkach 16 i 17 błąd względny dla obu parametrów zużycia energii oraz obu porównywanych okresów czasu. Błąd względny to:

$$\text{Błąd względny} = \frac{\text{Rzeczywiste zużycie energii} - \text{Obliczeniowe zużycie energii}}{\text{Rzeczywiste zużycie energii}} \cdot 100\% \quad [2]$$

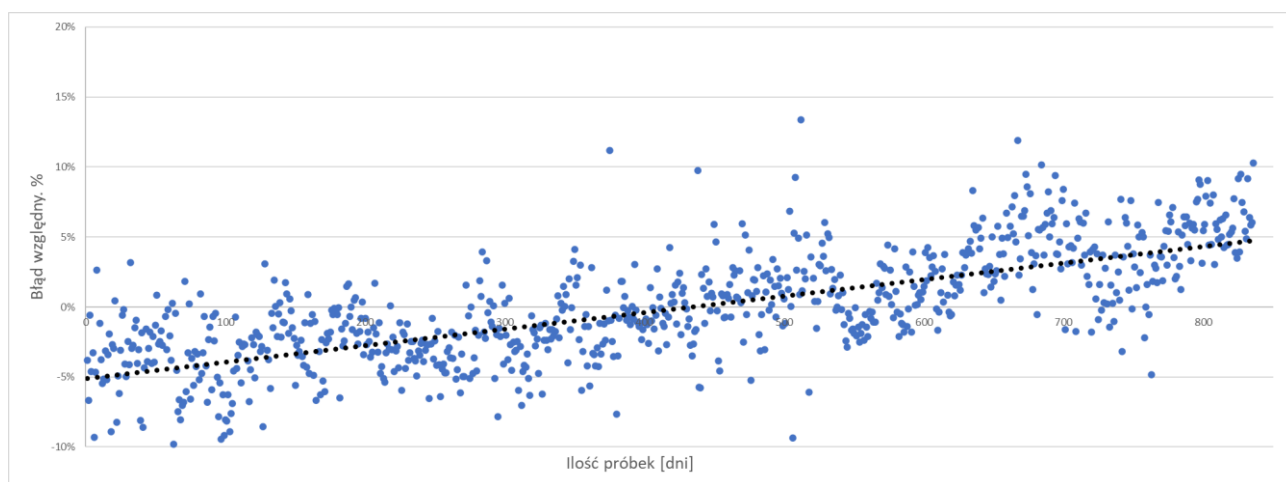
Wyniki obliczeń błędu względnego przedstawiono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4 Wyniki obliczeń błędu względnego i zużycia energii na tone wytopionego szkła przed wdrożeniem EMS

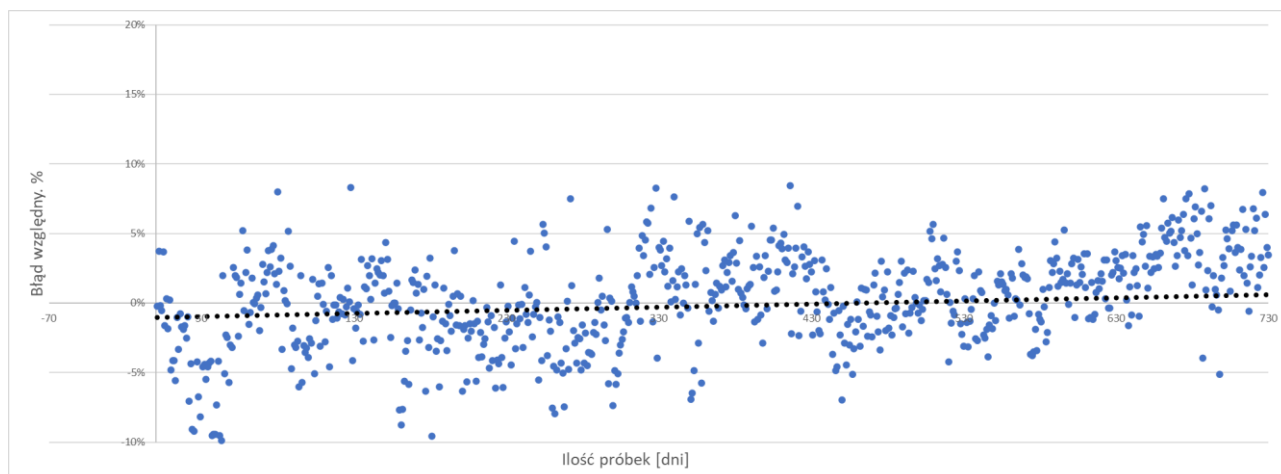
Date	Zużycie energii na tone szkła, MWh/t	Błąd względny, %
01.04.2012	1,29	-3,81
02.04.2012	1,19	-6,66
03.04.2012	1,29	-0,59
04.04.2012	1,21	-4,60
05.04.2012	1,19	-3,25
06.04.2012	1,11	-9,32
07.04.2012	1,16	-4,66
08.04.2012	1,30	2,65
09.04.2012	0,97	-17,86
10.04.2012	1,22	-1,15
-	-	-
-	-	-
-	-	-
22.12.2015	1,41	9,47
23.12.2015	1,42	7,47
24.12.2015	1,42	6,82
25.12.2015	1,41	5,43
26.12.2015	1,40	4,88
27.12.2015	1,45	9,17
28.12.2015	1,39	6,41
29.12.2015	1,38	5,86
30.12.2015	1,38	6,02
31.12.2015	1,47	10,27

Tabela 5 Wyniki obliczeń błędu względnego i zużycia energii na tone wytopionego szkła po wdrożeniu EMS

Date	Zużycie energii na tone szkła, MWh/t	Błąd względny, %
01.01.2019	1,67	-0,23
02.01.2019	1,80	3,74
03.01.2019	1,50	-0,17
04.01.2019	1,32	-0,56
05.01.2019	1,35	3,66
06.01.2019	1,25	-1,61
07.01.2019	1,28	0,30
08.01.2019	1,26	-1,83
09.01.2019	1,35	0,20
10.01.2019	1,29	-4,80
-	-	-
-	-	-
-	-	-
22.12.2020	1,34	6,94
23.12.2020	1,34	0,18
24.12.2020	1,30	-1,95
25.12.2020	1,35	0,58
26.12.2020	1,37	-0,76
27.12.2020	1,45	-4,02
28.12.2020	1,28	5,44
29.12.2020	1,34	5,70
30.12.2020	1,38	-3,03
31.12.2020	1,42	-1,36



Rysunek 16 Wykres błędów względnych kontroli zużycia energii przed wdrożeniem EMS



Rysunek 17 Wykres błędów względnego kontrolowania zużycia energii po wdrożeniu EMS

Tabela 6 przedstawia końcowe wyniki wpływu wdrożenia Systemu Zarządzania Energią jako średnie wartości błędów względnego oraz średnie zużycie energii na tonę szkła przed i po tym przedsięwzięciu.

Tabela 6 Wyniki wdrożenia systemu zarządzania energią jako średnia błędów względnego oraz średnia zużycia energii na tonę szkła

	<i>Średni błąd względny, %</i>	<i>Średnie zużycie energii na tonę wytopionego szkła, MWh/t</i>
Przed wdrożeniem EMS	0,21	1,32
Po wdrożeniu EMS	0,12	1,22

To co zostało udowodnione w powyższym badaniu, czyli wpływ EMS na zużycie energetyczne oraz możliwość jego predykcji w procesie, porównując rzeczywiste zużycie energii i to wynikające z obliczeń przed i po wdrożeniu Systemu Zarządzania Energią, pokazanym na rysunkach 14 i 15 oraz zostało dalej zweryfikowane poprzez obliczenie względnego błędów obu zestawów danych. Można zaobserwować, że linia trendu dla względnego błędów dla zebranych danych po wdrożeniu systemu na rysunku 17 jest bardziej płaska, co wskazuje na mniejsze odchylenia między rzeczywistym zużyciem energii, a zużyciem wynikającym z modelu regresji liniowej. Potwierdzają to również wyniki w Tabelach 4 i 5 porównującej średni błąd względny przed i po wdrożeniu EMS, gdzie średni błąd względny jest prawie o połowę niższy dla warunków po wdrożeniu. Te same Tabele przedstawiają także wyniki średniego zużycia energii na tonę szkła, które wskazują na poprawę efektywności topienia szkła średnio o około 8% po wdrożeniu EMS.

W przedstawionym zastosowaniu analizy wielokrotnej regresji liniowej przygotowanej przez doktoranta, za każdym razem, gdy zmieniają się parametry procesu, personel działu technologicznego, wprowadza dane do modelu, który porównuje bieżące zużycie

z prognozowanym. Pozwala to na natychmiastowe podjęcie decyzji i możliwość zmian w sposobie prowadzenia procesu topienia szkła w piecu [58].

Takie analizy i obliczenia, ilustrują, w jaki sposób systemy zarządzania energią i kontrola procesu topienia szkła mogą skutecznie przyczynić się do zwiększenia efektywności energetycznej, bezpieczeństwa i niezawodności działania zakładu, a także, docelowo, do jego wpływu na wyniki finansowe firmy.

Tak wszechstronne narzędzie, jak EMS, może służyć nie tylko jako wsparcie dla bieżących operacji zakładu, ale również jako platforma badawcza dla naukowców i inżynierów pracujących nad nowoczesnymi metodami zarządzania energią. W tym kontekście, EMS może być kluczowym elementem prac nad doktoratem wdrożeniowym, dostarczając niezbędnych danych, narzędzi analizy i wglądu w rzeczywiste procesy w hucie szkła, co przyczynia się do pomyślnego wdrożenia i ewaluacji innowacyjnych rozwiązań.

W dalszych analizach kolejnych rozwiązań udoskonalających wykorzystywane są dane historyczne i te zgromadzone w bazach systemu EMS w trakcie realizacji podjętych przedsięwzięć, redukujących zużycie mediów, porównanie wartości poziomów wykorzystywanych mediów w najprostszy i najszybszy sposób pozwalają zbadać oraz udowodnić sensowność wdrożenia.

7.3. Modernizacja oświetlenia w hucie szkła

Kolejnym z obszarów, w którym można osiągnąć znaczące oszczędności, była wymiana oświetlenia. W procesie produkcji szkła, gdzie wymagania dotyczące oświetlenia są wyspecyfikowane dla maszyn kontrolnych oraz pracowników linii produkcyjnych, właściwa modernizacja systemu oświetleniowego może przynieść nie tylko korzyści ekonomiczne, ale także poprawić warunki pracy.

Wdrożenie to skupia się na projektowanej i zrealizowanej modernizacji oświetlenia w jednej ze starszych budynków hal huty szkła, gdzie dokonano wymiany opraw starego typu na nowoczesne oprawy LEDowe. Ta prosta, lecz skuteczna zmiana, zapoczątkowała proces, który generuje duże oszczędności energii. Co więcej, charakteryzuje się ona szybkim czasem zwrotu inwestycji, co czyni tę interwencję nie tylko ekologiczną, ale również ekonomicznie opłacalną.

Rola doktoranta w modernizacji oświetlenia w hucie szkła jako główny energetyk i kierownik projektu polegała na zainicjowaniu działań od inwentaryzacji istniejącego oświetlenia, po nawiązanie kontaktu z firmami oświetleniowymi. Po dokładnej weryfikacji ofert, negocjacji kosztów i warunków kontraktów, nadzorował proces wymiany starych

opraw na nowoczesne rozwiązania LEDowe. Na zakończenie projektu dokładnie przeanalizował osiągnięte oszczędności, potwierdzając skuteczność przeprowadzonej modernizacji.

Dokładna analiza wymiany, wraz z obliczeniem osiągniętej oszczędności energii, została zebrana w tabeli 7. Analiza ta ma na celu nie tylko zilustrowanie efektywności samej modernizacji, ale również służy jako studium przypadku, które może posłużyć jako wzór dla podobnych inicjatyw w innych częściach zakładu lub w innych hutach szkła. Prosty działaniem inwestycyjnym można osiągnąć pokaźne oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, co wiąże się również, z szybkim czasem zwrotu inwestycji oraz oszczędnościami finansowymi.

Tabela 7 Osiągnięte oszczędności energii w wyniku modernizacji oświetlenia jednej z hali huty

Parametry	Przed modernizacją	Po modernizacji
Oprawy przemysłowe oświetlenia głównego		
Moc oprawy, W	400	200
Liczba sztuk, szt.	108	108
Sumaryczne zapotrzebowanie mocy, kW	43,2	21,6
Liczba godzin pracy, h	8760	8760
Roczne zużycie energii elektrycznej, kWh	378 432	189 216
Roczne oszczędności energii elektrycznej, MWh	189,216	
Oprawy hermetyczne nad ścieżkami i stanowiskami pracy		
Moc oprawy, W	106	36
Liczba sztuk, szt.	100	100
Sumaryczne zapotrzebowanie mocy, kW	10,6	3,6
Liczba godzin pracy, h	8760	8760
Roczne zużycie energii elektrycznej, kWh	92 856	31 536
Roczne oszczędności energii elektrycznej, MWh	61,32	

Modernizacja oświetlenia w hucie szkła to nie tylko kwestia techniczna i finansowa; to także krok naprzód w dążeniu do bardziej zrównoważonego i odpowiedzialnego podejścia do produkcji. W tym kontekście, rozwiązanie to jest jednym z działań optymalizacyjnych proces produkcji szkła w hucie szkła. Na podstawie tabeli 7 wywnioskować można pozytywne wykonanie przedsięwzięcia mającego na celu redukcję zużycia mediów energetycznych, ponieważ dzięki wymianie oświetlenia starego typu na oświetlenie LED, na jednej z hal produkcyjnych, w ciągu jednego roku osiągnięto oszczędności energii elektrycznej rzędu 250,536 MWh.

7.4. Wymiana układów gwiazda-trójkąt na przemienniki częstotliwości w szafach silników wentylatorów pieca szklarskiego

Wymiana tradycyjnych układów gwiazda-trójkąt na falowniki (przemienniki częstotliwości) może prowadzić do znaczących oszczędności energii, zwłaszcza w zastosowaniach przemysłowych takich jak huta szkła.

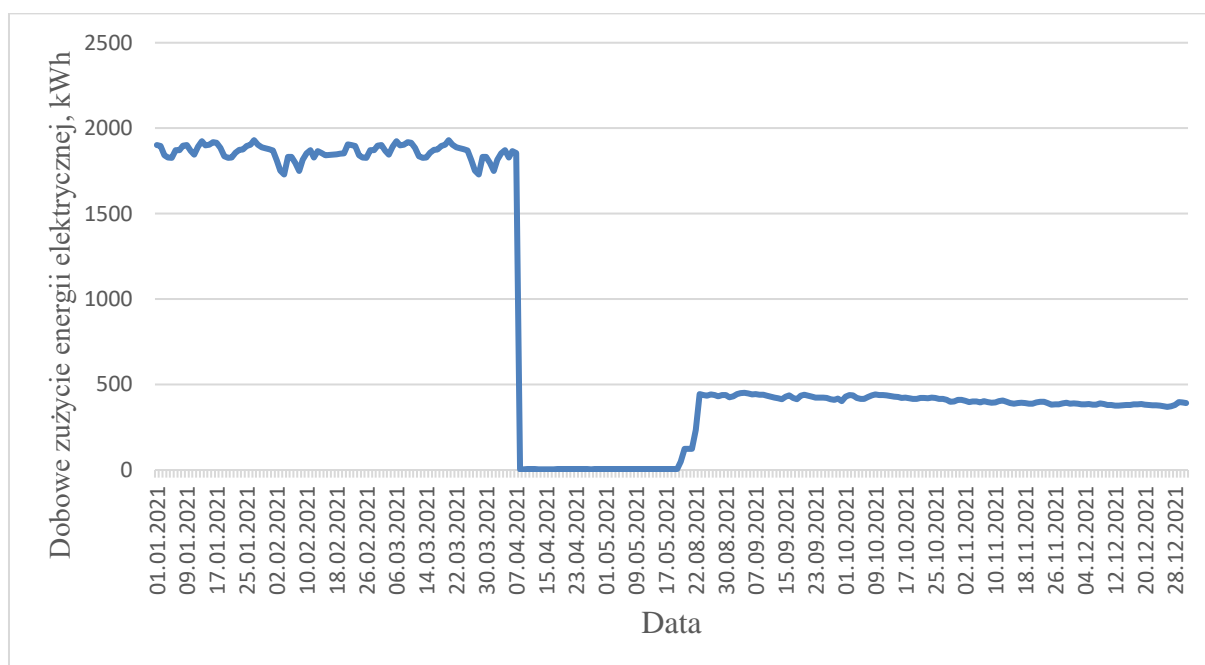
Układy gwiazda-trójkąt są często stosowane do sterowania silnikami elektrycznymi, zwłaszcza podczas startu. Choć są one skuteczne, mogą nie być tak wydajne energetycznie jak falowniki. Przemienniki, sterując częstotliwością zasilania silnika, pozwalają na precyzyjną kontrolę prędkości i momentu obrotowego, dopasowując je do bieżących wymagań procesu. W porównaniu z układami gwiazda-trójkąt, gdzie prędkość silnika jest zwykle stała, falowniki mogą dostosowywać prędkość w sposób dynamiczny, co prowadzi do większej efektywności energetycznej.

Korzyści z zastosowania falowników obejmują większą oszczędność energii, niż oszczędności wynikające z zastosowania rozruchu opartego na podłączeniu gwiazda-trójkąt, dzięki temu, że falowniki zużywają tylko tyle energii, ile jest wymagane w trakcie pracy silnika, co może prowadzić do znaczących oszczędności. Kolejną korzyścią jest dłuższa żywotność maszyn, ponieważ płynne rozruchy i zatrzymania redukują zużycie, wydłużając tym samym żywotność. Lepsza kontrola procesu jest również istotną korzyścią, ponieważ precyzyjne sterowanie prędkością pozwala na wyższą jakość produkcji. Dodatkowo ważną cechą jest szybki czas zwrotu inwestycji w przemienniki częstotliwości.

W kontekście huty szkła, gdzie procesy są energochłonne, i gdzie precyzyjna kontrola jest kluczowa, zastosowanie falowników może być strategicznym krokiem w kierunku bardziej efektywnej i zrównoważonej produkcji. Dlatego w analizowanej hucie zdecydowano się na

wymianę układu zasilania silników czterech wentylatorów jednego z pieców szklarskich z połączenia gwiazda-trójkąt na zasilanie poprzez przemiennik częstotliwości.

Po wymianie sterowania silnikami wentylatorów z układów gwiazda-trójkąt na falowniki, udało się osiągnąć oszczędności energii elektrycznej rzędu 70%. Rysunek 18 prezentuje wykres dla jednego z wymienionych systemów sterowania silnikami wentylatorów wygenerowany z danych zebranych przez System Zarządzania Mediami Energetycznymi. Ta znacząca redukcja zużycia energii nie tylko przyczyniła się do obniżenia kosztów eksploatacyjnych, ale również stanowiła istotny krok w kierunku bardziej efektywnego i zrównoważonego zarządzania energią. Taka zmiana w systemie sterowania podkreśla potencjał innowacyjnych technologii w dążeniu do zwiększenia efektywności energetycznej w różnych zastosowaniach przemysłowych.



Rysunek 18 Wykres dla jednego z wymienionych systemów sterowania silnikami wentylatorów z wykorzystaniem falownika

Wykres na rysunku 18 prezentuje dobowe zużycie energii elektrycznej jednego wentylatora przed i po wymianie układu sterowania zasilania. Jeden wentylator w trakcie normalnej pracy był w stanie pobierać ponad 1800 kWh energii elektrycznej dziennie, po wykonanej modernizacji, ilość pobieranej energii wynosi około 400 kWh na dobę, co stanowi 1400 kWh oszczędności. Przy przedsięwzięciu dotyczącym czterech wentylatorów oznacza to zmniejszenie zużycia energii elektrycznej na poziomie około 5,6 MWh dziennie, co rocznie pozwala osiągnąć prawie 2 050 MWh redukcji.

Doktorant, mając dostęp do precyzyjnych danych pomiarowych zużycia energii w hucie, zidentyfikował potencjał osiągnięcia oszczędności w sterowaniu silnikami wentylatorów pieca szklarskiego. Zajmując się analizą tych danych, doktorant mógł dokładnie ocenić, jak silniki wentylatorów pieca szklarskiego wpływały na całkowite zużycie energii w zakładzie. Jego kalkulacje przyczyniły się do podjęcia decyzji wymiany układów gwiazda-trójkąt na przemienniki częstotliwości, podkreślając jej opłacalność i przewidywane korzyści. Jego ekspertyza była kluczowa zarówno w wyborze odpowiednich przemienników, jak i w monitorowaniu efektywności po ich wdrożeniu.

7.5. Zwiększenie udziału topionej stłuczki szklanej w procesie topienia masy szklanej

Kolejnym rozwiązaniem mającym na celu zmniejszenie zużycia mediów energetycznych i emisji do środowiska jest zwiększenie udziału stłuczki szklanej w zestawie przetapianym w wannach szklanych w procesie topienia masy szklanej.

Stłuczka szklana jest klasyfikowana jako surowiec do produkcji szkła i może mieć znaczący udział w zestawie do produkcji szkła. Udział stłuczki w zestawie zależy od koloru wytwarzanego szkła, konstrukcji pieca szklarskiego oraz jakości i dostępności kruszywa. Użycie szkła kruszonego oszczędza surowce i środowisko, jednocześnie zmniejszając energię potrzebną do stopienia mieszanki.

Im wyższa czystość stłuczki (ten sam kolor), tym większego udziału można użyć w wytopie masy szklanej. Udział stłuczki w zestawie szklarskim może wynosić nawet 90%, zwykle wartości dla szkła zielonego to ponad 80%, dla bursztynu - amber (szkło brązowe) około 60%, natomiast dla szkła bezbarwnego (flintu) około 45–50%. W przypadku szkła bezbarwnego, stłuczka jest używana w mniejszym stopniu niż jak to się ma przy wytopie szkła kolorowych, ponieważ zawartość żelaza i chrom w szkłe flint powinna być bardzo niska, ogranicza się zatem udział związków wpływających na kolor szkła [59].

W ramach podejmowanych działań opisanych w rozprawie doktorskiej jako działanie w celu poprawy procesu produkcji szkła, wykorzystanie szkła kruszonego prowadzi do znaczących korzyści w kilku kluczowych obszarach. Po pierwsze, pozwala na redukcję zużycia surowców takich jak piasek krzemionkowy, soda i dolomit, co przekłada się na oszczędności i mniejszy wpływ na środowisko. Po drugie, wprowadzenie stłuczki do procesu topienia skutkuje redukcją emisji CO₂, która powstaje podczas tego etapu, co jest zgodne z globalnymi dążeniami do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Po trzecie, wykorzystanie szkła

kruszonego może przedłużyć żywotność pieca szklarskiego nawet o 30%, ze względu na niższą temperaturę topienia w porównaniu z tradycyjnymi surowcami. Po czwarte, zmniejsza to także zużycie źródeł energii, takich jak gaz ziemny czy też ropa (w zależności od wykorzystywanego paliwa w danej hucie szkła), co oznacza również mniejszą emisję NO_x, SO₂ i pyłów do środowiska, przyczyniając się do ochrony jakości powietrza. Na koniec warto podkreślić, że szkło kruszone cechuje możliwość 100% recyklingu, co oznacza, że z 100 kg tego surowca można wyprodukować równą ilość pojemników szklanych, dodatkowo podkreślając zalety ekonomiczne i ekologiczne tego podejścia [60].

W trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego od 2019 roku w hucie szkła podjęto działania sukcesywnego zwiększania udziału stłuczki szklanej w zestawie do przetopu masy szklanej na każdej z trzech wanien szklarskich. Trend ten był w dużym stopniu napędzany korzystnymi uwarunkowaniami rynkowymi, które sprzyjały dostępności jakościowej stłuczki szklanej. Ponadto, rosnąca świadomość korzyści, jakie niesie za sobą zwiększenie udziału stłuczki w procesie produkcyjnym, dodatkowo przyczyniła się do tej pozytywnej zmiany. Większy udział stłuczki w zestawie do przetopu nie tylko zmniejsza koszty produkcji, ale również przyczynia się do ochrony środowiska poprzez redukcję zużycia surowców naturalnych oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych podczas procesu topienia. W efekcie, zaangażowanie huty w zwiększanie wykorzystania stłuczki przekłada się na korzyści ekonomiczne i ekologiczne, co stanowi istotny krok w kierunku bardziej zrównoważonej produkcji szkła. Tabela 8 zestawia udział stłuczki szklanej od 2019 do końca 2021 roku, w latach w których huta szkła miała największą stabilizację rynkową i na każdym piecu wytapiany był inny kolor szkła, był to okres z najmniejszą ilością zmian koloru wytapianego szkła na wannach szklarskich. Dla większej dokładności analizowanej modernizacji wyselekcjonowano średnie wielkości wytopów dla poszczególnych pieców szklarskich.

Tabela 8 Wpływ udziału stłuczki na średnie zużycie paliwa energetycznego dla poszczególnych wanien szklarskich

Wanna szklarska	Parametry	2019	2021	Różnica, %
Wanna W1 (szkło bezbarwne – flint)	Udział stłuczki szklanej, %	36	58	22
	Średnie zużycie paliwa na dobę, MWh	277,8	263,6	5,11

Wanna szklarska	Parametry	2019	2021	Różnica, %
Wanna W2 (szkło brązowe – amber)	Udział stłuczki szklanej, %	38	70	32
	Średnie zużycie paliwa na dobę, MWh	376,13	339,36	9,78
Wanna W3 (szkło zielone – green)	Udział stłuczki szklanej, %	49	82,3	33,3
	Średnie zużycie paliwa na dobę, MWh	341,19	305,78	10,38

Powyższe dane prezentujące podjęte działania optymalizacji wytopu szkła poprzez zwiększenie udziału stłuczki i osiągnięte redukcje zużycia paliwa na dobę, pokrywają się również z informacjami opisanymi w literaturze branżowej, m.in. mówiące o tym, że według badań, zwiększenie udziału stłuczki o 10% (na podstawie wagi) redukuje netto zużycie energii o 2 - 3,5%. Takie zmniejszenie zużycia skutkuje również zmniejszeniem emisji szkodliwych substancji do środowiska, co jest przeanalizowane i opisane w dalszej części pracy.

Kolejne tabele 9, 10 i 11 prezentują wyniki badań procentowego składu zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem procentowego udziału stłuczki dla poszczególnych kolorów szkła tj. flintu, amber i green. W omawianej hucie szkła, w której prowadzony był proces topienia szkła na trzech piecach szklarskich, w rozprawie doktorskiej doktorant zdecydował się uprościć przepisy na poszczególne kolory szkła. Zamiast dokładnych składników, przedstawiano je jako kombinację piasku, związków sody i wapnia, specyficzną stłuczkę dla określonego koloru oraz inne składniki. Takie podejście miało na celu zachowanie poufności informacji.

Tabela 9 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła bezbarwnego - flint

Składnik zestawu	Udział procentowy składników zestawu szklarskiego – szkło flint								
Piasek	44%	41%	38%	35%	32%	29%	26%	23%	20%
Soda + Wapień	26%	24%	22%	21%	19%	17%	16%	14%	12%
Pozostałe składniki	5%	5%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%
Stłuczka flint	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%

Tabela 10 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła brązowego - amber

Składnik zestawu	Udział procentowy składników zestawu szklarskiego – szkło amber										
	Piasek	46%	42%	39%	36%	33%	30%	27%	25%	21%	18%
Soda + Wapień	19%	18%	17%	15%	14%	13%	11%	10%	9%	8%	6%
Pozostałe składniki	10%	10%	9%	9%	8%	7%	7%	5%	5%	4%	4%
Stłuczka amber	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%

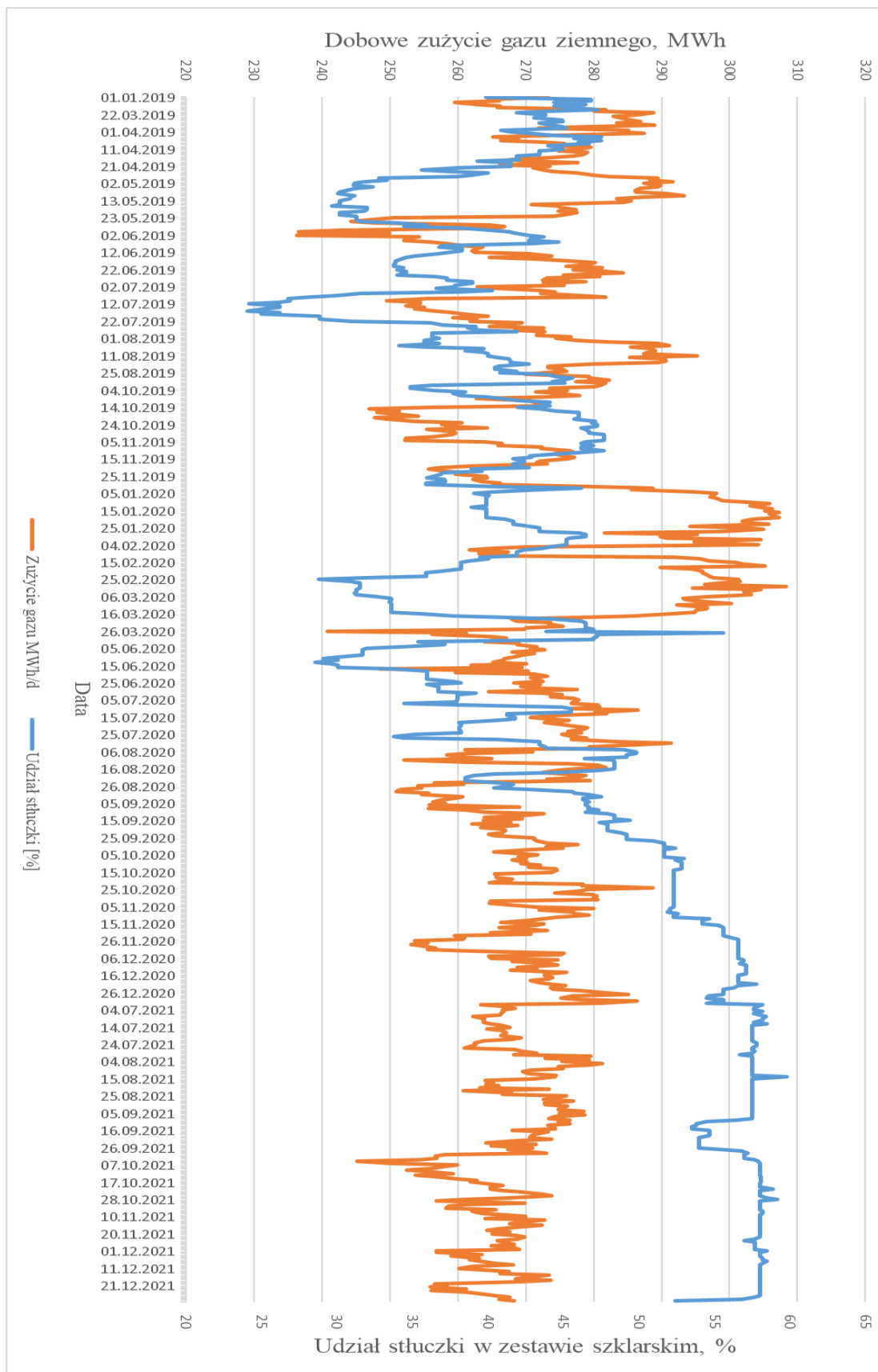
Tabela 11 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła zielonego - green

Składnik zestawu	Udział procentowy składników zestawu szklarskiego – szkło green												
	Piasek	43%	40%	38%	34%	31%	29%	26%	23%	20%	18%	14%	11%
Soda + Wapień	26%	24%	22%	21%	19%	17%	16%	14%	12%	10%	9%	7%	5%
Pozostałe składniki	6%	6%	5%	5%	5%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	2%	1%
Stłuczka green	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%

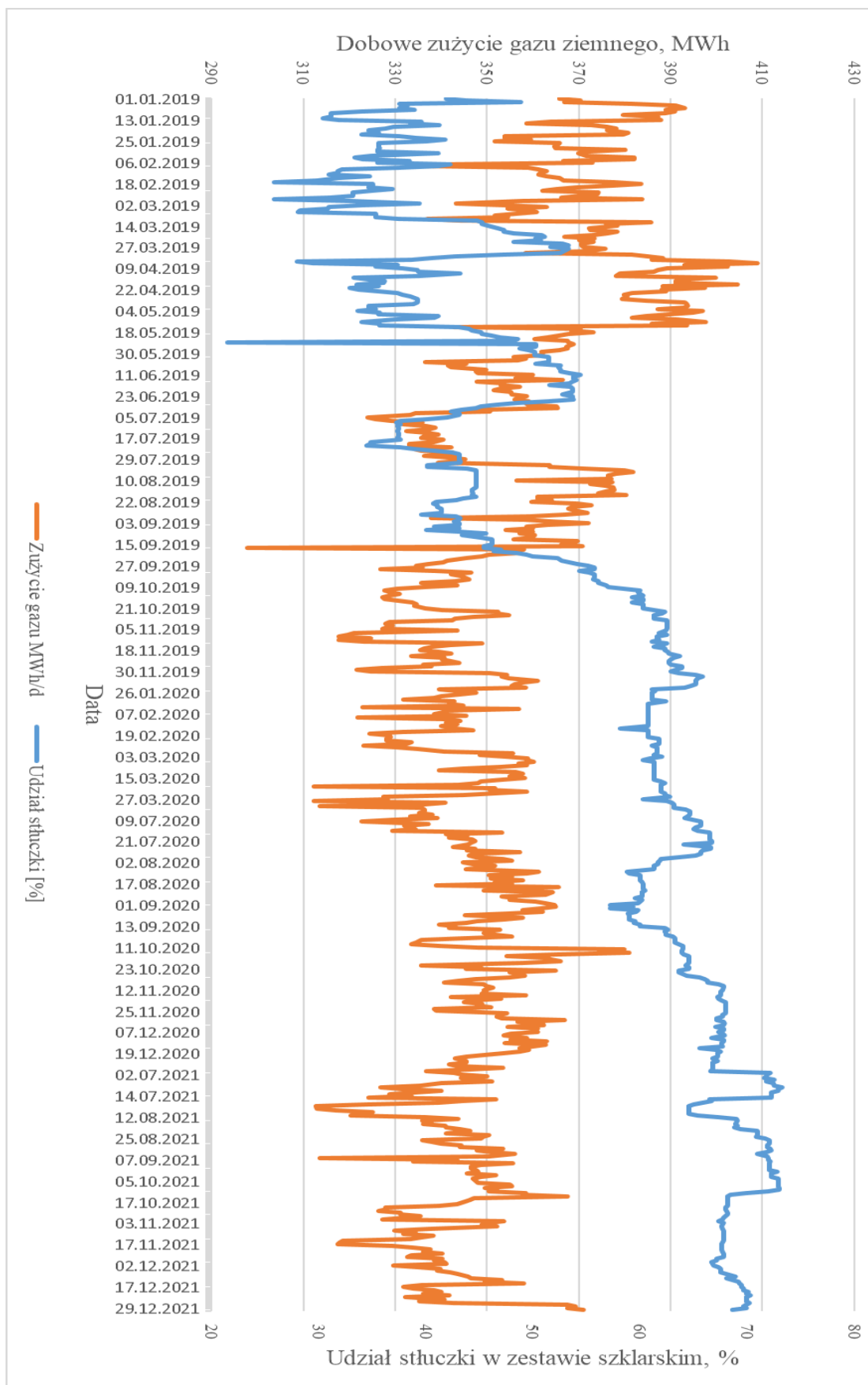
Tabele 9, 10 i 11 prezentują wyniki badania zastępowania tradycyjnych surowców stłuczka szklaną dla trzech różnych kolorów wytapianego szkła, które potwierdzają możliwość zamiany 1 kg tradycyjnego zestawu szklarskiego (piasek, soda, wapień i pozostałe składniki) jednym kilogramem stłuczki szklanej, do momentu możliwej utraty wyspecyfikowanej przez klienta jakości szkła. Oprócz redukcji zużycia energii przy wytopie masy szklanej ze zwiększonym udziałem stłuczki, huty szkła osiągnąć mogą oszczędności wynikające z mniejszego wykorzystania droższych tradycyjnych surowców do tworzenia szkła, ale również obniżenie wolumenu emisji szkodliwych związków chemicznych, takich jak dwutlenek węgla, ponieważ stłuczka szklana posiada niższe współczynniki emisji, w porównaniu do tradycyjnych surowców. Obliczenia i wyniki zostaną zaprezentowane w analizie ekologicznej i ekonomicznej w dalszej części rozprawy doktorskiej.

Opracowano również wykresy prezentujące zwiększanie udziału stłuczki szklanej w zestawie oraz wpływ tych działań na zużycie gazu ziemnego w MWh w latach 2019 do 2021. Wykres na rysunku 19 dotyczy wanny W1, wytapiającej głównie szkło bezbarwne (flint)

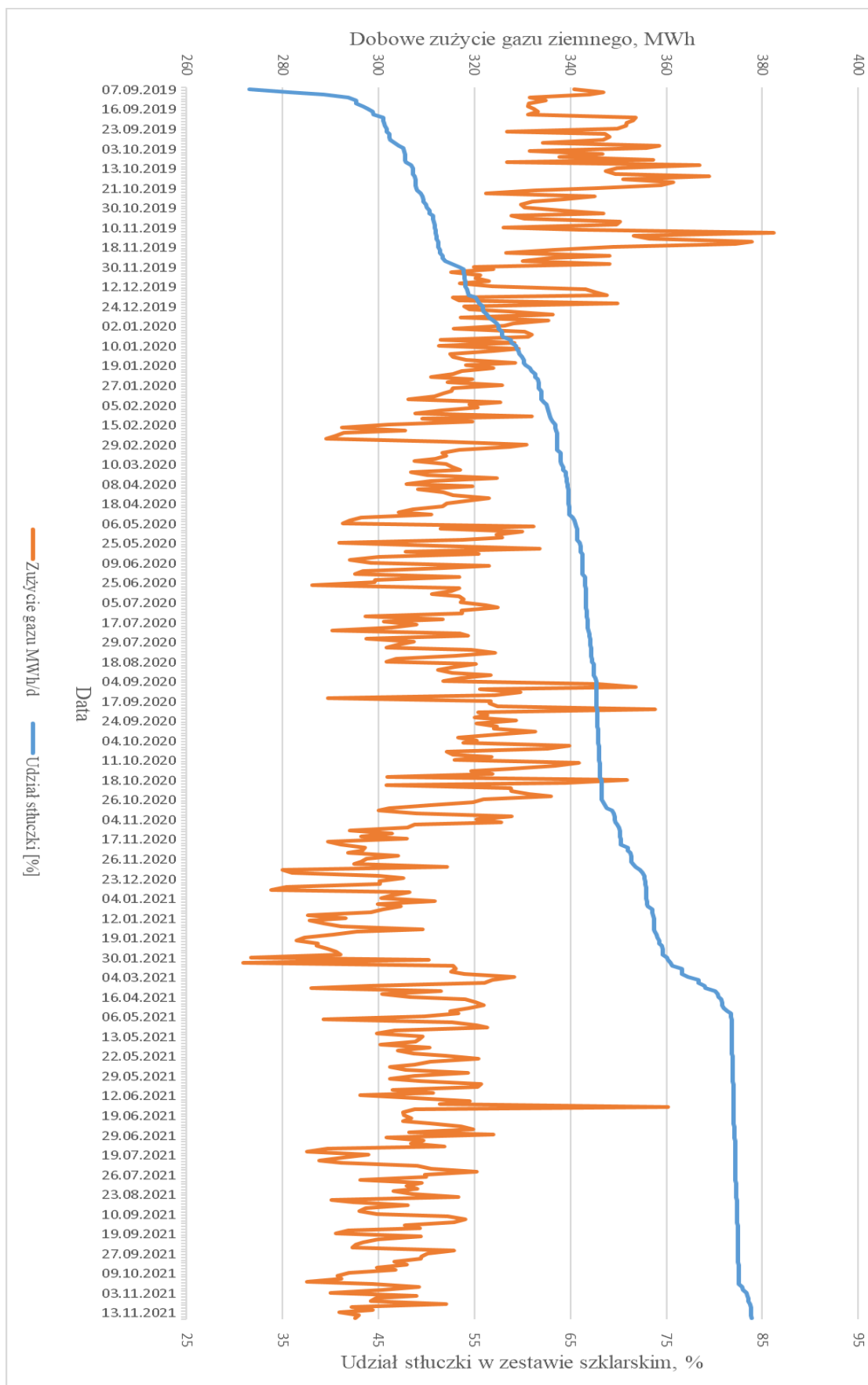
o wydajności wyciągu szkła w ciągu doby od 180 do 240 ton (do analizy przefiltrowano średnie wytopy na poziomie 195 ton), wykres przedstawiony na rysunku 20 dotyczy wanny W2 produkującej szkło amber (kolor brązowy) o wydajności wyciągu 300 do 400 ton dobowo (przefiltrowano średnie wytopy na poziomie 340 ton), a na rysunku 21 prezentujący wykres dla danych z wanny W3 produkującej szkło zielone i wydajności wytopu szkła 280 – 400 ton szkła na dobę (średni wytop wyniósł 340 ton).



Rysunek 19 Zużycie gazu ziemnego przy udziale słuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W1



Rysunek 20 Wykres zużycia gazu ziemnego przy udziale stuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W2



Rysunek 21 Wykres zużycia gazu ziemnego przy udziale stłuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W3

Zaprezentowane wykresy przedstawiają zmniejszenie zużycia gazu ziemnego w analizowanej hucie szkła przy stopniowym zwiększaniu udziału stłuczki na przestrzeni lat. W efekcie na wannie 1 wytapiającej szkło bezbarwne udało się osiągnąć redukcję zużycia wolumenu gazu o 5%, natomiast na wannie 2 i 3 po około 10%. Wykresy powstały na podstawie danych zebranych w EMS.

Uzyskiwanie szkła wymaga topienia różnych składników surowcowych w piecu szklarskim. Tradycyjne surowce do produkcji szkła to między innymi węglan sodu (soda) i węglan wapnia (wapień). W trakcie procesu topienia w piecu szklarskim te surowce ulegają dekompozycji, a jednym z produktów ubocznych tej dekompozycji jest dwutlenek węgla (CO₂). Zastosowanie stłuczki szklanej (lub szkła do recyklingu) w produkcji szkła to jedno z głównych podejść mających na celu zredukowanie emisji CO₂. Stłuczka szklana zastępuje część surowców pierwotnych, takich jak soda i wapień. Oznacza to, że mniej tych składników musi zostać przekształconych w piecu, co prowadzi do mniejszej emisji dwutlenku węgla. Dokładna analiza środowiskowa zastąpienia tradycyjnego surowca stłuczka szklaną została przedstawiona w rozdziale dotyczącym analizy ekologicznej.

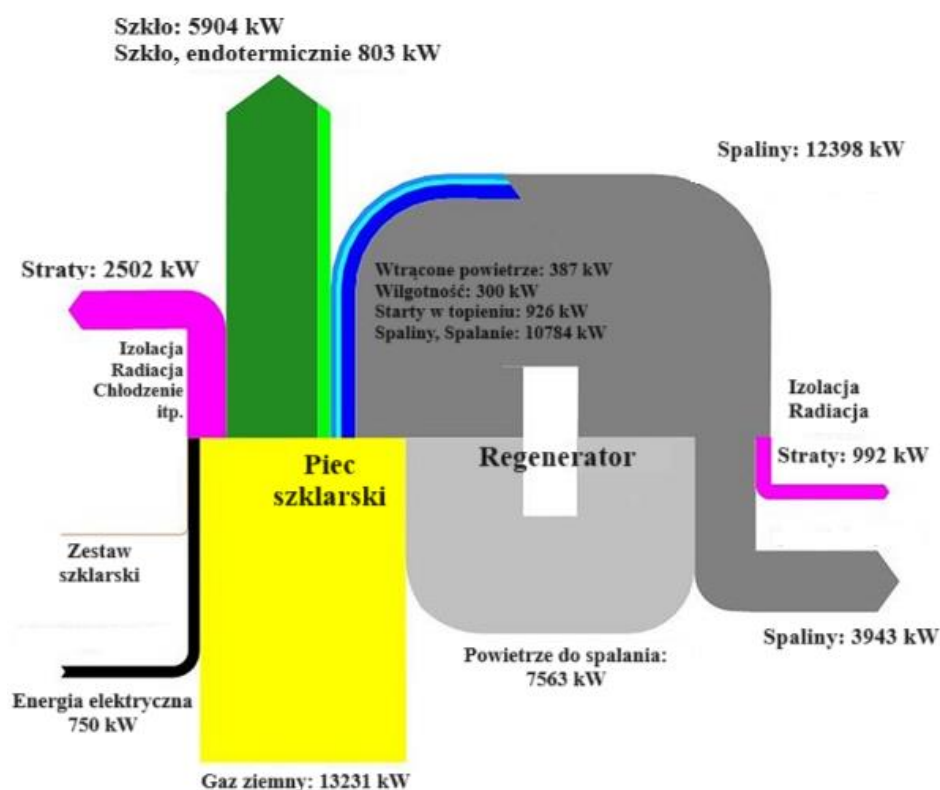
Wszystkie przedstawione dane w tabelach i na wykresach powstały na podstawie informacji zgromadzonych w dziennikach zmianowych pracowników działu technologicznego, prowadzących proces topienia szkła oraz danych odczytywanych i gromadzonych we wdrożonym systemie zarządzania mediami energetycznymi. Codziennie przez pracowników działu technologicznego odnotowywane są takie informacje jak temperatura zewnętrzna, temperatury w poszczególnych strefach wanny szklarskiej, wielkość wytopu, udział stłuczki czy zużycie mediów energetycznych. Wszystkie dane z istniejących dzienników połączono i zebrano w bazach danych do analiz.

Udział i rola doktoranta w przedsięwzięciu polegającym na stopniowym zwiększaniu udziału stłuczki szklanej w zestawie do topienia szkła na trzech piecach szklarskich był kluczowy z perspektywy analizy, badania i dokumentacji efektów. Choć doktorant nie miał bezpośredniego wpływu na proces decyzyjny dotyczący zmian w technologii, to korzystając ze swojej wiedzy i umiejętności, mógł dokładnie obliczyć potencjał oszczędności energii i redukcji emisji dwutlenku węgla związany ze zwiększaniem udziału stłuczki. W miarę zwiększania udziału stłuczki, doktorant obserwował i raportował efekty tych zmian, co pomogło w weryfikacji osiągniętych wyników oraz w dalszych decyzjach o kolejnym zwiększaniu udziału stłuczki. Jego analiza rzeczywistego wpływu stłuczki na zużycie energetyczne oraz porównanie wyników z dostępną literaturą były niezbędne dla pełnej oceny korzyści płynących z tego przedsięwzięcia.

7.6. Wdrożenie systemu odzysku ciepła odpadowego

Przemysł szklarski zużywa znaczną ilość energii w procesie topienia masy szklanej w wysokiej temperaturze. Do ogrzewania wani szklarskich często używane są takie paliwa jak olej opałowy, mazut czy też gaz ziemny. Mogą być również zainstalowane systemy wspomagające elektrycznie, tzw. dogrzew elektryczny, które dostarczają dodatkową energię do topienia w celu zwiększenia wydajności topienia jakościowego szkła.

W piecu zestaw szklarski przetapiany jest do postaci szkła w temperaturze między 1450°C a 1650°C, w zależności od rodzaju i konstrukcji pieca. Roztopione szkło jest oczyszczane i klarowane, tak aby usunąć bąbelki przed procesami formowania. Większość ciepła jest przenoszona wraz z gazem spalinowym oraz przez straty do ścian, korony i otworów pieca. Wynika to ze skomplikowanego kształtu pieca szklarskiego i obecności znacznej liczby otworów w ścianach pieca. Spaliny z komory pieca przepływają do regeneratora (lub rekuperatora), gdzie ciepło zawarte w gazie spalinowym przekazywane jest do powietrza wykorzystywanego w procesie spalania. Rysunek 22 przedstawia bilans cieplny typowego pieca regeneracyjnego.



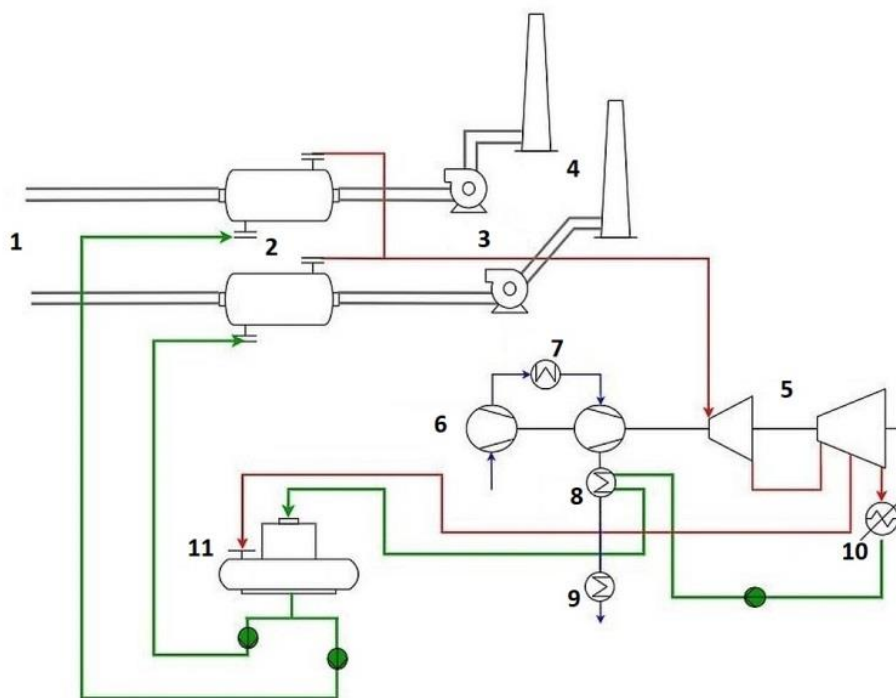
Rysunek 22 Bilans cieplny typowego pieca szklarskiego z regeneratorem [61]

Z uwagi na ograniczenia spowodowane głównie prawami termodynamiki, ilość pozostałego ciepła w gazach spalinowych opuszczających piec jest nadal bardzo wysoka.

Metody odzysku ciepła obejmują przechwycenie i przekazanie odpadowego ciepła z gazów spalinowych do systemu jako dodatkowego źródła energii. Źródło to może być wykorzystywane na różne cele, w tym na przykład na cele ogrzewania socjalnego lub do wytwarzania energii mechanicznej lub elektrycznej.

W obszarze odzysku wysokotemperaturowego ciepła, dążenie do wyższej efektywności wymaga uwzględnienia całokształtu procesu. Kluczowe jest, aby brać pod uwagę współdziałanie poszczególnych elementów wyposażenia z głównym procesem produkcyjnym w hucie szkła. Tylko wtedy można zrealizować cele oszczędności energii przy zachowaniu optymalnej wydajności operacyjnej. [62].

System odzysku ciepła odpadowego (WHRS, ang. Waste Heat Recovery System) w Hucie Szkła w Orzeszu został zaprojektowany jako złożony system służący do odzyskiwania ciepła odpadowego z gazów spalinowych z trzech wanieli szklarskich. Składa się z kilku sekcji odzysku ciepła, takich jak kotły odzyskujące ciepło, ekonomizery, wentylatory, odgazowywacz, dwustopniowa turbina parowa, sprężarka promieniowa z międzystopniowym chłodzeniem i kilka wymienników ciepła. Rysunek 23 przedstawia uproszczony schemat WHRS.



Rysunek 23 Uproszczony schemat wdrożonego odzysku ciepła; czerwona linia to strumień pary, zielona linia to przepływ wody; 1 - spaliny z pieców, 2 - kotły odzyskujące ciepło, 3 - wentylatory spalin, 4 - kominy, 5 - dwustopniowa turbina parowa, 6 - sprężarka promieniowa, 7 - chłodnica międzystopniowa, 8 - wymiennik ciepła, 9 - chłodnica powietrza, 10 - skraplacz, 11 - odgazowywacz [63]

System zawiera kotły odzyskujące ciepło do przekształcania wody w parę, odbierając ciepło od spalin z trzech pieców szklarskich. Kotły wytwarzają parę do turbiny, która napędza sprężarkę promieniową do produkcji sprężonego powietrza. Wydobyta i skondensowana para z turbiny jest dostarczana do odgazowywacza, gdzie woda oddzielana jest od pary. Nasycona para i woda zasilająca są dostarczane do kotłów odzyskujących ciepło. Między dwoma stopniami sprężarki zamontowana jest chłodnica międzystopniowa, która dodatkowo podgrzewa skondensowaną wodę z poprocesowej pary za turbiną.

Najważniejsze korzyści wynikające z inwestycji w system odzysku ciepła odpadowego zaimplementowanego w hucie szkła w Orzeszu to:

- redukcja rocznego zużycia energii elektrycznej o około 10%,
- redukcja emisji dwutlenku węgla o ponad 6 000 ton CO₂ rocznie,
- zwiększenie efektywności produkcji sprężonego powietrza. System odzysku ciepła redukuje zużycie energii elektrycznej, co skutkuje podwojeniem efektywności produkcji sprężonego powietrza w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem;
- WHRS zapewnia całkowite zapotrzebowanie na ogrzewanie socjalne i na ciepłą wodę użytkową [63].

Huta szkła podjęła ryzyko inwestycji w WHRS bez żadnych dotacji czy funduszy. Motywacją firmy były obowiązki środowiskowe i zmniejszenie wpływu przemysłu na klimat. Na podstawie obowiązujących przepisów środowiskowych wdrożenie systemów odzysku ciepła odpadowego jest jedną z najlepszych dostępnych technik, które pozwalają zminimalizować negatywny wpływ na środowisko i zwiększyć efektywność procesu. Jest to również zgodne z polityką Unii Europejskiej dotyczącą poprawy efektywności i ograniczenia emisji w przemyśle.

Ponieważ rozwiązanie to ma największy potencjał w procesie produkcji szkła w hucie szkła, a zarazem jest najbardziej złożonym projektem inwestycyjnym w hucie, zostanie dokładnie przedstawiony w rozdziale dotyczącym wdrożenia Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego jako główne rozwiązanie optymalizacyjne. Wykorzystanie ciepła odpadowego w produkcji szkła może znacząco zwiększyć efektywność energetyczną, jednocześnie zmniejszając emisję szkodliwych substancji. Wykorzystując najnowocześniejsze technologie i innowacyjne podejście, system ten może stać się kluczowym elementem w dążeniu do bardziej ekologicznej i ekonomicznej produkcji szkła [63].

W trakcie realizacji projektu wprowadzenia zaawansowanego systemu odzysku ciepła odpadowego w Hucie Szkła w Orzeszu kluczową rolę odegrał doktorant z zakresu inżynierii

procesowej. Jego wkład w prace nad tym projektem był nieoceniony, a jego wiedza specjalistyczna oraz doświadczenie w zakresie analizy i optymalizacji procesów przemysłowych pozwoliły na skuteczne rozwiązanie wielu problemów technicznych i technologicznych.

8. Wdrożenie odzysku ciepła odpadowego w badanej hucie szkła

8.1. Wprowadzenie

Wkład doktoranta w projekt WHRS był tak znaczący, że stał się głównym elementem jego pracy doktorskiej. Praca ta skupia się na opisie zastosowanych poszczególnych urządzeń oraz na analizie systemu skuteczności odzysku ciepła odpadowego w przemyśle szklarskim, a jej wyniki będą miały bezpośredni wpływ na dalszy rozwój tej technologii w innych hutach szkła oraz w innych gałęziach przemysłu. Ponadto doktorant brał czynny udział w opracowywaniu specyfikacji technicznych oraz w procesie decyzyjnym dotyczącym wyboru konkretnych technologii i dostawców. Jego zdolność do analizowania i interpretowania skomplikowanych danych technicznych oraz doświadczenie w zakresie zarządzania projektami przemysłowymi przyczyniły się do skutecznej realizacji projektu.

Rozdział ten skupia się na przeanalizowaniu wdrożenia zaawansowanego systemu odzysku ciepła odpadowego w hucie szkła, zwanego WHRS, którego głównym zadaniem jest odzyskiwanie ciepła z gorących spalin wytwarzanych z trzech wanien szklarskich. Ostatecznymi produktami systemu odzysku ciepła są sprężone powietrze oraz ciepło, które zasila centralny system ogrzewania w hucie. Głównym celem wdrożenia jest innowacyjny proces przekształcania energii dla zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów i minimalizacji śladu węglowego w analizowanej hucie.

System WHRS opiera się na trzech głównych systemach: systemie kotłów odzyskowych, systemie turbina-kompresor i systemie ciepłowniczym, oraz trzech systemów pomocniczych: chłodniczego, uzdatniania wody oraz wstępnego rozgrzewu, które odgrywają ważną rolę w zapewnieniu sprawnego i bezpiecznego funkcjonowania systemu WHRS. Każdy z wymienionych elementów WHRS-a pełni kluczową rolę w całym procesie odzyskiwania energii.

System kotłów jest odpowiedzialny za odbiór energii ze spalin z wanien, które są chłodzone od temperatury około 490°C do 220°C. W procesie schładzania, ciepło jest odzyskiwane i zamieniane na parę nasyconą, która jest następnie przesyłana do turbiny.

System turbina-kompresor wykorzystuje parę nasyconą do napędzania turbiny, która z kolei sprężona jest z kompresorem. Po przejściu przez turbinę, para skraplana jest w kondensatorze, a następnie, po podgrzaniu w wymienniku ciepła w układzie sprężonego powietrza, kierowana do odgazowywacza kotłów. W efekcie, kompresor jest w stanie sprężyć

powietrze atmosferyczne do ciśnienia 5 barów, które jest przesyłane do zbiorników sprężonego powietrza w głównej kompresorowni huty. Podczas pracy turbosprężarki napływ dużego strumienia sprężonego powietrza na kolektory zbiorcze wymuszają wyłączenie trzech tradycyjnych kompresorów śrubowych, zasilanych energią elektryczną.

System ciepłowniczy ma na celu dodatkowe odzyskiwanie ciepła za pomocą dwóch ekonomizerów, które podgrzewają wodę zasilającą kotły. Układ ciepłowniczy następnie przekazuje tę dodatkowo odzyskaną energię do systemu centralnego ogrzewania huty.

System chłodniczy odpowiada za utrzymanie optymalnej temperatury urządzeń pomocniczych, takich jak kondensator i chłodnice. Stacja uzdatniania wody produkuje zdemineralizowaną wodę, która jest niezbędna do produkcji pary, podczas gdy kocioł rozgrzewający jest wykorzystywany do podgrzewania kotłów, gdy są zimne i ich ciśnienie spada poniżej 3,5 barów.

Doktorant odgrywał kluczową rolę w procesie wdrożenia systemu WHRS w Hucie Szkła w Orzeszu. Jako specjalista energetyk zajmował się przede wszystkim weryfikacją dokumentacji technicznej poszczególnych urządzeń składowych systemu WHRS. Zadanie to obejmowało gruntowną analizę specyfikacji dostarczanych przez wykonawców i dostawców, co miało decydujący wpływ na właściwy dobór komponentów systemu.

W tym kolejnych podrozdziałach przedstawiono i przeanalizowano każdy z tych systemów, ich funkcje, a także wyjaśniono, jak współpracują ze sobą, aby osiągnąć główny cel systemu WHRS - efektywne odzyskiwanie i wykorzystanie energii cieplnej, jako największe wdrożone rozwiązanie optymalizacyjne w hucie.

8.2. Budowa systemu Odzysku Ciepła Odpadowego

8.2.1. System kotłów odzyskowych

Projekt budowy kotłów odzyskowych i ekonomizerów w hucie szkła miał na celu efektywne odzyskiwanie ciepła ze spalin generowanych podczas procesu wytopu szkła w piecach. Spaliny z wanien szklarskich o temperaturze około 490-500°C, zamiast zostać skierowane bezpośrednio do kominów, przechodzą przez kotły odzyskowe. Spaliny są tam schładzane do temperatury około 220°C na wylocie z kotłów. Energia odzyskana w ten sposób służy do wytworzenia pary nasyconej o ciśnieniu 21,5 bar oraz temperaturze 218°C. Następnie para jest transportowana rurociągami na pierwszy stopień turbiny – wyższego ciśnienia – HP, gdzie napędza łopaty turbiny.

Głównymi elementami systemu WHRS są kotły odzyskowe, oznaczone jako B1 i B2, które wykorzystują spaliny z wanien szklarskich (kolejno W1+W2 oraz W3) do produkcji pary świeżej. Każdy z kotłów wyposażony jest w system czyszczenia APCS (ang. Automatic Pipe Cleaning System). Oprócz kotłów odzyskowych zastosowane są również ekonomizery (E1 i E2), które dodatkowo odzyskują ciepło ze spalin, zanim te zostaną odprowadzone do komina.

Elementem konstrukcyjnym kotła odzyskowego jest poziomy podłużny cylindryczny korpus, w którym umieszczone są wewnętrzne komory wodno-parowe oraz rurki spalinowe. Te ostatnie są kluczowe dla procesu odzyskiwania ciepła - to przez nie przechodzą gorące spaliny, które mają kontakt z wodą w komorach. Dolna część naczynia ciśnieniowego kotła jest wypełniona wodą w obszarze rur spalin, co umożliwia transport ciepła ze spalin do wody.

Mechanizm działania takiego kotła opiera się na zasadzie przekazania ciepła ze spalin do wody w komorze kotła. W rezultacie woda w kotle podgrzewa się do stanu w którym rozpoczyna się parowanie. Bąbelki pary wzbijają się następnie do górnej części zbiornika kotła, do przestrzeni pary, następnie podgrzana para rurociągami pary transportowana jest do układu turbiny parowej. Rurki spalinowe w kotle odzyskowym muszą być zawsze pokryte wodą. To zapobiega ich przegrzewaniu i uszkodzeniom podczas eksploatacji. Przegrzanie rur spalinowych mogłoby doprowadzić do poważnych uszkodzeń strukturalnych i awarii kotła, co z kolei mogłoby zagrozić bezpieczeństwu całego systemu.

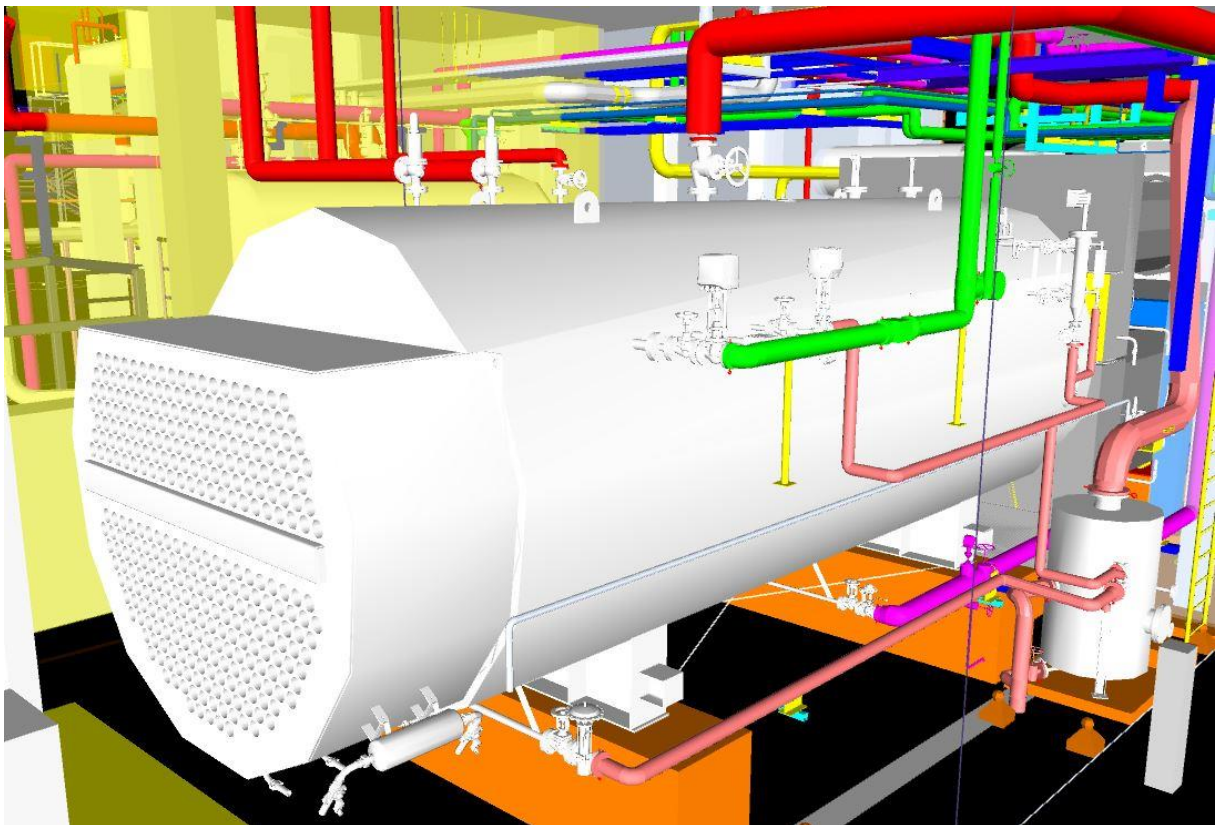
W tabeli 12 przedstawiono parametry techniczne pracy zaprojektowanych kotłów B1 (dla wanien szklarskich W1 i W2) oraz B2 (dla wanny szklarskiej W3).

Tabela 12 Parametry techniczne zaprojektowanych kotłów odzyskowych dla spalin wychodzących z wanien W1, W2 i W3

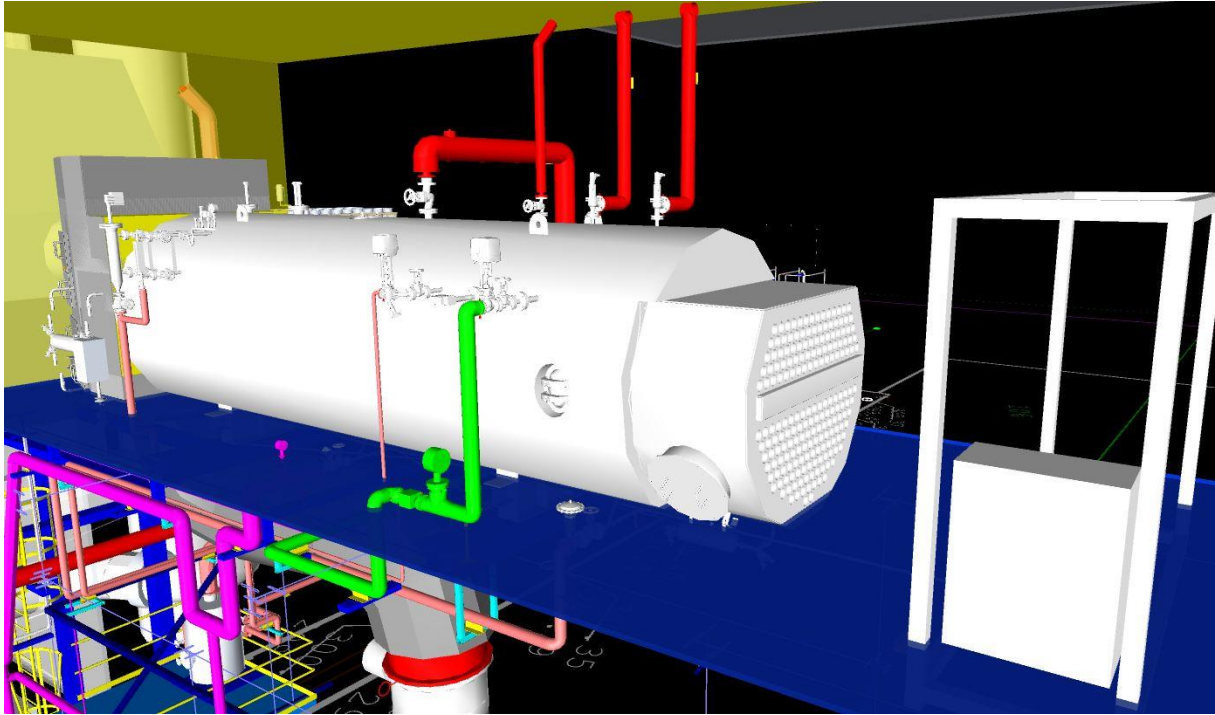
Parametry	Kocioł B1 dla W1 i W2	Kocioł B2 dla W3
Maksymalny strumień spalin, Nm ³ /h	33 000	20 000
Minimalny strumień spalin, Nm ³ /h	10 000	7 000
Średnia temperatura spalin, °C	490	490
Podgrzewana powierzchnia kotła, m ²	635	370
Maksymalna produkcja pary, kg/h	5 500	3 500

Parametry	Kocioł B1 dla W1 i W2	Kocioł B2 dla W3
Dopuszczalne ciśnienie w kotle, bar	25	25
Dopuszczalna temperatura wody zasilającej, °C	105	105

Rysunki 24 i 25 przedstawiają wizualizacje zaprojektowanych kotłów odzyskowych B1 i B2 dla analizowanej huty szkła.

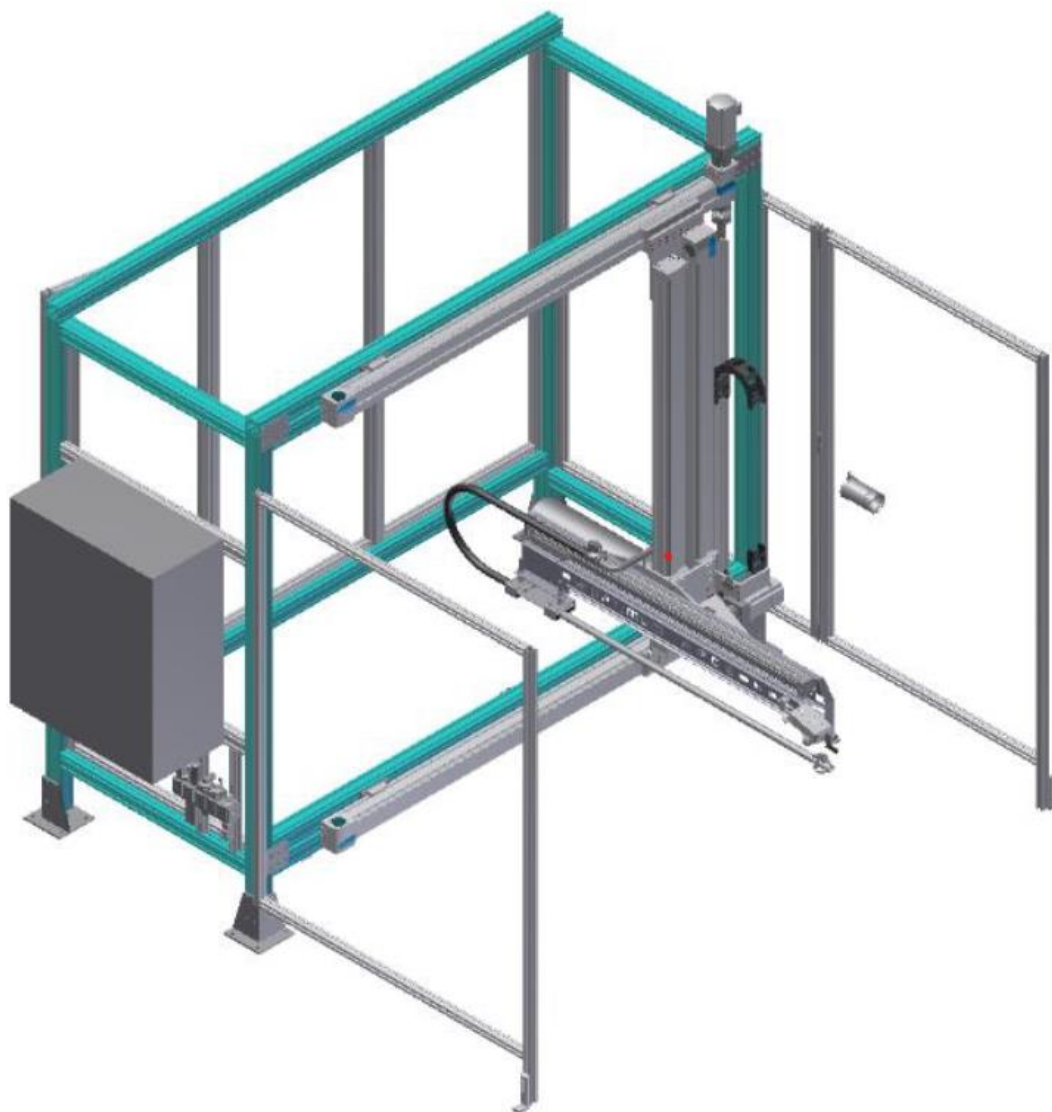


Rysunek 24 Wizualizacja projektowa kotła odzyskowego B1 dla spalin pochodzących z wanień W1 i W2



Rysunek 25 Wizualizacja projektowa kotła odzyskowego B2 dla spalin pochodzących z wanny W3

Każdy z kotłów wyposażony jest w system czyszczenia APCS, czyli system do automatycznego czyszczenia rur spalin kotła odzyskowego w trakcie jego pracy. Jest to realizowane za pomocą systemu pozycjonowania w osiach X-Y, na którym zamontowany jest system impulsów powietrznych. Dzięki impulsowi sprężonego powietrza zostaje usunięty osad/zanieczyszczenie na wewnętrznej ścianie rury spalinowej. W tym systemie rura zostaje prawie całkowicie zamknięta podczas cyklu czyszczenia. W rezultacie, w danym kanale nie występuje przepływ spalin przez rurę wymiennika podczas czyszczenia. Cała energia generowana przez impuls powietrza zostaje wykorzystana na rzecz usunięcia zanieczyszczeń z rury spalinowej. Rysunek 26 przedstawia system czyszczenia kotłów APCS:

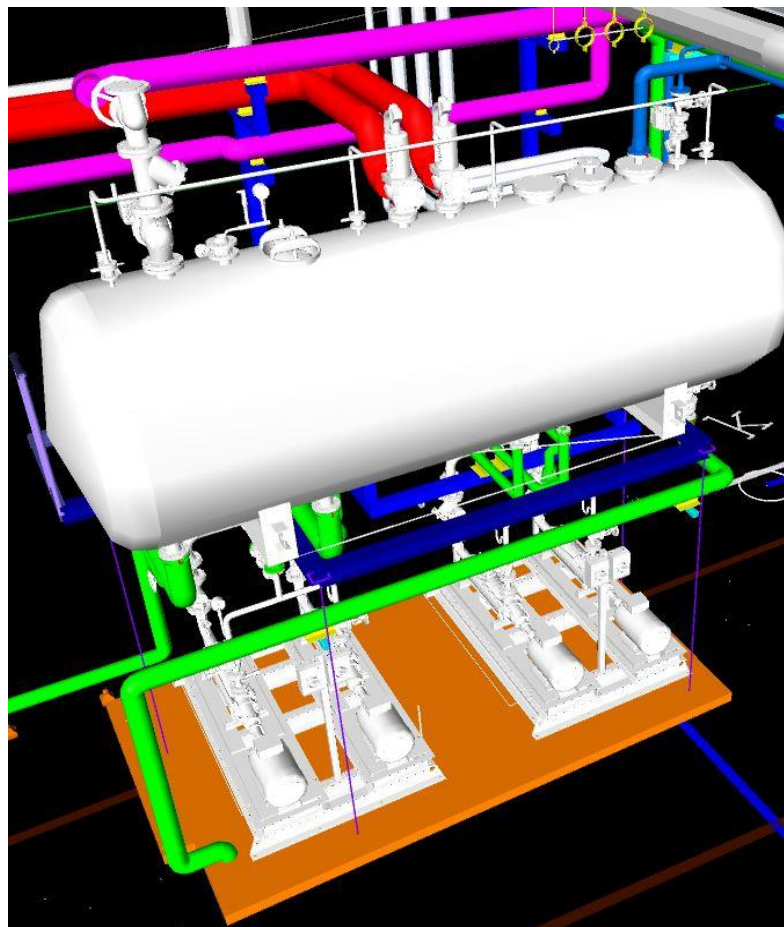


Rysunek 26 System oczyszczania kanałów spalin kotła odzyskowego - APCS

W system WHRS zintegrowany jest również odgazowywacz (deaerator) oraz stacja pomp. Głównym zadaniem deaeratora jest usunięcie gazów rozpuszczonych w wodzie, co jest kluczowe dla bezpiecznej i efektywnej pracy kotłów odzyskowych i turbiny parowej. Na każdy kocioł przewidziane są dwie pompy - jedna z nich musi ciągle pracować, aby zapobiec uderzeniom termicznym i hydraulicznym w ekonomizerach i rurociągach wody zasilającej.

Odgazowywacze pełnią kluczową rolę w systemach kotłowych, eliminując tlen i inne gazy z wody zasilającej za pośrednictwem pary wodnej. Tlen, nawet w minimalnych ilościach, może prowadzić do korozji elementów systemu, stąd istotność procesu odgazowywania. System odgazowywania wykorzystuje zasadę termiczną do podgrzewania wody zasilającej do temperatury w granicach 102-105°C. Proces ten odbywa się w odgazowywaczu poprzez doprowadzenie określonej ilości pary do zbiornika. W wyniku takiego procesu uzyskuje się

odgazowaną wodę zasilającą, która po ewentualnym dodatkowym traktowaniu chemicznym, nadaje się do eksploatacji w kotłach parowych. Odgazowywanie odbywa się dwuetapowo: podczas wstępnego odgazowywania woda jest rozpylana w części przestrzeni parowej, a końcowe odgazowywanie odbywa się w zbiorniku, gdzie para jest wprowadzana bezpośrednio w kontakt z wodą. Przygotowana w ten sposób woda jest jednocześnie odgazowywana i podgrzewana. W celu uniknięcia próżni podczas ochłodzenia odgazowywacza lub dodania dużych ilości wody zasilającej, deaerator wyposażony jest w zawór przeciwpróżniowy lub przystosowany do pracy w warunkach próżni. Rysunek 27 przedstawia wizualizację z projektu deaeratora dla huty szkła współpracującego z kotłami i turbiną.



Rysunek 27 Wizualizacja projektowa deaeratora (odgazowywacza)

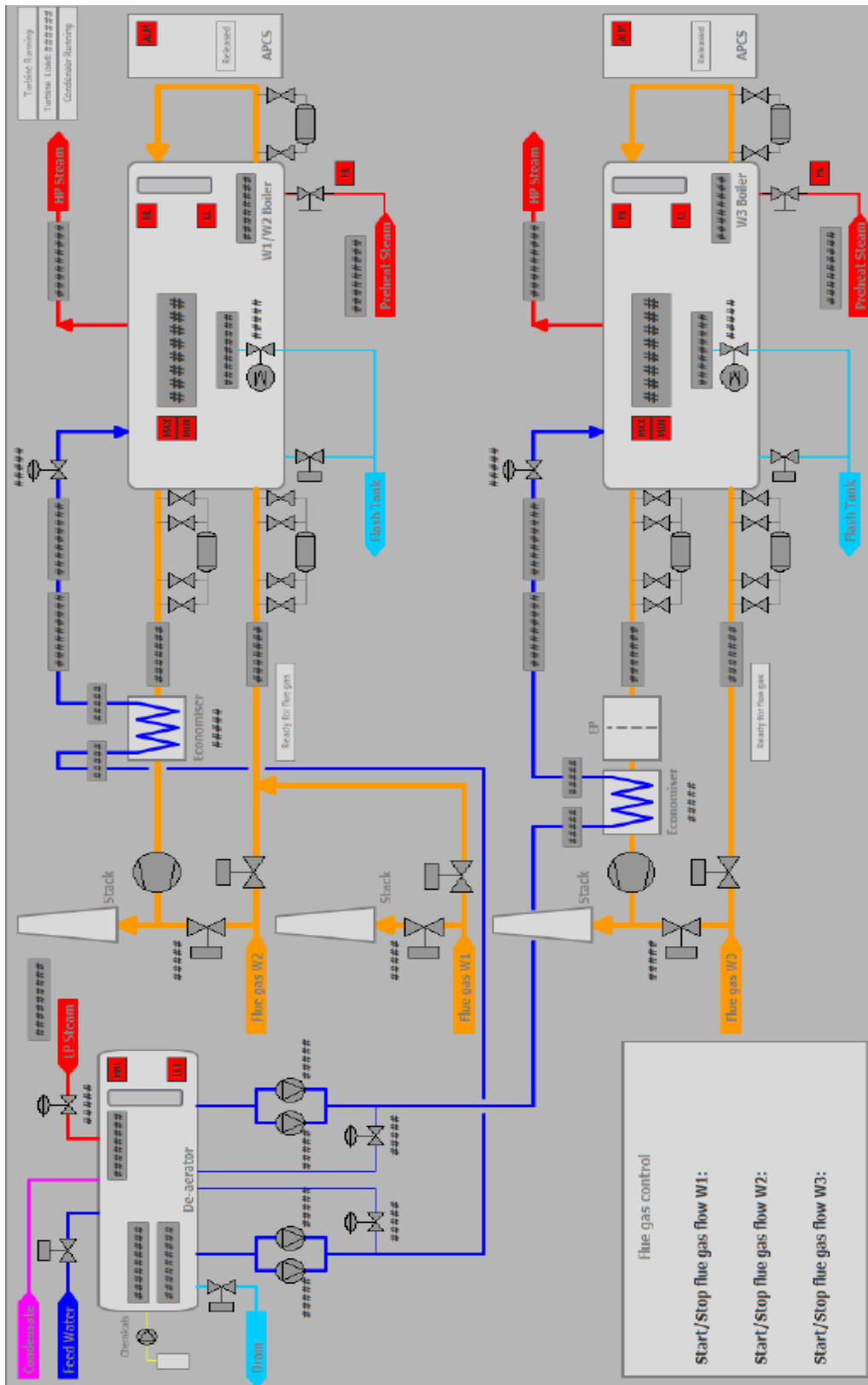
Założono przebudowę istniejących kanałów spalin z wanień W1+W2, aby zapewnić ciągły przepływ spalin do istniejących kominów wspomagany wentylatorami odciągu.

Ważnym aspektem projektu są klapy obejściowe, które mają służyć do automatycznego awaryjnego odcięcia dopływu spalin do kotłów B1 i B2 oraz do automatycznego odprowadzenia spalin do kominów. Klapy te są trójstronne i mogą być używane do redukcji obciążenia cieplnego kotłów B1 i B2, gdy ilość spalin do kotłów przekroczy ich obciążalność

lub gdy produkcja pary przekroczy maksymalne obciążenie turbiny parowej. Zabudowa klap odcinających służy również do celów remontowych. Zaprojektowano je tak, aby umożliwiły zabudowę dodatkowych zaślepek wymiennych, które zapewniają szczelne odcięcie kotłów lub odcinków kanałów spalin podczas remontu.

Końcowym elementem systemu jest system zbierania pary. Para świeża z kotłów jest doprowadzana do kolektorów rurociągami, a następnie do separatora pary, skąd jest kierowana do napędzania turbiny parowej zintegrowanej z kompresorem odśrodkowym.

Rysunek 28 prezentuje wizualizację systemu odzysku ciepła przez kotły odzyskowe wraz z deaeratorem, pompami, ekonomizerami, klapami, wentylatorami i kominami.

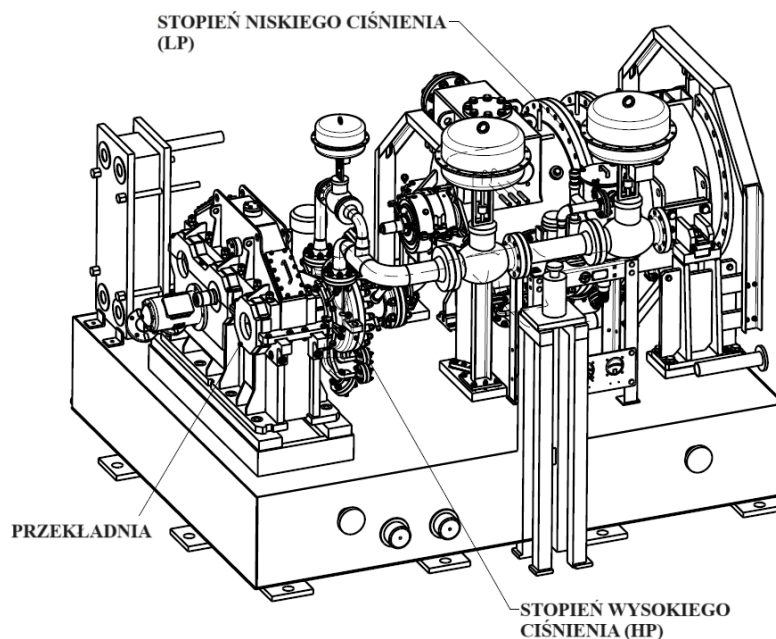


Rysunek 28 Wizualizacja z panelu sterowania systemu odzysku ciepła

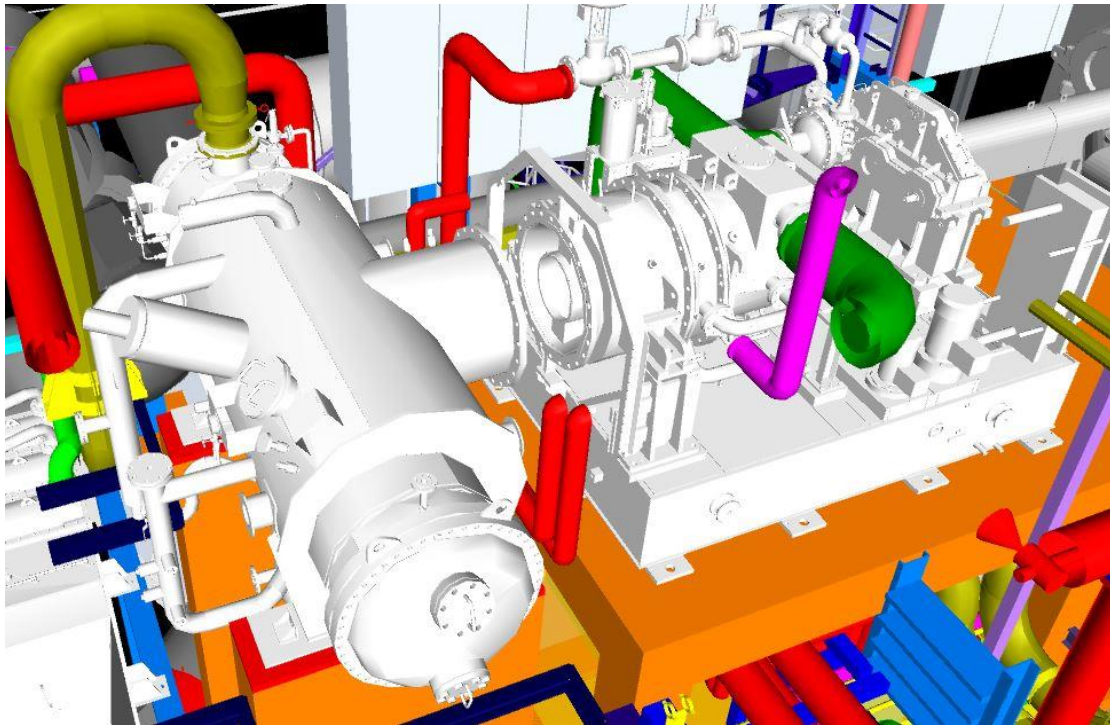
8.2.2. System turbiny-kompresora

W rozważanej hucie szkła przy doborze technologii odzysku ciepła, a konkretnie wykorzystania pary z kotłów odzyskowych, wybrano rozwiązanie polegające na zaprojektowaniu i dostawie turbiny parowej zintegrowanej ze sprężarką odśrodkową zamiast z generatorem, jak ma się to w tradycyjnych rozwiązaniach turbin parowych stosowanych w przemyśle energetycznym. W hucie szkła opakowaniowego, oprócz dogrzewu elektrycznego, to produkcja sprężonego powietrza na cele produkcyjne, przez kompresory, jest największym obszarem konsumpcji energii elektrycznej. We wdrażanym rozwiązaniu łącząc turbinę parową z kompresorem promieniowym pomija się proces zamiany energii elektrycznej w sprężone powietrze, od razu je produkując. Rozwiązanie to umożliwia również płynniejsze zastępowanie energii z tradycyjnych źródeł na energię ze źródeł odnawialnych, ponieważ w przypadku wyłączenia turbosprężarki, spadek ciśnienia automatycznie uruchamia tradycyjne sprężarki śrubowe w celu wyrównania ciśnienia sieci sprężonego powietrza.

Turbozespół składa się ze stalowej ramy fundamentowej, której elementem jest zbiornik oleju, na którym jest umocowana dwuzębnikowa przekładnia szybkobieżna. Na jej szybkobieżnym wale jest umieszczony pierwszy stopień turbiny wysokiego ciśnienia (HP), zaś drugi wał szybkobieżny jest połączony za pomocą sprzęgła wielotarczowego z wałem turbiny niskiego ciśnienia (LP). Wał wolnobieżny przekładni jest połączony za pomocą sprzęgła zębatego ze sprężarką. Rysunki 29 i 30 przedstawiają układ zaprojektowanej turbiny parowej.



Rysunek 29 Projekt dwustopniowej turbiny parowej z przekładnią



Rysunek 30 Wizualizacja projektowa dwustopniowej turbiny parowej z kondensatorem i przekładnią

Turbozespół składa się również z kondensatora z osprzętem, układu kondensacji (pompy kondensacyjne, regulacji poziomu w kondensatorze, układ napełniania uszczelnień dławnicowych, stacja próżniowa, pojemnik zbiorczy kondensatu), układu obiegowego wody chłodzącej i układu odwadniającego. Tabela 13 zestawia parametry techniczne turbozespołu turbiny parowej.

Tabela 13 Parametry techniczne turbozespołu turbiny parowej

Turbina wysokiego ciśnienia - HP		
Obroty nominalne turbiny	19 383	1/min
Ciśnienie pary na wlocie do turbiny:		
- maksymalne	2,55	MPa abs.
- nominalne	2,25	
- minimalne	2,00	
Temperatura pary na wlocie do turbiny:		
- maksymalna	240	°C
- nominalna	218,5	
- minimalna	200	
Przepływ pary:		

- maksymalny	7,2	t/h
- nominalny	6,9	
Turbina niskiego ciśnienia – LP		
Obroty nominalne turbiny	12 018	1/min
Ciśnienie pary na wlocie do turbiny:		
- maksymalna	1,10	MPa abs.
- nominalna	0,50	
- minimalna	0,45	
Temperatura pary na wlocie do turbiny:		
- maksymalna	200	°C
- nominalna	152	
Przepływ pary:		
- maksymalny	7,2	t/h
- nominalny	6,9	
Moc maksymalna turbiny	827	kW

Główne części turbokompresora:

- turbina parowa wysokiego ciśnienia (HP) z zaworem szybkozamykającym i zaworami regulacyjnymi,
- turbina parowa niskiego ciśnienia (LP) z nieregulowanym upustem (poborem),
- przekładnia z dwoma wysokoobrotowymi łożyskami,
- olejowy układ smarowniczy,
- kondensator z wyposażeniem, układ regulacji poziomu w kondensatorze,
- układ pary uszczelniającej i kondensator pary uszczelniającej,
- pompa próżniowa z pierścieniem wodnym z wyposażeniem,
- układ odwadniający i zbiornik gromadzący kondensat,
- separatory wilgoci,
- układ sterowniczy i układ ochrony i zabezpieczenia turbin,
- rura łącząca i rura bypassowa,
- kompresor,

Na zbiorniku olejowym oprócz dwóch stopni turbiny (HP i LP) umocowana jest pompa pomocnicza i awaryjna, ekshaustor par olejowych i rurociąg olejowego układu smarującego,

który doprowadza olej do przekładni i do przedniego oraz tylnego łożyska turbiny kondensacyjnej. Chłodnica oleju i filtr oleju są również umieszczone na zbiorniku oleju.

Króciec wylotowy LP turbiny jest połączony z kondensatorem. Pod kondensatorem znajdują dwie pompy kondensacyjne i pojemnik zbiorczy kondensatu z pompą Grundfos. Do kondensatora podłączony jest rurociąg wody chłodzącej, który następnie jest doprowadzony do chłodnicy układu olejowego, do chłodnicy kondensatora pary uszczelniającej (KPU) i do chłodnicy pompy próżniowej z pierścieniem wodnym.

Pompa próżniowa z pierścieniem wodnym jest umieszczona w pobliżu kondensatora i zapewnia podciśnienie w kondensatorze. Blisko pompy próżniowej znajduje się również kondensator pary uszczelniającej (KPU), który służy do odczerpywania i kondensacji pary z uszczelek.

Na rurze wlotowej i na rurze między wylotem stopnia HP i wlotem stopnia LP jest umieszczony separator pary, który pomaga oddzielić nadwyżkę pary mokrej. Para wlotowa po przepływie przez łopatki statorowe i łopatki wirnika turbiny wysokiego ciśnienia jest doprowadzona przez separator do wlotu turbiny LP. Wylot z turbiny LP połączony jest za pomocą króćca z kondensatorem. W przypadku wyłączenia turbiny para wlotowa prowadzona jest rurociągiem obejściowym z wytryskiem bezpośrednio do kondensatora. Z korpusu turbiny LP jest wyprowadzona rura nieregulowanego odbioru, która prowadzi do kolektora nr 3.

Obok turbozespołu znajdują się tablice rozdzielcze układu sterowania, tzn. regulacji i urządzenia zabezpieczającego, które zawiera regulatory, źródła, moduły wlotowe i wylotowe, jednostki analizujące zabezpieczenia turbiny i linię komunikacyjną dla układu wizualizacji układu sterowania.

Turbina składa się z przekładni dwubiegowej, a na jej dwóch wysokoprężnych wałkach zamontowane są koła zamachowe turbiny. Obudowy modułów turbiny są przymocowane do przekładni za pomocą dystansów, które umożliwiają ich dylatację i osiowe ustawienie w stosunku do osi obrotu wałka.

Siły osiowe generowane w turbinie są częściowo kompensowane przez siły działające na zęby przekładni zewnętrznej oraz przez tłok wyrównawczy. Reszta siły osiowej jest przenoszona przez pierścienie podporowe wałka na koło przekładni o niskiej prędkości, gdzie jest ona absorbowana przez łożysko osiowe.

Łożyska i koła zębate są smarowane przez system smarowania systemu. Przekładnia i maszyna napędzana są połączone sprzęgłem, które wyrównuje produkcyjne i eksploatacyjne odchylenia osiowe wałów. Wirniki turbin i łopatki są frezowane z jednego kawałka materiału.

Turbozespół jest sterowany za pomocą zaworów regulacyjnych (ZR) i zaworu szybkozamykającego (ZSZ), które są umieszczone w rurze wlotowej przed stopniem wysokiego ciśnienia. Są dwa ZR, które służą do regulacji całego turbozespołu, zaś ZSZ służy jako szybkozamykająca armatura zabezpieczająca. Pracę turbiny regulują ZR za pomocą napędu pneumatycznego sterowanego przez układ sterowania tak, że na skutek zmian ciśnienia powietrza sterującego serwonapęd przymyka lub otwiera ZR, w zależności od warunków eksploatacyjnych. Zawór regulacyjny reguluje obroty turbiny zgodnie z wykresem rozruchu przy uruchomionej turbosprężarce i utrzymuje stałą prędkość w zakresie 11 835 – 12 018 obr./min podczas pracy turbosprężarki.

Układ smarowania służy do smarowania przekładni i turbiny kondensacyjnej. Pompa pomocnicza pracuje podczas uruchamiania eksploatacyjnego turbiny i jej wyłączenia, pompa awaryjna działa przy nagłym spadku ciśnienia oleju lub zaniku napięcia w sieci. W czasie eksploatacji turbiny ciśnienie oleju w układzie smarowania zapewnia główna pompa olejowa, która znajduje się na przekładni.

Na rysunku 31 przedstawiono ekran panelu układu sterowania.

Turbozespół przystosowany jest do trzech głównych parametry operacyjnych:

Tryb 1: Tryb gwarantowany

Nominalna moc turbomaszyny: 950 kWe

Medium: Para nasycona

Nominalny przepływ pary nasyconej do HP: 7,17 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do HP: 22,5 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do HP: 218,5°C

Nominalny przepływ pary nasyconej do LP: 7,14 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do LP: 9 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do LP: 175,4°C

Przepływ pary do kondensatora 6,7 t/h

Ciśnienie pary do kondensatora 0,18 bar(a)

Temperatura pary do kondensatora 57,8°C

Tryb 2: Nominalnej pracy sprężarki na wale turbiny

Nominalna moc turbo maszyny: 827 kWe

Medium Para nasycona

Nominalny przepływ pary nasyconej do HP: 6,67 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do HP: 22,5 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do HP: 218,5°C

Nominalny przepływ pary nasyconej do LP: 6,64 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do LP: 8,38 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do LP: 172,0°C

Przepływ pary do kondensatora 6,2 t/h

Ciśnienie pary do kondensatora 0,18 bar(a)

Temperatura pary do kondensatora 57,8°C

Tryb 3: Minimalnej pracy turbiny

Nominalna moc turbo maszyny: 730 kWe

Medium: Para nasycona

Nominalny przepływ pary nasyconej do HP: 5,67 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do HP: 22,5 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do HP: 218,5°C

Nominalny przepływ pary nasyconej do LP: 5,64 t/h

Ciśnienie pary wejściowej do LP: 7,12 bar(a)

Temperatura pary wejściowej do LP: 165,6°C

Przepływ pary do kondensatora 5,2 t/h

Ciśnienie pary do kondensatora 0,18 bar(a)

Temperatura pary do kondensatora 57,8°C

Sprężarka promieniowa dwustopniowa z intercoolerem to zaawansowany układ sprężania powietrza, który wykorzystuje dwa stopnie sprężania z chłodzeniem pośrednim. Jest ona stosowana w połączeniu z turbiną parową w układach odzysku energii, tworząc sprężone powietrze z ciepła odpadowego.

Maszyna turbinowa została wyregulowana do wymaganego punktu pracy (np. poprzez regulację łopatek kierujących wlotu i zamknięcie zaworu obejściowego). Sprężarka wytwarza wymagane ciśnienie wylotowe i dostarcza sprężone powietrze na kolektory zbiorcze w kompresorowni.

Sprężarka promieniowa dwustopniowa z intercoolerem stanowi istotny element w systemie odzysku energii, zwłaszcza gdy jest zasilana na jednym wale z turbiną parową. Jej zdolność do przekształcania ciepła odpadowego w sprężone powietrze jest kluczowa dla zwiększenia wydajności energetycznej i zmniejszenia strat energii. Intercooler pełni ważną rolę w zwiększeniu efektywności, chłodząc powietrze między stopniami, co pozwala na wydajniejsze sprężanie i ostatecznie na bardziej zrównoważone wykorzystanie energii.

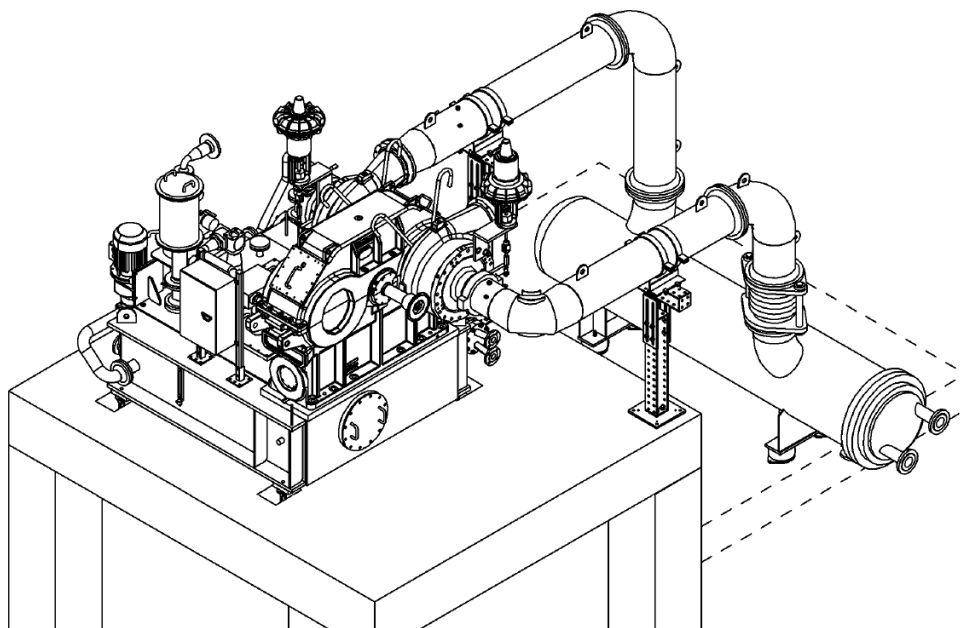
W obu stopniach, kluczowe elementy takie jak wirnik, obudowa wirnika, i dyfuzor pracują razem, aby efektywnie sprężyć powietrze. Pierwszy stopień działa na niższym ciśnieniu i temperaturze niż drugi, dlatego często jest różnica w konstrukcji łopatek wirnika i kształcie obudowy wirnika między tymi stopniami. Intercooler między nimi pełni kluczową rolę, chłodząc powietrze i umożliwiając drugiemu stopniowi sprężania działanie przy niższej temperaturze, co zwiększa efektywność całego systemu. Odpowiednie dobranie i konstrukcja tych elementów są kluczowe dla uzyskania optymalnej wydajności sprężarki w układzie odzysku energii.

Tabela 14 zestawia parametry techniczne dobranego kompresora do współpracy z turbiną parową.

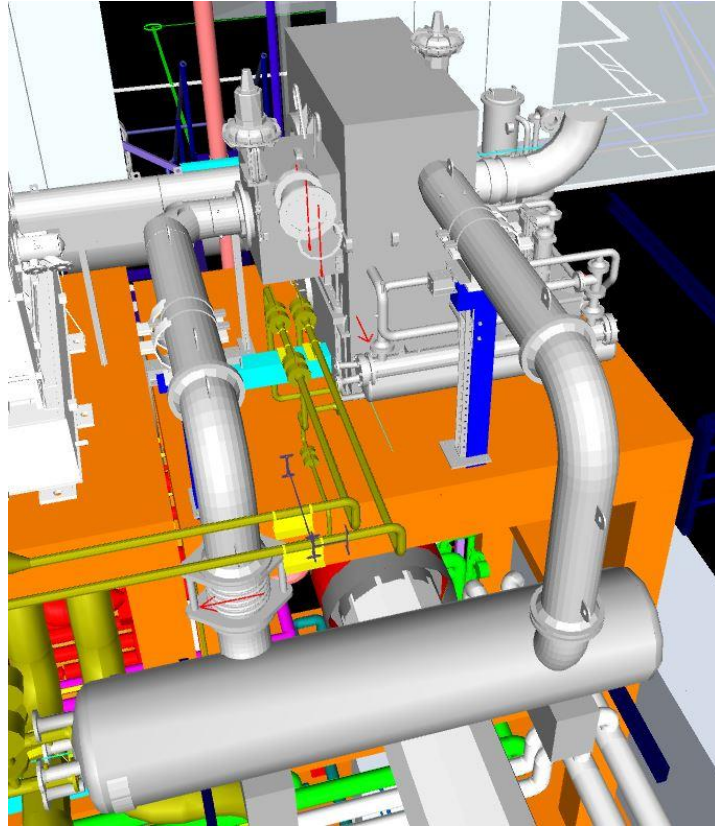
Tabela 14 Parametry techniczne dobranego kompresora promieniowego

Parametry	Jednostka	Wartość
Przepływ objętościowy V_n (1,013 Br(a) 0 °C)	Nm ³ /h	9 952,6
Masowy przepływ na wejściu	kg/h	13 170
Ciśnienie ssania w stopniu 1	bar	0,958
Temperatura na wlocie w stopniu 1	°C	27
Ciśnienie gazu w ostatnim stopniu	bar	5,96
Temperatura na ostatnim stopniu	°C	143,8
Prędkość wału napędu	min ⁻¹	2 960
Maksymalna prędkość wału zębatego	min ⁻¹	26 558
Moc	kW	950

Na rysunkach 32 i 33 przedstawiono układ zaprojektowanej sprężarki dwustopniowej z zainstalowanym intercoolerem międzystopniowym.

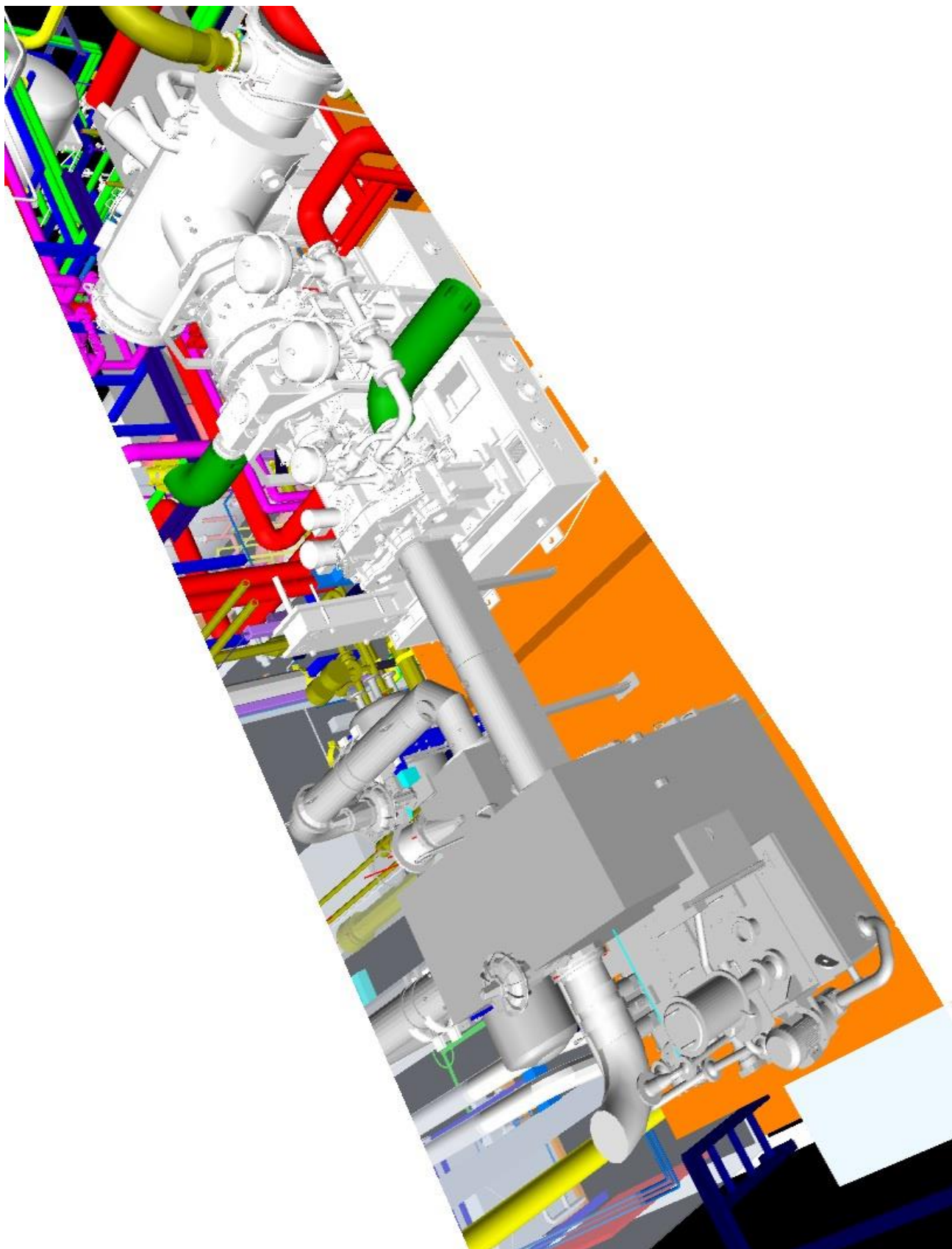


Rysunek 32 Projekt dwustopniowej sprężarki promieniowej z intercoolerem międzystopniowym



Rysunek 33 Wizualizacja projektowa dwustopniowej sprężarki z intercoolerm

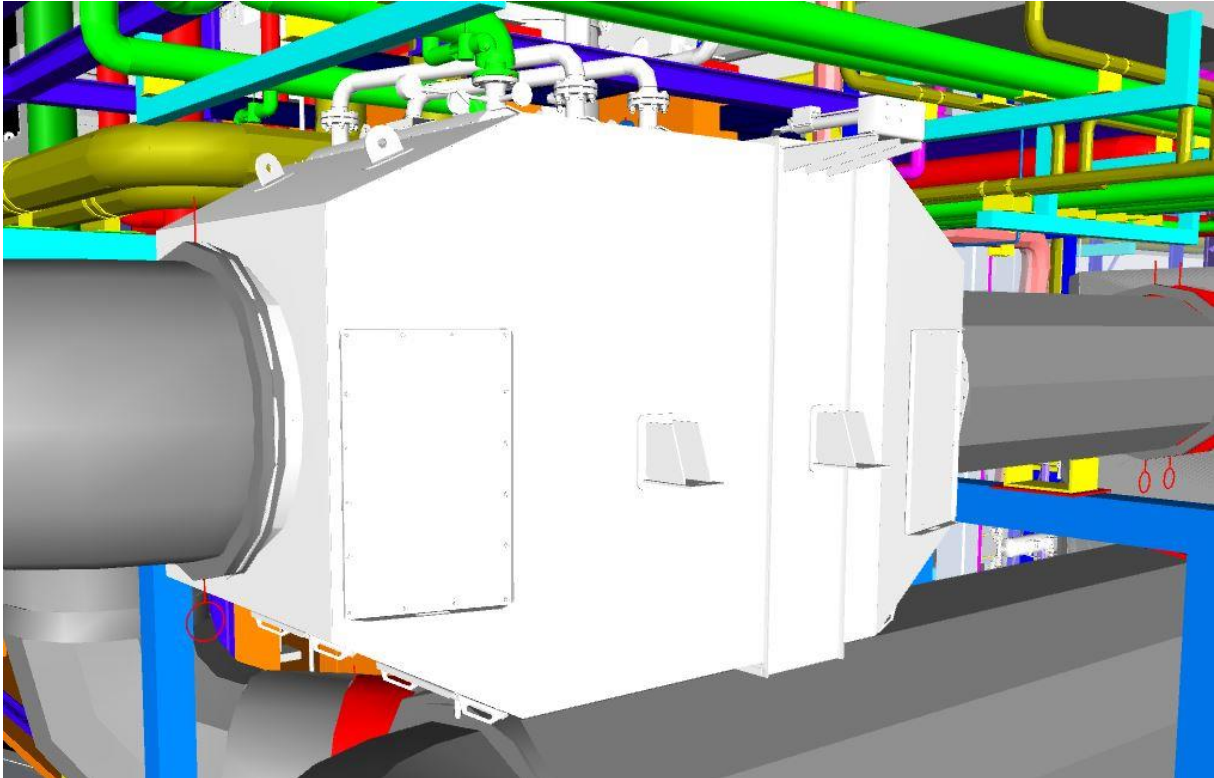
Na rysunku 34 przedstawiono połączony wałem układ turbiny parowej i promieniowej sprężarki dwustopniowej.



Rysunek 34 Wizualizacja projektowa dwustopniowej turbiny parowej z kondensatorem i dwustopniowej sprężarki promieniowej z intercoolerem połączone jednym wałem

8.2.3. System ciepłowniczy

Układ ciepłowniczy składa się z dwóch ekonomizerów E1 i E2, wymienników HE4.1 oraz HE4.2 za turbiną parową, pętli ciepłowniczej z pompami oraz przyłączy do wody sieciowej CO. Ekonomizer E1 (rysunek 35) jest usytuowany za wylotem spalin z kotła B1 dla wanień szklarskich 1 i 2. Celem jego działania jest podgrzewanie wody zasilającej kocioł B1 oraz dostarczanie ciepła do wody zasilającej, które za pomocą pompy następnie przekazywane jest do wymienników HE4.1 i 2.

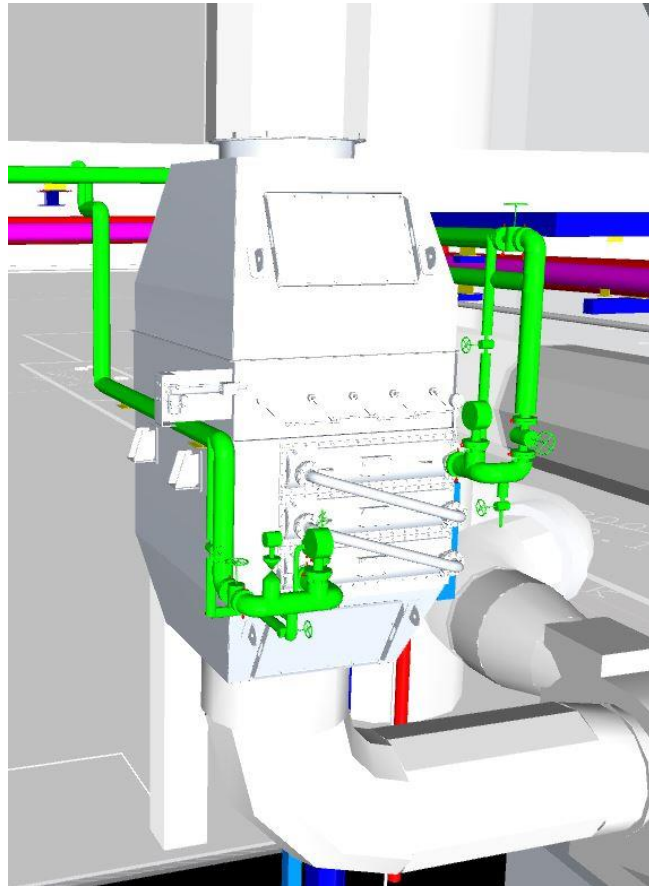


Rysunek 35 Wizualizacja projektowa ekonomizera E1 połączonego jednym kanałem spalin z kotłem odzyskowym B1

Ekonomizery są urządzeniami stosowanymi w systemach energetycznych, które mają na celu zwiększenie efektywności energetycznej poprzez odzyskiwanie ciepła z gorących gazów spalinowych. Zasada działania ekonomizera opiera się na wykorzystaniu ciepła zawartego w spalinach do podgrzewania medium – wody.

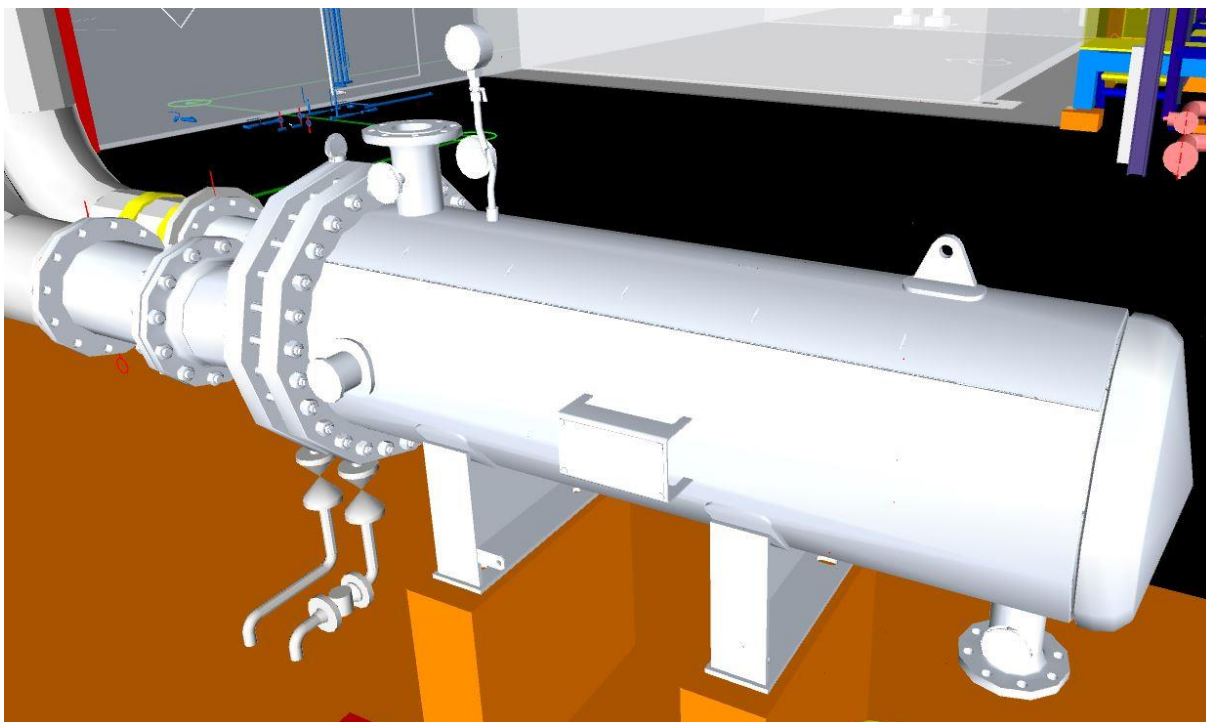
Gorące gazy spalinowe z kotła przemysłowego są kierowane przez ekonomizer. W ekonomizerze gazy przechodzą przez sieć rur, przez które przepływa woda. Rury te są zaprojektowane tak, aby maksymalizować powierzchnię kontaktu między gazami spalinowymi a wodą. Gazy spalinowe oddają ciepło do wody w rurach, co powoduje podgrzewanie wody. Podgrzana woda wykorzystywana jest na cele ogrzewania i przygotowania ciepłej wody

użytkowej na terenie huty. Gazy spalinowe, które straciły część swojego ciepła, są następnie odprowadzane z ekonomizera i kierowane do komina lub innego systemu odprowadzania spalin. Rysunek 36 prezentuje ekonomizer B2 połączony jednym kanałem spalin z kotłem odzyskowym B2 w celu zwiększenia efektywności odbioru energii cieplnej ze spalin.

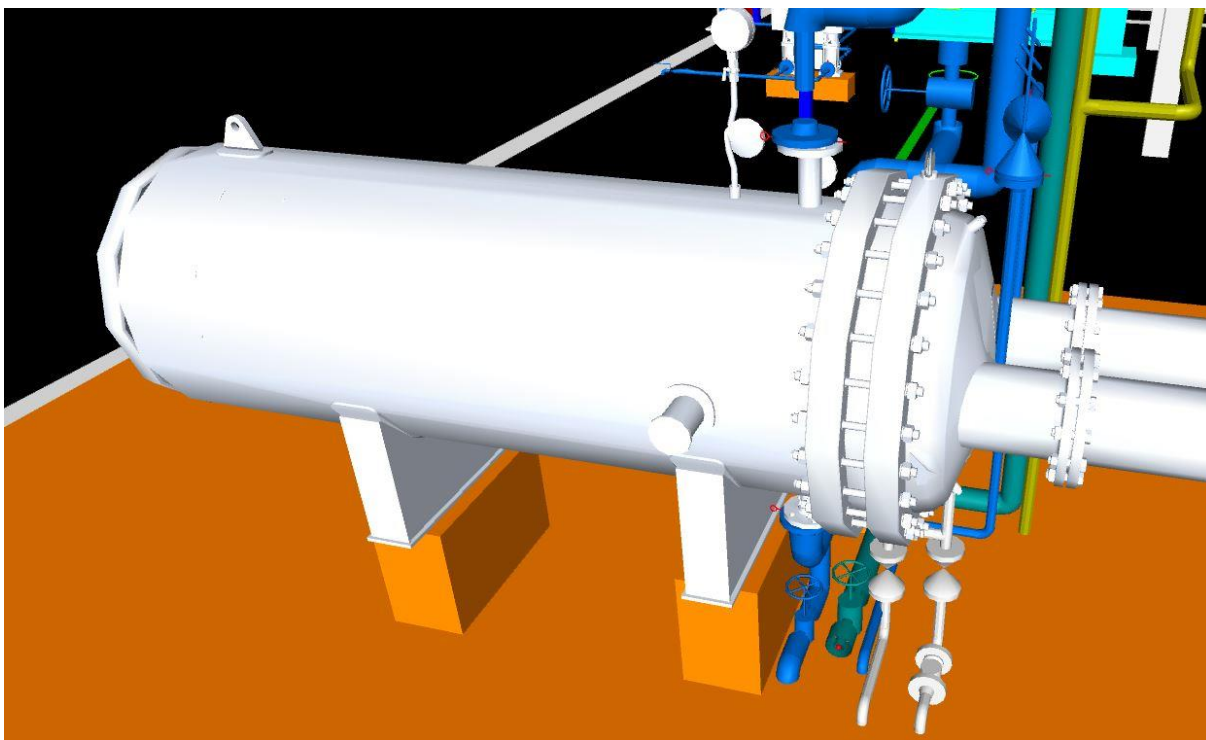


Rysunek 36 Wizualizacja projektowa ekonomizera E2 połączonego jednym kanałem spalin z kotłem odzyskowym B2

Woda zasilająca, wytworzona z odgazowanego kondensatu, zasila zarówno kotły odzyskowe B1 i B2, jak i kocioł rozruchowy. Woda zasilająca kocioł B1 i B2 przetłaczana jest pompami przez ekonomizer E1 oraz E2, a następnie rozdzielana na strumień kotłowy i w zamkniętej pętli ciepłowniczej odprowadzana jest do wymienników sieciowych HE4.1 i HE4.2 (rysunki 37 i 38). Schłodzona w w/w wymiennikach woda przepompowywana jest na wyjście pomp głównych.



Rysunek 37 Wizualizacja projektowa wymiennika ciepła HE4.1



Rysunek 38 Wizualizacja projektowa wymiennika ciepła HE4.2

Linia powrotna zakładowej sieci ciepłowniczej doprowadzona jest przez przyłącze do wymienników HE4.1 i HE4.2, gdzie jest ogrzewana, a następnie jako woda sieciowa zasilająca jest wyprowadzana przez to samo przyłącze.

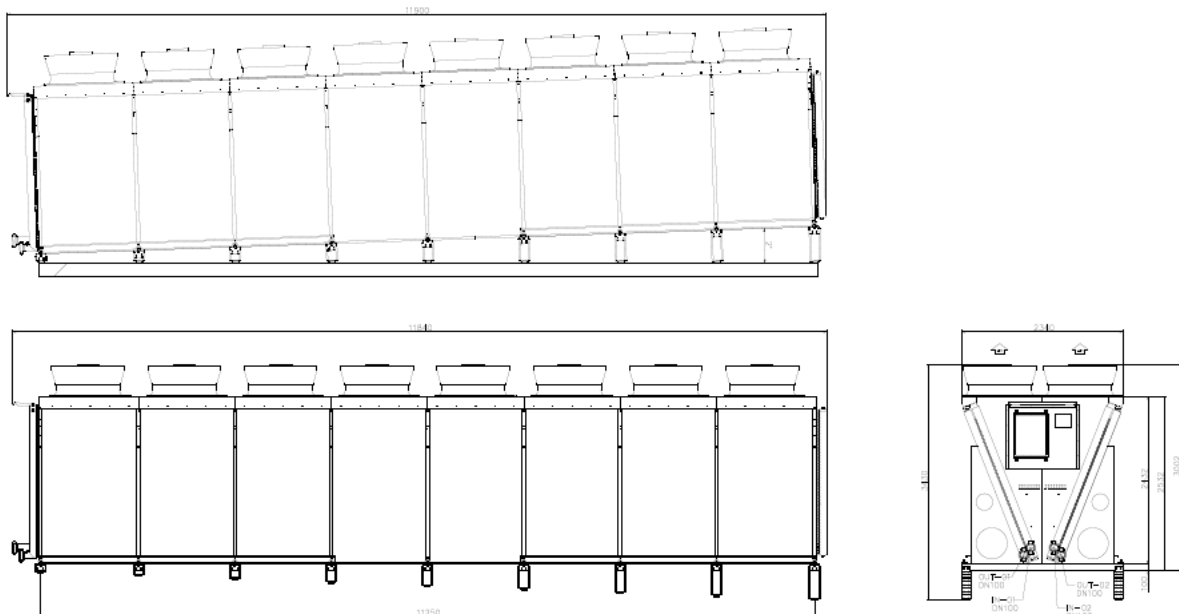
8.2.4. Systemy pomocnicze

8.2.4.1. System chłodniczy

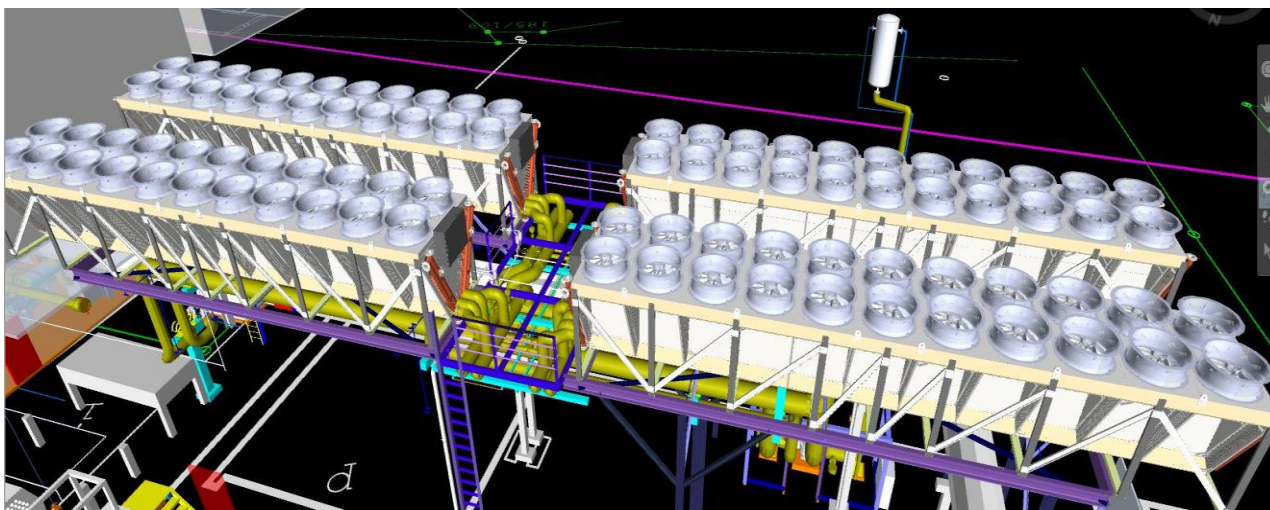
System chłodniczy jest tak zwanym systemem, w którym obieg wody chłodzącej jest zamknięty i wymaga tylko minimalnego uzupełniania strat. System chłodniczy odbiera ciepło z następujących urządzeń:

- kondensatora,
- chłodnicy pary z dławnic,
- układu próżniowego,
- zbiornika oleju turbiny,
- chłodnicy międzystopniowej sprężarki,
- chłodnicy oleju sprężarki,
- chłodnicy powietrza HE3.

Odebrane ciepło zostaje rozproszone do atmosfery za pomocą czterech chłodzi w wentylatorowych. Przepływ wody chłodzącej wymuszany jest jedną pompą obiegową o zmiennej wydajności. Rysunki 39 i 40 przedstawiają układ zaprojektowanej chłodni wentylatorowej V-kształtnej.



Rysunek 39 Projekt chłodni wentylatorowej



Rysunek 40 Wizualizacja projektowa chłodni wentylatorowej

Zastosowano V-kształtne wentylatorowe wymienniki ciepła, zwane również jako drycoolerami. Są to urządzenia służące do odbierania i odprowadzania ciepła z procesów przemysłowych za pomocą przepływu powietrza przez płaszczyznę wymiennika ciepła. Jest to typ chłodnicy powietrza, która wykorzystuje powietrze do odbierania ciepła z cieczy – w hucie medium stanowi woda - zamiast korzystać z procesu parowania, jak to ma miejsce w standardowych systemach chłodzenia. Dobrana chłodnia zbudowana jest z 4 segmentów po 16 wentylatorów, które zasysają zimne powietrze z zewnątrz, przepuszczają je przez wymiennik ciepła i wypuszczają na zewnątrz powietrze o podwyższonej temperaturze. Każdy segment dysponuje mocą chłodniczą 1348 kW i każdy może działać niezależnie, umożliwiając regulację procesu chłodzenia.

Tabela 15 Parametry techniczne pojedynczej chłodni wentylatorowej

Parametry pojedynczej chłodni:	Symbol	Wartość	Jednostka
Moc chłodnicza	Q	1348	kW
Medium	-	Woda	-
Obciążenie hydrauliczne	V_{fluid}	128,6	m^3/h
Spadek ciśnienia	Δp	27,1	kPa
Temperatura medium na wlocie	$t_{\text{fluid in}}$	39,1	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura medium na wylocie	$t_{\text{fluid out}}$	30,0	$^{\circ}\text{C}$
Przepływ powietrza	V_{air}	504 625,0	m^3/h
Temperatura powietrza na wlocie	$t_{\text{air in}}$	27,0	$^{\circ}\text{C}$
Wilgotność względna powietrza na wlocie	φ	50	%

Zraszanie mgiełką wodną jest techniką stosowaną do zwiększenia wydajności drycoolerów, szczególnie w gorące dni. Działa to na zasadzie zwiększenia parowania na powierzchni wymiennika ciepła, co pozwala na odbieranie większej ilości ciepła od cieczy przepływającej przez wymiennik. Mgiełka wodna jest rozpylana na powierzchnię wymiennika ciepła, a jej parowanie wymaga ciepła, co prowadzi do dodatkowego schłodzenia powietrza przepływającego przez wymiennik. Pozwala to na zwiększenie wydajności chłodzenia drycoolera, zwłaszcza w okresach wysokich temperatur zewnętrznych.

Ta technika wymaga dodatkowej wody i może prowadzić do osadzania się minerałów na powierzchni wymiennika ciepła, co z czasem może zmniejszyć wydajność urządzenia. Dlatego konieczne jest regularne czyszczenie i konserwacja wymiennika, aby zapewnić jego skuteczną pracę. Dla jeszcze bezpieczniejszej i skutecznej pracy w chłodniach wentylatorowych wykorzystuje się zdemineralizowaną wodę z systemu uzdatniania wody.

8.2.4.2. System uzdatniania wody

Stacja uzdatniania wody to kompleksowe urządzenie, które wykorzystuje zaawansowane technologie i procesy do oczyszczania wody z różnorodnych zanieczyszczeń. Zaprojektowana stacja uzdatniania składa się z elementów, które pracują razem, aby zapewnić dostarczanie czystej, bezpiecznej dla użytkowników końcowych wody.

Pierwszym etapem technologii uzdatniania wody jest filtracja na filtrze wstępnym z płukaniem wstecznym EPURION A25-2 o progu filtracji 300 μm . Celem filtracji jest usuwanie z wody głównego ładunku zanieczyszczeń mechanicznych takich jak rdza (żelazo utlenione) oraz innych drobnych cząstek i zawiesin stałych typowych dla instalacji wodociągowych.

Woda po procesie wstępnej filtracji trafia na zmiękczacze jonowymienny. Zmiękczenie wody jest realizowane na drodze wymiany jonowej w kationitach silnie kwasowych regenerowanych w cyklu sodowym, w których zostaje usunięta twardość ogólna do poziomu $<0,1$ OdH. Zastosowano układ 2-kolumnowy EPUROTECH 50/050 DF (DUPLEX), w którym 1 kolumna jest w pracy, podczas gdy 2 kolumna pozostaje w trybie regeneracji lub oczekiwania na pracę. Pojedynczy filtr jest zbiornikiem wykonanym z tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem szklanym wypełnionym monodispersyjną żywicą jonowymienną. W pojedynczej kolumnie znajduje się 50 l złoża (żywica monosferczna produkcji Lanxess). Praca filtra jest w pełni zautomatyzowana poprzez działanie głowicy sterującej. Nominalna wydajność systemu zmiękczającego wynosi 1,7 m^3/h przy twardości wypadkowej 0,1 OdH.

Po procesie zmiękczenia jonowymiennego woda trafia na filtry mechaniczne na wymienne wkłady o progu filtracji 25 μm . Celem tej operacji jest zatrzymanie drobinek złoża, które mogą wydobywać się z kolumn systemu jonowymiennego w razie wystąpienia awarii stacji zmiękczenia wody.

Zadaniem filtracji z węglem aktywnym jest zabezpieczenie membrany osmozera przed destrukcyjnym działaniem wolnego chloru stosowanego do dezynfekcji wody. Dechloracja jest prowadzona metodą wymiany wkładów filtracyjnych z prasowanym węglem.

Po procesie dechloracji woda trafia na filtry antykoloidowe z wkładami filtracyjnym z polipropylenu prasowanego o progu filtracji 1 μm . Stosowanie filtrów o malejącym progu filtracji do poziomu 1 μm ma na celu zatrzymanie jak największej ilości zanieczyszczeń mogących zatykać membrany osmozera. Chroni to membrany osmozy przed uszkodzeniem i skutecznie redukuje okresowe operacje ich czyszczenia.

Po przejściu przez filtry antykoloidowe woda dostaje się na filtr jednostopniowej odwróconej osmozy. W procesie tym woda pod wysokim ciśnieniem przetłaczana jest przez syntetyczne błony półprzepuszczalne. W wyniku działania ciśnienia, przez mikrootwory w błonie półprzepuszczalnej, może przedostać się wyłącznie woda pozbawiona soli mineralnych. Tak uzdatniona woda nazywana jest permeatem. Skoncentrowane sole i inne zanieczyszczenia zatrzymane na błonie zostają usunięte w postaci tzw. koncentratu. Proporcję, w jakiej uzyskuje się permeat w stosunku do wody zasilającej, nazywa się stopniem przemiany (sprawnością). Zaprojektowany system charakteryzuje się następującym stopniem przemiany: 70 – 75%. Wydajność urządzenia odwróconej osmozy wynosi 0,6 m^3/h . Urządzenie pracuje w oparciu o sygnał poziomu wody ze zbiornika magazynowego.

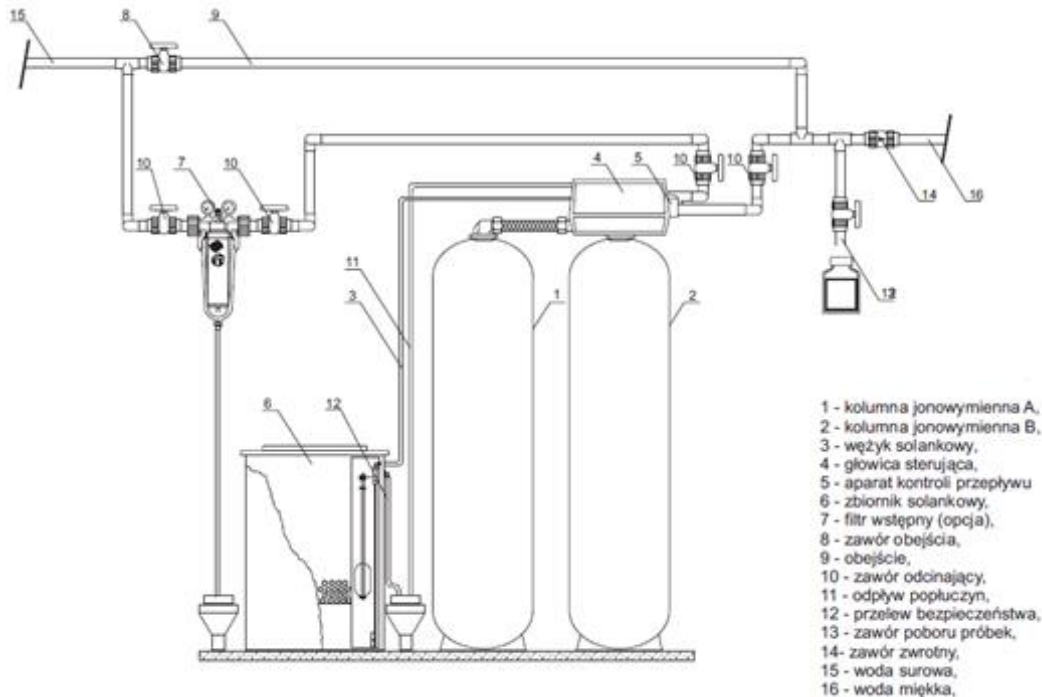
Woda po procesie demineralizacji kierowana jest do zbiornika magazynowego o pojemności 3 m^3 , skąd trafia do ZWZ pod odgazowywaczem gdzie zostaje poddana procesowi korekty chemicznej. Zadaniem systemu do dozowania inhibitorów korozji jest zabezpieczenie instalacji kotła parowego przed korozją oraz osadami.

Dozowane inhibitory spełniają następujące funkcje:

- Modyfikują strukturę krystaliczną trudno rozpuszczalnych soli, które tracą zdolność przylegania do powierzchni metali, są absorbowane przez polimery i usuwane w procesie odmulania kotła; zjawisko to pozwala również na rozluźnianie i stopniowe usuwanie istniejących osadów w trakcie normalnej eksploatacji kotła,
- Wspomagają tworzenie magnetytowej warstwy ochronnej,
- Neutralizują dwutlenek węgla w wodzie zasilającej i w kondensacie,

- Tworzą monomolekularny film pomiędzy metalem i wodą, który uniemożliwia przebieg reakcji korozji.

Kompletna stacja dozująca składa się z pompy dozującej, sondy wtryskowej na wodę zimną oraz zasobnika na preparat (rysunek 41).



Rysunek 41 Stacja uzdatniania wody

Woda surowa wodociągowa z istniejącej instalacji jest demineralizowana w stacji uzdatniania wody, a następnie magazynowana jest w zbiorniku. Ze zbiornika woda zdemineralizowana pompowana jest za pomocą pomp w celu napełnienia lub uzupełnienia ilości wody znajdującej się w obiegach wody zasilającej i chłodzącej. Woda ze stacji uzdatniania za pomocą pomp obiegowych doprowadzona jest do kondensatora, układu próżniowego, odgazowywacza oraz zbiornika wyrównawczego wody chłodzącej.

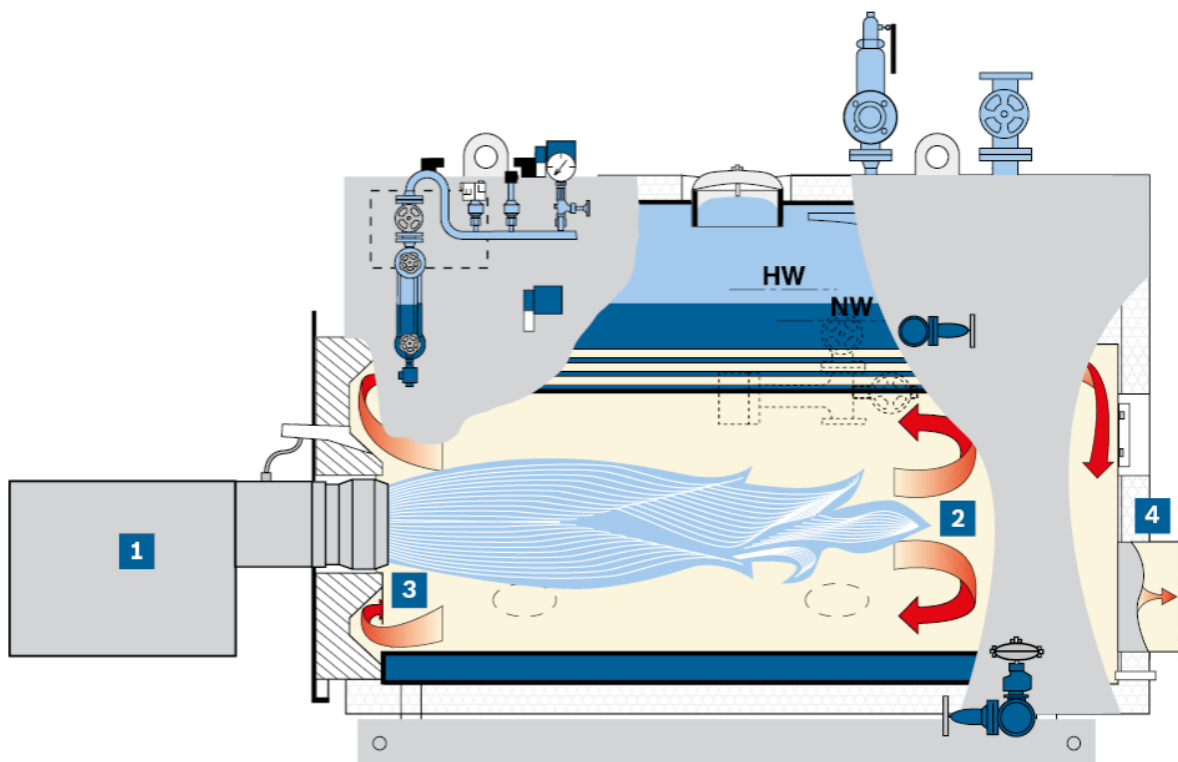
8.2.4.3. System rozgrzewu kotłów

Kocioł gazowy służy do produkcji pary, umożliwia prawidłowe i stabilne uruchomienie kotłów odzyskowych i w tym kontekście, kocioł gazowy pełni rolę kotła rozgrzewu. Rysunki 42 i 43 prezentują przekrój i wizualizację kotła gazowego rozgrzewu kotłów odzyskowych.

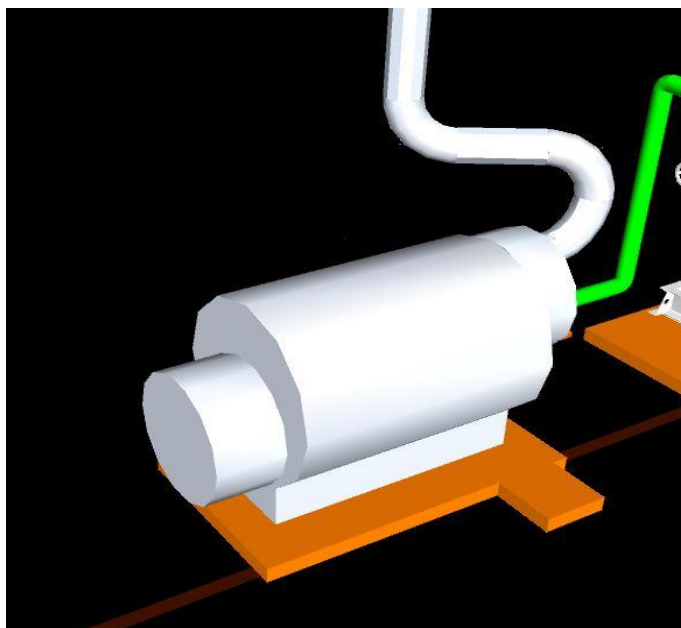
Gaz zasilający kocioł jest spalany w komorze spalania, co generuje ciepło. To ciepło jest następnie wykorzystywane do podgrzewania wody wewnątrz kotła, co prowadzi do powstania pary, która pod ciśnieniem jest następnie dostarczana do kotłów odzyskowych.

Kotły odzyskowe pracują zwykle przy wysokich ciśnieniach i temperaturach, aby maksymalnie wykorzystać ciepło odzyskane ze spalin pochodzących z procesu topienia szkła w piecach szklarskich. Jednakże, są one także narażone na szoki termiczne, które mogą powodować uszkodzenia mechaniczne czy korozję. Szoki termiczne mogą nastąpić, gdy kocioł jest zbyt szybko podgrzewany z niskiej temperatury do bardzo wysokiej. Dlatego kocioł gazowy jest wykorzystywany do stopniowego podgrzewania kotłów odzyskowych do minimalnych parametrów dopuszczalnej pracy. Para z kotła gazowego jest wprowadzana do kotłów odzyskowych, aby stopniowo zwiększyć ich temperaturę i ciśnienie, zanim rozpoczną one pracę z pełnym obciążeniem. To pomaga uniknąć szoków termicznych i związanych z nimi uszkodzeń.

Kocioł gazowy o mocy 273 kW, który jest w stanie wyprodukować 400 kg pary na godzinę przy maksymalnym ciśnieniu 12 barów, dostarcza odpowiednią ilość pary do stopniowego podgrzewania kotłów odzyskowych. Wszystko to prowadzi do bardziej efektywnej i bezpiecznej pracy całego systemu.



Rysunek 42 Przekrój kotła gazowego do rozgrzewu, 1 – Palnik, 2 - Wewnętrzna komora nawrotna spalin, 3 - Przednia komora nawrotna spalin, 4 - Wylot spalin z kotła



Rysunek 43 Wizualizacja projektowa kotła gazowego do rozgrzewu kotłów odzyskowych

8.3. Bilans cieplny wdrożonego Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego

8.3.1. Analiza termodynamiczna - bilanse cieplne

Analizę termodynamiczną systemu odzysku ciepła odpadowego w hucie szkła przeprowadzono z wykorzystaniem programu IPSEpro.

W ciągu całego procesu, doktorant systematycznie integrował dane poszczególnych urządzeń systemu odzysku ciepła z analizą termodynamiczną w IPSE. Dzięki temu mógł weryfikować, czy planowane parametry energetyczne są osiągalne oraz czy spełnione zostaną założenia projektowe. Ważnym elementem tej pracy było zestawienie założeń projektowych z rzeczywistymi osiąganiami systemu po jego uruchomieniu. Takie bilanse cieplne pozwalały na wprowadzanie koniecznych korekt oraz usprawnień, a także miały bezpośredni wpływ na wybór konkretnych urządzeń. Decyzje te opierały się głównie na dostarczanej przez producentów dokumentacji technicznej.

IPSEpro to wszechstronne oprogramowanie do tworzenia symulacji i analizy obiegów energetycznych. Stworzone z myślą o inżynierach i ekspertach branży energetycznej, umożliwia dokładne modelowanie i analizę różnorodnych systemów, począwszy od tradycyjnych elektrowni opalanych węglem, przez elektrownie gazowe, a skończywszy na instalacjach wykorzystujących odnawialne źródła energii.

Dynamiczny rozwój narzędzi i systemów informatycznych dla energetyki jest odpowiedzią na rosnące potrzeby nadzorowania procesów przemysłowych, projektowania i optymalizacji istniejących systemów. Program IPSE GO pozwala użytkownikom na wyznaczanie niemierzonych parametrów eksploatacyjnych, bilansowanie obiegów energetycznych i dogłębne rozumienie procesów w układzie dzięki możliwości modyfikacji wybranych fragmentów systemu.

Kluczową funkcją IPSE GO jest symulacja kluczowych procesów w jednym zintegrowanym środowisku, eliminując potrzebę przenoszenia danych między różnymi narzędziami. Użytkownicy mają możliwość wyznaczania niemierzonych parametrów eksploatacyjnych, przeprowadzania bilansowania obiegów energetycznych, symulowania różnych stanów pracy elektrowni, a także przeprowadzania analiz termodynamicznych złożonych obiegów. Ponadto, IPSE GO pozwala na symulację różnych konfiguracji pracy układu, co prowadzi do poprawy wybranych parametrów pracy.

Jednym z najbardziej unikatowych aspektów IPSE GO jest jego elastyczność. Użytkownicy mogą zdefiniować własne równania i modele, dostosowując je do specyficznych potrzeb. Metodologia modelowania w programie obejmuje trzy kluczowe etapy. W pierwszym etapie użytkownik wybiera odpowiednie komponenty modeli fizycznych maszyn i urządzeń dostępnych w programie. W drugim etapie, te komponenty są odpowiednio łączone, aby stworzyć kompleksowy model systemu. W trzecim etapie użytkownik definiuje podstawowe dane wejściowe oraz charakterystyki maszyn i urządzeń, co pozwala na dokładną symulację i analizę [64].

Korzystając z IPSE GO, można przeprowadzać analizy techniczne, regulować parametry pracy układu, analizować termodynamikę złożonych obiegów energetycznych i dokonywać wyboru odpowiednich parametrów urządzeń już na etapie projektowania. Niemniej jednak, tworzenie własnego modelu systemu energetycznego to skomplikowany proces, wymagający dużego nakładu czasu oraz wiedzy niezbędnej do zweryfikowania najważniejszych założeń oraz walidacji wyników obliczeń.

IPSE GO w swoich bibliotekach obiegów energetycznych korzysta z IAPWS_IF97, co oznacza "Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam" (Przemysłowa Formuła 1997 dla Termodynamicznych Właściwości Wody i Pary Wodnej), opracowana przez Międzynarodowe Stowarzyszenie dla Właściwości Wody i Pary Wodnej (IAPWS) [65].

Analizę termodynamiczną dla wdrożonego systemu odzysku ciepła wykonano na modelu stworzonego na podstawie parametrów zawartych w dokumentacji technicznej

wszystkich urządzeń składających się na WHRS. Model posłużył do wykonania analizy termodynamicznych dla ośmiu różnych warunków pracy systemu, tj.:

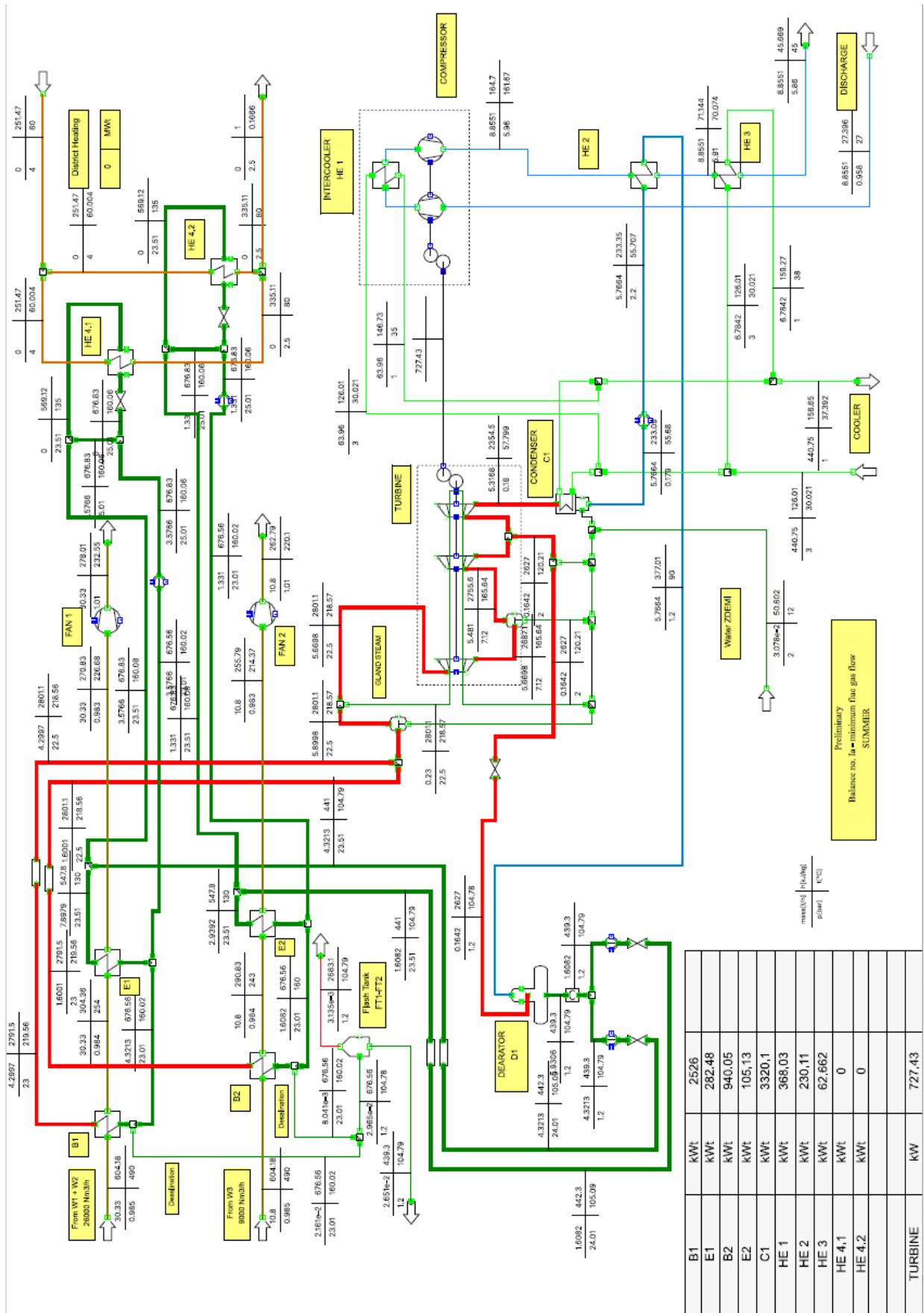
1. Dla minimalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach letnich,
2. Dla minimalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach zimowych, kiedy zapotrzebowanie na odzysk ciepła na cele grzewcze jest największe,
3. Dla nominalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach letnich,
4. Dla nominalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach zimowych, kiedy zapotrzebowanie na odzysk ciepła na cele grzewcze jest największe,
5. Dla maksymalnego przepływu spalin z wanien szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach letnich,
6. Dla maksymalnego przepływu spalin z wanien szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach zimowych, kiedy zapotrzebowanie na odzysk ciepła na cele grzewcze jest największe,
7. Dla maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach letnich,
8. Dla maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach zimowych, kiedy zapotrzebowanie na odzysk ciepła na cele grzewcze jest największe.

Wybór tych ośmiu wariantów wynika z potrzeby dokładnej analizy działania systemu WHRS w różnych warunkach eksploatacji. W celu całkowitego przeanalizowania możliwości rozruchu turbiny parowej, połączonej z kompresorem, do różnorodnych scenariuszy. Zarówno warunki pogodowe, jak i zmienne parametry pracy kotłów odzyskowych przy różnym obciążeniu strumieniem spalin z wanien szklarskich mają kluczowy wpływ na efektywność systemu. Uwzględnienie tych wariantów pozwala na holistyczną ocenę systemu i zapewnienie jego optymalnej pracy przez cały rok. Poniżej zestawiono wszystkie zmienne uwzględnione w kalkulowanych wariantach pracy:

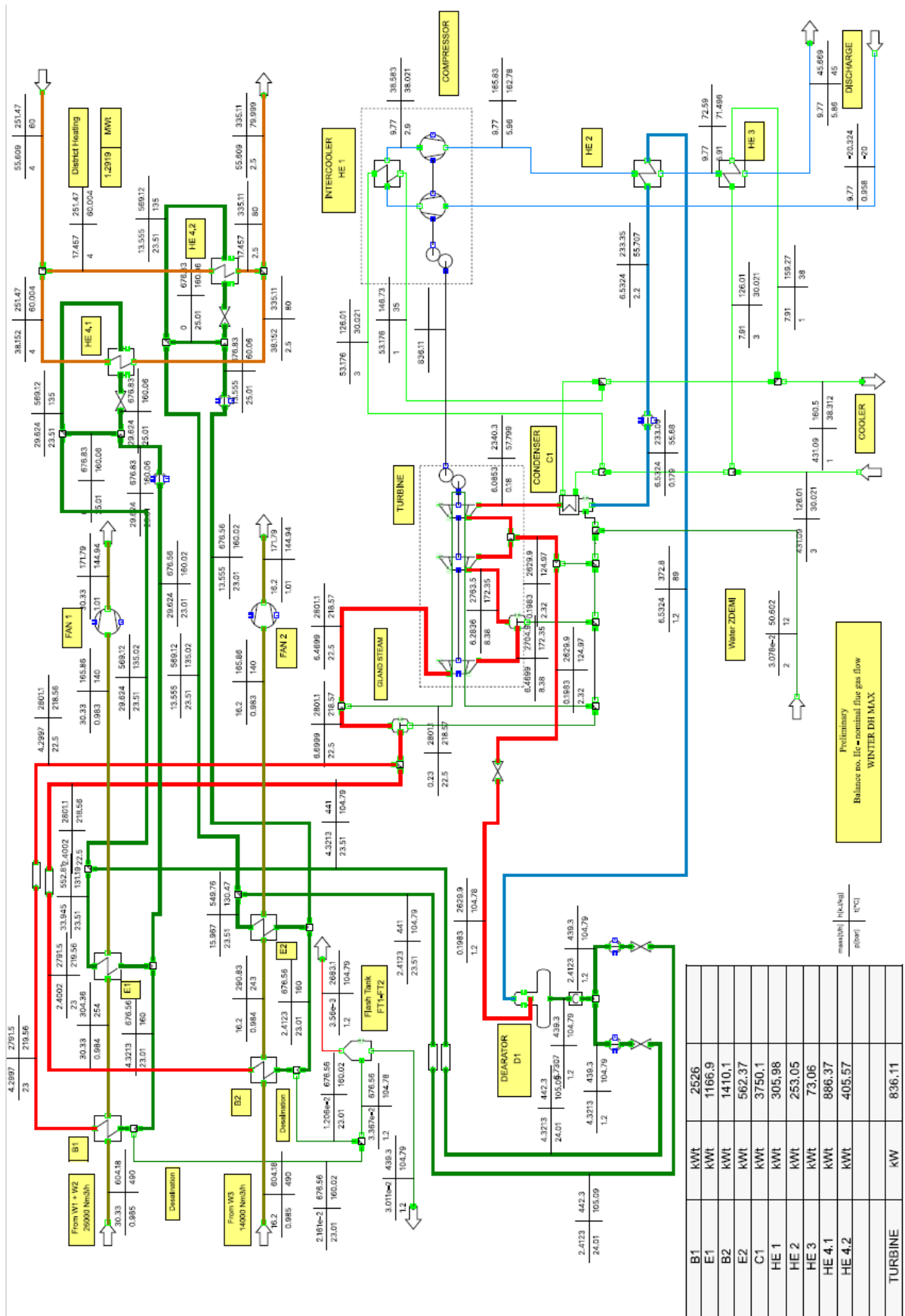
- Warunki letnie vs warunki zimowe: W zależności od sezonu rokrocznie mamy do czynienia z różnym zapotrzebowaniem na ciepło, a także z różnicami w właściwościach spalin. W zimie, zwiększone zapotrzebowanie na odzysk ciepła ma zastosowanie głównie do celów grzewczych, stąd analiza dla tych dwóch ekstremów jest kluczowa.
- Przepływ spalin: Analizując trzy poziomy przepływu spalin (minimalny, nominalny, maksymalny) uzyskuje się pełen obraz funkcjonowania systemu przy różnych obciążeniach.

- Różne źródła spalin: dla trzech różnych wanień szklarskich W1, W2 i W3 istnieje różnica w warunkach produkcji szkła, jakości spalin czy też poziomie obciążenia. Każde źródło spalin może wpływać na system odzysku ciepła inaczej, dlatego analizuje się je oddzielnie.
- Założenia do obliczeń:
 - Parametry spalin: Przyjęto wartości bazujące na danych z dokumentacji technicznej oraz pomiarów rzeczywistych. Dotyczy to zarówno temperatury, ciśnienia, składu chemicznego spalin, wilgotności oraz przepływu.
 - Właściwości cieplne urządzeń: Parametry takie jak sprawność kotłów, przewodnictwo cieplne materiałów, czy też opory cieplne są kluczowe dla analizy. Bazują one na specyfikacjach producenta.
 - Warunki zewnętrzne: Przyjęto średnie wartości temperatur dla warunków letnich i zimowych w lokalizacji huty.
 - Zapotrzebowanie na ciepło: Bazuje na danych historycznych dotyczących zużycia energii w hucie oraz prognozach na przyszłość. Uwzględnia różnice w zapotrzebowaniu w zależności od pory roku.
 - Parametry pracy wanień szklarskich: Obejmuje temperatury, ciśnienie, wielkość wytopu, zużycie gazu ziemnego, wykorzystanie powietrza do spalania i skład spalin dla każdej z wanień, mające główny wpływ na parametry spalin wydostających się z pieca do komina.

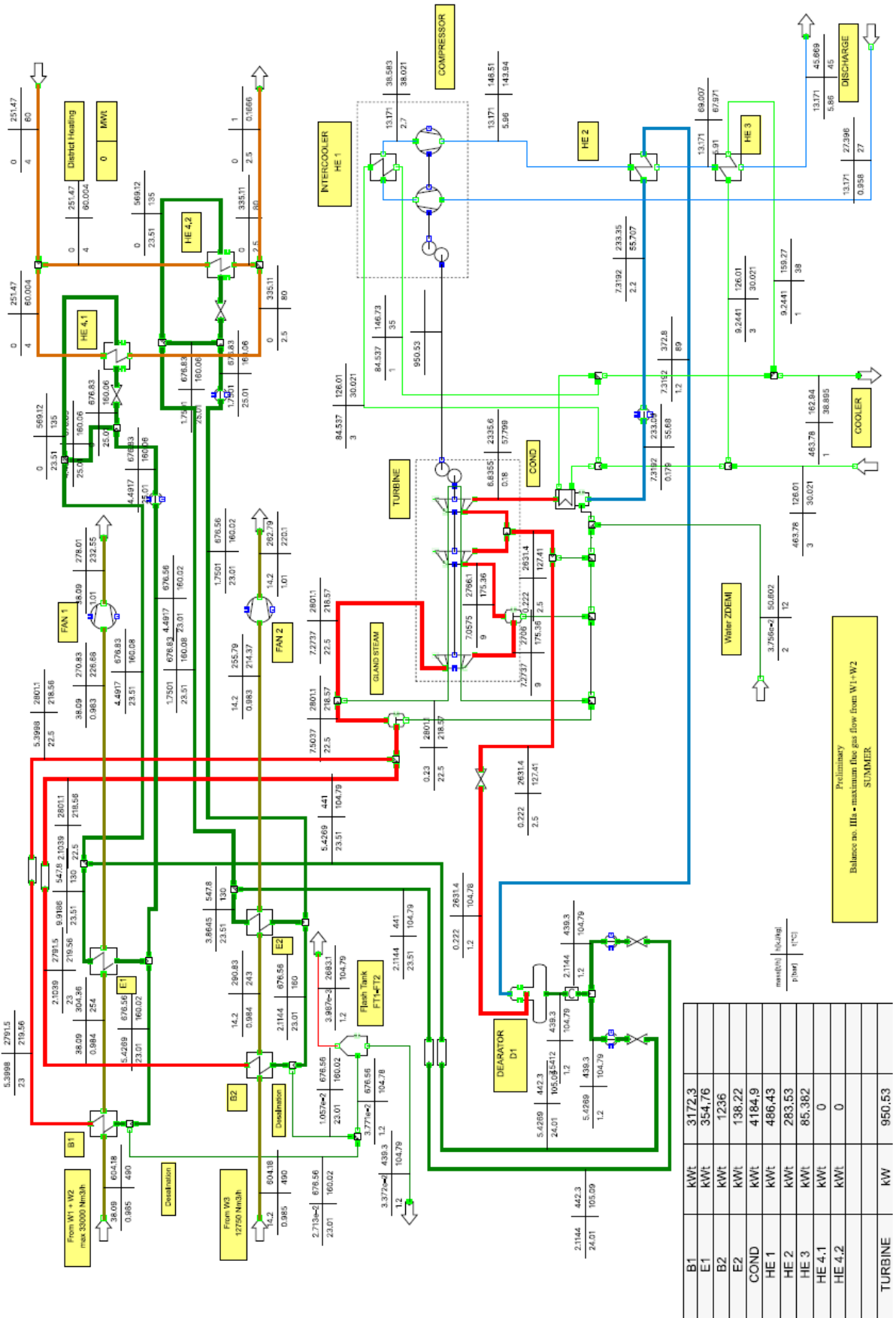
Wszystkie powyższe założenia są kluczowe dla dokładnej analizy termodynamicznej systemu WHRS. Dokładne wartości tych parametrów zależą od konkretnej instalacji, specyfiki lokalnej huty oraz dostępnych danych z pomiarów i dokumentacji technicznej. Poniżej załączono wyciągi zaprojektowanego modelu obiegu energetycznego systemu WHRS dla przytoczonych ośmiu warunków pracy systemu wraz z wynikami obliczeniowymi:



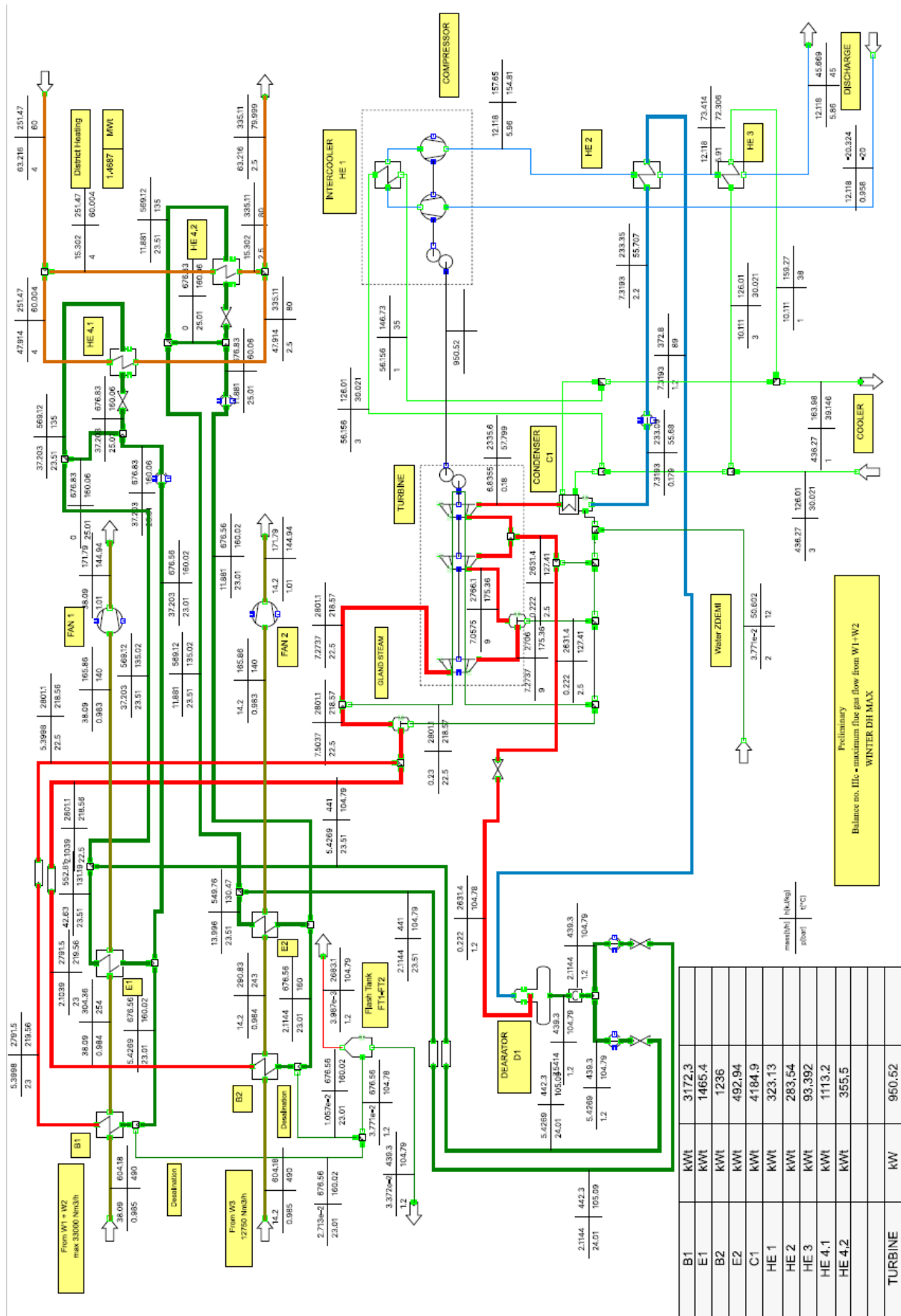
Rysunek 44 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu minimalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach letnich



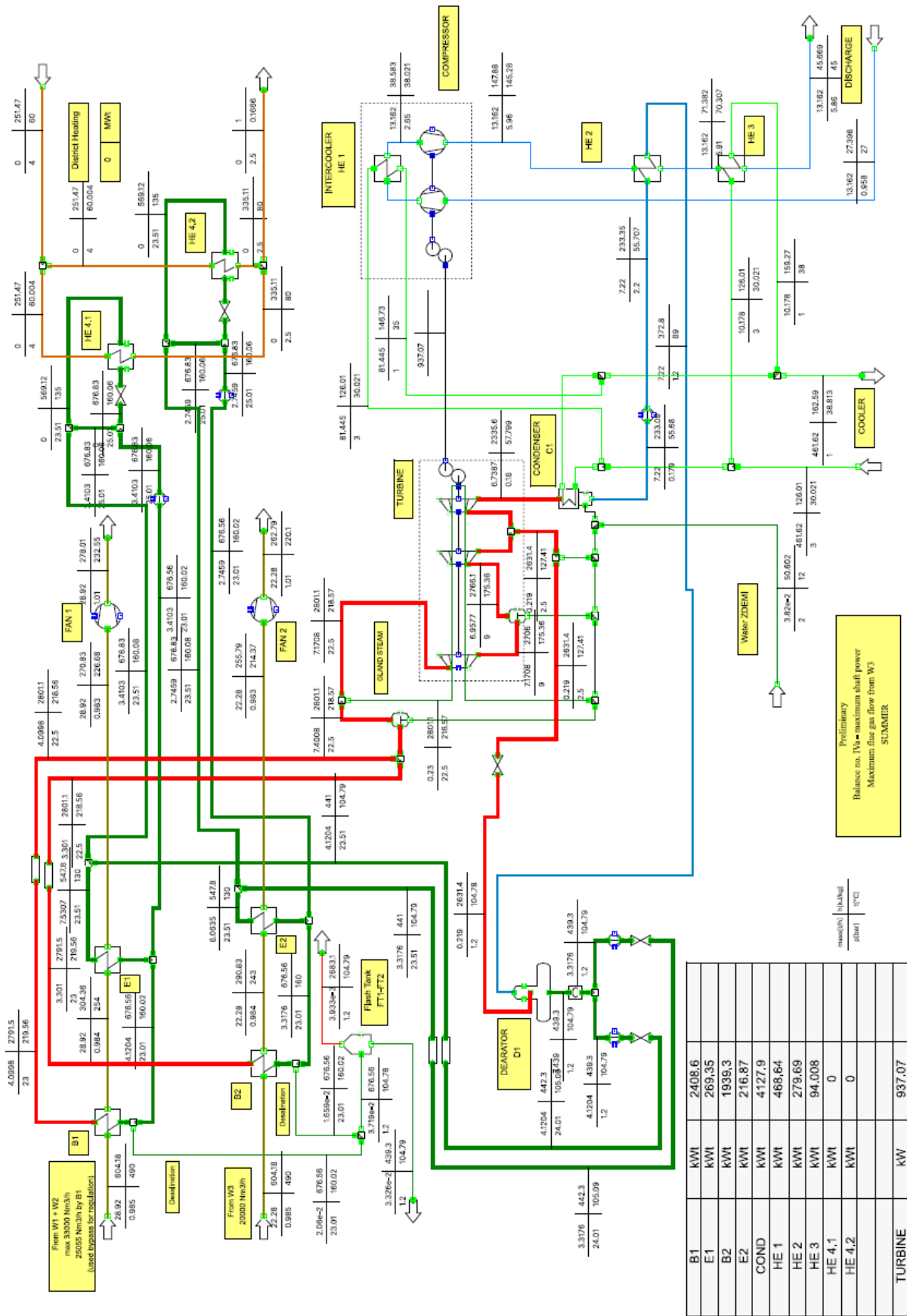
Rysunek 47 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu nominalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach zimowych



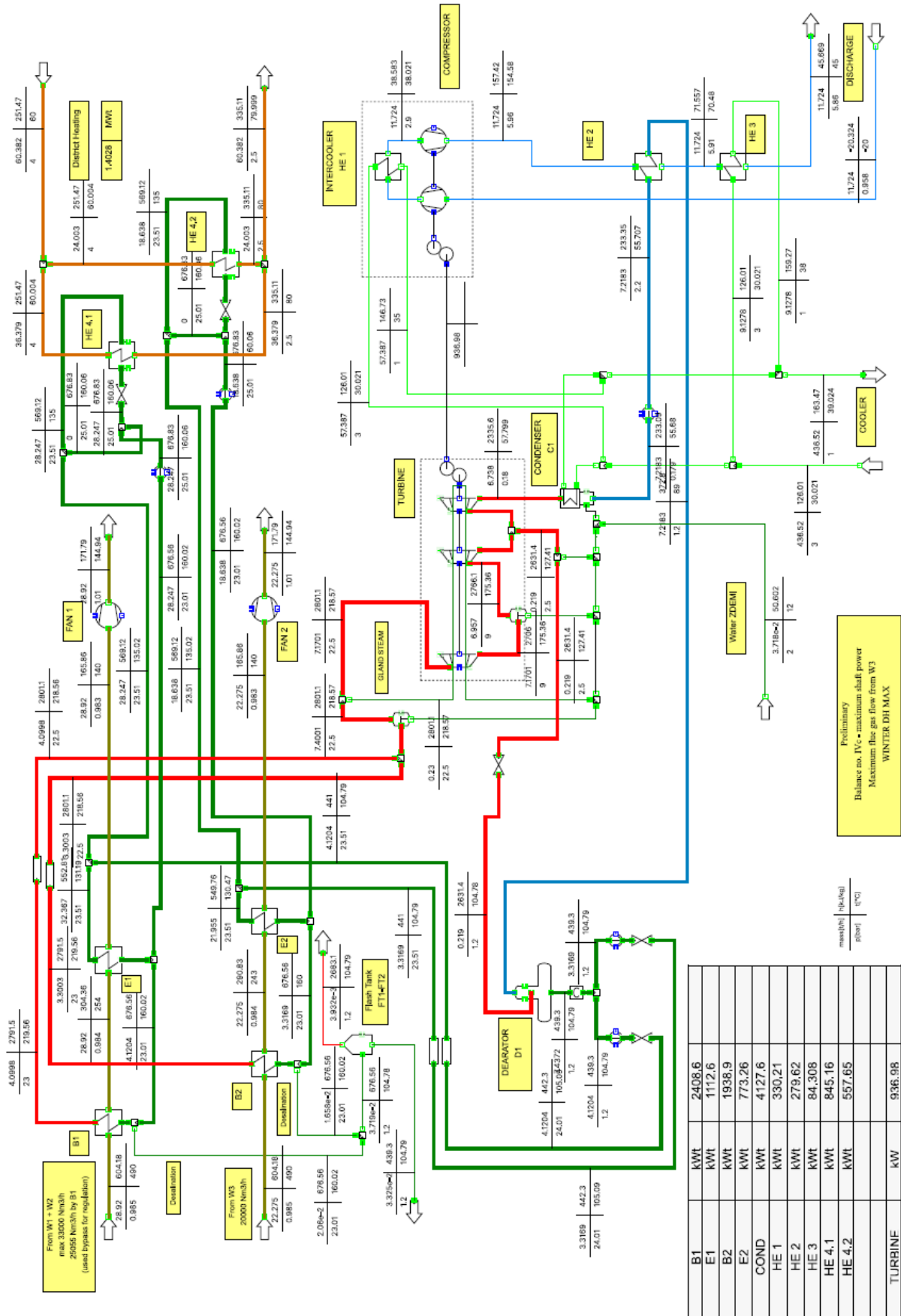
Rysunek 48 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanien szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach letnich



Rysunek 49 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanieli szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach zimowych



Rysunek 50 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach letnich



Preliminary
Balance no. 11°C - maximum shaft power
Maximum flue gas flow from W3
WINTER DH MAX

max(h) [°C/kg]
p(h) [bar]

B1	KWT	2408.6
E1	KWT	1112.6
B2	KWT	1938.9
E2	KWT	773.26
COND	KWT	4127.6
HE 1	KWT	330.21
HE 2	KWT	279.62
HE 3	KWT	84.308
HE 4.1	KWT	845.16
HE 4.2	KWT	557.65
TURBINE	KW	936.98

Rysunek 51 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach zimowych

8.3.2. Pomiar i obliczenia zmniejszenia zużycia energii

Po uruchomieniu systemu WHRS, głównym zadaniem doktoranta było monitorowanie osiąganego zmniejszenia zużycia energii. Wykorzystując system EMS, doktorant śledził rzeczywiste parametry pracy WHRS oraz analizował efektywność energetyczną całego systemu. Prace te były nie tylko odpowiedzią na techniczne wymogi projektu, ale także wpisywały się w cele CSR (ang. Corporate Social Responsibility) huty, dążącej do zrównoważonego i odpowiedzialnego rozwoju. Monitoring i analiza danych umożliwiły doktorantowi wyciąganie wniosków na temat rzeczywistej skuteczności systemu WHRS, a także proponowanie dalszych kierunków optymalizacji w celu maksymalizacji korzyści energetycznych. Obliczenia doktoranta były nie tylko korzystne dla huty, ale również dla niego samego. Projekt WHRS dostarczył mu cennego doświadczenia praktycznego oraz umożliwił zdobycie głębokiej wiedzy na temat najnowszych technologii i rozwiązań w zakresie odzysku ciepła, pozwalających opisać je w rozprawie doktorskiej.

Do obliczeń generowanych oszczędności przez system odzysku ciepła na cele pracy doktorskiej ustalono rok bazowy. Rok bazowy to średnia wartość parametrów operacyjnych i kosztowych z lat 2019 i 2021, uwzględniająca zużycie mediów energetycznych, koszty surowców oraz emisje dwutlenku węgla, przy założeniu ciągłej pracy systemu odzysku ciepła w obu wymienionych latach. Pomiar pracy i generowanych oszczędności systemu odzysku ciepła wykonano na podstawie danych pomiarowych zapisanych w bazach danych i wizualizowanych we wdrożonym Systemie Zarządzania Mediami Energetycznymi.

W tabelach 16 i 17 przedstawiono dane przepływu sprężonego powietrza wytworzonego przez dwustopniowy kompresor promieniowy z WHRS, całkowite zapotrzebowanie elektryczne systemu odzysku ciepła oraz pobór energii elektrycznej tradycyjnych sprężarek śrubowych podłączonych do tego samego kolektora sprężonego powietrza, do którego napływa sprężone powietrze z WHRS. Podczas pracy turbokompresora nadmiar sprężonego powietrza i podniesienie się ciśnienia w sieci sprężonego powietrza powoduje wyłączanie się tradycyjnych sprężarek, co od razu przekłada się na zmniejszenie zużycia energii z powodu braku poboru energii elektrycznej przez te urządzenia. Tabela 16 stanowi fragment danych wygenerowanych z bazy danych dla rozdzielczości jednogodzinowej dla roku bazowego w warunkach pracującej turbiny ze sprężarką systemu WHR, natomiast Tabela 17 prezentuje fragment danych w tabeli dla sytuacji w której system WHR jest wyłączony.

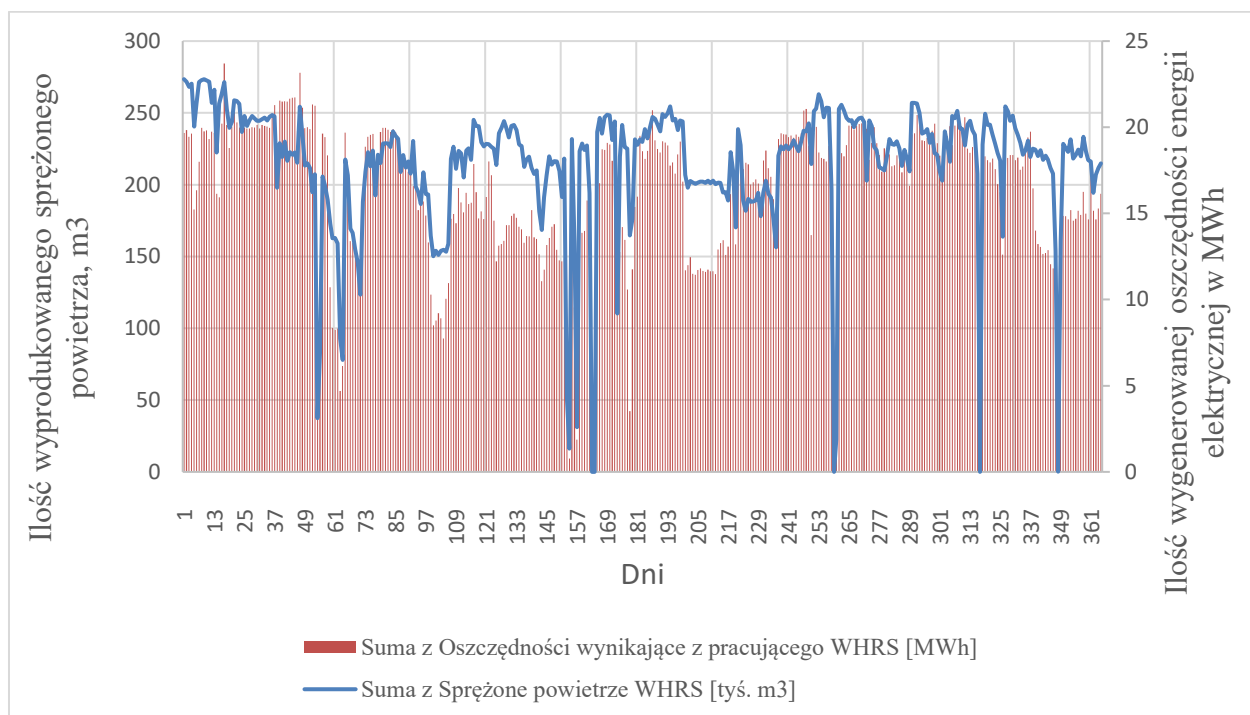
Tabela 16 Fragment danych wygenerowanych z bazy danych EMS dla rozdzielczości godzinowej dla roku bazowego w warunkach pracującej turbiny ze sprężarką systemu WHR

Zapis godzinowy	Sprężone powietrze WHRS, m3	W2_Sprężarka 1, kWh	W2_Sprężarka 2, kWh	W2_Sprężarka 3, kWh	W3_Sprężarka 2, kWh	W3_Sprężarka 3, kWh	Szafa OC WHRS, kWh	SUMA zużycia energii elektrycznej przez kompresory tradycyjne, kWh
50	11364	0	0	221	329	1	208	551
51	11108	0	1	221	329	0	212	551
52	11108	0	1	221	329	0	212	551
53	11080	0	0	221	329	0	215	550
54	11080	0	0	221	329	0	215	550
55	10838	0	1	221	329	0	216	551
56	10838	0	1	221	329	0	216	551
57	11128	0	0	220	327	0	215	547
58	11128	0	0	220	327	0	215	547
59	11140	0	1	221	329	1	215	552
60	11140	0	1	221	329	1	215	552
61	11198	0	0	221	328	0	210	549
62	11198	0	0	221	328	0	210	549
63	11194	0	1	221	329	0	205	551
64	11194	0	1	221	329	0	205	551
65	11212	0	1	221	329	0	203	551
66	11212	0	1	221	329	0	203	551
67	11274	0	0	222	330	0	200	552
68	11274	0	0	222	330	0	200	552
69	11284	0	1	221	329	1	198	552
70	11284	0	1	221	329	1	198	552
71	11274	0	0	219	329	0	196	548
72	11274	0	0	219	329	0	196	548
73	11358	0	1	222	330	0	196	553
74	11358	0	1	222	330	0	196	553
75	11328	0	0	221	331	0	195	552
76	11328	0	0	221	331	0	195	552
77	11362	0	1	222	330	0	195	553
78	11362	0	1	222	330	0	195	553
79	11306	0	0	221	330	1	197	552
80	11306	0	0	221	330	1	197	552

Tabela 17 Fragment danych wygenerowanych z bazy danych EMS dla rozdzielczości godzinowej dla roku bazowego w warunkach gdy turbina ze sprężarką systemu WHR nie pracuje

Zapis godzinowy	Sprężone powietrze WHRS, m3	W2_Sprężarka 1, kWh	W2_Sprężarka 2, kWh	W2_Sprężarka 3, kWh	W3_Sprężarka 2, kWh	W3_Sprężarka 3, kWh	Szafa OC WHRS, kWh	SUMA zużycia energii elektrycznej przez kompresory tradycyjne, kWh
3660	0	320	308	319	217	321	94	1485
3661	0	319	308	320	216	322	85	1485
3662	0	320	303	323	217	321	85	1484
3663	0	319	306	316	216	322	79	1479
3664	0	321	303	322	276	322	78	1544
3665	0	319	304	320	322	323	87	1588
3666	0	320	304	319	321	323	86	1587
3667	0	319	308	319	322	321	86	1589
3668	0	320	307	319	320	322	85	1588
3669	0	319	304	325	320	321	85	1589
3670	0	319	308	320	320	320	85	1587
3671	0	318	310	317	320	321	86	1586
3672	0	319	305	324	321	322	85	1591
3673	0	318	306	327	320	321	86	1592
3674	0	319	301	321	322	323	88	1586
3675	0	319	307	321	322	323	87	1592
3676	0	318	307	321	321	322	86	1589
3677	0	319	305	324	322	323	86	1593
3678	0	318	301	324	322	324	86	1589
3679	0	320	301	327	322	323	83	1593
3680	0	318	308	323	321	322	86	1592
3681	0	318	305	324	320	322	66	1589
3682	0	318	305	324	321	323	61	1591
3683	0	319	301	324	320	322	61	1586
3684	0	318	308	323	320	322	61	1591
3685	0	318	304	327	320	322	64	1591
3686	0	317	312	320	320	320	85	1589
3687	0	318	307	323	320	322	78	1590
3688	0	318	320	253	318	320	59	1529
3689	0	315	317	228	319	322	59	1501
3690	0	316	315	279	321	323	60	1554

Na podstawie różnic pomiędzy danymi zaprezentowanymi w tabelach 16 i 17, ostatnia kolumna stanowi sumę zużycia energii elektrycznej przez kompresory tradycyjne, gdzie dostrzec można, że podczas pracy systemu odzysku ciepła, w którego skład wchodzi turbokompresor, wyłączeniu ulegają trzy tradycyjne kompresory śrubowe co na godzinę pozwala osiągnąć oszczędności rzędu 0,8 MW energii elektrycznej z uwzględnieniem potrzeb własnych systemu WHR. Na rysunku 44 przedstawiono zależność pomiędzy ilością wyprodukowanego sprężonego powietrza w metrach sześciennych, a wygenerowanymi oszczędnościami wynikającymi z wyłączeniem tradycyjnych sprężarek.



Rysunek 52 Zależność pomiędzy ilością wyprodukowanego sprężonego powietrza w metrach sześciennych, a wygenerowanymi oszczędnościami wynikającymi z wyłączeniem tradycyjnych sprężarek

Tabela 18 zestawia dane z wartościami zaoszczędzonej energii dla roku bazowego przy pracującym WHRS z uwzględnieniem przerw wynikających z przeglądów i wymogów utrzymania sprawności instalacji, takich jak np. czyszczenie kotłów, ekonomizerów, pomp, itp.

Tabela 18 Dane oszczędności miesięcznych dla roku bazowego przy pracującym WHRS

Miesiąc	Suma wytworzonego sprężonego powietrza WHRS, m ³	Suma z oszczędności wynikające z pracującego WHRS, MWh
1	7 941 332,00	603,06
2	5 872 904,00	538,58

Miesiąc	Suma wytworzonego sprężonego powietrza WHRS, m³	Suma z oszczędności wynikające z pracującego WHRS, MWh
3	5 997 196,00	493,69
4	6 009 184,00	417,78
5	6 782 832,00	430,38
6	5 568 992,00	362,78
7	6 985 136,00	489,66
8	6 242 676,00	521,90
9	6 774 932,00	532,89
10	7 067 408,00	583,49
11	6 782 176,00	528,25
12	6 465 296,00	441,20

Średnio na miesiąc WHRS potrafi wygenerować oszczędności energii elektrycznej na poziomie 500 MWh, co w ciągu roku bazowego pozwoliło zmniejszyć zużycie energii o 5 943,66 MWh, które mnożąc z kosztami energii elektrycznej daje okazałe zyski ekonomiczne.

9. Analiza ekologiczna i ekonomiczna wdrożonych rozwiązań optymalizacyjnych

9.1. Wprowadzenie

Przemysł szklarski stoi w obliczu wyzwań związanych z rosnącymi kosztami energii oraz koniecznością minimalizacji wpływu produkcji na środowisko. W odpowiedzi na te wyzwania, w procesie produkcyjnym wprowadzono szereg innowacyjnych rozwiązań mających na celu zwiększenie efektywności energetycznej i zmniejszenie emisji szkodliwych substancji. W tym kontekście ważne jest zrozumienie, w jaki sposób te modyfikacje wpłynęły na ekonomię produkcji oraz jej ślad ekologiczny.

W niniejszym rozdziale skoncentrowano się na analizie ekonomicznej i ekologicznej wprowadzonych zmian, ograniczając się jedynie do aspektów zmniejszenia kosztów energii i emisji. Pomimo pominięcia analizy kosztów inwestycyjnych związanych z wdrożeniem tych rozwiązań, celem jest przedstawienie rzeczywistych korzyści wynikających z ich zastosowania. Biorąc pod uwagę każde z przedstawionych w pracy rozwiązań - od wymiany oświetlenia, przez wstawienie falowników, po zwiększenie udziału stłuczki oraz implementację systemów odzysku ciepła połączonego z turbosprężarką – przedstawiony zostanie ich wpływ na ekonomię oraz ekologię produkcji. Taka analiza pozwoli zrozumieć, które z wdrożonych rozwiązań przynoszą największy efekt w zakresie oszczędności energetycznych i redukcji emisji, służąc tym samym jako punkt wyjścia do dalszych działań modernizacyjnych w branży szklarskiej.

9.2. Analiza ekologiczna

W obliczu globalnych wyzwań związanych ze zmianami klimatu i presją na zasoby naturalne, mierzenie i minimalizacja wpływu działalności przemysłowej na środowisko stało się kluczowe. Jednym z głównych wskaźników służących do oceny tego wpływu jest ilość emitowanego dwutlenku węgla (CO₂) - jednego z głównych gazów cieplarnianych odpowiedzialnych za zmiany klimatyczne.

Wskaźniki emisji CO₂, wyznaczone na jednostkę energii elektrycznej lub energii paliwa oraz ilości surowca, są jednymi z najważniejszych narzędzi do oceny wpływu różnych surowców i procesów na środowisko. Dzięki nim można ocenić, jak zmienia się wpływ na środowisko po wdrożeniu różnych rozwiązań optymalizacyjnych w hutach szkła. Użycie wskaźników emisji CO₂ jest kluczowe, ponieważ dostarcza konkretnej i jednolitej metryki do

porównywania różnych aspektów procesu produkcyjnego i oceny ich wpływu na środowisko. W dodatku wskaźniki te są szeroko uznanymi i stosowanymi narzędziami w ocenie wpływu na środowisko, co dodaje wiarygodności i przejrzystości prezentowanych wyników analizy. Do analiz wykorzystano wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2023 opublikowane przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE).

Poniższa analiza ma na celu obliczenie i porównanie emisji CO₂ przed i po wdrożeniu nowych rozwiązań doskonalących w procesie produkcji szkła w skali roku bazowego. Przyjęto następujące wartości wskaźników emisji:

Energia elektryczna: 708 kg CO₂/MWh,

Gaz ziemny: 192 kg CO₂/MWh,

Inne surowce (np. soda, wapno, stłuczka szklana):

Węglan wapnia/soda: 440 kg CO₂/Mg,

Stłuczka szklana: 122 kg CO₂/Mg.

Dla każdego z wdrożonych rozwiązań mających na celu zmniejszenie zużycia energii wyznaczyć można zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, gazu ziemnego lub surowców wykorzystywanych w procesie produkcji szkła, mających wpływ na emisje do środowiska. Następnie znając wskaźniki emisji CO₂ dla każdego z oszczędzonego medium oblicza się redukcje emisji do środowiska według poniższego wzoru:

$$E_{CO_2m} = O_m \cdot WE_{CO_2m} \quad (2)$$

Gdzie:

O_m – oszczędzone medium: energia elektryczna (enel), gaz ziemny (NG), surowiec (sur),

WE_{CO_2m} – wskaźnik emisji CO₂ dla poszczególnych mediów

E_{CO_2m} – wielkość emisji CO₂ dla poszczególnych mediów

9.2.1. Redukcja emisji CO₂ dzięki zmniejszeniu zużycia energii elektrycznej

W celu ograniczenia zużycia energii elektrycznej w procesie produkcji szkła w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego podjęto się następujących przedsięwzięć:

- Modernizacja oświetlenia

Z tabeli 7, wyznaczając efekt oszczędności energetycznej w ciągu roku po wymianie oświetlenia na jednej z hal produkcyjnych, obliczono redukcję poboru energii elektrycznej o 250,536 MWh.

- Wymiana układów gwiazda-trójkąt na przemienniki częstotliwości

W punkcie 7.4. opisano wdrożenie optymalizacyjne polegające na wymianie układu sterowania czterech wentylatorów chłodzenia jednej z wani szklarskich, na podstawie rysunku 18, stanowiącego wykres wygenerowany z Systemu Zarządzania Mediami Energetycznymi dla poboru energii elektrycznej przed i po modernizacji sterowania jednego z modernizowanych wentylatorów, zaobserwowano redukcję zużycia energii elektrycznej o prawie 2 050 MWh rocznie.

- Zastąpienie tradycyjnych sprężarek, kompresorem sprzężonym z systemem odzysku ciepła;

Opisując największe wdrożenie optymalizacyjne proces produkcji szkła w celu zmniejszenia zużycia mediów energetycznych i emisji do środowiska, przeanalizowano również generowane oszczędności i opisano je w punkcie 7.3.2. Dla roku bazowego redukcja zużycia energii elektrycznej przy zastąpieniu produkcji sprężonego powietrza przez tradycyjne sprężarki śrubowe na sprężone powietrze pochodzące z całego systemu odzysku ciepła ze spalin wyniosła 5 943,66 MWh.

Sumarycznie w skali roku rozwiązania mające na celu udoskonalenie procesu pod względem redukcji energii elektrycznej przyniosły wynik na poziomie blisko 8 245 MWh.

Dla tego wyniku, znając współczynnik emisji CO₂ dla energii elektrycznej w Polsce, można obliczyć ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko w roku bazowym podstawiając do równania (2) i otrzymać wynik:

$$E_{\text{CO}_2\text{enel}} = 5\,837,46 \text{ ton CO}_2$$

9.2.2. Redukcja emisji CO₂ dzięki zmniejszeniu zużycia gazu ziemnego

W celu ograniczenia zużycia gazu ziemnego w procesie produkcji szkła w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego przeprowadzono poniższe rozwiązania:

- Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w wytapianym zestawie na trzech wannach w hucie szkła;

Jak opisano w punkcie 7.5, zwiększenie udziału stłuczki szklanej w wytapianym zestawie szklarskim pozwala osiągnąć szereg korzyści, m.in. wydłuża żywotność pieca szklarskiego, redukuje wykorzystanie tradycyjnych surowców wykorzystywanych do wytapiania szkła, zmniejsza zużycie paliwa w piecu, co również wiąże się z redukcją emisji dwutlenku węgla.

Tabela 8 zestawiała osiągnięte skutki wpływu udziału stłuczki na średnie zużycie paliwa energetycznego dla poszczególnych wani szklarskich w trakcie przeprowadzanej analizy na rzecz doktoratu wdrożeniowego. Podsumowując, dla każdej z wani udało osiągnąć się redukcję zużycia gazu ziemnego w MWh na dobę. Wanna W1 osiągnęła wynik redukcji na poziomie 14,3 MWh na dobę, Wanna 2 zwiększając udział stłuczki ograniczyła konsumpcję gazu o 36,77 MWh na dobę, natomiast Wanna nr 3 w rozliczeniu dobowym zmniejszyła zużycie o 35,41 MWh. Dla całej huty oznacza to obniżenie wolumenu pobieranego gazu o moc wartości bliskiej 86,5 MWh/dobę, co w skali roku daje oszczędności równe 31 565,2 MWh gazu ziemnego.

- wykorzystanie ciepła na cele socjalne w systemie odzysku ciepła odpadowego ze spalin (WHRS) w wymiennikach ciepła, zamiast tradycyjnego kotła gazowego;

System odzysku ciepła w celu osiągnięcia większych oszczędności energii i redukcji negatywnego wpływu na środowisko, oprócz możliwości produkcji sprężonego powietrza w promieniowej sprężarce dwustopniowej, wytwarza również ciepło na cele socjalne, pozwalając przy tym odcinać się od tradycyjnych źródeł mocy grzewczej. To rozwiązanie pozwala wygenerować oszczędność energii, dzięki wyłączeniu dopływu gazu ziemnego do kotłowni huty, która standardowo zaopatrywała hutę w gorącą wodę oraz ciepło.

Przed uruchomieniem WHRS, kotłownia miała zapotrzebowanie roczne na poziomie 2000 MWh gazu ziemnego i taką ilość energii udało się zredukować wdrażając odzysk ciepła.

W skali roku bazowego poprzez optymalizację procesu produkcji szkła zrealizowano sumaryczne oszczędności energii pochodzącej ze spalania gazu ziemnego na poziomie 33565,2 MWh. Znając współczynnik emisji CO₂ dla gazu ziemnego w Polsce, można obliczyć ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko w roku bazowym (równanie (2)):

$$E_{CO_2NG} = 6\,444,52 \text{ ton } CO_2$$

9.2.3. Redukcja emisji CO₂ dzięki zmniejszeniu zużycia tradycyjnych surowców w wytopie szkła

W celu ograniczenia zużycia tradycyjnych surowców mających wpływ na emisję dwutlenku węgla w procesie produkcji szkła w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego przeprowadzono poniższe rozwiązania optymalizacyjne:

- Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w wytapianym zestawie na trzech wannach w hucie szkła.

Spośród wykorzystanych surowców w procesie wytopu szkła wpływ na emisję dwutlenku węgla wykazuje soda, wapno i stłuczka szklana. Dlatego przy zastępowaniu

tradycyjnych surowców stłuczką szklaną można wyznaczyć redukcję emisji tego związku chemicznego.

Wanna 1 w roku bazowym utrzymuje dobowy wytop szkła na poziomie 195 ton, w którym zwiększono udział stłuczki z 25% na 65%, co skutkowało zmniejszeniem udziału związków sody i wapnia w zestawie z 26% do 12%. Oznacza to z kolei, że dobowe zastąpienie 40% udziału stłuczki czyli 78 ton kruszywa, zastępuje w 14% związki sody i wapnia – 27,3 tony.

W przypadku Wanny 2 zwiększenie udziału stłuczki wynosiło 50% w roku bazowym, co pozwoliło zredukować wykorzystanie związków sody i wapnia o 13%, co kolejno skutkowało dobowym zastąpieniem tradycyjnych surowców 170 tonami stłuczki oraz redukcją 44,2 ton mieszanki sody i wapnia.

Na wannie W3, na której wytapiany jest zielony kolor szkła, który umożliwia w większym stopniu zastępowanie surowców stłuczką szklaną, ze względu na łatwiejsze osiągnięcie parametrów specyfikacji jakościowej dzięki tlenkom metali zawartym w zestawie szklarskim. Dlatego to właśnie na tej wannie udało się osiągnąć największe zastąpienie surowców stłuczką szklaną, ponieważ zwiększono jej udział z 25% do 85%, czyli o aż 60 punktów procentowych redukując przy tym wykorzystanie sody i wapnia o 21%. Podobnie jak w przypadku wanny W2, dobowy tonaż dla roku bazowego wyniósł 340 ton, co oznacza, że wdrożenie dla wanny W3 zakończono z wykorzystaniem 204 ton stłuczki szklanej, przy zmniejszeniu wykorzystania związków sody i wapnia o 71,4 ton na dobę.

W przypadku przedsięwzięcia polegającego na zmniejszeniu wykorzystania energii i emisji do środowiska poprzez dodanie większej ilości stłuczki szklanej w wytopie masy szklanej w roku bazowym zwiększono sumaryczny udział stłuczki o 452 ton na dobę, co w ciągu roku oznacza przetopienie 164 980 ton stłuczki. Takie zastąpienie tradycyjnych surowców, w których skład wchodzi związki sody i wapnia, stłuczką szklaną, oznacza zmniejszenie wytapiania tych związków o prawie 143 tony dziennie, czyli o 52 195 ton rocznie. Znając współczynniki emisji CO₂ związków sody i wapnia oraz stłuczki w Polsce, można obliczyć ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko w roku bazowym poprzez zastąpienie tradycyjnego surowca stłuczką szklaną. Dlatego należy wyznaczyć różnicę w emisji CO₂ obu przypadków:

- Redukcja emisji CO₂ po zmniejszeniu zużycia związków sody i wapnia = 22 965,8 ton CO₂
- Emisja CO₂ przy wykorzystaniu stłuczki szklanej = 20 127,56 ton CO₂

Zatem ograniczenie emisji CO₂ (E_{CO_2sur}) w wyniku zastosowania stłuczki wynosi 2 838,24 tonCO₂

9.2.4. Sumaryczna redukcja emisji CO₂ dzięki wszystkim przeprowadzonym optymalizacjom

Po przeprowadzeniu analizy dla każdego z wdrożonych rozwiązań sumuje się oszczędności w emisji CO₂, dzięki czemu można ocenić łączne korzyści środowiskowe wdrożonych rozwiązań. Sumaryczne ograniczenie emisji do środowiska wdrożonych rozwiązań redukujących zużycie mediów energetycznych i emisji wynosi 15 120,22 ton CO₂, co stanowi około 15% całkowitej emisji dwutlenku węgla z zakładu w ciągu roku.

Ostateczna analiza pozwala na ocenę, jakie korzyści środowiskowe przyniosły zastosowane rozwiązania. Umożliwia to również identyfikację obszarów, które oferują największy potencjał zmniejszenia wpływu na środowisko, oraz planowanie przyszłych działań w tym zakresie.

9.3. Analiza finansowa

Optymalizacja procesów w hutach szkła nie tylko przynosi korzyści dla środowiska naturalnego, ale także niesie za sobą korzyści ekonomiczne. Pomimo braku uwzględnienia kosztowych nakładów inwestycyjnych, ze względu na zachowanie poufności informacji firmy, istnieje szereg oszczędności, które można osiągnąć dzięki mniejszemu zużyciu energii i surowców. Poniższa analiza skupia się na obliczeniu i porównaniu kosztów eksploatacyjnych związanych z użyciem mediów przed i po wdrożeniu proponowanych rozwiązań w roku bazowym.

Do obliczeń przyjęto następujące wskaźniki średnich kosztów dla roku bazowego (rok obliczeniowy na podstawie danych z lat 2019 – 2021):

Energia elektryczna: 401,17 PLN/MWh,

Gaz ziemny: 124,38 PLN/MWh.

Surowce wykorzystane do wytopu szkła:

Piasek: 70 PLN/Mg,

Związki sody i wapnia: 1650 PLN/Mg,

Pozostałe surowce: 610 PLN/Mg,

Stłuczka szklana: 450 PLN/Mg,

Koszty uprawnień do emisji dwutlenku węgla: 180,5 PLN/tona CO₂.

Powyższe wartości stanowią średnie ceny mediów energetycznych i surowców w latach 2019 – 2021, wyznaczone na podstawie raportów miesięcznych Towarowej Giełdy Energii, historycznych cen surowców oraz kontraktów terminowych na emisję CO₂.

Dla każdego z działania obliczono różnicę w zużyciu surowców lub energii przed i po wdrożeniu. Następnie, korzystając z wskaźników kosztów, obliczono oszczędności, zgodnie z poniższym wzorem:

$$\Delta O_{\text{koszt}} = O_m \cdot W_{\text{sr.koszt}} \quad (3)$$

Gdzie:

O_m – zmniejszenie zużycia medium: energia elektryczna (enel), gaz ziemny (NG), surowiec (sur), w MWh lub Mg

$W_{\text{sr.koszt}}$ – wskaźniki średnich kosztów dla roku bazowego dla poszczególnych mediów, PLN/MWh lub PLN/Mg

O_{koszt} – oszczędność kosztów dla poszczególnych mediów, PLN.

9.3.1. Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia zużycia energii elektrycznej

W rozdziale dotyczącym analizy ekonomicznej przytoczono optymalizacje generujące oszczędności energii elektrycznej w roku bazowym i wykazano, iż przyniosły one redukcję zużycia energii elektrycznej na poziomie blisko 8 245 MWh. Mnożąc ilość zaoszczędzonej energii w roku bazowym z ceną energii elektrycznej dla tego roku, zgodnie z równaniem (3), otrzymany zostanie wynik będący oszczędnością ekonomiczną (oszczędnością kosztów energii elektrycznej) w PLN.

$$O_{\text{koszt. enel}} = 3\,307\,646,65 \text{ PLN}$$

9.3.2. Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia zużycia gazu ziemnego

W trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego w celu ograniczenia zużycia gazu ziemnego przeprowadzono działania polegające na zastąpieniu, w zestawie szklarskim do wytopu szkła, tradycyjnych surowców stłuczką szklaną oraz na wykorzystaniu ciepła odpadowego, odebranego przez wymienniki ciepła, na cele ogrzewania pomieszczeń socjalnych i wody użytkowej. Dzięki tym rozwiązaniom osiągnięto oszczędność gazu ziemnego na poziomie 33 565,2 MWh. Mnożąc tę ilość przez cenę 1 MWh gazu ziemnego (równanie (3)), otrzymany zostanie wynik oszczędności kosztów gazu w roku bazowym.

$$O_{\text{koszt. NG}} = 4\,174\,839,58 \text{ PLN}$$

9.3.3. Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zwiększenia udziału stłuczki w zestawie do wytopu masy szklanej

Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w procesie produkcji szkła oprócz redukcji zużycia gazu ziemnego oraz emisji dwutlenku węgla powoduje przede wszystkim zmniejszenie zużycia tradycyjnych surowców wykorzystywanych w wytopie masy szklanej, takich jak piasek, związki wapnia i związki sody, itd. Każdy ze składników zestawu szklarskiego posiada swój koszt jednostkowy, dlatego zastąpienie tradycyjnych surowców stłuczką szklaną powoduje zmianę kosztu zestawu szklarskiego.

W niniejszej analizie przeanalizowano oszczędności ekonomiczne wynikające z zastąpienia surowców stłuczką szklaną w zestawie szklarskim dla każdej z wanien.

W tabelach 9, 10, 11, w punkcie 7.5, traktującym o przedsięwzięciu zwiększania udziału stłuczki szklanej w wytapianym zestawie szklarskim, zaprezentowano procentowe zastąpienie zużycia tradycyjnych surowców stłuczką szklaną na trzech wannach szklarskich dla trzech różnych kolorów wytapianego szkła.

Wanna 1 w roku bazowym utrzymuje dobowy wytop szkła na poziomie 195 ton, w którym zwiększono udział stłuczki z 25% na 65%, co skutkowało zmniejszeniem udziału piasku z 44% do 21%, związków sody i wapnia w zestawie z 26% do 12% oraz pozostałych składników z 5% do 3%.

W przypadku Wanny 2 wytop dobowy wyniósł 340 ton, zwiększono udział stłuczki o 50 punktów procentowych z 25% na 75%, co pozwoliło zredukować wykorzystanie piasku z 46% do 15%, związków sody i wapnia z 19% do 6%, innych surowców z 10% do 4%.

Na wannie W3, na której możliwe było zastąpienie w największym stopniu surowców stłuczką szklaną, udział stłuczki zwiększono z 25% do 85%. W przypadku surowców udział piasku zmniejszył się z 43% do 9%, związków wapnia i sody z 26 do 5%, a pozostałych surowców o 5 punktów procentowych z 6% do 1%.

Koszt dobowego wytopu można wyznaczyć sumując iloczyny udziałów surowców w dobowym wytopie z ceną jednostkową danego surowca przed i po zmianie. Następnie obliczenia przeprowadzono dla udziału stłuczki w wytapianym zestawie szklarskim i ceną jednostkową stłuczki szklanej. Od oszczędności wynikających z mniejszego zużycia tradycyjnych surowców odjęto koszty zwiększonego udziału stłuczki szklanej w wytapianej masie szklanej, otrzymując ostateczny wynik zysku finansowego.

Sumaryczne oszczędności kosztów wynikających z zastąpienia zakupu tradycyjnych surowców stłuczką szklaną w roku bazowym wynoszą:

$$O_{\text{koszt. sur}} = 9\,286\,086,67 \text{ PLN}$$

9.3.4. Oszczędności ekonomiczne wynikające ze zmniejszenia emisji dwutlenku węgla

Dzięki wdrożonym rozwiązaniom huta szkła może zredukować zużycie mediów energetycznych i surowców, może obniżyć również negatywne oddziaływanie na środowisko w formie ograniczenia emisji dwutlenku węgla do środowiska. Emisja CO₂ dla przedsiębiorstwa jest również kosztem, ponieważ jest ono zobligowane do wykupienia uprawnień do emisji CO₂. Dla roku bazowego koszt emisji 1 tony dwutlenku węgla wynosił 180,5 PLN. Po obliczeniu zmniejszonej ilości emisji dwutlenku węgla i znając koszt jednostkowy uprawnień wyznaczono oszczędności kosztowe przedsiębiorstwa:

$$O_{\text{koszt. E CO}_2} = 2\,729\,199,71 \text{ PLN}$$

9.3.5. Sumaryczne oszczędności ekonomiczne wynikające z wszystkich przeprowadzonych optymalizacji

Po przeprowadzeniu analizy ekonomicznej dla każdego z wdrożonych rozwiązań sumuje się oszczędności kosztów finansowych w PLN, dzięki czemu można ocenić łączne korzyści ekonomiczne wdrożonych rozwiązań. Sumaryczne oszczędności kosztów dla wszystkich przeprowadzonych wdrożeń wyniosły 19 497 772,61 PLN. Przy ciągłym wzroście cen energii elektrycznej, gazu ziemnego, surowców oraz opłat za emisję dwutlenku węgla przytoczone oszczędności będą coraz większe.

Taka analiza umożliwia zrozumienie, jakie korzyści finansowe przynoszą wprowadzone zmiany, co może stanowić argument do podejmowania dalszych działań optymalizacyjnych, nawet jeśli w obecnej analizie nie uwzględnione zostały koszty inwestycyjne, które nie mogły zostać wykorzystane w obliczeniach na rzecz rozprawy doktorskiej ze względu zachowania poufnych informacji analizowanej huty szkła.

10. Dyskusja

Tematem rozprawy doktorskiej jest optymalizacja procesu produkcji szkła opakowaniowego mająca na celu zmniejszenie zużycia mediów energetycznych oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń, która miała przedstawić wdrożone rozwiązania zrealizowane w trakcie trwania doktoratu wdrożeniowego.

Rozprawa doktorska została podzielona na rozdziały, spośród których część stanowił opis produkcji szkła opakowaniowego oraz istniejące rozwiązania mające na celu zmniejszenie zużycia energii i emisji szkodliwych substancji w przemyśle. W omawianej hucie szkła, zrównoważony rozwój i odpowiedzialność społeczna biznesu stały się głównymi priorytetami dla dalszej działalności przedsiębiorstwa, przyczyniając się do ochrony środowiska, ale także do budowania pozytywnego wizerunku wśród konsumentów i partnerów biznesowych. Dlatego dla przedsiębiorstwa istotnym jest dążenie do zminimalizowania zużycia mediów energetycznych, usprawniania procesu, zwiększania jego efektywności i opłacalności ekonomicznej, co ma także bezpośredni wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń odprowadzanych do powietrza atmosferycznego.

Bazując na Najlepszych Dostępnych Technikach (tzw. BAT) w produkcji szkła, raportach branżowych, audytach energetycznych, doświadczeniach w przemyśle i rozmowach z dostawcami technologii zwiększających wydajność podjęto się wdrożenia szeregu rozwiązań mających na celu poprawę energetyczną procesu produkcji szkła, której głównym celem było zwiększenie jej efektywności energetycznej.

Zaprezentowanymi i przeanalizowanymi rozwiązaniami optymalizującymi były:

- Wdrożenie Systemu Zarządzania Mediami Energetycznymi,
- Wymiana tradycyjnego oświetlenia na nowoczesne oświetlenie typu LED,
- Wymiana układów sterowania silnikami wentylatorów pieca szklarskiego z tradycyjnego rozwiązania gwiazda-trójkąt na rozwiązanie z falownikiem,
- Stopniowe zwiększanie udziału stłuczki szklanej,
- Wdrożenie Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego (WHRS) zintegrowany z układem turbiny parowej i sprężarki promieniowej.

Optymalizacja procesów i zapewnienie, że wdrożenia coraz bardziej wydajnych technologii, są kluczem do realizacji oszczędności energii w działalności zakładu. Koordynacja ich efektywności i działania jest niezbędna, aby oszczędności energii stały się rzeczywistością i to w doktoracie wdrożeniowym udało się osiągnąć.

Wykorzystanie systemu monitorowania energii i kontroli procesów odgrywa ważną rolę w zarządzaniu energią oraz w redukcji jej zużycia, obejmuje podsystemy pomiarowe, monitorowanie i systemy kontroli. Poprzez odpowiednie śledzenie przepływu mediów i działania urządzeń energetycznych możliwe jest skrócenie czasu potrzebnego do realizacji złożonych zadań, często poprawienie jakości produktu i spójności danych, a także optymalizowanie operacji procesowych.

System zarządzania mediami okazał się nieocenionym narzędziem badawczo-pomiarowym podczas trwania doktoratu i wdrażania strategii udoskonalających proces. Dzięki ciągłemu monitorowaniu zużycia, śledzeniu wszelkich zmian, prowadzeniu porównań oraz dokładnym bilansom, możliwe było szybkie wykrywanie i raportowanie pozytywnych wyników podjętych działań. Wyniki uzyskane z tego systemu były niezbędne w rozprawie doktorskiej, gdzie dokładnie opisano wprowadzone rozwiązania.

Wymiana starych opraw oświetleniowych na nowoczesne oprawy LED w jednej z hal produkcyjnych stanowiła element procesu modernizacyjnego w analizowanej hucie. Było to działanie nie tylko z myślą o oszczędności energii, ale również o poprawie jakości i funkcjonalności oświetlenia w całym obiekcie. Nowoczesne oprawy LED nie tylko zużywają znacznie mniej energii, ale również oferują dłuższą żywotność, lepsze parametry świetlne oraz możliwość precyzyjnego sterowania natężeniem i barwą światła. Cały proces wymiany był również krokiem w kierunku realizacji celów huty związanych ze zrównoważonym rozwojem i odpowiedzialnością środowiskową. Redukcja zużycia energii przekłada się nie tylko na aspekt ekonomiczny, ale także na mniejszy ślad węglowy prezentowanej działalności.

Zastosowanie falowników w miejsce tradycyjnych układów gwiazda – trójkąt stanowiło działanie podjęte przede wszystkim w celu znaczącej oszczędności energii, ale również dla poprawy wydajności i kontrolowania pracy naszych urządzeń. Wcześniejsze korzystanie z układów gwiazda-trójkąt, chociaż niezawodne, niesie ze sobą pewne ograniczenia, zwłaszcza w zakresie regulacji prędkości i płynności działania silników. Falowniki, dzięki swojej zdolności do płynnej regulacji prędkości silników i dostosowywania jej do bieżących potrzeb, pozwoliły na znacznie większą elastyczność w działaniu oraz redukcję zużycia energii. Zastosowanie falowników przyczyniło się do oszczędności energetycznych, poprzez eliminację nagłych szczytów zużycia energii podczas startu silników oraz umożliwienie ich pracy w optymalnych zakresach prędkości. Oferują one również dodatkowe korzyści, takie jak zmniejszenie zużycia elementów mechanicznych dzięki płynniejszym rozruchom oraz wydłużenie żywotności całego systemu.

Zwiększenie udziału stłuczki szklanej w zestawie szklarskim w hucie to krok w stronę bardziej zrównoważonego i efektywnego energetycznie procesu produkcji szkła. Wprowadzenie tego rozwiązania na trzech głównych piecach szklarskich pozwoliło na osiągnięcie znaczących oszczędności energetycznych, przy jednoczesnym zachowaniu jakości i właściwości wytwarzanego produktu. Różne kolory wytapianego szkła, takie jak flint, amber i green, mają swoje unikatowe właściwości i wymagają indywidualnego podejścia w procesie produkcji. Jednakże zastosowanie większej ilości stłuczki w każdym z tych kolorów, niezależnie od ich specyfikacji, przyniosło korzyści w zakresie zużycia energii.

Według dostępnej literatury, każde zwiększenie udziału stłuczki o 10% (pod względem wagi) w składzie mieszaniny szklarskiej przyczynia się do redukcji netto zużycia energii o 2 - 3,5%. Te teoretyczne wartości zostały potwierdzone w praktycznych badaniach przeprowadzonych w ramach doktoratu. Można dokładnie obserwować korzyści płynące z zastosowania większych ilości stłuczki i dostosowywać proces w taki sposób, aby osiągnąć optymalne wyniki zarówno pod względem jakości, jak i efektywności energetycznej. Zastosowanie stłuczki, oprócz korzyści energetycznych, ma również pozytywny wpływ na środowisko, redukując ilość odpadów trafiających na składowiska oraz zmniejszając emisję dwutlenku węgla podczas produkcji. Ponadto, recykling szkła poprzez wykorzystanie stłuczki jest ważnym elementem zrównoważonej gospodarki surowcowej, pozwalając na wielokrotne wykorzystanie tego samego materiału.

Wdrożenie Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego (WHRS) opartego na kotłach odzyskowych zintegrowanych z układem turbiny parowej i sprężarki promieniowej stanowi innowacyjny krok w zakresie zwiększania efektywności energetycznej oraz zrównoważonej produkcji w analizowanej hucie szkła. W wykorzystaniu ciepła ze spalin, generowanych w procesach produkcyjnych wytapiania masy szklanej, leży ogromny potencjał oszczędnościowy oraz korzyści środowiskowe. Integracja WHRS z turbiną parową oraz sprężarką promieniową pozwoliła na maksymalne wykorzystanie odzyskiwanego ciepła. Zamiast traconego wcześniej ciepła, można je teraz przekształcić w sprężone powietrze, pomijając straty w przemianach energii cieplnej na mechaniczną i na energię elektryczną, służące dalszym procesom produkcyjnym w hucie. Dzięki temu nie tylko znacząco obniżono zużycie pierwotnych nośników energii, ale również zmniejszono emisję szkodliwych dla środowiska substancji. Badania przeprowadzone w ramach doktoratu potwierdziły teoretyczne założenia dotyczące efektywności systemu. W praktyce, dzięki WHRS, udało się znacząco zmniejszyć koszty operacyjne oraz wpłynąć pozytywnie na ekologiczny odcisk działalności huty. Wprowadzenie tak zaawansowanego technologicznie systemu, jak WHRS,

zintegrowanego z turbiną parową i sprężarką promieniową, nie tylko przyczynia się do oszczędności energetycznych, ale również podkreśla zaangażowanie huty w innowacyjne i zrównoważone rozwiązania. System ten jest dowodem na to, że z zaawansowaną technologią można osiągnąć równowagę między efektywnością ekonomiczną a odpowiedzialnością środowiskową.

Podsumowując, istnieje wiele aspektów produkcji szkła, które mogą być optymalizowane w celu zwiększenia efektywności energetycznej, redukcji emisji oraz poprawy ogólnej wydajności. Podejmując działania w tej dziedzinie, przedsiębiorstwa nie tylko przyczyniają się do ochrony środowiska, ale także zwiększają swoją konkurencyjność na rynku.

11. Wnioski

Rozprawa doktorska poświęcona optymalizacji procesu produkcji szkła opakowaniowego pod kątem zmniejszenia zużycia mediów energetycznych oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń dostarczyła szeregu istotnych spostrzeżeń dotyczących podejścia do zrównoważonego rozwoju w przemyśle szklarskim. Wdrażanie zasad odpowiedzialności społecznej biznesu w hucie szkła pozwoliło na osiągnięcie nie tylko korzyści środowiskowych, ale również ekonomicznych, co podkreśla istotność synergii między troską o środowisko, a efektywnością biznesową. Najlepsze dostępne techniki w produkcji szkła, raporty branżowe oraz doświadczenia przemysłowe posłużyły jako fundament dla wdrożonych rozwiązań.

Kluczowe działania podjęte w trakcie badań, takie jak wdrożenie Systemu Zarządzania Mediami Energetycznymi, modernizacja oświetlenia czy zastosowanie falowników w sterowaniu silnikami, przyniosły mierzalne oszczędności energetyczne. Szczególnie istotne było zastosowanie stłuczki szklanej, które potwierdziło teoretyczne wartości dotyczące oszczędności energii. Jednakże najbardziej przełomowym rozwiązaniem okazało się wdrożenie Systemu Odzysku Ciepła Odpadowego, który przyczynił się do znaczącej redukcji kosztów operacyjnych oraz zmniejszenia wpływu huty na środowisko.

W świetle przeprowadzonych badań oraz analiz można odpowiedzieć na postawione tezy. W pierwszej z nich, mówiącej o tym, że wprowadzenie innowacyjnych technologii w przemyśle szklarskim nie tylko przynosi korzyści ekonomiczne, ale także ma potencjał do przyspieszenia transformacji sektora w kierunku bardziej zrównoważonej i ekologicznej produkcji, dokonane obserwacje i zebrane wyniki potwierdzają tę hipotezę. Zebrane ekonomiczne korzyści wynikające z implementacji nowych technologii są widoczne w redukcji kosztów operacyjnych o kwotę bliską 19,5 miliona PLN oraz w ulepszeniu procesu produkcyjnego.

Odpowiadając na drugą tezę dotyczącą wykorzystania stłuczki szklanej w procesie produkcji, badania w trakcie doktoratu wykazały, że zastąpienie tradycyjnych surowców stłuczką szklaną rzeczywiście prowadzi do obniżenia zużycia energii, co ma bezpośredni wpływ na redukcję śladu węglowego. Dodatkowo, wykorzystanie stłuczki szklanej stymuluje efektywny recykling surowców, co jest zgodne z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. W przeprowadzonych badaniach potwierdzono z literaturą naukową, iż każde zwiększenie udziału stłuczki o 10% skutkuje zmniejszeniem zużycia energii o 2,5 – 3% oraz to, że kilogram zestawu szklarskiego do wytapiania szkła może zostać zastąpiony kilogramem stłuczki szklanej. W hucie szkła w skutek zwiększenia udziału stłuczki osiągnięto w roku bazowym

oszczędności energii na poziomie 31 500 MWh, redukcję emisji CO₂ o prawie 9 tys. ton, a oszczędności finansowe bliskie 9 300 tys. PLN.

Kolejna postawiona teza mówiła o tym, że wdrożenie nowoczesnych technologii, takich jak kotły odzyskowe oraz układ turbiny parowej i sprężarki, przyczyni się do poprawy efektywności energetycznej huty. Wykonana analiza i jej wyniki potwierdzają tę tezę, pokazując, że te rozwiązania znacząco redukują zużycie mediów energetycznych i ograniczają emisję zanieczyszczeń do środowiska. Tym samym przyczyniają się one do bardziej zrównoważonej i ekologicznej produkcji szkła. Stabilnie pracujący WHRS włączając sprężone powietrze do huty szkła skutkuje wyłączeniem 3 tradycyjnych kompresorów śrubowych generując oszczędność energii około 800 kW na godzinę, co w skali roku pozwala zredukować pobór elektryczności o około 7 000 MWh, co zgodnie ze współczynnikami emisyjności dwutlenku węgla dla produkcji energii elektrycznej w Polsce świadczy o redukcji zanieczyszczenia o 5 000 ton CO₂.

Ostatnia teza zakładała, że efektywny odzysk ciepła, zwłaszcza w połączeniu z innymi innowacyjnymi technologiami, ma potencjał do rewolucjonizowania procesów energetycznych w hucie szkła. Efektywny odzysk ciepła, połączony z nowoczesnymi technologiami, nie tylko zmniejsza zużycie energii, ale także przyczynia się do bardziej zrównoważonej i ekologicznie odpowiedzialnej produkcji szkła.

Podsumowując, przedstawione tezy znajdują potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach, co wskazuje na to, że przemysł szklarski stoi przed szansą znaczącej transformacji w kierunku bardziej zrównoważonej i ekologicznej produkcji. Istnieją praktyczne i skuteczne metody optymalizacji w przemyśle szklarskim, które mogą przynieść korzyści zarówno dla środowiska, jak i dla przedsiębiorstwa. Zastosowane rozwiązania wskazują drogę dla innych hut i sektorów przemysłu, dążących do harmonii między zrównoważonym rozwojem a sukcesem biznesowym.

12. Bibliografia

1. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. ustanawiające ramy na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmieniające rozporządzenie (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie), Dz. Urz. UE L 243 z
2. Jeszke R. (red.); Publikacja CAKE/KOBiZE/IOŚ-PIB pt. „GO2’50. Klimat. Społeczeństwo. Gospodarka.”; Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy; eISSN: 2720-5320; Warszawa; 2022
3. Zalecenie Komisji (UE) 2021/1749 z dnia 28 września 2021 r. w sprawie zasady „efektywność energetyczna przede wszystkim”: od zasad do praktyki – Wytyczne i przykłady dotyczące jej wdrażania w procesie podejmowania decyzji w sektorze energetycznym
4. Najlepsze dostępne techniki (BAT). Wytyczne dla branży szklarskiej Praca zrealizowana na zamówienie Ministra Środowiska sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej; Warszawa; 2004
5. Henderson J.; The raw materials of early glass production (Europe); Oxford Journal of Archaeology 4(3):267 - 291; 1985
6. Shelby J. E.; Introduction to Glass Science and Technology, 3rd Edition; Royal Society of Chemistry; 2020
7. Greenman M., Ross C.P., Shell J., Gridley M., Wishnick D., McCracken D. J.; Energy and Environmental Profile of the U.S. Glass Industry; ENERGETICS Incorporated Columbia, Maryland; 2002
8. Geiger G.; Advances in Glass Processing; American Ceramic Society Bulletin 72(2); 1993
9. Trier W., Loewenstein K.; Glass Furnaces: Design, Construction and Operation; Society of Glass Technology; 1987
10. Martins B.M.R.; Decision Support System in the Design, Production and Quality Control of Glass Containers; Uniwersytet w Porto (Portugalia); ProQuest Dissertations Publishing; 2017
11. Schmid E. T.; Advanced Glassworking Techniques: An Enlightened Manuscript; Glass Mountain Press, 1997
12. Hiltmann K., Neubauer T.; Case study: Gob loading in a glass moulding machine; Procedia CIRP 39; s. 203-208; 2016
13. Snyder H.M.; Cold-end coatings in glass container manufacture. American Ceramics Society Bulletin; 69(11): s. 1831-1833; 1990

14. Williams H.P.; Wpływ uszlachetniania powierzchni na wytrzymałość pojemników szklanych; Biuletyn - Goldschmidt Informiert; nr 50 1/80
15. Gardon R.; Thermal Tempering of Glass; Glass Science and Technology; Vol. 5; Elasticity and Strength in Glasses; Academic press; New York (1980)
16. Bajdur W.M., Gajda P., Idzikowski A.; PROCES KONTROLI JAKOŚCI WYROBÓW W PRZEMYSŁE SZKLARSKIM
17. Schaefer J., Diehm L.; Improving Production Quality; Glass Worldwide; 2006
18. Kaczmarek W.; Analiza procesów zrobotyzowanego sortowania, pakowania i paletyzacji; Napędy i sterowanie; Nr 9; 2018
19. Glass B.; General Information on the Packaging of Glass Containers for their Safe Transport and Delivery to the Customer; British Glass Publication; 1998
20. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. ustanawiające ramy na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmieniające rozporządzenie (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie), (Dz. Urz. UE L 243
21. Wojtkowska-Łodej G.; Transformacja rynków energii Gospodarka. Klimat. Technologia. Regulacje; Seminaria naukowe – Szkoła Energii; Projekt realizowany w latach 1.10.2020–31.09.2022 w ramach grantu Ministerialnego nr SONP/SP/469426/2020
22. Javied T., Rackow T., Franke J.; Implementing energy management system to increase energy efficiency in manufacturing companies; Procedia CIRP Volume 26; 2015; Pages 156-161
23. Worrell E., Galitsky C., Masanet E.R., Graus W.; Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers; Energy Star; 2008
24. Alarcon M., Martínez-García F.M., Gomez de Leon Hijes F.C.; Energy and maintenance management systems in the context of industry 4.0. Implementation in a real case; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Volume 142, May 2021, 110841
25. Zumtobel; Jak modernizacja oświetlenia wspiera nowoczesny i energooszczędny przemysł?; Nowoczesny Przemysł, Technologie - Innowacje - Produkcja; [7] luty-marzec 2023; s. 29-30; ISSN 2720-6114
26. Saduir R.; A review on electrical motors energy use and energy savings; Renewable and Sustainable Energy Reviews; nr 14; s.887-898; 2014
27. De Wachter B.; White Paper Electric Motors In The Energy Transition; ECI Publication No Cu0254; 2018

28. Grajewski M.; Optymalizacja systemu wytwarzania i uzdatniania sprężonego powietrza; Nowoczesny Przemysł, Technologie - Innowacje - Produkcja; [7] luty-marzec 2023; s. 31-34; ISSN 2720-6114
29. Głodek-Bucyk E.; Możliwość wykorzystania ciepła odpadowego w przemyśle mineralnym; Szkło i Ceramika; Nr 1/2021; s. 25-27
30. Pudlik W.; Wymiana i wymienniki ciepła; Podręcznik dla studentów wydziałów mechanicznych specjalizujących się w technikach cieplnych i chłodniczych; Politechnika Gdańska; Gdańsk; 2012
31. Dańko R., Szymała K., Holtzer M., Holtzer G.; Skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w systemie kogeneracji; Archives of Foundry Engineering; Volume 12; Special Issue 1/2012; 185-190
32. Kajurek J., Rusowicz A.; Zastosowanie organicznego obiegu Rankine'a (ORC) zasilanego niskotemperaturowymi źródłami ciepła do produkcji energii elektrycznej; Aparatura Badawcza i Dydaktyczna; 3/2017; s. 159-173
33. Prauzner T., Krzywański J., Sosnowski M., Grabowska K., Żyłka A., Kułakowska A.; Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne systemów chłodniczych, jako przykład racjonalizacji użytkowania energii, bezpieczeństwa eksploatacji i ochrony środowiska; Wydawnictwo
34. Malicki M.; Przemysłowe i energetyczne zastosowanie absorpcyjnych pomp ciepła dużej mocy; Energia, Rynek Instalacyjny; Nr 12; s. 31-35 Grudzień 2016
35. Little A. B., Garimella S.; Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade; Energy 3(2011); s.1–13
36. Lewandowski W.; Proekologiczne odnawialne źródła energii; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa; 2006
37. Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D., Ossenbrink H.A.; Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries; Solar Energy; 81; 1295–1305
38. Rubik M.; Pompy ciepła – część 2. Teoretyczne podstawy działania – wykresy obiegów sprężarkowych pomp ciepła; Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja; nr 5; 2008; s. 3-5
39. Lubośny Z.; Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym; WNT; Warszawa; 2009
40. Knez D., Śliwa T.; Energetyka geotermalna jako element zrównoważonego rozwoju; Wiertnictwo, Nafta, Gaz; 2004; R. 21/1; 119-123
41. Mokrzycki E., Szurlej A., Skoczek A.; Energetyka wodna jako podstawowe odnawialne źródło energii elektrycznej; Polityka Energetyczna; 2004; nr 7; s. 463–481
42. Bocian P., Golec T., Rakowski J.(red.); Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystywania biomasy; wyd. Instytut Energetyki; Warszawa; 2010

43. Ignarska M.; Odnawialne źródła energii w Polsce; *Poliarchia* 1/2013; 57-72
44. Mitchel C.; *The Political Economy of Sustainable Energy*; Palgrave Macmillan; Basingstoke; 2010
45. Kuśnierz A.; *Recykling szkła*; Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o.; *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*
46. Pilipović A.; Kovačec M.; Štefanić N.; *Impact of Glass Cullet on the Consumption of Energy and Environment in the Production of Glass Packaging Material*; *Recent Researches in Chemistry, Biology, Environment and Culture*
47. *Energy Technology in the Glass Industry Sector (Thermie)*; AEA Environment and Energy; March 1992
48. Sordoń-Kulibaba B.; *Zagospodarowanie odpadów szkła i opakowań szklanych*; *Recykling*; 3 (87); 2008
49. Zippe P.; *Recent Developments of Batch and Cullet Preheating in Europe – Practical Experiences and Implications*; 71st Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings; New York; USA; 2011; Vol. 32; s. 1-18
50. *Proposals for GLS revision; 'Proposal from GEPVP (European Flat Glass Manufacturer Association) for the revision of the Glass BREF'*; Personal Communication; 2007
51. Beerkens R.; *Energy saving options for glass furnaces & recovery of heat from their flue gases and experiences with batch & cullet pre-heaters applied in the glass industry*; In: Drummond CH.; *Ceramic engineering and science proceedings*; Hoboken; NJ; US
52. Kobayashi H., Tuson G. B., Lauwers E. J.; *NOx Emissions From Oxy-Fuel Fired Glass Melting Furnaces*; European Society of Glass Science and Technology Conference on Fundamentals of the Glass Manufacturing Process; Sheffield; England; September 9-11; 19
53. Kobayashi H., Tasca A.; *Oxy-Fuel Fired Glass Melting Technology – Experience, Evolution, and Expectation*; V Latin American Technical Symposium on Glass; Campos do Jordão-SP Brazil; Sep 21-25; 2003
54. Friedmann J., Fan Z., Tang K.; *Low-carbon heat solutions for heavy industry: sources, options, and costs today*; 2019
55. Allendorf M.D.; *Analytical Models for High Temperature Corrosion of Silica Refractories in Glass-Melting Furnaces*; 7th International Conference in Advances in Fusion and Processing of Glass; Rochester; NY; July 27-31; 2003
56. Soares J., Ramos P., Pocas F.; *Is lightweighting glass bottles for wine an option? Linking technical requirements and consumer attitude*; *Packaging Technology and Science An International Journal*; Volume 35, Issue 11; November 2022; s. 833-843

57. Schmitz A., Kamiński J., Scalet B., Soria A.; Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry' Energy Policy; 2011; 39: s. 142-155
58. Dec P., Skorek-Osikowska A.; Assessment of the benefits of implementing the EMS system on the example of a container glass industry; Journal of Power Technologies; vol. 102, nr 4, s. 160 -174; marzec 2023; ISSN 2083-4195
59. Pawłowski W., Stoch L.; Recykling szkła; Wydawnictwo Poznańskie, Poznań
60. Dec P., Skorek-Osikowska A.; Influence of glass furnace age, cullet share and glass color on the glass production energy efficiency; Architecture Civil Engineering Environment; Vol. 14; nr 4; s. 117-123; 2021
61. <https://www.gsl.cz/services-products/assessment/audits-data-analyses/heat-mass-balances>
62. Jouhara H., Khordehghah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A.; Waste heat recovery technologies and applications; Institute of Energy Futures, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University London, 2018.
63. Dec P., Piotrowski P.; A waste heat recovery solution at CP Glass; Energy Efficiency; Glass International; Vol. 43; Nr 8; s. 28-31; September 2020
64. IPSE GO: <https://about.ipsego.app/model-libraries> [dostęp 10.09.2023]
65. IAWPS: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html> [dostęp 10.09.2023]

13. Spis tabel

Tabela 1 Podsumowanie wyników wygenerowanego równania regresji liniowej wielokrotnej w dodatku "Analiza Danych" w programie MS Excel.....	65
Tabela 2 Fragment danych procesu topienia szkła w piecu szklarskim przed wdrożeniem systemu zarządzania energią oraz zużycie energii jako wynik regresji.	67
Tabela 3 Fragment danych procesu topienia szkła w piecu szklarskim po wdrożeniu systemu zarządzania energią oraz zużycie energii jako wynik regresji.	67
Tabela 4 Wyniki obliczeń błędu względnego i zużycia energii na tony wytopionego szkła przed wdrożeniem EMS.....	70
Tabela 5 Wyniki obliczeń błędu względnego i zużycia energii na tony wytopionego szkła po wdrożeniu EMS.....	70
Tabela 6 Wyniki wdrożenia systemu zarządzania energią jako średnia błędu względnego oraz średnia zużycia energii na tonę szkła	71
Tabela 7 Osiągnięte oszczędności energii w wyniku modernizacji oświetlenia jednej z hali huty.....	73
Tabela 8 Wpływ udziału stłuczki na średnie zużycie paliwa energetycznego dla poszczególnych wanien szklarskich.....	77
Tabela 9 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła bezbarwnego - flint.....	78
Tabela 10 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła brązowego - amber	79
Tabela 11 Procentowy udział składników zestawu szklarskiego wraz ze wzrostem udziału stłuczki dla szkła zielonego - green.....	79
Tabela 12 Parametry techniczne zaprojektowanych kotłów odzyskowych dla spalin wychodzących z wanien W1, W2 i W3	91
Tabela 13 Parametry techniczne turbozespołu turbiny parowej	99
Tabela 14 Parametry techniczne dobranego kompresora promieniowego.....	106
Tabela 15 Parametry techniczne pojedynczej chłodni wentylatorowej	113
Tabela 16 Fragment danych wygenerowanych z bazy danych EMS dla rozdzielczości godzinowej dla roku bazowego w warunkach pracującej turbiny ze sprężarką systemu WHR.....	131
Tabela 17 Fragment danych wygenerowanych z bazy danych EMS dla rozdzielczości godzinowej dla roku bazowego w warunkach gdy turbina ze sprężarką systemu WHR nie pracuje	132
Tabela 18 Dane oszczędności miesięcznych dla roku bazowego przy pracującym WHRS..	133

14. Spis rysunków

Rysunek 1 Główny ciąg technologiczny produkcji szkła opakowaniowego	12
Rysunek 2 Schemat zestawu w hucie szkła	14
Rysunek 3 Schemat pomiaru energii elektrycznej przy użyciu liczników Diris Digiware.....	56
Rysunek 4 Miernik PM5111 z MID.....	56
Rysunek 5 Schemat układu pomiarowego jednego z transformatorów w analizowanej hucie	57
Rysunek 6 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W1	57
Rysunek 7 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W2	58
Rysunek 8 Schemat punktów pomiarowych gazu ziemnego dla hali W3	58
Rysunek 9 Przepływomierz z rurką spiętrzającą do pomiaru przepływu sprężonego powietrza	59
Rysunek 10 Screen głównego ekranu systemu EMS - Energy Performance Dashboard	60
Rysunek 11 Screen ekranu - Rozpływ powietrza.....	61
Rysunek 12 Screen ekranu - Energia - Zestawienie Strażników Mocy	61
Rysunek 13 Przykładowy raport wygenerowany przez System Zarządzania Mediami Energetycznymi - zużycie wody w procesie formowania hali W1	63
Rysunek 14 Porównanie rzeczywistego zużycia energii ze zużyciem z obliczeń przed wdrożeniem systemu zarządzania energią.	68
Rysunek 15 Porównanie rzeczywistego zużycia energii ze zużyciem z obliczeń po wdrożeniu systemu zarządzania energią.	69
Rysunek 16 Wykres błędu względnego kontroli zużycia energii przed wdrożeniem EMS	70
Rysunek 17 Wykres błędu względnego kontroli zużycia energii po wdrożeniu EMS	71
Rysunek 18 Wykres dla jednego z wymienionych systemów sterowania silnikami wentylatorów z wykorzystaniem falownika.....	75
Rysunek 19 Zużycie gazu ziemnego przy udziale stłuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W1	81
Rysunek 20 Wykres zużycia gazu ziemnego przy udziale stłuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W2.....	82
Rysunek 21 Wykres zużycia gazu ziemnego przy udziale stłuczki szklanej w zestawie dla pieca szklarskiego W3.....	83
Rysunek 22 Bilans cieplny typowego pieca szklarskiego z regeneratorem.....	85
Rysunek 23 Uproszczony schemat wdrożonego odzysku ciepła; czerwona linia to strumień pary, zielona linia to przepływ wody	86
Rysunek 24 Wizualizacja projektowa kotła odzyskowego B1 dla spalin pochodzących z waniei W1 i W2.....	92
Rysunek 25 Wizualizacja projektowa kotła odzyskowego B2 dla spalin pochodzących z wanny W3.....	93
Rysunek 26 System oczyszczania kanałów spalin kotła odzyskowego - APCS.....	94
Rysunek 27 Wizualizacja projektowa deaeratora (odgazowywacza)	95
Rysunek 28 Wizualizacja z panelu sterowania systemu odzysku ciepła	97
Rysunek 29 Projekt dwustopniowej turbiny parowej z przekładnią	98

Rysunek 30 Wizualizacja projektowa dwustopniowej turbiny parowej z kondensatorem i przekładnią	99
Rysunek 31 Ekran panelu sterowania dwustopniową turbiną parową i kondensatora.....	103
Rysunek 32 Projekt dwustopniowej sprężarki promieniowej z intercoolerem międzystopniowym	106
Rysunek 33 Wizualizacja projektowa dwustopniowej sprężarki z intercoolerem	107
Rysunek 34 Wizualizacja projektowa dwustopniowej turbiny parowej z kondensatorem i dwustopniowej sprężarki promieniowej z intercoolerem połączone jednym wałem.....	108
Rysunek 35 Wizualizacja projektowa ekonomizera E1 połączonego jednym kanałem spalin z kotłem odzyskowym B1	109
Rysunek 36 Wizualizacja projektowa ekonomizera E2 połączonego jednym kanałem spalin z kotłem odzyskowym B2	110
Rysunek 37 Wizualizacja projektowa wymiennika ciepła HE4.1	111
Rysunek 38 Wizualizacja projektowa wymiennika ciepła HE4.2	111
Rysunek 39 Projekt chłodni wentylatorowej	112
Rysunek 40 Wizualizacja projektowa chłodni wentylatorowej	113
Rysunek 41 Stacja uzdatniania wody	116
Rysunek 42 Przekrój kotła gazowego do rozgrzewu	117
Rysunek 43 Wizualizacja projektowa kotła gazowego do rozgrzewu kotłów odzyskowych	118
Rysunek 44 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu minimalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach letnich	122
Rysunek 45 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu minimalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach zimowych	123
Rysunek 46 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu nominalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach letnich	124
Rysunek 47 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu nominalnego przepływu spalin przez kotły odzyskowe w warunkach zimowych	125
Rysunek 48 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanień szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach letnich.....	126
Rysunek 49 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanień szklarskich W1 i W2 przez kocioł odzyskowy B1 w warunkach zimowych	127
Rysunek 50 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach letnich.....	128
Rysunek 51 Model obiegu energetycznego WHRS dla wariantu maksymalnego przepływu spalin z wanny szklarskiej W3 w warunkach zimowych	129
Rysunek 52 Zależność pomiędzy ilością wyprodukowanego sprężonego powietrza w metrach sześciennych, a wygenerowanymi oszczędnościami wynikającymi z wyłączeniem tradycyjnych sprężarek.....	133