



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA: Nauki inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Inżynieria mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Metoda efektywnego zarządzania procesem
transportu urobku w podziemnej
kopalni węgla kamiennego*

Autor: mgr inż. Łukasz Cieślik

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Kulinowski, profesor AGH

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

Kraków, 2025



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

FIELD OF SCIENCE: Engineering and Technology

SCIENTIFIC DISCIPLINE Mechanical Engineering

DOCTORAL DISSERTATION

*Method of efficient management of coal haulage
process in an underground mine*

Author: mgr inż. Łukasz Cieślik

First supervisor: dr hab. inż. Piotr Kulinowski, profesor AGH

Completed at: Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.

Kraków, 2025

Serdeczne podziękowania kieruję do mojego promotora, dr hab. inż. Piotra Kulinowskiego profesora AGH, za nieocenione wsparcie merytoryczne, inspirację i życzliwe przewodnictwo na każdym etapie pracy.

Dziękuję Firmie Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. za umożliwienie realizacji prac badawczych, wsparcie technologiczne i zaufanie, które miało istotny wpływ na powstanie rozprawy.

Składam podziękowania Akademii Górniczo-Hutniczej za sprzyjające warunki do rozwoju naukowego oraz możliwość realizacji pracy w jej środowisku akademickim.

Rozprawę dedykuję mojej Żonie i Dzieciom.

Z wyrazami szacunku
Łukasz Cieślik

Streszczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej nawiązuje do poprawy efektywności systemu odstawy urobku w podziemnych zakładach górniczych na przykładzie kopalni Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A. Praca koncentruje się na analizie zastosowania poziomych mechanicznych zbiorników retencyjnych jako elementów wspomagających zarządzanie strugą urobku w systemach transportu podziemnego poprzez poprawę trzech procesów z wykorzystaniem jednego typu urządzenia: retencji, stabilizacji strugi urobku oraz separacji skały płonnej.

W pierwszej części dokonano analizy przepływu strugi urobku obecnie stosowanego systemu odstawy urobku, ze szczególnym uwzględnieniem punktów nadawy, tras transportowych oraz górniczych zbiorników retencyjnych. Zmienne parametry nadawy z przodków chodnikowych i ścianowych, a także przerwy technologiczne i awaryjne, wpływają na niejednorodny charakter strugi, co wymusza konieczność jej stabilizacji.

W dalszej części pracy przeanalizowano stosowane w LW „Bogdanka” S.A. rozwiązania techniczne w zakresie separacji skały płonnej. Wskazano potencjalne kierunki rozwoju systemu transportowego, obejmujące zastosowanie poziomych zbiorników mechanicznych jako urządzeń umożliwiających retencję urobku, separację skały płonnej i stabilizację strugi.

Na podstawie analizy stanu techniki i przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych zbiorników poziomych opracowano projekt techniczny poziomego zbiornika mechanicznego PZM-250. Wybór systemu napędowego dokonano przy użyciu metody podejmowania decyzji APEKS. Szczegółowo określono założenia projektowe i konstrukcyjne, opracowano algorytm i przeprowadzono obliczenia mocy napędu oraz przygotowano algorytmy sterowania pracą zbiornika.

W kolejnych etapach wykonano symulację zastosowania zbiornika w uproszczonym modelu systemu transportowego kopalni. Przeprowadzone analizy pozwoliły określić wpływ wdrożenia projektowanego rozwiązania na efektywność systemu odstawy.

W dalszej części przeprowadzono symulacje mechaniczne w module Dynamic Simulation (Autodesk Inventor 2024), uwzględniając kontakty, siły zewnętrzne oraz opory ruchu. Analiza objęła zachowanie całego zespołu zbiornika w warunkach eksploatacyjnych, z uwzględnieniem wszystkich istotnych oddziaływań układu.

Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do dalszej oceny wytrzymałości konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES).

Opracowane urządzenie może znaleźć szerokie zastosowanie w innych podziemnych zakładach górniczych. Wyniki pracy stanowią podstawę do podjęcia działań wdrożeniowych mających na celu przystosowanie rozwiązania do warunków eksploatacyjnych wybranych zakładów.

Zagadnienie badawcze pt. „Metoda efektywnego zarządzania procesem transportu urobku w podziemnej kopalni węgla kamiennego” zostało sformułowane w ramach umowy trójstronnej, będącej wynikiem współpracy firmy Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. oraz Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat Wdrożeniowy”.

Abstract

The subject of the doctoral dissertation concerns the improvement of the efficiency of the run-of-mine (ROM) haulage system in underground mining facilities, using the case study of the Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A. mine. The research focuses on analyzing the application of horizontal mechanical buffering tanks as components supporting the management of the material stream in underground transportation systems by improving three key processes through the use of a single type of device: retention, stream stabilization, and gangue separation.

The first part of the dissertation presents an analysis of the ROM flow within the currently used haulage system, with particular attention to loading points, transport routes, and underground storage bunkers. Variable input parameters from roadway and longwall faces, as well as both planned and unplanned stoppages, contribute to the heterogeneity of the material stream, thereby necessitating its stabilization.

Subsequent chapters analyze the technical solutions currently applied at LW "Bogdanka" S.A. for gangue separation. Potential directions for the development of the transport system are identified, including the use of horizontal mechanical tanks as devices enabling ROM retention, gangue separation, and material stream stabilization.

Based on a review of the current state of the art and existing design solutions for horizontal tanks, a technical design of the PZM-250 horizontal mechanical tank was developed. The selection of the drive system was carried out using the APEKS decision-making method. Design and construction assumptions were thoroughly defined, a control algorithm was developed, drive power calculations were performed, and control algorithms for tank operation were prepared.

In the following stages, the application of the tank was simulated within a simplified model of the mine's transportation system. The analyses conducted allowed for an assessment of the potential impact of the proposed solution on the overall efficiency of the haulage system.

Further, mechanical simulations were carried out using the Dynamic Simulation module (Autodesk Inventor 2024), taking into account contacts, external forces, and motion resistances. The analysis included the behavior of the entire tank assembly under operational conditions, considering all relevant system interactions. The results served as the basis for a structural strength evaluation using the finite element method (FEM).

The developed device has potential for wide application in other underground mining facilities. The research findings provide a foundation for implementation activities aimed at adapting the solution to the operating conditions of selected sites.

The research topic titled "Method for Efficient Management of Run-of-Mine Transportation in an Underground Coal Mine" was formulated as part of a tripartite agreement resulting from the cooperation between Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A. and the AGH University of Science and Technology in Kraków, under the framework of the Ministry of Science and Higher Education's "Industrial Doctorate" program.

Spis treści

1	Wprowadzenie.....	10
2	Charakterystyka systemu odstawy LW „Bogdanka” S.A.	12
2.1	Struktura systemu odstawy	14
2.1.1	Odstawa główna	18
2.1.2	Odstawa przyszybowa.....	18
2.1.3	Odstawa zbiorcza.....	19
2.1.4	Odstawa ścianowa i przodkowa	19
2.1.5	Zbiorniki retencyjne	19
2.1.6	Odstawa skały płonnej.....	19
2.1.7	Szyby	20
2.2	Metoda mechanicznej separacji skały płonnej w warunkach LW „Bogdanka” S.A.	20
2.2.1	System przesiewaczy wibracyjnych	26
2.2.2	System załadowni do transportu skały płonnej	28
2.2.3	Analiza danych produkcyjnych	30
2.2.4	Problem wykorzystania skały płonnej w LW „Bogdanka” S.A.	31
2.3	Zanieczyszczenie urobku skałą płonną.....	20
2.3.1	Źródła zanieczyszczenia urobku skałą płonną.....	21
2.3.2	Szacowane ilości skały płonnej na podstawie literatury	22
2.3.3	Sposoby zagospodarowania odpadów	23
2.3.4	Korzyści z eliminacji skały płonnej z urobku	25
3	Cel pracy	33
4	Ocena możliwości selektywnego urabiania węgla.....	35
4.1.1	Systemy monitorujące jakość transportowanego urobku	36
4.1.2	Detekcja skały podczas urabiania.....	36
4.1.3	Detekcja skały płonnej podczas transportu	38
4.2	Obiekt badań.....	38
4.3	Wyposażenie stanowiska testowego	40
4.4	Opis prowadzonych badań testowych.....	42
4.5	Analiza danych	45
4.6	Wnioski	47
5	Analiza rozwiązań konstrukcyjnych i funkcjonalnych zbiorników retencyjnych.....	48
5.1	Systematyka zbiorników retencyjnych	49
5.1.1	Rola zbiorników retencyjnych w systemie transportowym.....	49
5.1.2	Klasyfikacja mechanicznych zbiorników retencyjnych	51
5.1.3	Schematy działania mechanicznych zbiorników retencyjnych	53
5.2	Stan techniki	57
5.3	Analiza rozwiązań technicznych mechanicznych zbiorników retencyjnych.....	58
5.3.1	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, ruchomym punktem podawania	59
5.3.2	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, stałym punktem podawania, z przenośnikiem płytowym na dnie	60
5.3.3	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, stałym punktem podawania, z przenośnikiem zgrzeblowym na dnie.....	61
5.3.4	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wygarniaczem	63
5.3.5	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wysypem bocznym.....	65
5.3.6	Mechaniczny zbiornik retencyjny z ruchomą skrzynią, z przenośnikiem taśmowym na dnie	68

5.3.7	Mechaniczny zbiornik retencyjny z ruchomą skrzynią, z przenośnikiem zgrzeblowym na dnie	71
5.4	Podsumowanie.....	73
6	Projekt poziomego zbiornika mechanicznego.....	77
6.1	Wybór wariantu napędu z wykorzystaniem metody APEKS.....	78
6.1.1	Warianty układów napędowych	78
6.1.2	Zestaw kryteriów ocen	82
6.1.3	Opis kryteriów ocen	84
6.1.4	Macierz decyzyjna APEKS	84
6.1.5	Wskaźnik wag	85
6.1.6	Ocena wariantów	86
6.1.7	Wybór wariantu.....	87
6.2	Obliczenia stanu obciążenia napędu i ciągu	88
6.2.1	Wykaz symboli i oznaczeń	88
6.2.2	Założenia do projektu	90
6.2.3	Algorytm obliczeniowy	91
6.2.4	Obliczenia mocy napędu	98
6.3	Algorytmy sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym	100
6.3.1	Założenia do opracowania algorytmów sterowania PZM-250	103
6.3.2	Algorytm zarządzania stanami PZM-250.....	103
6.3.3	Algorytm retencji.....	104
6.3.4	Algorytm stabilizacji	105
6.3.5	Algorytm separacji	106
7	Analiza efektywności zastosowania zbiornika mechanicznego w systemie odstawy	109
7.1	Dyskretny model symulacyjny	111
7.2	Model testowego systemu transportu.....	114
7.2.1	Model przodka ścianowego	116
7.2.2	Model przodków chodnikowych	117
7.2.3	Scenariusze badawcze	119
7.2.4	Wariant 1 bazowy - bez zbiorników mechanicznych.....	120
7.2.5	Wariant 2 - stabilizacja i retencja	124
7.2.6	Wariant 3 - retencja, stabilizacja i separacja	126
7.3	Wnioski z badań symulacyjnych.....	129
8	Projekt poziomego zbiornika mechanicznego.....	130
8.1	Założenia konstrukcyjne	130
8.2	Projekt poziomego zbiornika mechanicznego PZM-250.....	132
8.2.1	Skrzynia ładunkowa	137
8.2.2	Cięgno płytowo-łańcuchowe	138
8.2.3	Jednostka napędowa	142
8.2.4	Zespół zwrotny ciągu płytowego.....	144
8.2.5	Zespół zwrotny ciągu łańcuchowego.....	145
8.2.6	Konstrukcja nośna główna i pomocnicza	147
8.3	Symulacja dynamiczna pracy poziomego zbiornika mechanicznego	150
8.4	Analiza wytrzymałościowa metodą MES.....	155
9	Podsumowanie i wnioski końcowe	159
	Literatura	161

1 Wprowadzenie

Transport urobku w kopalniach podziemnych stanowi kluczowy element łańcucha produkcyjnego. Charakterystyczną cechą przenośnikowych systemów transportowych jest konieczność ich doboru tak, aby możliwe było przetransportowanie maksymalnego napływu materiału z robót eksploatacyjnych i przygotowawczych [1]. Maksymalna wydajność układu transportu zależy od wielu czynników np. ilości źródeł nadawy urobku, stosowanej techniki eksploatacji, długości i ilości przerw technologicznych, możliwości transportowych szybów wydobywczych czy maksymalnej wydajności zakładu przeróbki mechanicznej węgla na powierzchni.

W Polskim górnictwie węglowym, systemy transportowe oparte są głównie na wykorzystaniu przenośników taśmowych. W obliczu właściwego doboru parametrów urządzeń będących częścią systemu transportowego kluczowe staje się stosowanie zaawansowanych metod projektowania oraz wykorzystywanie zaawansowanych modeli symulacyjnych. Prowadzenie szczegółowych analiz umożliwia optymalny dobór parametrów urządzeń, co wpływa korzystnie na efektywność całego procesu wydobywczego. Indywidualne podejście do projektowania systemów transportowych, uwzględniające specyfikę podziemnego zakładu górniczego jest niezbędne do zapewnienia ciągłości pracy urządzeń. Wdrażanie innowacyjnych elementów ciągów transportowych w podziemnych zakładach górniczych napotyka jednak szereg barier, wynikających przede wszystkim z ograniczonej dostępności odpowiednich technologii na rynku.

Prace związane z implementacją nowych rozwiązań wymagają ścisłej współpracy pomiędzy wyspecjalizowanymi firmami produkcyjnymi, ośrodkami badawczo-rozwojowymi oraz doświadczoną kadrą inżynierską [2]. Ostatnie lata pokazują, że rynek maszyn i urządzeń górniczych wymaga coraz większego zaangażowania samych odbiorców w procesy projektowe, produkcyjne i decyzyjne. Rozwiązania dedykowane dla górnictwa często mają charakter prototypowy i są „szyte na miarę”, a ich opracowanie i dostosowanie do warunków pracy wymaga aktywnego udziału przyszłych użytkowników.

Wzrost zdolności produkcyjnych, eksploatacja coraz uboższych pokładów oraz rosnące wymagania w zakresie niezawodności podziemnych systemów transportowych wskazują na konieczność wdrażania rozwiązań umożliwiających retencję, stabilizację strugi urobku oraz separację skały płonnej. Zastosowanie mechanicznych zbiorników

retencyjnych w podziemnych ciągach transportowych może przyczynić się do poprawy stabilności układu transportowego i ograniczenia skutków zmienności nadawy [3]. Analiza funkcjonującego systemu transportowego z wykorzystaniem symulacji komputerowych pozwoli ocenić efekty zastosowania systemów retencji oraz określić kierunki dalszego rozwoju rozwiązań konstrukcyjnych wspomagających zarządzanie przepływem urobku [4],[5].

Przeprowadzenie przez autora rozprawy testów in situ oraz analiz z wykorzystaniem modelu symulacyjnego pozwoli oszacować potencjalny wpływ proponowanych rozwiązań na system transportowy kopalni. Wyniki badań będą podstawą do opracowania projektu rozwiązania technicznego możliwego do zastosowania w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny.

Tytuł rozprawy doktorskiej „Metoda efektywnego zarządzania procesem transportu urobku w podziemnej kopalni węgla kamiennego” obejmuje tematykę zarządzania przepływem urobku w warunkach podziemnych zakładów górniczych. W rzeczywistości jednak zasadniczy zakres pracy dotyczy analizy efektywności zastosowania mechanicznego zbiornika retencyjnego w systemie odstawy.

Przeprowadzone badania będą koncentrowały się na szczegółowej analizie systemu odstawy urobku w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. z uwzględnieniem wpływu wprowadzenia mechanicznego zbiornika retencyjnego. Głównym zadaniem jest więc zaprojektowanie urządzenia, które pozwoli na jednoczesną realizację trzech kluczowych funkcji wspierających organizację transportu: czasowej retencji urobku, stabilizacji strugi urobku oraz separacji skały płonnej na wczesnym etapie eksploatacji w celu uniknięcia jej dalszego transportu na powierzchnię.

2 Charakterystyka systemu odstawy LW „Bogdanka” S.A.

Proces wydobywania węgla kamiennego złożony jest z szeregu złożonych etapów, wśród których istotną rolę odgrywa skuteczny i efektywny system transportu kopaliny na powierzchnię. W odpowiedzi na rosnące wymagania techniczne, kopalnie wprowadzają do ciągów transportowych nowoczesne rozwiązania, umożliwiające maksymalizację wydajności transportu podziemnego. Rosnące zapotrzebowanie na węgiel kamienny oraz dynamiczny postęp technologiczny w branży górniczej przez lata sprawił, że systemy transportu urobku stały się kluczowym ogniwem procesu wydobywania. Szczególnie widoczne było to po wynalezieniu przez profesora Ryszarda Riegera przenośnika wstrząsanego, który znacząco wpłynął na rozwój technologii górniczych, jak również zmienił podejście do prowadzenia eksploatacji podziemnej. Z czasem jednak rozwiązanie to zostało wyparte przez przenośniki zgrzeblowe i taśmowe charakteryzujące się większą wydajnością. Dalszy wzrost efektywności prac górniczych został ograniczony przez możliwości technologiczne związane z postępem wykonywania obudowy wyrobisk za kombajnem chodnikowym. [6].

Transport górniczy stanowi kluczowe ogniwo łączące proces pozyskiwania i przetwarzania urobku węglowego, mające istotny wpływ na efektywność całego procesu produkcji. W związku z tym, konieczne jest stosowanie zaawansowanych i sprawdzonych rozwiązań technologicznych oraz prowadzenie stałej weryfikacji i nadzoru infrastruktury transportowej, aby maksymalnie wykorzystać potencjał transportu. W literaturze często podkreślana jest przewaga systemów transportowych opartych na przenośnikach taśmowych nad innymi środkami transportu podziemnego. Autorzy wymieniają szereg ich zalet między innymi:

- wysoką wydajność w przeliczeniu na tonę transportowanego nosiwa[1],
- prostą budowę przenośników [7],
- możliwość dostosowania konstrukcji trasy przenośnika taśmowego do warunków pracy [8],
- możliwość łatwej zmiany miejsca pracy i łatwą adaptację (wydłużanie, skracanie, zmiany miejsca pracy)[9],
- możliwość implementacji układów automatyki umożliwiających sterowanie pracą przenośników [10],
- wysoką trwałość i niezawodność urządzeń [11],

Systemy transportowe zbudowane w oparciu o przenośniki taśmowe i górnicze zbiorniki retencyjne zapewniają maksymalne wykorzystanie urządzeń wyciągowych. W kontekście nieustannie rosnących wymagań dotyczących niezawodności i efektywności w systemach transportowych, podkreśla się znaczenie zwiększenia niezawodności oraz stopnia ich zautomatyzowania. Ponadto, kładzie się nacisk na automatyzację i mechanizację, szczególnie w kontekście określania kierunków rozwoju przenośników taśmowych [12].

Analizowane są systemy odstawy urobku funkcjonujące w kopalniach podziemnych, uznając je za kompromis między ograniczeniami natury technicznej, formalnej, naturalnych oraz przestrzennych warunków zalegania złoża. Systemy transportowe oparte na przenośnikach taśmowych ewoluują dzięki intensywnie prowadzonym badaniom i implementacji nowych rozwiązań. Sukcesywnie wypierają mało efektywne i kosztowne inne urządzenia transportowe. Podkreśla się również, że najczęstszą przyczyną problemów z eksploatacją jest przeciążenie napędu, przeładowanie przenośnika lub niska efektywność pracy. Wymienione problemy skutkują negatywnymi konsekwencjami w wymiarze efektywności energetycznej oraz eksploatacji [13].

Systemy przenośników taśmowych należą do najbardziej energochłonnych elementów infrastruktury wykorzystywanej w górnictwie podziemnym. Jak wykazano w pracy [14], odpowiednia konfiguracja parametrów konstrukcyjnych może w istotny sposób wpłynąć na obniżenie wskaźnika energochłonności [15]. W ostatnich latach coraz większą rolę odgrywają nowoczesne rozwiązania techniczne m.in. stosowanie taśm o zmniejszonym współczynniku tarcia, przemienników częstotliwości, systemów automatyzacji pracy oraz wyposażenie urządzeń transportowych w układy monitorujące. Tego typu usprawnienia przyczyniają się nie tylko do wydłużenia żywotności całego systemu transportowego, ale również do zauważalnego ograniczenia zużycia energii [16].

Z kolei w pracy [17] zaproponowano model sterowania prędkością taśm w zależności od aktualnego natężenia przepływu materiału. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest unikanie strat energii, które pojawiają się w sytuacjach, gdy przenośniki pracują przy niepełnym obciążeniu. Co więcej, autorzy publikacji [3] udowodnili, że zastosowanie elementów buforowych oraz regulowanej prędkości transportu pozwala zredukować całkowite zużycie energii nawet o 30%. W świetle powyższego, wprowadzenie zbiornika mechanicznego jako elementu stabilizującego w systemie odstawy może stanowić praktyczne rozwiązanie wspierające poprawę parametrów

energetycznych. Taki zbiornik może działać jako bufor przejściowy, wyrównując chwilowe skoki obciążenia i zapewniając płynność przepływu urobku. W efekcie przekłada się to bezpośrednio na możliwość ograniczenia poboru energii przez systemy przenośników taśmowych.

2.1 Struktura systemu odstawy

Kopalnia LW „Bogdanka” S.A. wykorzystuje obecnie pod ziemią ponad 110 przenośników taśmowych 18 różnych typów (stan na październik 2023 r.). Posiadany park maszynowy umożliwia budowę systemu transportu oraz zapewnienie odstawy urobku i odseparowanej skały płonnej na trasie o łącznej długości blisko 53 kilometrów. Dzięki temu możliwe jest tworzenie układów odstawy z przodków i ścian, których długości sięgają nawet kilkunastu kilometrów.

W opracowaniu [18] przeprowadzono szczegółową analizę pracy układu transportowego Bogdanki. Dokument opracowany został w 2015 roku. W tym czasie Bogdancę eksploatowanych było 74 przenośników taśmowych o sumarycznej długości ponad 47 kilometrów. Zwiększenie liczby urządzeń oraz ich łącznej długości wynikało z konieczności docierania do złóż położonych coraz dalej od szybów wydobywczych. Dla porównania skali systemu, oszacowano liczbę przenośników taśmowych użytkowanych w całej branży górniczej w Polsce w 2007 roku. Według wyliczeń, w górnictwie wykorzystywano wówczas około 3000 przenośników taśmowych różnych typów, stanowiących integralną część systemów transportowych, których maksymalne długości sięgały kilkunastu kilometrów. Łączna długość tych przenośników wynosiła około 2000 kilometrów [19].

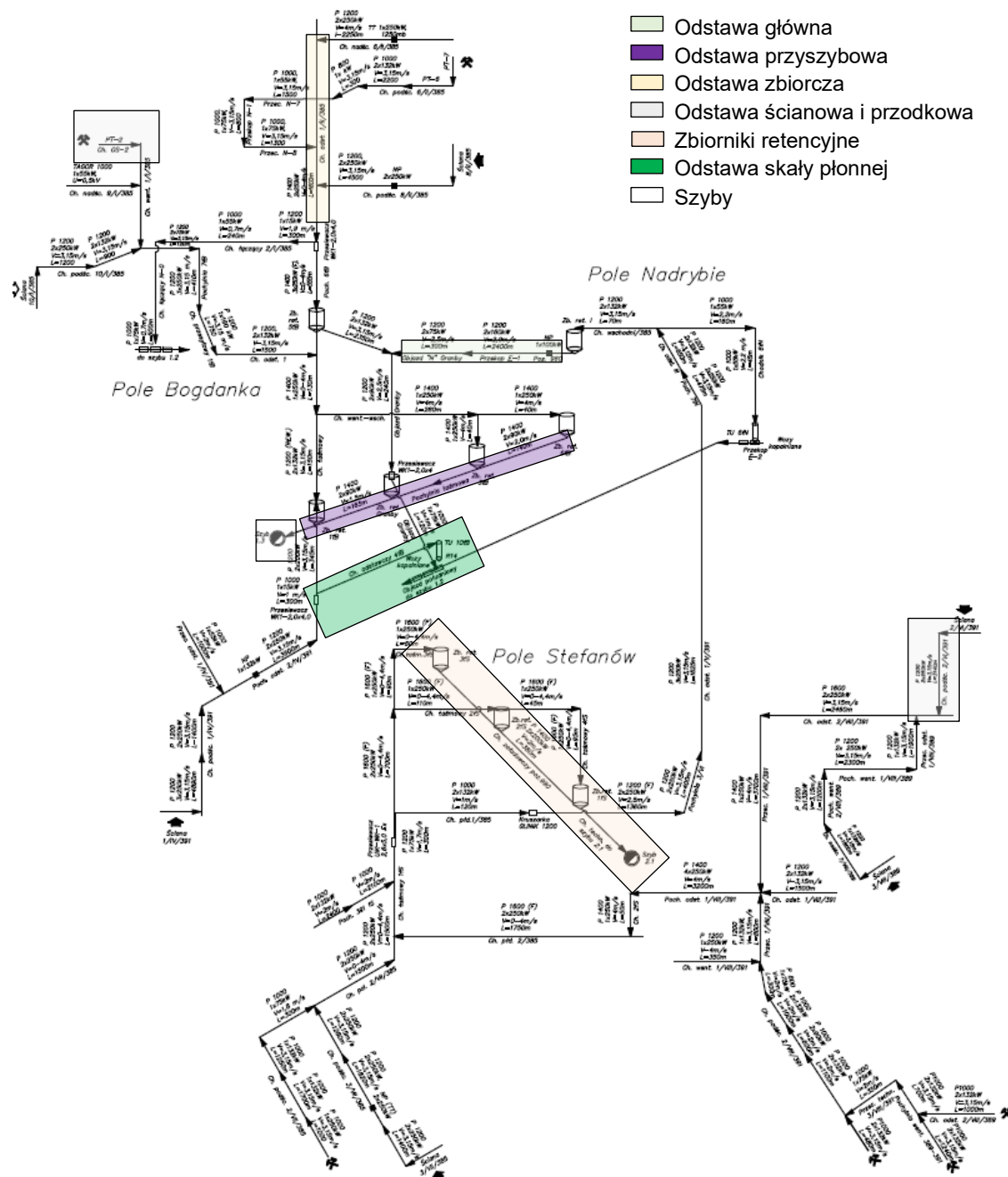
Układy odstawy w rejonach ścian i przodków podziemnych kopalń węgla kamiennego wymagają zastosowania specjalistycznego parku maszynowego. Jest to kluczowy element dla efektywnego prowadzenia prac. Eksploatacja przodków ścianowych stała się możliwa dzięki rozwinięciu i zastosowaniu układów przenośników zgrzeblowych. W układach tych stosowane są dwa przenośniki zgrzeblowe: ścianowy (PZS) i podścianowy (PZP). Układy umożliwiają bezpośredni transport urobku ze ściany na przenośnik taśmowy w chodniku podścianowym, znanym również jako przenośnik odstawy ścianowej, co znacząco usprawnia proces odstawy urobku z rejonu wydobywczego. Z kolei w przypadku przodków chodnikowych, eksploatacja opiera się na zastosowaniu systemu podajników, które umożliwiają transport i załadunek urobku wydobytego przez kombajn chodnikowy na przenośnik odstawy przodkowej.

Transformacja systemu odstawy w podziemnych zakładach górniczych widoczna jest w bardzo krótkich przedziałach czasu. Układy odstawy zwłaszcza w obszarze objętym prowadzeniem prac przygotowawczych zmieniają się bardzo dynamicznie. Średni miesięczny postęp robót w przodku chodnikowym w LW „Bogdanka” S.A. wynosi około 200 m, a rekordowy postęp odnotowany w czerwcu 2018 roku wyniósł 820 m. Wysokie postępy prac są zauważalne w szczególności podczas prowadzenia robót przygotowawczych dla ścian eksploatowanych na długich wybiegach (powyżej 3000 m) gdzie prace udostępniające prowadzone są przez więcej niż jeden oddział przodkowy.

Dobór wydajności przenośników taśmowych odstawy prowadzony jest tak, aby możliwe było przetransportowanie maksymalnej chwilowej nadawy urobku. Uwzględniane są tutaj takie parametry jak: prędkość i szerokość taśmy, jej wytrzymałość, moce napędów, funkcja urządzenia w układzie odstawy, nachylenie trasy.

Układ transportu urobku LW „Bogdanka” S.A. rozwijany jest od ponad 40 lat. Obecnie w układzie pracują przenośniki zapewniające maksymalne zdolności transportowe wynoszące 4300 t/h oraz osiągające prędkości taśmy w zakresie 0,3-4,4 m/s. W 2010 roku wprowadzone zostały pierwsze przenośniki odstawy głównej wyposażone w przemienniki częstotliwości. Obecnie przenośniki tego typu zainstalowane na odstawach głównych w polu Bogdanka i Stefanów wyposażone są w taśmy o szerokości 1400 mm i 1600 mm, co zapewnia wydajność odpowiednio 2700 t/h i 4300 t/h i prędkość taśmy do 4,4 m/s. System odstawy umożliwił wydobyć 9,9 mln ton węgla. Poziom ten spółka Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A. osiągnęła w 2021 roku. System transportu organiczny jest niestety zdolnościami wydobywczymi szybów skipowych [20].

Zaproponowany w dalszej części rozdziału podział elementów odstawy ma charakter umowny. W poniższym rozdziale z uwagi na bardzo dynamiczne zmiany układu odstawy głównie w obszarze eksploatacji przodków chodnikowych i ścianowych zdecydowano się ująć i opisać stan systemu na grudzień 2023 roku (Rys. 2.1.1). Odstawa realizowana jest z 4 pokładów wydobywczych połączonych ze sobą za pośrednictwem pochylni, górniczych zbiorników retencyjnych oraz otworów wielkośrednicowych. Urobek pochodzący z eksploatacji ścian i przodków w polu Stefanów oraz zamiennie skała płonna pochodząca z przesiewacza wibracyjnego zainstalowanego na odstawie głównej w polu Stefanów może zostać skierowana do Bogdanki. Wykorzystywany jest do tego ciąg przenośników taśmowych oraz górniczy zbiornik retencyjny na terenie pola Nadrybie.



Rys. 2.1.1 Schemat odstawy urobku w LW „Bogdanka” S.A. (stan 12.2023 r.) [oprac. własne]

W tabeli 2.1 zestawiono wybrane parametry urządzeń odstawy.

Tabela 2.1 Zestawienie parametrów systemu odstawy (opracowanie własne)

Ilość przenośników taśmowych	111	[szt.]
Ilość napędów	165	[szt.]
Łączna moc napędów	25,8	[MW]
Długość tras	52970	[m]
Średnia długość trasy	535	[m]
Maksymalna długość przenośnika	2500	[m]
Minimalna długość przenośnika	12	[m]
Średnia moc napędu	231,1	[kW]
Maksymalna moc napędu	4x250	[kW]
Minimalna moc napędu	11	[kW]
Maksymalna wydajność przenośnika	4300	[t/h]
Minimalna wydajność przenośnika	100	[t/h]
Ilość napędów na przenośnik taśmowy	1,49	[szt.]
Ilość typów przenośników taśmowych	18	-
Przenośniki poziome	70	[%]
Przenośniki >5°	>5	[%]
Przesiewacze wibracyjne	4	[szt.]
Kruszarki	8	[szt.]
Retencja urobku (ilość zbiorników)	9	[szt.]
Retencja urobku (objętość zbiorników)	16 897	[m ³]

Na podstawie zestawienia można zauważyć, że blisko połowa przenośników taśmowych posiada jednostki dwunapędowe. Łączna moc napędów wynosi 25,8 MW, co świadczy o wysokim zapotrzebowaniu systemu transportu na energię elektryczną. Całkowita długość tras przenośników taśmowych to 52 970 metrów, przy czym średnia długość pojedynczej trasy wynosi 535 metrów, a najdłuższy przenośnik osiąga 2 500 metrów. Warto również zwrócić uwagę na zróżnicowanie mocy napędów od 11 kW do 1 000 kW (4 × 250 kW), co potwierdza wysoką elastyczność systemu transportowego.

System odstawy można umownie podzielić na:

- odstawę główną,
- odstawę przyszybową,
- odstawę zbiorczą,
- odstawę z przodków ścianowych,
- odstawę z przodków chodnikowych,
- odstawę skały płonnej.

Podział systemu odstawy jest wynikiem podziału obowiązków i odpowiedzialności pomiędzy poszczególnymi oddziałami ruchu zakładu górniczego. Odstawa główna znajduje się pod nadzorem dysponentów odstawy, natomiast odstawa przyszybowa jest zarządzana przez dyspozytora ruchu, który decyduje o kolejności opróżniania zbiorników retencyjnych.

2.1.1 Odstawa główna

Zakład dysponuje dwoma układami odstawy głównej zlokalizowanej w filarach ochronnych szybów w polu Bogdanka i polu Stefanów (Rys. 2.1.1). Zbudowane są one w oparciu o przenośniki taśmowe o szerokości taśmy 1200 mm, 1400 mm i 1600 mm. LW „Bogdanka” S.A. prowadzi separację skały płonnej w ciągach odstawy głównej z wykorzystaniem przesiewaczy wibracyjnych. Umożliwiają one oddzielenie nadgabarytowych ziaren skały płonnej. Daje to możliwość zwiększenia uzysku węgla w urobku kierowanego do zakładu przerobczego oraz ograniczenia dewastacji/zużycia elementów ciągów transportowych transportem kamienia (taśmy przenośnikowej, krawężników, przesypów, naczyń wyciągowych).

2.1.2 Odstawa przyszybowa

Odstawa przyszybowa (Rys. 2.1.1) jest częścią systemu transportu znajdująca się pod bezpośrednim nadzorem dyspozytora ruchu kopalni. Realizowany jest na niej ostatni etap transportu urobku pod ziemią pomiędzy górniczymi zbiornikami retencyjnymi, a naczyniem wyciągowym. W polu Bogdanka znajdują się cztery zbiorniki retencyjne o łącznej pojemności ok. 7 tys. ton obsługiwane są przez dwa przenośniki taśmowe. W polu Stefanów znajdują się trzy zbiorniki retencyjne również o łącznej pojemności ok. 7 tys. ton obsługiwane są przez jeden przenośnik taśmowy. System z uwagi na budowę oraz stabilną nadawę pochodzącą ze zbiorników charakteryzuje się wysokim stopniem wykorzystania wydajności przenośników oraz niską awaryjnością.

2.1.3 Odstawa zbiorcza

Odstawa zbiorcza (Rys. 2.1.1) jest zlokalizowana pomiędzy odstawami ścianowymi i przodkowymi a odstawą główną. Odstawa zbiorcza łączy transport z poszczególnych rejonów wydobywczych z odstawą główną. System odstawy zbiorczej jest zbudowany w oparciu o przenośniki taśmowe, których taśmy mają szerokość od 1200 mm do 1600 mm. Wydajność przenośników dostosowywana jest do indywidualnych potrzeb transportowych charakterystycznych dla danego rejonu wydobywczego (ilość eksploatowanych ścian i przodków).

2.1.4 Odstawa ścianowa i przodkowa

Układ odstawy ścianowej i przodkowej (Rys. 2.1.1) stanowią podajniki i przenośniki o szerokości taśmy 800 mm do 1200 mm. Wydajność urządzeń dla przodków wynosi do 700 t/h, a dla ściany do 2000 t/h. Przenośniki w drążonych przodkach chodnikowych instalowane są za układem podajników, a w ścianach za przenośnikiem zgrzeblowym zlokalizowanym w chodniku podścianowym.

2.1.5 Zbiorniki retencyjne

Elementami ciągów odstawy zapewniającymi ciągłość przepływu strugi są górnicze zbiorniki retencyjne (Rys. 2.1.1). Mają one głównie charakter końcowych punktów odstawy akumulujących urobek przed załadunkiem kieszeni skipowych. W systemach odstawy głównej występują również zbiorniki pośrednie, zlokalizowane na trasie przenośników taśmowych, nad którymi może być prowadzony dalszy transport po ich napełnieniu urobkiem.

2.1.6 Odstawa skały płonnej

Transport oddzielonej od urobku węglowego skały płonnej realizowany jest z wykorzystaniem przenośników taśmowych o szerokości 1000 mm i prędkości taśmy do 1 m/s (Rys. 2.1.1). W procesie odstawy wykorzystywany jest również wspólny ciąg transportowy odstawy głównej łączący rejony Stefanowa i Bogdanki. Układ ten umożliwia zamienny transport zarówno urobku pochodzącego z eksploatacji ścian i przodków, jak i skały płonnej oddzielonej wcześniej na przesiewaczach wibracyjnych. W systemie odstawy skały płonnej zastosowano także otwory wielkośrednicowe łączące poszczególne poziomy kopalni, co pozwala na uproszczenie transportu zanieczyszczeń. Skała płonna, po odseparowaniu i przemieszczeniu przenośnikami, trafia do wozów

urobkowych, a następnie, z pominięciem szybu skipowego oraz zakładu przeróbki mechanicznej węgla kierowana jest bezpośrednio na składowisko odpadów.

2.1.7 Szyby

W LW „Bogdanka” S.A. obecnie eksploatowanych jest sześć górniczych wyciągów szybowych: dwa z nich to szyby skipowe, trzy wielozadaniowe szyby materiałowo-osobowe oraz jeden szyb wentylacyjny (Rys. 2.1.1). Wszystkie szyby otoczone są specjalnie wyznaczonymi filarami ochronnymi, które zabezpieczają je przed oddziaływaniem eksploatacji górniczej prowadzonej w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Szyby skipowe są intensywnie eksploatowane, ponieważ stanowią wąskie gardło w procesie transportu urobku na powierzchnię. Ograniczenie ilości skały płonnej transportowanej tymi szybami wpływa korzystnie na jakość urobku kierowanego do zakładu przeróbki mechanicznej węgla. W latach dziewięćdziesiątych szyb materiałowo-osobowy 1.2 znajdujący się w polu Bogdanka został przystosowany wraz z infrastrukturą powierzchniową do transportu odseparowanej pod ziemią skały płonnej co wpłynęło na poziom wydobywania kopalni.

2.2 Zanieczyszczenie urobku skałą płonną

Wydobycie węgla kamiennego nierozdzielne jest z problemem otaczającej złoża węgla skały płonnej/płonnej. W literaturze spotyka się oba określenia [24],[26],[30] i jak wynika ze znaczenia odnoszą się do minerału trudnego do gospodarczego wykorzystania. Potocznie używana jest również nazwa „kamień”, którą również można odnaleźć w literaturze [28]. Dla ujednolicenia nazewnictwa w dalszej części rozprawy, nie będącej cytowaniem literatury autor będzie posługiwał się określeniem skała płonna.

Problem ograniczenia wydobywania i zagospodarowania skały płonnej istnieje od czasów rozpoczęcia eksploatacji górniczej. Widoczny jest trend wzrostowy zawartości zanieczyszczenia urobku skałą płonną przez ostatnie lata. Jej ilość zależna jest od poziomu wydobywania, stosowanego systemu eksploatacji i jego stopnia zmechanizowania oraz technologii transportu urobku, długości i przebiegu drogi na powierzchnię.

Zanieczyszczenie wydobyte wraz z urobkiem na powierzchnię oddzielane jest w procesie przeróbczym, a następnie w zagospodarowywane lub składowane na hałdach. Dane dotyczące wielkości wydobywania i zanieczyszczenia urobku skałą płonną są zmienne i zależne od wielu czynników. Agencja rządowa ARP opracowuje i publikuje informacje

dotyczącej polskiego górnictwa podziemnego. Dane zawarte są w miesięcznych raportach dotyczą m.in. przychodów i zobowiązań spółek węglowych, wskaźników technicznych, kosztów i bieżącej produkcji (w tym wartości bieżących wskaźników wydobywania węgla) [31]. Według danych Agencji Rozwoju Przemysłu z lutego 2023 roku produkcja węgla kamiennego w Polsce w 2022 roku wynosiła 52,8 mln ton [32]. Skutkowało to wydobywaniem 25,8 mln ton odpadu, co stanowiło 33% wydobytego urobku. Sprawozdanie Zarządu z działalności LW „Bogdanka” S.A. oraz Grupy Kapitałowej LW „Bogdanka” w tym okresie mówi o produkcji 8,4 mln ton węgla handlowego i osiągnięciu uzysku na poziomie 66,2% [33]. Wartość zanieczyszczenia urobku skałą płonną była nieznacznie wyższa od uśrednionych danych przedstawionych w dokumencie ARP.

Poziom wydobyty skały płonnej na powierzchnię w LW „Bogdanka” S.A. w 2022 roku wyniósł 4,3 mln ton, z tego zagospodarowanych zostało 53% odpadów wydobywczych. Plany na 2023 r. to zagospodarowanie 2,5 mln ton przetworzonych odpadów. Na przestrzeni lat stosunek zagospodarowanej skały płonnej do jej wydobywania regularnie rośnie [32],[34]. Pomimo to wysoki udział zanieczyszczenia urobku skałą płonną powinien być bodźcem do rozwoju metod separacji i lokowania skały płonnej pod ziemią poprzez opracowywanie i wdrażanie nowych technologii w podziemiach kopalń. Powinny one umożliwiać osiągnięcie wysokiej efektywności procesu oraz wpływać na zwiększenie ilości zdeponowanej skały przy minimalnych nakładach.

Odseparowanie skały we wczesnym stadium procesu produkcyjnego wpłynie na redukcję kosztów transportu poziomego, pionowego i przeróbki mechanicznej wraz z zagospodarowaniem odpadu na powierzchni [37].

2.2.1 Źródła zanieczyszczenia urobku skałą płonną

Odpady powstałe w wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej mogą być poddane procesom odzysku lub unieszkodliwiania, czyli składowania [38]. W praktyce oddzielenie skały płonnej podczas procesu wydobywania (urabiania i transportu) możliwe jest poprzez zastosowanie separatorów zainstalowanych w ciągach odstawy lub poprzez selektywną eksploatację złoża. Z uwagi na obecność w otoczeniu pokładu węgla piaskowców, łupków czy iłowców obecność skały płonnej w urobku jest nieunikniona.

Do zanieczyszczenia urobku węglowego skałą płonną dochodzi podczas:

- eksploatacji przodków ścianowych i chodnikowych,

- przybierania skał spągowych za postępem przodka chodnikowego i przed postępem przodka ścianowego,
- przebudowy wyrobisk,
- eksploatacji pokładów z występującymi przerostami skałą płoną.

Autorzy [39] zauważają negatywny wpływ oddziaływania transportowanej skały płonnej. Zanieczyszczenie urobku niekorzystnie wpływa na zużycie elementów ciągów transportowych pionowych i poziomych, konieczne jest instalowanie dodatkowych urządzeń takich jak przesiewacze i kruszarki. W przypadku transportu zanieczyszczonego skałą płoną urobku tracony jest uzysk. Autorzy wymieniają kierunki, które mogą wpłynąć na ograniczenie zawartości skały płonnej w urobku.

2.2.2 Szacowane ilości skały płonnej na podstawie literatury

O rozmiarze problemu i ilości odpadu wiadomo od początku eksploatacji górniczej. Czystość wydobywanego urobku w wyniku rozwoju technologii górniczej i eksploatacji pokładów zasobnych w węgiel rosła. Stopniowe wyczerpywanie zasobów i sięganie po trudniej dostępne, uboższe złoża spowodowało tendencję odwrotną- wzrost zawartości zanieczyszczenia dostrzegalne w zestawieniach od kilkunastu lat.

Szacuje się, że urobek węglowy z kopalń podziemnych na świecie zawiera od 10 – 60% niepalnych substancji mineralnych (odpadów) [40]. Dane z lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku mówią o zawartości skały płonnej w urobku węglowym wynoszącym 0,5 t na 1,0 t wydobytego urobku. Obecnie wartości te wahają się w zakresie 0,25-0,35 t. [41].

Autorzy [42] przedstawili podział odpadów powęglowych. Według ich definicji odpady górnicze pochodzące z prowadzonych robót przygotowawczych są możliwe do częściowego pozostawienia pod ziemią. Odpad przeróbczy stanowią zanieczyszczenie wytworzone podczas prac eksploatacyjnych, które wraz z urobkiem trafia do zakładu przeróbczego. W ogólnej masie odpadów udział odpadów górniczych stanowi 15-18%, a przeróbczych 80%.

Autorzy [28] szacują, że ilość zanieczyszczenia w wydobytym urobku węglowym wynosi 40%, a zawartość w tym skały płonnej pochodzenia górniczego wynosiła od 20% do 40%. Indywidualny stopień zanieczyszczenia dla poszczególnych kopalń w Polsce w 1990 roku wahał się od 7% do 73,1%. Źródła skały płonnej oraz ich wpływ na poszczególne etapy procesu wydobywczego na przykładzie LW „Bogdanka” S.A. opisuje [39]. Najwyższym stopniem zanieczyszczenia charakteryzują się roboty

przygotowawcze, podczas których zawartość skały płonnej w urobku może wynosić nawet do 80%.

Ocenia się, że każdej wydobytej tonie węgla kamiennego towarzyszy 250-300 kg odpadów węglowych. Podczas drażenia wyrobisk korytarzowych w pokładach o małej miąższości udział wagowy kamienia na taśmie transportującej urobek z przodka może dochodzić nawet do 70% [43].

W szacowaniu zanieczyszczenia urobku skałą płonną w LW „Bogdanka” S.A. wykorzystywany jest cyfrowy model złoża. System umożliwia prognozowanie ilości skały płonnej podczas prowadzonej eksploatacji dostarczając informacji dotyczących lokalizacji, geometrii oraz przestrzennego zróżnicowania jakości złoża węgla. Cyfrowy model złoża jest tym dokładniejszy im dokładniej prowadzone są prace rozpoznawcze i jest tylko częścią systemu umożliwiającego optymalne zarządzanie złożem [39], [44]. W LW „Bogdanka” S.A. stworzony został cyfrowy model złoża. Narzędzie informatyczne zasilane są danymi geologicznymi (roboty rozpoznawcze w przodkach chodnikowych oraz próby z badawczych otworów rdzeniowych). Dane są przetwarzane, wprowadzane do bazy danych, mając wpływ na aktualizację numerycznego modelu złoża [45].

Prowadzone są nadal badania i analizy z wykorzystaniem technik modelowania numerycznego mające na celu zrozumienie zmian parametrów wpływających zarówno na rozmiar, jak i charakter zubożenia urobku skałą płonną, w zależności od przyjętego systemu eksploatacji [46].

2.2.3 Sposoby zagospodarowania odpadów

Problem wykorzystania i zagospodarowania skały płonnej w górnictwie nie jest zagadnieniem nowym, wymaga jednak ciągłej aktualizacji, tzn. rozpoznawania kierunków zagospodarowania i tworzenia nowych technologii ich wykorzystania na potrzeby gospodarki [37]. Rozwój mechanizacji urabiania i ładowania wpływa niekorzystnie na stopień zanieczyszczenia skałą płonną (obecnie trudne jest nawet wydzielenie kamienia grubego z urobku). Wzrost zanieczyszczenia kopaliny jest ściśle związany z postępującym procesem mechanizacji mającym miejsce w przemyśle wydobywczym. Ciągły wzrost efektywności ekonomicznej poprzez zwiększanie produkcji przy utrzymaniu określonego poziomu kosztów stałych, może skutkować pogorszeniem jakości wydobywanej kopaliny [46].

Uważa się, iż optymalnym rozwiązaniem jest poddawanie odpadów górniczych składowaniu w miejscu ich występowania, co wpłynie na redukcję kosztów wydobycia w wyniku braku konieczności dalszego transportu i ponoszenia opłat za składowanie [47].

Jak wskazuje [29] przeprowadzono badania symulacyjne i wykazano wpływ kosztów wydobycia skały płonnej na ogólne koszty operacyjne związane z wydobyciem węgla kamiennego. Dlatego uzasadnione jest poszukiwanie rozwiązań, które umożliwią ograniczenie ilości odpadów wydobywczych, na rzecz bardziej efektywnego procesu wydobycia.

W publikacji [48] opisano potrzebę separacji skały płonnej pod ziemią przed dalszym transportem urobku na powierzchnię do zakładu przeróbczego. Realizacja prowadzona byłaby na węzłach odkamieniania urobku. Oddzielone w ten sposób zanieczyszczenie zostałoby zagospodarowane pod ziemią. Ponadto opisano potrzeby związane z oddzieleniem zanieczyszczenia skałą płonną urobku, opisuje możliwe do wdrożenia rozwiązania wraz z określeniem ryzyka za tym idącego. W jego ocenie im większa jest zawartość skały płonnej w urobku, tym opłacalność inwestycji związanej z pozostawieniem go pod ziemią jest wyższa [49]. Nierzadko pomijany jest fakt, iż najskuteczniejszym sposobem redukcji ilości generowanych w procesie produkcji odpadów jest zapobieganie ich powstawania. Prawidłowy dobór kompleksów ścianowych oraz właściwe planowanie robót górniczych umożliwią osiągnięcie tego celu. Koncepcja przeróbki podziemnej węgla daje duże nadzieje, choć wyzwaniem pozostają nadal ograniczone możliwości oraz trudności w efektywnym wykorzystaniu odpadów pod ziemią. Proces przeróbczy prowadzony pod ziemią eliminowałby konieczność transportu odpadów na powierzchnię [50].

Istnieje szereg kierunków i możliwości zagospodarowania odpadów wydobywczych. W literaturze dokonano podziału na następujące grupy:

- zastosowanie odpadów węglowych na podsadzki,
- gromadzenie na zwałowiskach,
- niwelacja i rekultywacja zdegradowanych terenów,
- roboty inżynieryjne,
- produkcja materiałów budowlanych,
- przetwarzania odpadów powęglowych [42].

2.2.4 Korzyści z eliminacji skały płonnej z urobku

Podjęmowane działania związane z eliminacją skały płonnej z urobku niosą za sobą szereg korzyści wymiernych i niewymiernych. Z technicznego punktu widzenia obniżenie zawartości zanieczyszczenia w transportowanym urobku wpłynie na trwałość maszyn i urządzeń górniczych obniżenie zużycia energii, zwiększenie wydajności szeroko rozumianego procesu produkcji. Eliminacja skały płonnej podczas prowadzonego procesu wydobywania jest kluczowym elementem nowoczesnego górnictwa.

Eliminacja zanieczyszczenia z urobku wpłynie na

- zwiększenie postępów ścian (osiągnięcie wyższego poziomu wydobywania przy poniesieniu tych samych kosztów),
- zmniejszenie liczby i czasów awarii,
- redukcję kosztów transportu poziomego i pionowego (kosztów energii, wymiany taśmy przenośnikowej, krążników, elementów ciągów transportowych tj. kieszenie skipowe, załadownie, przesypy, zmniejszenie kosztów separacji)
- redukcja kosztów związanych z przeróbką urobku i zagospodarowaniem odpadu [46].

Podsumowując eliminacja skały płonnej stanowi kluczowy element efektywnego i zrównoważonego prowadzenia procesu wydobywania węgla.

2.3 Metoda mechanicznej separacji skały płonnej w warunkach LW „Bogdanka” S.A.

W tej części rozdziału przedstawiono metodę mechanicznej separacji skały płonnej w warunkach kopalni podziemnej LW „Bogdanka” S.A., stosowaną obecnie pod ziemią i umożliwiającą płynny oraz niezawodny transport urobku i oddzielonej skały płonnej na powierzchnię. Rozwiązania ewoluowały od prostych konstrukcji, które pierwotnie były wytwarzane w warsztatach mechanicznych pod ziemią z dostępnych materiałów.

Obecnie do budowy przesypów i załadowni wykorzystywane są nowoczesne materiały konstrukcyjne, stosowane zaawansowane powłoki zabezpieczające oraz wprowadzane elementy prostej mechanizacji umożliwiające sterowanie przepływem strugi urobku. Proces tworzenia konstrukcji przebiega od koncepcji, przygotowania szkiców, przeprowadzenia inwentaryzacji mierniczej wyrobisk mającej na celu zebranie aktualnych danych o przestrzennym rozmieszczeniu elementów w chodniku, opracowania dokumentacji konstrukcyjnej, doboru materiałów, analizy wytrzymałościowej konstrukcji, zlecenia wykonania konstrukcji przez wyspecjalizowany podmiot zewnętrzny, instalacji pod ziemią oraz odbioru po zakończonych pracach montażowych. Każdy z punktów przesypowych i załadowniczych odgrywa unikalną rolę w systemie transportu. Właściwie zaprojektowane przesypy i załadownie są elementami systemu transportu urobku mającymi wpływ na minimalizację uszkodzeń elementów przenośników taśmowych (taśma, krążniki), jak również redukcję kruszenie urobku.

W dalszej części rozdziału przedstawiono rozwiązania, które stanowią istotny wkład własny autora w rozwój podziemnego systemu transportu w kopalni. Każdy z projektów został współtworzony w ramach dotychczasowej pracy zawodowej. Ich opracowanie wymagało szerokiej analizy problemu i przyczyniło się do rozwoju systemu, a także do późniejszego wdrożenia opracowanych rozwiązań w szerszym zakresie. Autor uczestniczył w realizacji każdego z przedstawionych projektów od etapu koncepcji, poprzez projektowanie, aż po nadzór autorski nad wykonaniem i instalacją konstrukcji w wyrobiskach podziemnych.

2.3.1 System przesiewaczy wibracyjnych

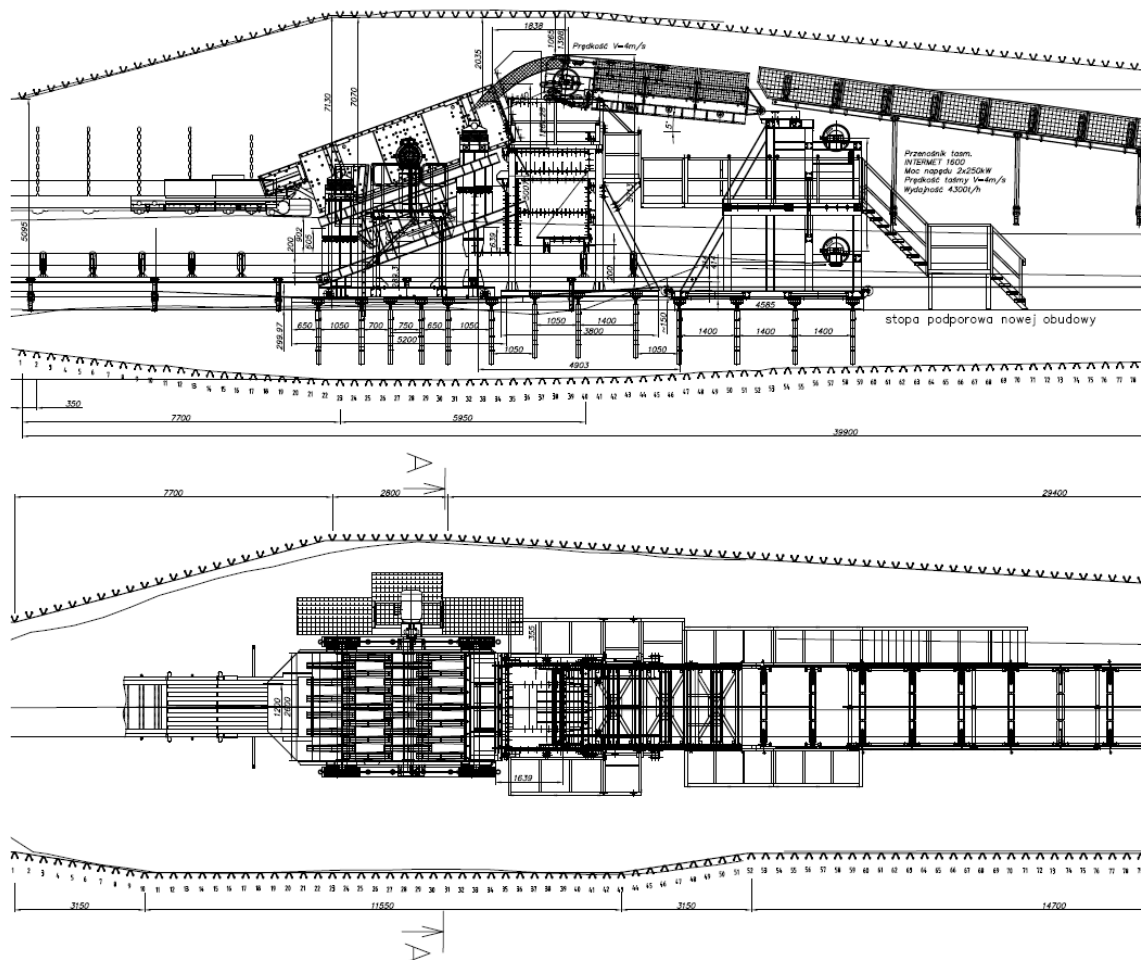
Ponad trzy dekady temu LW „Bogdanka” S.A. rozpoczęła skutecznie wprowadzanie rozwiązań technicznych i organizacyjnych mających na celu separację skały płonnej realizowaną podczas transportu urobku. Pierwsze próby separacji prowadzone były przez operatorów przenośników taśmowych, którzy sterowali

przepływem urobku z wykorzystaniem ruchomych elementów przesypów lub specjalnie zaprojektowanych zgarniaczy. Możliwe było to podczas selektywnego drążenia wyrobisk lub przybieraniu skał spągowych, a system transportu umożliwiał skierowanie oddzielonej skały na powierzchnię lub jej pozostawienie pod ziemią. Kamieniem milowym w rozwoju systemów separacji skały płonnej było wprowadzenie systemu przesiewaczy wibracyjnych pod ziemią. Oddzielenie skały płonnej miało pozytywny wpływ na trwałość elementów konstrukcyjnych przenośników taśmowych oraz innych urządzeń górniczych. Obecnie przesiewacze wibracyjne instalowane są bezpośrednio w ciągach odstawy. Przenośniki taśmowe wyposaża się w przystawki wysięgnikowe umożliwiające transport urobku na przesiewacz. Oddzielona na przesiewaczu skała płonna trafia na podajnik taśmowy, a dalej na system wolnobieżnych przenośników taśmowych. Przesiewacze wibracyjne instalowane są również na ramach zbiorników retencyjnych. Zapewnia to możliwość transportu przesianego urobku bezpośrednio przez zbiornik retencyjny.

Układy umożliwiające oddzielenie skały płonnej instalowane są w filarach ochronnych szybów. Wpływa to dodatnio na możliwość transportu kamienia na powierzchnię. Systemy przesiewaczy wibracyjnych umożliwiają odseparowanie nadgabarytowych ziaren skały płonnej. Działania związane z instalacją układu przesiewaczy zostały opisane i przedstawione w opracowaniu zespołu pod kierownictwem C. Cyrnka. Dokument powstał w 1990 roku. Według niego maksymalny stopień skuteczności zależy od konfiguracji przesiewaczy w systemie transportu podziemnego umożliwiał separację maksymalnie do 3% skały płonnej [21].

Pierwsze wdrożenie układu separacji skały płonnej z wykorzystaniem przesiewaczy wibracyjnych zostało objęte ochroną patentową. System rozwijany na przestrzeni lat, występuje obecnie w konfiguracjach zależnych od bieżących potrzeb oraz warunków górniczych panujących w wyrobisku górniczym. Poniżej przedstawione zostały wybrane wdrożenia przesiewaczy wibracyjnych w warunkach zakładu górniczego. Jednym z nich jest projekt instalacji wysokowydajnego przesiewacza wibracyjnego typu WK-1-2,6x5,0Ex (Rys. 2.3.1). Został on zainstalowany w systemie odstawy głównej w polu Stefanów wyposażonej w przenośniki taśmowe o szerokości taśmy 1600 mm. Projekt układu wymagał niestandardowego podejścia do zagadnienia instalacji urządzenia w układzie odstawy. W celu realizacji projektu została przebudowana część wyrobiska, aby otrzymać wymiary zapewniające bezpieczne prowadzenie ruchu (w tym transportu kolejną podwieszoną). Urządzenie zostało

zaprojektowane i wykonane w wersji prototypowej. Po przeprowadzeniu serii testów na powierzchni zainstalowane w ciągu odstawy. W urządzeniu zostało zastosowane sito umożliwiające odseparowanie skały płonnej pochodzącej z przenośnika taśmowego umożliwiającego transport urobku do 4 300 t/h.



Rys. 2.3.1 Projekt zabudowy przesiewacza wibracyjnego typu WK-1-2,6x5,0Ex [oprac. własne]

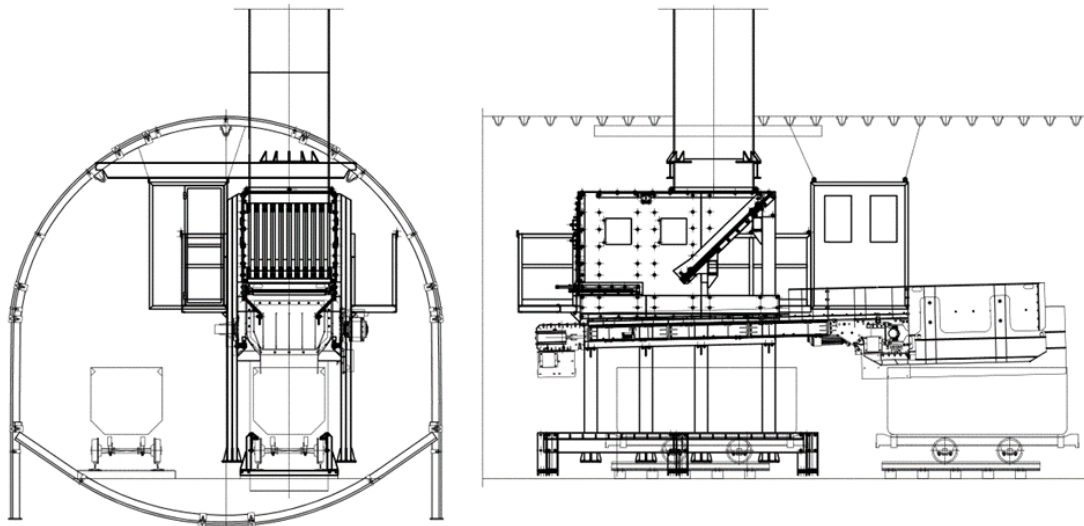
Obecnie system przesiewaczy wibracyjnych zainstalowanych pod ziemię umożliwia separację do 3 000 ton skały płonnej.

2.3.2 System załadowni do transportu skały płonnej

System załadowni pod otworami wielkość średnicowymi umożliwia transport odseparowanej skały płonnej pomiędzy poziomami i pokładami z pominięciem konieczności budowy złożonych układów transportu. Załadownie pod otworami wielkośćśrednicowymi przejmują energię spadającego materiału i kierując skałę płonną na przenośnik taśmowy lub wozy urobkowe (Rys. 2.3.2). Następnie skała płonna kierowana jest z wykorzystaniem kolei podziemnej do szybu osobowo-materiałowego, skąd dalej transportowana jest na składowisko odpadów na powierzchni. Konstrukcje

załadowni jak i metoda separacji skały płonnej zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego i objęte prawami ochronnymi.

Organizacja układu separacji skały płonnej w LW „Bogdanka” S.A. została opisana w artykule [22]. Ograniczeniem ilości wydobywanego urobku w kopalni jest głównie wydajność szybu wydobywczego. Aby zwiększyć wydobywanie, zastosowano specjalny układ wyrobisk oraz zainstalowano system przesiewaczy wibracyjnych pod ziemią kopalni. Nadgabarytowe ziarna skały płonnej pochodzącej z eksploatacji ścian i innych robót górniczych separowane są na przesiewaczach wibracyjnych pod ziemią, a następnie transportowane oddzielnym układem do stacji załadunkowych wozów kopalnianych. Jeśli zawartość urobku pochodzącego z prowadzonych robót zawiera wyłącznie skałę płonną, prowadzony jest transport do stacji załadunkowych bez przesiewania. Taki sposób organizacji wydobywania nie tylko zwiększa wydobywanie kopalni, ale także redukuje obecność dużych ziaren skały płonnej w urobku wydobywanym za pomocą skipów, co korzystnie wpływa na trwałość i unika uszkodzeń urządzeń skipowych. W układzie transportu wykorzystane są otwory wielkośrednicowe łączący poziomy 920 i 960 i pokład 382 z poziomem 960. W praktyce układy umożliwiające oddzielenie skały płonnej od transportowanego urobku znajdują się w filarach ochronnych szybów w końcowej fazie transportu, co ułatwia transport skały płonnej na powierzchnię.



Rys. 2.3.2 Załadownia pod otworem wielkośrednicowym (1200 mm) umożliwiającą załadunek wozów urobkowych [oprac. własne]

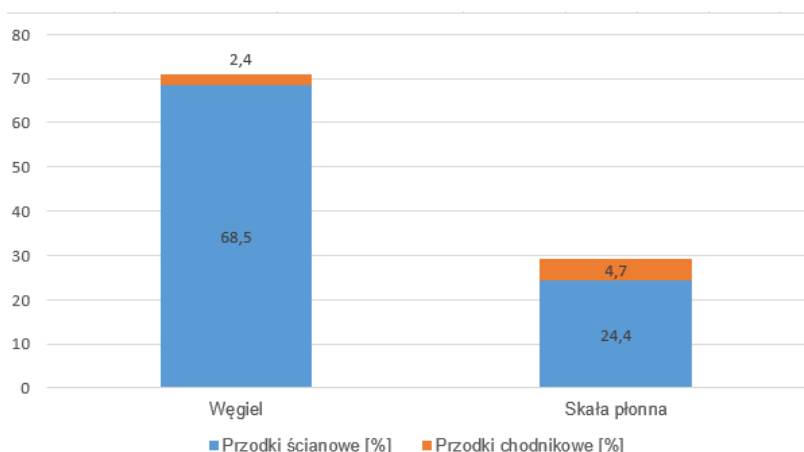
2.3.3 Analiza danych produkcyjnych

W toku realizacji prac nad rozprawą przeprowadzono analizę danych produkcyjnych rejestrowanych w systemach informatycznych zakładu górniczego. Ocenie poddano parametry ilościowe i jakościowe urobku wychodzącego z rejonów. Na podstawie danych dotyczących postępu robót przodkowych, grubości pokładu węgla oraz miąższości warstw skały płonnej oszacowano ilość węgla i skały płonnej znajdujących się w eksploatowanych przodkach chodnikowych. Celem było określenie stopnia zanieczyszczenia urobku skałą płonną oraz ocena możliwości zwiększenia udziału węgla poprzez ograniczenie ilości skały płonnej w urobku. W dalszej części, w oparciu o dane górniczo-geologiczne oraz wyniki przeprowadzonych analiz, oszacowano ilość węgla i skały płonnej wydobytych w przodkach chodnikowych w wybranych przedziałach czasowych. Uzyskane wyniki pozwoliły określić zawartość zanieczyszczeń w urobku oraz ocenić wpływ ich oddzielenia na zwiększenie efektywności transportu do zakładu przeróbczego.

W podsumowaniu przedstawiono prognozę poziomu odzysku skały płonnej z urobku jeszcze na etapie eksploatacji i transportu podziemnego. W trakcie analizy zebrano dane produkcyjne, pogrupowano je, uśredniono oraz przedstawiono w formie graficznej. Dane te są argumentem za opracowaniem i wprowadzeniem do podziemnego systemu transportowego rozwiązania technicznego, umożliwiającego separację skały płonnej w celu jej późniejszego zagospodarowanie bez konieczności transportu na powierzchnię lub alternatywny transport na powierzchnię z pominięciem szybu wydobywczego. Działanie to może istotnie przyczynić się do zmniejszenia udziału zanieczyszczeń w urobku kierowanym do zakładu przeróbczego oraz redukcji kosztów jednostkowych. W związku z tym istnieje potrzeba dalszych prac ukierunkowanych na opracowanie rozwiązania umożliwiającego skuteczne oddzielenie, magazynowanie i zagospodarowanie skały płonnej już na wczesnym etapie wydobywania.

W kontekście powyższych rozważań istotne staje się oparcie dalszych działań na rzeczywistych danych produkcyjnych. Dane przedstawiają udział skały płonnej pochodzącej zarówno z eksploatacji prowadzonej w przodkach ścianowych, jak i z prac przygotowawczych w przodkach chodnikowych. W analizowanym okresie udział węgla w całkowitej masie urobku wynosił 70,9%, natomiast udział skały płonnej 29,1%. Zdecydowana większość wydobytego węgla tj. 96,6% pochodziło z przodków ścianowych, a 3,4% z przodków chodnikowych (Rys. 2.3.1). W strukturze skały płonnej

aż 16,2% stanowiło zanieczyszczenie z drażenia przodków chodnikowych. Wynika z niego, że znaczna część skały płonnej trafia do urobku z przodków chodnikowych. Oddzielenie skały płonnej pochodzącej z przodków chodnikowych umożliwiłoby wzrost udziału węgla w urobku o 4,7%. Wskazuje to, że prowadzenie prac przygotowawczych generuje znaczną część zanieczyszczenia, którego eliminacja może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne.



Rys. 2.3.1 Procentowy udział węgla i skały płonnej w urobku w LW „Bogdanka” S.A.

Poziom wydobywania z podziemnej kopalni w dużym stopniu zależy od możliwości transportu urobku, jego retencji pod ziemią oraz wykorzystania szybów skipowych. Eliminacja skały płonnej jeszcze przed transportem na powierzchnię przyczynia się do zwiększenia zawartości węgla w urobku. Obecnie proces separacji skały płonnej możliwy jest zarówno przy wykorzystaniu separatorów zainstalowanych w ciągach transportowych, jak i przy użyciu specjalnych przesypów dwudrożnych. Rozwój systemów eksploatacji górniczej na przestrzeni lat doprowadził do większego rozdrobnienia kopaliny, co skutkowało wzrostem ilości skały płonnej przekazywanej do zakładów przeróbczych. Prowadzenie badań oraz wdrażanie innowacyjnych metod i technologii separacji skały płonnej od urobku może znacząco zwiększyć efektywność wydobywania i ograniczyć zanieczyszczenia, co jest kluczowe dla dalszego rozwoju górnictwa.

2.3.4 Problem wykorzystania skały płonnej w LW „Bogdanka” S.A.

W LW „Bogdanka” S.A. część skały płonnej wydobytej na powierzchnię zagospodarowuje wykorzystując do prac melioracyjnych i rekultywacyjnych. Firma do 2017r prowadziła w ramach grupy kapitałowej utworzony w połowie lat 90-tych XX wieku Zakład Ceramiki Budowlanej Ekoklinkier. Uruchomienie produkcji możliwe

było dzięki wykazaniu przydatności odseparowanych skał przywęglowych do produkcji budowlanych materiałów ceramicznych. Firma posiadała roczną wydajność produkcyjną do 20 milionów sztuk cegieł [23]. Prowadzone na Bogdancie badania wykazały nieszkodliwość skały płonnej na środowisko naturalne (niska aktywność fizykochemiczna w kontakcie z glebą), z wykazaniem jednoczesnego źródła niezbędnych minerałów dla roślin [24].

Działania związane z opracowaniem systemu odzysku skały płonnej z transportowanego pod ziemią urobku prowadzone są w LW „Bogdanka” S.A. od lat dziewięćdziesiątych. [20],[22]. W ramach wdrożenia, które odbyło się w 1997 roku zaprojektowano i wykonano układ odstawy oraz załadownię pod otwór wielkośrednicowy. Załadownia umożliwiała bezpieczny transport kamienia pomiędzy poziomami. Konstrukcja i metoda separacji doczekały się ochrony w Urzędzie Patentowym RP [25],[26].

W ocenie autora rozprawy firma dysponuje możliwościami technicznymi i organizacyjnymi skierowania odseparowanej skały płonnej w dowolne miejsce zlokalizowane wzdłuż ciągów transportowych odstawy (centralne sterowanie systemem odstawy wyposażone w monitoring wizyjny oraz szereg elementów monitorujących pracę urządzeń, możliwość wykorzystania dolnej taśmy na trasie odstawy lub wprowadzenie rewersyjnej pracy ciągów transportowych). W 2010 roku przeprowadzono studium wykonalności zastosowania systemu komorowo-filarowego dla lokowania skały płonnej pod ziemią uzyskując zadowalające wyniki ekonomiczne oraz zmniejszenie obciążenia funkcjonującej infrastruktury szybów 1.2 oraz 1.3, pozwalając na zwiększenie wydobywania węgla z eksploatowanych ścian i planowanych zrobów[27].

Najszerzy zakres zawartości zanieczyszczenia urobku węglowego skałą płonną urobku w zakładzie górniczym przedstawiono w pracy [28]. Wynosi on według publikacji 7%-73,1% co może świadczyć o skali problemu, różnorodności eksploatacji górniczej oraz potrzebie indywidualnego podejścia do każdego przypadku.

Autor [29] uważa, iż obecnie uzasadnione wydaje się prowadzenie badań pilotażowych i eksperymentów, które potencjalnie mogą przekształcić się we wdrożenie sprawdzonych rozwiązań mających wpływ na poprawę efektywności procesu wydobywczego. Zakłady górnicze powinny podejmować kroki w kierunku poprawy efektywności wydobywania, z uwagi na narastający problem eksploatacji zasobów trudniej dostępnych zasobów węgla.

3 Cel pracy

Celem rozprawy jest przeprowadzenie analizy możliwości zastosowania mechanicznego zbiornika wyrównawczego w podziemnej kopalni węgla kamiennego oraz opracowanie rozwiązania technicznego umożliwiającego realizację trzech procesów: retencji, stabilizacji strugi urobku oraz separacji skały płonnej pochodzącej z górniczych robót przygotowawczych.

Zastosowanie poziomych zbiorników mechanicznych przyczyni się do zwiększenia dyspozycyjności systemu odstawy, umożliwi czasowe zmagazynowanie urobku lub skały płonnej oraz ograniczy udział zanieczyszczenia urobku w strudze kierowanej do zakładu przeróbczego na powierzchni. Wpłynie to na zwiększenie zawartości węgla w transportowanym urobku, a odpady będzie można tymczasowo składować w miejscu ich powstawania, z możliwością ich późniejszego zagospodarowania pod ziemią.

W ramach pracy zrealizowano następujące zadania:

- przeprowadzenie testów przemysłowych in-situ w zakresie oceny ilościowych i jakościowych parametrów strugi urobku w warunkach eksploatacji górniczej,
- testy przemysłowe możliwości separacji skały płonnej na podstawie testów selektywnego urabiania,
- przeprowadzenie numerycznych badań symulacyjnych zbiornika zainstalowanego w systemie odstawy i ocena efektywności jego zastosowania,
- opracowanie algorytmu obliczeniowego poziomego zbiornika mechanicznego,
- opracowanie algorytmu sterowania urządzeniem,
- dobór jednostki napędowej z wykorzystaniem analizy wyboru wariantu metodą APEKS,
- opracowanie założeń projektowych i konstrukcyjnych oraz wykonanie wirtualnego prototypu zbiornika mechanicznego,
- weryfikacja parametrów wytrzymałościowych wybranych elementów urządzenia z wykorzystaniem narzędzi komputerowego wspomagania projektowania,

- opracowanie dokumentacji technicznej poziomego zbiornika mechanicznego, który stanowi załącznik niniejszej rozprawy.

Wprowadzenie mechanicznego zbiornika wyrównawczego przyczyni się do efektywniejszego zarządzania procesem transportu urobku w podziemnej kopalni węgla kamiennego. Zbiornik ustabilizuje pracę systemu transportowego, zapewniając ciągłość procesu odstawy. Możliwość retencji pozwoli na czasowe magazynowanie urobku, co wpłynie na zwiększenie płynności przepływu urobku w całym ciągu transportowym. Istotną funkcją jest również czasowe zmagazynowanie odseparowanej skały płonnej, która wpłynie na poprawę jakości urobku transportowanego na powierzchnię. Eliminacja skały płonnej na wczesnym etapie procesu zmniejsza koszty związane z transportem i przeróbką urobku oraz zminimalizuje zużycie elementów poziomego i pionowego systemu transportowego.

4 Ocena możliwości selektywnego urabiania węgla

Selektywne urabianie definiowane jest jako proces ograniczania zanieczyszczenia urobku skałą płonną, polegające na dokładnym oddzieleniu węgla od otaczającej skały płonnej na etapie urabiania i załadunku urobku. Zanieczyszczanie węgla skałą płonną wynika z trudności rozpoznania przez operatora kombajnu chodnikowego granicy między węglem, a otaczającymi skałami [28]. W praktyce selektywnym urabianiem czoła przodka chodnikowego jest takie sterowanie głowicą urabiającą kombajnu chodnikowego podczas wydobywania kolejnych partii złoża (węgla i otaczającej go skały płonnej), podczas którego istnieje możliwość oddzielenia ich od siebie. W praktyce do mieszania węgla i skały płonnej dochodzi podczas m.in. procesu urabiania granicy warstw węgla i skały płonnej, podczas załadunku urobku zalegającego na spągu wyrobiska, na stole załadowniczym oraz na przesypach. Zanieczyszczony skałą płonną węgiel jest dalej oczyszczany w procesach przeróbczych. Wzrost zawartości skały płonnej w urobku powoduje zwiększenie czasu i kosztów potrzebnych na jego oczyszczenie. W celu ograniczenia zanieczyszczenia urobku w LW „Bogdanka” S.A. podejmowane były próby rozdzielenia urobku pochodzącego z przodków chodnikowych zasobnych w skałę płonną. Rozwiązaniem było sterowanie kierunkiem przepływu urobku na przesypach pomiędzy trasami przenośników taśmowych. Skała płonna kierowana jest na osobną ścieżkę transportową, co umożliwia jej oddzielenie od urobku węglowego już na wczesnym etapie transportu. Pracownik obsługi odstawy, po otrzymaniu informacji o konieczności zmiany kierunku nadawy, uruchamia mechanizm przestawiający klapę kierunkową przesypu. Przełączenie odbywa się za pomocą ruchomej blachy sterowanej dźwignią zintegrowaną z siłownikiem hydraulicznym, co pozwala na przekierowanie strumienia urobku.

W procesie selekcji urobku istotne jest zastosowanie odpowiednich technologii lub narzędzi umożliwiających automatyczną identyfikację i klasyfikację transportowanego materiału. Podejmowane są próby klasyfikacji zanieczyszczenia w procesie urabiania lub rozdzielenia strugi opierające się na subiektywnej ocenie i doświadczeniu operatorów (kombajnistów maszyn oraz obsługi przenośników taśmowych).

4.1.1 Systemy monitorujące jakość transportowanego urobku

W LW „Bogdanka” S.A. rozwijany jest system monitorujący jakość transportowanego urobku. Wyposażony jest on w analizatory składu węgla Syskon 400. Monitorowane są dwa obszary obejmujące jakość urobku wychodzącą z rejonów wydobywczych oraz jakość urobku trafiającą do górniczych zbiorników retencyjnych. Informacje dotyczące parametrów jakościowych i ilościowych transportowanego urobku przesyłane są do dyspozytora kopalni. Na podstawie pomiarów tworzone są również raporty dobowe.

4.1.2 Detekcja skały podczas urabiania

Systemy monitorowania i zarządzania jakością urobku w podziemnych zakładach górniczych powinny stanowić jeden z kluczowych elementów struktury wydobywania węgla kamiennego. Z praktycznego punktu widzenia, eliminacja zanieczyszczenia powinna być realizowana w etapach, rozpoczynając już od procesu urabiania, poprzez transport, aby ostatecznie do zakładu przerobczego trafił urobek z najniższą możliwą zawartością skały płonnej. Właściwe zarządzanie skałą płonną ma kluczowe znaczenie dla redukcji ilości odpadów wydobywczych poprzez zwiększenie czystości wydobywanego urobku węglowego. Poszukiwanie i rozwój technik detekcji skały płonnej jest kluczowe z punktu widzenia możliwości jej oddzielenia pod ziemią. Redukcja skały płonnej może być prowadzona już w miejscu urabiania z wykorzystaniem metod manualnych (selektywne urabianie złoża) lub zautomatyzowanych (instalacja sensorów i czujników w pobliżu głowic urabiających). W latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia liderzy wydobywania węgla kamiennego na świecie zapoczątkowali działania mające na celu opracowanie uniwersalnego przyrządu umożliwiającego automatyczne rozpoznawanie warstwy granicznej pomiędzy węglem a otaczającymi go skałami [28].

Prace nad czujnikiem "węgiel-skała" obszernie zostały opisane w dokumencie opracowanym na zlecenie LW „Bogdanka” S.A. [37]. Początkowe próby wdrożenia czujnika skoncentrowane były na zastosowaniu izotopowych czujników odbiciowych, które umożliwiały pomiar grubości łaty węglowej na podstawie odbicia rozproszonego promieniowania, jednak ich skuteczność była ograniczona ze względu na wymagany stały kontakt z powierzchnią pomiarową, problemy eksploatacyjne oraz kwestie formalne związane z zastosowaniem źródła izotopowego.

Autor [51] przeprowadził podział metod rozpoznania granic między pokładem węglem a skałą płonną. Wykorzystują one różnorodne sposoby detekcji bazujące na aktualnych osiągnięciach naukowych i technologicznych. Rozróżnił metody:

- z wykorzystaniem naturalnego promieniowania gamma,
- wibracji,
- akustyczną,
- optyczną,
- radarową.

Wykorzystanie naturalnych cech skał umożliwia pomiar różnicy radioaktywności, dzięki temu opracowano metodę opartą na możliwości rozpoznania niskiej aktywności promieniowania gamma. Różnice twardości skał i ich wytrzymałość na ściskanie umożliwiły rozwój techniki wykorzystującej fale akustyczne oraz wibracje narzędzi tnących i części maszyn, na których są one instalowane. Zaproponowano również metody oparte na użyciu radarów lub kamer termowizyjnych testujących temperaturę noży tnących oraz zastosowanie czujnika dotykowego rozpoznającego różne typy warstw skalnych. Czujniki stosowane w opisanych metodach instalowane są na lub w pobliżu elementu wykonawczego maszyny. Wysokie stężenie pyłu kamiennego w atmosferze kopalnianej, obecność wody i wysoki hałas generowany przez pracujące urządzenia, ujawniają szereg cech poszczególnych metod. Użycie czujników bazujących na promieniowaniu gamma wprowadza opóźnienia w pomiarze i obróbce sygnału co wpływa to na tempo urabiania. Techniki akustyczne i wibracyjne okazują się skuteczne i kosztowo atrakcyjne, niestety czujniki wykrywają skałę, kiedy jest ona urabiana przez kombajn, co uniemożliwia pozostawianie półki węglowej w celu ochrony stropu przed przedwczesnym zawaleniem. Metody oparte na przetwarzaniu obrazu z wykorzystaniem kamer są efektywne, lecz ich skuteczność maleje ze wzrostem zapylenia. Technika radarowa zapewnia wysoką dokładność pomiarów, ale związana jest z wysokimi kosztami wdrożenia. Wykorzystanie technologii sztucznej inteligencji (sieci neuronowych) pozwala na znaczącą poprawę identyfikacji granic, umożliwiając stworzenie kompletnie zautomatyzowanych systemów wydobywczych. To przekłada się na wyższą efektywność wydobywania, poprawę bezpieczeństwa pracowników oraz obniżenie kosztów operacyjnych [52].

4.1.3 Detekcja skały płonnej podczas transportu

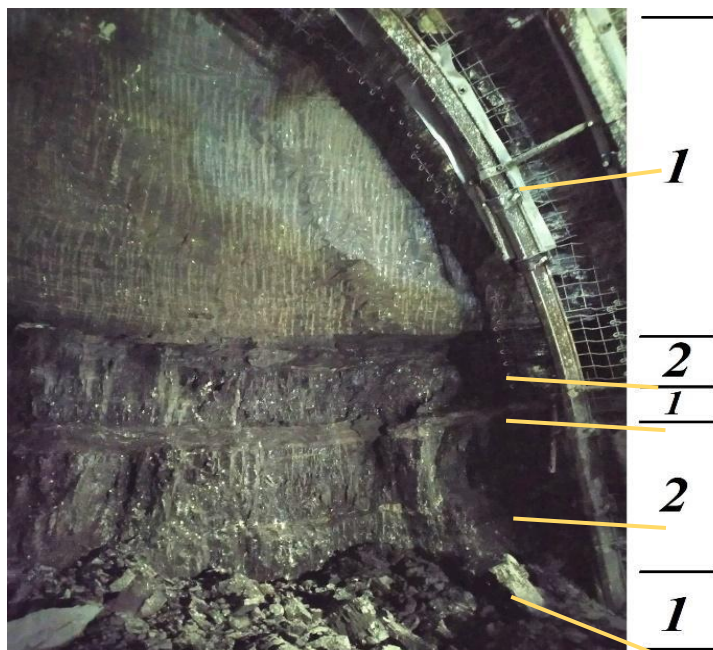
Proces separacji zanieczyszczenia skałą płonną stosowany jest obecnie przed procesem przeróbczym. W ten sposób oddzielane są grubsze ziarna skały płonnej z wykorzystaniem separatorów zainstalowanych w ciągach odstawy. Urobek transportowany z rejonów wydobywczych trafia w całości na przesiewacze wibracyjne. W praktyce nie jest prowadzona systemowa detekcja skały płonnej, choć źródła literaturowe opisują szereg możliwych sposobów. Autorzy [53] przeprowadzili przegląd metod sensorycznego sterowania jakością rud z wyszczególnieniem technik stosowanych dla pomiarów węgla kamiennego. Opisują zalety dla technologii sensorowych tj. pomiar w czasie (niemal) rzeczywistym, nieniszczący, bezdotykowy. Odpowiednia rozdzielczość przestrzenna umożliwia określenie położenia każdej pojedynczej cząstki, dzięki czemu system dostarcza informacji o właściwościach i składzie materiału.

W opinii autora rozprawy wymagane jest opracowanie prostego, niezawodnego i taniego systemu detekcji skały płonnej możliwego do zastosowania w kopalniach podziemnych.

4.2 Obiekt badań

Testy selektywnego urabiania zostały przeprowadzone w wyrobisku chodnikowym kopalni LW „Bogdanka” S.A. Podczas prowadzonych prób wykonano analizę procesu selektywnego urabiania czoła przodka chodnikowego. Efektywność prac została zweryfikowana przy użyciu analizatora Syskon 400 wykorzystującego źródła izotopowe i mikrofalowe.

Na rysunku Rys. 4.2.1 przedstawiono front przodka będącego przedmiotem badań możliwości selektywnego urabiania. Widoczny jest na nim pokład węgla (Poz. 2) z kilkunastocentymetrowym przerostem skały płonnej (Poz. 1). W górnej części przekroju chodnika znajduje się skała płonna (Poz. 1).



Rys. 4.2.1 Widok eksploatowanego selektywnie przodka chodnikowego
Poz. 1 skała płonna Poz. 2 pokład węgla

Podczas prowadzonych prób zaobserwowano, iż proces urabiania mechanicznego złoża w przodku może odbywać się w sposób selektywny (warstwa po warstwie) dla odpowiedniego sterowania kombajnem oraz dla odpowiednio grubej warstwy skał płonnych. Problem pojawia się w chwili załadunku i transportu urobku, które powodują mieszanie się węgla ze skałą płonną. Na rysunku 4.2.2' przedstawiono proces urabiania skały płonnej, a na rysunku 4.2.3 proces urabiania węgla obserwowany ze stanowiska operatora kombajnu chodnikowego. Urabianiu skały płonnej towarzyszy większe niż przy urabianiu węgla zapylenie oraz zwiększone opory urabiania organem zaobserwowane przez operatora kombajnu chodnikowego.



Rys. 4.2.2 Proces urabiania skały płonnej - intensywne zapylenie



Rys. 4.2.3 Proces urabiania węgla - nieznaczne zapylenie

4.3 Wyposażenie stanowiska testowego

W podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny do pomiaru parametrów jakościowych i ilości urobku pochodzącego z robót górniczych używane są analizatory składu węgla. Urządzenia instalowane są na przenośnikach taśmowych zainstalowanych w odstawach oddziałowych, zbiorczych lub głównych. Analizator Syskon 400 wykorzystany podczas prowadzonych testów selektywnego urabiania wykorzystuje promieniowanie gamma i mikrofałe do pomiaru zawartości popiołu i wilgotności węgla, a następnie wyznacza kaloryczność. Urządzenie składa się ze skrzynek ognioszczelnych zawierających podzespoły elektryczne i elektroniczne, modułów pomiarowych zawartości popiołu i wilgotności, wagi technologicznej, systemu prezentacji wyników oraz okablowania zasilającego i sterującego. Moduł pomiaru zawartości popiołu korzysta z popiołomierza izotopowego, a moduł pomiaru wilgotności wykorzystuje mikrofałe. Waga technologiczna o maksymalnym błędzie pomiaru 2%, zamontowana na pomoście wagowym z przetwornikami siły, ma za zadanie dokonywać pomiaru masy urobku. Pomiar absorpcji promieniowania gamma o różnych energiach pozwala na wykrycie zmian zarówno w składzie chemicznym, jak i ilościowym mierzonego materiału [51],[52].

Stanowisko pomiarowe (Rys. 4.3.1) składa się z zespołu źródła promieniowania (a), tensometrycznego układu pomiaru masy (b), zespołu detektora promieniowania (c), czujnika ruchu taśmy (d).

Sekcja pomiaru zawartości popiołu dokonuje pomiaru za pomocą modułu izotopowego. Pomiar wilgotności urobku odbywa się z wykorzystaniem mikrofal. Na podstawie tych dwóch parametrów wyznaczana jest kaloryczność transportowanego urobku.



a. zespół źródła promieniowania



b. tensometryczny układ pomiaru masy



c. zespół detektora promieniowania



d. Czujnik ruchu taśmy

Rys. 4.3.1 Stanowisko pomiarowe wyposażone w analizator Syskon 400

Firma Syskon wykorzystuje w swojej metodzie do pomiaru gęstości nasypowej źródło zawierające pierwiastek promieniotwórczy Cs137, który emituje promieniowanie gamma o energii 661 keV. Współczynnik absorpcji tego promieniowania zależy głównie od gęstości materiału w strefie pomiarowej, mniej od rodzaju materiału. Absorpcja niskoenergetycznego promieniowania gamma (60 keV), emitowanego przez źródło zawierające Am241, zależy od liczby atomowej pierwiastków obecnych w mierzonym materiale [55].

Wykonywanie jednoczesnych pomiarów absorpcji promieniowania o różnych energiach pozwala na wykrycie zarówno zmian w składzie chemicznym, jak i ilościowym mierzonego materiału, dlatego kalibracja układu pomiarowego do konkretnego urobku ma kluczowe znaczenie. Układ pomiarowy reaguje inaczej na niskoenergetyczne

i wysokoenergetyczne promieniowanie, dlatego istotne jest posiadanie wiedzy na temat sposobu, w jaki promieniowanie jest absorbowane w zależności od grubości warstwy urobku i zawartości popiołu. Metoda określania wybranych właściwości urobku na podstawie absorpcji promieniowania wymaga zastosowania odpowiednich algorytmów, które są unikalnym know-how firmy Syskon.

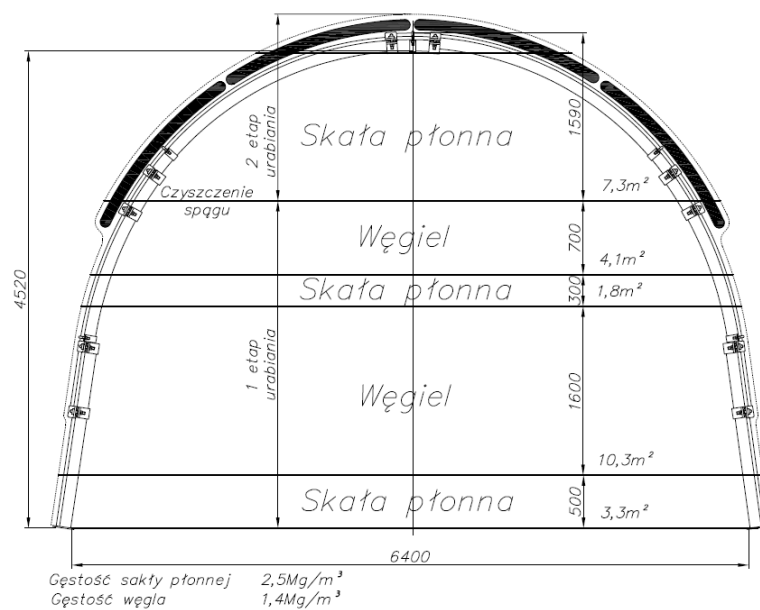
4.4 Opis prowadzonych badań testowych

Przygotowania do badań testowych in situ obejmowało sporządzenie harmonogramu działań oraz kalibrację systemu pomiarowego. Prace podzielono na dwa etapy. Podczas pierwszego etapu prowadzono obserwacje procesu drażenia przodka bez informowania kombajnistów o prowadzeniu działań. Szczególną uwagę zwrócono na sposób realizacji skrawu w trakcie wykonywania pełnego zabioru, sposób prowadzenia prac oraz zmienność warunków pracy w przodku. Równolegle prowadzono monitoring pracy systemu odstawy urobku, rejestrując czasy postoju oraz identyfikując ich przyczyny.

Drugi etap prowadzony był po uprzednim poinformowaniu kombajnistów o prowadzonych działaniach oraz konieczności urabiania czoła przodka i załadunku urobku w określony sposób. Przed rozpoczęciem drugiego etapu przeprowadzono instruktaż operatorów w celu zapewnienia odpowiedniego przeprowadzenia procedur pomiarowych. Projekt wymagał zaangażowania pracowników Bogdanki oraz producenta systemu pomiarowego Syskon 400. W trakcie testów regularnie odbywały się spotkania, na których omawiano postępy prac oraz dyskutowano nad ewentualnymi korektami.

Do obowiązków zespołu z Bogdanki należało przeprowadzenie działań związanych z selektywnym urabianiem czoła przodka, pobranie próbek węgla i skały płonnej, niezbędnych do kalibracji systemu pomiarowego. Producent systemu był odpowiedzialny za adaptację algorytmu obliczeniowego do celu badań. Podczas testów wykonanych zostało łącznie 196 monitorowanych cykli urabiania calizny w przodku chodnikowym. Do analizy wykorzystano dane zebrane z systemu Syskon 400, który monitorował jedno z wyrobisk korytarzowych.

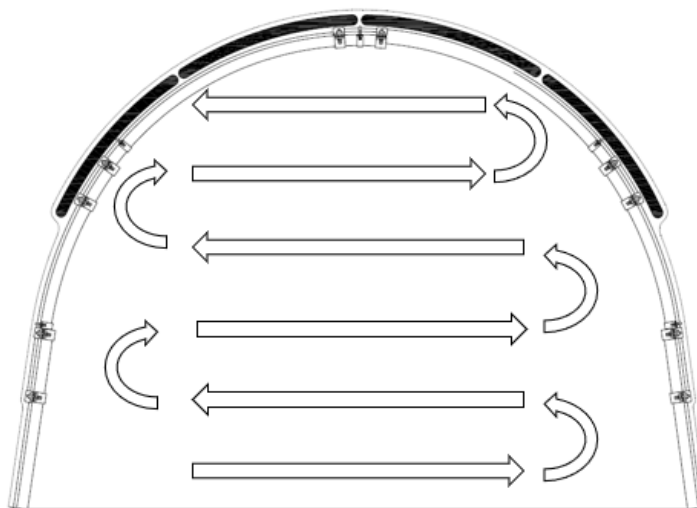
W analizowanym wyrobisku zidentyfikowano następujące warstwy górotworu, licząc od spągu (Rys. 4.4.1): warstwa skały płonnej o grubości około 0,5 m, warstwa węgla o grubości około 1,6 m, kolejna warstwa skały płonnej o grubości około 0,3 m, kolejna warstwa węgla o grubości około 0,7 m oraz na końcu warstwa skały płonnej której grubość wynosiła 1,4m. Szerokość wyłomu wyrobiska wynosiła około 6,9 m.



Rys. 4.4.1 Profil czoła przodka chodnikowego

Cykl pracy obejmujący wydobywanie przodka i montaż obudowy łukowej trwał średnio 40 minut, z czego 20 minut zajmowało urabianie górotworu. Zebrane dane obejmowały procentowy udział popiołu, wilgotność urobku, jego kaloryczność, wysokość nadawy i masę, które były rejestrowane co sekundę. Dodatkowo zebrane zostały informacje o godzinie, dacie, pracy przenośnika taśmowego (0 lub 1), oznaczeniu operatora (A, B, C, D) lub zmianie remontowej (E), oraz informację o urabianiu selektywnym (T lub N). W wyniku przeprowadzonych prób zarejestrowano dane pomiarowe, które wskazują na zmienność warunków eksploatacyjnych, takich jak precyzja urabiania, wpływ operatora oraz występujące przerwy technologiczne w pracy.

Na rysunku 4.4.2 przedstawiono schemat ruchu organu urabiającego. Organ urabiający porusza się w płaszczyźnie poziomej, od lewego do prawego ociosu i w kierunku przeciwnym, przy jednoczesnym stopniowym przemieszczaniu się w kierunku pionowym od warstw spągowych do stropu wyrobiska. W obrębie pokładu węgla mogą lokalnie występować przerosty skały płonnej, których położenie i grubość są zmienne lub mogą zanikać.



Rys. 4.4.2 Schemat ruchu organu urabiającego

W celu odizolowania wpływu czynników zewnętrznych przeprowadzono ostatecznie kontrolowane próby selektywnego urabiania czoła przodka. Ich celem było uzyskanie strugi czystej skały płonnej oraz mieszaniny węgla ze skałą płonną, która nie uległa odseparowaniu. Priorytetem było wyodrębnienie jak największej ilości skały płonnej od reszty urobku. Podczas każdego cyklu wykonywano dodatkowo czyszczenie spągu przed rozpoczęciem urabiania kolejnej warstwy tj. po zakończeniu urabiania węgla zebrano urobek zalegający na spągu chodnika, a następnie przystąpiono do urabiania warstwy skały płonnej, po zakończeniu której również przeprowadzono załadunek urobku zalegającego na spągu. System pomiarowy Syskon 400 zlokalizowany był w chodniku nadścianowym 6/II/385, w odległości 2898m od drążonego przodka chodnikowego. Na czas realizacji testów w rejonie tym wstrzymano wszelkie roboty wydobywcze oraz prace zabezpieczające, aby nie zanieczyszczać urobku z przodka.

Do szczegółowej analizy wybrano próby selektywnego urabiania przeprowadzone w niezmiennych warunkach pracy. Cykle te zapewniły możliwość oceny procesu w najbardziej stabilnych i kontrolowanych warunkach. Miało to na celu zapewnienie wysokiej wiarygodności zebranych danych pomiarowych oraz eliminację wpływu czynników zewnętrznych.

Każdy z przeprowadzonych wzorcowych cykli urabiania składał się z dwóch tych samych etapów tj.:

etap 1- urabianie części spągowej chodnika, próbę rozpoczynamy od lewej strony czoła przodka urabiając poziomo ku górze do granicy węgla ze skałą płonną, następnie prowadzone jest czyszczenie spągu z urobku, który nie znalazł się na podawarce kombajnu podczas urabiania, urobek z tego etapu kierujemy do zakładu przeróbczego,

etap 2- urabianie skały płonnej w części stropowej chodnika, czyszczenie spągu ze skały płonnej, która nie znalazła się na podawarce kombajnu podczas urabiania, skałę płonną z tego etapu kierujemy do zbiornika.

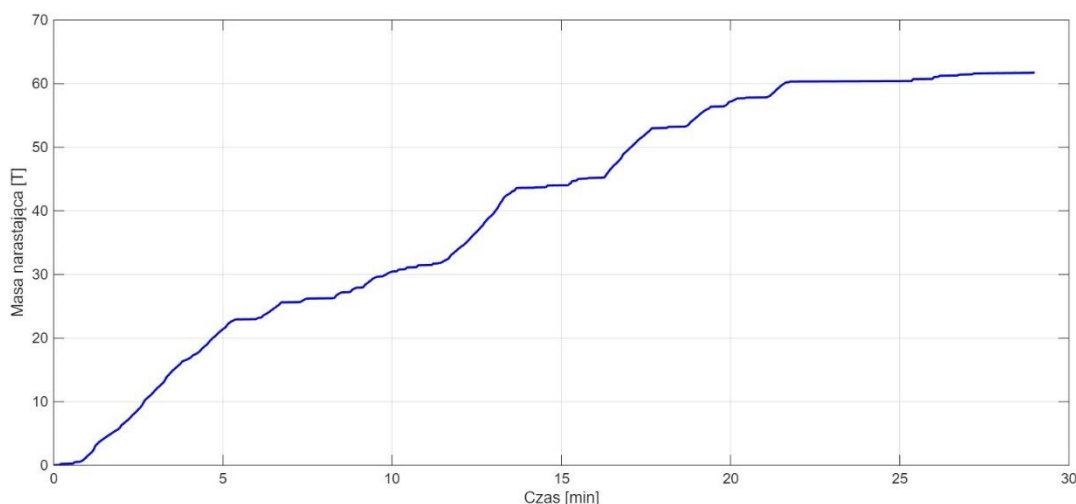
Wydobycie skały płonnej odbywało się przez bezpośredni załadunek na stół załadowczy i podawarkę kombajnu chodnikowego. Następnie przeprowadzano czyszczenie spągu z użyciem dwóch różnych ustawień kombajnu. Algorytm został skalibrowany tak, aby przy wskazaniach powyżej 50% popiołu można było stwierdzić, że urobek stanowi czysta skała płonna. Kalibracja urządzenia przeprowadzona została w oparciu o pobrane próby skały płonnej.

4.5 Analiza danych

Dane zarejestrowane w trakcie testów selektywnego urabiania przy użyciu systemu Syskon zostały poddane analizie. Podczas wydobywania zastosowano metodyczne oddzielenie skały płonnej od pozostałego urobku, zgodnie z zasadą czystego wydobywania skały płonnej. Pozostały urobek mógł zawierać sam węgiel lub węgiel ze skałą płonną, i był on przeznaczony do dalszego przetwarzania mechanicznego.

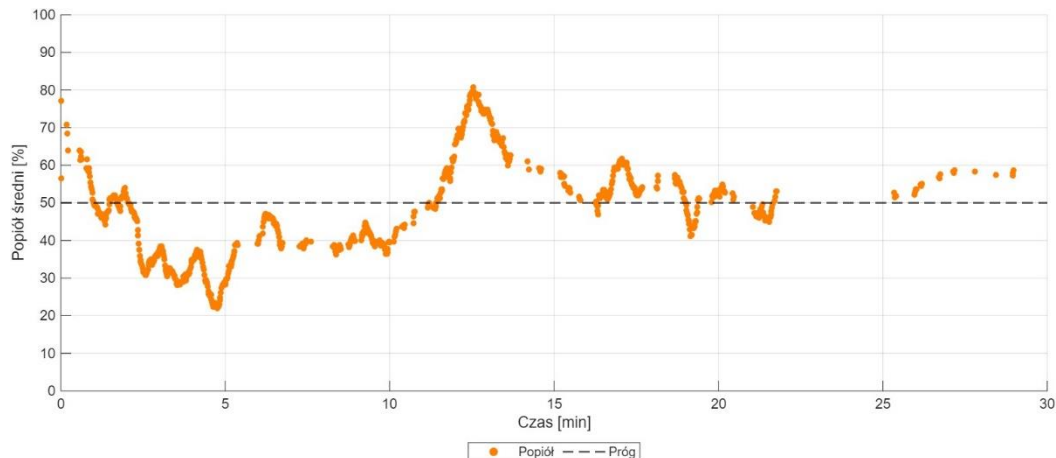
Do analizy wykorzystano dane zarejestrowane podczas realizacji pełnych cykli urabiania kombajnu chodnikowego. Obejmowały one chwilową zawartość popiołu w urobku (%), masę urobku w czasie (t/s) oraz zmierzony czas urabiania (minuty). Zawartość popiołu stanowiła wskaźnik klasyfikacyjny, dla którego wartość 50% posłużyła do rozróżnienia między frakcją węglową (poniżej 50%) a frakcją kamienną (powyżej 50%). Dane zostały przetworzone i przedstawione w formie graficznej, dzięki czemu możliwy był opis dynamiki zmian składu jakościowego urobku.

Na rysunku 4.5.1 przedstawiono przyrost masy urobku podczas cyklu urabiania przodka chodnikowego. Fragmenty przebiegu o większym nachyleniu krzywej odpowiadają okresom intensywnego dopływu urobku do analizatora, co jest charakterystyczne dla eksploatacji węgla, który jest łatwiejszy w urabianiu, a tym samym stanowi większą strugę masy w jednostce czasu. Fragmenty przebiegu o mniejszym nachyleniu krzywej wynikają z urabiania skały płonnej, która charakteryzuje się większą wytrzymałością i mniejszą podatnością na urabianie, co skutkuje mniejszym przyrostem masy urobku. Zerowy przyrost masy świadczy o okresach braku dopływu urobku do analizatora, wynikających z technologii drążenia przodka chodnikowego.



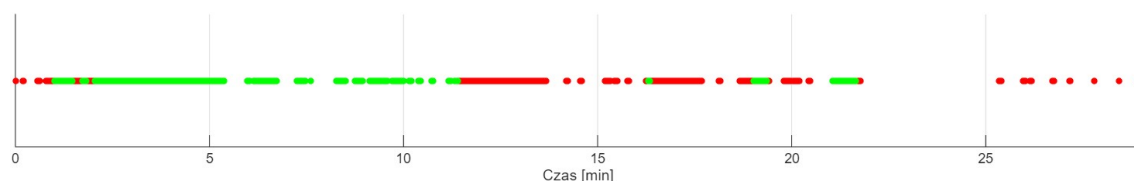
Rys. 4.5.1 Przebieg narastającej masy urobku

Na wykresie średniej zawartości popiołu (Rys. 4.5.2) zauważalne są wyraźne zmiany wartości w czasie pracy kombajnu. Fragmenty przebiegu o zawartości popiołu powyżej progu 50% należy klasyfikować jako momenty skutecznego urabiania skały płonnej. Sekwencje urabiania z dominacją węgla lub dominacją skały płonnej świadczą o zachowaniu selektywności urabiania, jednak naprzemienne sekcje o wysokiej i niskiej zawartości popiołu wskazują na zmienność warunków geologicznych i związane z tym urabianie granicy warstw.



Rys. 4.5.2 Przebieg średniej zawartości popiołu

Na Rys. 4.5.3 przedstawiono wyniki klasyfikacji urobku uzyskane z systemu pomiarowego, w którym kolor czerwony odpowiada urabianiu skały płonnej, a kolor zielony oznacza urobek mieszany, zawierający zarówno skałę płonną, jak i węgiel.



Rys. 4.5.3 Klasyfikacja skały płonnej
Kolor czerwony skała płonna, kolor zielony mieszanina węgla i skały płonnej

Okresy braku urobku, widoczne jako przerwy w przebiegu cyklu, wynikają z realizowanej technologii drążenia przodka oraz założeń prowadzenia testów selektywnego urabiania.

4.6 Wnioski

Przeprowadzone badania upoważniły do sformułowania następujących wniosków:

1. Celem testów w warunkach dołowych LW „Bogdanka” S.A. była ocena możliwości selektywnego urabiania czoła przodka chodnikowego. Założono, że podejście to może wpłynąć na poprawę jakości urobku i ograniczyć konieczność późniejszej separacji skały płonnej w zakładzie przeróbczym.
2. Przeprowadzone testy potwierdziły możliwość rozróżnienia strugi skały płonnej od strugi węgla lub ich mieszaniny.
3. Selektywnie urabiane warstwy musiały być ładowane oddzielnie, aby uniknąć mieszania węgla ze skałą płąną w układzie stołu załadowczego, a skuteczność procesu zależała od staranności i konsekwencji operatora oraz od okresowego ładowania urobku ze spągu pomiędzy kolejnymi cyklami.
4. Transportowana odseparowana skała płąna może być przekierowywana do zbiornika, co ogranicza jej udział w urobku kierowanym do zakładu przeróbczego.
5. Czyszczenie spągu pomiędzy poszczególnymi cyklami nie wpłynęło istotnie na czas cyklu urabiania, natomiast zwiększyło skuteczność selekcji urobku.
6. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że selektywne urabianie w warunkach kopalni węgla kamiennego może poprawić jakość urobku. Podczas najbardziej efektywnego cyklu oddzielono 81,6% skały płąnej.
7. Odseparowana skała płąna może zostać przekierowany do wyznaczonego miejsca w kopalni, co wpłynie na odciążenie podziemnego systemu transportowego, szybów skipowych oraz zakładu przeróbki mechanicznej węgla.
8. Ze względu na złożoność procesu kalibracji analizatora Syskon 400, w projekcie zastosowana zostanie metoda detekcji skały płąnej z wykorzystaniem wagi przenośnikowej i skanera laserowego.

5 Analiza rozwiązań konstrukcyjnych i funkcjonalnych zbiorników retencyjnych

Zbiorniki retencyjne odgrywają kluczową rolę w podziemnym górnictwie węglowym, pełniąc szereg istotnych funkcji. Zgodnie z definicją są to elementy zaprojektowane do przyjmowania zmieniającej się ilości nadawy, umożliwiając jej równomierne odprowadzenie [56]. W praktyce górniczej zbiornik retencyjny może być wyrobiskiem będącym buforem w układzie transportu zapewniającym ciągłość odstawy urobku. Jego zadaniem jest stabilizacja transportowanej do naczynia wyciągowego strugi urobku w celu optymalnego wykorzystania infrastruktury szybowej [57]. Transport urobku z więcej niż jednego przodka może skutkować przeładowaniem przenośnika zbiorczego. Zbiorniki niwelują różnice wydajności nadawy maszyn urabiających i środków transportu oraz pozwalają na optymalny dobór urządzeń transportowych. Zbiorniki wykorzystane są na styku różnych środków transportu najczęściej na oddziałowych stacjach załadunkowych, nadszybiach i podszybiach szybów [58]. Zapewnienie dodatkowego bufora urobku pozwala na zachowanie bezpieczeństwa ciągłości produkcji oraz pewności realizacji planów wydobywczych. Retencja urobku surowego pod ziemią zapewnia utrzymanie ciągłości eksploatacji ścian jak i transportu szybami [59]. W literaturze ponadto bardzo szeroko opisywane są zagadnienia z zakresu budowy, monitorowania i utrzymania właściwego stanu technicznego górniczych zbiorników retencyjnych [60],[61].

W niniejszym rozdziale poddane zostały analizie źródła literaturowe oraz patentowe w celu poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych zbiorników buforowych. Szczególny nacisk kładzie się na rolę zbiornika jako elementu wyrównawczego w systemie odstawy urobku. W tekście poruszono kwestię kierowania strugi urobku w sposób optymalny, eliminujący konieczność projektowania nadmiarowych systemów transportowych, co wpływa na zwiększenie efektywności produkcji. Zbiorniki odgrywają tutaj kluczową rolę, niwelując różnice w wydajności środków transportu oraz eliminując konieczność projektowania systemów transportowych o zawyżonych parametrach pracy.

Kluczowymi funkcjami zbiorników retencyjnych są:

Retencja, czyli możliwość gromadzenia urobku określona w jednostkach masy lub objętości, definiowana jako zdolność zbiornika do cyklicznego magazynowania określonej ilości urobku węglowego w określonych przedziałach czasowych.

Stabilizacja strugi urobku, definiowana jako zdolność zbiornika do zapewnienia równomiernego przepływu urobku, eliminując wahania ilościowe transportowanego materiału określana poprzez wydajność zbiornika, zapewniając ciągłość procesu eksploatacji górniczej. Zbiornik skutecznie reaguje na wahania ilościowe dopływającego urobku, minimalizując ryzyko przestojów systemu odstawy.

Separacja, czyli możliwość rozdzielenia strugi urobku (praca w układzie bypass) definiowana jako zdolność zbiornika do kontrolowanego podziału przepływającej strugi urobku na dwie inne strugi w zależności np. od rodzaju lub właściwości fizycznych nosiwa (skała płonna).

W rozdziale opisano rozwiązania w zakresie dotychczas stosowanych typów mechanicznych zbiorników retencyjnych, które mogłyby być zaadaptowane do potrzeb współczesnego podziemnego górnictwa węglowego.

5.1 Systematyka zbiorników retencyjnych

Zbiorniki retencyjne odgrywają kluczową rolę w górniczych systemach transportowych, zapewniając ciągłość przepływu strugi urobku. Pozwalają one także na jej gromadzenie w miejscach, gdzie następuje zmiana charakteru transportu z cyklicznego na ciągły i odwrotnie. W praktyce występuje wiele rodzajów zbiorników mechanicznych, które różnią się między sobą budową, jak i pełnionymi funkcjami w systemie transportowym.

5.1.1 Rola zbiorników retencyjnych w systemie transportowym

W badaniach przeprowadzonych w ramach projektu ECSC Coal Research wykazano, że zastosowanie sterowanego zbiornika w systemie odstawy wpływa na poprawę efektywności pracy systemu odstawy. Zbiornik pełni funkcję regulatora przepływu urobku, gromadząc jego nadmiar w okresach szczytowych i uwalniając go w sposób kontrolowany w momentach mniejszego obciążenia odstawy. Dzięki automatycznemu sterowaniu poziomem napełnienia możliwe jest utrzymanie stabilnej pracy przenośników, wpływając na zmniejszenie ryzyka przeciążeń, ograniczenie zużycia energii oraz wydłużenie żywotności podzespołów systemu [62].

W publikacji [58] autor zilustrował przykłady możliwych lokalizacji zbiorników w systemie transportowym. Zbiorniki mogą pracować w układach równoległych, szeregowych lub w zespołach zbiorników. Przez układy szeregowe przepływa cała struga

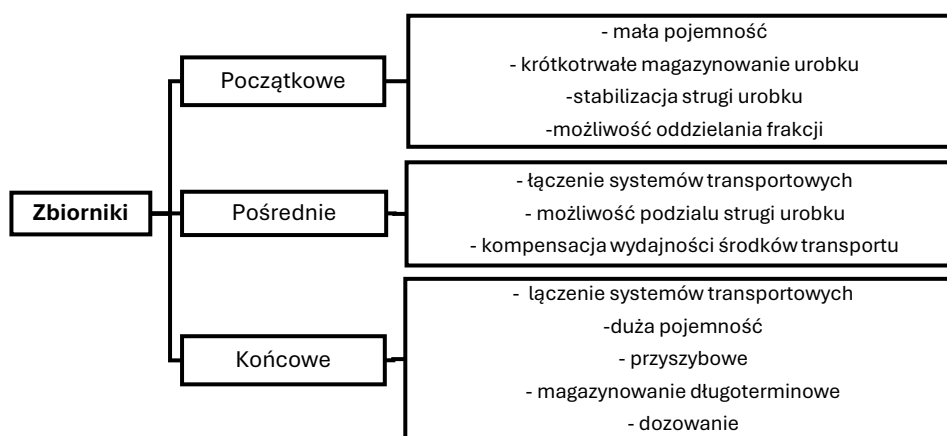
urobku która jest w nich akumulowana lub stabilizowana. Układy równoległe umożliwiają sterowanie przepływem nadawy.

W pracy [1] usystematyzowano i opisano funkcje górniczych zbiorników retencyjnych, a także dokonano podziału zbiorników ze względu na ich lokalizację w systemie transportu.

Zadania jakie zbiorniki retencyjne pełnią w systemach odstawy to:

- stabilizacja i zapewnienie ciągłości strugi urobku,
- gromadzenie urobku w miejscu zmiany charakteru transportu z cyklicznego na ciągły i odwrotnie.

Zbiorniki retencyjne podzielono na trzy podstawowe kategorie: początkowe, pośrednie oraz końcowe (Rys. 5.1.1). Zbiorniki początkowe lokalizowane są na początku ciągów technologicznych w niewielkiej odległości od miejsca urabiania w rejonie eksploatacji przodków chodnikowych lub ścianowych. Ich zadaniem jest krótkookresowe magazynowanie urobku lub stabilizacja strugi poprzez magazynowanie nadwyżek urobku, a także możliwość oddzielania zanieczyszczenia pochodzącego z prowadzonych robót przygotowawczych (drażenia chodników). Zbiorniki pośrednie lokalizowane są pomiędzy różnymi środkami transportu np. kolej podziemna co pozwala na wyrównanie wydajności w różnych odcinkach systemu. Ich celem jest stabilizacja nadawy w rejonie odstawy oddziałowej lub zbiorczej. Z kolei zbiorniki końcowe, znajdujące się na końcu układu, odpowiadają za przekazanie (dozowanie) odpowiedniej ilości urobku np. do naczyń wyciągowych szybów wydobywczych. Podział ten obrazuje znaczenie zbiorników jako elementów systemu transportu podziemnego, które zapewniają ciągłość procesu transportowego.



Rys. 5.1.1 Podział zbiorników ze względu na lokalizację/funkcjonalność i efektywność operacyjną

Zgodnie z klasyfikacją przedstawioną w [7] zbiorniki dzieli się na stałe (wyróbiska pionowe lub silnie pochylone) oraz zbiorniki przenośnikowe. Zbiorniki przenośnikowe były najczęściej stosowane i najbardziej rozwinęły się w angielskim górnictwie węglowym. Autor pracy podkreśla, że poziome zbiorniki retencyjne stosowane w polskim górnictwie będą miały kluczowe znaczenie w kontekście dużej koncentracji wydobycia i związanych z tym wymagań technologicznych. Cechą charakterystyczną poszczególnych grup jest ich miejsce w podziemnym systemie transportowym, a sposób załadunku dostosowany jest do specyfiki oraz skali produkcji. Wyładunek z zamkniętych zbiorników odbywa się w sposób grawitacyjny lub za pomocą systemów przenośnikowych.

Magazynowanie węgla i urobku węglowego obejmuje różnorodne rozwiązania konstrukcyjne, które wg [63] można podzielić na cztery główne kategorie w zależności od ich zastosowania i specyficznych wymagań operacyjnych: otwarte hałdy, magazynowanie w sekcjach kontenerowych, podziemne bunkry oraz silosy.

Otwarte hałdy węgla, stosowane w przypadku magazynowania węgla przechowywanego na zewnątrz, gdzie kluczową rolę odgrywają niskie koszty wdrożenia oraz bezpieczeństwo magazynowania. Warto zwrócić uwagę na wady rozwiązania związane z ekspozycją urobku na czynniki atmosferyczne, takie jak opady czy wiatr.

- Magazynowanie w sekcjach kontenerowych zapewnia dużą elastyczność transportu i przechowywania. Rozwiązanie to może być szeroko stosowane w przypadku transportu, podczas którego kontenery mogą być przenoszone między różnymi środkami transportu.
- Podziemne bunkry, są to zamknięte przestrzenie podziemne, które minimalizują wpływ środowiska zewnętrznego zapewniając ochronę urobku węglowego przed wpływem czynników atmosferycznych. Zapewniają możliwość współpracy z podziemnymi systemami transportowymi.
- Silosy to pionowe powierzchniowe zbiorniki magazynowe, które umożliwiają gromadzenie węgla na niewielkiej powierzchni przy jednoczesnym zapewnieniu łatwego dostępu do zgromadzonego urobku. Stosowane są często w miejscach, gdzie istotne jest oszczędzanie przestrzeni.

5.1.2 Klasyfikacja mechanicznych zbiorników retencyjnych

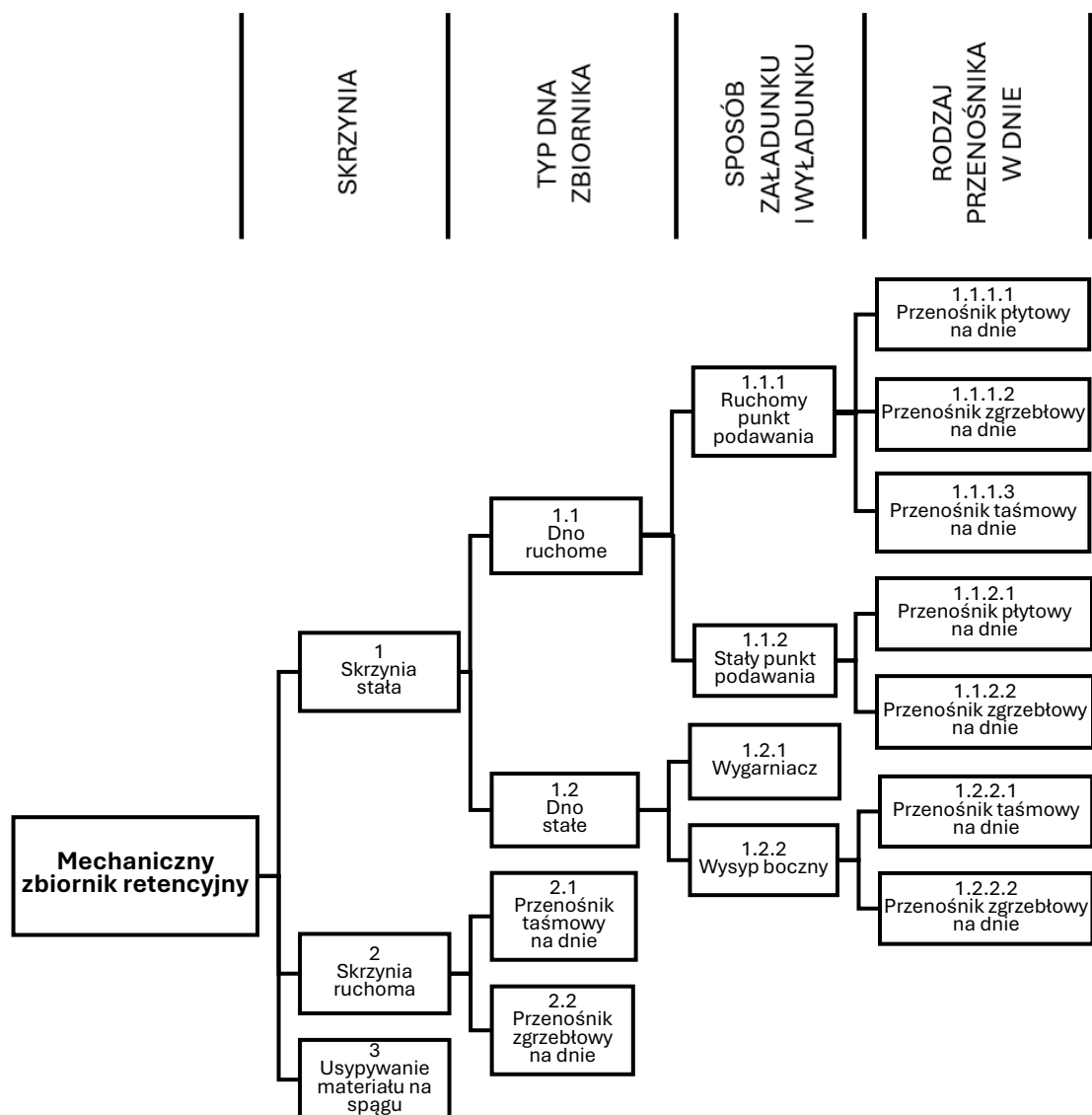
W literaturze branżowej i naukowej niewiele miejsca poświęcono górnictwem zbiornikom retencyjnym, być może dlatego, że niewiele zmieniło się w ich konstrukcji

na przełomie ostatnich kilkudziesięciu lat. Modyfikacjom podlegały jedynie systemy monitorowania stanu wypełnienia oraz urządzenia rozładowcze.

Ciekawym rozwiązaniem technicznym są natomiast mechaniczne zbiorniki retencyjne, czyli zbiorniki wykonane najczęściej jako konstrukcje stalowe wyposażone w mechanizmy umożliwiające kontrolowanie stanu wypełnienia zbiornika i jego wydajności. W dalszej części rozdziału przedstawiono propozycje systematyki (podziału) tych maszyn oraz ich rozwiązania konstrukcyjne i aplikacje przemysłowe.

Ze względu na ograniczoną liczbę pozycji literaturowych opisujących mechaniczne zbiorniki retencyjne, postanowiono opracować własną propozycję ich systematyki.

Na rysunku 1.1 przedstawiono autorski podział mechanicznych zbiorników retencyjnych ze względu na cechy konstrukcyjne opracowane na podstawie danych literaturowych i patentowych.



Rys. 5.1.1 Podział zbiorników mechanicznych

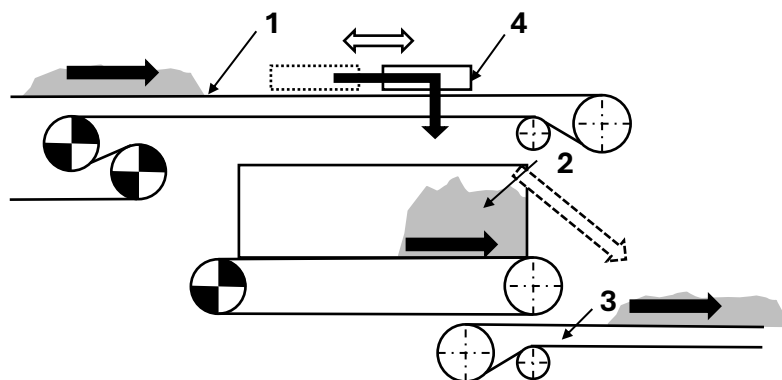
5.1.3 Schematy działania mechanicznych zbiorników retencyjnych

Zastosowano następujące kryteria podziału:

- stała skrzynia ładunkowa,
- ruchoma skrzynia ładunkowa,
- brak skrzyni ładunkowej.

System ten ilustruje zróżnicowanie i elastyczność zastosowań mechanicznych zbiorników retencyjnych w zależności od potrzeb.

Na rysunku 5.1.2 przedstawiono schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze stałą skrzynią wypełnianą przez ruchomy zgarniak pługowy. W dnie zbiornika może być zainstalowany przenośnik płytowy (1.1.1.1), zgrzeblowy (1.1.1.2) lub taśmowy (1.1.1.3). Wprowadzony do systemu transportu zbiornik spełnia 3 funkcje, umożliwiając retencję, stabilizację strugi urobku i zmagazynowanie odseparowanej skały płonnej. Chłonność zbiornika równa jest maksymalnej wydajności przenośnika podającego. Wydajność wyładunku ograniczona jest wydajnością przenośnika odbierającego i jest sumą nadawy przenośnika podającego oraz zbiornika mechanicznego. Istnieje możliwość transportu urobku z pominięciem zbiornika (funkcja bypass). Szacowana ładowność zbiorników ze stałymi skrzyniami wynosi około 200 ton, a maksymalna długość wynosi do 200 m.

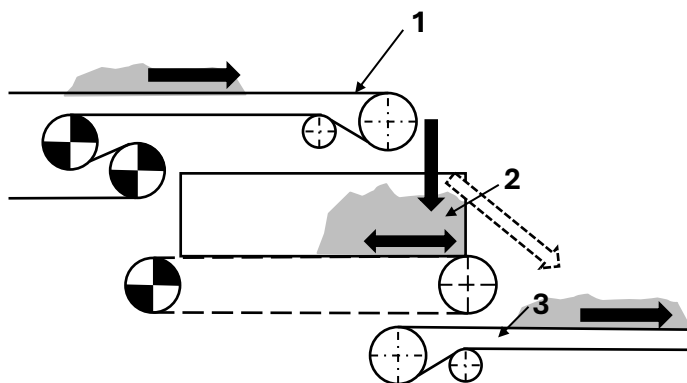


Rys. 5.1.2 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze stałą skrzynią i dnem ruchowym w jednym kierunku (1.1.1)

1. przenośnik podający, 2. mechaniczny zbiornik retencyjny, 3. przenośnik odbierający,
4. zgarniak pługowy.

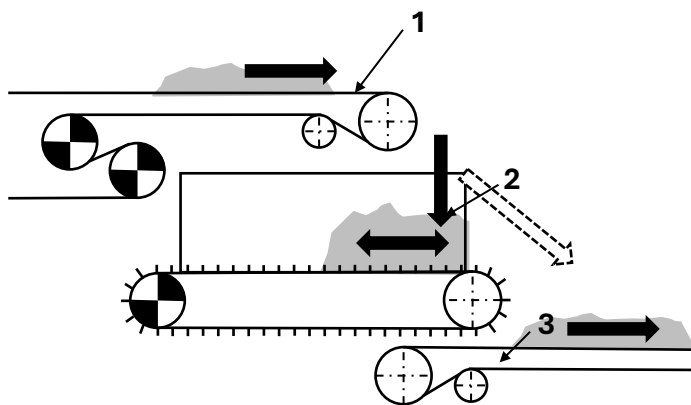
Na rysunku 5.1.3 zamieszczono schemat funkcjonalny mechanicznego zbiornika retencyjnego ze stałą skrzynią i dnem w postaci przenośnika płytowego ruchomego w dwóch kierunkach (1.1.2.1). Urobek dostarczany jest do zbiornika przenośnikiem taśmowym (1). Ruchome dno zbiornika (2) pozwala na kontrolowane przemieszczanie zgromadzonego materiału, umożliwiając jego równomierne rozprowadzenie w zbiorniku.

W razie potrzeby, system może pracować w trybie bypass, co pozwala na bezpośredni transport urobku bez gromadzenia go w zbiorniku. Napełnianie zbiornika odbywa się ze stałego punktu podawczego tj. bębna wysypowego przenośnika taśmowego. Modułowa konstrukcja zbiornika umożliwia adaptację urządzenia do specyfiki wydobywania w rejonie wydobywczym.



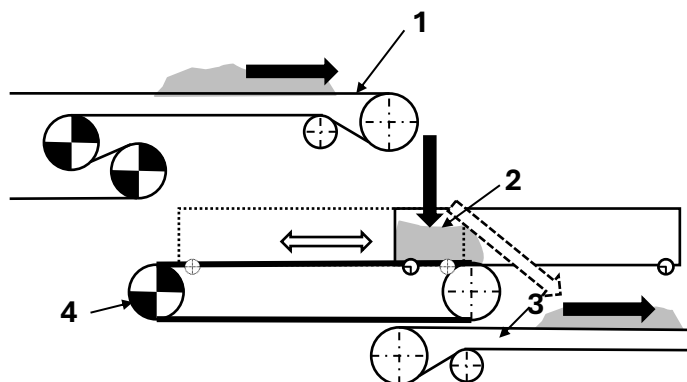
Rys. 5.1.3 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze stałą skrzynią i dnem ruchomym w dwóch kierunkach (przenośnik płytowy) (1.1.2.1)
1. przenośnik podający, 2. mechaniczny zbiornik retencyjny z dnem płytowym, 3. przenośnik odbierający.

Rysunku 5.1.4 przedstawia schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego, wyposażonego w nieruchomą skrzynię oraz dno stanowiące przenośnik zgrzeblowy umożliwiający przemieszczenie zgromadzonego urobku w dwóch kierunkach. Zastosowanie zbiornika z przenośnikiem zgrzeblowym w dnie wiąże się z wyzwaniami eksploatacyjnymi, szczególnie podczas transportu materiału skalnego o wysokich właściwościach abrazyjnych. Konstrukcja zbiornika nie sprawia większych problemów z uszczelnieniem. Ponadto, w mechanicznych zbiornikach retencyjnych systemy przenośników zgrzeblowych mogą powodować trudności w utrzymaniu ciągłości pracy, zwłaszcza w przypadku zerwania cięgna łańcuchowego, którego wymiana lub ponowne połączenie jest skomplikowane i czasochłonne. Pojemność zbiorników z ruchomymi skrzyniami wynosi około 260 ton. Według dostępnych źródeł ich maksymalne wymiary mogą osiągać 2,4 m szerokości, 3,75 m wysokości oraz długość do 200 m.

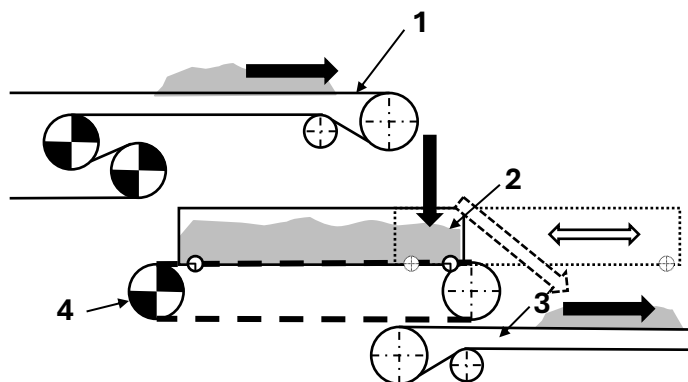


Rys. 5.1.4 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze stałą skrzynią i dnem ruchowym w dwóch kierunkach (przebiegowy) (1.1.2.2)
1. przenośnik podający, 2. mechaniczny zbiornik retencyjny z przenośnikiem zgrzeblowym na dnie, 3. przenośnik odbierający.

Zbiornik mechaniczny z przenośnikiem taśmowym na dnie i ruchomą skrzynią przedstawiono na rysunku 5.1.5, a zbiornik mechaniczny z przenośnikiem płytowym na dnie i ruchomą skrzynią przedstawiono na rysunku 5.1.6. Urządzenia umożliwiają kontrolowane magazynowanie oraz transport urobku w dwóch kierunkach. Przenośniki płytowy i taśmowy współpracując z ruchomą skrzynią ładunkową umożliwiają skuteczne przemieszczanie zgromadzonego materiału. Wpływa to również na ograniczenie tarcia zgromadzonego urobku z dnem oraz ograniczeniami bocznymi zbiornika, co zmniejsza zużycie elementów konstrukcyjnych. Maszyny charakteryzują się niską energochłonnością, wpływa to na ekonomiczne ich użytkowanie. Warto jednak zaznaczyć, że przemieszczenie skrzyni wymaga dodatkowego miejsca w wyrobisku, co należy uwzględnić podczas planowania instalacji zbiornika. Rozwiązania wyposażone w przenośniki płytowe znajdują zastosowanie w przemyśle wydobywczym, hutniczym i cementowym zapewniając ciągłość transportu materiałów sypkich.



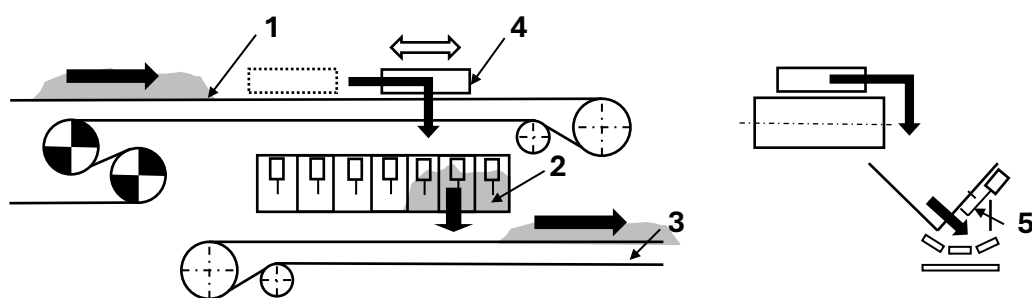
Rys. 5.1.5 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze skrzynią i dnem ruchowym z przenośnikiem taśmowym na dnie (2.1.1.1)
1. przenośnik podający, 2. mechaniczny zbiornik retencyjny, 3. przenośnik odbierający, 4. przenośnik taśmowy.



Rys. 5.1.6 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze skrzynią i dnem ruchomym z przenośnikiem płytowym na dnie (2.1.1.2)

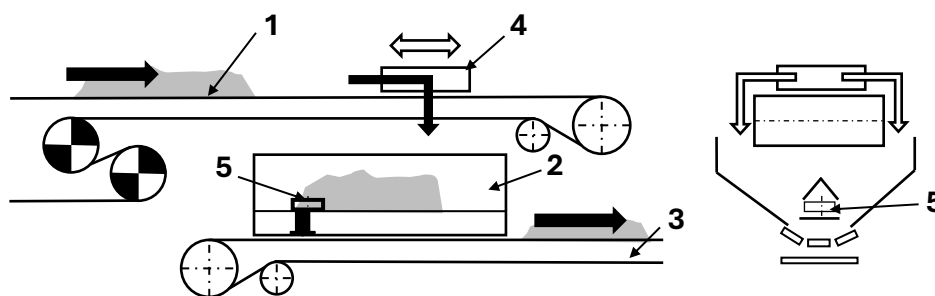
1. przenośnik podający, 2. mechaniczny zbiornik retencyjny, 3. przenośnik odbierający, 4 przenośnik płytowy.

Na rysunkach 5.1.7 i 5.1.8 przedstawiono zbiorniki mechaniczne ze stałymi skrzyniami i dnami. Proces załadunku odbywa się z wykorzystaniem przenośnika taśmowego (1). Zgarniacz pługowy (4) umożliwia kontrolowany załadunek zbiorników. Może on zostać odsunięty lub zdemontowany w celu zapewnienia na separacji zanieczyszczenia urobku skalą płonną. Proces rozładunku odbywa się przy udziale przenośnika taśmowego odbierającego (3). W zbiorniku retencyjnym ze stałą skrzynią i dnem, wyposażonym w boczny wysyp (Rys. 5.1.7) odpływ urobku kontrolowany jest przez zasuwę sterowaną hydraulicznie (5), umożliwiającą boczne opróżnianie zbiornika. Zbiornik retencyjny (Rys. 5.1.8) różni się mechanizmem wyładunku. W rozwiązaniu tym zastosowano wygarniacz urobku (5). Zapewnia on równomierne i kontrolowane przemieszczanie zgromadzonego materiału w kierunku przenośnika odbierającego.



Rys. 5.1.7 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze skrzynią i dnem stałym z wysypem bocznym (1.2.2)

1. przenośnik podający, 2. zbiornik retencyjny, 3. przenośnik odbierający, 4. zgarniacz pługowy, 5. zasuw z napędem hydraulicznym.



Rys. 5.1.8 Schemat mechanicznego zbiornika retencyjnego ze skrzynią i dnem stałym wyposażony w wygarniacz urobku (1.2.1)

1. przenośnik podający, 2. zbiornik retencyjny, 3. przenośnik odbierający, 4. zgarniak pługowy, 5. wygarniacz.

5.2 Stan techniki

Poszukiwanie informacji na temat konstrukcji mechanicznych zbiorników retencyjnych stosowanych w podziemnych zakładach górniczych wymagało zastosowania wielowymiarowego podejścia, obejmującego analizę różnych źródeł wiedzy technicznej i patentowej. Na wstępie ustalono słowa kluczowe, które były podstawą poszukiwań. W poszukiwaniach wykorzystano literaturę techniczną i naukową. Poszukiwania prowadzono z wykorzystaniem baz tj.: google scholar, reaserchgate, baztech, scopus, iee xplora. Skupiono się na źródłach opisujących koncepcje zbiorników stosowanych w podziemnym górnictwie podziemnym, jak i praktycznych aspektach wdrożenia. Kolejnym etapem była analiza rozwiązań zgłoszonych do Światowych Urzędów Patentowych. Informacje te dostarczyły wiedzy o nowatorskich rozwiązaniach konstrukcyjnych i organizacyjnych. Obszar poszukiwań dotyczył magazynowania urobku z wykorzystaniem zbiorników mechanicznych w podziemnych zakładach górniczych. Podczas poszukiwań wykorzystano słowa kluczowe tj. poziomy zbiornik mechaniczny, magazyn urobku, retencja urobku oraz ich anglojęzyczne odpowiedniki. Podczas analizy posłużyła również międzynarodowa klasyfikacja patentowa (MKP).

Poszukiwania przeprowadzono:

- w bazie Urzędu Patentowego RP [64] – dla patentów, praw ochronnych i zgłoszeń wynalazków i wzorów użytkowych na terytorium Polski,
- w bazie Espacenet [65] – dla patentów i zgłoszeń wynalazków krajowych i międzynarodowych na świecie,
- w bazie Europejskiego Urzędu Patentowego [66] – dla patentów i zgłoszeń wynalazków i wzorów użytkowych europejskich i międzynarodowych.

- w bazie Światowej Organizacji Własności Intelektualnej (WIPO- World Intellectual Property Organization) [67]- dla międzynarodowych dokumentów patentowych (wynalazków, wzorów użytkowych, wzorów przemysłowych).

Poszukiwania koncentrowały się głównie na górnictwie jako obszarze funkcjonowania rozwiązań. W toku realizacji badania opisano odnalezione wybrane dokumenty. Rozwiązania zgłoszone zostały do urzędów patentowych na przestrzeni lat 1954-2022. W ocenie autora rozprawy rozpoznanie stanu zagadnienia przeprowadzone na podstawie analizy dokumentów patentowych dało dużo szersze spektrum informacji niż przegląd literatury naukowej. Poszukiwania zakończono przeglądem informacji udostępnianych przez producentów zbiorników retencyjnych, w tym stron internetowych, broszur technicznych i kart katalogowych.

Połączenie źródeł wiedzy, od literatury naukowej, przez bazy patentowe, do informacji udostępnianych przez producentów umożliwiło opracowanie kompleksowego przeglądu dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych. Taka wieloaspektowa analiza pozwala zarówno na ocenę dostępnych technologii, jak i na wskazanie potencjalnych kierunków rozwoju w projektowaniu zbiorników retencyjnych dla podziemnych zakładów górniczych. Wyniki przeprowadzonej analizy posłużyły także do sformułowania klasyfikacji zbiorników retencyjnych, zaprezentowanej w poprzednim rozdziale.

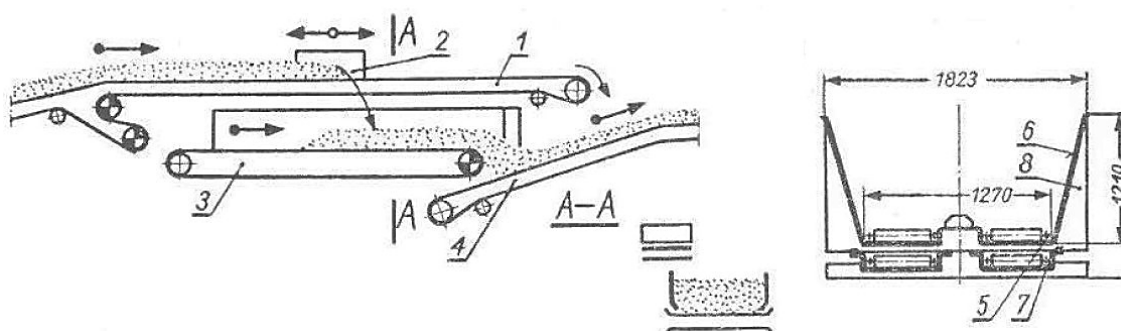
5.3 Analiza rozwiązań technicznych mechanicznych zbiorników retencyjnych

Różnorodność konstrukcji mechanicznych zbiorników retencyjnych pozwala na ich adaptację do specyficznych warunków górniczych i wymagań eksploatacyjnych kopalń. W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcje oraz rozwiązania zbiorników mechanicznych stosowanych w górnictwie podziemnym, uwzględniając ich różne warianty konstrukcyjne i zastosowania. Szczególną uwagę poświęcono urządzeniom wykorzystywanym w zakładach górniczych, opisanych w literaturze oraz zgłoszeniach patentowych. Na przestrzeni lat rozwiązania ewoluowały od prostych układów stacjonarnych, takich jak poziomy bunkier warstwowy (ang. horizontal strata bunker) [68], gdzie przestrzeń magazynową stanowiła część wyrobiska, do nowoczesnych systemów. Starsze rozwiązania, ze względu na ich peryferyjne położenie w systemie transportowym, były mniej elastyczne, droższe w budowie i generowały problemy związane z transportem ziaren nadgabarytowych. Współczesne zbiorniki

to zaawansowane technologicznie urządzenia, sterowane automatycznie lub zdalnie, które lepiej spełniają wymagania współczesnego górnictwa.

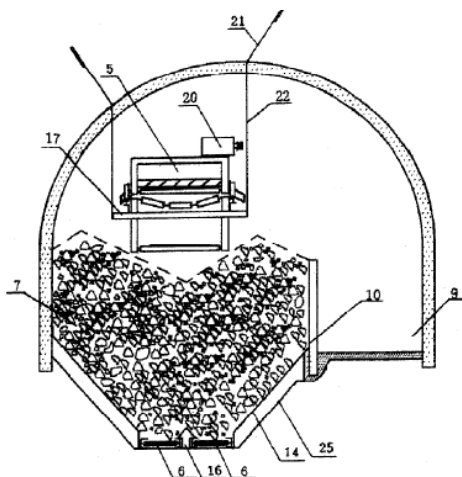
5.3.1 Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, ruchomym punktem podawania

Działanie przenośnika zgrzeblowego zasobnikowego z jednym kierunkiem ruchu łańcucha przedstawiono na rysunku 5.3.1. Układ składa się z następujących elementów: przenośnik taśmowy (1), zgarniak pługowy (2), przenośnik zgrzeblowy zasobnikowy (3), przenośnik taśmowy odbierający (4), łańcuch czteropasmowy (5), zastawki (6), dno rynny (7), dno rynny (8). Na przekroju poprzecznym A-A oznaczono główne wymiary urządzenia [1]. Zbiornik zasypywany jest na całej długości z przenośnika taśmowego z wykorzystaniem zgarniaka pługowego. Rozładunek prowadzony jest poprzez pracę zasobnikowego przenośnika zgrzeblowego zainstalowanego na dnie urządzenia. Zbiornik i przenośnik podający nie znajdują się w jednej osi.



Rys. 5.3.1 Przenośnik zgrzeblowy zasobnikowy o jednym kierunku ruchu łańcucha [1]

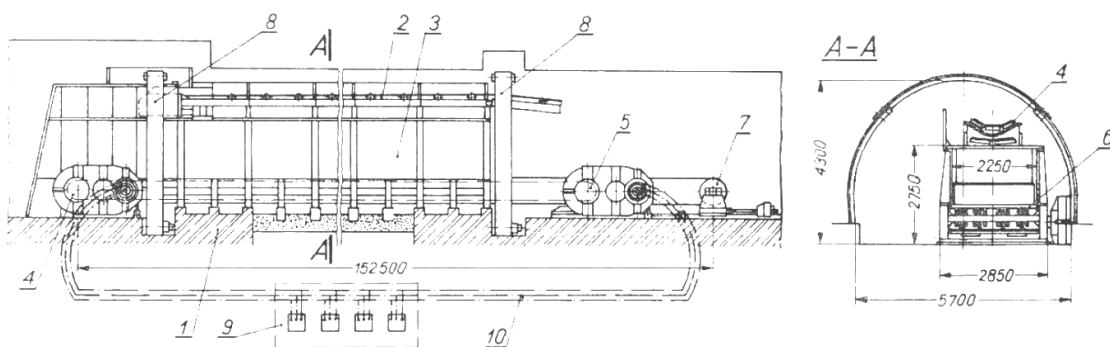
Rysunek 5.3.2 przedstawia poziomy zbiornik węglowy (ang. horizontal type coal bunker), stanowiący zgłoszenie do Urzędu Patentowego o numerze CN2756833Y. Zgłoszenie rozwiązania dokonane zostało w 2004 roku uzyskując ochronę w postaci wzoru użytkowego. Urządzenie zbudowane w oparciu o przenośnik taśmowy zasypujący zbiornik oraz przenośnik płytowy umożliwiający jego opróżnianie. Przenośnik taśmowy znajdujący się górnej części bunkra wyposażony jest w wózek rozładunkowy oraz dwa zgarniacze. Elementem umożliwiającym przemieszczanie urobku w zbiorniku jest zainstalowany w dolnej jego części przenośnik płytowy. Zbiornik poziomy współpracuje z kopalnianym układem odstawy urobku, zainstalowany jest tak, aby nie ograniczać ruchu załogi w wyrobisku. Według autorów pomysłu rozwiązanie jest proste w instalacji, elastyczne w użyciu oraz spełnia wszystkie przepisy dotyczące składowania urobku w podziemnej kopalni węgla kamiennego [69].



Rys. 5.3.2 Poziomy zbiornik węglowy [69]

5.3.2 Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, stałym punktem podawania, z przenośnikiem płytowym na dnie

Zbiornik rewersyjny płytowy typu Jan-500 przedstawiony został na rysunku 5.3.3 [70]. W publikacji krótko została opisana jego budowa, zasada działania oraz lokalizacja w systemie transportu. Podsumowując zbiornik autor podkreślił jego wadę- wysoki koszt inwestycji i eksploatacji.

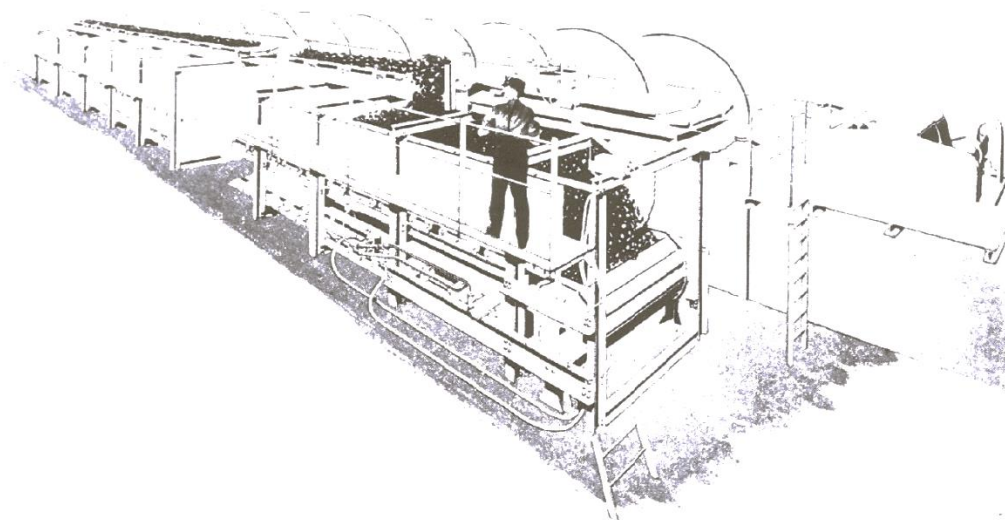


Rys. 5.3.3 Zbiornik rewersyjny płytowy typu Jan-500 [71]

1- korona fundamentowa, 2- przenośnik taśmowy, 3- zasobnik, 4- napęd wysypowy, 5- napęd zwrotny, 6- przenośnik płytowy lub taśmowy, 7- bęben, 8- usuwak, 9- komora, 10- magistrala hydrauliczna.

Rozwiązaniem, któremu poświęcono uwagę w literaturze w 1958 roku jest zbiornik bunkrowy (Rys. 5.3.4). Wdrożenie rozwiązania wpłynęło na zwiększenie wydajności szybu skipowego z 200 t/h do 220 t/h przy wykorzystaniu ładowności zbiornika wynoszącej 120 t. Wdrożenie zbiornika skutkowało również ustabilizowaniem nadawy. Urządzenie umożliwiało załadunek ze zmienną szybkością, zapewniając stałą strugę urobku podczas rozładunku, a w przypadku niedostatecznej nadawy umożliwiało pominięcie zbiornika [72]. Artykuł opisuje budowę zbiornika, strukturę napędową, sterowanie oraz możliwe funkcje zbiornika w systemie produkcyjnym kopalni. Wśród

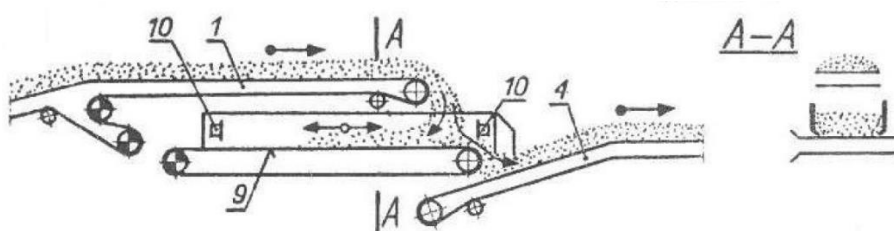
możliwych funkcji wymieniane są m.in.: stabilizacja nadawy w przodkach chodnikowych, rozdział różnych gatunków węgla, a w zakładach przeróbczych na powierzchni możliwość zastosowania urządzenia do magazynowania urobku pomiędzy poszczególnymi etapami przeróbki węgla.



Rys. 5.3.4 Przenośnik bunkrowy [72]

5.3.3 Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym, stałym punktem podawania, z przenośnikiem zgrzeblowym na dnie

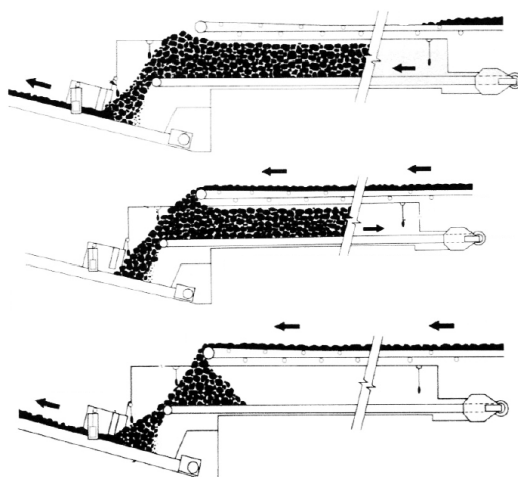
Rysunek 5.3.5 przedstawia koncepcję przenośnika zgrzeblowego rewersyjnego. Oznaczono na nim: 1- przenośnik taśmowy, 4- przenośnik taśmowy odbierający, 9-przenośnik rewersyjny, 10- czujniki krańcowe. Wszystkie elementy systemu transportowego znajdują się w jednej osi [1].



Rys. 5.3.5 Przenośnik zgrzeblowy rewersyjny [1]

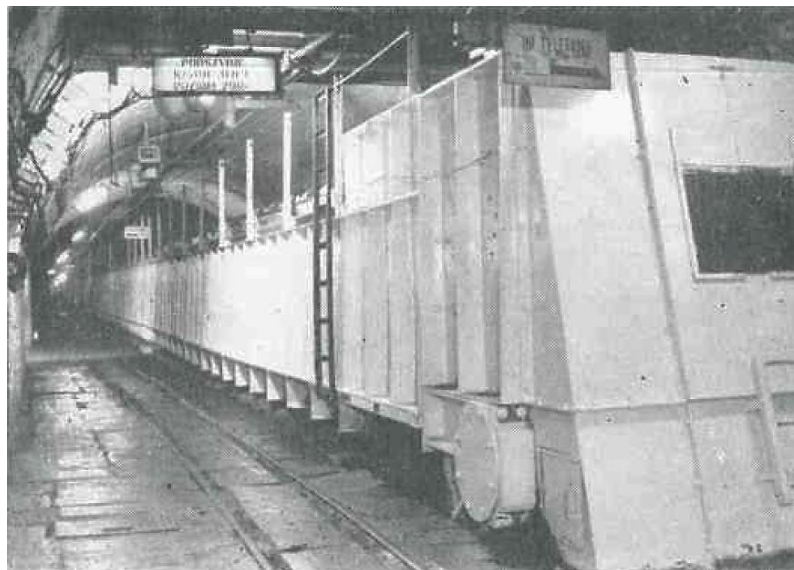
W odniesieniu do pozycji [2] autor przedstawił model oraz zasadę pracy zgrzeblowego zasobnika węgla (Rys. 5.3.6). Według niego najpowszechniejszym typem poziomych zbiorników mechanicznych są przenośniki łańcuchowe specjalne- zasobniki zgrzeblowe. Umożliwiają one retencję ponad 1000 t urobku ze zmienną prędkością załadunku i rozładunku zbiornika. Sterownik pracujący w oparciu o określony algorytm wykorzystuje pomiar wydajności przenośników podającego i odbierającego. Umożliwia

to płynne sterowanie napędem mechanicznym lub elektrycznym oraz regulację zasuw regulujących wydajność nadawy. W publikacji poruszono również przyczyny niestosowania w Polsce zasobników mechanicznych, takie jak: wysokie wydajności eksploatowanych ścian, większa dyspozycyjność stosowanych obecnie maszyn i urządzeń oraz brak producentów zbiorników. Autor podkreślił, iż mała możliwość retencji zbiorników mechanicznych daje mniejsze efekty ekonomiczne z wdrożenia [2].



Rys. 5.3.6 Idea pracy zgrzeblowego zasobnika węgla [2]

W publikacji [73] autor opisuje zbiorniki wyrównawcze stałe i mechaniczne. Ładowność zbiornika wynosząca 100 t gwarantuje zapewnienie równomiernego dopływu urobku do stacji załadowniczej. Autor wymienia dodatkowo możliwości retencji urobku w krótkich szybkach, stromych pochylniach wyposażonych w suwnie śrubowe lub mechaniczne urządzenia, podkreślając powszechność stosowania do tego celu wozów kopalnianych. Pierwszy w Polsce zbiornik został uruchomiony w 1968 roku w kopalni doświadczalnej Jan (Rys. 5.3.7). Pojemność wynosiła 235 m³ co zapewniało ładowność 200 t oraz możliwość przyjęcia nadawy na poziomie 450 t/h. Układ napędowy realizowany był z wykorzystaniem dwóch silników hydraulicznych przekazujących napęd na dwa łańcuchy zgrzeblowe znajdujące się na dnie zbiornika [70],[73]. Urządzenie było w pełni automatyczne umożliwiało stabilizację pracy szybu i stanowiło rezerwę w przypadku awarii urządzeń transportowych [74].



Rys. 5.3.7 Zbiornik rewersyjny w kopalni Jan [73],[74]

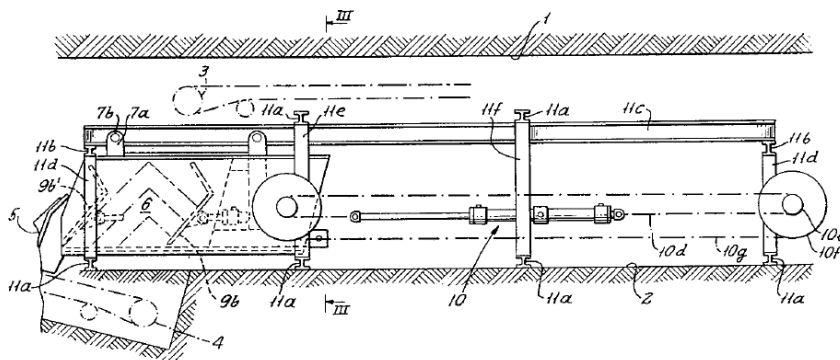
Poradnik górnika tom 3 przedstawia ogólną budowę zbiornika mechanicznego. Głównymi elementami urządzenia, są: skrzynia zbiornika, przenośnik zgrzeblowy denny, napęd przenośnika dennego, przenośnik podający, przenośnik odbierający, czujnik kontroli spiętrzenia, czujnik kontroli napełnienia zbiornika, czujnik kontroli ruchu przenośnika odbierającego. Zgodnie z założeniem zbiornik stanowi wyposażenie wyrobiska górniczego, dlatego możliwa jest zmiana miejsca jego lokalizacji [70].

Zbiornik z przenośnikiem łańcuchowym (ang. chain conveyor bunker) to zbiornik o pojemności do 200 ton, który jest urządzeniem wysoko energochłonnym. Tarcie powstałe podczas pracy urządzenia skutkuje wysokim zużyciem energii oraz wysokim zużyciem podzespołów co wpływa na ekonomikę użytkowania [68].

5.3.4 Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wygarniaczem

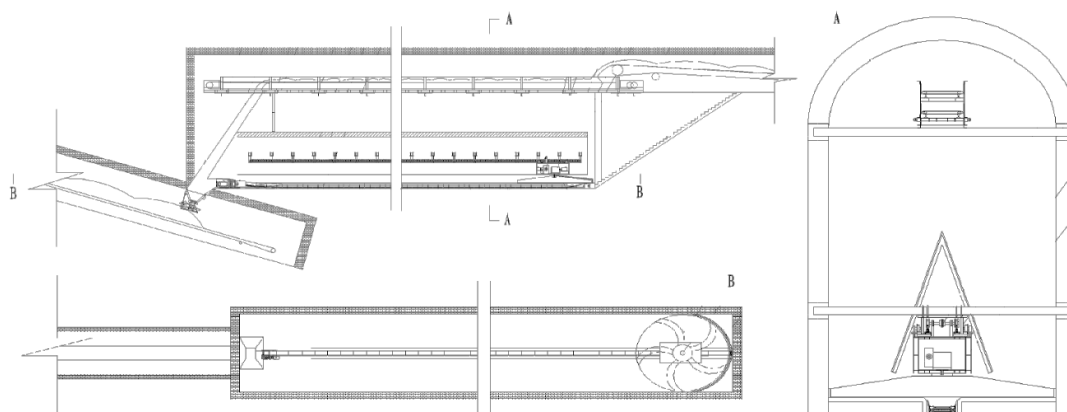
Patent US4236630(A) Rozsuwany teleskopowy zbiornik na węgiel dla górnictwa podziemnego (ang. Extensible telescopic coal bunker for subsurface mining) (Rys. 5.3.8) zgłoszony został w Amerykańskim Urzędzie Patentowym w 1978 roku. Konstrukcja zbiornika opracowana została z myślą o przechowywaniu węgla kamiennego. Rozwiązanie zbudowane w oparciu o zestaw kontenerów teleskopowych, w skład których wchodzi jeden kontener nieruchomy oraz zestaw kontenerów ruchomych. Układ jest tak wykonany, aby każdy mobilny kontener pasował do poprzedzającego, większego kontenera. Ponadto kontenery ruchome można teleskopowo wydłużać i skracać, co umożliwia płynną zmianę objętości zbiornika. Układ

napelniany i opróżniany jest z wykorzystaniem przenośnika taśmowego. Napęd realizowany jest przez siłowniki hydrauliczne zamocowane do ramy zbiornika, które umożliwiają przemieszczanie kontenerów teleskopowych wzdłuż ramy urządzenia [75].



Rys. 5.3.8 Wysuwany teleskopowy zbiornik węglowy dla górnictwa podziemnego [75]

Poziomy bunkier węglowy dla kopalń węgla kamiennego (ang. Horizontal type bunker for coal mines) (Rys. 5.3.9), którego twórcą jest L. Zhiwang składa się ze skrzyni bunkra, układu rozładunkowego zainstalowanego w dolnej części oraz ramy nośnej. Bunkier współpracuje z odbierającym przenośnikiem taśmowym pochylonym ku górze. Rozwiązanie charakteryzuje się prostą konstrukcją, małymi rozmiarami gabarytowymi i niską masą. Dolna część zbiornika posiada konstrukcję ochronną w kształcie odwróconej litery V, umożliwia ona ciągłą pracę układu rozładowującego zbiornik niezależnie od ilości nagromadzonego węgla i ryzyka jego awarii. Rozwiązuje to problem unieruchomienia maszyny rozładowującej zwiększając tym samym efektywną pojemność bunkra i zmniejszając koszty budowy [76].

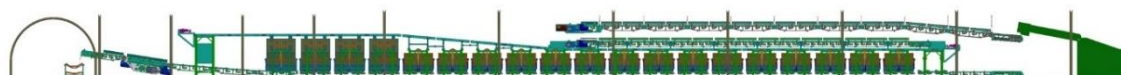


Rys. 5.3.9 Poziomy bunkier węglowy dla kopalń węgla kamiennego [76]

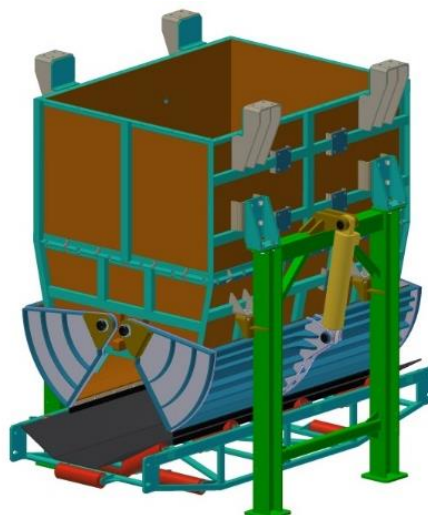
5.3.5 Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wysypem bocznym

Opis zgłoszeniowy Magazynu urobku P.406874 dotyczy urządzenia służącego do czasowego gromadzenia urobku w podziemnych zakładach górniczych za postępowaniem robót w drążonych przodkach chodnikowych. Pomysł zgłoszony został w Polskim Urzędzie Patentowym w 2008 roku. W skład magazynu urobku wchodzi zasobnik po którym przemieszcza się przenośnik rewersyjny, pod zasobnikiem zainstalowany jest przenośnik odstawczy. Zasobnik składa się z mniejszych kontenerów wyposażonych w uchylne dno. Pod stropem wyrobiska zainstalowany jest podajnik transportujący urobek do magazynu. Gdy zbiornik jest napełniony, kierunek przenośnika zostaje zmieniony lub przenośnik jest przesuwany do kolejnego zbiornika. Do opróżnienia zbiorników wykorzystywany jest przenośnik odstawczy, który po uruchomieniu transportuje zgromadzony węgiel [77],[78].

Ostatnia publikacja dotycząca przodkowego magazynu urobku- HYDRA pochodziła z 2020r.[79]. Urządzenie (Rys. 5.3.10) umożliwia gromadzenie urobku lub jego selekcję bez konieczności zatrzymywania ciągu odstawy za postępowaniem przodka chodnikowego. Zastosowanie urządzenia w opinii autorów zredukuje ilość załogi potrzebnej do obsługi urządzeń odstawy. Układ testowany w ZG Sobieski posiadał pojemność 80 m³, masę 78 t i długość 71,5 m. Możliwe jest rozbudowa układu do pojemności 160 m³ i długości 140 m. W skład urządzenia wchodzi podajniki: rewersyjny, odbierający spod wysięgnika i odbierający oraz zbiorniki magazynujące (Rys. 5.3.11) w ilości 19 szt. Układ umożliwia pracę w trzech trybach: napełnianie, opróżnianie i omijanie [80]. Każdy zbiornik magazynujący wyposażony jest w klapy uchylane, które odchylane za pomocą siłowników hydraulicznych umożliwiają załadunek podajnika odbierającego. Budowa i zasada działania układu przedstawiona została w opisie patentowym [19]. Autorzy [78] przeprowadzili ocenę wpływu wprowadzenia urządzenia do układu transportowego kopalni. Eksploatacja układu wpłynie m.in. na obniżenie liczebności załogi potrzebnej do obsługi urządzeń odstawy, wyeliminowanie postojów z powodów awarii systemu odstawy, wprowadzi możliwość oddzielenia skały płonnej od urobku.

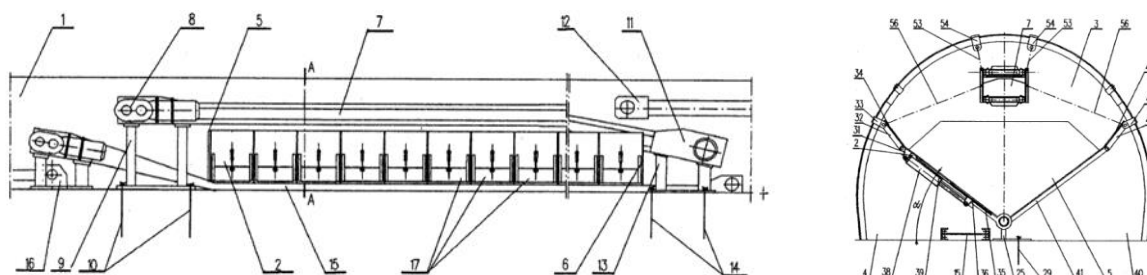


Rys. 5.3.10 Przodkowy magazyn urobku- HYDRA [78]

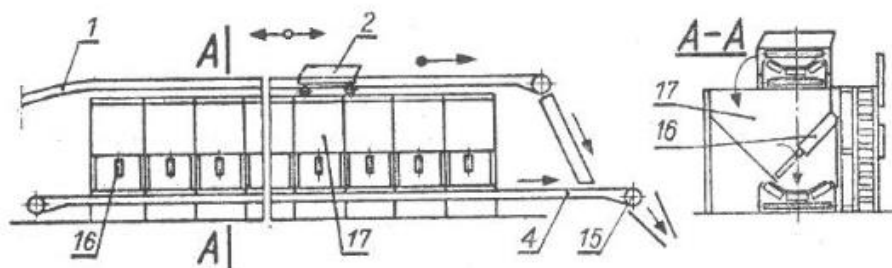


Rys. 5.3.11 Zbiornik magazynujący [78]

Rozwiązanie Zbiornik retencyjny urobku PL181956 [82] zgłoszony w Urzędzie Patentowym RP w 1996 roku (Rys. 5.3.12) w literaturze opisany również przez Koreckiego [1] (Rys. 5.3.13). Przeznaczony jest do pracy w podziemnych zakładach górniczych, podczas prac związanych z drążeniem przodków chodnikowych. Zbiornik przeznaczony jest do retencji urobku pochodzącego z drążenia wyrobisk chodnikowych oraz uniezależnienia pracy ciągu przenośników taśmowych odstawy od nieciągłości odbioru urobku. Zbudowany jest w oparciu o układ dwóch przenośników: rozgarniającego i odbierającego. Zbiornik zainstalowany jest w wyrobisku korytarzowym, oddzielonym przegrodami stalowymi przebiegającymi wzdłuż osi wyrobiska. Przegrody posiadają konstrukcję modułową i dzielą zbiornik na część zasobnikową oraz część transportową. Urobek podawany jest do zbiornika przenośnikiem taśmowym, gdzie jest magazynowany lub zsypywany przez okna na przenośnik zgrzeblowy. Następnie transportowany w kierunku przenośników taśmowych systemu odstawy.



Rys. 5.3.12 Zbiornik retencyjny urobku [82]



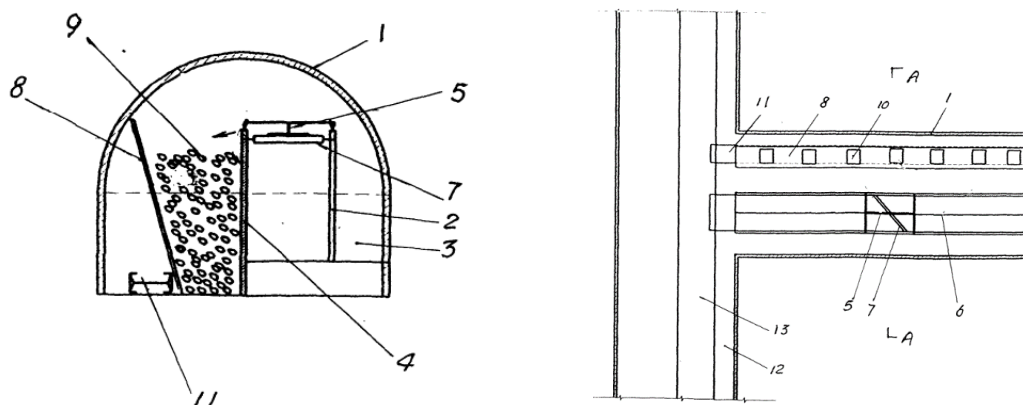
Rys. 5.3.13 Zasobnik samowyladowczy [1]

Autor dodatkowo w publikacji [71] opisuje inny poziomy zbiornik stacjonarny. Urządzenie posiada budowę segmentową umożliwiając zmagazynowanie 50-100 t urobku. Urobek zsypywany jest z wysięgnika przenośnika taśmowego za pomocą wózka zrzutowego, który przemieszczany jest z wykorzystaniem kołowrotu w momencie uzyskania odpowiedniego wypełnienia zbiornika. Wyloty z poszczególnych segmentów otwierane są indywidualnie za pomocą wózka jezdny w zależności od bieżącego zapotrzebowania na urobek w szybie skipowym. Rozładunek zbiornika sterowany jest przez urządzenie skipowe.

Poziomy zbiornik skrzyniowy (ang. horizontal bin type bunker) jest typem zbiornika stałego, który wymaga dodatkowego miejsca dla urządzeń załadunkowych i wyladowczych. Kształt zbiornika umożliwia przepływ urobku, lecz ujemnie wpływa na użyteczną przestrzeń zbiornika. Podczas użytkowania istnieje ryzyko przyklejania się mokrego urobku do ścian zbiornika w wyniku zbyt długiego czasu przechowywania w nim urobku. Urządzenie charakteryzuje się wysokimi kosztami napraw. Sterowane odbywa się w sposób ręczny, choć możliwa jest jego automatyzacja [71].

Wzór użytkowy CN2567342Y o nazwie Podziemny bunkier węglowy (ang. Underground gallery bunker) zgłoszony został w Urzędzie Patentowym w 2002 roku. (Rys. 5.3.14) przedstawia układ urządzeń będących przedmiotem projektu zainstalowanych w wyrobisku. Wyposażenie układu stanowi m.in. część magazynowa układu (poszycie zbiornika), przenośniki: taśmowy i zgrzeblowy umożliwiające załadunek i rozładunek zbiornika, otwory wyladowcze zbiornika, linę trakcyjną połączoną z wózkiem jezdny przenośnika taśmowego. Transport urobku może być realizowany przez zbiornik lub z jego pominięciem. Autorzy projektu zaproponowali rozwiązanie o długości 50 m-100 m umożliwiające zapewnienie ładowności 60-100 ton. Węgiel ze zbiornika transportowany jest z wykorzystaniem przenośnika zgrzeblowego znajdującego się w dolnej części zbiornika, skąd dalej kierowany jest na przenośnik taśmowy znajdujący się w sąsiednim wyrobisku. W momencie zamknięcia zasuw

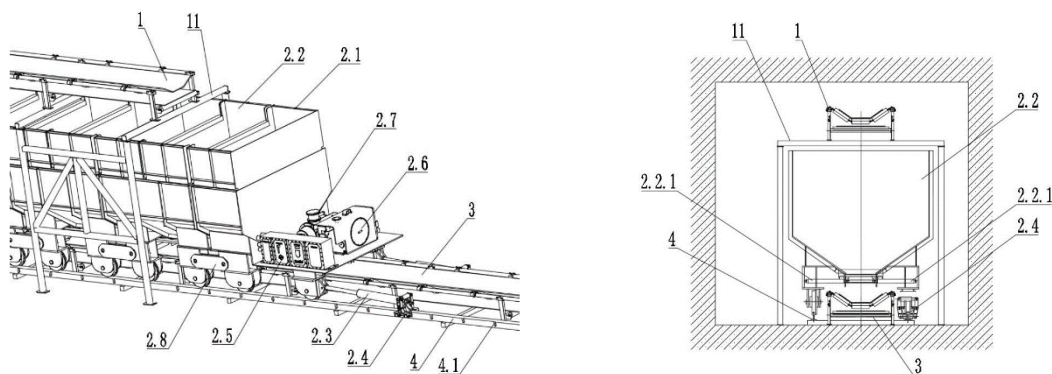
zbiornik zostaje rozładowywany bezpośrednio na sąsiadujący przenośnik taśmowy odstawy[83].



Rys. 5.3.14 Podziemny bunkier węglowy [83]

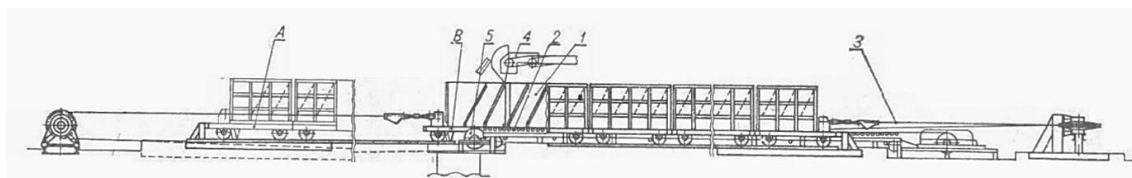
5.3.6 Mechaniczny zbiornik retencyjny z ruchomą skrzynią, z przenośnikiem taśmowym na dnie

Ruchomy zasobnik buforowy na węgiel (ang. Movable type buffering coal bin) o numerze CN113895899A zgłoszony został w Urzędzie Patentowym w 2021 roku (JRys. 5.3.15). W skład systemu wchodzi dwa przenośniki taśmowe- górny i dolny, pomiędzy którymi poruszają się połączone ze sobą zasobniki. Wyposażono je w koła jezdne, pierwsza skrzynia (prowadząca) połączona jest z jednostką napędową. Wysięgnik umożliwia transport urobku do zasobników lub z ich pominięciem. Układ wyposażony jest w urządzenie monitorujące wypełnienie zasobników oraz ich wagę oraz automatyczny system sterowania, a także wizyjny system monitorowania. System opracowany został w celu stabilizacji nadawy pomiędzy odstawą oddziałową a odstawą zbiorczą. W przypadku stabilnej nadawy z przenośnika oddziałowego urobek może zostać skierowany bezpośrednio na przenośnik odstawy zbiorczej. W przypadku zatrzymania przenośnika odbierającego istnieje możliwość czasowego zmagazynowania urobku w zasobnikach [84].



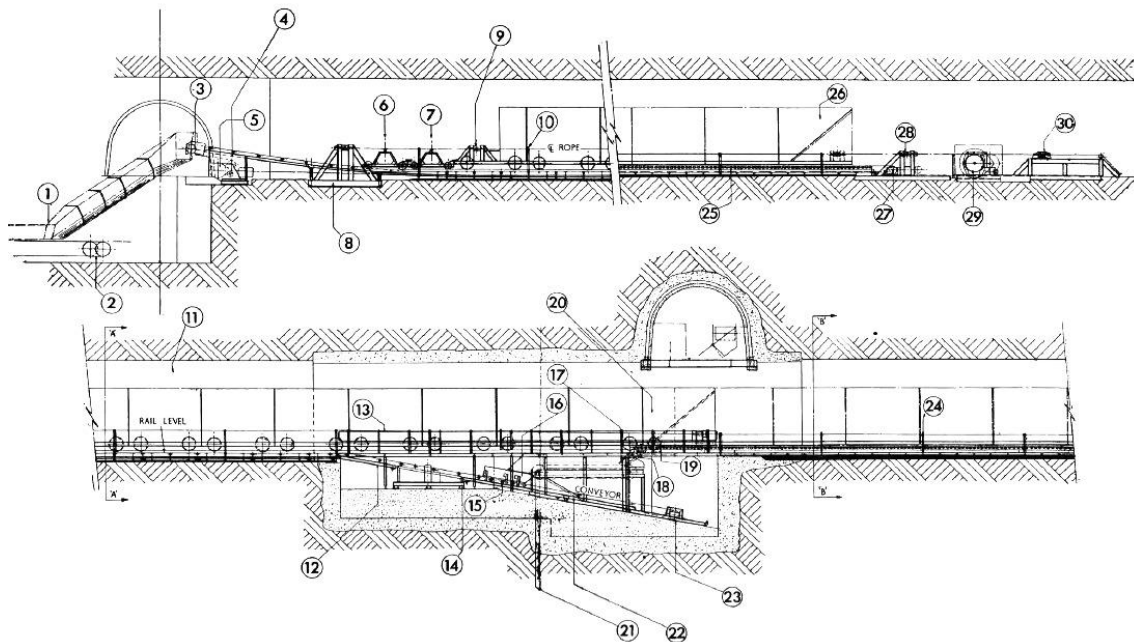
Rys. 5.3.15 Movable type buffering coal bin [84]

Zbiornik wyrównawczy ze ścianami stałymi (GHH) (Rys. 5.3.16) sterowany jest automatycznie, a praca polega na przeciwbieżnym do ruchu urządzeń odstawy ruchu taśmy zbiornika. W zbiorniku gromadzony jest w ten sposób urobek, którego ilość wynika z różnicy nadawy przenośnika odbierającego i podającego. Dzięki temu załadunek zbiornika odbierającego jest równomierne. Zadaniem zbiornika jest stabilizacja nadawy w systemie odstawy, zwiększenie jego stopnia wykorzystania oraz zmniejszenie ilości urobku spadającego z taśmy przenośnikowej. Dla eliminacji oporów związanych tarciem urobku o ściany boczne zbiornika, nadstawki przemieszczają się wraz oz taśmą. Układ napędowy stanowi kołowrót linowy, choć autor dopuszcza zastosowanie mechanizmu zębatkowego. W jego ocenie optymalne wypełnienie zbiornika uzyskuje się dzięki zastosowaniu oddzielnych komór ładunkowych. Załadunek odbywa się podczas ruchu przeciwnego do transportowanego urobku, rozładunek podczas zmiany kierunku tj. ruchu zgodnego z kierunkiem przenośników podającego i odbierającego [85].



Rys. 5.3.16 Taśmowy zbiornik wyrównawczy z przejezdными ścianami (pojemność 243m³, wydajność rozładunku 0,12m³/s) (Cuprum) [85]

Firma The Butterley Engineering prezentuje wdrożone rozwiązanie w kopalni Monktonhall Colliery uruchomionej w 1965 roku w Szkocji. Przenośnik bunkrowy konstrukcji Horrocks-Walker przedstawia (Rys. 5.3.17). Na rysunku oznaczono wszystkie elementy systemu retencji.

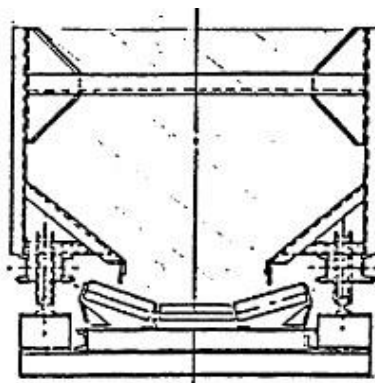


Rys. 5.3.17 Plan przenośnika bunkrowego [86]

1. Przesyp rynnowy 2. Przenośnik odbierający 3. Bęben wysięgnika 4. Głowica napędowa 5. Koło napędowe 6. Wózek podtrzymujący linę A 7. Wózek podtrzymujący linę B 8. Rama zwrotna liny transportowej 9. Wózek prowadzący z podporami kół pasowych 10. Podpory liny transportowej 11. Wózek pośredni 12. Sekcja przenośnika taśmowego korytkowego 13. Poręcz wzdłuż przesypu 14. Waga taśmowa 15. Koła pasowe udarowe 16. Płyty osłonowe i rynna zsykowa płytowo-taśmowa 17. Płyta zsywu wyrzutowego 18. Zsyw drobnego materiału ze zgarniacza 19. Sekcja wyładunku 20. Wózek ciągnięty z podporami kół pasowych 21. Przenośnik taśmowy płaski 22. Sekcja koryta zasypowego 23. Zwrotnia taśmy korytkowej 24. Podpory linowe 25. Rolki czołowe 26. Rolki zwrotne czołowe 26. Pozycja zasobnika ciągniętego, gdy zbiornik jest pełny 27. Zwrotnia taśmy 28. Rama wsporcza liny 29. Napęd hydrauliczny 30. Zespół napinania liny transportowej.

Konstrukcja urządzenia rozwijana była przez firmę The Butterley Company. Opracowany został typoszereg urządzeń o ładowności od 60 do 700 t możliwych do użytkowania przy nachyleniach wyrobiska do 10°. Urządzenie zbudowane było z segmentów o ładowności 7 ton, zasobniki połączone były ze sobą za pomocą cięgien. Węgiel transportowany był do zbiornika dwoma przenośnikami, a opróżniany poprzez ruch zasobników w kierunku przenośnika odbierającego. Jego dno stanowił przenośnik taśmowy połączony z ostatnim zbiornikiem. Urządzenie sterowane było elektronicznie, zapewniając realizację określonych funkcji logicznych. Dzięki temu przenośnik odbierający był obciążony w sposób równomierny. Zastosowanie układu eliminowało tarcie urobku o ściany zbiornika. Największy zbudowany przenośnik bunkrowy posiadał ładowność 700 t i zapewniał stałą wydajność wynoszącą 420 t/h. Wyposażony w jednobiegowy, rewersyjny układ hydrauliczny napędzany silnikiem o mocy 60 KM (~44 kW) zapewniając uciąg 80 000 funtów (~36,3 ton) [86].

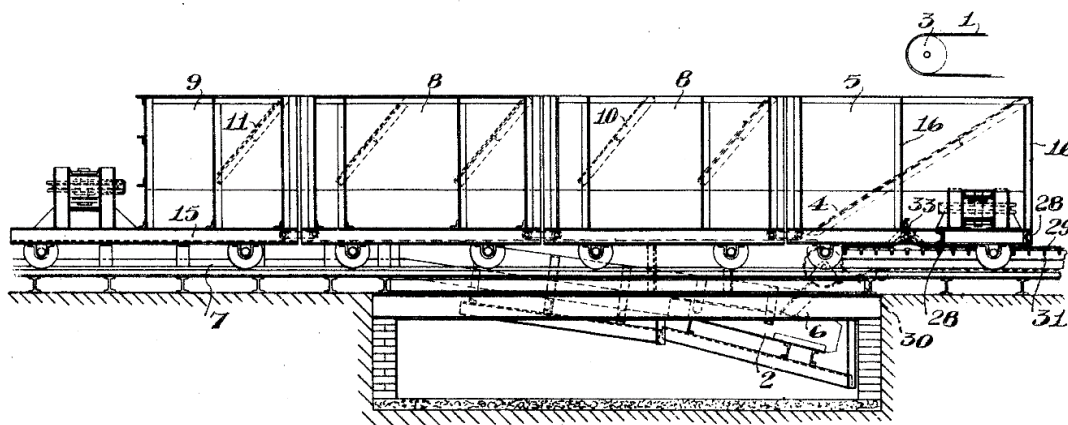
Zbiornik z ruchomymi skrzyniami ładunkowymi (ang. moving car bunker) (Rys. 5.3.18 Zbiornik z ruchomymi skrzyniami ładunkowymi [68]) to zbiornik o pojemności do 600 ton. W celu przejazdu skrzyni wymaga instalacji dwukrotnie dłuższego toru jezdni. Jest typem urządzenia stacjonarnego, dlatego ewentualne ruchy górotworu mogły mieć szkodliwy wpływ na jego pracę [68].



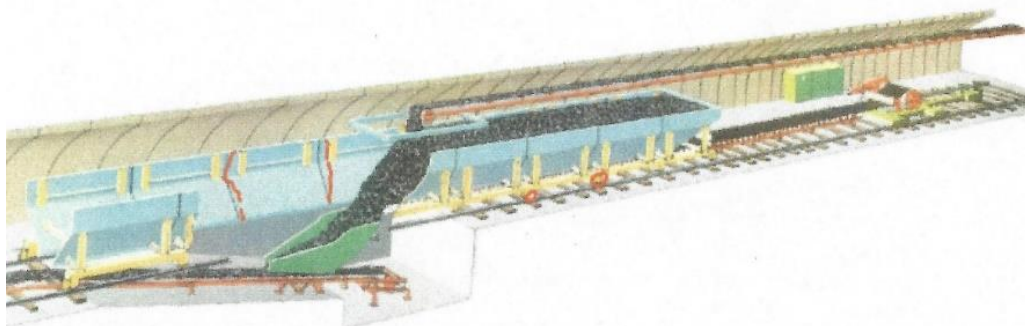
Rys. 5.3.18 Zbiornik z ruchomymi skrzyniami ładunkowymi [68]

5.3.7 Mechaniczny zbiornik retencyjny z ruchomą skrzynią, z przenośnikiem zgrzeblowym na dnie

Patent DE1166129 Verbesserungen an Grubenfoerderern (pol. Ulepszenia przenośników kopalnianych) -zgłoszenie z 1961 roku do Niemieckiego Urzędu Patentowego (Rys. 5.3.19 i Rys. 5.3.20) opisuje układ do tymczasowego gromadzenia urobku w chwili awarii systemu odstawy lub powstania zatoru w układzie odstawy. Urządzenie zapewnia prowadzenie ciągłego transportu poprzez eliminację zakłóceń podczas postoju systemu odstawy. Wynalazek dotyczy układu szeregowo połączonych urządzeń, które w sposób ciągły transportują materiał z miejsca wydobycia do miejsca załadunku. Materiał dostarczany przenośnikiem taśmowym gromadzony jest w skrzyniach. Układ przemieszcza się w zależności od potrzeby (porusza się zgodnie z ruchem taśmy przenośnika podającego - w momencie rozładunku układu skrzyń lub jest cofany - podczas załadunku). Po uruchomieniu kolejki przetokowej następuje ruch skrzyni i jednoczesny rozładunek na przenośnik zgrzeblowy. Urobek transportowany przenośnikiem taśmowym kierowany jest na przenośnik zgrzeblowy, nie jest gromadzony w tym przypadku na wagonach. W ten sposób przenośnik zgrzeblowy kontynuuje odprowadzanie materiału pochodzącego z przodka stopniowo usuwając zmagazynowany materiał. [87]

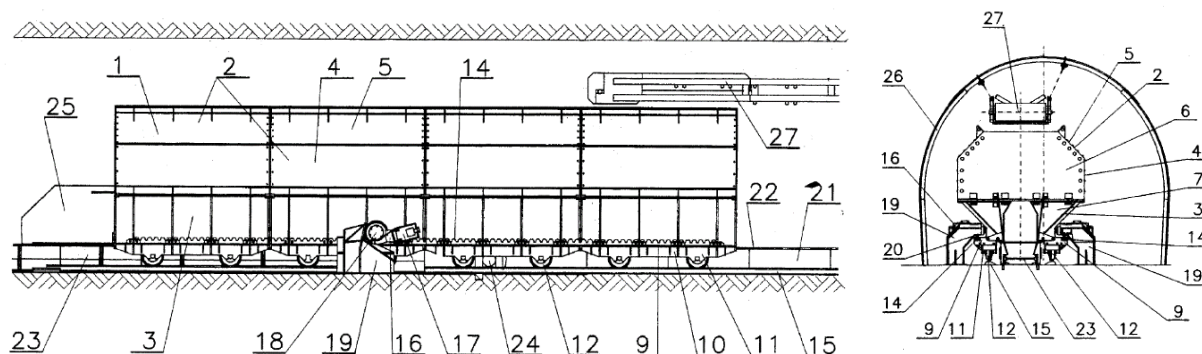


Rys. 5.3.19 Układ magazynowania urobku z wykorzystaniem przenośnika zgrzeblowego oraz wagonów [87]



Rys. 5.3.20 Układ magazynowania urobku z wykorzystaniem przenośnika zgrzeblowego oraz wagonów [archiwalne źródło internetowe].

Patent Zbiornik urobku PL181146 (Rys. 5.3.21) zgłoszony w Urzędzie Patentowym RP w 1996 roku. Przeznaczony jest do uniezależniania pracy przodków od nieciągłości odbioru urobku. Urobek dostarczany jest do zbiornika przenośnikiem taśmowym. Zbiornik zbudowany jest z segmentów, wyposażonych w burty nachylone do środka oraz otwartego dna. Układ porusza się po torach umieszczonych na spągu. Ruch układu realizowany jest w oparciu o jednostkę napędową zainstalowaną na spągu wyrobiska. Jej wyposażenie stanowi koło zębate na wale zdawczym poruszające się po listwach zębatych zainstalowanych na bokach skrzyni. Załadunek skrzyni odbywa się w momencie zatrzymania przenośnika zgrzeblowego odbierającego i przemieszczaniu segmentów zbiornika w kierunku przeciwnym do ruchu przenośnika podającego. Rozładunek może odbywać się podczas zatrzymanego lub uruchomionego przenośnika poprzez przemieszczanie segmentów zbiornika zgodnie z ruchem taśmy [88].



Rys. 5.3.21 Zbiornik retencyjny [88]

W rozdziale opisano wybrane rozwiązania techniczne zidentyfikowane w toku badania stanu techniki oraz przeglądu literatury. Opisane urządzenia lub układy urządzeń umożliwiają prowadzenie retencji urobku węglowego, choć z praktycznego punktu widzenia większość z nich daje możliwość zmagazynowania odseparowanego zanieczyszczenia oraz stabilizację strugi urobku. Analiza rozwoju systemów retencji urobku wskazuje na istotny postęp od prostych konstrukcji aż po złożone, automatycznie sterowane systemy. Rozwiązania ewaluowały od prostych układów stanowiących wyposażenie wyrobisk górniczych do zaawansowanych rozwiązań sterowanych automatycznie, wyposażonych w szereg systemów umożliwiających ich bezobsługową pracę. Urządzenia posiadają kompaktową budowę oraz możliwość zwiększania lub zmniejszania czynnej objętości magazynowej. W przedstawionych rozwiązaniach zasypywanie zbiorników realizowane jest za pomocą przejezdnych głowic wyspowych (samodzielnych lub poruszających się z podajnikiem), pługów lub funkcji urządzeń umożliwiających przemieszczanie urobku do wnętrza zbiornika. Stosowanie rozwiązań których bufor stanowi przestrzeń wyrobiska może okazać się nieuzasadnione ekonomicznie.

5.4 Podsumowanie

W rozdziale szczegółowo przeanalizowano dotychczasowe rozwiązania techniczne w aspekcie budowy i pełnionej funkcji w systemie odstawy. Literatura w przeważającej ilości nie zawiera szczegółów technicznych (konstrukcyjnych i użytkowych). Istniejące zbiorniki cechuje brak możliwości rozbudowy w celu zwiększenia pojemności, poza urządzeniami współpracującymi z zestawami zasobników lub górniczych wozów urobkowych. Część z opisanych rozwiązań posiadała zbyt duże gabaryty w stosunku do pojemności.

Skomplikowana budowa zbiorników, generuje wysokie koszty ich produkcji, utrzymania i konserwacji (np. wymiana łańcucha przy wypełnionym urobkiem zbiorniku). W omawianym zbiorniku z przenośnikiem łańcuchowym istniała konieczność zastosowania większej jednostki napędowej z uwagi na występowanie nadmiernego tarcia elementów urządzenia i urobku. Wielkość jednostki w tym przypadku również była ograniczona wytrzymałością łańcucha. Ponadto wysokie zużycie podzespołów generowało wysokie koszty utrzymania i wysoką energochłonność urządzenia.

W przypadku peryferyjnej lokalizacji zbiorniki charakteryzowały się wysokimi kosztami budowy i utrzymania. Urządzenia stacjonarne (zbudowane w wyrobisku górniczym) mogły być narażone na oddziaływanie górotworu. W zbiornikach sterowanych wskazywana jest możliwość wprowadzenia sterowania automatycznego. Poziome zbiorniki mechaniczne wdrażane były w podziemnych zakładach górniczych jako rozwiązania jednostkowe, dedykowane dla określonej lokalizacji.

Tabela 5.1 przedstawia zestawienie różnych typów mechanicznych zbiorników retencyjnych stosowanych w podziemnych kopalniach węgla kamiennego. Porównanie oparte jest zarówno na dostępnej literaturze, jak i wnioskach autora rozprawy. Część z analizowanych rozwiązań nie znalazła szerokiego zastosowania w praktyce przemysłowej. Zestawienie przedstawia korzyści i ograniczenia poszczególnych typów mechanicznych zbiorników retencyjnych. Analiza uwzględnia kluczowe aspekty funkcjonalne i konstrukcyjne, które należy uwzględnić podczas projektowania i wdrażania zbiorników w górnictwie podziemnym, aby zapewnić ich efektywne funkcjonowanie.

Podsumowując można stwierdzić, iż stosowane poziome zbiorniki są kluczowymi elementami systemu odstawy, pełniąc funkcje retencji oraz stabilizacji strugi urobku. Odnaleziona i poddana analizie literatura pochodzi z lat 1958-2020. Zagadnienia najszerzej opisane są w literaturze anglojęzycznej pochodzącej z lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia. Literatura ta porusza również problematykę budowy układów sterowania oraz opisuje szczegółowo budowę struktury napędowej. W analizowanej literaturze dostrzegalna jest różnorodność nazewnictwa nawiązująca do budowy lub zasady działania. Układy napędowe realizowane są na szereg sposobów, a dobór ich mocy zależny jest od wielkości oporów jakie występują w układzie. Dalszy rozwój systemów magazynowania urobku lub odseparowanej skały płonnej będzie miał kluczowe znaczenie w dla obniżenia energochłonności procesu transportu podziemnego.

W ocenie autora rozprawy integracja zbiorników mechanicznych z systemami automatyki wpłynie na poprawę efektywności transportu podziemnego.

Tabela 5.1 Ograniczenia i korzyści z zastosowania zbiorników mechanicznych [[13] + informacje własne]

	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym i ruchomym punktem podawania	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem ruchomym i stałym punktem podawania	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wygarniaczem	Mechaniczny zbiornik retencyjny ze stałą skrzynią, dnem stałym, z wysypem bocznym	Mechaniczny zbiornik retencyjny z ruchomą skrzynią, z przenośnikiem taśmowym, płytowym lub zgrzeblowym na dnie	Usypywanie urobku na spągu
Ładowność V (t)	200	260	2000	265	700	1800
Długość l (m)	200	200	200	200	200	200
Ładowność/Długość	-	+	+	-	+	+
Łatwość transportu	-	+	-	-	-	-
Łatwość automatyzacji	+	+	+	+	+	+
Łatwość utrzymania	-	-	-	+	+	+
Efektywność operacyjna	-	-	-	+	+	-
Podatność konstrukcji na oddziaływania geomechaniczne	-	-	-	-	-	+
Niskie zużycie elementów	+	-	+	+	+	-
Niskie zapotrzebowanie na energię	+	-	+	+	+	-
Funkcja bypass	+	+	-	+	+	-

Przedstawiona analiza uwidacznia wyzwania stawiane przed inżynierami w celu podjęcia dalszych działań związanych ze stworzeniem nowoczesnych, bardziej efektywnych i zrównoważonych technologii magazynowania urobku w górnictwie

podziemnym. Optymalizacja układów napędowych, konstrukcji oraz rozwój systemów automatyki i sterowania mogą być kluczowe dla przyszłości tego obszaru technologicznego.

6 Projekt poziomego zbiornika mechanicznego

Zaprojektowanie poziomego zbiornika mechanicznego przeznaczonego do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych wymaga uwzględnienia szeregu aspektów technicznych, wynikających z jego przeznaczenia oraz warunków eksploatacji. W tabeli 6.1 zestawiono główne założenia projektowe.

Tabela 6.1 Zestawienie założeń projektowych

L.p.	Element	Wartość/uwagi
1.	Przeznaczenie	Retencja urobku Stabilizacja strugi urobku Retencja odseparowanej skały płonnej
2.	Pojemność	max. 150 m ³ /max. 250 t
3.	Lokalizacja	Transportowe wyrobiska chodnikowe zakładu górniczego wyposażone w system przenośników taśmowych.
4.	Tryb pracy (napełnianie/opróznianie)	Praca ciągła
5.	Możliwość przemieszczania	Zbiornik przenośny
6.	Warunki pracy	Zagrożenie wybuchem pyłu metanu lub pyłu węglowego, wilgotność, zapylenie
7.	Zasilanie	Elektryczne

Powyższe założenia projektowe stanowią podstawę do przeprowadzenia prac koncepcyjnych i dalej projektowych. Zbiornik zostanie zaprojektowany dla potrzeb retencji urobku, stabilizacji strugi urobku oraz gromadzenia odseparowanej skały płonnej pozyskanej podczas urabiania calizny w przodku chodnikowym. Urządzenie będzie pracowało w górniczych wyrobiskach chodnikowych, w warunkach zagrożenia wybuchem pyłu węglowego lub metanu, a także wystąpieniu wilgotności do 95% i znaczącym zapyleniu.

Sformułowanie założeń wynikających z uwarunkowań technicznych i eksploatacyjnych stanowi punkt wyjścia do opracowania projektu. Po przeprowadzonej analizie literatury oraz stanu techniki zdecydowano się opracować projekt poziomego zbiornika mechanicznego z ruchomą skrzynią i przenośnikiem płytowym w dnie. Urządzenie tego typu zapewniłoby uzyskanie niskich oporów ruchu, a w następstwie niskiej energochłonności. Dodatkowymi kryteriami były możliwość wykorzystania części, podzespołów i materiałów dostępnych w zakładzie górniczym, optymalne wykorzystanie wyrobiska górniczego oraz wykonanie konstrukcji w powtarzalnych modułach.

6.1 Wybór wariantu napędu z wykorzystaniem metody APEKS

W procesie projektowania zbiornika retencyjnego istotnym zagadnieniem konstrukcyjnym jest odpowiedni dobór napędu oraz systemu jego przekazania. Układ ten powinien zapewniać niezawodną pracę całego urządzenia w zmiennych warunkach eksploatacyjnych podziemnego zakładu górniczego. Jednostka napędowa mechanicznego zbiornika retencyjnego musi być dostosowana zarówno do wymagań funkcjonalnych, jak i warunków eksploatacyjnych.

W celu dokonania racjonalnego wyboru spośród wybranych dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych zdecydowano się na zastosowanie metody podejmowania decyzji APEKS [87],[88]. Umożliwia ona porównanie rozwiązań na podstawie zdefiniowanych kryteriów oceny. Metoda ta pozwala przypisać każdemu wariantowi bezwymiarową ocenę procentową, odnoszącą się do modelu idealnego, ułatwiając wybór rozwiązania optymalnego. Dzięki strukturze dziesięciu kroków APEKS, możliwe jest nie tylko wyłonienie najlepszego wariantu, ale również wskazanie obszarów wymagających dalszego doskonalenia.

6.1.1 Warianty układów napędowych

Tabela 6.2 przedstawia pięć analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych, oznaczonych jako warianty od W1 do W5, wraz z odpowiadającymi im skrótami. Każdy z wariantów bazuje na innym mechanizmie przenoszenia napędu i może zostać wykorzystany do realizacji napędu poziomego zbiornika mechanicznego w warunkach eksploatacyjnych typowych dla podziemnych zakładów górniczych wydobywających węgiel kamienny.

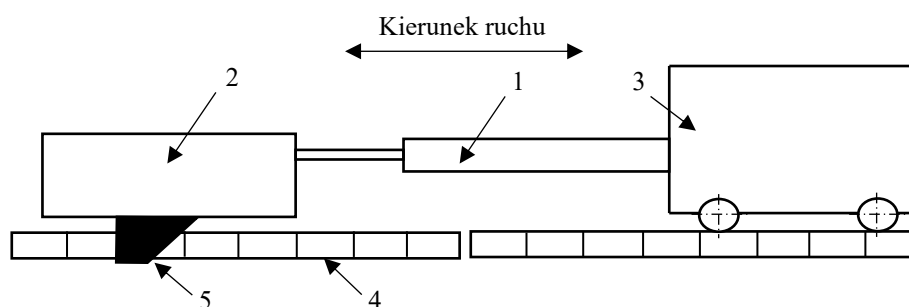
Tabela 6.2 Zestawienie możliwych do zastosowania jednostek napędowych

	Wariant	
W1	Mechanizm przekładkowy	MP
W2	Bęciągowy system posuwu	BP
W3	Napęd łańcuchowy	NŁ
W4	Napęd cierny	NC
W5	Napęd linowy	NL

Poniżej przedstawiono przegląd wariantów jednostek napędowych wybranych przez autora, które potencjalnie mogą zostać zastosowane w poziomym zbiorniku mechanicznym wykorzystywanym w górnictwie podziemnym.

6.1.1.1 Wariant 1 - mechanizm przekładkowy (MP)

Jednym z układów napędowych stosowanych w podziemnych zakładach górniczych umożliwiających nadanie ruchu liniowego jest mechanizm przekładkowy (Rys. 6.1.1). Układ przekładkowy umożliwia prowadzenie przenośnika zgrzeblowego nad przenośnikiem taśmowym w sposób zapewniający ich współpracę w odstawie urobku. Składa się on z dwóch głównych elementów: siłownika hydraulicznego (1) oraz mechanizmu zapadkowego (2). Układ ten służy do realizacji sekwencyjnego ruchu urządzenia (3). Przemieszczenie odbywa się dzięki cyklicznej pracy siłownika, który generując ruch posuwisto-zwrotny, przekazuje napęd poprzez mechanizm zapadkowy. Mechanizm zapadkowy porusza się po torze jezdnym (4). Kierunek ruchu zależy od ustawienia zapadki (5), która umożliwia przekazywanie napędu w jednym kierunku, eliminując możliwość cofania urządzenia. Konstrukcja mechanizmu przekładkowego cechuje się prostą budową, odpornością na obciążenia dynamiczne oraz wysoką niezawodnością w warunkach zakładu górniczego.

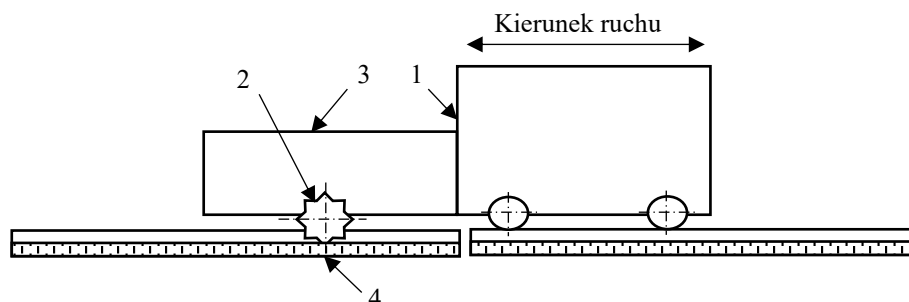


Rys. 6.1.1 Schemat działania mechanizmu przekładkowego

6.1.1.2 Wariant 2 - bęciągnowy system posuwu (BP)

Bęciągnowy system posuwu przedstawiony na rysunku (Rys. 6.1.2) jest jednym z powszechnie stosowanych rozwiązań napędów posuwu górniczych kombajnów ścianowych (1). Umożliwia on jego przemieszczanie wzdłuż czoła ściany wydobywczej. Układ oparty jest na współpracy pionowo ustawionego koła trakowego (2) osadzonego w korpusie napędu (3) z poziomo zamontowanymi listwami zębatymi (4). Mają one budowę segmentową, osadzone w gniazdach z którymi są połączone za pomocą sworzni. Ruch realizowany jest poprzez zazębienie koła trakowego z drabinkami. Taki układ umożliwia precyzyjne pozycjonowanie urządzenia wzdłuż ściany. Brak cięgna eliminuje ryzyko jego zerwania, wydłużenia oraz ogranicza liczbę elementów wymagających regularnej konserwacji. Sztywna konstrukcja segmentów zapewnia zwiększoną trwałość

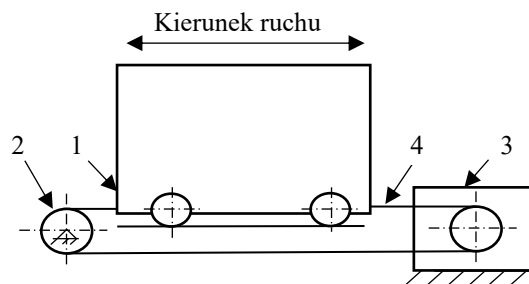
układu oraz jego odporność na wysokie obciążenia. System zapewnia przemieszczanie z wykorzystaniem znacznych sił uciągu.



Rys. 6.1.2 Schemat działania bezciągnowego systemu posuwu

6.1.1.3 Wariant 3 - Napęd łańcuchowy (NŁ)

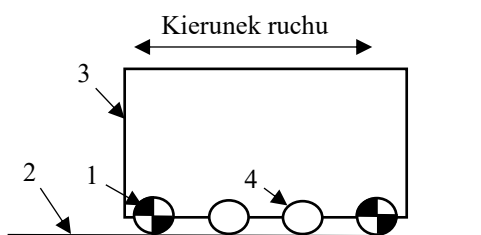
Napęd łańcuchowy znajduje zastosowanie w górnictwie podziemnym, gdzie wykorzystywany jest głównie do przemieszczania głowicy struga wzdłuż czoła ściany w kompleksach ścianowych oraz jako ciągnio współpracujące ze zgrzeblami w przenośnikach zgrzeblowych. Rysunek 6.1.3 przedstawia schemat działania napędu łańcuchowego. Przenoszenie napędu na urządzenie (1) możliwe jest dzięki współpracy cięgna łańcuchowego (2) z kołami łańcuchowymi (napędowym (3) i zwrotnym (4)). Ruch obrotowy koła łańcuchowego zostaje przekształcony w liniowy ruch cięgna łańcuchowego poprzez zazębienie ogni w gniazdach w kole napędowym. Do zalet napędu łańcuchowego należy zaliczyć wysoką wytrzymałość na obciążenia i brak występowania poślizgu. Wadami są natomiast znaczna masa cięgna, powodująca dodatkowe obciążenie układu napędowego, a także zużycie kół łańcuchowych wskutek eksploatacji. W miarę użytkowania cięgno ulega wydłużeniu, co prowadzi do powstawania luzów, pogorszenia pracy całego układu oraz przyspieszonego zużycia elementów współpracujących w wyniku intensywnej eksploatacji. Częstym problemem w tego typu napędach jest klinowanie się ogni w gniazdach kół łańcuchowych, co może generować dodatkowe opory, drgania oraz hałas. W przypadku wystąpienia przeciążeń istnieje również ryzyko zerwania cięgna. Dodatkowo napęd ten charakteryzuje się stosunkowo wysokimi oporami tarcia oraz głośną pracą, szczególnie przy dużych obciążeniach. Napęd łańcuchowy stosowany jest w urządzeniach przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych, gdzie wymagana jest wysoka odporność oraz zdolność do przenoszenia dużych obciążeń.



Rys. 6.1.3 Schemat działania napędu łańcuchowego

6.1.1.4 Wariant 4 - napęd cierny (NC)

Napęd cierny (Rys. 6.1.4) jest powszechnie stosowanym układem napędowym przenoszenia siły pociągowej w górniczych pojazdach szynowych. Jego działanie opiera się na wykorzystaniu siły tarcia statycznego, występującej pomiędzy wieńcem tocznym koła napędowego (1), a główką szyny (2). Moment obrotowy wytwarzany przez silnik (elektryczny lub spalinowy) przekazywany jest na osie zestawów kołowych, a następnie na koła napędowe. Siła normalna, wynikająca z ciężaru pojazdu, zapewnia odpowiednie przyleganie kół do szyn, co wpływa bezpośrednio na maksymalną wartość siły tarcia możliwą do wykorzystania przez napęd. Siła pociągowa jest ograniczona tą wartością, a jej przekroczenie skutkuje poślizgiem kół i utratą przyczepności. Napęd cierny cechuje się prostą budową, jednak jego wadą jest ograniczona siła pociągowa, szczególnie w warunkach pogorszonego tarcia. W celu poprawy przyczepności stosuje się m.in. systemy piaskowania toru lub odpowiedni rozkład masy pojazdu/ładunku. Na rysunku oznaczono ponadto (3) pojazd szynowy oraz (4) koło toczne nieprzywołane dotychczas w tekście.

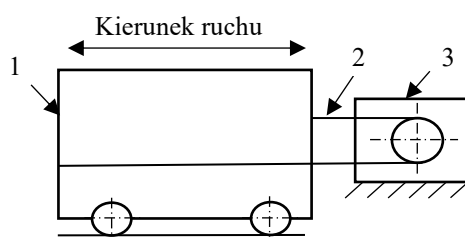


Rys. 6.1.4 Schemat działania napędu ciernego

6.1.1.5 Wariant 5 - napęd linowy (NL)

Napęd linowy znajduje szerokie zastosowanie w górnictwie, w szczególności w systemach transportu pionowego i poziomego. Wykorzystywany jest w maszynach wyciągowych szybów, kołowrotach oraz jako element układów napinania taśmy przenośników taśmowych. Napęd linowy (Rys. 6.1.5) to rodzaj układu napędowego,

w którym siła pociągowa przekazywana jest na moduł transportowy (1) za pośrednictwem cięgna linowego (2) (liny stalowej) przemieszczającego się wzdłuż wyznaczonej trasy. Lina napędzana jest przez zespół napędowy, zlokalizowany na końcu trasy (3). W przypadku prowadzenia poziomego, cięgno linowe przechodzi przez układ krążków prowadzących. Napęd realizowany jest za pomocą bębna ciernego lub tarczy napędowej. Do zalet napędu linowego należą: cicha praca, duża precyzja sterowania ruchem (szczególnie w systemach wyciągów szybowych) oraz niskie koszty eksploatacyjne. Wśród wad można wymienić ograniczoną elastyczność trasy, wynikającą z konieczności poruszania się elementu ciągniętego wzdłuż ściśle wyznaczonego toru, niską prędkość maksymalną (związaną z ograniczeniami dynamicznymi liny), a także wysokie wymagania w zakresie konserwacji i inspekcji cięgna.



Rys. 6.1.5 Schemat działania napędu linowego

6.1.2 Zestaw kryteriów ocen

W celu przeprowadzenia analizy rozpatrywanych wariantów układów napędowych, wyodrębniono zestaw kryteriów oceny o charakterze technicznym, eksploatacyjnym i ekonomicznym. Szczegółowy wykaz zastosowanych kryteriów przedstawiono w tabeli 6.3. Zestawione kryteria służą do przeprowadzenia analizy porównawczej oraz umożliwiają identyfikację rozwiązania najbardziej odpowiedniego z punktu widzenia przyjętych warunków eksploatacyjnych.

Tabela 6.3 Kryteria oceny wariantów układów napędowych

	Kryterium oceny	Rodzaj skali	Skala ocen
K1	Prostota budowy	Skala punktowa	1-9
K2	Koszty inwestycji	Wartość punktowa na podstawie kosztów	1-9
K3	Łatwość obsługi	Skala punktowa	1-3
K4	Niezawodność	Wartość w %	0-100
K5	Precyzja sterowania	Skala punktowa	1-3
K6	Koszt utrzymania	Wartość punktowa na podstawie kosztów	1-9
K7	Łatwość konserwacji	Skala punktowa	1-3
K8	Unifikacja	Skala punktowa	1-9
K9	Kompaktowość	Skala punktowa	1-5

Szczegółowe informacje dotyczące kosztów zakupu, eksploatacji i utrzymania urządzeń górniczych traktowane są jako wrażliwe dane wewnętrzne przedsiębiorstwa (często objęte są klauzulami poufności). Ich ujawnienie mogłoby naruszyć zasady uczciwej konkurencji. Aby umożliwić obiektywne porównanie różnych rozwiązań, w ostatecznej analizie wykorzystano skalę punktową zamiast podawania konkretnych wartości liczbowych. Podejście to pozwala na ocenę kosztową poszczególnych wariantów przy zachowaniu poufności danych oraz porównanie rozwiązań bez konieczności ujawniania szczegółowych informacji finansowych.

Poniżej przedstawiono hierarchię kryteriów oceny układów napędowych, usystematyzowanych według ich znaczenia przyjętego przez autora rozprawy.

1. K4 – Niezawodność
2. K2 – Koszty inwestycyjne
3. K6 – Koszt utrzymania
4. K1 – Prostota budowy układu napędowego
5. K3 – Łatwość obsługi jednostki napędowej
6. K5 – Precyzja sterowania
7. K7 – Łatwość konserwacji
8. K9 – Kompaktowość
9. K8 – Unifikacja

Kryteria te obejmują kluczowe aspekty funkcjonalne, wpływające na niezawodność i efektywność pracy jednostek napędowych stosowanych w warunkach górnictwa podziemnego.

6.1.3 Opis kryteriów ocen

Kryteria przedstawione w tabeli zostały dobrane tak, aby możliwe było przeprowadzenie obiektywnej oceny wariantów układów napędowych. Ujęcie różnych opinii od projektanta po użytkownika pozwala na obiektywne porównanie rozwiązań jednostek napędowych. Kryterium prostej budowy (K1) odnosi się do łatwości montażu i użytkowania układu oraz ograniczenia ryzyka awarii. Koszty inwestycyjne (K2) określają stopień opłacalności wdrożenia danej jednostki napędowej. Łatwość obsługi (K3) oraz konserwacji (K7) wpływają na ograniczenie postojów i zwiększenie dostępności układu. Niezawodność (K4) odnosi się do zdolności napędu do bezawaryjnej pracy i jest jednym z najistotniejszych kryteriów oceny technicznej. Precyzja sterowania (K5) pozwala na skuteczne dopasowanie układu do wymogów funkcjonalnych urządzenia. Koszty utrzymania (K6) odnoszą się do długoterminowych kosztów eksploatacji. Unifikacja (K8) oznacza możliwość wykorzystania wspólnych podzespołów i części maszyn eksploatowanych w ruchu zakładu górniczego (przekłada się to na obniżenie kosztów magazynowania i serwisu). Kompaktowość (K9) odnosi się do eksploatacji jednostki napędowej w o ograniczonej przestrzeni montażowej. Dobrane w ten sposób kryteria umożliwiają przeprowadzenie analizy porównawczej różnych rozwiązań napędowych pod kątem określonych cech użytkowych.

6.1.4 Macierz decyzyjna APEKS

W tabelach przedstawiono wartości przypisane poszczególnym wariantom (W1–W5) w odniesieniu do zdefiniowanych kryteriów oceny (K1–K9). Tabela 6.4 zawiera dane wyrażone w różnych skalach, zgodnych z charakterem poszczególnych kryteriów. W tabeli 6.5 przedstawiono oceny przeskalowane do jednolitej skali punktowej 1–9. Skalowanie przeprowadzono metodą liniową lub nieliniową w zależności od rodzaju ocenianego parametru.

Tabela 6.4 Macierz decyzyjna z ocenami wariantów według przyjętych kryteriów (indywidualna skala dla każdego kryterium)

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
W1	8	6	3	90%	2	8	3	7	3
W2	4	6	3	95%	3	7	2	6	4
W3	6	7	2	70%	1	6	1	7	3
W4	7	4	1	75%	1	4	1	4	2
W5	6	5	2	75%	1	6	1	8	3

W tabeli 6.5 zestawiono wartości przypisane poszczególnym wariantom (W1–W5) w odniesieniu do zdefiniowanych kryteriów oceny (K1–K9).

Tabela 6.5 Macierz decyzyjna z ocenami wariantów według przyjętych kryteriów (skala 1-9)

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
W1	8	6	8	8	6	8	9	7	5
W2	4	5	8	9	8	7	7	6	7
W3	6	7	5	4	4	5	5	6	5
W4	5	5	3	5	4	4	5	4	3
W5	5	5	5	5	4	5	5	5	5
APEKS	8	7	8	9	8	8	9	7	7

W macierzy przedstawiono oceny (a_{ij}) przypisane poszczególnym wariantom z wykorzystaniem skali dziesięciopunktowej, w której 10 oznacza pełne spełnienie danego kryterium, a 0 oznacza jego całkowite niespełnienie. Dodatkowo uwzględniono wartości odniesienia APEKS (a_{Aj}), stanowiące najwyższe oceny uzyskane dla każdego z rozpatrywanych kryteriów.

6.1.5 Wskaźnik wag

Tabela 6.6 przedstawia wskaźniki wagowe (w_j) przypisane poszczególnym kryteriom oceny wariantów. Wartości wag zostały wyznaczone na podstawie przeprowadzonych porównań i odzwierciedlają ustaloną hierarchię ważności kryteriów w kontekście oceny analizowanych rozwiązań.

Tabela 6.6 Wskaźniki wagowe kryteriów oceny wariantów

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	w _j	
K1		0	0	0	0	1	1	0	0	0,055	Budowa
K2	1		1	0	0	1	1	1	1	0,166	Koszt inwestycji
K3	1	0		0	0	1	1	1	0	0,111	Obsługa
K4	1	1	1		1	1	1	1	1	0,222	Niezawodność
K5	1	1	1	0		1	1	1	1	0,194	Sterowanie
K6	0	0	0	0	0		1	1	1	0,083	Koszt utrzymania
K7	0	0	0	0	0	0		1	0	0,027	Konserwacja
K8	1	0	0	0	0	0	0		0	0,027	Unifikacja
K9	1	0	1	0	0	0	1	1		0,111	Kompaktość

Wskaźniki wagowe wyznaczono na podstawie zależności (1):

$$w_j = \frac{d}{L} \quad (6.1.1)$$

gdzie:

d- liczba zwycięstw (decyzji) przypisanych danemu kryterium

L- łączna liczba porównań

Wartość L wyznaczono z zależności:

$$L = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6.1.2)$$

gdzie:

n- liczba analizowanych wariantów

Najwyższą wagę uzyskało kryterium K4 (niezawodność), a kolejne miejsca zajęły kryteria K5 (precyzja sterowania) oraz K2 (koszty inwestycyjne). Uzyskany rozkład wag zostanie wykorzystany do wyznaczenia ocen wariantów.

6.1.6 Ocena wariantów

W kolejnym etapie analizy przeprowadzono przeliczenie ocen wariantów z zastosowaniem współczynników wagowych. W tym celu należy obliczyć względne procentowe wartości oszacowań (c_{ij}) na podstawie wzoru:

$$c_{ij} = \left[\left(\frac{a_{ij}}{a_{Aj}} \right)^{\pm 1} \cdot 100 \right]^{w_j} \quad (6.1.3)$$

Wyniki przedstawiono w tabeli 6.7.

Tabela 6.7 Wartości oceny wariantów w ujęciu jakościowym i ilościowym

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
W1	1,288	2,094	1,667	2,780	2,311	1,466	1,132	1,132	1,606
W2	1,240	2,031	1,667	2,780	2,443	1,449	1,125	1,28	1,667
W3	1,268	2,148	1,582	2,322	2,136	1,409	1,115	1,128	1,606
W4	1,255	2,031	1,495	2,440	2,136	1,384	1,115	1,115	1,518
W5	1,255	2,031	1,582	2,440	2,136	1,409	1,115	1,122	1,606
APEKS	1,288	2,148	1,667	2,780	2,443	1,466	1,132	1,132	1,667

6.1.7 Wybór wariantu

Tabela 6.8 przedstawia końcowe oceny wariantów zespołów napędowych, identyfikujące optymalne rozwiązanie.

Tabela 6.8 Ocena wariantów układów napędowych

Wariant	Kod wariantu	Ocena
W1	MP	84,9
W2	MP	87,4
W3	NŁ	60,8
W4	NC	51,8
W5	NL	59,5

Ocenie poddano warianty W1–W5 w odniesieniu do dziewięciu kryteriów, obejmujących zarówno cechy jakościowe, jak i ilościowe. Ze względu na wrażliwość danych finansowych, wszystkie wartości kosztowe od początku analizy były prezentowane w odniesieniu do skali dziewięciopunktowej. Ostateczna punktacja wariantów została uzyskana poprzez przeskalowanie danych źródłowych. Najwyższą ocenę końcową (87,4) uzyskał wariant W2 bezciężnowy system posuwu (BP). Rozwiązanie to bardzo dobrze wypadło pod względem precyzji sterowania oraz łatwości obsługi. Wariant W1 mechanizm przekładkowy (MP) również uzyskał wysoką ocenę (84,9), co potwierdza jego duży potencjał zastosowania w poziomym zbiorniku mechanicznym przeznaczonym do pracy w warunkach górnictwa podziemnego. Cechuje się on prostą budową i dobrą unifikacją z istniejącymi systemami. Warianty W3 (napęd łańcuchowy), W4 (napęd cierny) i W5 (napęd linowy) osiągnęły odpowiednio niższe

oceny końcowe, odpowiednio 60,8; 51,8 oraz 59,5 co wskazuje na ich ograniczoną funkcjonalność oraz niższą niezawodność w warunkach kopalnianych. Wyniki uzyskane z zastosowania metody APEKS wykazały, że rozwiązania napędowe (W1 i W2) znacząco przewyższają układy (W3–W5). Wariant W2, dzięki wysokiej skuteczności działania oraz niskim kosztom obsługi, stanowi realną alternatywę dla wdrożenia w projektowanym urządzeniu. Wariant W2, wskazany jako najkorzystniejszy w analizie metodą APEKS, zostanie uwzględniony w konstrukcji poziomego zbiornika mechanicznego. Sama metoda APEKS okazała się skutecznym narzędziem wspierającym proces projektowania, umożliwiającym identyfikację zarówno zalet, jak i ograniczeń analizowanych rozwiązań.

6.2 Obliczenia stanu obciążenia napędu i cięgna

W niniejszym rozdziale przedstawiono algorytm obliczeń oporów ruchu, mocy napędu i sił w cięgnie poziomego zbiornika mechanicznego. Rozdział podzielono na dwie części. W pierwszej przedstawiono opracowany algorytm obliczeniowy, a w drugiej wykonano obliczenia niezbędne do przeprowadzenia dalszych prac projektowych.

6.2.1 Wykaz symboli i oznaczeń

A_1 –pole przekroju zbiornika nad ograniczeniami bocznymi, [m^2]

A_2 –pole przekroju zbiornika nad cięgnem płytowym, [m^2]

A_{ZB} –pole przekroju zbiornika, [m^2]

a – przyspieszenie, [m/s^2]

b – ilość kół jezdnych w pojedynczym segmencie zbiornika,

D_k – średnica koła jezdnego, [m]

d_c – średnica czopa koła jezdnego, [m]

f_P – współczynnik oporów ruchu cięgna płytowego,

f_L – współczynnik oporów ruchu cięgna łańcuchowego,

f_t – ramie tarcia toczenia, [m]

G_k – ciężar koła, [N]

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s^2]

L_{ZB} –długość zbiornika, [m]

L_S – długość pojedynczego segmentu zbiornika, [m]

L_P –długość cięgna płytowego, [m]

α – kąt nachylenia zbiornika, [$^\circ$]

$m_{\text{CAŁK}}$ – masa zbiornika wraz z urobkiem, [kg/m]
 m_{CL} – masa ciągną łańcuchowego, [kg/m]
 m_{CP} – masa ciągną płytowego, [kg/m]
 m_{S} – masa segmentu zbiornika, [kg]
 m_{OB} – masa ograniczeń bocznych, [kg/m]
 m_{U} – masa urobku, [kg/m]
 μ_l – współczynnik tarcia łożyska,
 n_k – ilość kół jezdnych,
 n_s – ilość segmentów skrzyni,
 η_n – sprawność napędu,
 P_n – znamionowa moc napędu, [kW]
 Q_{ZB} – chłonność lub wydajność zbiornika, [kg/s]
 Q_{OB} – ciężar ograniczeń bocznych [N]
 Q_{SP} – ciężar skały płonnej [N]
 R_k – sumaryczne obciążenie koła, [N]
 ρ_{sp} - gęstość nasypowa skały płonnej, [kg/m³]
 S_{max} – maksymalna siła w ciągnie, [N]
 S_{min} – minimalna siła w ciągnie, [N]
 S_i – siła działająca w punkcie i, [N]
 t - czas rozruchu, [s]
 V_{ZBMAX} – maksymalna prędkość posuwu zbiornika, [m/s]
 V_0 – prędkość początkowa zbiornika, [m/s]
 W_{B} – opory bezwładności, [N]
 W_{C} – całkowite opory ruchu ciągną, [N]
 W_{CD} – opory ruchu ciągną dolnego, [N]
 W_{CG} – opory ruchu ciągną górnego, [N]
 W_{CDL} – opory ruchu ciągną dolnego łańcuchowego, [N]
 W_{CDP} – opory ruchu ciągną dolnego płytowego, [N]
 W_{CGL} – opory ruchu ciągną dolnego łańcuchowego, [N]
 W_{CGP} – opory ruchu ciągną dolnego płytowego, [N]
 W_{D} – opory przewijania ciągną płytowego, [N]
 W_{HU} – opory podnoszenia ładunku (urobku), [N]
 W_{HS} – opory podnoszenia pustej skrzyni, [N]
 W_{MN} – opory mechanizmu napędowego, [N]

W_T – opory toczenia pojedynczego koła jezdnych skrzyni ładunkowej, [N]

W_{TS} – opory toczenia kół jezdnych skrzyni ładunkowej, [N]

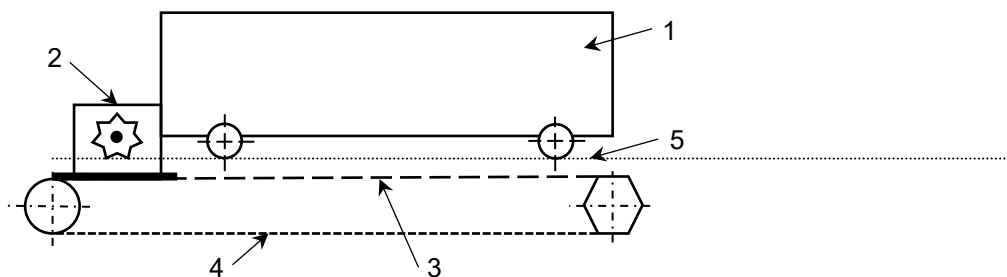
$W_{całk}$ – całkowite opory ruchu zbiornika, [N]

6.2.2 Założenia do projektu

Przeprowadzenie obliczeń mechanicznego zbiornika retencyjnego wymaga zdefiniowania podstawowych parametrów technicznych układu. Poniżej przedstawiono zestawienie przyjętych założeń projektowych:

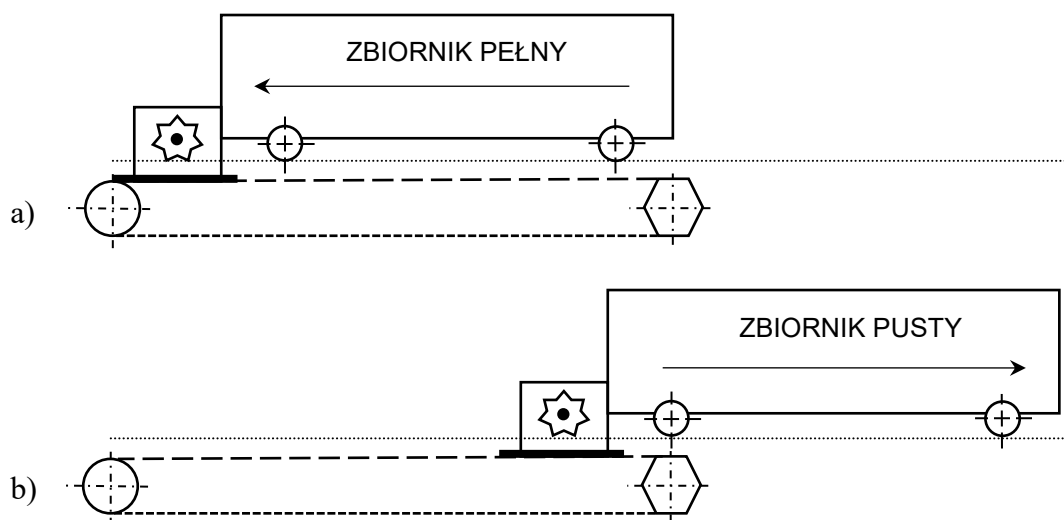
Chłonność lub wydajność zbiornika	Q_{ZB}	700 [t/h], 194 [kg/s]
Zakres dopuszczalnego kąta nachylenia zbiornika	α	$\pm 5^\circ$
Pole przekroju zbiornika	A_{ZB}	3,2[m ²]
Długość części ładunkowej zbiornika	L_{ZB}	50[m]
Gęstość nasypowa skały płonnej	ρ_{sp}	1,65 [t/m ³]

Rysunek 6.2.1 przedstawia schemat ideowy głównych elementów mechanicznego zbiornika retencyjnego. Oznaczono na nim m.in. skrzynię ładunkową (poz. 1), służącą do gromadzenia urobku. Skrzynia porusza się wzdłuż torów jezdnych (poz. 5), a jej ruch realizowany jest za pośrednictwem mechanizmu napędowego (poz. 2) poruszającego się razem z ciągnem zbiornika. W dolnej części zbiornika znajdują się dwa ciągna: górne i dolne. Górne ciągno płytowe (poz. 3) porusza się równoległe ze skrzynią ładunkową, przenosząc część obciążenia od urobku. Dolne ciągno łańcuchowe (poz. 4) służy do połączenia początku i końca ciągna płytowego, zamykając je w jedną pętlę.



Rys. 6.2.1 Główne elementy mechanicznego zbiornika retencyjnego
1- skrzynia ładunkowa, 2- mechanizm napędowy, 3- ciągno płytowe- górne,
4 ciągno łańcuchowe- dolne, 5- tor jezdny skrzyni ładunkowej i napędu

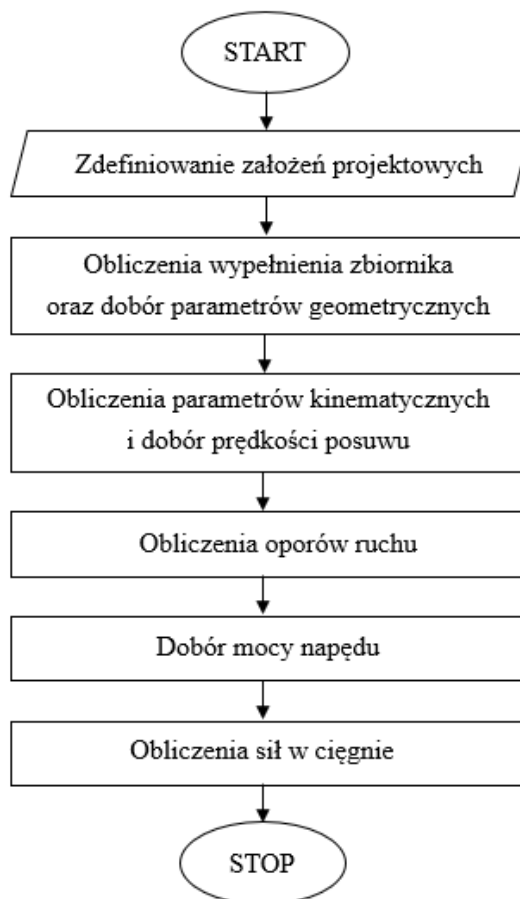
Rysunek 6.2.2 przedstawia poziomy zbiornik mechaniczny oznaczeniem kierunku ruchu. Zmiana położenia skrzyni pozwala na cykliczne napełnianie i opróżnianie zbiornika bez konieczności wprowadzania do układu dodatkowych urządzeń transportowych.



Rys. 6.2.2 Poziomy zbiornik mechaniczny w pozycji
a) załadowania, b) wyładowania

6.2.3 Algorytm obliczeniowy

W dalszej części rozdziału przedstawiono algorytm obliczeniowy przygotowany w celu wyznaczenia oporów ruchu oraz oszacowania mocy napędu (Rys. 6.2.3). Opracowany model bazuje na algorytmie stosowanym w analizie przenośników ciągłych, został dostosowany do specyfiki analizowanego układu. Algorytm znajduje zastosowanie w praktycznych zastosowaniach inżynierskich. W pierwszym etapie zdefiniowano założenia projektowe, określające cechy geometryczne oraz parametry pracy urządzenia. Następnie wykonano obliczenia wypełnienia zbiornika i dobrano jego parametry geometryczne. W kolejnym kroku przeprowadzono obliczenia parametrów kinematycznych oraz dobrano prędkość posuwu. Na tej podstawie obliczono opory ruchu, uwzględniając m.in. tarcie, masę, siły bezwładności oraz inne czynniki wpływające na pracę układu. W dalszej kolejności określono wymaganą moc napędu oraz wyznaczono siły w ciągu, które stanowią podstawę do projektowania elementów nośnych odpowiedzialnych za przenoszenie napędu. Algorytm cechuje się przejrzystą strukturą, umożliwia analizę poszczególnych etapów i pozwala na wykorzystanie go jako skuteczne narzędzie wspomagające proces projektowy.



Rys. 6.2.3 Algorytm obliczeniowy

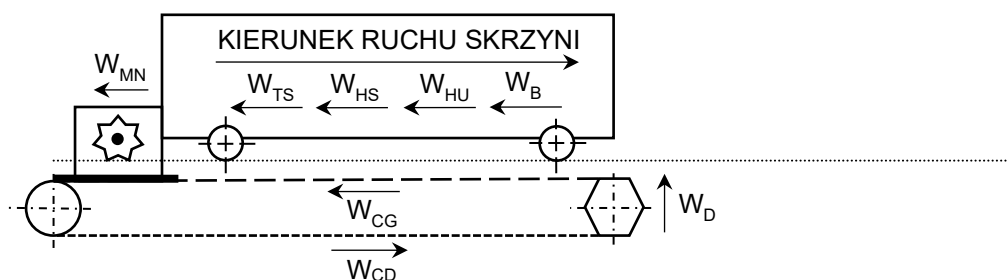
Opory główne:

- opory toczenia pustej skrzyni (W_{TS}),
- opory ruchu cięgna górnego (W_{CG}),
- opory ruchu cięgna dolnego (W_{CD}),
- opory podnoszenia ładunku (urobku) (W_{HU}),
- opory podnoszenia pustej skrzyni (W_{HS}),
- opory bezwładności (W_B),

oraz opory dodatkowe:

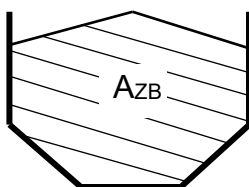
- opory mechanizmu napędowego (W_{MN}),
- opory przewijania cięgna płytowego (W_D).

Wektory oznaczone na rysunku 6.2.4 ilustrują główne i dodatkowe składniki oporów ruchu, wynikające z przemieszczenia skrzyni, cięgien oraz oporów dodatkowych składających się z oporów mechanizmu napędowego oraz oporów przewijania cięgna.



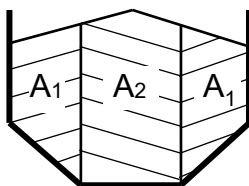
Rys. 6.2.4 Schemat oporów ruchu mechanicznego zbiornika retencyjnego

Rysunek 6.2.5 przedstawia oznaczenie pola powierzchni przekroju poprzecznego urobku zgromadzonego w zbiorniku (A_{ZB}). Obszar ten odwzorowuje geometrię materiału znajdującego się wewnątrz zbiornika.



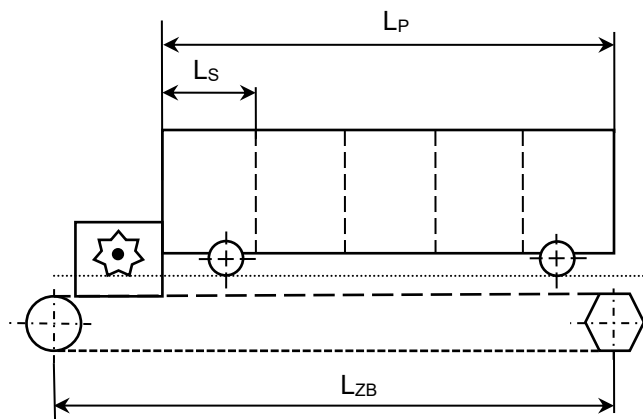
Rys. 6.2.5 Przekrój poprzeczny zbiornika

Na rysunku 6.2.6 przedstawiono przekrój poprzeczny zbiornika, w którym wyróżniono dwa obszary oddziaływania ciężaru urobku wewnątrz skrzyni ładunkowej zbiornika. Obszar A_1 oznaczony w miejscu przenoszenia obciążeń przez ograniczenia boczne (nachylone ścianki boczne zbiornika), natomiast obszar A_2 znajduje się w strefie oddziaływania urobku na cięgno płytowe.



Rys. 6.2.6 Przekrój poprzeczny zbiornika z oznaczeniem stref oddziaływania urobku
 A_1 – obszar obciążający ograniczenia boczne, A_2 – obszar obciążający cięgno płytowe

Na rysunku 6.2.7 oznaczono długości elementów mechanicznego zbiornika retencyjnego. Wyróżniono następujące wielkości: L_{ZB} – długość zbiornika, L_S – długość pojedynczego segmentu zbiornika, L_P – długość cięgna płytowego.



Rys. 6.2.7 Długości robocze elementów mechanicznego zbiornika retencyjnego

6.2.3.1 Prędkość posuwu zbiornika

Chłonność zbiornika zależy jest od maksymalnych wydajności przenośników: podającego i odbierającego. Dlatego prędkość posuwu zbiornika V_{ZB} (6.2.1) jest wprost proporcjonalna do natężenia nadawy (Q_{ZB}) oraz odwrotnie proporcjonalna do iloczynu gęstości nasypowej skały płonnej (ρ_{sp}) i pola przekroju poprzecznego zbiornika. Równanie prędkości posuwu przyjmuje postać:

$$V_{zb} = \frac{Q_{ZB}}{\rho_{sp} \cdot A_{ZB}} \quad (6.2.1)$$

$$\text{gdzie: } A_{ZB} = 2 \cdot A_1 + A_2 \quad (6.2.2)$$

Wartość prędkości posuwu zbiornika jest maksymalną wartością prędkości przy zadanej wydajności.

6.2.3.2 Opory ruchu ciągna

Wyznaczenie całkowitych oporów ruchu ciągna (6.2.3) obejmuje sumę oporów ruchu ciągna górnego i dolnego, z uwzględnieniem dodatkowych oporów skupionych. W analizie założono ich wartość na poziomie 20%.

$$W_C = 1,2 \cdot (W_{CG} + W_{CD}) \quad (6.2.3)$$

6.2.3.3 Opory ruchu ciągna górnego

Wyznaczenie oporów ruchu powinno opierać się na identyfikacji i analizie sił działających na ciągno i skrzynię ładunkową. Równanie oporów ruchu ciągna górnego (6.2.4) uwzględnia masę urobku, ciągna płytowego i łańcuchowego, długość zbiornika oraz współczynnik tarcia. Analiza zostanie przeprowadzona dla dwóch rodzajów ciągna tworzących pętle w następujący sposób:

$$W_{CG} = W_{CGP} + W_{CGL} \quad (6.2.4)$$

$$\text{dla odcinka ciągna płytowego: } W_{CGP} = (\rho_{sp} \cdot A_2 \cdot \frac{L_S}{2} + m_{CP}) \cdot g \cdot L_P \cdot f_P \quad (6.2.5)$$

$$\text{dla odcinka cięga łańcuchowego: } W_{GL} = m_L \cdot g \cdot (L_{zb} - L_P) \cdot f_L \quad (6.2.6)$$

6.2.3.4 Opory ruchu cięga dolnego

Równanie oporów ruchu cięga dolnego (6.2.7) uwzględnia masę cięga (płytowego i łańcuchowego), długość zbiornika oraz współczynnik oporów ruchu zbiornika. Przy pełnym załadunku zbiornika opory dolnej części cięga płytowego są pomijalne, tj. $W_{CDP}=0$:

$$W_{CD} = W_{CDP} + W_{CDL} \quad (6.2.7)$$

$$\text{dla odcinka cięga płytowego: } W_{CDL} = m_{CL} \cdot g \cdot L_P \cdot f_L \quad (6.2.8)$$

$$\text{dla odcinka cięga łańcuchowego: } W_{CDP} = m_{CP} \cdot g \cdot (L_Z - L_P) \cdot f_P \quad (6.2.9)$$

6.2.3.5 Opory toczenia kół skrzyni ładunkowej

Opory toczenia kół skrzyni ładunkowej W_T (6.2.10) należy obliczyć analogicznie jak w modelu obliczeniowym oporów ruchu kół wozu kopalnianego przedstawionego przez Antonia [1]. Algorytm umożliwia wyznaczenie oporów koła nienapędzanego, poruszającego się ruchem tocznym po powierzchni płaskiej. Opór ruchu koła oblicza się z zależności:

$$W_T = R_k \cdot \frac{2}{D_k} \cdot (f_t + \mu_t \cdot \frac{d_c}{2}) \quad (6.2.10)$$

Obciążenie koła jezdnego R_k (6.2.11) uwzględnia ciężar skały płonnej (Q_{SP}), ciężar ograniczeń bocznych (Q_{OB}) oraz ciężar koła (G_K). Dla segmentu zbiornika o długości 2m, wyposażonego w sześć kół jezdnych, obciążenie jednostkowe przypadające na jedno koło określono jako iloraz sumarycznego obciążenia pochodzącego od ograniczeń bocznych (Q_{OB}), masy skały płonnej zgromadzonej w segmencie (Q_{SP}) i liczby kół oraz jednostkowej masy:

$$R_k = Q + G_k \quad (6.2.11)$$

Rozpisując dalej równanie otrzymujemy (6.2.12 i 6.2.13):

$$W_T = (\frac{Q_{SP}}{b} + \frac{Q_{OB}}{b} + G_k) \cdot \frac{2}{D_k} \cdot (f_t + \mu_t \cdot \frac{d_c}{2}) \quad (6.2.12)$$

$$W_T = (\frac{2 \cdot A_1 \cdot L_S \cdot \rho_{sp} \cdot g}{6} + \frac{m_{OB} \cdot g}{6} + G_k) \cdot \frac{2}{D_k} \cdot (f_t + \mu_t \cdot \frac{d_c}{2}) \quad (6.2.13)$$

Równanie oporów toczenia zestawu kół jezdnych skrzyni ładunkowej (6.2.14) uwzględnia ich ilość:

$$W_{TS} = W_T \cdot n_k \quad (6.2.14)$$

6.2.3.6 Opory podnoszenia

Wyznaczenie całkowitych oporów podnoszenia (6.2.15) obejmuje sumę oporów podnoszenia ładunków (urobku) i podnoszenia pustej skrzyni. Wartość oporów jest zależna od kierunku ruchu skrzyni ładunkowej. Podczas jej ruchu po wzniosie opory przyjmują wartość dodatnią, a przy ruchu w dół wartość ujemną.

$$W_H = W_{HU} + W_{HS} \quad (6.2.15)$$

6.2.3.7 Opory podnoszenia ładunku (urobku)

Równanie oporów podnoszenia ładunku (urobku) (6.2.16) uwzględnia masę skały płonnej oraz maksymalny kąt nachylenia trasy:

$$W_{HU} = m_U \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (6.2.16)$$

$$W_{HU} = A_{ZB} \cdot L_P \cdot \rho_{sp} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (6.2.17)$$

6.2.3.8 Opory podnoszenia pustej skrzyni

Obliczenia podnoszenia pustej skrzyni przeprowadzono z wykorzystaniem wzoru (6.2.18):

$$W_{HS} = n_S \cdot m_S \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (6.2.18)$$

6.2.3.9 Opory bezwładności

Opory bezwładności poziomego zbiornika mechanicznego wpływają na charakterystykę dynamiczną układu napędowego zarówno w fazie rozruchu, zatrzymania jak i zmiany prędkości. Zależne są od jego masy oraz przyspieszenia z jakim układ wprowadzany jest w ruch. Równanie oporów przybiera postać (6.2.19):

$$W_B = m_{CAŁK.} \cdot a \quad (6.2.19)$$

$$m_{CAŁK.} = m_U \cdot m_S \cdot m_C \quad (6.2.20)$$

$$V_{ZBMAX} = a \cdot t + V_0 \quad (6.2.21)$$

$$a = \frac{V_{ZBMAX}}{t_{min}} \quad (6.2.22)$$

Przyjęto, że czas wymagany do uzyskania prędkości maksymalnej V_{ZBMAX} wynosi co najmniej t_{min}

6.2.3.10 Opory całkowite

Opory całkowite urządzenia (6.2.23) są sumą oporów jednostkowych tj.: oporów cięgien, oporów toczenia kół skrzyni ładunkowej, oporów podnoszenia oraz oporów bezwładności:

$$W_{całk.(+5^\circ)} = W_C + W_{TS} + W_H + W_B \quad (6.2.23)$$

W przypadku poruszania się zbiornika po nachyleniu trasy w dół (6.2.24) opory podnoszenia W_H mają przeciwny kierunek działania w przeciwieństwie do ruchu

zbiornika po wzniosie, dlatego w równaniu sumy oporów jednostkowych przyjmowane są ze znakiem ujemnym:

$$W_{calc.(-5^\circ)} = W_C + W_{TS} - W_H + W_B \quad (6.2.24)$$

6.2.3.11 Moc napędu

Obliczenia mocy napędu zbiornika poruszającego się pod górę należy przeprowadzić z wykorzystaniem wzoru (6.2.25):

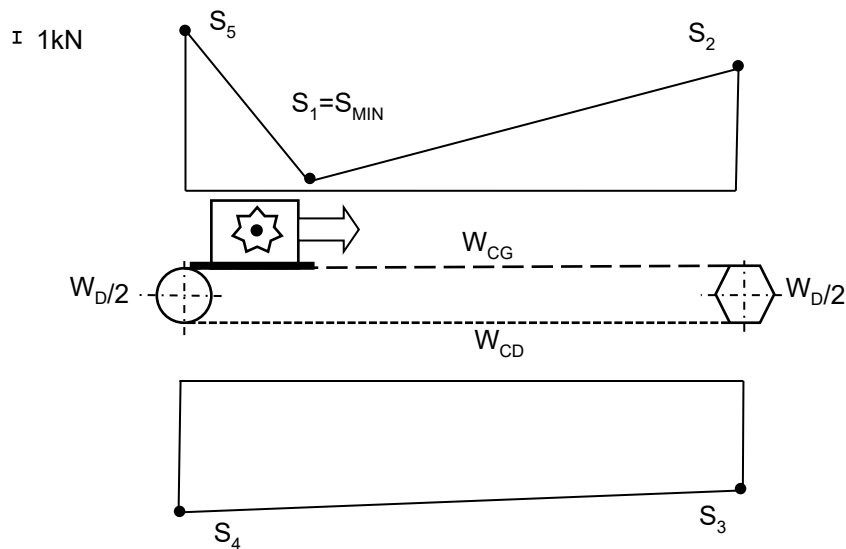
$$P_n = \frac{W_{calc.(+5^\circ)} \cdot V_{ZB}}{\eta_n} \quad (6.2.25)$$

Obliczenia mocy napędu zbiornika poruszającego się w dół powinny uwzględniać ujemne opory podnoszenia (6.2.26):

$$P_n = W_{calc.(-5^\circ)} \cdot V_{ZB} \cdot \eta_n \quad (6.2.26)$$

6.2.3.12 Siła w cięgni

Na rysunku 6.2.8 oznaczono charakterystyczne punkty cięgna, dla których określono wartości sił. Przyjmuje się, że dla poprawnej pracy układu wstępna siła $S_{MIN} = 1000N$. Odpowiada ona wstępnemu naprężeniu cięgna w warunkach braku obciążeń dynamicznych. Oszacowanie tej wartości jako punktu odniesienia umożliwi dalsze wyznaczenie sił w cięgni.



Rys. 6.2.8 Rozkład sił w cięgni

Wartość siły w punkcie S1 – S5 można opisać zależnościami:

$$S_1 = S_{MIN} = 1000[N] \quad (6.2.27)$$

$$S_2 = S_1 + W_{CG} \quad (6.2.28)$$

$$S_3 = S_1 + W_{CG} + \frac{W_D}{2} \quad (6.2.29)$$

$$S_4 = S_1 + W_{CG} + W_D + W_{CD} \quad (6.2.30)$$

$$S_5 = S_4 + \frac{W_D}{2} \quad (6.2.31)$$

Wartość maksymalnej siły w ciągu stanowi sumę wartości składowych ciągu górnego, ciągu dolnego, oporów dodatkowych oraz wartości siły minimalnej. Składnik W_C obejmuje sumę sił w ciągu oraz jest powiększony o spodziewane opory dodatkowe urządzenia.

6.2.4 Obliczenia mocy napędu

W bieżącej części rozdziału przeprowadzono obliczenia zgodnie z opracowanym algorytmem obliczeniowym.

- Prędkość posuwu zbiornika obliczono z uwzględnieniem gęstości nasypowej skały płonnej wynoszącej 1650 kg/m^3 :

$$V_{zb} = \frac{Q_{ZB}}{\rho_{sp} \cdot A_{ZB}} = \frac{Q_{ZB}}{\rho_{sp} \cdot (2 \cdot A_1 + A_2)} = \frac{194}{1650 \cdot (2 \cdot 1 + 1,2)} = 0,035 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- Opory ruchu ciągu górnego (płytowego i łańcuchowego):

$$W_{CG} = W_{CGP} + W_{CGL}$$

$$W_{CGP} = \left(\rho_{sp} \cdot A_2 \cdot \frac{L_S}{2} + m_{CP} \right) \cdot g \cdot L_P \cdot f_P = (1650 \cdot 1,2 \cdot 1 + 138) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 50m \cdot 0,05 = 43\,850[N]$$

$$W_{CGL} = m_L \cdot g \cdot (L_{zb} - L_P) \cdot f_L = 6,6 \cdot 9,81 \cdot (52 - 50) \cdot 0,4 = 52[N]$$

$$W_{CG} = 43\,850 + 52 = 43\,902[N]$$

- Opory ruchu ciągu dolnego:

$$W_{CD} = W_{CDP} + W_{CDL}$$

$$W_{CDL} = m_L \cdot g \cdot L_P \cdot f_L = 6,6 \cdot 9,81 \cdot 52 \cdot 0,4 = 1\,347[N]$$

$$W_{CDP} = m_C \cdot g \cdot (L_Z - L_P) \cdot f_P = 0$$

$$W_{CD} = 1\,347 + 0 = 1\,347[N]$$

- Opory ruchu ciągu:

$$W_C = 1,2 \cdot (W_{CG} + W_{CD}) = 1,2 \cdot (43\,902 + 1\,347) = 54\,299[N]$$

- Opory toczenia kół skrzyni ładunkowej:

$$R_k = Q + G_k$$

Podstawiając do wzoru (10) oraz uwzględniając ramie tarcia toczenia (dla szyn) $f_t=0,0005[m]$, a także $\mu_t=0,003$ - wartość dla łożysk tocznych otrzymujemy:

$$W_t = \left(\frac{Q_{SP}}{b} + \frac{Q_{OB}}{b} + G_k \right) \cdot \frac{2}{D_k} \cdot \left(f_t + \mu_t \cdot \frac{d_c}{2} \right)$$

$$W_t = \left(\frac{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1650 \cdot 9,81}{6} + \frac{1580 \cdot 9,81}{6} + 455 \right) \cdot \frac{2}{0,3} \cdot (0,0005 + 0,003 \cdot \frac{0,07}{2}) = 55[N]$$

Opory toczenia zestawu kół jezdnych skrzyni ładunkowej wynoszą:

$$W_{TS} = W_t \cdot n_k = 55 \cdot 150 = 8\,250[N]$$

- Opory podnoszenia ładunku (urobku):

$$W_{HU} = m_U \cdot g \cdot \sin \alpha = A_{ZB} \cdot L_P \cdot \rho_{sp} \cdot g \cdot \sin \alpha = 3,2 \cdot 50 \cdot 1650 \cdot 9,81 \cdot \sin 5^\circ = 225\,720 [N]$$

- Opory podnoszenia pustej skrzyni:

$$W_{HS} = n_S \cdot m_S \cdot g \cdot \sin \alpha = 25 \cdot 1580 \cdot 9,81 \cdot \sin 5^\circ = 33\,773 [N]$$

- Opory podnoszenia:

$$W_H = W_{HU} + W_{HS} = 225\,720 + 33\,773 = 259\,493 [N]$$

- Opory bezwładności:

$$\text{gdzie: } m_{CAŁK.} = m_U \cdot m_S \cdot m_C = 264 + 46,2 + 7,5 = 317,5[t]$$

a- przyspieszenie skrzyni na podstawie założenia $t_{\min}=2s$

$$a = \frac{V_k}{t_{\min}} = \frac{0,035}{2} = 0,0175 [\frac{m}{s^2}]$$

$$W_B = m_{CAŁK.} \cdot a = 317,5 \cdot 10^3 \cdot 0,0175 = 5600[N]$$

- Opory całkowite:

$$W_{całk.(+5^\circ)} = W_C + W_{TS} + W_H + W_B = 54\,299 + 8\,250 + 259\,493 + 5600 = 327\,642 [N]$$

$$W_{całk.(-5^\circ)} = W_C + W_{TS} - W_H + W_B = 54\,299 + 8\,250 - 259\,493 + 5600 = -191\,344 [N]$$

- Moc napędu

$$P_n = \frac{W_{całk.(+5^\circ)} \cdot V_{ZB}}{\eta_n} = \frac{327\,642 \cdot 0,035}{0,6} = 19,1 [kW]$$

Obliczenia wykonano przy założeniu sprawności układu napędowego wynoszącej $\eta_n=0,6$. Wynika to ze specyfiki pracy urządzenia w warunkach zakładu górniczego. Przeprowadzone obliczenia wykazały wymaganą moc wynoszącą 19,1 kW.

- Moc hamowania

$$P_n = W_{całk.(-5^\circ)} \cdot V_{ZB} \cdot \eta_h = -191\,344 \cdot 0,035 \cdot 0,6 = -4,0 [kW]$$

Ujemny znak mocy oznacza, że przy ruchu zbiornika w dół układ napędowy pracuje w trybie generatorowym. Wartość bezwzględna mocy określa ilość energii jaka zostanie odprowadzona do sieci.

W dalszej części obliczono siły działające w ciągu napędowym:

- siła w punkcie S_1

$$S_1 = S_{MIN} = 1\,000 [N]$$

- siła w punkcie S_2

$$S_2 = S_1 + W_{CG} = 1\,000 + 43\,902 = 44\,902[N]$$

- siła w punkcie S_3

$$S_3 = S_1 + W_{CG} + \frac{W_D}{2} = 1\,000 + 43\,902 + 4\,525 = 49\,427 \text{ [N]}$$

- siła w punkcie S_4

$$S_4 = S_1 + W_{CG} + W_D + W_{CD} = 1\,000 + 43\,902 + 4\,525 + 1\,347 = 50\,774 \text{ [N]}$$

- siła w punkcie S_5

$$S_5 = S_4 + \frac{W_D}{2} = 50\,774 + 4\,525 = 55\,299 \text{ [N]}$$

Analiza wykazała przyrost siły w kolejnych punktach ciągu. Największa wartość została obliczona w punkcie S_5 i wyniosła 55,3 kN. Wyniki pozwolą na dobór łańcucha oraz pozostałych elementów ciągu.

6.3 Algorytmy sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym

W dalszej części rozdziału, dla uproszczenia zapisu oraz ujednolicenia terminologii, przyjęto skrót PZM-250 jako oznaczenie poziomego zbiornika mechanicznego. Skrót ten będzie stosowany przy opisie konstrukcji, funkcji oraz algorytmów sterowania tym urządzeniem. Zastosowanie skrótu pozwala na zwięzłe przedstawienie treści. Ma to szczególne znaczenie w opisach technicznych i schematach sterowania.

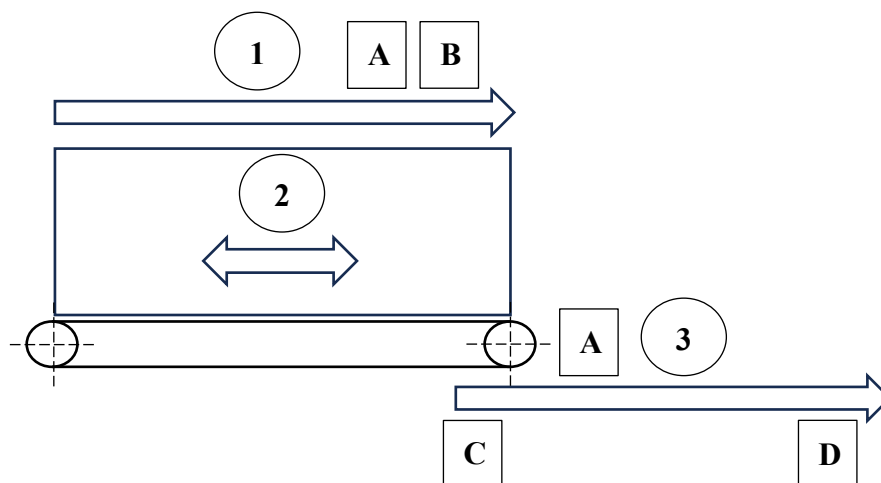
Skuteczne zarządzanie pracą poziomego zbiornika mechanicznego wymaga zastosowania odpowiednio dobranych algorytmów sterowania. Wynika to ze zróżnicowanych warunków jego pracy, które zależą zarówno od lokalizacji zbiornika w systemie transportowym, jak i od warunków techniczno-organizacyjnych eksploatacji podziemnej. Uwzględnienie charakterystyki przepływu materiału oraz parametrów eksploatacyjnych całego układu pozwala na zwiększenie efektywności w obrębie odcinka systemu, w którym zastosowano zbiornik. W niniejszej części rozprawy przedstawiono założenia dotyczące doboru i zastosowania algorytmów sterowania PZM-250 w zależności od pełnionej przez niego funkcji w systemie transportowym. Dobór właściwych algorytmów sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym wymaga analizy uproszczonego modelu odstawy urobku. Zbiornik może realizować trzy podstawowe funkcje: magazynowanie urobku (retencja), wyrównywanie wahań przepływu (stabilizacja) oraz przechwytywanie części strugi urobku stanowiącej zanieczyszczenie (separacja). Oprócz funkcji podstawowych, zbiornik retencyjny może pełnić również funkcje alternatywne, bez konieczności wprowadzania modyfikacji: retencję skały płonnej pochodzącej z separatorów, retencję awaryjną lub technologiczną

w przypadku przestojów lub awarii urządzeń transportowych. W każdym z tych przypadków można wykorzystać wcześniej opracowane algorytmy sterowania, dopasowując je do aktualnego trybu pracy układu.

Sterowanie poziomym zbiornikiem mechanicznym (PZM) wymaga monitorowania parametrów ilościowych i jakościowych urobku doprowadzanego do zbiornika. Dla zbiorników przeznaczonych do magazynowania urobku i stabilizacji przepływu kluczowe jest bieżące pozyskiwanie danych o jego zmienności. W tym celu niezbędny jest pomiar ilości materiału dostarczanego w danym momencie.

Rysunek 6.3.1 przedstawia zintegrowany model odstawy urobku z poziomym zbiornikiem mechanicznym. Oznaczono na nim m.in.:

- 1- Przenośnik taśmowy (podający)
- 2- Poziomy zbiornik mechaniczny PZM-250
- 3- Przenośnik taśmowy (odbierający)
- A- Waga taśmowa
- B- Układ pomiaru przekroju poprzecznego strugi urobku
- C- Czujnik krańcowy (zatrzymanie załadunku)
- D- Czujnik krańcowy (zatrzymanie wyładunku)

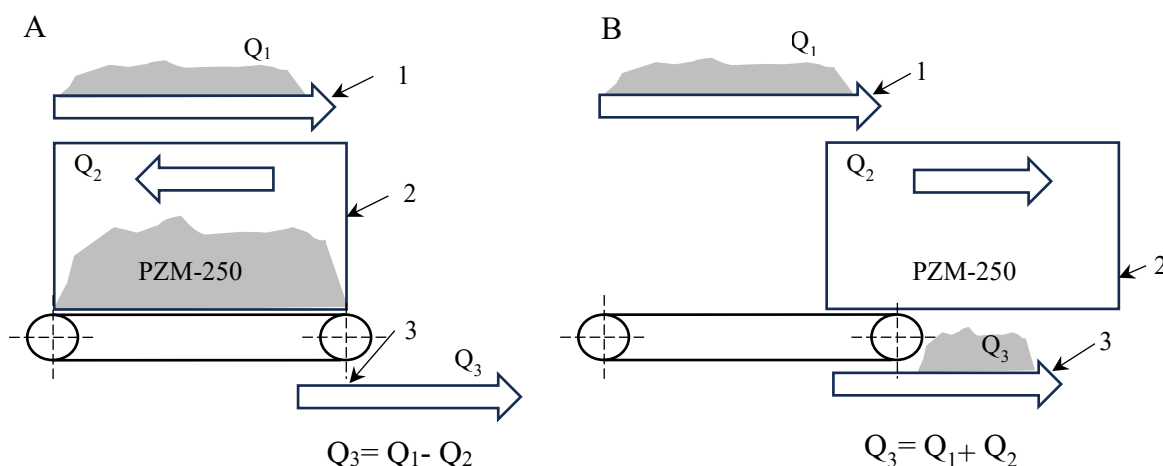


Rys. 6.3.1 Schemat układu transportu z poziomym zbiornikiem mechanicznym PZM-250

Dla zapewnienia prawidłowego działania systemu odstawy z poziomym zbiornikiem mechanicznym układ pomiarowy powinien umożliwiać pomiar podstawowych parametrów strugi urobku. Przenośnik sypiący powinien być wyposażony w dwa moduły pomiarowe: przenośnikową wagę np. jednokrążnikową (A), służącą do pomiaru wydajności przenośników (podającego i odbierającego), oraz czujnik przekroju poprzecznego strugi (B), wykorzystywany do wyznaczenia jej objętości

na przenośniku podającym. Oba układy pomiarowe działają w sposób bezinwazyjny, umożliwiając pomiary w czasie rzeczywistym bez przerywania pracy przenośnika. Waga przenośnikowa wykorzystuje zintegrowany układ czujników tensometrycznych, które mierzą siłę nacisku urobku na trasę taśmy, co pozwala na określenie strumienia masowego materiału. Pomiar przekroju poprzecznego realizowany jest z wykorzystaniem wiązek światła laserowego, umożliwiających wyznaczenie powierzchni transportowanej strugi. W przypadku układu pomiarowego PZM-250 zastosowany układ pomiarowy umożliwia detekcję skały płonnej na podstawie różnicy gęstości transportowanego urobku. Równoczesny odczyt wskazań przyrządów A i B pozwala na określenie gęstości nasypowej i dalszą klasyfikację urobku. Działanie algorytmu klasyfikacji opiera się na porównaniu chwilowej gęstości nasypowej z wartością graniczną. Wartością progową charakterystyczna dla LW „Bogdanka” S.A. jest gęstość nasypowa skały płonnej, którą przyjmuje się $1,65 \text{ t/m}^3$. Osiągnięcie tej wartości pozwala systemowi zaklasyfikować transportowany materiał jako skałę płonną i skierować go do zbiornika. Zbiornik mechaniczny powinien być dodatkowo wyposażony w czujniki krańcowe (C) i (D), które wstrzymują proces załadunku i rozładunku po osiągnięciu określonego poziomu napełnienia.

Rysunek 6.3.2 przedstawia uproszczony schemat pracy poziomego zbiornika retencyjnego w dwóch stanach roboczych.



Rys. 6.3.2 Położenie robocze zbiornika w zależności od stanu napełnienia
A- zbiornik napełniany, B- zbiornik opróżniany

Oznaczono na nim zbiornik retencyjny (2) oraz współpracujące z nim przenośniki taśmowe: przenośnik podający (1) i przenośnik odbierający (3), znajdujące się odpowiednio przed i za zbiornikiem zgodnie z kierunkiem przepływu urobku. Zbiornik wyposażony jest w skrzynię ładunkową, przemieszczającą się wzdłuż osi układu

transportowego. W wariancie A zbiornik znajduje się w stanie napełniania, drugi wariant B przedstawia zbiornik opróżniany.

6.3.1 Założenia do opracowania algorytmów sterowania PZM-250

Na podstawie zdefiniowanych założeń opracowano algorytmy sterujące pracą poziomego zbiornika mechanicznego. Ich zastosowanie umożliwia automatyczne zarządzanie przepływem strugi urobku oraz ułatwia zrozumienie działania całego układu transportowego z wykorzystaniem PZM-250. Algorytm steruje pracą urządzenia na podstawie analizy parametrów pracy systemu. Działanie algorytmów opiera się na bieżącej analizie parametrów przepływu oraz stanie gotowości czujników krańcowych. W algorytmie uwzględniono następujące zmierzone wielkości:

Q_1 – wydajność przenośnika podającego [kg/s],

Q_2 – wydajność/chłonność PZM-250 [kg/s],

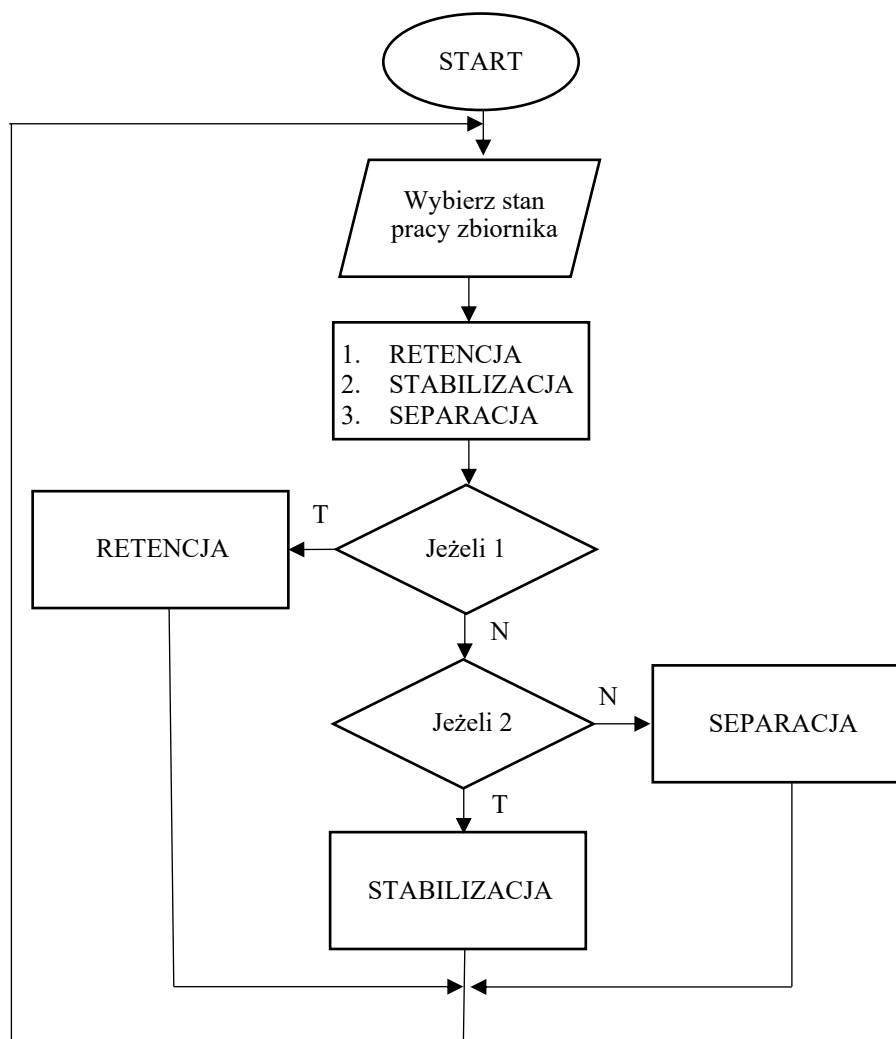
Q_3 – wydajność przenośnika odbierającego [kg/s],

A – pole przekroju strugi transportowanej do zbiornika [m^2]

Algorytm został opracowany tak, aby zapewnić ciągłość pracy systemu odstawy oraz umożliwić dostosowywanie się do zmiennych warunków pracy układu transportowego.

6.3.2 Algorytm zarządzania stanami PZM-250

Rysunek 6.3.3 ilustruje algorytm zarządzania stanami PZM-250, który pełni funkcję nadrzędną względem szczegółowych algorytmów wykonawczych odpowiedzialnych za retencję, stabilizację strugi oraz separację skały płonnej.



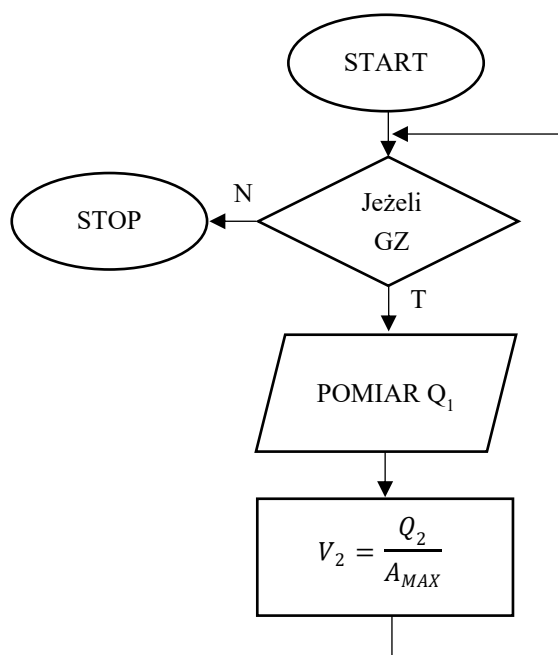
Rys. 6.3.3 Algorytm zarządzania stanami PZM-250

Dzięki prostej i przejrzystej strukturze możliwe jest uruchamianie poszczególnych trybów pracy w zależności od aktualnych potrzeb eksploatacyjnych. Takie podejście pozwala na elastyczne dostosowanie funkcji zbiornika do bieżących warunków pracy systemu transportowego. Algorytm retencji umożliwia krótkotrwale zmagazynowanie urobku w zbiorniku PZM-250. Funkcja stabilizacji polega na wyrównywaniu wahań wydajności przenośnika podającego. Separacja pozwala na identyfikację skały płonnej i skierowanie jej do zbiornika

6.3.3 Algorytm retencji

Rysunek 6.3.4 przedstawia proces sterowania PZM-250 w funkcji retencji urobku. Stan GZ (gotowość do załadunku) występuje, gdy skrzynia ładunkowa znajduje się w położeniu pomiędzy punktami C i D (czujniki krańcowe) lub gdy zostanie aktywowany czujnik D informujący o pustym zbiorniku. Stan GR (gotowość do rozładunku)

jest osiągany, gdy skrzynia znajduje się pomiędzy punktami C i D (czujniki krańcowe) lub gdy zostanie uaktywniony czujnik C informujący o pełnym zbiorniku.



Rys. 6.3.4 Algorytm sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym w funkcji retencji urobku

Algorytm sterowania zbiornikiem umożliwia identyfikację stanu zbiornika i przełączenie pomiędzy trybem załadunku oraz rozładunku.

6.3.4 Algorytm stabilizacji

Rysunek 6.3.5 przedstawia algorytm sterowania PZM-250, którego celem jest stabilizacja strugi urobku w systemie transportowym. Algorytm ten został opracowany w celu wyrównania przepływu poprzez bieżące monitorowanie parametrów oraz odpowiednie sterowanie pracą zbiornika. Skrzynia ładunkowa zbiornika może przemieszczać się w obu kierunkach ze zmienną prędkością. Algorytm kontroluje dwa stany pracy zbiornika: GZ (gotowość do załadunku) oraz GR (gotowość do rozładunku). Analiza opiera się na porównaniu wydajności poszczególnych elementów systemu z wydajnością nominalną układu. Przyjęte warunki pracy przedstawiono poniżej:

1. Wydajność przenośnika odbierającego:

$$Q_3 = Q_{NOM} \quad (6.3.1)$$

$$Q_{NOM} = Q_1 - Q_2 \quad (6.3.2)$$

2. Tryb pracy zbiornika, wartość dodatnia Q_2 oznacza załadunek zbiornika, natomiast wartość ujemna jego rozładunek:

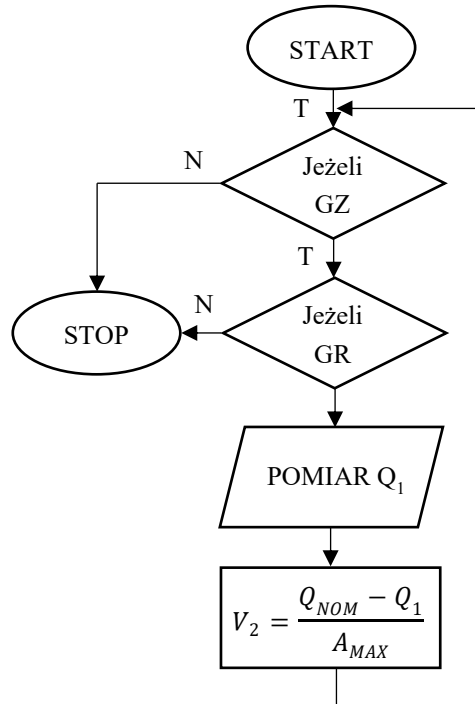
$$Q_2 = Q_{NOM} - Q_1 \quad (6.3.3)$$

3. Prędkość zbiornika, zmienną zależną od wydajności przenośnika podającego

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_{MAX}} \quad (6.3.4)$$

$$V_2 = \frac{Q_{NOM} - Q_1}{A_{MAX}} \quad (6.3.5)$$

Na podstawie powyższych zależności algorytm steruje pracą PZM-250, dostosowując do parametrów przepływu urobku w systemie transportowym.

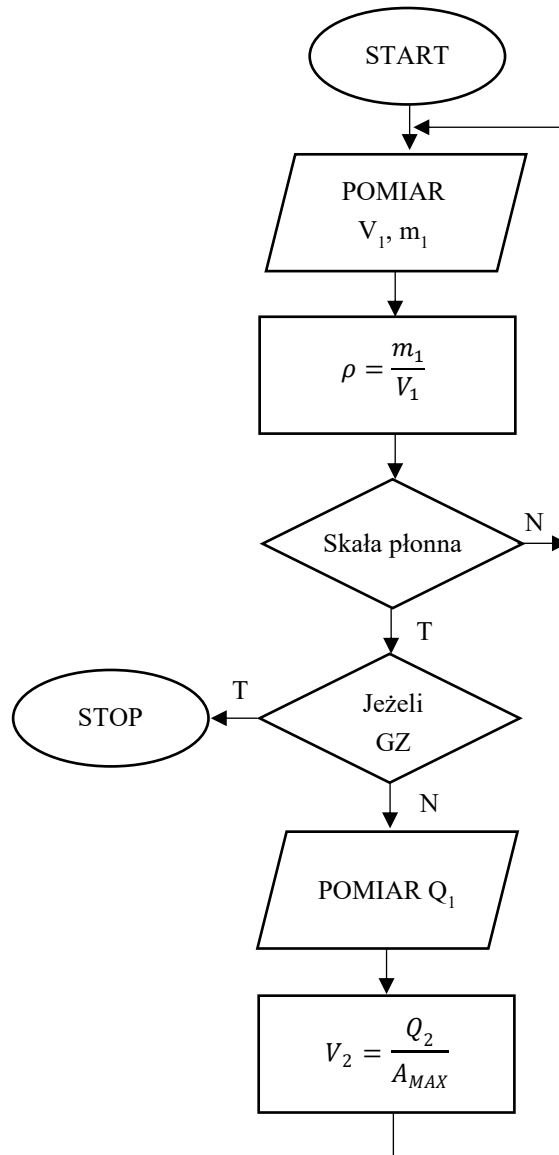


Rys. 6.3.5 Algorytm sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym w funkcji stabilizacji strugi urobku

Powyższy algorytm umożliwia stabilizację strugi urobku w oparciu o wydajność nominalną układu.

6.3.5 Algorytm separacji

Przedstawiony na rysunku 6.3.6 algorytm dotyczy procesu sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym w funkcji separacji zanieczyszczenia urobku.



Rys. 6.3.6 Algorytm sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym w funkcji stabilizacji separacji zanieczyszczenia urobku

W prezentowanym algorytmie analizowane są warunki umożliwiające ocenę, czy na taśmie przenośnika znajduje się czysta skała płonna. W tym celu porównywana jest zmierzona gęstość nasypowa urobku transportowanego przenośnikiem podającym (ρ_{ZM}) z gęstością nasypowa skały płonnej ($\rho_{SK.PL.}$). Aby wyznaczyć chwilową gęstość nasypową transportowanego urobku na przenośniku podającym, mierzone są: masa urobku (m) oraz pole przekroju poprzecznego strugi urobku (A). Na tej podstawie obliczana jest gęstość chwilowa według zależności:

$$\rho_{ZM} = \frac{m}{A \cdot V_1} \quad (6.3.6)$$

gdzie V_1 jest prędkością przenośnika podającego.

Porównanie wartości zmierzonej gęstości nasypowej z wartością wzorcową umożliwia detekcję skały płonnej w strudze transportowanego urobku. W rozdziale przedstawiono trzy algorytmy sterowania poziomym zbiornikiem mechanicznym. Algorytm sterowania została zróżnicowana w zależności od funkcji, jaką pełni zbiornik w systemie transportu urobku, tj.: retencji urobku, stabilizacji strugi oraz separacji zanieczyszczeń. Każdy z algorytmów opracowano na podstawie charakterystyki przepływu materiału oraz technicznych możliwości pomiarowych dostępnych w warunkach podziemnego zakładu górniczego.

Algorytm retencji odpowiada za krótkoterminowe magazynowanie urobku i oparty jest na analizie bilansu przepływów Q_1 , Q_2 , Q_3 . Umożliwia przełączanie zbiornika pomiędzy trybami: załadunek, rozładunek oraz stop (bypass).

Algorytm stabilizacji strugi odpowiada za wyrównywanie chwilowych wahań przepływu urobku względem wartości nominalnej Q_{nom} . Jego celem jest utrzymanie ciągłości pracy systemu odstawy.

Algorytm separacji zanieczyszczeń umożliwia identyfikację oraz oddzielenie skały płonnej na podstawie różnic w gęstości nasypowej transportowanego urobku. Na podstawie wyników pomiarów algorytm decyduje o przekierowaniu urobku do zbiornika lub jego pominięciu.

Wszystkie algorytmy zostały zintegrowane w nadrzędnym algorytmie zarządzania stanami PZM-250, który działa w oparciu o wybór trybu pracy zbiornika. Dzięki temu możliwe jest elastyczne sterowanie funkcją zbiornika w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem zmiennych warunków eksploatacyjnych. Wszystkie algorytmy bazują na prostych zależnościach logicznych i wykorzystując aktualne dane pomiarowe. Zastosowanie algorytmów umożliwi włączenie zbiornika do istniejącego systemu sterowania systemem transportu podziemnego.

7 Analiza efektywności zastosowania zbiornika mechanicznego w systemie odstawy

Postęp w zakresie cyfrowego odwzorowania rzeczywistych procesów przemysłowych umożliwia coraz szersze zastosowanie symulacji numerycznych w analizie funkcjonowania systemów transportu urobku w podziemnych zakładach górniczych. Dostępne narzędzia informatyczne pozwalają nie tylko na odwzorowanie dynamicznego przepływu w układach transportowych, lecz również wspierają analizę różnych wariantów konfiguracji tych systemów, w tym zastosowania zbiorników mechanicznych. W literaturze technicznej znaleźć można przykłady wykorzystania symulacji zdarzeń dyskretnych (DES), zarówno przy użyciu dedykowanych środowisk, jak i narzędzi uniwersalnych, które, pomimo że nie zostały zaprojektowane specjalnie z myślą o górnictwie, znajdują w nim skuteczne zastosowanie. Autor pracy [91] wykazał, że modele DES pozwalają nie tylko na odwzorowanie przepływu urobku, ale również na ocenę warunków pracy jednostek napędowych oraz wpływu elementów buforujących, takich jak zbiorniki retencyjne. Opracowanie [92] zwraca uwagę na możliwość symulowania współistniejących przepływów ciągłych i dyskretnych, co dobrze odzwierciedla złożoność rzeczywistych układów występujących w kopalniach węgla kamiennego. Przeprowadzone w środowiskach GPSS/H, SimMine, FlexSim czy Matlab symulacje potwierdzają, że dobrze skalibrowane modele, oparte na danych rzeczywistych, stanowią efektywne narzędzie do analizy i optymalizacji systemów odstawy urobku. Wyniki badań [93] dodatkowo potwierdzają, że parametry techniczne zbiorników mają istotny wpływ na charakterystykę przepływu materiału oraz na stopień obciążenia przenośników taśmowych. W literaturze podkreślane jest znaczenie kompleksowych, nowoczesnych systemów symulacyjnych dedykowanych dla podziemnych zakładów górniczych. Narzędzia te umożliwiają odwzorowanie i analizę procesów produkcyjnych poprzez integrację modeli poszczególnych podsystemów, takich jak monitoring procesu eksploatacji górniczej, systemu odstawy, wentylacji wyrobisk górniczych, odwadniania zakładu górniczego i wielu innych. Przykładem takiego podejścia jest system MTSS, opracowany przez zespół Okolnishnikova, który pozwala na budowę wizualnych, interaktywnych środowisk symulacyjnych dedykowanych dla kopalń węgla kamiennego [5], [94], [96]. System ten obejmuje bibliotekę modeli urządzeń górniczych oraz technologii urabiania, co umożliwia nie tylko symulację złożonych sytuacji operacyjnych, ale również

testowanie algorytmów sterowania i ocenę różnych wariantów konfiguracji systemu transportowego. Wysoka dokładność odwzorowania parametrów pracy maszyn oraz możliwość integracji ze sterownikami logicznymi sprawia, że narzędzia te znajdują zastosowanie nie tylko w projektowaniu, ale również w analizie funkcjonowania systemów w warunkach rzeczywistych [4], [97].

W świetle tak szerokiego i opisanego w literaturze zastosowania modeli symulacyjnych w górnictwie, zdecydowano się na implementację jednego z dostępnych modeli dyskretnych w celu oceny wpływu zbiornika mechanicznego na funkcjonowanie systemu odstawy. Efektywność tego rozwiązania można określić jako jego zdolność do zapewnienia ciągłości i stabilności przepływu strugi urobku, przy jednoczesnym ograniczeniu postojów technologicznych oraz przerw wynikających z awarii elementów infrastruktury podziemnej. Wprowadzenie urządzenia do systemu odstawy wpłynie na:

- zmniejszenie kosztów wydobycia poprzez skrócenie przestojów spowodowanych przeładowaniem lub przeciążeniem przenośników,
- redukcję kosztów inwestycyjnych dzięki zastosowaniu przenośników o mniejszych mocach jednostek napędowych,
- obniżenie kosztów eksploatacyjnych związanych z mniejszym zużyciem energii systemu odstawy obciążonego w sposób równomierny,
- możliwość obniżenia prędkości przenośników taśmowych skutkujące zwiększeniem trwałości podzespołów (taśma, kładniki, bębny) oraz mniejszą energochłonnością systemu odstawy,
- usprawnienie gospodarki skałą płonną poprzez możliwość retencji odseparowanej skały płonnej w procesie drążenia przodków chodnikowych, co wpłynie na możliwość jej pozostawienia pod ziemią i ograniczenie kosztów transportu na powierzchnię.

Ocena wpływu zbiornika mechanicznego na system odstawy wymaga przeprowadzenia analizy jego funkcjonowania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W tym celu zastosowano model symulacyjny, który umożliwia odwzorowanie przepływu strugi urobku w systemie transportowym kopalni. Badania symulacyjne pozwalają na analizę dynamicznych stanów pracy systemu, identyfikację wąskich gardeł oraz ocenę wpływu różnych konfiguracji systemu transportowego na stabilność przepływu i wykorzystanie mocy napędów. Dzięki temu możliwe jest testowanie i porównywanie różnych wariantów transportowych oraz wskazanie

optymalnej lokalizacji i parametrów pracy poziomego zbiornika mechanicznego w wybranym miejscu systemu transportowego kopalni.

7.1 Dyskretny model symulacyjny

Dyskretny model symulacyjny systemu transportowego MTSM (Modular Transport Simulation Model), opracowany w ramach prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, stanowi zaawansowane narzędzie analityczne służące do odwzorowania dynamicznych procesów transportu urobku w podziemnym zakładzie górniczym. Model został opracowany w skryptowym języku programowania środowiska MATLAB. Zapewnia to wysoką elastyczność w zakresie modyfikacji kodu źródłowego, integracji z zewnętrznymi bibliotekami oraz adaptacji do innych platform obliczeniowych.

Struktura modelu umożliwia łatwą adaptację w środowiskach alternatywnych, takich jak Python, C++ czy środowiska symulacyjne typu FlexSim. Możliwe jest również stworzenie tzw. cyfrowego bliźniaka, czyli komputerowego odpowiednika rzeczywistego systemu transportowego. Zapewni on połączenie modelu z systemami automatyki przemysłowej i sterowania w kopalni. W efekcie możliwe jest prowadzenie symulacji w czasie rzeczywistym oraz wspomaganie procesu podejmowania decyzji.

Wersja MTSM 1.0 umożliwia konfigurację systemu transportowego złożonego z następujących komponentów:

- przenośniki taśmowe, które są urządzeniami realizującymi transport urobku w zdefiniowanych wyrobiskach górniczych, posiadającymi możliwość definiowania wielu punktów załadunku i jednego punktu rozładunku,
- zbiorniki retencyjne będące elementami akumulującymi urobek, umożliwiającymi jego buforowanie i kontrolowany rozładunek, z uwzględnieniem parametrów pojemności i wydajności,
- urządzenia załadowcze których zadaniem jest odwzorowanie procesów eksploatacji górniczej,
- separatory, które są urządzeniami zmieniającymi właściwości fizyczne lub skład urobku poprzez jego rozdział lub podział, z możliwością konfiguracji zawartości poszczególnych składników.
- materiał transportowany definiowany jako mieszanina trzech składników (węgiel, skała płonna, woda) o określonych parametrach fizycznych, takich jak gęstość i współczynnik rozluźniania.

Każdy komponent systemu posiada przypisany unikalny identyfikator, który pełni funkcję adresu w strukturze modelu. W przypadku przenośników, identyfikator odpowiada lokalizacji punktu rozładunku, natomiast dla separatorów identyfikatory obejmują zarówno punkt podawania urobku, jak i dwa punkty odbierania urobku. Wprowadzenie spójnej, jednolitej struktury danych w systemie umożliwia dokładną identyfikację każdego elementu oraz odwzorowanie powiązań logicznych i funkcjonalnych między elementami.

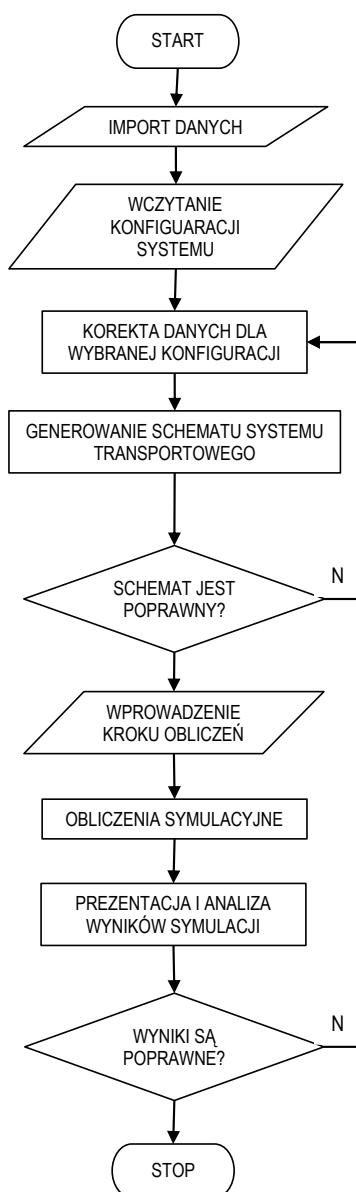
Dane techniczno-ruchowe urządzeń są przetwarzane i zapisywane w plikach tekstowych w formacie CSV. Umożliwia to ich prostą edycję oraz import do środowiska programistycznego. Dane wykorzystywane przez model zapisane są w zewnętrznych plikach tekstowych:

- `import_conv.csv` – zawiera dane przenośników, w tym: kod identyfikacyjny (ID: 001–999), typ urządzenia, stan techniczny, profil trasy, lokalizację punktów załadunku, prędkość taśmy, moc napędu oraz kąt kierunku transportu. Dane umożliwiają graficzne odwzorowanie układu transportu,
- `import_silo.csv` – zawiera dane zbiorników retencyjnych (ID: 1000–1999), pojemność, wydajność wylotu oraz konfigurację punktów załadunku i rozładunku,
- `import_sep.csv` – zawiera dane separatorów (ID: 3000–3999), w tym identyfikatory punktów wlotowych i wylotowych, parametry pracy oraz skuteczność separacji określoną poprzez proporcje rozdziału składników materiału,
- `import_in.csv` – zawiera dane punktów załadunku (ID: 2000–2999), w tym przebieg wydajności w czasie dla każdego ze składników materiału,
- materiał transportowany definiowany jest poprzez identyfikatory składników (ID 5000–5999), z przypisanymi parametrami fizycznymi: gęstością oraz współczynnikiem rozluźniania.

Po wczytaniu danych wejściowych użytkownik dokonuje wyboru konfiguracji systemu, uwzględniającej m.in. lokalizację punktów załadunku oraz wydajność poszczególnych urządzeń. Wczytane dane są następnie weryfikowane poprzez automatyczne wygenerowanie wizualizacji systemu transportowego, co umożliwia wykrycie ewentualnych błędów strukturalnych i logicznych. Podstawą działania modelu jest dyskretna metoda symulacyjna, w której czas jest podzielony na równe kroki

obliczeniowe. W każdej jednostce czasu następuje aktualizacja stanu systemu, obejmująca m.in. zmianę prędkości taśmy, wydajności zbiorników, kierunku przepływu materiału oraz stanu urządzeń. Im krótszy krok czasowy, tym większa dokładność odwzorowania procesów, jednak kosztem wydłużenia czasu obliczeń. Model uwzględnia również opóźnienia technologiczne, czasy reakcji układów sterowania oraz możliwość wystąpienia zdarzeń losowych, takich jak awarie czy przeciążenia.

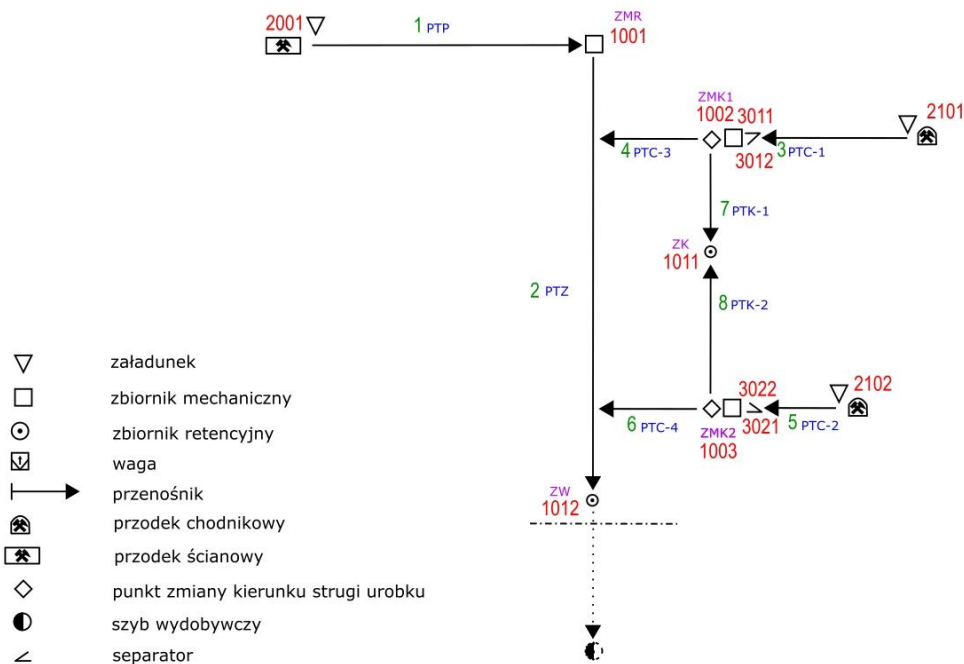
Uproszczony algorytm symulacji przedstawiono na rysunku 7.1.1. Algorytm MTSM dzieli przenośniki na odcinki o określonej długości, co pozwala na dokładniejsze odwzorowanie pracy urządzeń. Jednocześnie analizowany jest wpływ długości kroku czasowego na precyzję całej symulacji. W trakcie symulacji porcje materiału są przesuwane wzdłuż przenośników, gromadzone w zbiornikach, a ich właściwości mogą ulegać zmianie w wyniku działania separatorów. Po każdym kroku obliczeniowym następuje weryfikacja stanu układu sterowania oraz korekta parametrów wszystkich urządzeń systemu. Po zakończeniu symulacji następuje etap analizy wyników, obejmujący m.in. ocenę przepływu masy przez węzły przesypowe, identyfikację wąskich gardeł, ocenę efektywności energetycznej oraz wykorzystania mocy napędów. Wyniki mogą być prezentowane w formie wykresów, tabel oraz map przepływu, co umożliwia ich wykorzystanie w procesie optymalizacji systemu transportowego. Model generuje również schemat systemu transportowego oraz animowany obraz przepływu materiału z uwzględnieniem jego składu.



Rys. 7.1.1 Uproszczony algorytm symulacji

7.2 Model testowego systemu transportu

Na rysunku 7.2.1 przedstawiono model systemu odstawy urobku, obejmujący główne elementy transportu oraz ich wzajemne powiązania. Stanowi on odzwierciedlenie standardowego układu odstawy w podziemnym zakładzie górniczym, na którym uwzględniono wszystkie podstawowe elementy: źródła urobku, przenośniki taśmowe, zbiorniki mechaniczne i retencyjne, punkty przesypowe oraz szyb wydobywczy. Model ma charakter przykładowy i został opracowany w celu przeprowadzenia analizy symulacyjnej.



Rys. 7.2.1 Identyfikatory węzłów modelowanej sieci transportu przenośnikowego

Urobek z przodka ścianowego (2001) kierowany jest poprzez zbiornik mechaniczny (1001), w kierunku szybu z wykorzystaniem przenośników taśmowych (1PTP i 2PTZ). Urobek z przodków chodnikowych (2101 i 2102) trafia odpowiednio do zbiornika mechanicznego (1002) oraz zbiornika mechanicznego (1003). W ciągach tych zastosowano separatory (3011, 3012) dla punktu (2101) oraz (3021–3022) dla punktu (2102), pełniące rolę punktów zmiany kierunku transportu urobku. Strugi z obu przodków chodnikowych mogą być łączone w zbiorniku górnym (1011). Całość systemu umożliwia transport urobku ze źródeł nadawy (2001, 2101, 2102), z których urobek jest kierowany do zbiornika górnego 1012, zlokalizowanego na trasie przenośnika zbiorczego przed szybem wydobywczym. Transport pomiędzy punktami odbywa się z wykorzystaniem przenośników taśmowych PTC, PTZ i PTK, łączących pracę wszystkich punktów nadawy, zbiorników i separatorów w jeden układ odstawy. Model zakłada, że każdy z tych przodków dostarcza urobek do systemu transportowego osobnym przenośnikiem, do przenośnika zbiorczego lub peryferyjnych zbiorników mechanicznych. Strugi urobku ze ściany i z chodnika mogą różnić się parametrami, dlatego w modelu traktowane są niezależnie aż do momentu ich połączenia w wspólnym węźle transportowym. W modelu przyjęto, że urobek z przodków transportowany jest za pomocą przenośników taśmowych lub magazynowany w zbiornikach mechanicznych. Przenośniki działają w sposób ciągły z zadaną prędkością taśmy i wydajnością,

przemieszczając urobek od przodka ścianowego oraz chodnikowego do zbiornika, a następnie dalej (z zbiornika na kolejny odcinek transportu, np. do szybu).

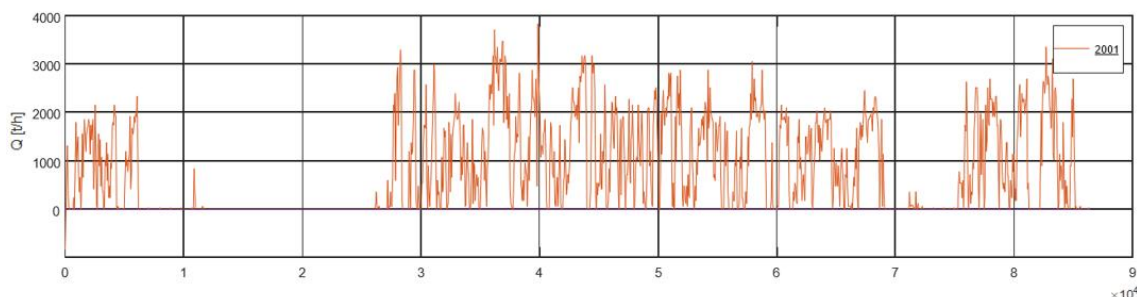
Szczegółowe oznaczenia modelu:

2001	punkt załadowczy przodka ścianowego
2101, 2102	punkty załadowcze przodków chodnikowych
1001	zbiornik mechaniczny dla punktu załadowczego 2001
1002	zbiornik mechaniczny dla punktu załadowczego 2101
1003	zbiornik mechaniczny dla punktu załadowczego 2102
1011	zbiornik górniczy dla 2101 i 2102 (pomiar masy urobku)
1012	zbiornik górniczy dla 2001, 2101 i 2102 (pomiar masy urobku)
3011, 3012	separator dla 2101 (punkt zmiany kierunku strugi urobku)
3021, 3022	separator dla 2102 (punkt zmiany kierunku strugi urobku)
PTC, PTZ, PTK	przenośniki taśmowe

Model symulacyjny odstawy urobku uwzględnia szczegółowe parametry jakościowe i ilościowe punktów nadawy zlokalizowanych w przodkach ścianowym i chodnikowych.

7.2.1 Model przodka ścianowego

Charakterystyka pracy przodka ścianowego (Rys. 7.2.2) została zilustrowana przebiegiem chwilowej wydajności. Wykres obrazuje dominujący udział eksploatacji ściany (krzywa koloru czerwonego) w sumarycznej nadawie systemu transportowego. Zmienność strugi powoduje dynamiczne obciążenia jednostek napędowych. Udział nadawy z przodków chodnikowych (krzywe koloru niebieskiego i żółtego) pozostaje niewielki i nie oddziałujące na pracę układu transportu w znaczącym stopniu. Przebieg pracy ściany odzwierciedla charakterystyczne wahania wydajności urabiania, będące głównym źródłem niestabilności przepływu urobku.



Rys. 7.2.2 Symulacja pracy przodka ścianowego 2001

7.2.2 Model przodków chodnikowych

Poniżej przedstawiono dane wejściowe pracy przodków chodnikowych 2101 i 2102. Uwzględniono w nich parametry technologiczne procesu, takie jak wydajność, czas cyklu oraz masa urobku.

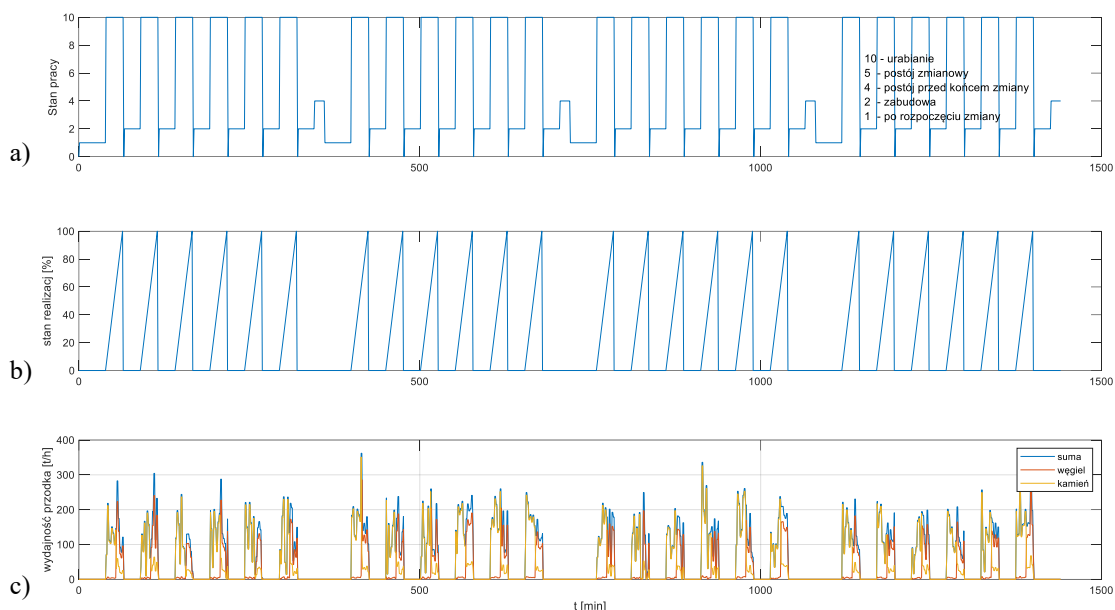
Charakterystyka pracy przodka 2101:

– rodzaj przodka	chodnikowy
– gęstość nasypowa urobku	1313,1 kg/m ³
– czas cyklu urabiania	25 minut
– średnia wydajność urabiania	137,4 t/h (max. 140,5 t/h)
– średnia wydajność transportu	61,2 t/h
– łączna masa urobku	1469,3 t
– wskaźnik czystości urabiania węgla	0,79
– wskaźnik czystości urabiania skały płonnej	0,97

Charakterystyka pracy przodka 2102:

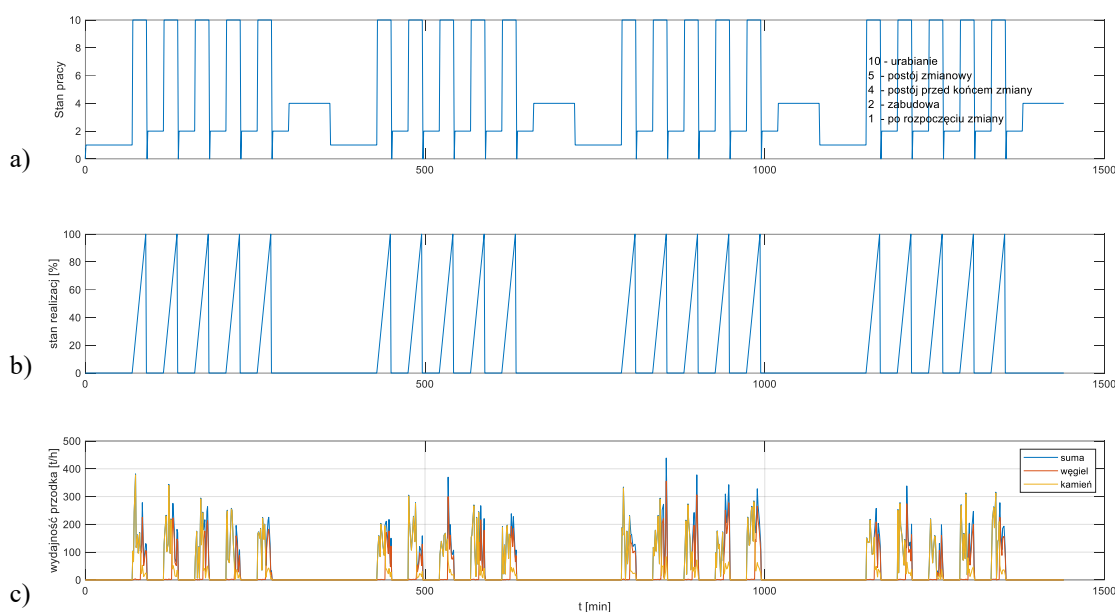
– rodzaj przodka	chodnikowy
– gęstość nasypowa urobku	1313,1 kg/m ³
– czas cyklu urabiania	20 minut
– średnia wydajność urabiania	137,4 t/h (max. 145,9 t/h)
– średnia wydajność transportu	44,5 t/h
– łączna masa urobku	1068,3 t
– wskaźnik czystości urabiania węgla	0,81
– wskaźnik czystości urabiania skały płonnej	0,99

Na rysunkach 7.2.3 i 7.2.4 przedstawiono przebiegi pracy przodków chodnikowych przygotowane na podstawie danych przemysłowych oraz wyników symulacji modelu transportowego. Wykresy obrazują zmienność stanów pracy, postępu cyklu urabiania oraz chwilowej wydajność transportu urobku.



Rys. 7.2.3 Symulacja pracy przodka chodnikowego 2101

a) stany pracy przodka w czasie, b) postęp cyklu urabiania [%], c) wydajność chwilowa przodka [t/h]



Rys. 7.2.4 Symulacja pracy przodka chodnikowego 2102

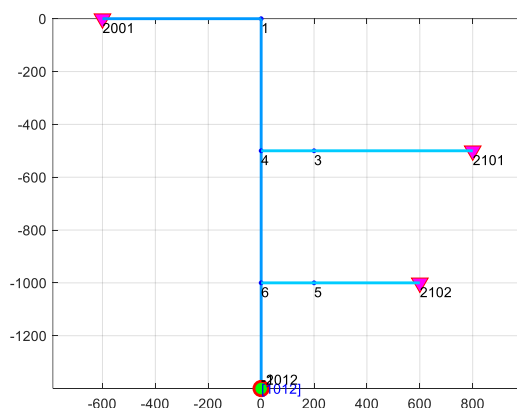
a) stany pracy przodka w czasie, b) postęp cyklu urabiania [%], c) wydajność chwilowa przodka [t/h]

Przedstawione dane dotyczące pracy przodków 2101 i 2102 zostały opracowane w oparciu o rzeczywiste przebiegi pracy przodka znajdującego się w chodniku nadścianowym ściany 2/II/382 oraz dane przemysłowe odnoszące się do ilościowych i jakościowych parametrów strugi urobku. Na potrzeby symulacji wyeliminowano z nich wszelkie zwłoki czasowe, takie jak postoje systemu odstawy, przerwy technologiczne czy awarie. W efekcie cykle urabiania realizowane są w sposób jednolity jeden po drugim, co pozwala na ocenę maksymalnych możliwości systemu transportowego urobku

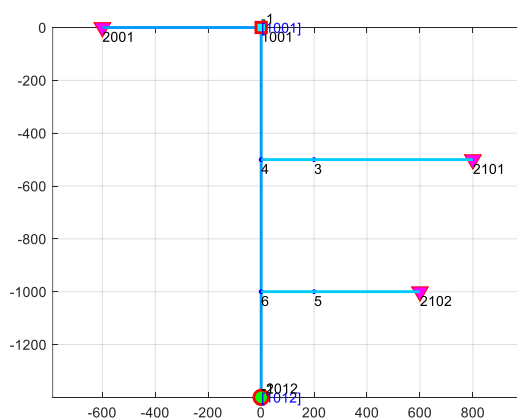
z przodków. Przodek 2101 charakteryzuje się większą masą urobku i wyższą wydajnością transportową, natomiast dla przodka 2102 uzyskano lepsze wskaźniki czystości urabiania.

7.2.3 Scenariusze badawcze

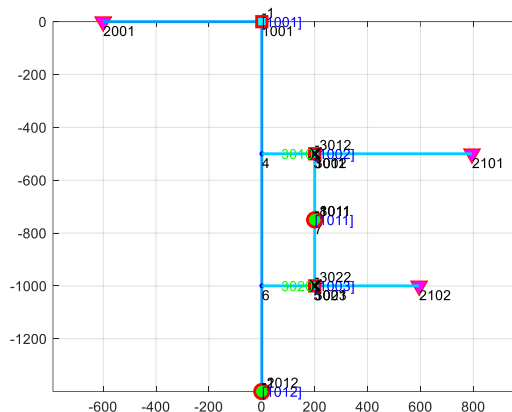
Dla porównania działania wybranych wariantów systemu odstawy urobku opracowano trzy scenariusze symulacyjne, różniące się lokalizacją wprowadzonych zbiorników mechanicznych. Porównano wariant bazowy (Rys. 7.2.5), w którym transport realizowany jest wyłącznie przenośnikami taśmowymi, scenariusz ze zbiornikiem mechanicznym w systemie transportowym z przodka ścianowego (Rys. 7.2.6) oraz układ z dodatkowymi zbiornikami współpracującymi z przodkami chodnikowymi służącymi retencji skały płonnej (Rys. 7.2.7).



Rys. 7.2.5 Wariant 1 bazowy – bez zbiorników retencyjnych



Rys. 7.2.6 Wariant 2 - stabilizacja i retencja



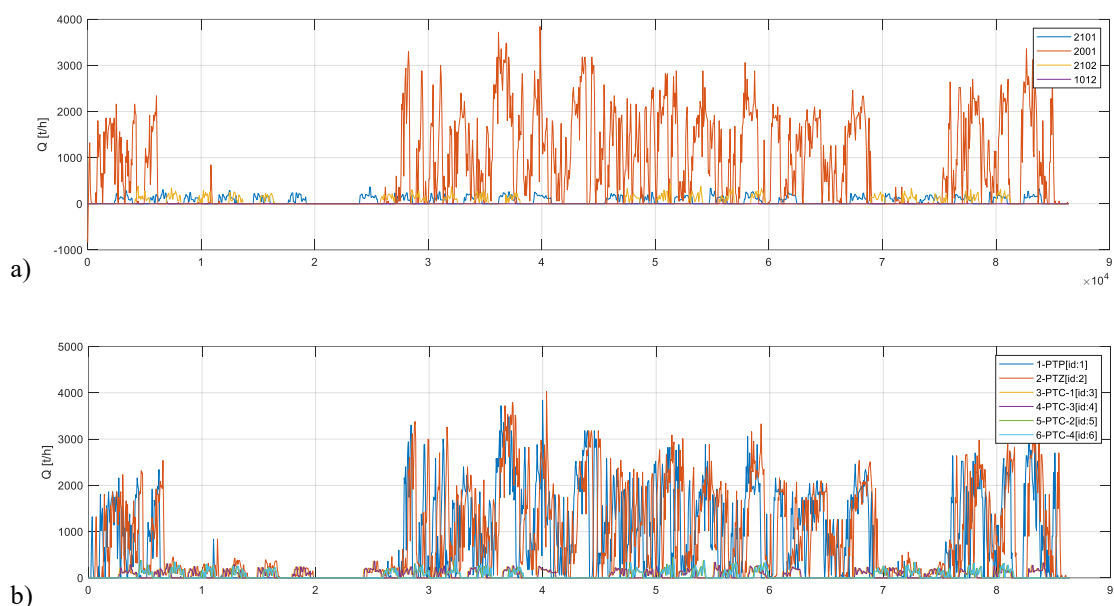
Rys. 7.2.7 Wariant 3 – retencja, stabilizacja i separacja

Na podstawie trzech powyższych wariantów symulacyjnych dokonano oceny parametrów pracy systemu odstawy. Analiza obejmowała:

- ocenę stopnia przeładowania przenośników taśmowych urobkiem pochodzącym z przodka ścianowego,
- ocenę stopnia obciążenia jednostek napędowych,
- ocenę zasadności zastosowania zbiorników mechanicznego,
- określenie ilości skały płonnej zgromadzonej w zbiorniku,
- uzasadnienie zastosowania mechanicznych zbiorników w celu retencji urobku w przodkach położonych peryferyjnie, w znacznej odległości od szybu.

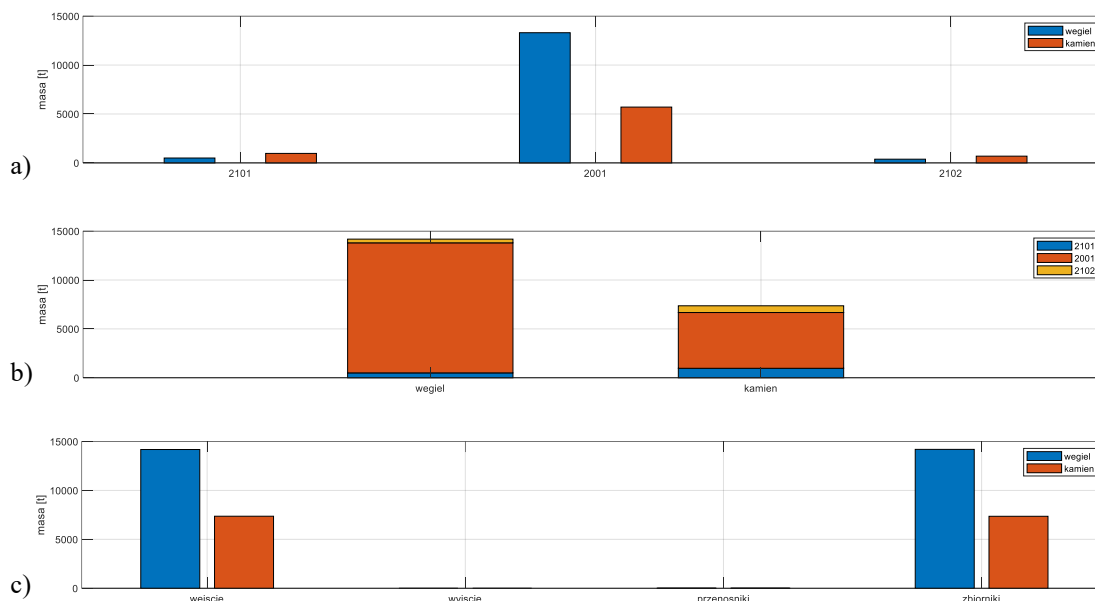
7.2.4 Wariant 1 bazowy - bez zbiorników mechanicznych

Na wykresie (Rys. 7.2.8) przedstawiono przebiegi zmian wydajności w wybranych punktach oraz na kolejnych odcinkach systemu transportowego. Konfiguracja nie uwzględnia wykorzystania zbiorników mechanicznych. Urobek ze wszystkich przodków kierowany jest bezpośrednio do zbiornika retencyjnego 1012. Brak elementów buforujących skutkuje dużą zmiennością chwilowych wartości wydajności, szczególnie w momentach jednoczesnej pracy przodków. Przeciążenia systemu występują na przenośnikach biorących udział w transporcie urobku ze ściany.



Rys. 7.2.8 Przebiegi zmian wydajności w systemie transportowym (warian 1)
a) punkty nadawcy 2101, 2001, 2102, 1012 b) przenośniki taśmowe 1 PTP, 2 PTZ, PTC-1, PTC-2, PTC-3, PTC-4

Na wykresach (Rys. 7.2.9) przedstawiono strukturę ilościową i jakościową urobku w systemie odstawy. Analiza obejmuje przepływ strugi z poszczególnych przodków, udział frakcji węgla i kamienia oraz rozkład urobku w elementach systemu transportowego. Dominującym źródłem pozostaje przodek ścianowy (2001), natomiast przodki chodnikowe (2101 i 2102) generują znacznie mniejsze ilości urobku, w większości kamiennego. Brak elementów retencyjnych skutkuje bezpośrednim przekazywaniem całej strugi do zbiornika końcowego. Struga pochodząca ze ściany zawiera głównie węgiel, natomiast urobek z przodków chodnikowych charakteryzuje się znacznym udziałem skały płonnej. Układ nie umożliwia lokalnej separacji ani retencji tej frakcji. Brak wykorzystania zbiorników mechanicznych skutkuje większym obciążeniem przenośników oraz podwyższoną zmiennością przepływu, przekładającą się na ograniczoną stabilność pracy układu.



Rys. 7.2.9 Struktura nadawy (warant 1)
a) punkty 2001, 2101, 2102, b) składniki urobku z punktów, c) nosiwo w obiektach

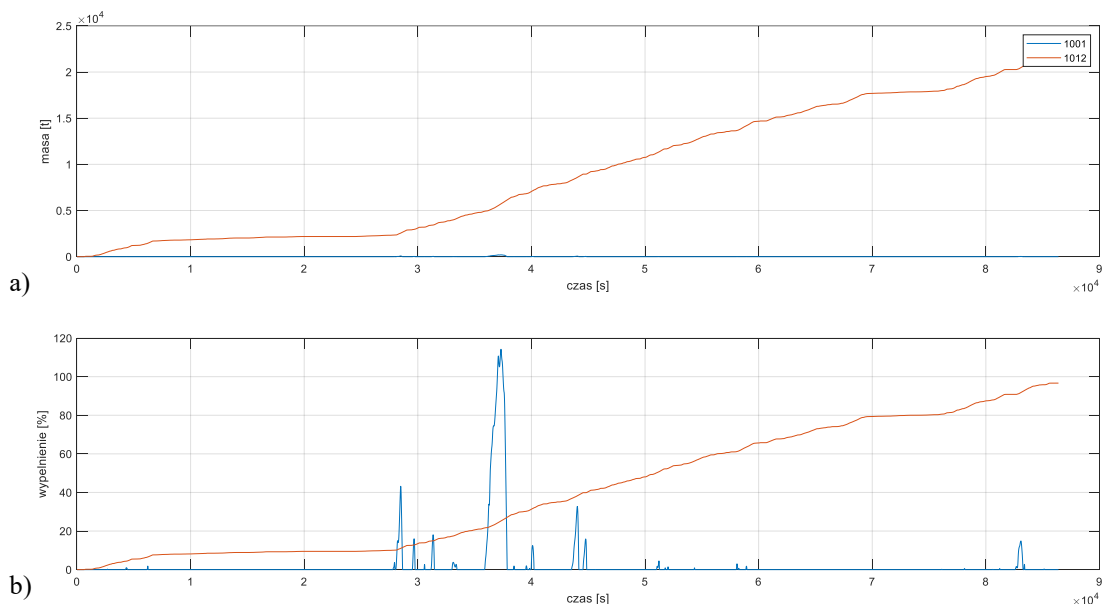
Na rysunku 7.2.10 przedstawiono wyniki symulacji obciążenia sześciu przenośników taśmowych systemu. Analiza dotyczy wartości wskaźnika przeładowania oraz zapotrzebowania mocy. Z uwagi na jednoczesne prowadzenie prac wydobywczych w przodku ścianowym (2001) oraz przodkach chodnikowych (2101, 2102), znaczące obciążenia odnotowano na przenośniku 2 PTZ. Charakteryzuje się on wysoką zmiennością transportowanej strugi urobku skutkującą przekroczeniem dopuszczalnych wartości współczynnika przeciążenia oraz granicznego poboru mocy. W przenośniku 1 PTP odnotowano przekroczenie zapotrzebowania na moc, co wynika z dużej intensywności nadawy z przodka ścianowego. Wartości obciążenia dla przenośników przodkowych (PTC-1, PTC-2, PTC-3, PTC-4) znajdują się wyraźnie poniżej wartości granicznych, co jest efektem niewielkiej i rozproszonej nadawy z przodków chodnikowych.



Rys. 7.2.10 Wartości wskaźnika przeładowania i przeciążenia przenośników podczas badań symulacyjnych dla wariantu 1

a) wskaźniki wQ i wN dla poszczególnych przenośników taśmowych, b) przebieg przeładowania w czasie,
 c) przebieg przeciążenia w czasie.

Stan wypełnienia zbiornika retencyjnego podczas symulacji obrazuje rysunek 7.2.11. Przebieg narastania masy w zbiorniku 1012 wskazuje na jego napełnianie urobkiem oraz aktywny udział w systemie transportowym.



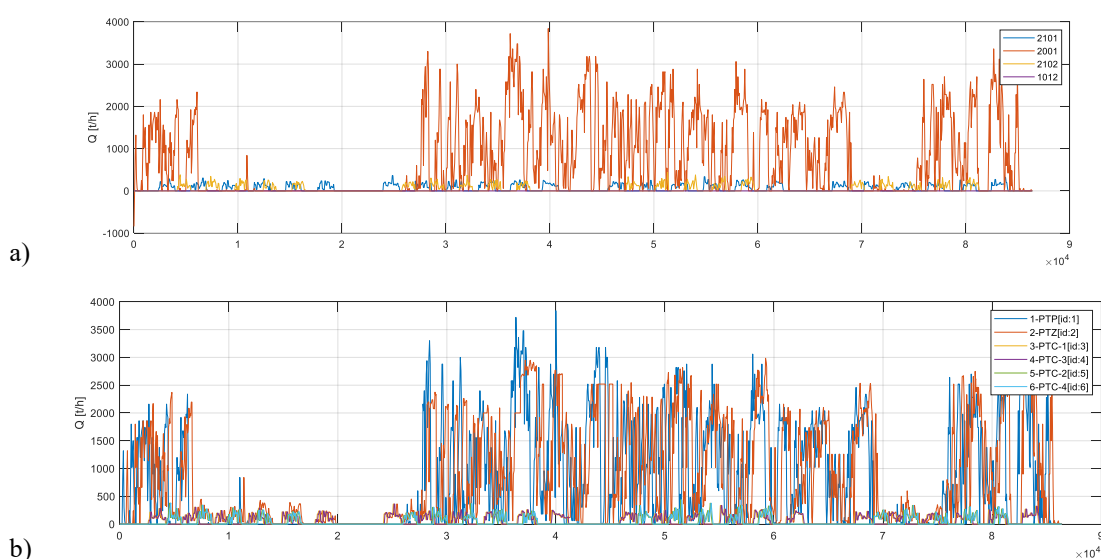
Rys. 7.2.11 Stan wypełnienia zbiorników retencyjnych podczas symulacji (wariant 1)
 a) wypełnienie masowe, b) wypełnienie procentowe

7.2.4.1 Podsumowanie

Analiza układu odstawy bez zbiorników mechanicznych wykazała przeciążenia przenośników 1 PTP i 2 PTZ. W przypadku przenośnika 2 PTZ wartości współczynnika obciążenia oraz zapotrzebowania na moc przekroczyły poziomy dopuszczalne. Nadawa ze ściany charakteryzuje się dużą zmiennością wydajności, co skutkuje skokowymi obciążeniami jednostek napędowych i niestabilną pracą systemu transportowego. Wskazuje to, że układ wymaga zastosowania dodatkowych elementów stabilizujących strugę urobku. Problem przeładowania przenośnika 2 PTZ bez zmiany konfiguracji systemu (np. prędkości lub szerokości taśmy, mocy napędów) może zostać rozwiązany poprzez wprowadzenie zbiornika mechanicznego pełniącego funkcję wyrównawczą. Charakter przepływu urobku oraz przeciążenie przenośnika zbiorczego wskazują na potrzebę stabilizacji pracy całego układu transportowego.

7.2.5 Wariant 2 - stabilizacja i retencja

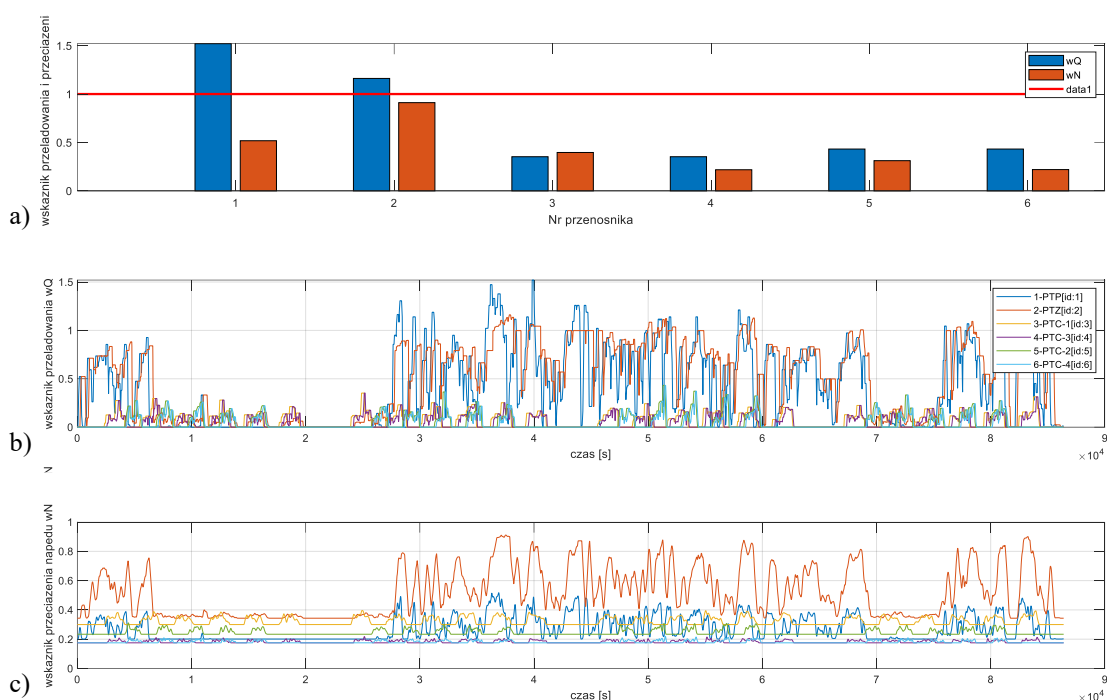
Przebieg zmian wydajności w wybranych punktach układu transportu przedstawiono na rysunku 7.2.12. W konfiguracji wariantu 2 zastosowano mechaniczny zbiornik buforowy o objętości 160 m³, którego zadaniem jest ograniczenie zmienności nadawy ze ściany. Rozwiązanie to pozwala na stabilizację charakterystyki transportowej układu oraz poprawę jego pracy. Przodki chodnikowe pracują bez wsparcia retencji, kierując urobek bezpośrednio na przenośnik 2 PTZ, co skutkuje okresowymi skokami wartości nadawy.



Rys. 7.2.12 Przebiegi zmian wydajności w systemie transportowym (wariant 2)
a) punkty nadawy 2101, 2001, 2102, 1012 b) przenośniki taśmowe 1 PTP, 2 PTZ, PTC-1, PTC-2, PTC-3, PTC-4

Struktura nadawy w punktach załadunkowych systemu pozostaje niezmienną w odniesieniu do wariantu 1. Wynika to z faktu, że skała płonna nie była oddzielana od urobku na etapie załadunku i transportu.

Ocena wariantu 2 została przeprowadzona ponadto w odniesieniu do parametrów pracy przenośników taśmowych. Rysunek 7.2.13 przedstawia zestawienie wskaźników przeciążenia oraz zapotrzebowania na moc dla poszczególnych urządzeń w analizowanym układzie. Zaobserwowano poprawę względem konfiguracji bazowej. Wprowadzenie zbiornika buforowego pozwoliło na częściową stabilizację przepływu urobku, nie eliminując jednak w pełni zmienności obciążeń. Obciążenia pozostałych przenośników taśmowych mieszczą się w określonym przedziale pracy.



Rys. 7.2.13 Wartości wskaźnika przeładowania i przeciążenia przenośników podczas badań symulacyjnych dla wariantu 2

a) wskaźniki wQ i wN dla poszczególnych przenośników taśmowych, b) przebieg przeładowania w czasie, c) przebieg przeciążenia w czasie.

Stan wypełnienia zbiornika retencyjnego w analizowanym wariancie pozostaje taki sam jak w wariancie 1

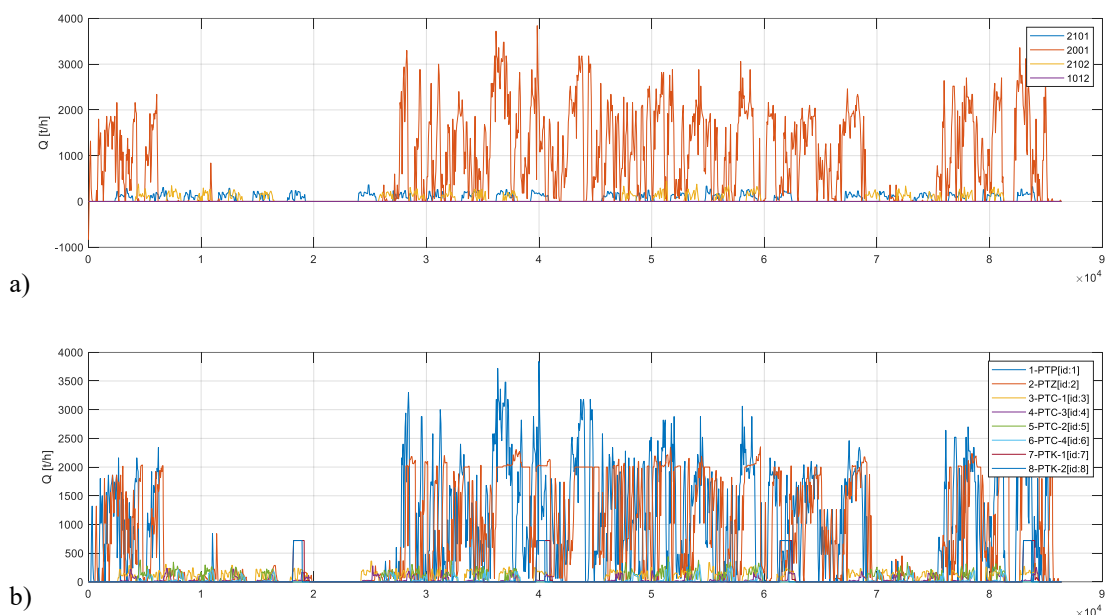
7.2.5.1 Podsumowanie

Wariant 2 uwzględnia zastosowanie zbiornika mechanicznego pełniącego funkcję stabilizującą dla strugi urobku pochodzącej z przodka ścianowego. Wprowadzenie tego elementu pozwoliło na częściowe ograniczenia dynamicznych zmian obciążeń układu transportowego. Mimo poprawy parametrów pracy przenośników, przodki

chodnikowe nadal pracują bez wsparcia retencji, co skutkuje chwilowymi skokami nadawy. Obciążenia kluczowych jednostek mieszczą się w zakresie pracy ustalonej, jednak ograniczona objętość zastosowanego zbiornika nie pozwala na pełną stabilizację przepływu. Układ wykazuje poprawę w stosunku do wariantu bazowego, lecz nadal pozostaje podatny na lokalne przeciążenia.

7.2.6 Wariant 3 - retencja, stabilizacja i separacja

W wariantcie 3 zastosowano konfigurację systemu odstawy obejmującą zbiornik mechaniczny w rejonie ściany wydobywczej oraz dwa dodatkowe zbiorniki w rejonach przodków chodnikowych, przeznaczone do retencji skały płonnej. Przebiegi chwilowych wydajności (Rys. 7.2.14) wskazują na poprawę stabilności transportu w stosunku do wariantu pierwszego i drugiego. Struga urobku z przodka ścianowego została skutecznie ustabilizowana, co przekłada się na równomierne obciążenie jednostek napędowych w dalszych odcinkach układu. Zastosowanie zbiorników przy przodkach chodnikowych ograniczyło skokowe dopływy urobku kamiennego, co korzystnie wpłynęło na charakterystykę pracy przenośnika 2 PTZ.



Rys. 7.2.14 Przebiegi zmian wydajności w systemie transportowym (wariant 3)
a) punkty nadawy 2101, 2001, 2102, 1012 b) przenośniki taśmowe 1 PTP, 2 PTZ, PTC-1, PTC-2, PTC-3, PTC-4

Struktura nadawy punktów załadowniczych w wariantcie 3 nie uległa zmianie względem poprzednich konfiguracji. Podział masy urobku pomiędzy przodek ścianowy (2001) i przodki chodnikowe (2101, 2102) pozostaje tożsamy i dominującym źródłem pozostaje ściana, natomiast urobek z przodków chodnikowych nadal stanowi niewielki

udział, głównie w postaci skały płonnej. Wprowadzenie zbiorników w wariancie 3 nie wpłynęło na rozkład ilościowy i jakościowy nadawy, a jedynie na sposób jej dalszego przetwarzania i retencji w systemie.

Zastosowanie dodatkowych punktów retencji w wariancie 3 wpłynęło na obniżenie obciążenia jednostek napędowych oraz zwiększenie stabilności systemu transportowego. Zestawienie wskaźników przeciążenia i zapotrzebowania na moc (Rys. 7.2.15) jednoznacznie wskazuje, że wprowadzenie zbiorników retencyjnych w rejonie przodków chodnikowych oraz przy ścianie wydobywczej przyczyniło się do redukcji dynamicznych wahań obciążeniowych. W porównaniu do konfiguracji wariantu 1 i 2 widoczna jest poprawa parametrów pracy przenośników 2 PTZ i 1 PTP. Zastosowane zbiorniki ograniczyły skokowe zmiany obciążenia i wpłynęły na stabilizację charakterystyki pracy całego układu. Wartości wskaźników mieszczą się w dopuszczalnym zakresie.

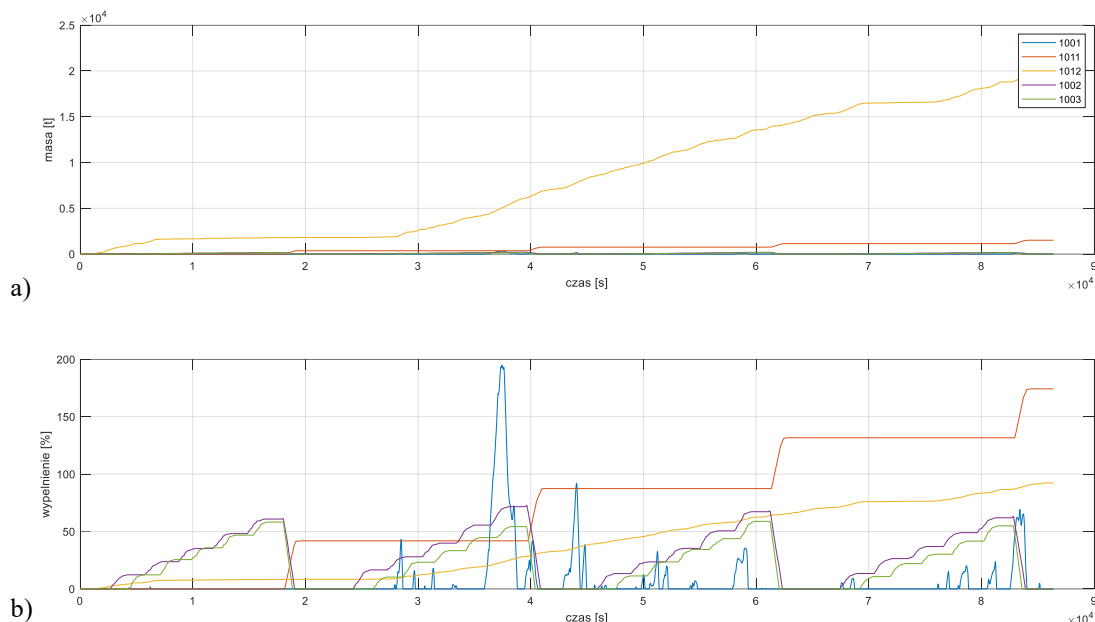


Rys. 7.2.15 Wartości wskaźnika przeładowania i przeciążenia przenośników podczas badań symulacyjnych dla wariantu 3

a) wskaźniki Q i N dla poszczególnych przenośników taśmowych, b) przebieg przeładowania w czasie, c) przebieg przeciążenia w czasie

Charakterystykę pracy zbiorników mechanicznych przedstawiono na rysunku 7.2.16. Zawarte na nim przebiegi ilustrują przepływ masy w poszczególnych zbiornikach. Zbiorniki 1002 i 1003, przypisane do przodków chodnikowych, pracują cyklicznie i z uwagi na swoje przeznaczenie napełniane są w wolniejszym tempie. Dolny wykres przedstawia stopień wypełnienia zbiorników w czasie. Praca zbiornika 1012 przebiega w sposób uporządkowany, bez gwałtownych skoków. Wypełnienia zbiorników

1002 i 1003 rosną stopniowo, osiągając wysokie wartości co wskazuje na konieczność ich opróżniania w okresach zmianowych. Całość przebiegów potwierdza skuteczność przyjętej konfiguracji oraz poprawę działania systemu względem wariantów wcześniejszych.



Rys. 7.2.16 Stan wypełnienia zbiorników retencyjnych podczas symulacji (wariant 3)
a) wypełnienie masowe, b) wypełnienie procentowe

7.2.6.1 Podsumowanie

Wariant 3 zakładał zastosowanie pełnej konfiguracji zbiorników mechanicznych, zbiornika mechanicznego stabilizującego strugę urobku w rejonie przodka ścianowego oraz dwóch zbiorników retencyjnych służących gromadzeniu odseparowanej skały płonnej obsługujących przodki chodnikowe. Wprowadzone rozwiązania pozwoliły na znaczące ograniczenie zmienności chwilowej nadawy oraz obniżenie obciążenia jednostek napędowych w newralgicznych punktach systemu. Przenośniki 2 PTZ i 1 PTP pracują w zakresie dopuszczalnych parametrów, a charakterystyka przepływu urobku wskazuje na ustabilizowanie pracy całego układu. Retencja skały płonnej odciążała odcinek odstawy zbiorczej. Potwierdzają to przebiegi napełniania zbiorników, jak i wskaźniki przeładowania i przeciążenia przenośników. Wariant ten należy uznać za najbardziej korzystny z punktu widzenia stabilności pracy systemu transportowych.

7.3 Wnioski z badań symulacyjnych

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych sformułowano następujące wnioski:

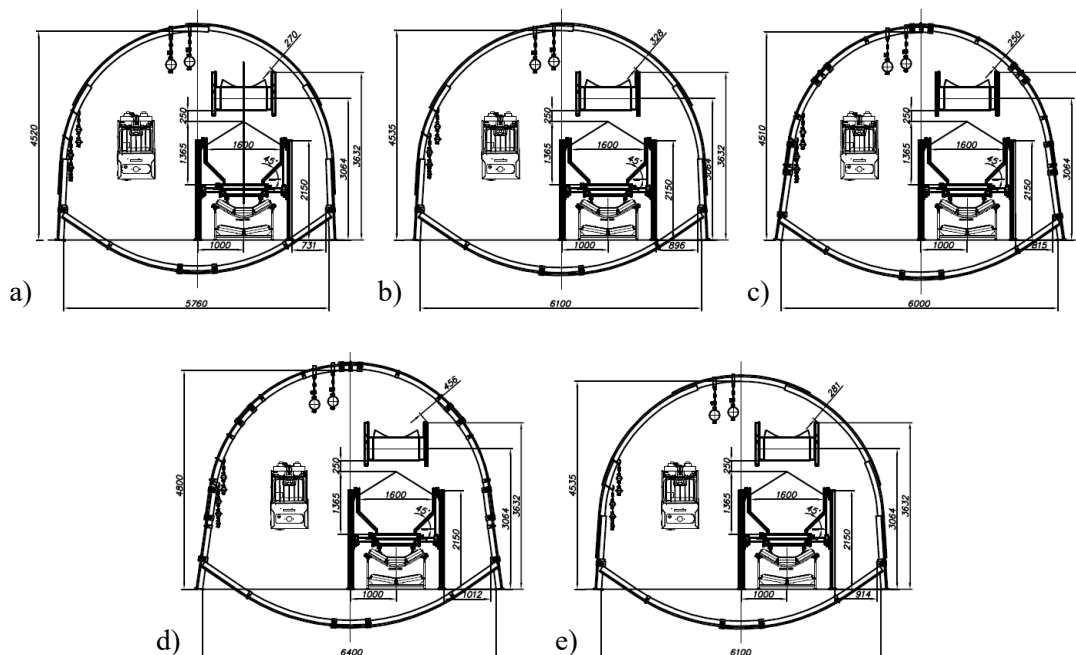
1. Podstawowym źródłem nadawy pozostaje przodek ścianowy, a w urobku z przodków chodnikowych dominuje frakcja skały płonnej.
2. W wariancie 1 system funkcjonował bez wsparcia zbiorników mechanicznych. W efekcie przenośniki (szczególnie 2 PTZ) były narażone na przeciążenia.
3. Wariant 2 uwzględniał zastosowanie zbiornika mechanicznego o objętości 160 m³ w rejonie przodka ścianowego. Pomimo ograniczonej pojemności, urządzenie to pozwoliło na ograniczenie maksymalnych wartości wydajności i poprawę pracy systemu transportowego. W wariancie tym nadawa z przodków chodnikowych trafiała bezpośrednio na przenośnik zbiorczy.
4. Wariant 3 zakładał zastosowanie zbiornika mechanicznego stabilizującego strugę przy ścianie oraz dwa lokalne zbiorniki przy przodkach chodnikowych. Rozwiązanie to poprawiło stabilność przepływu urobku, a przenośniki 1 PTP i 2 PTZ pracowały w zakresie parametrów. Zastosowanie lokalnej retencji umożliwiło efektywne zarządzanie frakcją kamienną i odciążenie odcinków zbiorczych.
5. Zbiornik mechaniczny jest urządzeniem skalowalnym i stanowi rozwiązanie uniwersalne, jego funkcja zależy wyłącznie od miejsca w systemie oraz charakteru nadawy. Może pełnić rolę:
 - zbiornika stabilizującego zmienną strugę urobku,
 - elementu lokalnej retencji skały płonnej,
 - pośredniego magazynu urobku.

8 Projekt poziomego zbiornika mechanicznego

W rozdziale przedstawiono proces projektowy poziomego zbiornika mechanicznego przeznaczonego do pracy w wyrobiskach chodnikowych podziemnego zakładu górniczego. Urządzenie zaprojektowano do pracy ciągłej, w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego, przy zapyleniu miejsca pracy. Konstrukcja jest dostosowana do wymiarów wyrobisk chodnikowych. Urządzenie może być modyfikowane, przebudowane lub nawet przenoszone. Zbiornik możliwy jest do integracji z istniejącym systemem transportowym kopalni. Rozdział składa się z czterech części. W pierwszej przedstawiono założenia konstrukcyjne, w drugiej opisano budowę zbiornika wraz z jego głównymi elementami. Kolejna część zawiera analizę kinematyki i dynamiki pracy układu zbiornika, ostatnia dotyczy analizy wytrzymałościowej konstrukcji przeprowadzonej metodą elementów skończonych (MES).

8.1 Założenia konstrukcyjne

Prace projektowe wymagały przeprowadzenia analizy możliwości zabudowy zbiornika w wyrobisku. W związku z tym, w oparciu o wymagania Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych [98] z uwzględnieniem stosowanych profili obudowy chodnikowej [99] w LW „Bogdanka” S.A., wykonano analizę geometryczną zbiornika w miejscu pracy. Jej celem było określenie parametrów geometrycznych zbiornika oraz dostosowanie jego konstrukcji do warunków wyrobiska.



Rys. 8.1.1 Analiza geometryczna zbiornika w wyrobisku
a) obudowa LPSC 11S, b) obudowa LPSC 12S, c) obudowa LPSc-10K, d) obudowa LPSc-11K,
e) obudowa LPSc-1/S7

W dalszej części rozdziału zestawieniowo założenia konstrukcyjne będące podstawą opracowania projektu poziomego zbiornika mechanicznego.

Konstrukcja zbiornika powinna być dostosowana do eksploatacji w podziemnych wyrobiskach górniczych o różnych typach obudów chodnikowych. Wymiary gabarytowe oraz kształt zbiornika muszą umożliwiać zapewnienie skrajni ruchowych zgodnych z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych [98]. Na rysunku przedstawiono analizę zbiornika mechanicznego w typowych obudowach chodnikowych stosowanych w LW „Bogdanka” S.A. W każdy typ stosowanej obudowy wpisano w sposób schematyczny konstrukcję zbiornika z zachowaniem podziałki rysunku.

Szczegółowe założenia przedstawiono w tabeli 8.1.

Tabela 8.1 Zestawienie założeń konstrukcyjnych

L.p.	Element	Wartość/uwagi
1.	Konstrukcja zbiornika	Spawana, skręcana
2.	Materiał zbiornika	Stal (głównie gatunek S235JR, S355J2G3)
3.	Zabezpieczenie antykorozyjne	Tak (wielowarstwowa powłoka malarska zgodnie z normą)
4.	Transport	Kolej podziemna, kolej podwieszana
5.	Fundamenty	Pale fundamentowe, dźwigary
6.	System posuwu	Bezcieżnowy
7.	Maksymalne wymiary gabarytowe (wys. x szer. x dł.)	3 000 x 2 000 x 120 000
8.	Kąt nachylenia	$\pm 5^\circ$
9.	Prędkość napełniania/oprózniczenia	700 t/h
10.	Zgodność z przepisami, dyrektywami oraz normami	1. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych 2. Dyrektywa Atex (Dyrektywa 2014/34/UE) 3. Dyrektywa maszynowa (Dyrektywa 2006/42/WE) 4. Ogólne zasady projektowania (PN-EN ISO 12100)

Zbiornik zaprojektowany zostanie jako konstrukcja spawana złożona ze skręcanych elementów możliwych do transportu w podziemnych wyrobiskach górniczych. Wykorzystana będzie stal konstrukcyjna gatunki S235JR, S355J2G3. Dla zabezpieczenia przed korozją przewidziano wielowarstwowe powłoki ochronne, zgodne z obowiązującymi normami. Wszystkie przyjęte rozwiązania konstrukcyjne zgodne są z aktualnymi wymaganiami dyrektywy maszynowej, przepisami ATEX oraz ogólnymi zasadami projektowania maszyn, określonymi w normie PN-EN ISO 12100.

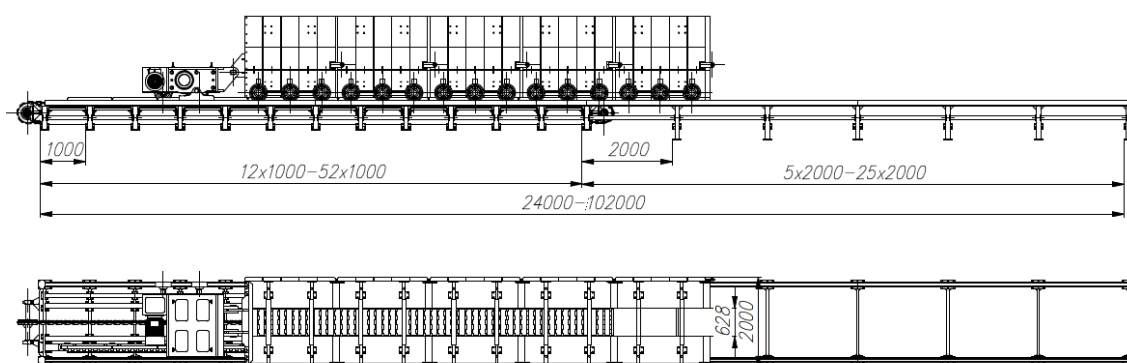
8.2 Projekt poziomego zbiornika mechanicznego PZM-250

W rozdziale przedstawiono parametry techniczne, budowę oraz opis instalacji w wyrobisku górniczym poziomego zbiornika mechanicznego typu PZM-250. Urządzenie przeznaczone jest do pracy w wyrobiskach podziemnego zakładu górnictwa w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego. Rozwiązanie to może być

oraz łatwą rozbudowę. Podczas procesu projektowania wykorzystywano elementy zunifikowane, dostępne w zakładzie górniczym. Bazowano na materiałach takich jak blachy, profile i pręty walcowane, szyny. W celu redukcji oporów ruchu zastosowano łożyskowanie kół jezdnych segmentów skrzyni ładunkowej, kół jezdnych ciągnącego oraz elementów zespołów zwrotnych. Zbiornik został zaprojektowany z uwzględnieniem łatwego dostępu do połączeń śrubowych i łożysk bez konieczności skomplikowanego demontażu głównych podzespołów urządzenia. Przyjęcie powyższych założeń projektowych miało na celu przystosowanie konstrukcji do specyficznych warunków eksploatacji w podziemnych zakładach górniczych. Instalacja zbiornika w wyrobisku może odbywać się bezpośrednio na spągu, natomiast rekomendowane jest posadowienie urządzenia na dźwigarach ułożonych na palach fundamentowych, aby wyeliminować ewentualny wpływ oddziaływania górotworu na konstrukcję urządzenia.

Podstawowe parametry techniczne zbiornika PZM-250 to:

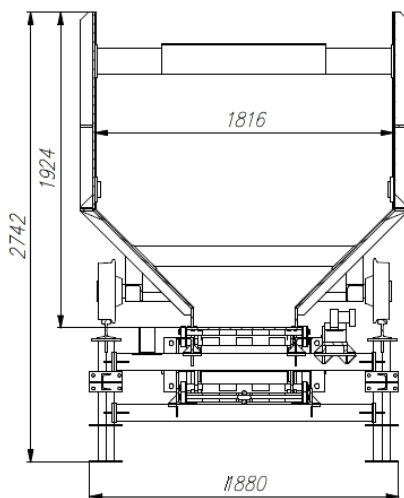
- sumaryczna długość skrzyni ładunkowej: do 50 m,
- ładowność: do 250 t,
- chłonność/wydajność: do 700 t/h,
- dopuszczalny kąt nachylenia: $\pm 5^\circ$,
- moc silnika napędu: 22 kW,
- kompatybilność: przenośniki taśmowe o szerokości taśmy 1000 mm



Rys. 8.2.2 Poziomy zbiornik mechaniczny PZM-250 - główne wymiary zbiornika

Na rysunku 8.2.3 przedstawiono przekrój poprzeczny urządzenia. Widoczny jest na nim segment liniowy wraz z elementami podparcia, układem ciągną górnego i dolnego. Zbiornik posiada symetryczną budowę, dolna część skrzyni ładunkowej nachylona jest pod kątem 45 stopni zwężając się ku dołowi. Część denną skrzyni

ładunkowej stanowi ciągnó płytkowe poruszające się po torze jezdny. Ciągnó płytkowe przemieszcza się wzdłuż otworu zsypowego zbiornika.



Rys. 8.2.3 Przekrój poprzeczny zbiornika

Urządzenie zostanie oznakowane tabliczką. Będzie ona umieszczona w widocznym miejscu na konstrukcji urządzenia. Na tabliczce znamionowej znajdują się dane producenta, typ, numer fabryczny, parametry pracy i rok produkcji, dzięki czemu użytkownik może jednoznacznie zidentyfikować urządzenie. Z uwagi na użytkowanie w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu lub pyłu węglowego urządzenie zostanie oznaczone znakiem Ex, kategoria IM2 co jest potwierdzeniem zgodności urządzenia z dyrektywą ATEX.

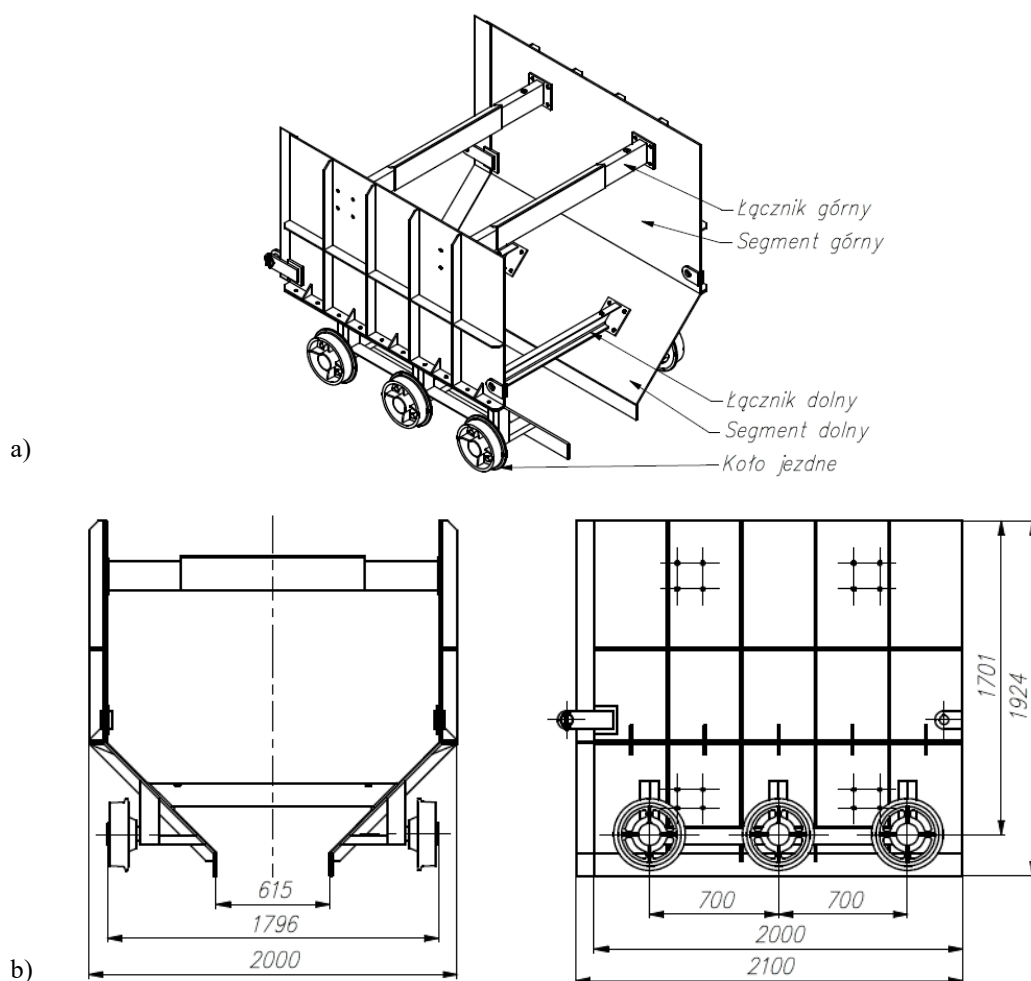
Montaż zbiornika PZM-250 w wyrobisku górniczym realizowany jest w ściśle określonej kolejności. Rozpoczyna się od wykonania inwentaryzacji mierniczej wyrobiska i przeprowadzenia symulacji instalacji zbiornika z wykorzystaniem środowiska CAD. Na jej podstawie wykonywany jest projekt techniczny instalacji zbiornika PZM-250 w wyrobisku. Kolejne etapy obejmują wykonanie pali fundamentowych, montaż konstrukcji nośnej oraz instalację elementów przenośników taśmowych. Następnie prowadzona jest instalacja toru jezdno skrzyni, ciągów transportowych. Po zamknięciu układu ciągną w jedną pętlę, jego naciągnięciu i zabudowie systemu posuwu, następuje instalacja jednostki napędowej oraz montaż segmentów skrzyni ładunkowej. Całość prac kończy montaż wyposażenia elektrycznego i przeprowadzenie prób ruchowych. Poniżej przedstawiono szczegółowy zakres prac instalacyjnych:

- wykonanie inwentaryzacji mierniczej wyrobiska w celu weryfikacji parametrów PZM-250 w odniesieniu do miejsca instalacji,

- przeprowadzenie symulacji dopasowania PZM-250 do geometrii wyrobiska z wykorzystaniem środowiska CAD, (weryfikacja: maksymalnej długości zbiornika, położenia zbiornika w wyrobisku, odległości podpór trasy od spągu),
- wykonanie projektu instalacji zbiornika w wyrobisku górniczym z uwzględnieniem rozmieszczenia pali fundamentowych, wykonanie siatki pali,
- montaż pali fundamentowych pod konstrukcję nośną zbiornika,
- ułożenie dźwigarów nośnych,
- instalacja wysięgnika przenośnika taśmowego podającego z uwzględnieniem trajektorii lotu urobku,
- instalacja zwrotni przenośnika odbierającego oraz jego trasy,
- montaż głównej konstrukcji nośnej zbiornika,
- montaż pomocniczej konstrukcji nośnej zbiornika,
- montaż belek oporowych ciągną płytowego i łańcuchowego,
- montaż wałów zwrotnych ciągów,
- montaż toru jezdni ciągną płytowego,
- montaż ciągną płytowego i łańcuchowego,
- montaż segmentu zamykającego skrzyni ładunkowej, połączenie blachy zamykającej segmentu z ciągnem płytowym i łańcuchowym w jedną pętlę,
- naciąg ciągną,
- montaż szyn S30,
- montaż bezciągnowego systemu posuwu,
- montaż kanału kablowego,
- tymczasowy demontaż jednego segmentu bezciągnowego systemu posuwu,
- ustawienie jednostki napędowej na szynach,
- ponowny montaż jednego segmentu bezciągnowego systemu posuwu,
- połączenie modułu napędowego z segmentem zamykającym,
- montaż kolejnych segmentów liniowych skrzyni ładunkowej,
- połączenie segmentów skrzyni ładunkowej,
- montaż wyposażenia elektrycznego,
- przeprowadzenie ruchu próbnego urządzenia.

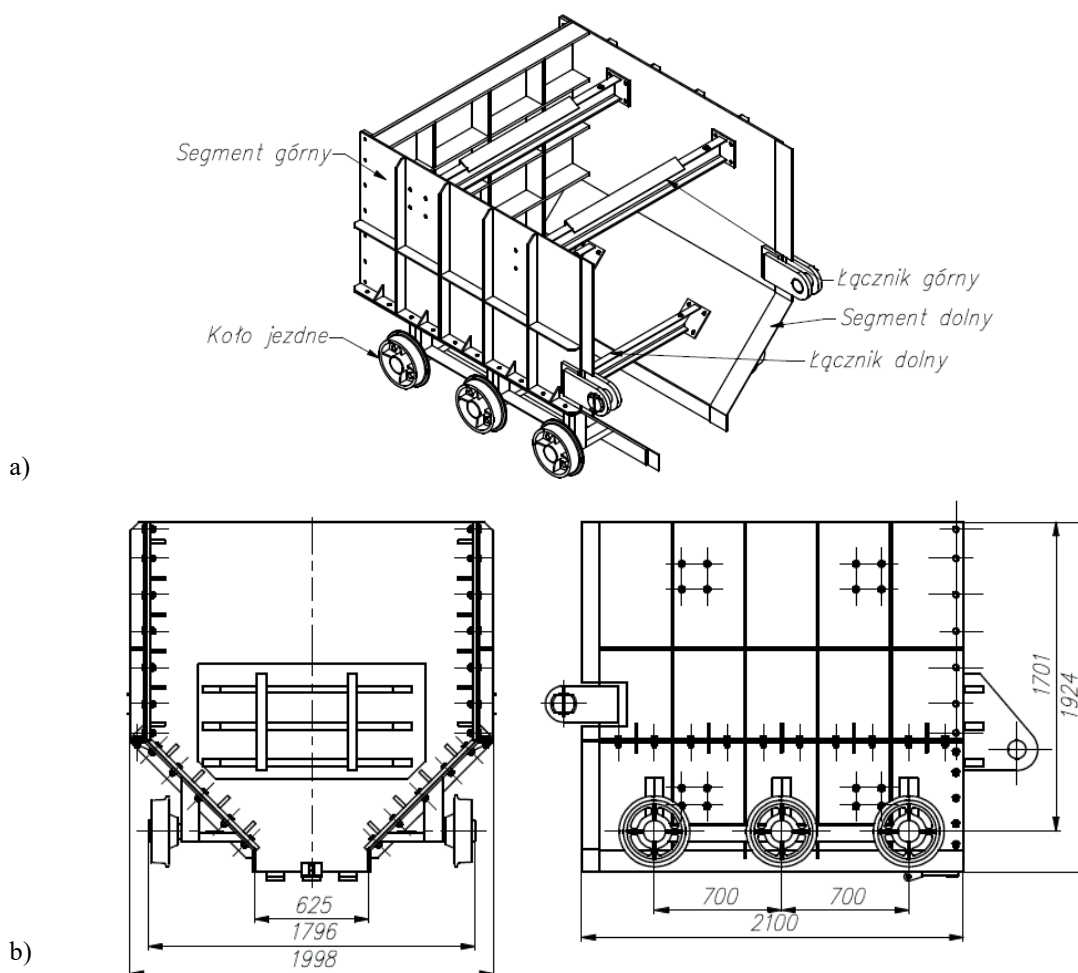
8.2.1 Skrzynia ładunkowa

Segmenty skrzyni ładunkowej (liniowe Rys. 8.2.4, i napędowy Rys. 8.2.5) są konstrukcjami spawanymi z typowych blach i profili walcowanych, a następnie skręcanymi z wykorzystaniem połączeń śrubowych. Poszczególne segmenty skrzyni ładunkowej łączone są ze sobą sprzęgami sworzniowymi zabezpieczonymi dodatkowo przed przemieszczeniem. Rozstaw osi w poszczególnych segmentach wynosi 700 mm. Zestaw kołowy tworzy sześć odlewanych ze staliwa kół tocznych osadzonych na sztywnej osi przy użyciu łożysk stożkowych. Koła jezdne są elementami znormalizowanymi, dostępnymi na rynku jako kompletne zespoły z wyposażeniem. Połączone są z osiami przy użyciu nakrętek. Obudowa łożyska od strony wewnętrznej wyposażona jest w labiryntowe uszczelnienia, a od zewnętrznej zamknięta jest stalową pokrywą. W piaście każdego koła znajduje się punkt umożliwiający przeprowadzenie smarowania, w którym wkręcona jest śruba z podkładką uszczelniającą.



Rys. 8.2.4 Segment liniowy skrzyni ładunkowej
a) budowa, b) główne wymiary

Segmenty liniowe skrzyni ładunkowej łączone są ze sobą w sposób powtarzalny, co umożliwia dowolne wydłużanie zbiornika w zależności od bieżących potrzeb. Pomiędzy zestawem segmentów liniowych, a napędem montowany jest segment napędowy wyposażony w blachę zamykającą. Rozwiązanie to umożliwia bezpośrednie przeniesienie siły napędowej z mechanizmu napędowego na skrzynię ładunkową i ciągną płytowe przenośnika. Blacha zamykająca mocowana jest do segmentu za pomocą śrub M20 klasy 8.8. W odróżnieniu od segmentów liniowych, segment napędowy może być łączony wyłącznie z blachą zamykającą.

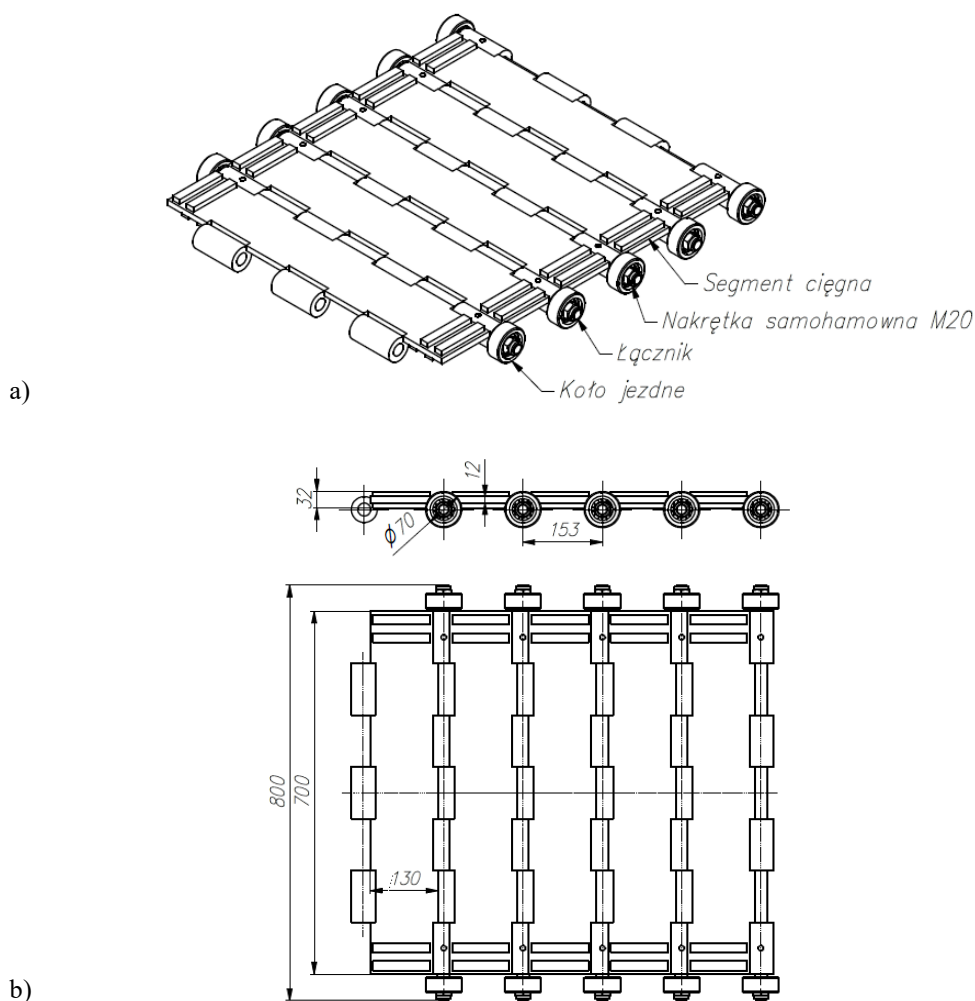


Rys. 8.2.5 Segment napędowy skrzyni ładunkowej

8.2.2 Ciężno płytowo-łańcuchowe

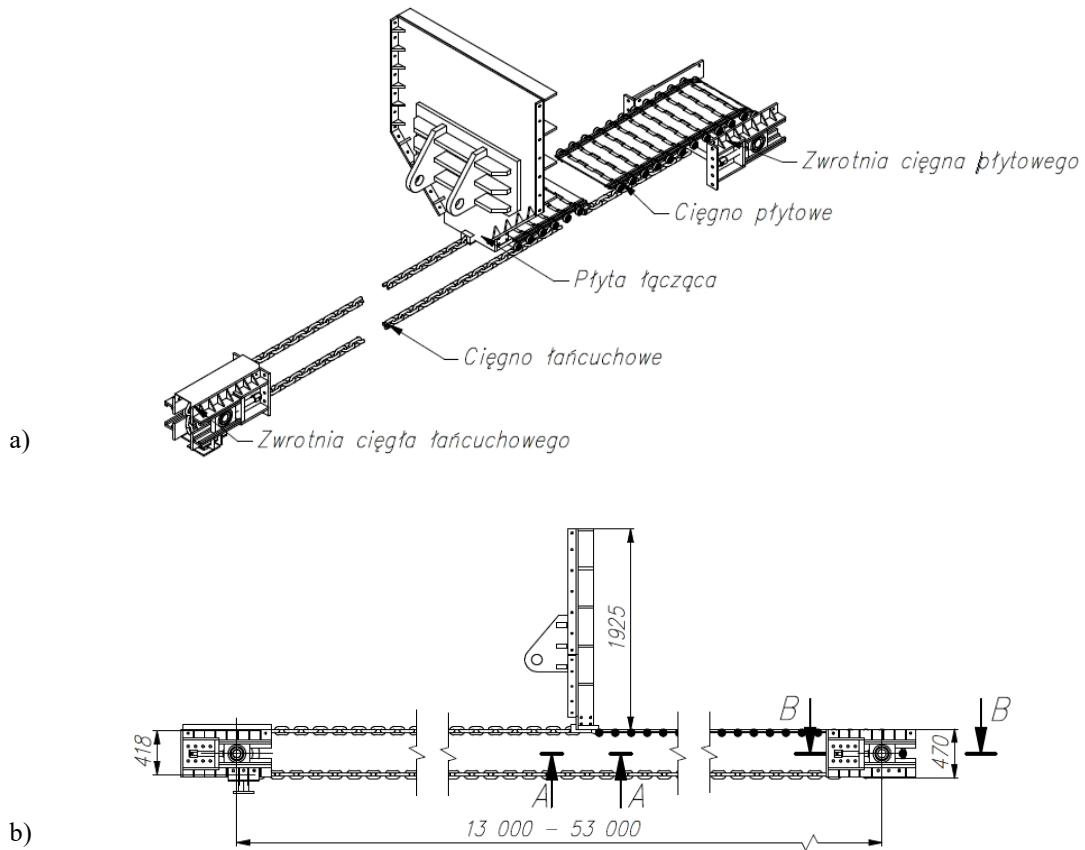
Zespół ciężna zbiornika złożony jest z części płytowej oraz łańcuchowej. Część płytowa współpracuje bezpośrednio ze skrzynią ładunkową, uczestnicząc w przemieszczaniu urobku. Segmenty ciężna pełnią funkcję dna skrzyni ładunkowej. Ciężno płytowe wykonane jest z elementów spawanych ze stali konstrukcyjnej gatunku S355J2G3. Na górnej i dolnej powierzchni płyt znajdują się elementy prowadzące, które

odpowiadają za wzajemne pozycjonowanie ciągu względem skrzyni ładunkowej oraz bębna zwrotnego. Dodatkowo pełnią one funkcję doszczelniającą na styku ciągu płytowego i segmentów skrzyni ładunkowej. Każdy segment ciągu współpracuje z dwoma stalowymi kołami jezdny, poruszającymi się po prowadnicach. Poszczególne płyty ciągu połączone są przy pomocy stalowego łącznika wykonanego z pręta z końcami gwintowanymi. Koła jezdne osadzone są na osiach łączników i zabezpieczone nakrętkami M20 samohamownymi (z wkładką teflonową). Zastosowanie tego typu połączenia eliminuje ryzyko luzowania się elementów podczas pracy urządzenia w warunkach obciążeń dynamicznych (Rys. 8.2.6).



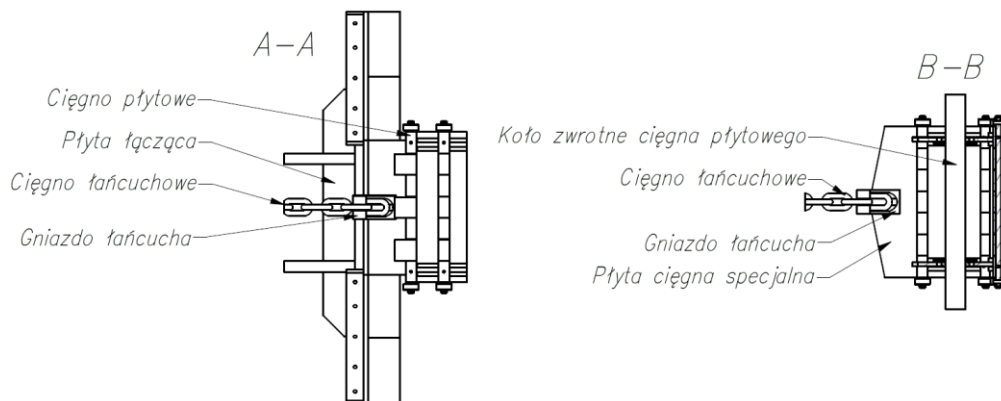
Rys. 8.2.6 Ciężno płytowe
a) budowa, b) główne wymiary

Drugą częścią ciągu jest łańcuch górniczy o rozmiarze 26x92. Część płytowa i łańcuchowa ciągu tworzą zamkniętą pętlę (Rys. 8.2.7). Zespół ciągu połączony jest ze skrzynią ładunkową za pośrednictwem płyty łączącej. Na rysunku 8.2.7 oznaczono przekroje A-A i B-B.



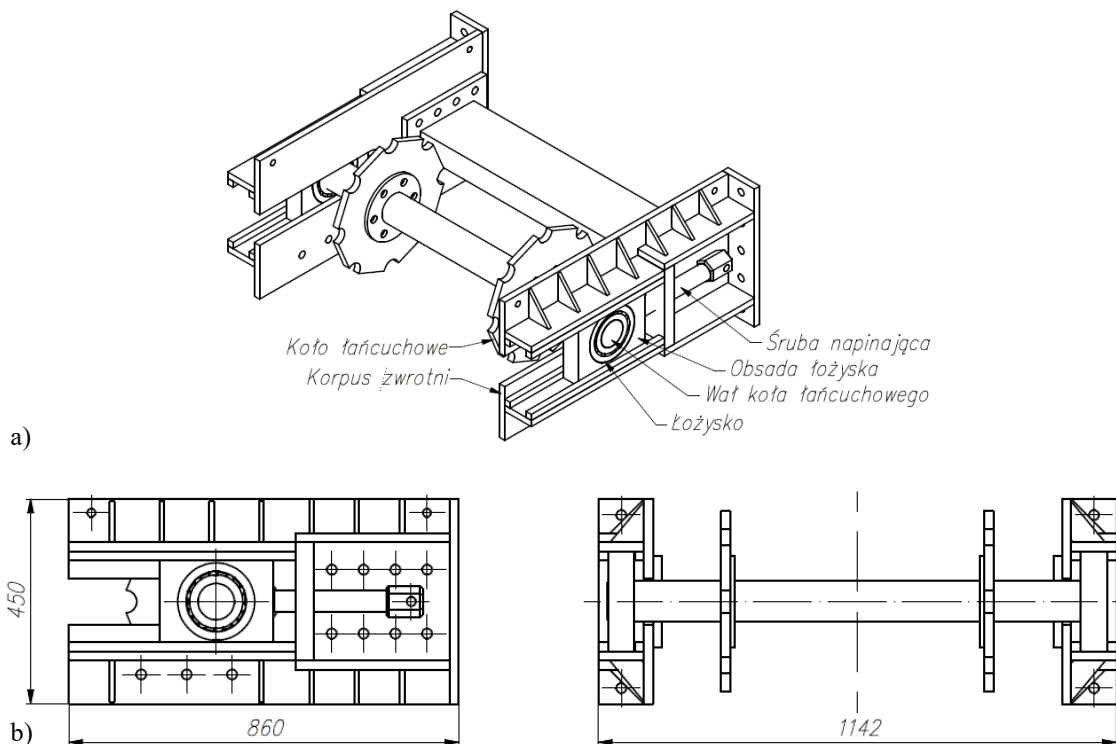
Rys. 8.2.7 Zespół cięgna
a) budowa, b) główne wymiary

Sposób połączenia cięgien płytowego i łańcuchowego przedstawiono na rysunku 8.2.8. Rozwiązanie opiera się na zastosowaniu gniazda łańcuchowego, które z jednej strony stanowi element płyty łączącej (szczegół A-A), a z drugiej strony jest częścią specjalnej płyty cięgna (szczegół B-B). Taka konfiguracja umożliwia szybkie, trwałe i bezpieczne połączenie układu, bez konieczności stosowania dodatkowych łączników mechanicznych. Złącze zapewnia trwałe połączenie podczas eksploatacji umożliwiając łatwy montaż i demontaż.

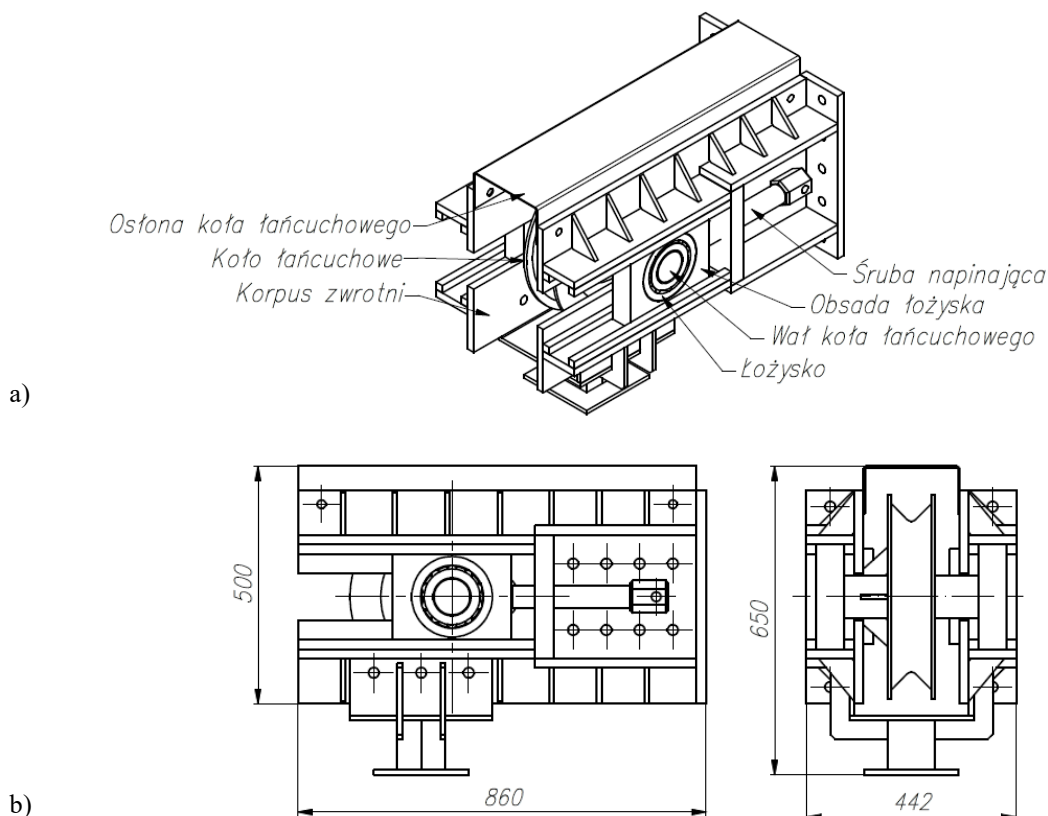


Rys. 8.2.8 Połączenie cięgna płytowego i łańcuchowego

Układ napinania zespołu ciągną oparty jest na współpracy ciągną ze zwrotnią ciągną płytowego (Rys. 8.2.9) i zwrotnią ciągną łańcuchowego (Rys. 8.2.10). Zwrotnie wyposażone są w śruby napinające współpracujące z suwliwymi obsadami łożysk tocznych wałów zwrotnych. Rozwiązanie to umożliwia kontrolowane wprowadzenie naciągu roboczego poprzez regulację położenia osi obrotu ciągną. Śruby napinające zostały osadzone w sposób umożliwiający ich swobodne obracanie. Współpracują z gwintowanymi elementami osadzonymi w bocznych ścianach modułów zwrotnych. Koniec każdej śruby opiera się bezpośrednio o obsadę łożyska, co pozwala na jej przemieszczenie podczas obracania śrubą. Regulacja umożliwia kompensację luzu roboczego ciągną. Mechanizm umożliwia regulację bez konieczności demontażu, ani ingerencji w ciągną.



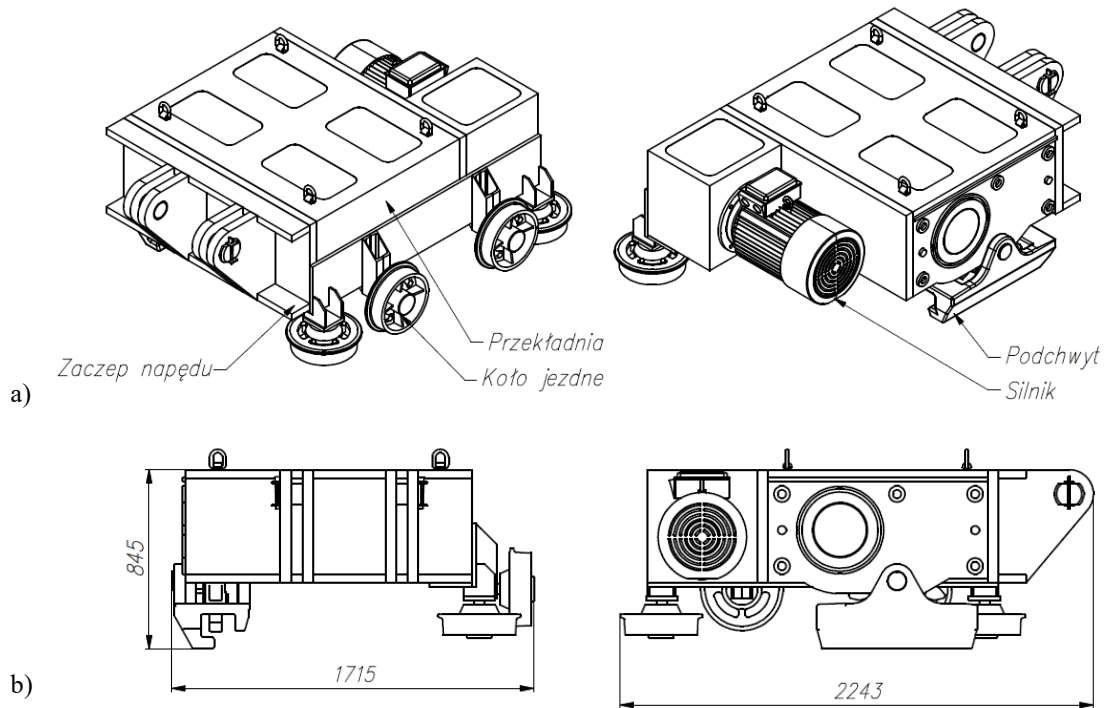
Rys. 8.2.9 Zwrotnia ciągną płytowego
a) budowa, b) główne wymiary



Rys. 8.2.10 Zwrotnia ciągną płytowego
a) budowa, b) główne wymiary

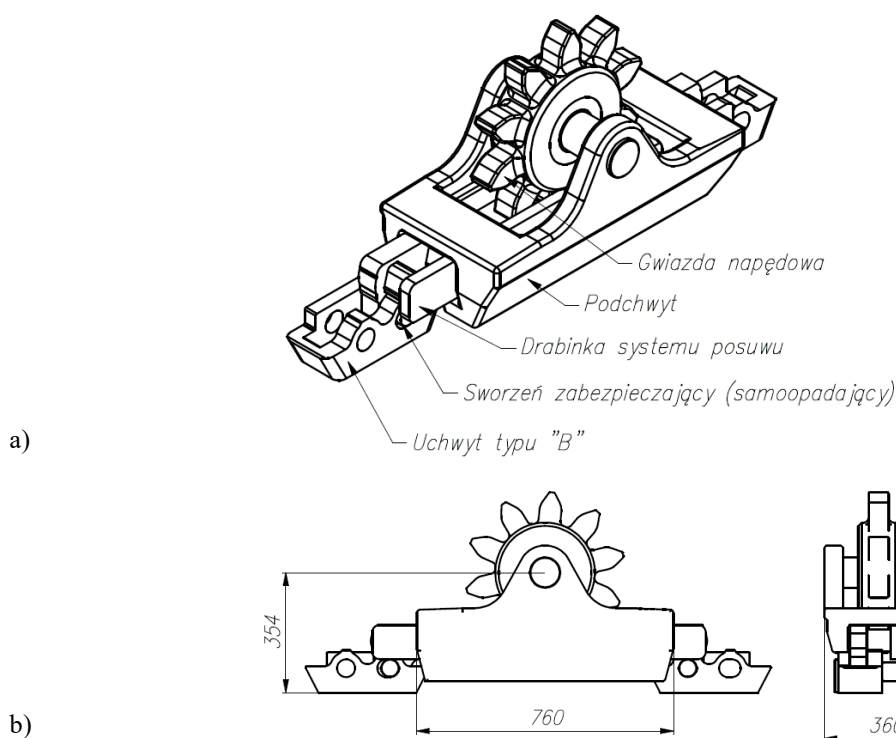
8.2.3 Jednostka napędowa

Na rysunku 8.2.11 przedstawiono jednostkę napędową zastosowaną w poziomym zbiorniku mechanicznym. Jest to zespół o mocy 22 kW, konstrukcja napędu jest powszechnie wykorzystywana w kombajnach ścianowych jako mechanizm realizujący funkcję posuwu. Kadłub jednostki wykonano jako konstrukcję spawaną, co umożliwia jego modyfikację oraz integrację z konstrukcją zbiornika. Jednym z elementów modyfikacji jest zastosowanie zintegrowanego zaczepu zbiornika, umożliwiającego bezpośrednie połączenie jednostki napędowej z segmentem napędowym skrzyni ładunkowej. Takie rozwiązanie ograniczy liczbę pośrednich elementów łączących napędu ze skrzynią ładunkową. Kolejnym elementem modernizacji jest zastąpienie płóz kołami łożyskowanymi. Zmiana ta prowadzi do redukcji oporów ruchu oraz zmniejszenia zużycia nawierzchni jezdnej. Zmiany konstrukcyjne kadłuba wpływają na uproszczenie całej jednostki, a dzięki zmniejszeniu gabarytów i masy na ułatwienie jej montażu oraz demontażu w warunkach wyrobiska górniczego.



Rys. 8.2.11 Jednostka napędowa
a) budowa, b) główne wymiary

Rysunek 8.2.12 przedstawia fragment układu przekazania napędu. Mechaniczna jednostka napędowa współpracuje z bezciągnowym systemem posuwu. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest możliwość przemieszczania napędu razem ze skrzynią ładunkową oraz układem ciągnym, co eliminuje konieczność trwałego montażu napędu w wyrobisku na palach fundamentowych. Układ oparty jest na współpracy podchwytu, gwiazdy napędowej oraz elementów systemu posuwu. Gwiazda zazębia się z poprzecznymi członami drabinki systemu posuwu, co pozwala na przekształcenie ruchu obrotowego na posuw liniowy. Drabinki mocowane są w uchwytych typu "B". Podchwyt napędu umożliwia prowadzenie napędu po drabinkach, zapewniając właściwe położenie napędu, w tym gwiazdy napędowej względem systemu posuwu.



Rys. 8.2.12 Sposób przekazania napędu w układzie gwiazda napędowa- drabinka systemu posuwu
a) budowa, b) główne wymiary

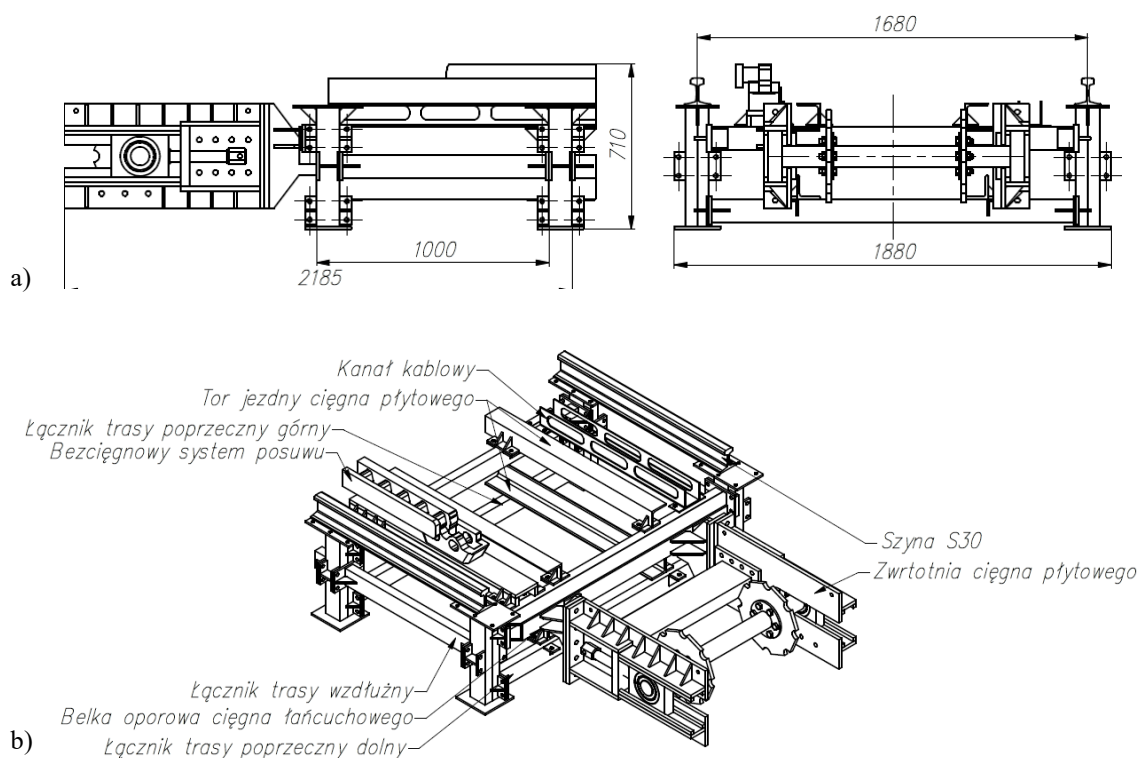
8.2.4 Zespół zwrotny ciągną płytowego

Poniższy rysunek (Rys. 8.2.13) przedstawia konstrukcję zespołu zwrotnego ciągną płytowego. Jego głównymi elementami są:

- wał zwrotny ciągną płytowego,
- koła zwrotne ciągną płytowego,
- obsady łożyska,
- belka oporowa ciągną płytowego,
- kanał kablowy,
- łączniki trasy wzdłużny oraz poprzeczne,
- podparcie trasy,
- szyny S30.

Zespół zwrotny ciągną płytowego odpowiada za zmianę jego kierunku ruchu. Na wale zwrotnym zespołu osadzone są symetrycznie dwa koła zwrotne, których profil geometryczny dopasowany jest do kształtu płyt ciągną. Zapewnia to precyzyjne prowadzenie ciągną podczas zmiany jego kierunku. Wał obsadzony jest w łożyskach tocznych, umożliwiających jego obrót oraz redukcję oporów ruchu. Belka oporowa ciągną łańcuchowego stanowi podstawę dla wału przez co przenosi siły wzdłużne

występujące w ciągnię łańcuchowym. Podparcie trasy stanowi konstrukcję, która przekazuje obciążenia pochodzące zarówno od masy własnej zbiornika, jak i od zgromadzonego urobku, bezpośrednio na podłoże wyrobiska. Szyny S30 pełnią funkcję toru jezdny dla modułu napędowego oraz skrzyni ładunkowej. Kanał kablowy, zlokalizowany wzdłuż konstrukcji zbiornika, służy do prowadzenia przewodów elektrycznych oraz ich ochrony w trakcie przemieszczenia napędu. Łączniki trasy (wzdłużne i poprzeczne) tworzą ramę nośną zbiornika, zapewniając jej sztywność oraz odporność na dynamiczne obciążenia występujące w trakcie pracy. Całość konstrukcji współpracuje z bezciągnowym systemem posuwu, którego elementy prowadzące (szyny, tor jezdny) są zintegrowane z ramą zbiornika, umożliwiając przemieszczanie zespołu napędowego wraz ze skrzynią ładunkową.



Rys. 8.2.13 Zespół zwrotny ciągnia płytowego
a) budowa, b) główne wymiary

8.2.5 Zespół zwrotny ciągnia łańcuchowego

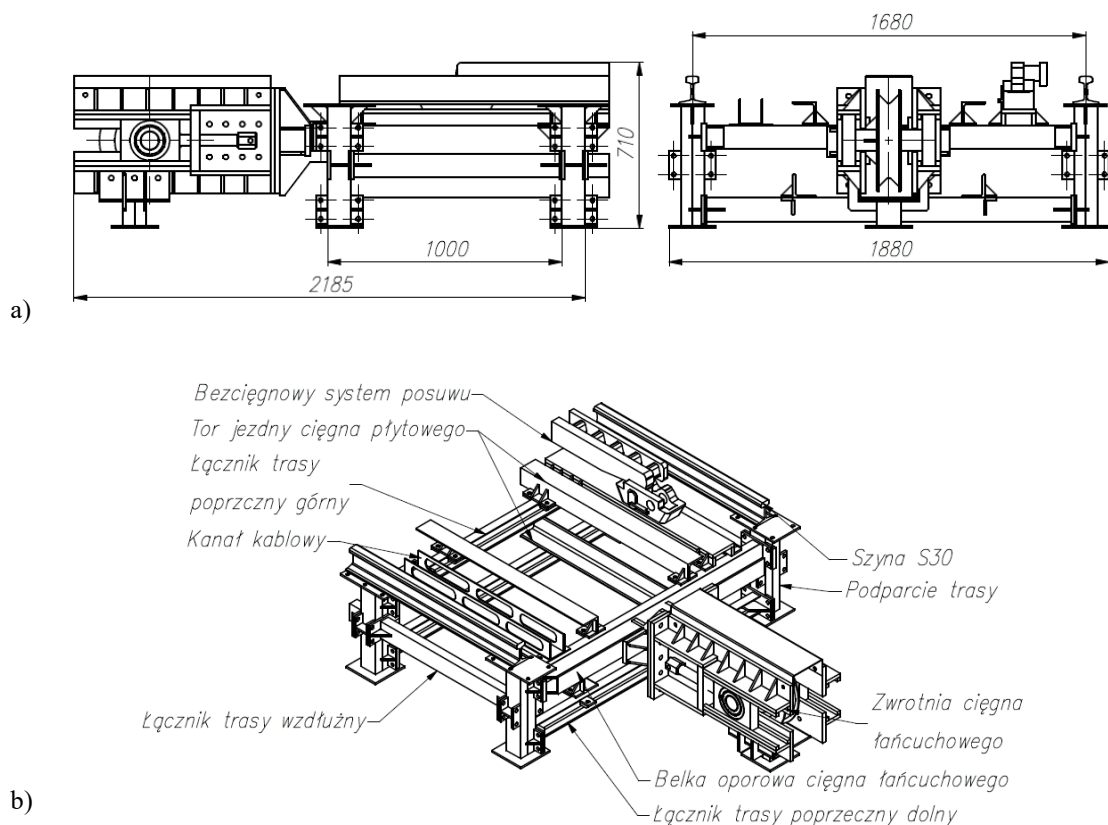
Zespół zwrotny ciągnia łańcuchowego (Rys. 8.2.14) pełni funkcję analogiczną do zespołu zwrotnego ciągnia płytowego tj. odpowiada za zmianę kierunku ruchu ciągnia łańcuchowego.

Głównymi elementami zespołu zwrotnego ciągnia łańcuchowego są:

- wał zwrotny ciągnia łańcuchowego,
- koło zwrotne ciągnia łańcuchowego,

- obsady łożyska,
- belka oporowa ciągną łańcuchowego,
- kanał kablowy,
- łączniki trasy wzdłużny oraz poprzeczne,
- podparcie trasy,
- szyny S30.

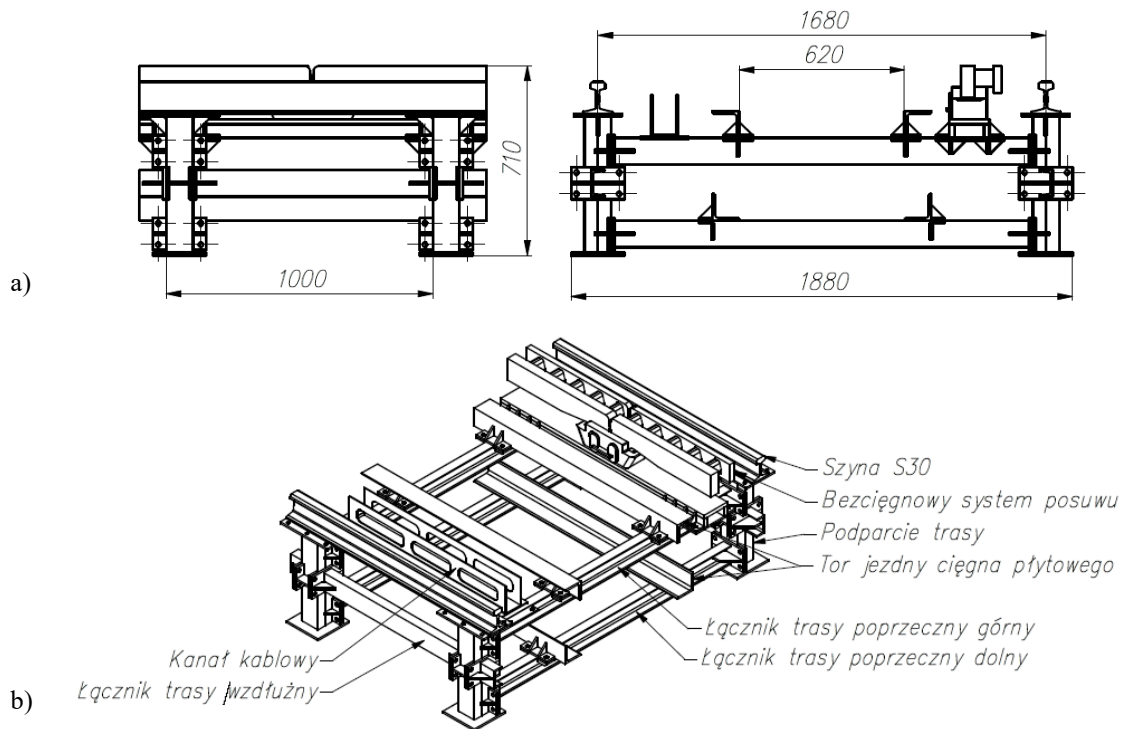
Zespoły zwrotne ciągną płytowego oraz łańcuchowego posiadają wspólną konstrukcję nośną. Różnica polega na zastosowaniu innych kół zwrotnych dostosowanych do rodzaju ciągną. Oba wykorzystują wały zwrotne osadzone w obsadach łożyskowych. Zarówno w module łańcuchowym, jak i płytowym zastosowano łączniki trasy (wzdłużne i poprzeczne), które tworzą sztywną ramę konstrukcyjną. Podparcia trasy oraz szyny typu S30 stanowią elementy nośne zbiornika, przenosząc obciążenia na podłoże. Wzdłuż konstrukcji prowadzony jest kanał kablowy, przeznaczony do układania i ochrony przewodów elektrycznych. Główna różnica pomiędzy nimi dotyczy zastosowanego elementu roboczego: zespół łańcuchowy wyposażony jest w jednostronne koło łańcuchowe, natomiast w module płytowym zastosowano dwa koła zwrotne rozmieszczone symetrycznie względem osi trasy zbiornika. Oba rozwiązania zaprojektowano z myślą o współpracy z bezciągnowym systemem posuwu, w którym elementy prowadzące (szyny i prowadnice) są zintegrowane z ramą zespołu.



Rys. 8.2.14 Zespół zwrotny ciężna łańcuchowego
a) budowa, b) główne wymiary

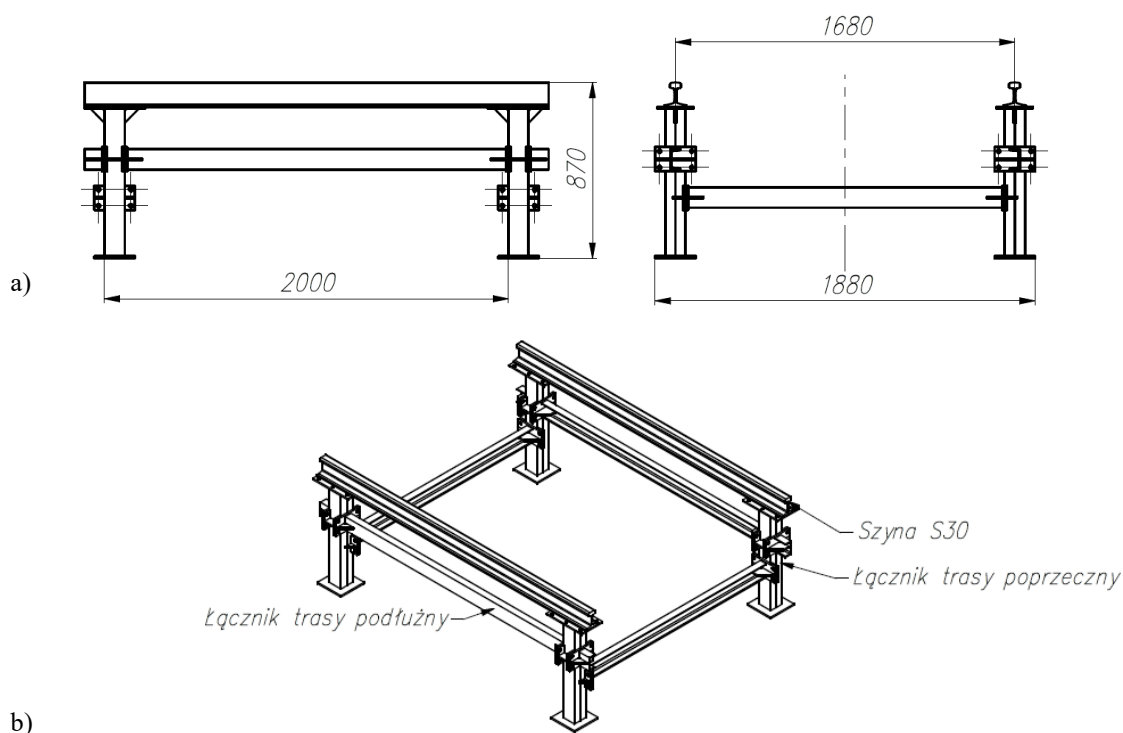
8.2.6 Konstrukcja nośna główna i pomocnicza

Konstrukcja nośna poziomego zbiornika mechanicznego podzielona jest na dwie części: główną oraz pomocniczą. Główna konstrukcja nośna (Rys. 8.2.15) umożliwia prowadzenie segmentów skrzyni ładunkowej obciążonej urobkiem oraz zespołu napędowego. Jest zbudowana z zestawu powtarzalnych modułów połączonych w sposób umożliwiający montaż, demontaż lub ewentualnie rozbudowę. Wzdłuż głównej konstrukcji nośnej przebiega kanał kablowy oraz tor jezdny ciężna płytowego. Część główna trasy współpracuje z systemem bezciężnowego posuwu, którego prowadnice osadzone są na ramie nośnej.



Rys. 8.2.15 Konstrukcja nośna główna
a) budowa, b) główne wymiary

Pomocnicza konstrukcja nośna (Rys. 8.2.16) stanowi niezależną ramę wsporczą, która przejmuje obciążenia z konstrukcji pustej skrzyni ładunkowej i przekazuje je na podłoże wyrobiska. Jej modułowa budowa umożliwia łatwe dopasowanie długości i konfiguracji do warunków. W jej skład wchodzi m.in. podparcia oraz łączniki trasy (wzdłużne i poprzeczne).



Rys. 8.2.16 Konstrukcja nośna pomocnicza- budowa
a) budowa, b) główne wymiary

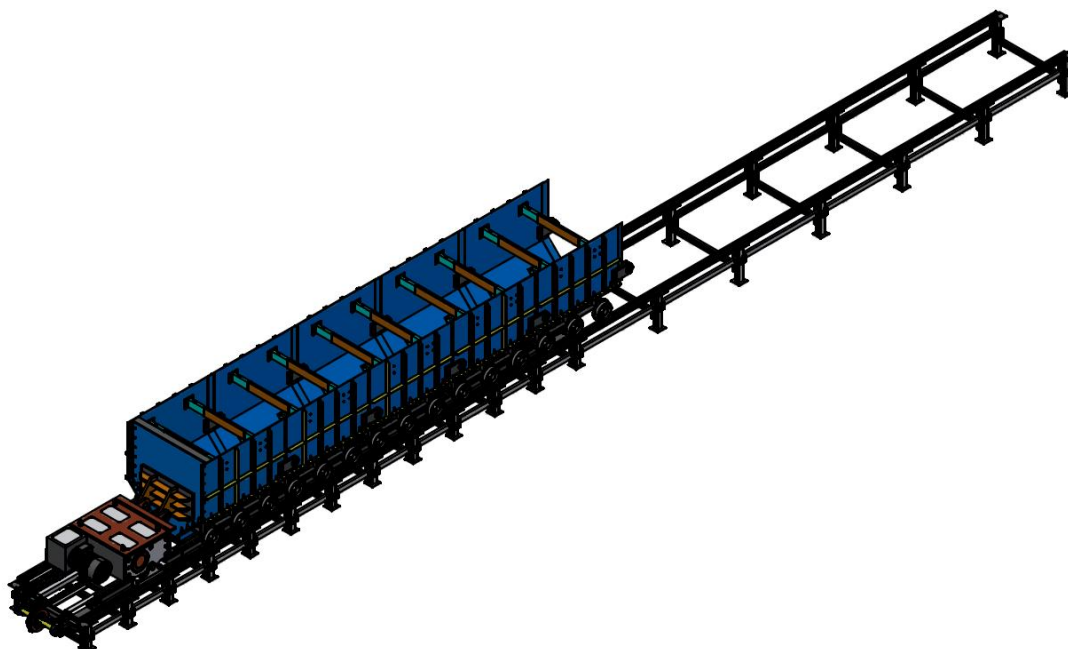
Podsumowując, poniżej przedstawiono główne cechy zbiornika PZM-250:

- prosta, modułowa budowa urządzenia, umożliwiająca montaż, demontaż i rozbudowę w zależności od potrzeb eksploatacyjnych,
- wykorzystanie typowych części i materiałów (blachy, profile, pręty walcowane, szyny), dostępnych w zakładzie górniczym,
- ładowność zbiornika określona w jego oznaczeniu (symbol urządzenia definiuje ładowność skrzyni ładunkowej),
- konstrukcja zapewnia łatwy dostęp do połączeń śrubowych i łożysk bez konieczności demontażu elementów urządzenia,
- możliwość montażu urządzenia bezpośrednio na spągu lub na dźwigarach osadzonych na palach fundamentowych, co ogranicza wpływ górotworu na konstrukcję.

8.3 Symulacja dynamiczna pracy poziomego zbiornika mechanicznego

Jednym z elementów rozprawy było opracowanie modelu dynamicznego z wykorzystaniem środowiska do symulacji ruchu układów wielobryłowych. Celem analizy była ocena współpracy skrzyni ładunkowej, modułu napędowego oraz cięgna płytowego. Do badań wykorzystano moduł Dynamic Simulation dostępny w oprogramowaniu Autodesk Inventor 2024, który umożliwił przeprowadzanie symulacji mechanicznych z uwzględnieniem kontaktów, sił zewnętrznych i oporów ruchu. Analiza objęła ocenę zachowania całego zespołu oraz uwzględniała wszystkie istotne oddziaływania układu. Wyniki pozwolą określić m.in. siły reakcji w połączeniach elementów wynikające z oporów ruchu występujących w układzie. Stanowi to podstawę dalszej oceny wytrzymałości konstrukcji i analizy mocy napędu.

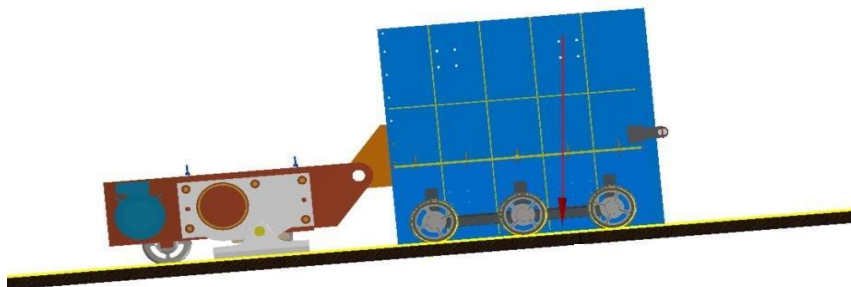
Model wyjściowy zbiornika rysunek 8.3.1 przedstawia konstrukcję przed wprowadzeniem uproszczeń niezbędnych do przeprowadzenia symulacji. Zawiera wszystkie elementy układu, w tym skrzynię ładunkową, układ napędowy, koła jezdne, prowadnice oraz cięgna płytowe i łańcuchowe. Model ten stanowił punkt odniesienia do opracowania wersji uproszczonej wykorzystywanej w środowisku Dynamic Simulation.



Rys. 8.3.1 Model wyjściowy zbiornika

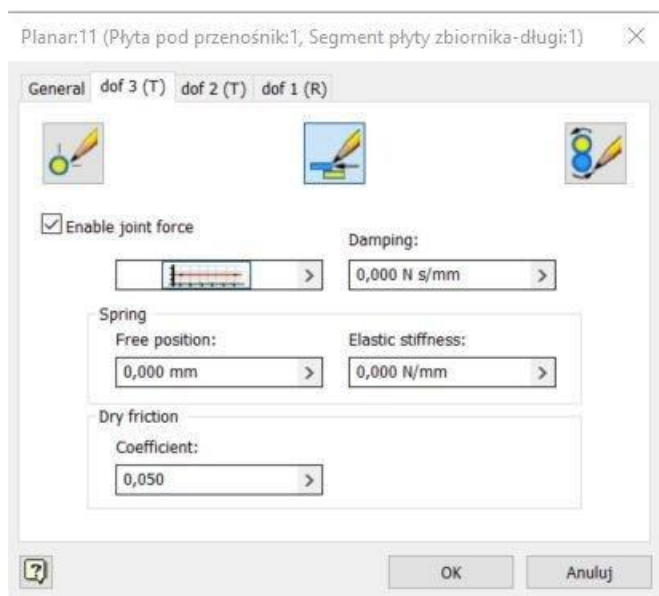
W pierwszym etapie analizy przygotowano uproszczony wirtualny prototyp urządzenia (Rys. 8.3.2). Obejmował on m.in. skrzynię ładunkową z układem kół

jezdnych i prowadnic, moduł napędowy oraz ciągną. Zdefiniowano wiązania odwzorowujące rzeczywiste połączenia mechaniczne pomiędzy elementami. Kompletny model został przeniesiony do modułu Dynamic Simulation, w którym wykonano analizę.



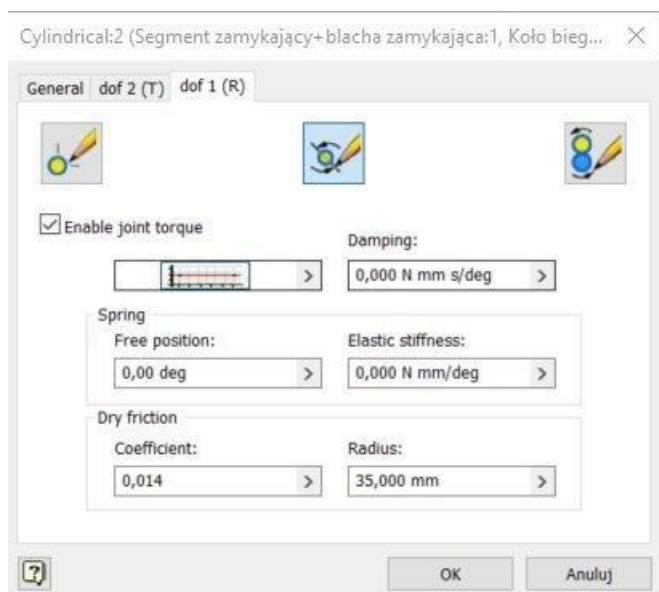
Rys. 8.3.2 Uproszczony model zbiornika (nachylenie 5 stopni)

Analizę rozpoczęto od nadania kąta pochylenia podłużnego dwu szynom, które stanowią tor jezdny modelu, a następnie ich unieruchomienie. Spowoduje to umieszczenie toru jezdnych w grupie elementów nieruchomych. Dzięki zaznaczonej funkcji automatycznej konwersji wiązań do połączeń standardowych uzyskano m.in. połączenia płaskie pomiędzy torem jezdny a napędem oraz między torem, a skrzynią ładunkową. Pośród skrzyni a kołami występuje połączenie "walcowe". Konwersja automatyczna oraz dodatkowe ustawienia umożliwiła uzyskanie rzeczywistych stopni swobody w analizowanym układzie. Dodano połączenie toczne typu „walec na płaszczyźnie” pomiędzy kołami, a szynami co pozwoliło na uzyskanie efektu toczenia. Zdefiniowano współczynniki tarcia pomiędzy torem jezdny ciągną, a ciągnem płytowym (Rys. 8.3.3). W modelu aktywowano opcję *Enable joint force*, umożliwiającą uwzględnienie reakcji kontaktowych. Parametry tłumienia i sprężystości pozostawiono na poziomie zerowym, przyjmując sztywne połączenie bez uwzględnienia odkształcalności. Wartość współczynnika tarcia suchego przyjęto jako 0,05, co stanowi uproszczone odwzorowanie oporów przesuwu między elementami układu.



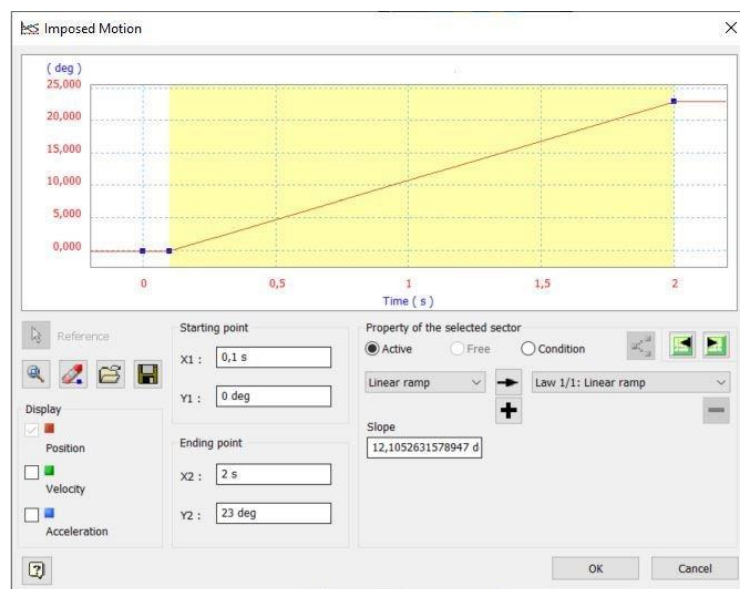
Rys. 8.3.3 Zdefiniowanie oporu ciągną płytowego

Dzięki temu możliwe było odwzorowanie rzeczywistych oporów toczenia w układzie transportowym. Na ciągną płytową nałożono siłę odpowiadającą ciężarowi urobku, działającą pionowo w dół, co umożliwiło analizę wpływu masy transportowanego materiału. Każdemu z kół przypisano wartość współczynnika tarcia zależną od promienia toczenia. Aktywowano opcję *Enable joint torque*, co pozwoliło uwzględnić moment oporu w połączeniu. Parametry tłumienia i sztywności sprężystej pozostawiono na poziomie zerowym, przyjmując dominujący wpływ tarcia suchego. W sekcji *Dry friction* wprowadzono współczynnik tarcia równy 0,014 oraz promień osi koła o wartości 35 mm, zgodny z geometrią modelu (Rys. 8.3.4).



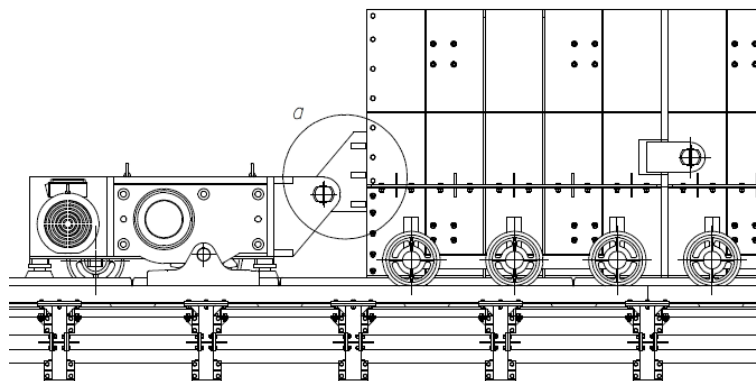
Rys. 8.3.4 Zdefiniowanie oporu toczenia w połączeniu obrotowym

Symulację przeprowadzono w przedziale czasowym 2 sekund, co pozwoliło na pełną obserwację ruchu zespołu oraz uzyskania wszystkich istotnych wielkości dynamicznych. Przy użyciu funkcji *Imposed Motion* zdefiniowano liniowy przyrost kąta od 0° do 23° w przedziale czasu od 0,1 s do 2 s co przy średnicy koła napędowego o wartości 350 mm przekłada się na uzyskanie prędkości liniowej całego składu 35 mm/s (Rys. 8.3.5).

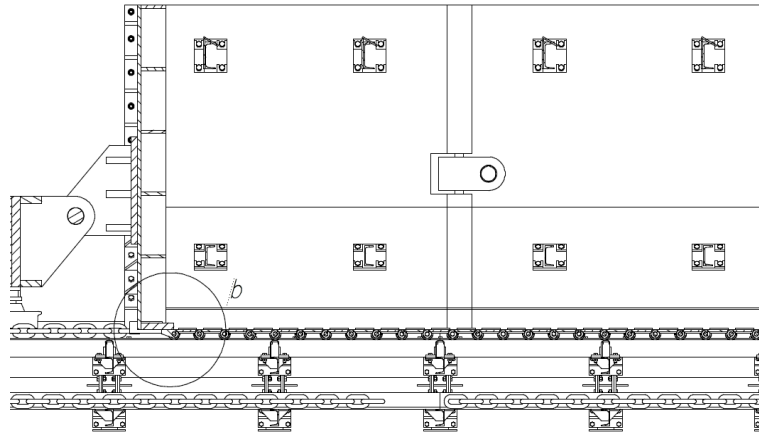


Rys. 8.3.5 Ustawienia parametrów wymuszenia dla koła napędowego

Podczas symulacji wyznaczono siły reakcji w połączeniu pomiędzy skrzynią ładunkową a napędem (Rys. 8.3.6) oraz połączeniu pomiędzy skrzynią a ciągnem płytowym (Rys. 8.3.6).



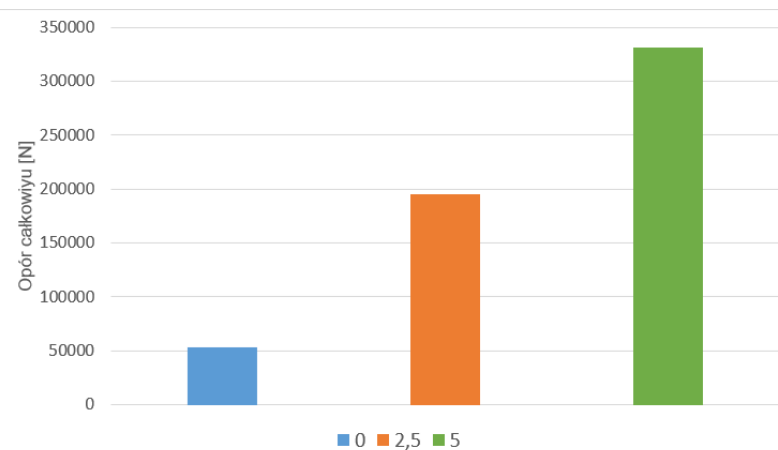
Rys. 8.3.6 Połączenie skrzyni ładunkowej z napędem



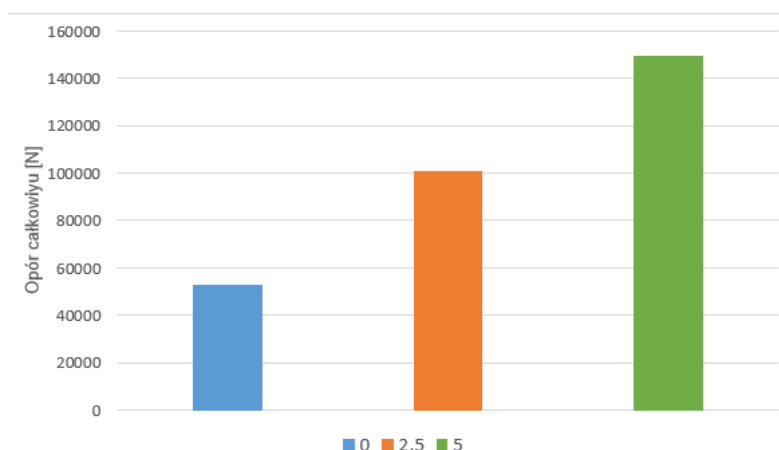
Rys. 8.3.7 Połączenie skrzyni ładunkowej z ciągnem płytowym.

Wartości sił reakcji odczytano wykorzystując narzędzie modułu symulacji dynamicznej "Grafer wyjściowy". Otrzymane siły reakcji wynosiły:

- w połączeniu pomiędzy napędem i skrzynią ładunkową (Rys. 8.3.8) 331 429 [N],
- w połączeniu pomiędzy skrzynią a ciągnem płytowym (Rys. 8.3.9) 149 258 [N].



Rys. 8.3.8 Siły reakcji rejestrowane między napędem, a zbiornikiem



Rys. 8.3.9 Siły reakcji rejestrowana między zbiornikiem a ciągnym płytowym

Porównanie wyników numerycznego modelu symulacyjnego z uproszczonym modelem obliczeniowym potwierdza zbieżność wartości sił reakcji występujących w układzie poziomego zbiornika mechanicznego. Powyższe wykresy wskazują, że największa wartość siły rejestrowana jest na styku napędu ze zbiornikiem. Dla największego analizowanego nachylenia urządzenia w wyrobisku wynoszącego 5°, wartość siły reakcji pomiędzy napędem, a skrzynią ładunkową zgodnie z obliczeniami uproszczonego modelu analitycznego wynosi 327 642[N]. Porównanie tej wartości z wynikiem uzyskanym w modelu numerycznym potwierdza jej bliską zgodność z sumaryczną siłą reakcji uzyskaną pomiędzy napędem, a zbiornikiem. Różnica pomiędzy modelem symulacyjnym, a obliczeniowym wynosi 1,2%. Wyniki wskazują, że największe siły oporu w układzie koncentrują się na styku napędu i zbiornika. W związku z tym siła ta powinna być traktowana jako wartość referencyjna przy dalszych etapach projektowania. Zgodność wyników analitycznych z wynikami symulacji numerycznej jednoznacznie potwierdza trafność przyjętej metodyki obliczeniowej oraz wiarygodność zastosowanego narzędzia symulacyjnego w dynamicznej analizie złożonych układów transportowych. Analiza numeryczna została przeprowadzona z wykorzystaniem rzeczywistych danych geometrycznych i materiałowych, natomiast obliczenia uproszczone wykonano samodzielnie zgodnie z opracowanym autorskim modelem obliczeniowym.

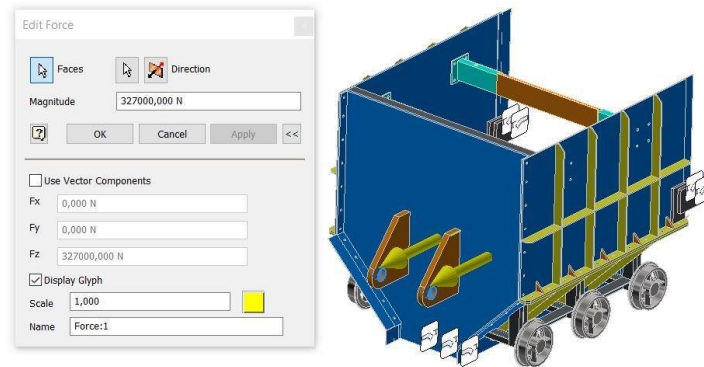
8.4 Analiza wytrzymałościowa metodą MES

Celem analizy było określenie stanów naprężeń segmentu napędowego, ze szczególnym uwzględnieniem blachy zamykającej stanowiącej połączenie skrzyni z napędem. Dodatkowo wyznaczono wartość współczynnika bezpieczeństwa

dla obciążenia odpowiadającego rzeczywistym warunkom pracy. Analizę przeprowadzono metodą elementów skończonych MES przy wykorzystaniu środowiska symulacyjnego Autodesk Inventor 2024. Model został poddany analizie statycznej z uwzględnieniem rzeczywistych warunków podparcia i obciążenia. Zastosowano automatyczne generowanie siatki typu Mesh 3D Solid. Jako warunki brzegowe przyjęto odpowiednio:

- siłę skupioną o wartości 327 kN przyłożoną do zaczepu blachy zamykającej
- utwierdzenie przyłożone w miejscu połączenia z drugą skrzynią oraz przenośnikiem płytowym. Wartość przyjętej siły wynika z obliczeń analitycznych, a także z badań symulacyjnych dla najmniej korzystnych warunków pracy projektowanego zasobnika (Rys. 8.4.1).

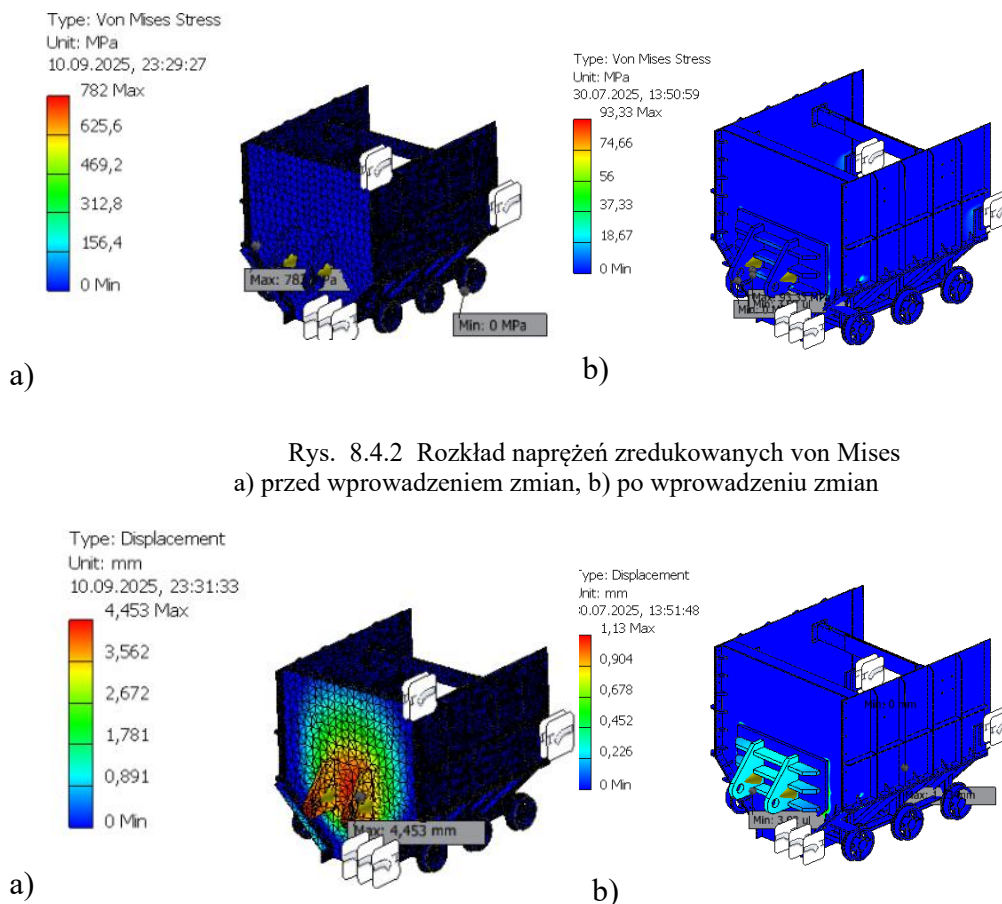
W początkowym etapie analiz konstrukcja nie spełniała przyjętych kryteriów wytrzymałościowych (Rys. 8.4.2a, Rys. 8.4.3a, Rys. 8.4.4a). Współczynnik bezpieczeństwa w wybranych obszarach spadał poniżej założonej wartości granicznej. W górnictwie podziemnym przyjmuje się jego minimalną wartość równą 3. Ma to na celu zagwarantowanie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji w zmiennych warunkach eksploatacji. W odpowiedzi na uzyskane wyniki wprowadzono szereg modyfikacji mających na celu zwiększenie nośności elementów. Zmiany obejmowały zastosowanie materiału o wyższej wytrzymałości, tj. blachy stalowej gatunku S355J2G3 zamiast pierwotnie przyjętej gatunku S235JR. Dodatkowo wzmocniono konstrukcję blachy zamykającej poprzez zwiększenie grubości jej elementów oraz zmieniono geometrię gniazd i otworów pod sworznie mocujące moduły zbiornika. Pierwotnie zakładano analizę wyłącznie blachy zamykającej. Jednak w celu uzyskania bardziej wiarygodnego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy oraz uniknięcia błędów wynikających z uproszczonego zadania warunków brzegowych, w szczególności utwierdzenia, zdecydowano się przeprowadzić analizę całego elementu wraz z segmentem napędowym. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie symulacji zbliżonej do rzeczywistego rozkładu sił i reakcji.



Rys. 8.4.1 Warunki brzegowe dla analizy

Analiza wykazała maksymalne naprężenia w miejscu koncentracji sił przy krawędzi otworów montażowych blachy zamykającej z zaczepem napędu. Wartości maksymalne wyniosły odpowiednio:

- naprężenie zredukowane von Mises (Rys. 8.4.2b) 93,33 [MPa]
- przemieszczenie w układzie wyniosło (Rys. 8.4.3b) 1,13 [mm]

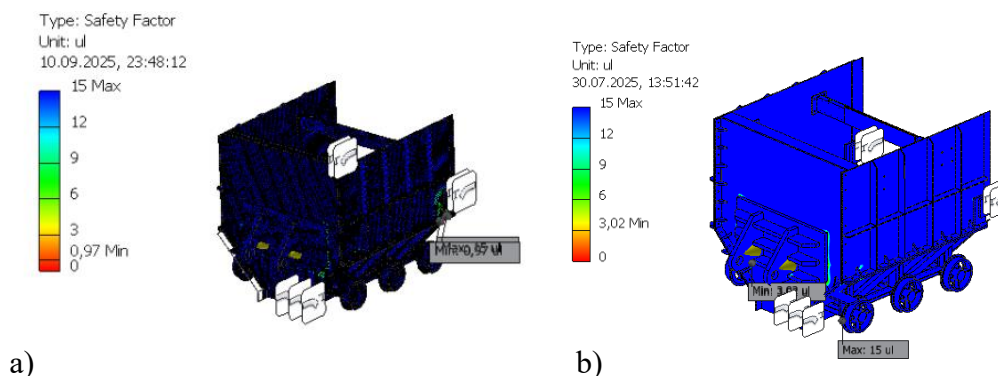


Rys. 8.4.2 Rozkład naprężeń zredukowanych von Mises
a) przed wprowadzeniem zmian, b) po wprowadzeniu zmian

Rys. 8.4.3 Rozkład przemieszczeń w układzie
a) przed wprowadzeniem zmian, b) po wprowadzeniu zmian

Niska wartość przemieszczenia wskazuje na odpowiednią sztywność elementu w badanym zakresie obciążeń. W wyniku przeprowadzonych modyfikacji

konstrukcyjnych, uzyskano wartości współczynnika bezpieczeństwa przekraczające wartość 3 (Rys. 8.4.4b). Został on wyznaczony na podstawie dopuszczalnej granicy plastyczności materiału. Obszary o najniższym współczynniku występowały w rejonie otworów technologicznych, jednak nie przekraczały granicznych wartości dopuszczalnych.



Rys. 8.4.4 Rozkład współczynnika bezpieczeństwa
a) przed wprowadzeniem zmian, b) po wprowadzeniu zmian

Podsumowując, wynikiem przeprowadzonej symulacji MES była ocena stanu naprężeń oraz przemieszczeń segmentu napędowego w odwzorowanych warunkach pracy. Początkowo konstrukcja nie spełniała kryterium minimalnego współczynnika bezpieczeństwa, jednak po wprowadzeniu zmian materiałowych i geometrycznych osiągnięto wartości przekraczające wymagany poziom współczynnika.

9 Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozprawa doktorska koncentruje się na problematyce zwiększenia efektywności transportu urobku w podziemnych zakładach górniczych, przy czym wszystkie działania badawcze realizowano w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A., będącej źródłem wiedzy przemysłowej. Rezultatem pracy jest przygotowanie projektu poziomego zbiornika mechanicznego PZM-250, umożliwiającego realizację trzech procesów technologicznych: retencji, separacji skały płonnej oraz stabilizacji strugi urobku.

Poniżej przedstawiono zakres zrealizowanych prac i zestawienie uzyskanych rezultatów:

1. Analiza istniejącej infrastruktury transportowej i informacje eksploatacyjne wykazały, że niestabilność strugi urobku, wynikająca zmiennej wydajności przodków chodnikowych i ścianowych oraz z przestojów technologicznych powoduje powstawanie zakłóceń w przepływie urobku.
2. Przeprowadzono testy in-situ selektywnego urabiania w przodkach chodnikowych, których celem było odseparowanie skały płonnej ze strugi urobku. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość skutecznego oddzielenia frakcji skały płonnej trudnej do gospodarczego wykorzystania, co w połączeniu z retencją mechaniczną pozwala na poprawę jakości urobku kierowanego do zakładu przeróbczego.
3. Kwerenda literatury umożliwiła szczegółową analizę światowych, współczesnych i historycznych rozwiązań technicznych, a wybór najlepszego stanowił podstawę prowadzonych prac koncepcyjnych i projektowych.
4. W celu wyznaczenia oporów ruchu i obliczenia mocy napędu opracowano algorytm obliczeniowy, który wykorzystano do realizacji projektu i doboru podzespołów zbiornika.
5. Dobrano parametry konstrukcyjno-ruchowe i zaprojektowano poziomy zbiornik mechaniczny PZM-250, którego funkcją jest stabilizacja nadawy, czasowa retencja urobku oraz separacja zanieczyszczeń powstających podczas drażenia przodków chodnikowych. Dokumentacja zbiornika stanowi załącznik do niniejszej rozprawy.
6. Dobór napędu zbiornika przeprowadzono z wykorzystaniem metody APEKS, co umożliwiło wybranie optymalnego wariantu pod względem technicznym, eksploatacyjnym i kosztowym.

7. Opracowano i przedstawiono trzy podstawowe algorytmy sterowania zbiornikiem realizujące funkcje retencji, stabilizacji strugi i separacji skały pływnej zintegrowane w system zarządzania pracą urządzenia.
8. Analiza efektywności rozwiązania odbyła się w cyfrowym środowisku symulacyjnym, z wykorzystaniem modelu dyskretnego. Analiza trzech wariantów organizacji odstawy z zastosowaniem mechanicznych zbiorników retencyjnych wykazała, że największą skuteczność osiąga się przy ich wprowadzeniu przy przodkach ścianowych i chodnikowych.

Zbiornik posiada konstrukcję modułową i jest dostosowany do warunków zagrożenia metanowego i pyłowego. Przystosowany jest do szybkiego montażu, łatwego serwisu oraz integracji z systemami sterowania kopalni. Rozwiązanie ma charakter uniwersalny i skalowalny, możliwy do wdrożenia nie tylko w LW „Bogdanka” S.A., ale również w innych podziemnych zakładach górniczych. Opracowany projekt zbiornika stanowi odpowiedź na rzeczywiste problemy eksploatacyjne i tworzy podstawę do dalszych prac w kierunku rozwoju systemów transportowych w górnictwie.

Literatura

- [1] J. Antoniak, "Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach Wydanie drugie całkowicie zmienione," Wydawnictwo Śląsk., Katowice, 1990.
- [2] J. Suchoń, *Górnictwo przenośniki zgrzebłowe. Budowa i zastosowanie*. 2012.
- [3] R. Kirijia and L. Shyrin, "Reducing the energy consumption of the conveyor transport system of mining enterprises," *E3S Web Conf.*, vol. 109, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201910900036.
- [4] V. Okolnishnikov, "A Simulation Model of Longwall Coal Mining," vol. 91, no. Msbda, pp. 1–5, 2019, doi: 10.2991/msbda-19.2019.1.
- [5] V. Okolnishnikov, S. Rudometov, and S. Zhuravlev, "Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 993–999, 2016, doi: 10.48084/etasr.625.
- [6] W. Lesiecki, *Transport kopalniany. Część I. Odstawa urobku*. Katowice: Państwowe Wydawnictwa Techniczne, 1951.
- [7] J. Antoniak, "Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym: energooszczędne." Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010
- [8] J. Antoniak, *Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
- [9] J. Antoniak, *Przenośniki taśmowe. Wprowadzenie do teorii obliczenia*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.
- [10] J. Wolski, "Wpływ wzrostu koncentracji wydobywania na projektowanie dołu kopalni węgla kamiennego," *Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej*, vol. 193, pp. 23–51, 1967.
- [11] M. Hardygóra, T. Żur, *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk., 1996.
- [12] D. Mazurkiewicz, *Studium wybranych aspektów diagnostyki eksploatacyjnej transportu taśmowego*. Politechnika Lubelska, 2011.
- [13] R. Polak, "Modele symulacyjne w wielokryterialnej analizie procesu transportu urobku w kopalniach podziemnych," Kraków, 2021.
- [14] W. Kawalec, N. Suchorab, M. Konieczna-Fuławka, and R. Król, "Specific energy consumption of a belt conveyor system in a continuous surface mine," *Energies*, vol. 13, no. 19, 2020, doi: 10.3390/en13195214.
- [15] J. Antoniak, "Przedsięwzięcia techniczne zmniejszające energochłonność górniczych przenośników taśmowych," pp. 42–51, 2010.
- [16] M. Konieczna-Fuławka, "Energy-Saving Solutions Applied in Belt Conveyors: A Literature Review," *Energies*, vol. 18, no. 12, 2025, doi: 10.3390/en18123019.
- [17] J. Ji, C. Miao, X. Li, and Y. Liu, "Speed regulation strategy and algorithm for the variable-belt-speed energy-saving control of a belt conveyor based on the material flow rate," *PLoS One*, vol. 16, no. 2 February, pp. 1–14, 2021, doi:10.1371/journal.pone.0247279.

- [18] P. Kulinowski, M. Kopacz, R. Polak, and A. Dyczko, "Opracowanie modelu symulacyjnego odstawy urobku w LW do 2034 r." IGSMiE, Kraków, pp. 1–192, 2015.
- [19] J. Koczwar, "Prezentacja nt. problemów bezpiecznej eksploatacji przenośników taśmowych" 2007.
- [20] Ł. Cieślik, P. Kochaj, D. Osowski, and P. Cynkusz, "Rozwój transportu przenośnikami taśmowymi w podziemnej kopalni węgla kamiennego na wybranych przykładach wdrożonych w Lubelski Węgiel Bogdanka S.A.," Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie, 2023.
- [21] Cyrnek C. et al., "Opracowanie koncepcji poprawy jakości urobku poprzez wstępne oddzielenie kamienia na dole i jego selektywny transport. Kraków, 2001". (dokument niepublikowany).
- [22] K. Bogdan and G. Jaremi, "Materiały XV Międzynarodowego Symposium pt.: Nowe rozwiązania w transporcie przenośnikami taśmowymi. Zakopane 2007," 2007, pp. 97–101.
- [23] Strona internetowa Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A. "www.lw.com.pl." (dostęp 04.2025).
- [24] J. Borowiec and J. Magierski, "Fizykochemiczna charakterystyka odpadów kopalnianych LZW w aspektach możliwości ekologicznej ich utylizacji," Zesz. Probl. postępow. Nauk Rol., vol. 475, pp. 245–251, 2001.
- [25] J. Gall, A. Golonka, and A. Paluszek, "Załadownia urobku węgla i/lub skały płonnej," PL 63255, 2006.
- [26] J. Łobejko et al., "Sposób i układ do wzbogacania surowca węglowego w wyrobiskach podziemnych kopalni," PL 188943, 2002.
- [27] K. Kwiatkowski et al., "Ocena celowości prowadzenia eksploatacji systemem komorowo-filarowym w częściach pokładów 382 i 385 / 2 nie przewidzianych do lokowania odpadów w zrobach zabierek," Bogdanka, 2010 (materiały niepublikowane).
- [28] W. Sikora, "Lokowanie odpadów górniczych i elektrownianych w kopalniach," Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, vol. 224, pp. 1–239, 1995.
- [29] M. Kopacz, "Ocena kosztów gospodarki skałą płonną w funkcji zmiennego poziomu współczynnika uzysku węgla netto na przykładzie kopalni węgla kamiennego," Gospod. Surowcami Miner., vol. 31, no. 3, pp. 121–144, 2016, doi: 10.1515/gospo-2015-0028.
- [30] Leksykon górniczy Praca zbiorowa. Katowice: Wydawnictwo Śląsk., 1989.
- [31] Sytona internetowa Agencji Restrukturyzacji Przemysłu "www.arp.pl." (dostęp 02.2025).
- [32] Agencja Rozwoju Przemysłu, "Wyniki techniczno - ekonomiczne działalności oraz inwestycje w górnictwie węgla kamiennego w Polsce w 2022r.," Katowice, 2023.
- [33] Lubelski Węgiel "Bogdanka" S.A., "Sprawozdanie Zarządu z działalności LW Bogdanka S.A. i GK LW Bogdanka za 2022 r."

- [34] "Gospodarka odpadami górnictwymi w 2020 roku LW 'Bogdanka' S.A." (materiały niepublikowane).
- [35] "Gospodarka odpadami górnictwymi w 2019 roku w LW 'Bogdanka' S.A." (materiały niepublikowane).
- [36] "Gospodarka odpadami górnictwymi w 2021 LW 'Bogdanka' S.A." (materiały niepublikowane).
- [37] J. Kicki et al., "Opracowanie dynamicznego modelu zarządzania wartością i strategią LW „Bogdanka” S.A. z uwzględnieniem wpływu kluczowych projektów inwestycyjnych na wartość przedsiębiorstwa PROJEKT: Lokowanie skały płonnej w wyrobiskach LW Bogdanka S.A.- aspekty ekonomiczne," Kraków, 2013. (materiały niepublikowane).
- [38] W. Kozioł and Z. Piotrowski, "Aktualne kierunki zagospodarowania odpadów z udostępniania węgla kamiennego," *Przegląd Górniczy*, vol. 65, no. 10, pp. 36–39, 2009.
- [39] D. Kijanka, T. Kuchta, and A. Halbina, "Szacowanie zanieczyszczenia urobku skałą płonną w kopalni węgla kamiennego," *Wiadomości Górnicze*, vol. 67, no. 2, pp. 85–93, 2016.
- [40] J. Palarski, "Problemy górnictwa węgla kamiennego," *Wiadomości Górnicze*, vol. 1, pp. 2–14, 2009.
- [41] J. Koperski and B. Lech, "Produkcja kruszyw z odpadów powęglowych." Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.
- [42] W. Sokół, A. Tabor, "Problemy zagospodarowania odpadów powęglowych z górnictwa węgla kamiennego w Polsce," *Przegląd Górniczy*, vol. 44, no. 7, pp. 710–715, 1996.
- [43] Sobczyk E.J, J. Kicki, Prawne, techniczne, ekonomiczne i środowiskowe aspekty gospodarki skałą płonną. Kraków: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, 2016.
- [44] I. Kowalczyk, D. Galica, A. Dyczko, "model geologiczny złoża oraz harmonogramy produkcji pozwalające na ich dynamiczną ak -," no. 92, 2020.
- [45] T. Janik, J. Nycz, and D. Galica, "O potrzebie modelowania złoża w warunkach polskich kopalń węgla kamiennego na przykładzie doświadczeń LW „Bogdanka” S.A.," 2021.
- [46] A. Dyczko, "Metodyka oceny wpływu zanieczyszczenia urobku na efektywność procesu produkcji węgla kamiennego na przykładzie LW Bogdanka S.A.," Kraków, 2018.(materiały niepublikowane).
- [47] B. Białecka and J. Grabowski, Zarządzanie gospodarką odpadami z górnictwa węgla kamiennego. Monografia [red.] Biały W. Górnictwo węgla kamiennego: wybrane problemy funkcjonowania. Gliwice: Wydawnictwo PKJS, 2011.
- [48] T. Tumidajski, T. Gawenda, T. Niedoba, and D. Saramak, "Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi/Mineral Resources Management*, vol. 24, no. 1/2, pp. 245–258, 2008.
- [49] M. Osoba, "Odkamienianie urobku surowego węgla kamiennego," *Górnictwo i Geol.*, vol. 2, 2011.

- [50] K. Kurus, B. Białecka, and F. Dernerova, "Model systemu zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego w górnośląskim zagłębiu węglowym," *Syst. wspomagania w inżynierii Prod. Jakość i Bezpieczeństwo*, pp. 131–141, 2014.
- [51] I. O. P. C. Series and M. Science, "Selected methods for material identification on the border of geological layers for the automation of industrial processes of obtaining raw materials Selected methods for material identification on the border of geological layers for the automation of ind," 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1182/1/012035.
- [52] P. Kiljan, Krzysztof Kalinowski, "Przegląd metod rozpoznawania granic węgla i skał w celu automatyzacji pracy kombajnu ścianowego," in *Komtech 2020*, 2020, pp. 1–10.
- [53] C. Robben, H. Wotruba, "Sensor-based ore sorting technology in mining—past, present and future," *Minerals*, vol. 9, no. 9, pp. 1–25, 2019, doi: 10.3390/min9090523.
- [54] Strona internetowa firmy Syskon "www.syskon.eu." (Dostęp 10.2023).
- [55] *Analizator Jakości Węgla SysKon 400 Dokumentacja techniczno-ruchowa*, pp. 1–34, 2016. (materiały niepublikowane).
- [56] J. Olszewski et al., "Leksykon górniczy Praca zbiorowa." Wydawnictwo Śląsk., Katowice, pp. 383–384.
- [57] S. Bock, M. Rotkegel, and J. Szymała, "Podziemne retencyjne zbiorniki węgla. Typowe uszkodzenia i metody oceny stanu technicznego," *Przegląd Górniczy*, pp. 39–51, 2016.
- [58] J. Antoniuk, *Maszyny górnicze Cz.3 transport kopalniany*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk., 1980.
- [59] M. Jekielek et al., "Ocena możliwości wykonania i stosowania poziomej retencji urobku w wyrobiskach chodnikowych," *Bogdanka*, 2022.
- [60] T. Karnowka, W. Grzybowski, "Rekonstrukcja obudowy podziemnego zbiornika urobku w KWK 'Rydułtowy-Anna,'" *Górnictwo i Geoinżynieria*, vol. 31, no. 3, pp. 215–223, 2007.
- [61] W. Lekan, T. Sądej, and P. Głuch, "Nowe konstrukcje obudów stalowo-betonowych w szybach, wlotach szybowych i zbiornikach retencyjnych w Lubelskim Węglu „Bogdanka” SA," *Wiadomości Górnicze*, vol. 67, no. 3, pp. 203–213, 2016.
- [62] *Technical Coal Research. ECSC coal research Annual report 1988*,. Luxembourg: Commision of the European Communities, 1988.
- [63] "Improvements To Coal Transport Methods and associated site reception and handling facilities for the industrial user," Cheltenham, 1989.
- [64] Strona internetowa Urzędu Patentowego RP "www.uprp.gov.pl." (Dostęp 01.2025,
- [65] Strona internetowa Europejskiego Urzędu Patentowy EPO "www.worldwide.espacenet.com." (Dostęp 01.2025).

- [66] Strona internetowa Europejskiego Urzędu Patentowego EPO “www.epo.org.” (Dostęp 01.2025).
- [67] Strona internetowa Światowej Organizacji Własności Intelektualnej WIPO “www.patentscope.wipo.int.” (Dostęp 01.2025).
- [68] A. Hopkins, “Development of the Huwood moving bed bunker,” Gateshead, 1997.
- [69] Z. Shengguo, “Horizontal type coal bunker (ang.),” Wzór użytkowy CN2756833Y, 2004.
- [70] Z. S. Irena Modrzyk, Michał Przybyła, “Poradnik górnika Tom 3.” Wydawnictwo Śląsk., Katowice, pp. 636–640, 1974.
- [71] Z. Korecki, “Maszyny i urządzenia górnicze Cz. 2.” Wydawnictwo Śląsk., Katowice, pp. 209–213.
- [72] J. Birch, “The use of the bunker conveyor in material handling.” pp. 571–577, 1958.
- [73] J. Mitręga, “Koncentracja wydobywania podstawą intensywnego rozwoju górnictwa węglowego.” Wydawnictwo Śląsk., Katowice, pp. 271–272, 1970.
- [74] Ministerstwo Górnictwa i Energetyki, Zautomatyzowana doświadczalna kopalnia “Jan.” Katowice: Zakłady Graficzne P.W. w Katowicach, 1968.
- [75] G. Sander and R. Günter, “Extensible telescopic coal bunker for subsurface mining,” Patent US4236630(A), 1978.
- [76] L. Zhiwang, “Horizontal type bunker for coal mines (ang.),” CN202038612U.
- [77] L. Gąsiorek et al., “Magazyn urobku,” Patent PL406874A1, 2014.
- [78] Strona internetowa Grupy Hajduk “www.hajduk-group.pl” (strona archiwalna),”
- [79] P. Kiljan, A. Kiljan, and K. Kalinowski, “Possibilities of application of spoil container in coal mine,” Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019, vol. 1. pp. 67–71, 2020, doi: 10.1201/9781003014577-9.
- [80] W. Kamiński, P. Orzeł, and P. Hajduk, “Przodkowy magazyn urobku- selekcja i gromadzenie urobku z robót przygotowawczych,” Inżynieria Górnicza, vol. 3, pp. 13–17, 2014.
- [81] L. Róg, A. Kozłowski, M. Kryca, B. Michalik, and J. Smyła, “Technologiczny pomiar zawartości popiołu w węglu surowym – popiołomierz RODOS-EX,” Przegląd Górniczy, vol. 71, no. 12, pp. 67–75, 2015.
- [82] P. Kaczmarczyk, K. Bednaręka, M. Lasicz, A. Narbutt, A. Semeniuk, and J. Szeler, “Zbiornik retencyjny urobku,” Patent PL181956B1, 1998.
- [83] Z. Guangjian, “Underground gallery bunker (ang.),” Wzór użytkowy CN2567342Y, 2002.
- [84] M. Wang, “Movable type buffering coal bin,” CN 113895899A, 2022.
- [85] T. Żur, Przenośniki taśmowe w górnictwie. Katowice: Wydawnictwo Śląsk., 1979.
- [86] “Horizontal Bunker at Monktonhall Colliery,” Colliery Guardian. Harrison & Sons Ltd, 1966.
- [87] J. E. Tristram, “Verbesserungen an Grubenfoerderern,” Patent DE1166129(B),

- 1961.
- [88] W. Skolik et al., "Zbiornik urobku," Patent PL181146, 1996.
 - [89] M. Heinrich and G. Jasica, "Wielokryterialna ocena jakości wyrobu z uwzględnieniem etapów projektowania , wytwarzania i eksploatacji," *Probl. Eksploat.*, vol. 3, pp. 85–96, 2009.
 - [90] J. Szybka and S. Pabian, "APEKS - a method of making decisions," *Sci. Technol. Innov.*, vol. 12, no. 1, pp. 45–50, 2021, doi: 10.5604/01.3001.0015.3310.
 - [91] R. L. MCNEARNY and Z. NIE, "Simulation of a conveyor belt network at an underground coal mine," *Miner. Resour. Eng.*, vol. 09, no. 03, pp. 343–355, 2000.
 - [92] S. Y. Hong, A. Bal, F. Badurdeen, Z. Agioutantis, and S. Hicks, "Evaluation of bunker size for continuous/discrete flow systems by applying discrete event simulation: A case study in mining," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 105, no. July, p. 102155, 2020, doi: 10.1016/j.simpat.2020.102155.
 - [93] P. J. Bardzinski, P. Walker, R. Krol, and W. Kawalec, "Simulation of random tagged ore flow through the bunker in a belt conveying system," *Int. J. Simul. Model.*, vol. 17, no. 4, pp. 597–608, 2018, doi: 10.2507/IJSIMM17(4)445.
 - [94] V. Okolnishnikov, "An MTSS Based Underground Coal Mining Simulation Model," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 3060–3063, 2018, doi: 10.48084/etasr.2087.
 - [95] V. Okolnishnikov, S. Rudometov, and S. Zhuravlev, "Simulation Environment for Development of Automated Process Control System in Coal Mining," *Int. J. Energy*, vol. 15, pp. 98–101, 2021, doi: 10.46300/91010.2021.15.15.
 - [96] S. V. Rudometov and V. V. Okolnishnikov, *A system for computer simulation of technological processes*, vol. 46, no. 9. IFAC, 2013.
 - [97] V. V. Sinoviev, A. N. Starodubov, M. U. Dorofeev, and V. V. Okolnishnikov, "Simulation application for evaluating of efficiency of mining systems automatization," vol. 14, pp. 261–267, 2015.
 - [98] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, "Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych,".
 - [99] Podstawowe odrzwia obudowy chodnikowej, elementy pomocnicze i inne rodzaje obudowy indywidualnej stosowane w kopalni "Bogdanka". Katalog dostosowany do "książki obudowy" stanowiącej załącznik nr 14 planu ruchu na lata 2020-2022. Wydanie VI. Bogdanka. 2020. (materiały niepublikowane)