



Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

mgr inż. Filip Jasiczek

**System logistyki dostaw surowca a efektywność
wykorzystania linii technologicznej
do produkcji peletów**

Praca doktorska

Promotor:
dr hab. inż. Dariusz Kwaśniewski, prof. URK
Katedra Inżynierii Produkcji, Logistyki
i Informatyki Stosowanej

Kraków, 2024

Spis treści

1.	Wstęp.....	5
1.1.	Wprowadzenie	5
1.2.	Przegląd literatury i uzasadnienie problemu naukowego	10
1.2.1.	Technologia produkcji peletów	10
1.2.2.	Efektywność wykorzystania linii technologicznej	20
1.2.3.	System logistyki dostaw biomasy	28
1.3.	Cel i zakres pracy	40
2.	Metodyka pracy	42
2.1.	Metodyka badań	42
2.2.	Metodyka obliczeń	43
2.2.1.	Metoda wskaźnikowa	44
2.2.2.	Metoda analizy wymiarowej	48
2.2.3.	Metoda AHP	52
3.	Przedmiot badań	60
3.1.	Charakterystyka firmy i produkowanych peletów.....	60
3.2.	Charakterystyka i parametry eksploatacyjne linii technologicznej	63
4.	Wyniki badań.....	74
4.1.	Charakterystyka środków transportowych wykorzystywanych do transportu surowca.....	74
4.2.	Organizacja dostaw surowca do produkcji peletów	77
4.3.	Zasoby i zużycie surowca a produkcja peletów	84
4.4.	Ocena efektywności wykorzystania linii technologicznej.....	88
5.	Optymalizacja dostaw surowca	95
5.1.	Zastosowanie analizy wymiarowej w modelowaniu procesu dostaw	95
5.1.1.	Oznaczenie głównych parametrów procesu	95
5.1.2.	Algorytm analizy wymiarowej procesu dostaw słomy	96
5.1.3.	Algorytm modelowania procesu dostaw słomy	101
5.1.4.	Przykłady testowe wykorzystania analizy wymiarowej.....	109
5.2.	Ocena logistyki dostaw surowca z wykorzystaniem metody AHP	118
6.	Dyskusja wyników	127
7.	Stwierdzenia i wnioski	130
8.	Literatura	132
9.	Spis tabel	139
10.	Spis rysunków	140
11.	Streszczenie	141

12. Abstract 142

1. Wstęp

1.1.Wprowadzenie

Rosnące zapotrzebowanie na energię w XXI wieku wiąże się z nieustannym poszukiwaniem nowych rozwiązań. Dodatkowe ustawy Unii Europejskiej nakładają na społeczeństwo wymogi ograniczające emisję gazów cieplarnianych, a restrykcje te w kolejnych latach będą cały czas rosnąć. W ostatnim czasie kraje Unii Europejskiej średnio zwiększyły udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto do 17%, gdzie w Polsce w 2016 roku udział ten wynosił 11,4% (GUS, 2017), w 2020 roku było to 16,13% (GUS, 2021) a w 2022 roku 16,81% (GUS, 2023).

Ciągły rozwój światowego przemysłu sprawia nieustanne poszukiwanie nowych źródeł energii. Biomasa, jako paliwo jest najstarszym źródłem stosowanym przez człowieka (Kowalik, 2002). W czasach prehistorycznych, gdy spojrzymy na naścienne malowidła, możemy zaobserwować palące się ognisko. W czasie rewolucji przemysłowej w XVIII-wiecznej Anglii zaczęto stosować na szeroką skalę węgiel jako podstawowe źródło energii. W XIX i XX wieku użycie tego rodzaju paliwa zwiększało się z każdym rokiem. Doprowadziło to do dużego skażenia atmosfery, a to zwróciło uwagę badaczy na duży problem, jakim jest zanieczyszczenie środowiska naturalnego, a przede wszystkim atmosfery przez takie związki chemiczne jak: tlenki węgla, tlenki siarki, tlenki azotu, pyły i freony. Stale pogarszający się stan środowiska naturalnego spowodował powolną, ale jednak, zmianę trendu w światowej energetyce. Wzrost popularności OZE w XXI wieku stał się faktem i cały czas ta zmiana ma miejsce. Powrót do korzeni, czyli do biomasy objawia się coraz częstszym napotykaniem upraw roślin energetycznych w kraju i w Europie. Oprócz ekologicznych paliw stałych zaczęto także myśleć o zaawansowanych technologiach pozyskiwania energii, które do tej pory niemożliwe były do wykonania. Pod koniec XX wieku, a dokładnie w roku 1980 powstała pierwsza farma wiatrowa na zboczach Crotched Mountain w południowym New Hampshire. Składała się ona z 20 turbin o całkowitej mocy 30 kW każda. W XXI wieku widok elektrowni wiatrowych stał się już normalny dla każdego z nas. Nowoczesne technologie budowlane i materiały pozwalają stawiać farmy wiatrowe nawet na morzu, co najczęściej można spotkać w takich krajach jak Belgia, Dania, Niemcy, Finlandia, Francja i Holandia. Inną technologią pozyskiwania ekologicznej energii stały się elektrownie wykorzystujące energię pływów wodnych. Pierwsza taka elektrownia powstała we Francji, w mieście Saint-Malo w 1967 roku. Obecnie wciąż niestety technologia ta nie jest tak popularna i nigdzie na świecie taka elektrownia nie jest używana na skalę przemysłową. Mimo wszystko pływy wodne i energia z nich płynąca jest ciekawą

alternatywą i dużą szansą w poszukiwaniu alternatyw produkcji energii. Następną, bardzo ciekawą technologią, lecz potrzebującą specjalnych uwarunkowań geograficznych jest energia wodna (energia rzek). Jest to jedna z najstarszych eko-technologii. Pierwsza elektrownia wodna (produkująca prąd stały) powstała w 1882 roku w USA koło Appleton na rzece Fox. W podobnym czasie (dokładnie w roku 1895) powstała jedna z najbardziej znanych elektrowni wodnych na świecie, mieszcząca się przy wodospadzie Niagara. Innym ekologicznym źródłem pozyskiwania energii jest ta pozyskiwania z wnętrza ziemi, czyli energia geotermalna. Mimo tego, że nie jest ona tak powszechnie znana jak inne źródła, można powiedzieć, że powstała już jakiś czas temu, ponieważ pierwszą elektrownię tego typu założono w 1904 roku we Włoszech, a dokładnie w Toskanii. Popularność geotermii jest niestety uzależniona od położenia. Nie każdy teren nadaje się do budowy takiej elektrowni. W Polsce, najlepszym terenem do tego typu inwestycji jest Podhale, ale geotermalne zakłady ciepłownicze można znaleźć w m.in.: Bańskiej Niżnej, Stargardzie Szczecińskim, Uniejowie, Klikuszowej, Lasku, Pyrzycach i Mszczonowie.

Najbardziej popularnym z ekologicznych sposobów pozyskiwania energii na całym świecie stała się niewątpliwie energetyka słoneczna. Moda jaka zapanowała na ogniwa słoneczne i kolektory w XXI wieku rozwijała się w tempie 40% rocznie. Ogromne zapotrzebowanie i stale utrzymujący się trend sprawiły, że ten odłam technologii rozwinął się w sposób najbardziej znaczący. Nowe materiały poprawiły sprawność instalacji oraz obniżenie ceny, która niewątpliwie jest stałym czynnikiem przy dokonywaniu wyborów inwestycyjnych każdego z nas (Szafrński, 2007). Ogromną przewagą tego typu rozwiązania jest to, iż w czasie procesu produkcji energii nie występują żadne skutki uboczne takie jak hałas, zanieczyszczenie środowiska pyłem, radiacja itd. Z całą pewnością proces ten jest zeroemisyjny. Istotnym impulsem do rozwoju tej gałęzi stała się polityka rządów w całej Europie. Na początku stawki, za które była skupowana energia były bardzo atrakcyjne. Takie wsparcie zyskało miano taryfy stałej. Z czasem stawki ulegały regresji. Największy rozkwit w krajach europejskich miał miejsce w Hiszpanii.

Kolejnym ważnym aspektem, który należy podkreślić to ekologiczne źródła w formie płynnej, tak zwane biopaliwa ciekłe. Impulsem do badań nad ekologicznym paliwem ciekłym była, podobnie jak w wyżej wymienionych źródłach, chęć znalezienia alternatywy do wyczerpujących się źródeł kopalnych takich jak ropa oraz jej pochodne. Źródła podają także, że innymi siłami sprawczymi rozwoju biopaliw ciekłych była sytuacja gospodarcza na świecie (która nadal ma miejsce) oraz stale pogarszająca się ich dostępność. Pod pojęciem biopaliwa ciekłe kryją się takie substancje jak: etanol, biodiesel, oleje do pirolizy. Różne są też sposoby otrzymywania takich paliw, a każde z wymienionych ma swoją odrębną technologię produkcji.

Różne są także substancje z których możliwe jest wytworzenie biopaliw, dlatego dzielimy je na trzy generacje:

1. Pierwsza generacja – wszystkie biopaliwa produkowane z oleju roślinnego, cukrów lub skrobi.
2. Druga generacja – wszystkie biopaliwa ciekłe wytwarzane z trwałych surowców, które nie stanowią konkurencji dla pożywienia, np. trociny, słoma i inne odpady produkcji rolniczej. Do takich paliw można zaliczyć na przykład biowodór.
3. Trzecia generacja – obejmuje wszystkie paliwa wytworzone z alg czyli z glonów i innych mikroorganizmów. Jest to jak na razie najbardziej zaawansowana technologia, nad którą cały czas są prowadzone prace rozwojowo-badawcze na całym świecie. Paliwo glonowe to jak na razie jedyny przedstawiciel paliwa trzeciej generacji.

Ostatnim rodzajem paliw ekologicznych są biopaliwa stałe, które żeby wyprodukować należy użyć biomasy roślinnej, która powstaje w wyniku procesu fotosyntezy. Biopaliwa stałe są jednymi z najpopularniejszych odnawialnych źródeł energii (Kuś i Matyka, 2008). Jako źródło powszechnie dostępnej biomasy można zaliczyć rolnictwo, leśnictwo i przemysł rolno-spożywczy oraz w mniejszym stopniu gospodarkę komunalną. Za podstawowe biopaliwo stałe uznaje się pelety oraz brykiety. Zasadnicza różnica pomiędzy peletami i brykietami to kształt i wymiar. Brykiety są paliwem o cylindrycznym lub prostokątnym kształcie a ich długość waha się pomiędzy 10 a 30 cm a średnica wynosi od 6 do 12 cm (Sutrisno i inni, 2017). Pelet ma także kształt cylindryczny o długości od 5 do 40 mm i średnicy od 8 do 12 mm. Zarówno pelety, jak i brykiety składają się z rozdrobnionego i suchego materiału organicznego takiego jak drewno, słoma i inne podobne surowce, które są sprasowane pod wpływem wysokiego ciśnienia. Na dzień dzisiejszy stosowanie biopaliw stałych staje się bardzo powszechne w takich krajach jak Szwecja, Dania i Austria. Jednocześnie na terenie Polski zauważalny jest rozwój rynku biomasy, którego efektem są liczne przedsiębiorstwa zajmujące się produkcją, dostawą i obsługą szeroko rozumianych biopaliw stałych (Kwaśniewski, 2019).

Polskie prawo również określa co znajduje się pod terminem biomasa. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii określa termin „biomasa” jako „ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęgla, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie

kwalfikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów”. Polskie ustawodawstwo określa też pojęcie „biomasa pochodzenia rolniczego” i rozumie ją jako „biomasę pochodzącą z upraw energetycznych, a także odpady lub pozostałości z produkcji rolnej oraz przemysłu przetwarzającego jej produkty”.

Polskie prawo definiuje to pojęcie jako produkty składające się z substancji roślinnych pochodzących z rolnictwa lub leśnictwa spalanych w celu odzyskania zawartej w nich energii, jako źródła pochodzenia wymienia:

- odpady roślinne z rolnictwa (np. słoma zbóż) i leśnictwa,
- odpady roślinne z przemysłu przetwórstwa spożywczego, jeżeli odzyskuje się wytwarzaną energię,
- odpady włókniste roślinne z procesu produkcji pierwotnej masy celulozowej i z procesu produkcji papieru z masy, jeżeli odpady te są spalane w miejscu, w którym powstają, a wytwarzana energia cieplna jest odzyskiwana,
- odpady korka, drewna, z wyjątkiem odpadów drewna, które mogą zawierać związki fluorowcoorganiczne lub metale ciężkie, jako wyniki obróbki środkami konserwacji drewna lub powlekania, w skład których wchodzi w szczególności odpady drewna pochodzące z budownictwa.

Jednym z najpopularniejszych rodzajów biomasy są rośliny energetyczne, które wchodzi w skład biomasy stałej (Kachel-Jakubowska i Szpryngiel, 2014). Jeżowski (2001) określa je jako gatunki, które w swoim składzie posiadają odpowiednią ilość węglowodorów lub oleju, które są jednym z elementów wyjściowych do wytwarzania energii. Według Budzyńskiego i Bielskiego (2004) najważniejsze są rośliny drzewiaste szybkiej rotacji, krzewy i byliny szybko rosnące, a także rośliny trawiaste wieloletnie i plonujące corocznie oraz niektóre rośliny jednoroczne.

Do najbardziej znanych roślin energetycznych w Polsce Jeżowski (2003) zalicza m.in.:

- miskant olbrzymi, który jest rośliną wieloletnią naturalnie występującą w Rosji, Japonii i Chinach. Roślina wymagająca, która potrzebuje odpowiedniego podłoża i odchwaszczenia przed sadzeniem. Wydajność miskanta waha się w granicach 17-20 ton z jednego hektara,
- ślazier pensylwański, należący do rodziny ślazierowatych, która obejmuje kilkaset gatunków roślin jednorocznych, wieloletnich i trawiastych. Roślina ta nadaje się idealnie do produkcji peletu i brykietu. Wartość energetyczną ślazierca można porównać do drzewa bukowego. Roślina nie posiada specjalnych wymagań glebowych. Ciekawostką jest, że roślina nadaje się do uprawy na terenach ogólnie uznawanych za niesprzyjające, tzn. tereny zdegradowane chemicznie, hałdy pokopalniane a także rekultywowane wysypiska

komunalne, gdzie pełni rolę fitoremediacyjną. W zależności od warunków klimatycznych plony ślazuwca mogą osiągnąć od 10 do 18 ton suchej masy z hektara,

- wierzba energetyczna, roślina niewymagająca, którą można uprawiać na wielu rodzajach gleb, od piaszczystych do organicznych. Jest rośliną szybko rosnącą, która potrzebuje dużo wody. Plon suchej masy waha się w granicach 10-15 ton z jednego hektara,
- inne rośliny energetyczne, które należy także wymienić, ale są rzadko uprawiane to: topola, robinia akacjowa, mozga trzcinowa, palczatka Gerarda, soja, słonecznik, rzepak, topinambur.

Bezpośrednie wykorzystanie odpadów pochodzenia rolniczego do celów energetycznych jest niemożliwe, głównie ze względu na duże zawilgocenie, niewłaściwy stan skupienia lub nieodpowiednie wymiary. Trudności te mogą być pokonywane przez przetwarzanie odpadów roślinnych na biopaliwa. Do najczęściej stosowanych procesów przetwarzania odpadów roślinnych na biopaliwa stałe zalicza się: rozdrabnianie, suszenie, peletowanie i brykietowanie (Witt i Kaltschmitt, 2007; Kornacki i Maj, 2011).

Biomasa powstała w trakcie produkcji rolniczej znajduje szerokie zastosowanie przy produkcji peletów i brykietów (Kania i inni, 2019). Największym zainteresowaniem cieszą się materiały o jak najwyższej kaloryczności (Trangkaprassith i Chavalparit, 2011). Słoma zbóż, mimo tego, że jej kaloryczność jest niska to także może być wykorzystywana do produkcji biopaliwa stałego (Wróbel i Mudryk, 2010).

Wzrost cen paliw kopalnych, duży potencjał biomasy w Polsce, a także zobowiązania unijne odnośnie wykorzystania określonych wartości procentowych odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie produkcji energii – to wszystko spowodowało rosnące zainteresowanie inwestorów sektorem produkcji biopaliw w postaci peletów dla odbiorców indywidualnych i energetyki zawodowej (Zawistowski, 2003; Wrzosek i Gworek, 2010).

Dlatego w niniejszej pracy podjęto tematykę produkcji peletów z odpadów roślinnych z rolnictwa (do których zaliczana jest słoma zbóż) oraz ocenę systemu logistyki dostaw surowca do produkcji.

1.2. Przegląd literatury i uzasadnienie problemu naukowego

1.2.1. Technologia produkcji peletów

Powszechnie wiadomo, że spalanie paliw kopalnych i wylesianie są głównymi czynnikami przyczyniającymi się do zmian klimatycznych. Wykorzystanie biopaliw jako alternatywnych źródeł energii zapewnia korzyści społeczno-ekonomiczne i środowiskowe, które rekompensują minusy wynikające z ich stosowania dzięki zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla i innych szkodliwych związków (Niedziółka, 2010). Najtańszymi zasobami biomasy na świecie są pozostałości z przetwórstwa drewna i rolnictwa, ponieważ są one najczęściej uważane jako odpady i rzadko się z nich korzysta. W porównaniu z paliwami kopalnymi, odpady z przemysłu drzewnego i odpady pochodzenia rolniczego zawierają wysoką wilgotność oraz niską gęstość, co czyni je technicznie nieprzydatnymi do bezpośredniego wykorzystania ze względu na problemy przy spalaniu (Niedziółka i Szpryngiel, 2014).

Biomasa roślinna w stanie nieprzetworzonym charakteryzuje się stosunkowo małą gęstością nasypową, wpływającą na koszty jej transportu, magazynowania i wykorzystania w praktyce (Hejft, 2006; 2011; Mani i in. 2006; Szpryngiel i in. 2011; Niedziółka i in. 2012). Zatem zwiększenie koncentracji masy i energii biomasy poprzez jej brykietowanie i peletowanie znacznie podnosi komfort dystrybucji i użytkowania tego paliwa (Grzybek, 2004; Niedziółka i in. 2012).

Pelety, zwane również granulatem drzewnym to paliwo stałe w postaci małych cylindrycznych brył wykonane z rozdrobnionej i skompresowanej biomasy. Do najważniejszych cech peletów należy zaliczyć (Kołodziej i Matyka, 2012):

- Łatwość składowania i transportu. Dzięki regularnym kształtom materiału i jednakowym wymiarom możliwe jest dostosowanie odpowiednich środków transportowych i magazynowych. Pelety mogą być składowane w workach (tzw. „Big Bag”), specjalnych zbiornikach lub po prostu na płaskiej powierzchni z zadaszeniem.
- Niską emisję, w porównaniu z drewnem. Spalanie peletu jest bardziej efektywne i czystsze niż spalanie tradycyjnego drewna ponieważ, odpowiednio wyprodukowany pelet posiada mniejszą zawartość wilgoci i zanieczyszczeń, co przekłada się na niższą emisję szkodliwych substancji.
- Odnawialne źródło energii. Pelety są produkowane z odpadów drzewnych, słomy i innych organicznych substancji pochodzenia rolniczego co czyni je odnawialnym źródłem energii.
- Wykorzystanie peletów jako paliwa – zmniejsza to uzależnienie gospodarki od paliw kopalnych (Hansen i inni, 2009).

Produkcja peletu wzrosła w ciągu ostatnich lat. Według Duca i innych (2014) w latach 2012-2014 światowa produkcja peletu wrosła z 7 do 19 mln ton, przy czym Europa i Ameryka Południowa odpowiadają praktycznie za całą produkcję i konsumpcję biopaliw stałych. Zużycie jest nieznaczne w krajach rozwijających się. Na podstawie danych z serwisu Bioenergy Europe Statistical Report 2021, w Europie, w 2019 roku odnotowano wzrost wartości o 7,2% w porównaniu z rokiem poprzednim, a produkcja ta osiągnęła 22 mln ton peletu drzewnego. Liderem produkcji europejskiej są Niemcy, których roczna produkcja wyniosła 2,8 mln ton. Na drugim miejscu znajduje się Rosja, która produkuje 2,1 mln ton a na trzecich miejscach znajdują się Szwecja, Łotwa i Francja, których roczna produkcja wynosi równo 1,6 mln ton peletu. Biorąc pod uwagę konsumpcję peletów, prawie 75% światowej produkcji była zużywana przez kraje Unii Europejskiej (74,6%), następnie Azja (13,6%) i Ameryka Północna (7,3%).

Rynek peletów w Afryce, Azji i Ameryce Południowej nie jest porównywalny z innymi rynkami. Oprócz czynników ekonomicznych i gospodarczych należy uwzględnić także czynnik temperaturowy. W rejonach świata, gdzie średnia temperatura w roku jest wysoka, społeczeństwo nie potrzebuje ogrzewania pomieszczeń, a cała infrastruktura techniczna gospodarki w tych krajach jest przystosowana do użytkowania gazu lub węgla, a nie biopaliwa w postaci peletu czy brykietu. Inne podejście panuje w krajach Europy, szczególnie zachodniej i środkowej, gdzie spójnym czynnikiem jest to, że rządy promują energię odnawialną, prowadząc do polityki, która napędza popyt na pelety drzewne. Gospodarki tych krajów dążą do osiągnięcia swoich celów w zakresie energetyki odnawialnej przez co przewiduje się zwiększenie zużycia peletu pochodzenia drzewnego, jak i rolniczego. Raju i inni (2014) w pracy „Studies on development of fuel briquettes using locally available waste” stwierdził, że proces peletowania i brykietowania może być wykorzystywany w większym stopniu, jeśli infrastruktura techniczna zostanie do tego w odpowiedni sposób przystosowana. Pozostałości i odpady pochodzenia rolniczego mogą być wykorzystywane w jeszcze większym stopniu.

Podstawowym biopaliwem stałym oprócz brykietu jest pelet. Z wyłączeniem tych dwóch wymienionych są jeszcze pozostałe biopaliwa stałe takie jak: zrębka drewna, drewno opałowe, PKS (Palm Kernel Shells), czyli rozdrobniona pestka owocu olejowca gwinejskiego) i ziarno energetyczne (Olkuski i Saluga-Szlugaj, 2018). Każdy produkt dopuszczony do obrotu na terenie Unii Europejskiej powinien być zgodny z normami aktualnie obowiązującymi.

Pelety (jak również brykiety) muszą spełniać normy. Obecnie obowiązującymi normami w naszym kraju, są:

- Norma PN-EN ISO 17225-1:2021-10, która określa klasy jakości paliw, w tym specyfikacje biopaliw stałych oraz naturalnych i przetworzonych materiałów pochodzących z leśnictwa, sadownictwa, rolnictwa, ogrodnictwa i akwakultury. Norma

została opublikowana 30 listopada 2021 roku, posiada 76 stron i zastępuje normę PN-EN ISO 17225-1:2014-07.

- Norma PN-EN ISO 17225-2:2021-11, określa klasy jakościowe paliwa i wymagania dla klas peletów drzewnych stosowanych do celów nieprzemysłowych i przemysłowych. Norma ta obejmuje tylko i wyłącznie pelety drzewne produkowane z surowców: drewno z lasu, plantacji oraz z innych naturalnych źródeł, produkty uboczne i pozostałości z przemysłu drzewnego, drewno używane, które nie zostało przetworzone chemicznie. Norma ta zastąpiła normę PN-ISO 17225-2:2014-07.

W wielu publikacjach naukowych można spotkać się z omawianymi normami z lat ubiegłych (powyżej wymienione normy są ich następcami), jako formy nieobowiązujące należy wymienić: PN-EN 14961-1:2011 oraz PN-EN 14961-2:2011, które były pierwszymi normami dotyczącymi biopaliwa obowiązującymi w Polsce. Określały one (podobnie jak te obowiązujące w obecnym czasie) klasy jakościowe paliw i specyfikacje dla peletów drzewnych do zastosowań nieprzemysłowych i przemysłowych. Precyzowały one wymagania techniczne i źródła surowców dla biopaliwa stałego. Oprócz wyżej wymienionych norm, w literaturze można się spotkać z innymi normami (które obowiązywały do 2021 roku):

- PN-EN 14588:2011 – opis biopaliw stałych, zawiera podstawową terminologię, definicje i określenia,
- PN-EN 15234 – określa zasady zapewnienia jakości paliw,
- PN-EN 14778:2011 – określa zasady pobierania próbek,
- PN-EN 14780:2011 – określa zasady pobierania próbek.

Oprócz Normy Europejskiej na rynku biopaliw stałych można się spotkać także z normami i certyfikatami krajowymi, które posiadają nie mniejszy wpływ na jakościowy odbiór produktów. Najważniejszym certyfikatem, uznawanym globalnie jest niewątpliwie certyfikat DINplus. Powstał on w Niemczech, jako oznaczenie zgodności peletu drzewnego z wymogami niemieckich norm jakości peletu. Największe znaczenie certyfikatu DIN jest niewątpliwie dla peletów i brykietów sprzedawanych na rynku dla mniejszych i domowych odbiorców tego paliwa. Jednostką zajmującą się wydawaniem dokumentu zgodności jest instytut certyfikujący DIN CERTCO. Certyfikat sprawdza pod względem jakościowym czy pelet nie jest zanieczyszczony różnymi związkami oraz czy przy produkcji peletu nie zostały użyte żadne inne materiały oraz lepiszcza. Kolejnym certyfikatem uznawanym na rynku biomasy jest certyfikat EN plus. Został on stworzony przez Europejskie Stowarzyszenie Biomasy wraz z Europejskim Urzędem Peletu (EPC). EN Plus jest standardem jakościowym uznawanym w całej Europie do określenia jakości peletu drzewnego. Dokument ten jest coraz częściej wymagany przez producentów kotłów, dystrybutorów peletu, sieci detaliczne oraz

sektor energetyczny. Standard EN plus obejmuje całość procesu związanego z peletem, czyli od opuszczenia gotowego produktu z granulatora, przez kondycjonowanie, pakowanie, transport i sprzedaż do ostatecznego konsumenta. EN plus określa także takie parametry jak: zawartość popiołu, odporność mechaniczną, długość, grubość oraz wilgotność.

Technologia produkcji peletów składa się z trzech etapów, które są podstawowymi składowymi procesu produkcji:

1. suszenie,
2. mielenie,
3. granulacja.

Każda technologia może się różnić, lecz idea oraz zamysł procesu technologicznego są stałe. Podstawowym założeniem wszystkich technologii jest to, iż otrzymywany na końcu produkt jest wytwarzany bez użycia spoiwa (bez substancji klejącej). Ciśnieniowa aglomeracja rozdrobnionego i suchego surowca (słomy, wióry drewniane, etc.) pod wpływem zewnętrznych (tłoczysko, rolka, matryca, prasa) i wewnętrznych (siły międzycząsteczkowe, naprężenia) sił, pozwala na uzyskanie granulatu o średnicy od 4 do 10 mm i długości od 20 do 50 mm. Wymiary są podawane w zaokrągleniu, ponieważ produkt gotowy jest kruchy i pod wpływem, najczęściej transportu, może ulegać łamaniu, jak pokazano na rysunku 1.1. Zagęszczona biomasa przez to, że zwiększono jej gęstość, może konkurować z węglem o niższej kaloryczności.

Do produkcji peletów może być wykorzystywana słoma zbóż traktowana jako produkt uboczny w procesie produkcji zbóż.



Rysunek 1.1. Pelety ze słomy

Źródło: opracowanie własne

Denisiuk (2009) w swojej pracy dokonał charakterystyki parametrów słomy, które zostały zamieszczone w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Charakterystyka parametrów słomy

Sposób przetworzenia słomy	Masa usypowa	Objętość właściwa	Współczynnik koncentracji energii
	(kg·m ⁻³)	(m ³ ·t ⁻¹)	(MWh·m ⁻³)
Słoma luźna	20 - 50	20 - 50	0,16 - 0,7
Słoma pocięta (sieczka)	40 - 60	10 - 25	0,13 - 0,19
Słoma sprasowana do małych kostek 50x50x100	50 - 110	9 - 20	0,16 - 0,29
Słoma zrolowana ϕ 100x100	60 - 90	11 - 16	0,19 - 0,29
Słoma w big bal 85x120x250	70 - 130	7,7 - 14	0,23 - 0,49
Słoma brykiety	300 - 450	2,3 - 3,3	0,99 - 1,48
Słoma pelety	550 - 750	1,2 - 1,4	2,22 - 2,78

Źródło: (Denisiuk, 2009)

Odpowiednie dobranie surowca oraz jego charakterystyka wpływa na efektywność wykorzystania linii technologicznej do produkcji biopaliw stałych (Zwolińska i Kubica, 2017). Istotnym elementem surowca są jego parametry. Każda nowa dostawa do zakładu powinna zostać sprawdzona i skontrolowana czy spełnia kryteria wybranej technologii. Najważniejsze parametry i cechy surowca to:

- wilgotność surowca nie powinna przekraczać 15%; optymalna wartość waha się w granicach 12-14%. Powyżej tej wartości wartość surowca (opłata za surowiec) w wielu przedsiębiorstwach zostaje pomniejszona, a czasami nawet materiał nie zostaje odebrany,
- brak zanieczyszczeń mechanicznych, chemicznych i mineralnych, które mogą wpływać na obniżenie jakości produktu gotowego (obniżenie wartości opałowej) lub mogą doprowadzić do uszkodzenia linii technologicznej,
- odpowiednie rozdrobnienie; w niektórych źródłach autorzy wspominają również odpowiednie rozdrobnienie, lecz w wielu zakładach produkujących pelety lub brykiety nie jest to brane pod uwagę, gdyż przedsiębiorstwa rozdrabniają surowiec na początkowych etapach produkcji biopaliwa (Jakubiak i Kordylewski, 2008).

Najważniejszym etapem wytwarzania peletów jest proces aglomeracji, dla którego kluczowe jest odpowiednie przygotowanie surowca. Dobrane do technologii odpowiednie rozdrobnienie i wilgotność pozwalają na optymalizację wydajności granulatora. Według Niedziółki (2010) drobne frakcje ułatwiają wypełnianie elementów roboczych granulatora, czego efektem jest podwyższenie trwałości i jakości produktu gotowego (Mani i inni, 2006).

Należy pamiętać, że zbyt duże rozdrobnienie surowca może wpływać negatywnie na proces peletyzacji, ponieważ zbyt małe elementy tworzą nietrwałe wiązania między sobą i w trakcie produkcji wytwarzana jest duża ilość pyłu (Grochowicz, 1996). Wilgotność wpływa bezpośrednio na zagęszczanie surowca. Według Skoneckiego i Potręć (2008), gdy zwiększamy wilgotność rośnie stopień zagęszczenia oraz zmniejszamy energochłonność procesu. Najkorzystniejszy poziom wilgotności surowca zmniejsza tarcie między materiałem a matrycą granulatora, a także obniża współczynnik tarcia wewnętrznego przemieszczających się względem siebie drobin (Kulig i Laskowski, 2006). Ważnym etapem procesu produkcji jest etap kondycjonowania, który nawilża surowiec za pomocą pary wodnej. Etap ten jest w sposób ciągły kontrolowany, aby nie przesadzić z nadmiernym nawilżeniem. Doprowadzić to może do zmniejszenia jednostkowej pracy zagęszczania oraz obniżenia gęstości surowca i aglomeratu (Adamczyk, 2010).

Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na jakość procesu peletyzacji i efektywność pracy linii technologicznej jest skład chemiczny materiału roślinnego czyli surowca. Surowiec zawierający wzbogaconą mieszankę takich składowych jak: tłuszcz, celuloza, białka ulega łatwiejszej granulacji i jest bardziej trwały (Grochowicz i inni, 2004). Ostatnim kluczowym parametrem wpływającym w znacznym stopniu na proces produkcji oraz jakość wyrobu gotowego jest temperatura surowca. Wyższa temperatura wpływa pozytywnie. Sprawia, że zmniejszone są siły tarcia pomiędzy materiałem a granulatorem, czego efektem jest podwyższenie trwałości produktu oraz zmniejszenie w znacznym stopniu energochłonności procesu granulacji.

Aby proces granulacji został przeprowadzony w sposób efektywny należy na początku przygotować surowiec. Najczęściej spotkaną praktyką jest trzyetapowy proces rozdrabniania. Kowalewski (2009) wyróżnia rozdrabnianie wstępne, wtórne i końcowe. Długość elementów frakcji nie powinna być większa niż 3 mm. Każdy materiał poddawany obróbce posiada inne parametry oraz właściwości, dlatego dla każdego surowca dobierana jest indywidualna technologia obróbki. Celem etapu rozdrabniania jest przyspieszenie procesu suszenia, a stopień rozdrobnienia zależy od wydajności suszarni zamontowanej na linii technologicznej. Warto zaznaczyć, że w niektórych technologiach nie jest wykorzystywana suszarnia (Jakubiak i Kordylewski, 2008), a w tych, w których jest stosowany etap suszenia często potrzebne jest rozdrabnianie wtórne. Sytuacja ta wymaga zainstalowania młynów rozdrabniających nie wysuszone jeszcze zrębki do drobniejszych postaci. Młyny (młotkowe) wyposażone są w sita, których najmniejsza wielkość otworów wynosi 12 mm (Jakubiak i Kordylewski, 2008). Ostatnim etapem (w wybranych technologiach produkcji) rozdrabniania jest rozdrabnianie końcowe, gdzie za pomocą skrawarek lub wiórkarek nożowych otrzymuje się surowiec, którego

rozmiar (3 mm) nadaje się do etapu granulacji, ponieważ rozdrabnianie końcowe jest stosowane po etapie suszenia.

Istotnym etapem produkcji jest oczyszczenie surowca. Wykorzystywane są do tego urządzenia montowane często w kilku miejscach linii technologicznej. Powodem tego jest wyeliminowanie ryzyka uszkodzenia urządzeń w jak największym stopniu. Magnetyzery stosowane są do usunięcia zanieczyszczeń metalowych (żelazne) przez ich przyciągnięcie. Metale nieżelazne usuwane są najczęściej za pomocą siły odpychającej powstałej za pomocą magnesów wytwarzających pola wirowe. Magnetyzery to zazwyczaj walce, taśmy, płyty lub pręty umieszczone na różnych etapach procesu produkcyjnego. Kolejne urządzenie, za pomocą którego segregowany jest wsad do granulatorów to przesiewacze, jedno i dwu płaszczyznowe, służą do oczyszczenia frakcji z pozostałych niepożądanych elementów, które mogłyby wpłynąć negatywnie na zagęszczenie surowca. Na linii stosowane są także czyszczalnie pneumatyczne, które pozwalają na usuwanie takich frakcji jak piasek czy zbędny kurz. Działa to na zasadzie wprowadzenia wsadu w ruch wirowy, który sprawia, że cięższy materiał (np. wspomniany piasek) zostanie odrzucony na zewnętrzną stronę wiru (Kowalewski, 2009). Innym sposobem usuwania tego typu zanieczyszczeń może być odmuchiwanie spadającego materiału, czego następstwem sprawia się, że lżejsze frakcje są wypychane.

Następnym etapem produkcji peletów jest suszenie wcześniej rozdrobnionego wsadu. Najpowszechniejszą stosowaną technologią suszenia jest stosowanie suszarni bębnowych. Metalowy bęben nachylony jest pod niewielkim kątem z zamontowanymi w środku łopatkami ułatwiającymi przemieszczanie się wsadu. W kierunku wyjścia przesypywany jest rozdrobniony surowiec. Zamontowany wentylator wymusza cyrkulację powietrza. Ogrzane wcześniej powietrze do temperatury ok. 400 °C wtłaczane jest do środka bębna. Po przejściu materiału przez suszarnię odbierane jest za pomocą pneumatycznego wentylatora, który transportuje suchy materiał do cyklonów, gdzie jest oczyszczany. Kluczowe jest monitorowanie całego procesu, gdyż nieodpowiednie parametry mogą doprowadzić do mineralizacji materiału, co skutkuje pogorszeniem się jakości peletu (Wach, 2005). Według Maja (2015) lepszym rozwiązaniem jest stosowanie suszarni bębnowej pośredniej. Przez inne umiejscowienie wymiennika ciepła tzn. pomiędzy piecem a bębniem, możliwe jest wtłaczanie powietrza nie zawierającego spalin, a sama temperatura jest mniejsza i wynosi 300 °C. Innym rozwiązaniem suszenia jest stosowanie bębnow z wewnętrznymi rurami, przez które przepływa para wodna. Przemieszczany wokół rur materiał zostaje osuszony i przekazany do dalszych etapów. Dużym plusem tej technologii jest znaczne obniżenie temperatury w porównaniu z poprzednimi rozwiązaniami. W tej metodzie temperatura nie przekracza 180°C. Wadą tego rozwiązania jest konieczność posiadania instalacji kotła parowego.

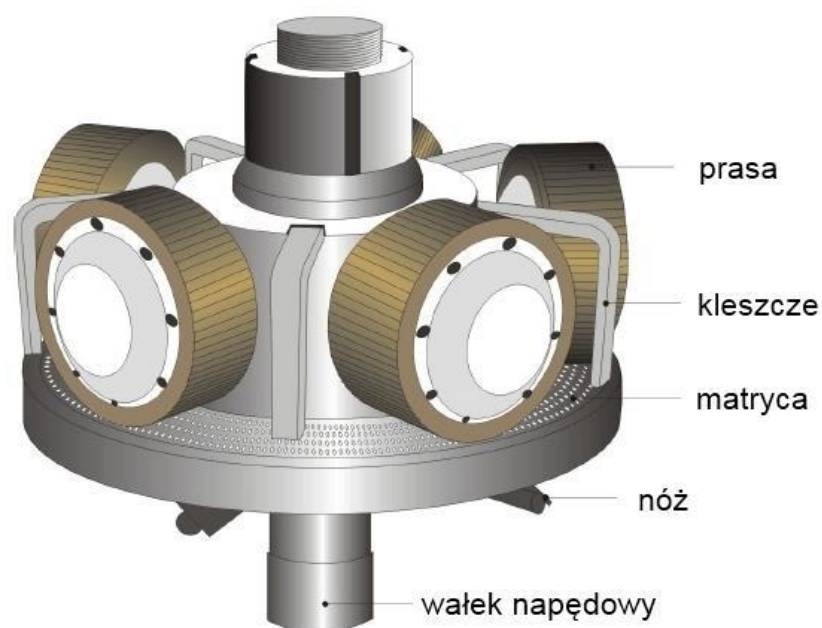
Inny rodzaj suszarni stosowanych na liniach technologicznych do produkcji peletów to suszarnie taśmowe. Materiał jest umieszczany na taśmie stalowej, która przechodzi przez tunel, w którym panuje wysoka temperatura. W przypadku tego typu suszarni można wyróżnić konstrukcje wielopoziomowe lub standardowe, czyli jednopoziomowe. Powszechnym dodatkiem suszarni taśmowych jest zastosowanie elementu wibracyjnego, co dodatkowo oczyszcza suszony materiał. Najrzadszym sposobem suszenia wsadu w procesach produkcji biopaliwa są suszarnie fluidalne i strumieniowe. W przypadku pierwszego rozwiązania, materiał jest przesuwany za pomocą ciepłego strumienia powietrza, gdy osiągnie pewną masę czyli zostanie odparowana nadmierna ilość wody, która uniemożliwia uniesienie materiału. W początkowym etapie surowiec opada na samo dno sita, przez które przepływa rozgrzany strumień powietrza, co tworzy tak zwane „złoże fluidalne”. Powstałe ciśnienie wtłaczanego powietrza unosi rozdrobnioną frakcję nad sito, czego następstwem jest powstanie ruchu cyrkulacyjnego wsadu w bębnie. Po wysuszeniu materiał trafia do cyklonu, gdzie jest oddzielany i przemieszczany do następnego etapu produkcji. Można wyróżnić suszarnie fluidalne typu kolumnowego i poziomego. Drugie rozwiązanie, tzn. suszarnie strumieniowe, osuszają rozdrobniony materiał w wyniku przenoszenia go za pomocą strumienia gorącego powietrza. Stosowane są suszarnie z pośrednim i bezpośrednim zadawaniem ciepłego powietrza z grzejnika (pieca). Zaletą tego typu rozwiązania jest możliwość ponownego wykorzystania tego samego powietrza, co wpływa na obniżenie kosztów i jest rozwiązaniem bardziej ekonomicznym. Gdy surowiec został rozdrobniony, wysuszony i oczyszczony, często zachodzi potrzeba kondycjonowania oraz nawodnienia. Jeżeli materiał jest zbyt suchy może ulec nadmiernemu zbiciu w matrycy granulatora, a co za tym idzie opóźnieniu produkcji, a nawet poważnej awarii. Aby zapobiec takim zdarzeniom, materiał traktowany jest wówczas suchą parą o temperaturze ok. 180°C. To działanie ma także na celu uaktywnienie ligniny, która sprawia, że produkt gotowy jest bardziej wytrzymały, ponieważ lignina jest naturalnym lepiszczem. Tak jak z każdym etapem produkcji, także kondycjonowanie zaraz przed granulacją należy wykonywać w określonym zakresie czasu i pod kontrolą, gdyż zaobserwujemy efekt odwrotny do spodziewanego, a pelety nie będą wytrzymałe.

Każdy wcześniej omówiony etap (suszenie, mielenie) służył przygotowaniu surowca do granulacji, inaczej mówiąc do procesu peletowania. Proces peletowania realizowany jest za pomocą maszyn zwanych peleciami, peletyzatorami lub granulatorami (Obidziński i Hejft, 2012). Proces ten odbywa się na liniach technologicznych, gdzie istotną częścią linii jest maszyna peletyzująca, która posiada wiele typów i każdy z nich w szczególności różni się typem matrycy, spośród których wyróżniamy między innymi:

- granulatory z matrycą pierścieniową,

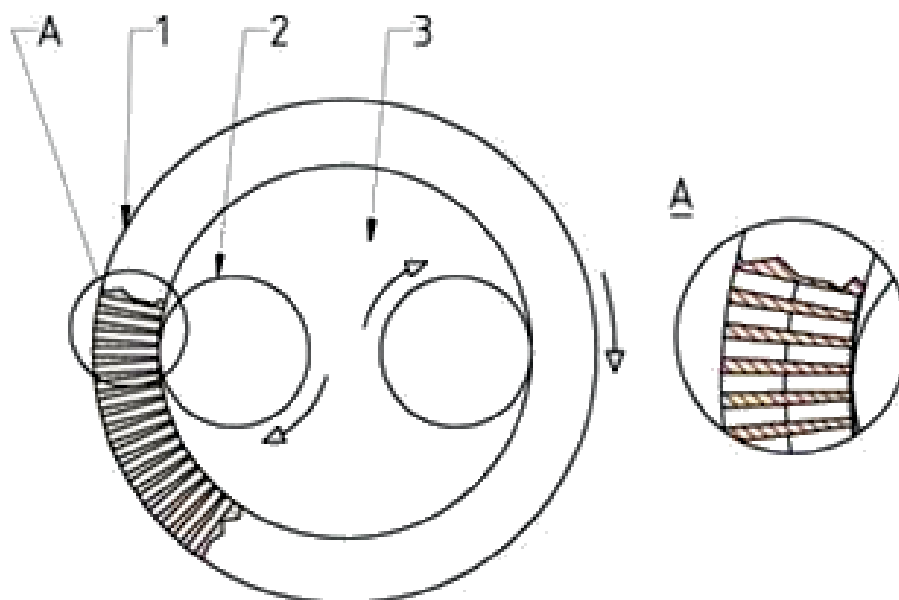
- granulatory z matrycą płaską.

Zasada działania pelecarki polega na cyklicznym obrocie rolek, które prasują rozdrobniony surowiec wtłaczając go do cylindrycznych otworów umieszczonych równomiernie w matrycy. Wytłoczony produkt pod odcięciem na odpowiednią długość staje się peletem. Stosowane w granulatorach matryce są elementem wymiennym, który po przepracowaniu pewnej ilości roboczogodzin lub wyprodukowanej określonej ilości peletu zostaje zastąpiony nową matrycą. Rozróżniamy też różne typy matryc, które odznaczają się innym rozstawem otworów cylindrycznych oraz różną grubością ścian, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie określonych rodzajów peletów (Grochowicz i inni, 2004). Zostały one zaprezentowane na rysunku 1.2 i 1.3.



Rysunek 1.2. Układ roboczy maszyny do peletyzacji z płaską matrycą

Źródło: (Hansen i inni, 2009)

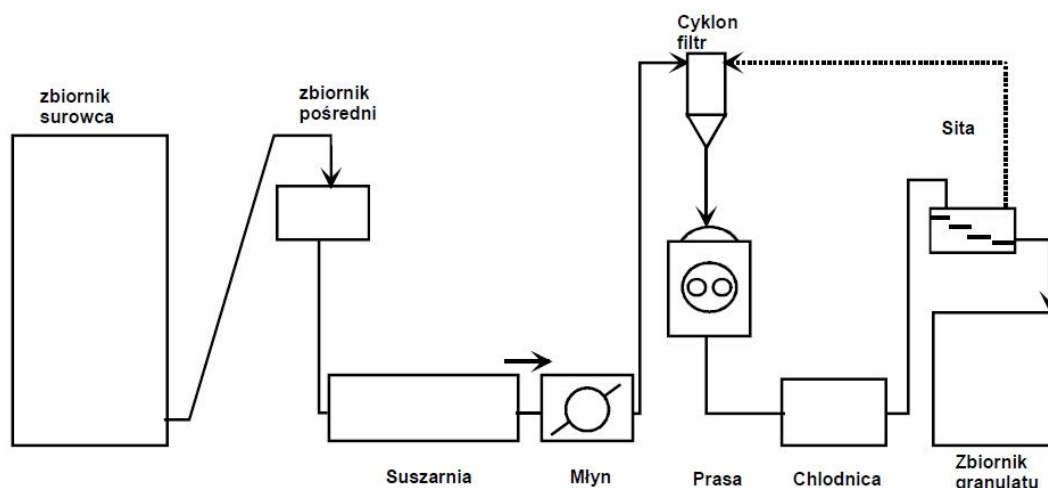


Rysunek 1.3. Schemat działania maszyny do peletyzacji z matrycą pierścieniową,
1-matryca; 2-rolka; 3-komora prasująca

Źródło: (Rembowski, 2007)

Najczęściej gotowy pelet zostaje poddany procesowi chłodzenia, ponieważ po przejściu przez granulator w wyniku tarcia ziaren o siebie oraz o ściany matrycy temperatura wzrasta do dużych wartości. Celem chłodzenia jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości produktu oraz zmniejsza jego zapylenia. Optymalną temperaturą transportu peletu jest temperatura pokojowa. Przed etapem magazynowania luzem lub pakowania jest etap frakcjonowania, czyli usuwanie zbędnego pyłu. Według Hansena i innych (2009) w czasie procesu produkcji należy dostosować parametry procesu do typu i właściwości surowca. Gdy produkcja opiera się na surowcu o dużej twardości, ciśnienie powinno być wysokie, ponieważ zbyt niskie ciśnienie może doprowadzić do zatykania się otworów w matrycy. Efektem będzie niska jakość peletu oraz częste przestoje linii technologicznej spowodowane zatykaniem przez zagęszczony surowiec, a nawet jej poważne uszkodzenie. Według Hansena (2009) odpowiednie dostosowanie parametrów pracy do matrycy urządzenia wpływa bezpośrednio na jakość peletu. Dodatkowo należy zaznaczyć, że autor wskazuje zależność pomiędzy energochłonnością procesu a długością kanału pracującego i jego długością, co potwierdza ważność doboru odpowiednich parametrów pracy maszyny. Hejft (2002) opisuje charakterystykę pracy z surowcami, które zawierają stosunkowo duże zawartości tłuszczów. Według niego w takim przypadku należy stosować matrycę o wysokim współczynniku sprężania. Jeżeli mamy do czynienia z materiałami o niskiej zawartości tłuszczu, stosujemy matrycę z niskim stopniem sprężania (Obidziński i Hejft, 2007). Kulig i Laskowski (2006) wskazują, że dwukrotny wzrost długości kanału prasującego matrycy wpływa na półtorakrotny wzrost energochłonności

procesu produkcji. Poglądowy schemat instalacji do produkcji peletu według Wacha (2006) został przedstawiony na rysunku 1.4.



Rysunek 1.4. Schemat instalacji do produkcji peletu

Źródło: (Wach, 2005)

Poniżej została zaprezentowana charakterystyka peletów w porównaniu z innymi paliwami energetycznymi według Wacha (2006):

- aby ogrzać dom jednorodzinny w ciągu roku potrzeba około 5 ton peletów,
- żeby zastąpić 1 tonę węgla należy użyć 1,5 tony peletów,
- 0,5 tony peletów odpowiada 2,5 m³ zrębków, które to odpowiadają 1 m³ litego drewna,
- po zużyciu (spaleniu) 1 tony peletów dobrej jakości można uzyskać około 20 kilogramów popiołu,
- litr oleju opałowego jest porównywalny z 2 kg peletów.

Podsumowując, należy podkreślić, że pelety są uniwersalnym paliwem opałowym, przyjaznym dla środowiska i jednocześnie łatwym w transporcie, magazynowaniu i dystrybucji. Charakteryzują się niską zawartością wilgoci, popiołów i substancji szkodliwych dla środowiska. Proces produkcji peletów realizowany jest na liniach technologicznych.

1.2.2. Efektywność wykorzystania linii technologicznej

Produkcja peletów ze słomy jest jedną z kluczowych metod przetwarzania biomasy na biopaliwa stałe, które znajdują zastosowanie w energetyce odnawialnej. W kontekście globalnych działań na rzecz redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz poszukiwania alternatywnych źródeł energii, pelety stają się coraz bardziej atrakcyjną opcją.

Słoma jest produktem ubocznym w rolnictwie, powstającym przy uprawie zbóż. Przez to, że jest dostępna w dużych ilościach, czyni ją atrakcyjnym surowcem do produkcji biopaliw. Słoma zawiera celulozę, hemicelulozę oraz ligninę, które są kluczowe dla procesu produkcji peletów. Wysoka zawartość ligniny działa jako naturalne spoiwo podczas procesu granulacji, co pozwala na produkcję biopaliwa o wysokiej gęstości i wytrzymałości mechanicznej. Aby określić efektywność wykorzystania każdej linii technologicznej do produkcji biopaliw stałych, należy zbadać cały proces produkcji, na który się składa:

- przygotowanie surowca – obejmuje zbiór, transport, magazynowanie i ewentualne wstępne rozdrabnianie,
- suszenie – polega na zmniejszeniu wilgotności słomy, co jest kluczowe do uzyskania peletów o wymaganych parametrach jakościowych,
- rozdrabnianie – zmniejszenie objętości surowca do wymaganych rozmiarów,
- granulowanie – formowanie surowca za pomocą granulatora,
- chłodzenie i pakowanie.

Efektywność procesu produkcji peletów można oceniać na podstawie kilku kluczowych wskaźników:

- Wydajność energetyczna, czyli stosunek energii zawartej w peletach do energii zużytej na ich produkcję. Wysoka wydajność energetyczna świadczy o efektywności procesu technologicznego. Badania wykazały, że wydajność energetyczna produkcji peletów ze słomy wynosi od 70% do 90%, w zależności od technologii i warunków procesowych (Demirbas, 2001). Wysoka wydajność energetyczna oznacza, że znaczna część energii zawartej w surowcu jest zachowana w końcowym produkcie.
- Wydajność materiałowa, czyli stosunek masy wyprodukowanych peletów do masy użytej słomy, oznacza minimalne straty surowca podczas produkcji. Wydajność materiałowa procesu produkcji peletów ze słomy jest również istotnym wskaźnikiem efektywności. Badania wykazują, że średnia wydajność materiałowa wynosi około 80-90%, co oznacza, że tylko 10-20% surowca jest tracone podczas produkcji (Kaliyan i Morey, 2009). Straty te są wynikiem odpadów powstających podczas rozdrabniania oraz granulacji.
- Jakość peletów to parametry takie jak: gęstość, wytrzymałość mechaniczna, zawartość wilgoci oraz wartość opałowa, które wpływają na jakość finalnego produktu. Element ten jest kluczowym czynnikiem wpływającym na przydatność tego paliwa. Badania wykazują, że pelety ze słomy mogą osiągnąć gęstość na poziomie 600-700 kg·m⁻³, zawartość wilgoci poniżej 10%, oraz wartość opałową około 16-18 MJ·kg⁻¹ (Tumuluru i inni, 2011).

Produkcja peletów ze słomy wpisuje się w koncepcję zrównoważonego rozwoju poprzez efektywne wykorzystanie odpadów rolniczych, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz wspieranie lokalnej gospodarki. Pelety ze słomy są odnawialnym źródłem energii, które może zastąpić paliwa kopalne, przyczyniając się do ochrony środowiska oraz zmniejszenia zależności od importu energii (Faaij, 2006).

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że efektywność wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów ze słomy jest kluczowym czynnikiem wpływającym na opłacalność ekonomiczną oraz zrównoważony rozwój produkcji OZE. Analiza wydajności energetycznej, wydajności materiałowej oraz jakości peletów wskazuje, że produkcja paliwa ze słomy może być konkurencyjna i efektywna. Optymalizacja procesu produkcji oraz zarządzanie odpadami są kluczowe dla dalszego zwiększenia efektywności oraz zrównoważonego rozwoju tej technologii. Optymalizację procesu można realizować poprzez:

- Automatyzację: wprowadzenie zaawansowanych systemów sterowania i monitoringu, które umożliwiają dokładne kontrolowanie parametrów produkcji, takich jak temperatura, wilgotność i ciśnienie.
- Innowacje technologiczne: rozwój i implementacja nowych technologii, takich jak ulepszone prasy czy systemy suszenia, które zwiększają wydajność i redukują zużycie energii.
- Optymalizacja dostarczanych surowców: selekcja i przygotowanie biomasy o odpowiednich właściwościach fizykochemicznych, które zapewniają najlepsze rezultaty w procesie produkcji peletów.
- Recykling odpadów: wykorzystanie odpadów produkcyjnych do ponownej produkcji peletów lub innych produktów, co redukuje koszty surowcowe i zmniejsza wpływ na środowisko.

Pomimo licznych korzyści wynikających z produkcji peletów z biomasy, istnieje wiele wyzwań, które należy przezwyciężyć w celu dalszej optymalizacji procesów produkcyjnych, spośród nich należy wymienić najważniejsze, czyli:

- dostępność surowców – zmienność i sezonowość dostępności biomasy może wpływać na ciągłość produkcji,
- koszty inwestycyjne – wysokie koszty zakupu i utrzymania zaawansowanych maszyn mogą stanowić barierę dla mniejszych przedsiębiorstw,
- wpływ na środowisko – choć biomasa jest odnawialnym źródłem energii, jej pozyskiwanie i przetwarzanie muszą być prowadzone w sposób zrównoważony, aby minimalizować negatywny wpływ na ekosystemy.

Literatura przedmiotu dostarcza szerokiej gamy informacji, które obejmują zarówno teoretyczne podstawy, jak i praktyczne studia przypadków z wielu branż. Trzeba jednak zaznaczyć, że istnieje bardzo mało pozycji literaturowych dotyczących tego zagadnienia na rynku biopaliw. Przykładowo książka „Production Line Efficiency: A Comprehensive Guide for Managers” omawia, jak projektowanie niesynchronizowanych i nie zrównoważonych linii produkcyjnych może być bardziej efektywne poprzez wykorzystanie inherentnych nierówności, takich jak różne prędkości pracy operatorów. Kwestionuje to tradycyjny pogląd na ten aspekt jako przeszkodę dla produktywności (Shaaban i inni, 2010). Inni autorzy zajmują się badaniami linii produkujących przekładnie (Putra i inni, 2022). Inne studium przypadku pokazuje, że poprawa efektywności linii produkcyjnej w średnich i małych fabrykach można osiągnąć przez skrócenie cykli produkcyjnych i przypisanie dodatkowych zadań pracownikom (Chung i inni, 2015, Alexander i inni, 2024).

Ocenę efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń można przeprowadzić z przynajmniej dwóch różnych perspektyw. Pierwsza perspektywa obejmuje aspekty rachunkowo-finansowe i skupia się na pieniężnym ujęciu efektywności. Druga perspektywa ma charakter techniczno-produkcyjny i dotyczy ilościowych aspektów produkcji, takich jak czas oraz wielkość produkcji.

W kontekście rachunkowości, maszyny i urządzenia są traktowane jako trwałe środki rzeczowe, które są wykorzystywane w procesach produkcyjnych przez okres dłuższy niż rok. Początkowa wartość tych aktywów jest systematycznie obniżana przez odpisy amortyzacyjne, które odzwierciedlają cyklicznie księgowane koszty amortyzacji. Efektywność wykorzystania takich sklasyfikowanych maszyn i urządzeń jest zazwyczaj oceniana holistycznie, dla poszczególnych grup aktywów, a jej celem jest ocena rentowności lub rotacyjności tych grup. W przypadku rentowności wskaźniki efektywności są obliczane jako stosunek zysku netto (lub innej kategorii wyniku finansowego) do wartości bilansowej wybranej grupy maszyn i urządzeń. Takie wskaźniki pozwalają określić, jaki procent zysku przypada na wybrane aktywa trwałe. W kontekście rotacyjności, efektywność jest mierzona jako stosunek przychodów ze sprzedaży produktów do wartości bilansowej danej grupy maszyn i urządzeń, co pozwala na ocenę liczby cykli produkcyjnych realizowanych przez te aktywa w określonym czasie, zazwyczaj w ciągu roku obrotowego.

Zarówno w przypadku wskaźników rentowności, jak i rotacyjności, wzrost tych wartości wskazuje na poprawę efektywności, ponieważ oznacza to, że dany składnik majątku przynosi coraz więcej zysku i intensywniej przyczynia się do zwiększenia produkcji. Wskaźniki rachunkowo-finansowe oceny efektywności maszyn i urządzeń są szczególnie użyteczne w porównaniach makroekonomicznych, często na przestrzeni rocznej, ze względu na

zagregowany charakter danych finansowych i wymóg sporządzania rocznych sprawozdań finansowych (dla spółek giełdowych kwartalnych). Dzięki temu wskaźniki te mają duże znaczenie w ogólnych porównaniach między przedsiębiorstwami i branżami. Są także wykorzystywane w systemach motywacyjnych dla kadry zarządzającej, ponieważ odzwierciedlają wyniki przedsiębiorstwa jako całości i są związane z zakresem odpowiedzialności zarządzających.

Z kolei techniczno-produkcyjna perspektywa oceny efektywności maszyn i urządzeń koncentruje się na aspektach produkcyjności, takich jak czas oraz wielkość produkcji. Ta perspektywa ma zazwyczaj charakter mikroekonomiczny, pozwalając na analizę konkretnych procesów technologicznych i zasobów zaangażowanych w ich realizację, co wpływa na efektywność oddolnie. Najbardziej wszechstronną propozycję oceny efektywności w kontekście techniczno-produkcyjnym oferuje standard Maintenance – Key Performance Indicator, który obejmuje 71 wskaźników oceny efektywności eksploatacji, w tym 24 ekonomiczne, 21 techniczne i 26 organizacyjne. Wskaźniki te mają charakter uniwersalny i umożliwiają porównania w czasie oraz benchmarking między branżami.

Zasady wyboru i konstrukcji tych wskaźników zostały opracowane na podstawie standardu Maintenance Terminology, który pozwala na ocenę efektywności na trzech poziomach: dla całego przedsiębiorstwa, dla linii technologicznych oraz dla poszczególnych obiektów produkcyjnych. Standard ten zawiera zbiór wskaźników, które stanowią katalog miar oceny efektywności eksploatacji majątku przedsiębiorstwa, obejmujący dotychczasowe osiągnięcia w tym zakresie. Chociaż pełna analiza wszystkich proponowanych wskaźników jest pracochłonna i czasochłonna, w praktyce wybiera się najważniejsze i możliwe do wdrożenia w danym przedsiębiorstwie.

W ten sposób, ocena efektywności maszyn i urządzeń może być kompleksowa i wieloaspektowa, uwzględniając zarówno aspekty finansowe, jak i techniczno-produkcyjne, co pozwala na wszechstronne zrozumienie i poprawę wydajności w różnych kontekstach. Takie podejście umożliwia nie tylko lepsze zarządzanie zasobami przedsiębiorstwa, ale również lepsze planowanie strategiczne i operacyjne, które może prowadzić do długoterminowego wzrostu i zrównoważonego rozwoju.

W dzisiejszych czasach, w obliczu intensywnej konkurencji, zarówno jakość produktów, jak i ich cena mają kluczowe znaczenie dla klientów. Można obniżyć koszty produkcji bez pogorszenia jakości poprzez optymalne wykorzystanie urządzeń w procesie technologicznym produkcji (Czerkawi i Rosak, 2006). Kluczowe znaczenie ma optymalizacja funkcjonalności i ciągłości pracy maszyn, co wpływa na wydajność i konkurencyjność przedsiębiorstwa na rynku każdej branży przemysłowej (Ożadowicz, 2006). W wielu firmach istnieje duży potencjał do

poprawy efektywności maszyn. Badania pokazują, że większość urządzeń wykorzystuje jedynie połowę swojego potencjału, a ich całkowita efektywność wynosi 30-50% (Mikler, 2005).

Efektywność wykorzystania maszyn i urządzeń staje się coraz ważniejsza dla sukcesu firmy. Jednym ze sposobów jej zwiększenia jest wdrożenie systemu Kompleksowego Utrzymania Maszyn (TPM - Total Productive Maintenance) (Rychter, 2005). TPM to system, który pozwala firmom na optymalne wykorzystanie maszyn (Czerska, 2015).

Wyposażenie jest strategicznym aktywem zakładu, biorącym bezpośredni udział w procesie technologicznym, który kształtuje jakość produktu (Czerkawi i Rosak, 2006). Konieczne jest wdrożenie metody zapewniającej efektywne i ekonomiczne utrzymanie urządzeń w dobrym stanie, a taką metodą jest TPM. TPM jest narzędziem doskonalącym organizację, a jego postęp mierzy się głównie poprzez wskaźnik OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*), który łączy dostępność maszyn, efektywność ich pracy oraz jakość procesu produkcyjnego. Inne stosowane mierniki to średni czas między awariami maszyn (ang. MTBF – Mean Time Between Failures) i czas reakcji na awarie (ang. MTTR – Mean Time to Repair) (Brzeski i Figas, 2006).

Wskaźnik OEE (Całkowita Efektywność Wyposażenia Produkcyjnego) definiowany jest jako wynikowa efektywność produkcji. Skupienie przenosi się z maszyny na proces produkcyjny, mierząc wartość dodaną generowaną przez urządzenie (Mikler, 2005). OEE określa, jaki procent planowanego czasu produkcji jest wykorzystany na wytwarzanie wyrobów spełniających wymagania jakościowe w określonym tempie. Warto wspomnieć, że OEE nie uwzględnia czasu strat planowanych, co może oznaczać, że maszyna wymagająca dużo czasu na konserwację może mieć taki sam współczynnik jak maszyna, która takiej konserwacji nie potrzebuje (Mikler, 2005).

OEE jest iloczynem trzech wskaźników: dostępności, wydajności i jakości. Dostępność oznacza, jaki procent planowanego czasu produkcji został rzeczywiście wykorzystany. Wydajność porównuje aktualne tempo pracy do tempa standardowego, a jakość wskazuje, jaka część wyprodukowanych wyrobów spełnia wymagania jakościowe. OEE gdy wynosi 100% oznacza, że urządzenie pracuje zawsze bez przerw, w odpowiednim tempie i nie produkuje wadliwych wyrobów. Projekt wdrożenia TPM jest uważany za udany, gdy OEE osiąga 85%, co oznacza dostępność powyżej 90%, wydajność co najmniej 95% oraz jakość na poziomie 99%. W praktyce rzadko osiąga się taki idealny stan, a OEE zazwyczaj oscyluje wokół 60% (Mikler, 2005).

Stosowanie wskaźnika OEE jest kluczowe dla zakładów produkcyjnych. Informacja o wartości OEE dostarcza precyzyjnych danych na temat efektywności produkcji, a nawet

niewielki wzrost tego wskaźnika może przynieść znaczące korzyści finansowe. Analiza OEE oraz zrozumienie strat wynikających ze zmniejszenia całkowitego czasu produkcji pozwalają na podjęcie działań zmierzających do minimalizacji strat (Purzycki, 2003). Wartość wskaźnika OEE stanowi punkt wyjścia do dalszych działań mających na celu poprawę efektywności maszyn i linii produkcyjnych. Na podstawie literatury można stwierdzić jakie są czynniki wpływające na efektywność.

- Technologia i urządzenia – technologia wykorzystywana w produkcji ma bezpośredni wpływ na efektywność. Nowoczesne, zautomatyzowane linie produkcyjne mogą znacznie zwiększyć wydajność poprzez redukcję przestojów i zwiększenie prędkości produkcji.
- Zarządzanie produkcją – efektywne zarządzanie procesami produkcyjnymi, w tym planowanie i harmonogramowanie zadań, ma kluczowe znaczenie dla minimalizacji przestojów i maksymalizacji wydajności.
- Umiejętności personelu (pracowników) – kwalifikacje i doświadczenie pracowników operujących linią technologiczną mają również znaczący wpływ. Przeszkoleni operatorzy są w stanie szybciej reagować na problemy i minimalizować czas przestojów.
- Konserwacja i utrzymanie ruchu – regularne i prewencyjne konserwacje sprzętu pomagają w utrzymaniu wysokiej dostępności maszyn, co jest kluczowym elementem efektywności.
- Jakość materiałów – jakość surowców używanych w produkcji wpływa na końcową jakość produktów oraz na wydajność linii technologicznej, poprzez redukcję odpadów i potrzeby przestojów.

Metoda OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) jest jednym z najważniejszych narzędzi stosowanych w przemyśle do oceny i poprawy efektywności maszyn i urządzeń. Stosowanie tej metody pozwala na identyfikację strat i wąskich gardeł w procesie produkcyjnym, co umożliwia wdrażanie działań naprawczych i optymalizacyjnych.

Jednym z przykładów zastosowania metody OEE w przemyśle elektronicznym jest badanie przeprowadzone przez badaczy z Indonezji (Alexander i inni, 2024) w PT Electronics Components Indonesia. Celem badania było wdrożenie Total Productive Maintenance (TPM) na maszynie do spawania ram za pomocą metody OEE. Średnia wartość OEE wyniosła 88%, co przewyższa globalny standard wynoszący 85%. Badanie wykazało, że kluczowe straty w procesie produkcyjnym wynikały z przestojów maszyn i problemów z jakością. Dzięki zastosowaniu metody OEE i wdrożeniu TPM, udało się zidentyfikować i wyeliminować główne przyczyny strat, co przyczyniło się do zwiększenia efektywności i produktywności

zakładu. Kolejny przykład to badanie wydajności maszyny sterylizującej w PT. Karya Tanah Subur za pomocą metody OEE. Wartości dla dostępności, wydajności oraz jakości zostały wyliczone, aby określić odpowiednie działania konserwacyjne (Rizal i Pandria, 2023). Ich wyniki pokazały, że największe straty wynikały z niskiej dostępności maszyny, co było spowodowane częstymi przestojami i awariami. Wdrożenie działań naprawczych, takich jak regularne przeglądy i konserwacja, pozwoliło na znaczną poprawę wskaźników OEE i zwiększenie efektywności produkcji.

Metoda OEE znajduje zastosowanie w wielu sektorach przemysłu, przykładem może być praca, w której autorzy oceniali OEE koparek Sumitomo SH 350 LHD oraz Hitachi Zaxis 350H przed i po optymalizacji, osiągając wartości OEE odpowiednio 41% i 43%, co jest poniżej światowego standardu wynoszącego 85% (Prabovo i inni, 2023). Główne przyczyny niskiej efektywności wynikały z problemów z dostępnością i wydajnością maszyn. Wprowadzenie działań optymalizacyjnych, takich jak lepsze planowanie przestojów i konserwacji, pozwoliło na poprawę wskaźników OEE i zwiększenie efektywności pracy koparek. Zastosowanie tej metody można też znaleźć w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie badacze wykorzystali omawianą metodę do oceny działań konserwacyjnych maszyn w Oni Jaya Motor. Wartości OEE wahały się od 77,1% do 81,0%, identyfikując kluczowe straty, takie jak ustawienie i regulacja, zmniejszona prędkość oraz awarie (Setyawan i inni, 2021). Analiza pokazała, że główne przyczyny strat wynikały z problemów z ustawieniem i regulacją maszyn oraz częstymi awariami. Wdrożenie działań naprawczych, takich jak regularne przeglądy i konserwacja, pozwoliło na znaczną poprawę wskaźników OEE i zwiększenie efektywności produkcji. Kolejnym przykładem zastosowanie OEE może być przemysł włókienniczy, gdzie badane były przestoje, które wpływają na przepływ produkcji, prowadząc do niskiego poziomu OEE wynoszącego 66,92%, wskazując na potencjał poprawy poprzez ukierunkowane interwencje (Putera i Marodiyah, 2024). W wynikach badań można znaleźć informację, że główne przyczyny strat wynikały z częstych przestojów i problemów z konserwacją maszyn. Wdrożenie działań naprawczych, takich jak lepsze planowanie przestojów i konserwacji, pozwoliło na poprawę wskaźników OEE i zwiększenie efektywności produkcji.

Przykłady można też znaleźć w polskiej literaturze, gdzie naukowcy podejmują się badań metodą OEE w zakładach przemysłowych (Brochu, 2007), przemyśle spożywczym (Brzeski i Figas, 2006), górnictwie (Jonek-Kowalska i Tchórzewski, 2016). Krason (2016) w swoich badaniach otrzymał wartość wskaźnika OEE na poziomie 85% tylko dla 5 maszyn. Reszta urządzeń uzyskała rezultat mieszczący się w granicach 63-81%. Oznacza to, że maszyny efektywnie pracowały od 63% do 81% czasu, który mogłyby przepracować w sytuacji, gdyby

nie wystąpiły awarie, przebrojenia wykonywane były w planowanym czasie, a maszyny pracowały idealnie, czyli bez braków oraz strat wydajności.

Optymalizacja zdolności produkcyjnej linii technologicznej oraz wykorzystanie metody OEE są kluczowymi elementami poprawy efektywności i konkurencyjności w różnych sektorach przemysłu. Prace naukowe wskazują na różnorodność zastosowań i wyzwań związanych z tymi zagadnieniami, podkreślając znaczenie ciągłego monitorowania i dostosowywania strategii produkcyjnych.

Następnym terminem, o którym należy wspomnieć jest optymalizacja efektywności. Można rozumieć ją jako działania, których celem jest usprawnienie i ulepszenie szeroko rozumianej organizacji. Główne obszary to:

- Automatyzacja procesów – znacznie zwiększa wydajność przez redukcję błędów ludzkich, zwiększa szybkość produkcyjną i umożliwia pracę bez przerw.
- Analiza danych – umożliwia wykorzystanie technologii analitycznych na zbieranie i analizę danych w czasie rzeczywistym, co umożliwia szybką reakcję na wszelkie nieprawidłowości i optymalizację procesów.
- Lean Manufacturing – skupia się na eliminacji marnotrawstwa we wszystkich aspektach produkcji. Poprzez identyfikację i eliminację nieefektywnych procesów, firmy mogą znacznie poprawić efektywność swojej produkcji.
- Six Sigma – metodologia zarządzania jakością, która dąży do minimalizacji wad i zmienności w procesach produkcyjnych poprzez zastosowanie rygorystycznych narzędzi statystycznych.

Podsumowując, efektywność wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów z biomasy jest jednym z kluczowych czynników wpływających na rozwój rynku produkcji paliw stałych. Poprzez optymalizację procesów produkcyjnych, automatyzację oraz innowacje technologiczne, możliwe jest zwiększenie wydajności, redukcja kosztów i poprawa jakości produktu końcowego.

1.2.3. System logistyki dostaw biomasy

Logistyka dostaw, obejmująca dostawy surowca do przedsiębiorstwa, koordynuje przepływ towarów oraz informacji (Dyczkowska, 2012; Gostomczyk, 2012), aby zapewnić przedsiębiorstwu ciągłość produkcji (Żurawska i Kulińska, 2015). Dyczkowska wyróżnia trzy zasady zewnętrznego zaopatrzenia materiałowego, są to: indywidualne zaopatrzenie w razie zapotrzebowania stosowane w mniejszych przedsiębiorstwach, zaopatrzenie z utrzymywaniem zapasów, które jest najczęściej spotykaną metodą wśród firm z branży biopaliw stałych oraz

dostawy zsynchronizowane z produkcją lub zużyciem, które są najczęściej spotykane w dużych przedsiębiorstwach, a do ich zastosowania używa się zwykle zaawansowane programy komputerowe. Ficoń (2001) wyróżnia cztery płaszczyzny sprawnego funkcjonowania logistyki – jest to planowanie, organizowanie, sterowanie i kontrola wszystkich procesów logistycznych biorących udział w pracy danego przedsiębiorstwa.

Wykorzystanie biomasy w energetyce odnawialnej można podzielić na trzy obszary: produkcja biomasy, produkcja biopaliwa i produkcja energii z biopaliwa (Borowski i inni, 2015; Dinesha i inni, 2018; Dubas i inni, 2004; Frączek i inni, 2010a, Frączek i inni, 2010b). Dodatkową komplikacją jest wiele rodzajów biopaliw stałych oraz mnogość surowców, z których paliwo to można wytwarzać. Z tego powodu produkcja brykietu i peletu wymaga skutecznego działania na wielu obszarach. Jednym z nich jest system logistyczny, który możemy określić jako celowo zorganizowany i połączony zespół takich elementów jak: zaopatrzenie, produkcja, transport, magazynowanie, odbiorca wraz z relacjami między nimi oraz między ich własnościami, warunkujący przepływ strumieni, środków finansowych i informacji (Barcik i Jakubiec, 2011; Michałowicz, 2002; Blaik, 2010).

Każdy system logistyczny według Ciesielskiego (2006) funkcjonuje w kręgu zaopatrzenia, produkcji, manipulowania materiałami, dystrybucją i ponownym zagospodarowaniu czynników produkcji. Każdy system logistyczny działa w wyniku wcześniejszego ustalenia pełnionych procesów logistycznych, które pełnią zadane funkcje (Fertsch, 2008). Jako procesy rozumie się zebrane czynności, które zachodzą w ustalonej kolejności i w ustalonych zakresach. Celem każdego procesu jest spełnienie z góry wyznaczonych celów. W swoim artykule Gabryelczyk (2006) wspomina, że procesy opisują przepływy i zmiany materiałów, informacji, operacji i decyzji. Efektywność procesów logistycznych danego przedsiębiorstwa zależy od trzech głównych kategorii czynników. Pierwszy z nich to czynnik organizacyjny, który wpływa na ułożenie stanowisk linii technologicznej, kolejności wykonywanych czynności i operacji technologicznych. Drugi to czynnik techniczny, który decyduje o sprawności wykonywanych procesów logistycznych, do których można zaliczyć jakość zaopatrzenia, wykorzystanie infrastruktury logistycznej, zapewnienie ciągłości procesów produkcyjnych i logistycznych (Bendkowski, 2015). Ostatni czynnik to kryterium ekonomiczne, które jest nieodłącznym elementem gospodarki państw europejskich. Wpływa ono na całość funkcjonowania przedsiębiorstwa, co ma bezpośrednie przełożenie na procesy logistyczne (Fertsch, 2003).

Na procesy logistyczne działające w obrębie dostaw biomasy wpływa wiele czynników (Bendkowski i Pietrucha-Pacut, 2003). Według Ciesielskiego (2006) największy wpływ wywiera czynnik prawny. To właśnie regulacje i ich częste zmiany decydują o kierunkach rozwoju tychże procesów. Inne czynniki, które także wpływają w dużym stopniu to wymagania

odbiorców, rozwój nowoczesnych technologii (szczególnie środki transportu, układy napędowe, silniki, paliwa), rodzaj i poziom konkurencji na danym rynku (region kraju, województwa) i wymuszenie zwiększenia elastyczności dotychczasowych działań podejmowanych przez konsumentów i producentów. Autorzy Skowronek i Sarjusz-Wolski (2007) wymieniają etapy przepływu biomasy:

- pozyskiwanie surowców,
- przetwórstwo surowców na materiały i półprodukty,
- produkcja wyrobu finalnego,
- wymiana handlowa produktów,
- eksploatacja lub zużycie produktu,
- zagospodarowanie odpadów.

Logistyka w przedsiębiorstwach zajmujących się produkcją biopaliwa zajmuje się także prognozowaniem popytu, zarządzaniem zamówieniami, gospodarką magazynową, sterowaniem zapasami, obsługą zaopatrzenia, czynnościami manipulacyjnymi, transportem wewnętrznym i zewnętrznym oraz jednym z kluczowych elementów czyli gromadzeniem informacji. Informacje pozyskiwane ze wszystkich etapów produkcji pozwalają lepiej dostosować i zoptymalizować dostawy oraz proces produkcji. Przy biomasie, jakość dostarczonego surowca ma kluczowe znaczenie, dlatego monitorowanie stanu surowca, czyli jego jakości wpływa bezpośrednio na efektywność procesu produkcji biopaliwa. Sobolewski i Marcinkowski (2017) wspominają, że ważną cechą w firmach z obszaru biopaliw jest zróżnicowanie surowców pod względem procesów logistycznych, czego powodem jest rodzaj przetwarzanej biomasy. Różne jest także podejście do ryzyka, co często daje fałszywe poczucie bezpieczeństwa.

Różnorodność rodzajów biomasy, która jest surowcem pochodzenia rolniczego polega na dużym zróżnicowaniu cech i parametrów materiału. Najważniejsze różnice widać w wartości opałowej, wilgotności, stanie skupienia, ciężarze właściwym i objętości. Powyższe parametry wpływają bezpośrednio na różnorodność wyposażenia w zakładach produkujących pelety i brykiety. Do danego typu biomasy należy często stosować różne typy maszyn i urządzeń oraz, co najważniejsze w logistyce dostaw, różne typy środków transportowych. Najlepiej jest stosować jeden rodzaj surowca, pod który projektowany jest cały proces. Od dostawy przez produkcję aż po sprzedaż. Niestety, w praktyce nie jest to takie oczywiste. Dodatkowym czynnikiem, który ma ogromny wpływ na szeroko rozumianą produkcję biopaliwa jest to, iż źródła pozyskania biomasy są bardzo często rozproszone. Komplikuje to w dużym stopniu

dostarczanie surowca do zakładu i wpływa to bezpośrednio na efektywność całego procesu produkcji (Gostomczyk, 2012).

Cykl dostaw biomasy składa się z kilku części:

- zebranie biomasy (np. słomy) z pola,
- transport biomasy z pola/lasu/innego zakładu do miejsca składowania,
- składowanie biomasy np. w przyzmach,
- przetwarzanie biomasy na biopaliwa,
- transport do magazynu,
- transport do klienta/zakładu energetycznego.

Każdy z tych etapów wiąże się z realizowaniem zadań przez producenta lub dostawcę. W większości przedsiębiorstw, biomasa dostarczana jest za pośrednictwem zewnętrznych firm. Celem takiego działania jest zapewnienie ciągłości i stabilności dostaw. Efektem tego jest większa efektywność procesu produkcji (Osiak i Dwórzniak, 2015). Każde rozwiązanie posiada wady i zalety. Do najważniejszych plusów tego rozwiązania należy brak konieczności utrzymywania i zajmowanie się środkami transportowymi w zakładzie, ponieważ zadania te rzucane są na firmy zewnętrzne. Oczywiście, zdarza się, że duże zakłady produkujące biopaliwa, pomimo tego, że współpracują z zewnętrznymi przedsiębiorstwami transportującymi surowiec, posiadają także własne środki transportu. Powodem takiego działania jest dodatkowe zabezpieczenie procesu dostaw oraz konieczność innych przewozów, które często są wynikiem przyczyn losowych. Ficoń (2001) pisze, iż łańcuchy dostaw mogą być bardziej lub mniej złożone i mogą tworzyć zależności i relacje na linii odbiorca-dostawca. Ciesielski (2006) wspomina, że kształt sieci dostaw jest efektem strategii zakupowej zakładu. Ponadto Gostomczyk (2012) uważa, że tworzenie całego zaopatrzenia w surowiec jest zależne od rodzaju, pochodzenia, jakości, dostępności produktu i wielkości zaopatrzenia w biomasę w jednostce czasu.

Analiza łańcucha dostaw umożliwia optymalizowanie całego procesu. Pozwala wskazać powiązania pomiędzy pracującymi działami, aby finalny produkt był jak najlepszy dla finalnego odbiorcy (Marciniec i Szkoda, 2013). Jednym z rozwiązań zapewnienia optymalizacji procesu, jakości i ciągłości dostaw są umowy. Dzięki nim przedsiębiorstwa, zarówno dostarczające, jak i pozyskujące surowiec mogą się zabezpieczyć w danym okresie czasu. Duże przedsiębiorstwa posiadają procedury zakupowe, postępowania przetargowe, konkursy ofert i możliwości negocjacji lepszych cen z dostawcami. Każda transakcja w przedsiębiorstwie musi się wpisywać w ramy, które wcześniej zostały wyznaczone (Gostomczyk, 2012). Umowy sporządzane przez strony powinny zawierać takie elementy jak:

- Przedmiot umowy, czyli typ surowca, czas potrzebny na wypełnienie zobowiązania, obowiązki obu ze stron i okoliczności odstąpienia od zasad ogólnych.
- Terminy zawarte w umowie, czyli wyjaśnienie słów użytych przy formułowaniu umowy, charakterystyka biomasy, partia dostarczonego surowca, harmonogram dostaw, sposób badania jakości i jej normalizacja i dobowe awizacja dostaw.
- Dostawa surowca, czyli czas i miejsce dostawy surowca, organizacja procesu dostawy, zapewnienie bezpieczeństwa w trakcie transportu, załadunku i wyładunku materiałów na terenie przedsiębiorstwa.
- Parametry jakościowe przewożonego surowca do przedsiębiorstwa, czyli wymagania, które musi spełniać towar aby został przyjęty na teren zakładu.
- Rozliczanie dostaw biomasy, czyli opis jak będzie badany towar po dostarczeniu do przedsiębiorstwa i jak będzie wyglądało badanie jakości surowca.
- Ceny surowca, obejmują cenę zakupu, koszty transportu, załadunek i wyładunek na terenie firmy.
- Ogólne wymagania dotyczące realizacji dostawy, szczegółowy opis rodzaju transportu i sposobu manipulacji biomasy, zabezpieczenie ładunku.
- Inne, dodatkowe informacje charakterystyczne dla różnych typów przedsiębiorstw, surowców, środków transportowych, dróg oraz wzory protokołów.

Harmonijna realizacja dostaw do zakładu wiąże ze sobą producentów, przewoźników i wytwórców produktu gotowego. Każdy podmiot jest jednak indywidualny, dlatego na rynku wykształciły się różne modele sieciowej organizacji przedsiębiorstw. Realizują między sobą zadania, a ich niezależność i mnogość jest źródłem konkurencyjności, czego rezultatem jest zwiększenie wykorzystania potencjału każdego z nich (Ciesielski, 2006).

Logistyka zaopatrzenia i transportu są ze sobą ściśle powiązane. Ich celem jest zagwarantowanie dostarczenia surowca oraz innych niezbędnych materiałów do produkcji bez postojów przy zachowaniu opłacalności. Biomase charakteryzuje kilka cech, o których należy pamiętać przy planowaniu transportu oraz produkcji. Na rynku mamy do czynienia z różnymi postaciami biomasy:

- postać sypka – są to między innymi wióry, zrębki lub trociny,
- postać sprasowana, czyli kostki różnych wymiarów i bele słomy,
- postać litą, czyli różnej wielkości kawałki drewna.

Dlatego dobór odpowiedniego środka transportu ma duże znaczenie i zależy przede wszystkim od (Stucley i inni, 2012):

- rodzaju biomasy,

- stopnia rozdrobnienia i formy,
- możliwości wykorzystania przestrzeni ładunkowej,
- dopuszczalnej masy ładunku,
- objętości ładunku,
- wilgotności przewożonego surowca,
- dróg lokalnych (ograniczeń),
- wyposażenia miejsc załadunku i wyładunku,
- odległości transportowej,
- przepisów prawa.

W niektórych przypadkach możliwy jest także transport kolejowy biomasy. Jest on najlepszym wyborem, gdy jest konieczność przemieszczenia ładunku na daleką odległość (Marciniec i Szkoda, 2013). Ten rodzaj transportu jest efektywny tylko przy masowych przewozach drewna i biomasy na duże odległości, lecz posiada pewne konieczne warunki, które należy spełnić. Miejsce, z którego jest odbierany oraz miejsce, do którego jest transportowany surowiec musi być wyposażone w odpowiednią infrastrukturę, na przykład w bocznice kolejową i urządzenia do załadunku i wyładunku. W przypadku kolei, najczęściej stosowane są wagony czteroosiowe, potocznie zwane „węglarki”, których kubatura wynosi 69 m³ oraz mogą przewozić maksymalnie do 40 ton masy ładunku. Należy zaznaczyć, że najczęściej wybieranym środkiem transportu w Polsce jest jednak transport samochodowy. Głównym powodem jest to, że nie ma potrzeby przemieszczania dużych ilości surowca na dalekie odległości tak jak ma to miejsce w innych krajach np. Kanada, Rosja, Brazylia, Indie czy Chiny. Duda-Kękuś (2011) stwierdzają, iż do najważniejszych zalet transportu samochodowego należy możliwość jego użycia w różnym terenie i miejscu, do którego trzeba dojechać, np. las, pole rolne, zakład przetwórstwa drewna. Biomasa może być przewożona w:

- kontenerach,
- wywrotkach,
- samochodach z urządzeniami samowyładowczymi.

Czynności załadunku i wyładunku należą do kierowcy samochodu ciężarowego, a co za tym idzie, bierze on odpowiedzialność za te czynności. Kluczowe jest też doświadczenie operatorów czy kierowców, ponieważ odbiór surowca ma miejsce często w niesprzyjających okolicznościach przyrody, dlatego ważne jest odpowiednie zaplanowanie wszystkich czynności. Często można się spotkać z ograniczonymi miejscami manewrowymi, dlatego też w takie obszary wysyłana jest mniejsza ilość samochodów, aby nie blokować, a co za tym idzie opóźniać prac. W przypadku takich miejsc jak tartaki, lasy lub inne tereny, gdzie nie ma

utwardzonych dróg nienarażonych na opady atmosferyczne, należy stosować samochody dostosowane do jazdy terenowej z odpowiednim napędem (4x4, 6x6, 8x8) i ogumieniem, aby zminimalizować ryzyko utknięcia, co może mieć negatywny wpływ na efektywność procesu transportu. Często kiedy mamy do czynienia z trudnymi warunkami atmosferycznymi, stosuje się zasadę dwóch samochodów. W przypadku utknięcia jednego z nich, drugi samochód może pomóc.

Do obowiązków kierowcy należy prawidłowe zabezpieczenie ładunku, wypełnienie dokumentów transportowych i skontrolowanie przy odbiorze jakości odbieranego surowca. Stopień, w jakim zostaje wykorzystana ładowność środka transportowego zależy od surowca, dlatego w tabeli 1.2. zostało przedstawione wykorzystanie ładowności i przestrzeni ładunkowej dla wybranych środków transportowych (Duda-Kękuś, 2011).

Obecny rozwój gospodarczy wszystkich krajów Europy doprowadził do sytuacji, iż rynek spedycyjny jest bardzo dobrze rozwinięty, zarówno do przewozu biomasy o różnej gęstości oraz różnych parametrach fizycznych, równocześnie z wysokim wykorzystaniem ładowności środków transportowych. Każdy pojazd poruszający się po publicznych drogach w Polsce oraz innych krajach Unii Europejskiej musi spełniać z góry określone wymogi prawne. Z punktu widzenia logistyki dostaw biomasy, najważniejsze wymogi prawne dotyczą dopuszczalnych wymiarów zestawu, tonażu i nacisku na osie.

Tabela 1.2. Podstawowe parametry techniczne pojazdów wykorzystywanych do transportu biomasy stałej

Lp.	Nazwa pojazdu	Objętość ładunku	Masa ład. DMC	Długość pojazdu	Średni czas rozładunku	Postać biomasy	Zużycie paliwa
-	-	m ³	t	m	min	-	l·km ⁻¹
1	Samochód wywrotka 2 osie	15	7-14	6,5-8	10	sypka	0,13
2	Samochód wywrotka 2 osie	20	8-16	7-8,5	10	sypka, pakowana	0,14
3	Samochód wywrotka do materiałów sypkich	53	17-24	9-10,5	10	sypka	0,22
4	Ciągnik z naczepą wywrotną, otwarty z plancką 5 osi	80	24-38	13,6-16	12	sypka	0,36
5	Samochód z prasą, zamknięty wywrotka 5 osi	63	25-40	10-12,5	10	sypka, luzem	0,38
6	Kontenerowiec 4 osie: dwa kontenery po 36 m ³	72	20-32	16-17,5	15	trociny, sypkie	0,30
7	Samochód z chwytakiem do drewna i tarcicy, 4 osie	48	22-30	12,5-14	60	zrzyny, deski, pręty	0,30
8	Ciągnik z naczepą z ruchomą podłogą, 4 osie	90	20-30	13,6-16	20	sypka	0,30
9	Ciągnik z naczepą z ruchomą podłogą, 5 osi	90	26-40	13,6-16	30	sypka, 33 Eurol	0,36
10	Platforma do przewozu słomy i siana	80	14-22	10,5-15	60	kostki lub baloty	0,15

Źródło: (Duda-Kękuś, 2011)

Wszystkie wymogi są nakreślone w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z 31 grudnia 2002r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia. Zgodnie z powyższym rozporządzeniem, DMC, czyli dopuszczalna masa całkowita zależy od liczby osi pojazdu, lecz jej całkowita masa nie może przekraczać 36 ton. Jest to maksymalna wartość sprecyzowana dla zespołu pojazdu, który składa się z dwuosiowego samochodu oraz dwuosiowej przyczepy. Nieco wyższa wartość, bo 40 ton jest dopuszczona dla zespołu mającego 5 lub 6 osi pojazdów lub o liczbie osi większej niż 4, a także 44 tony dla trzyosiowego ciągnika siodłowego i trzyosiowej naczepy przewożącej 40 stopowy kontener zgodny z normą ISO w transporcie kombinowanym. Poniżej są przedstawione dopuszczalne rozmiary pojazdów ciężarowych do przewozu biomasy, które wynoszą:

- maksymalna długość pojazdu ciężarowego łącznie z naczepą wynosi maksymalnie 18,75 m,
- długość przestrzeni przeznaczanej na ładunek wynosi maksymalnie 16,40 m,
- szerokość pojazdu z ładunkiem nie może przekroczyć 2,55 m.

W procesie transportowym kluczowe jest też zużycie energii. Roszkowski (2012) podaje, że aby przewieźć 1 tonę biomasy należy przyjąć $0,3-1,2 \text{ MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$ na 1 km trasy, co wpływa na końcową wypadkową efektywności energetycznej procesu zarówno transportu, jak i produkcji biopaliwa stałego. Każdy czynnik produkcji posiada zarówno wady, jak i zalety. W przypadku produkcji biopaliwa i transportu biomasy przeznaczonej do jego produkcji, to właśnie transport drogowy jest najbardziej efektywnym z możliwych sposobów przemieszczania surowców w Polsce. Transport surowca może być związany z pewnymi niedogodnościami, do których należy zaliczyć:

- trudności w załadunku w przypadku pewnych przyczep, np. przyczepa „ruchoma podłoga” posiada ponadprzeciętną wysokość burty,
- różną wilgotność tego samego rodzaju biomasy z powodu warunków atmosferycznych lub pory roku, efektem tego może być obniżenie wartości transportowanego ładunku,
- zanieczyszczenie biomasy ziemią, kamieniem, piaskiem, żwirem lub innym niechcianym materiałem; jest to możliwe w przypadku nieodpowiedniego ładowania bezpośrednio z pola lub po prostu, gdy podłoże, na którym się znajduje surowiec jest podmokłe,

- utrudnione ładowanie surowca bezpośrednio do naczepy, wynikające z podmokłego terenu; gdy istnieje ryzyko ugrzęźnięcia w terenie, kierowcy nie podejmują się wjechania samochodami na pole, na którym znajduje się np. słoma,
- korzystanie z kontenerów w trudnych warunkach atmosferycznych, które zwiększa zużycie paliwa oraz zmniejsza pojemność zastawu, co jest bezpośrednim przełożeniem na obniżenie efektywności pracy.

Każdy transport wiąże się z kosztami. To właśnie aspekt ekonomiczny ma jeden z największych wpływów na decyzyjność osób odpowiedzialnych za dostawy materiałów. Zgodnie z literaturą przedmiotu optymalna odległość transportu nie jest do końca sprecyzowana, dlatego niezbędne są badania, które bardziej przybliżą optymalną odległość transportową biomasy przeznaczonej na cele energetyczne. Przykładowo Roszkowski (2012) oraz Gołos i Kaliszewski (2015) piszą, że optymalna odległość transportu waha się w granicach 30-60 km, natomiast inni autorzy wskazują, że ta odległość sięga granicy 100 km. W praktyce długość przebytej drogi dla transportowanej biomasy zależy od zbyt wielu czynników, aby móc to tak uprościć. Dlatego konieczne jest przeprowadzenie analiz, aby to dokładnie określić. W praktyce, normalną okolicznością jest fakt, że niektóre zakłady w wyniku zmian rynkowych, ich lokalizacji lub aktualnej sytuacji zapotrzebowania w surowiec, zmuszone są do „ściągnięcia” surowca z obszarów odległych o kilkaset kilometrów, gdyż bardziej opłacalne jest zapłacenie więcej za transport niż zaprzestanie produkcji, której wznowienie może być związane z dodatkowymi kosztami z tytułu umów i niepotrzebnymi nikomu problemami.

Istotnym elementem systemu logistycznego jest magazynowanie surowca. Magazynowanie surowca do produkcji peletów, jakim jest słoma zbóż wiąże się z zapewnieniem odpowiednich warunków, które należy spełnić aby materiał nadawał się do dalszej obróbki (Wieruszewski i inni, 2022):

- Odpowiednia wilgotność. Słoma ustawiona na zewnątrz nie powinna być składowana na terenach podmokłych, ponieważ może w znacznym stopniu pogorszyć jej jakość oraz uniemożliwić jej wykorzystanie w procesie produkcji.
- Wentylacja. Słoma powinna być składowana na pryzmach o odpowiednich wymiarach, dostosowanych do formy sprasowanej słomy, a pryzmy nie powinny być zbyt blisko siebie, gdyż ograniczy to przepływ powietrza. Wentylacja działa jako środek zapobiegawczy przed gromadzeniem się wilgoci i zabezpiecza przed pleśnią oraz namnażaniem się mikroorganizmów. Zapewnienie odpowiedniej cyrkulacji powietrza pomaga utrzymać jakość surowca na odpowiednim poziomie oraz minimalizuje ryzyko degradacji.

- Zadaszenie. Jeżeli jest możliwość to surowiec powinien być składowany pod zadaszeniem.
- Bezpieczeństwo pożarowe. Należy mieć na uwadze, że surowiec wykorzystywany do produkcji peletu jest materiałem palnym, dlatego należy zapewnić jak najlepszą ochronę przeciwpożarową, aby uniknąć tego typu wydarzeń (Saletnik i inni, 2021).

Reasumując, należy podkreślić, że na podstawie przeglądu literatury stwierdzono istotną lukę w badaniach naukowych nad problemem wpływu logistyki dostaw biomasy na efektywność wykorzystania linii produkcyjnej paliwa kompaktowe (pelety/brykiety). Żarski (2015) analizuje logistykę zaopatrzenia i możliwości wspomagania produkcji biopaliw w przedsiębiorstwie, jednakże nie bada jej wpływu na efektywność wykorzystania linii technologicznej. Maj (2015) oraz Sławiński i inni (2015) w swoich artykułach dokonują kompleksowych opisów warunków transportu drogowego w dostawie biomasy, w tym charakterystykę pojazdów oraz wynikające z ich budowy ograniczenia, ale nie łączą ich z wykorzystaniem zdolności produkcyjnej linii technologicznej. Natomiast według nich transport biomasy jest jednym z głównych elementów warunkujących opłacalność przetwarzania biomasy na pelety. Z kolei Kraszkiewicz i inni (2015) analizują koszty produkcji peletów z biomasy roślinnej, w których, według autorów, ważnym elementem są koszty zakupu surowców oraz lokalizacja przedsiębiorstwa. Szyszlak-Bargłowicz i inni (2014) oraz Borowski i inni (2015) uważają biomasę stałą za źródło energii o największym potencjale w naszym kraju. Ponadto stwierdzają, iż trzeba dążyć do stworzenia modeli organizacyjnych i logistycznych dla zapewnienia stabilnych dostaw biomasy, a poprawienie zdolności produkcyjnej firmy produkującej biopaliwa stałe łączone powinno być z logistyką dostaw surowca. Według Bauma i innych (2012) wydaje się uzasadnione przeprowadzanie analiz na temat produkcji i wykorzystania biomasy. Dodają także, że w najbliższych latach znacznie wzrośnie zapotrzebowanie na biopaliwo ze strony zakładów petrochemicznych, energetycznych i elektrociepłowni, co spowoduje konieczność opracowania sprawnych systemów sieci, które będą zajmować się gromadzeniem, transportem, zbiorem, wstępnym przetwarzaniem oraz magazynowaniem biomasy (Szkoda, 2002).

Nieodłącznym elementem łączącym produkcję peletów z logistyką dostaw surowca jest lokalizacja obiektu w którym mieści się linia technologiczna do produkcji. Jest to istotny element, ponieważ mamy do czynienia z surowcem, który jest gabarytowo duży, a jego wartość stosunkowo niska, dlatego lokalizacja zakładu powinna być umiejscowiona w obszarze, gdzie znajduje się jak najwięcej potencjalnego surowca. Według Maja (2015) takie umiejscowienie nie zawsze jest możliwe, co ma znaczący wpływ na ostateczną cenę surowca, a w konsekwencji na cenę produktu.

Kluczowe jest właściwe wykorzystanie środków transportu, dlatego proces ten jest monitorowany za pomocą odpowiednich wskaźników i mierników, wpływających na jego efektywność (Stajniak, 2007).

Różnorodność cen na rynku transportowym zależy od podaży i popytu, konkurencyjności, możliwości zastąpienia produktów logistycznych oraz satysfakcji użytkowników systemu logistycznego.

Transport odgrywa także kluczową rolę w funkcjonowaniu gospodarki i systemu logistycznego, będąc integralną częścią procesu przepływu towarów. Łączy miejsca produkcji, dostawców i odbiorców na różnych etapach łańcucha dostaw, umożliwiając globalną wymianę handlową. Nowoczesne środki transportu, takie jak samoloty, statki, pociągi i ciężarówki, pozwalają na przemieszczanie towarów na znaczne odległości między krajami i kontynentami. Dzięki temu transport wspiera eksport, import oraz rozwój międzynarodowych relacji handlowych, odgrywając istotną rolę w rozwoju gospodarczym i globalizacji (Nowicka-Skowron, 2000).

Transport zapewnia również dostępność różnorodnych towarów w różnych regionach geograficznych, umożliwiając ich dystrybucję tam, gdzie są potrzebne. Wpływa to na zaspokojenie potrzeb konsumenckich i prawidłowe funkcjonowanie rynku. Bez efektywnego transportu wiele niezbędnych towarów, takich jak żywność, leki i paliwa, nie byłoby dostępnych w miejscach, gdzie są one niezwykle ważne (Nowakowski, 2011).

Efektywny transport wspiera także rozwój gospodarczy, umożliwiając przepływ surowców, materiałów, części i gotowych produktów między różnymi etapami produkcji, co przyczynia się do efektywności operacyjnej przedsiębiorstw. Nowoczesne technologie transportowe, takie jak zaawansowane systemy zarządzania transportem, logistyka łańcucha dostaw i inteligentny transport, optymalizują procesy logistyczne i zwiększają konkurencyjność przedsiębiorstw.

Analiza roli transportu w badaniach naukowych opiera się na wskaźnikach i miernikach, takich jak przepływy towarów, koszty transportu, efektywność logistyczna, wpływ na środowisko i inne czynniki wpływające na efektywność i zrównoważony rozwój systemu transportowego.

Reasumując, należy też podkreślić, że transport pełni kluczową rolę w logistyce dostaw biomasy, ponieważ jest niezbędny do przemieszczenia surowca z miejsca produkcji do miejsca jego energetycznego wykorzystania. Zapewnia regularne i terminowe dostawy biopaliwa do elektrowni, zakładów przetwórczych, magazynów lub innych punktów odbioru. Dobrze zorganizowana logistyka transportu minimalizuje opóźnienia, zapobiega przerwom w dostawach i utrzymuje ciągłość produkcji.

Efektywne planowanie tras, odpowiedni dobór środków transportu oraz redukcja pustych przebiegów mogą znacząco obniżyć koszty dostaw biomasy. Wybór optymalnego rodzaju transportu, takiego jak transport drogowy, kolejowy, morski czy rzeczny powinien uwzględniać zarówno koszty, jak i logistyczne korzyści. Regularne oceny wskaźnikowe i miernikowe pozwalają utrzymać procesy transportowe na pożądanym poziomie efektywności, zgodnie z założeniami przedsiębiorstwa. Takie oceny umożliwiają wczesne identyfikowanie pozytywnych lub negatywnych trendów w procesie (Twaróg, 2004).

1.3. Cel i zakres pracy

Celem pracy było określenie efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów ze słomy zbóż w zależności od jej potencjału produkcyjnego oraz stosowanego systemu logistyki dostaw surowca.

Na podstawie dokonanego studium literatury oraz zakładając, że rynek produkcji peletów będzie w Polsce się rozwijał, sformułowano w formie pytań następujące problemy badawcze:

- W jakim zakresie uwarunkowania zewnętrzne dostaw surowca do produkcji peletów i jego zapasy wpływają na efektywne wykorzystanie linii produkcyjnej?
- Czy zastosowana technologia produkcji peletów i stosowany system logistyki dostaw surowca jest wystarczający do pokrycia zapotrzebowania na pelety?
- Jakie czynniki wpływają na efektywność wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów ze słomy zbóż?

W związku z powyższym sformułowano następującą hipotezę badawczą:

H1: System logistyki dostaw surowca istotnie wpływa na efektywność wykorzystania linii do produkcji peletów.

Do weryfikacji postawionej hipotezy konieczna była realizacja następujących etapów badań:

- określenie parametrów eksploatacyjnych środków transportowych wykorzystywanych do realizacji dostaw surowca (moc silnika, masa całkowita, ładowność),
- określenie odległości transportowych oraz masy przewożonego surowca,
- ocena ilościowa zasobów surowca do produkcji peletów (dostawy surowca i zapasy magazynowe),
- określenie potencjału produkcyjnego peletów i zużycia surowca w skali miesiąca i roku,
- charakterystyka technologii produkcji peletów (parametry eksploatacyjne linii produkcyjnej),
- ocena efektywności wykorzystania linii produkcyjnej w aspekcie potencjału produkcyjnego,
- analiza logistyki dostaw surowca z wykorzystaniem metody analizy wymiarowej i metody AHP.

Zakresem pracy objęto firmę i linię technologiczną do produkcji peletów ze słomy zbóż, a badania wykonano w latach 2018-2021. Firma znajduje się na terenie województwa

lubelskiego, a właściciel nie wyraził zgody na wykorzystanie w pracy nazwy firmy oraz modeli i typów maszyn i urządzeń, które tworzą linię technologiczną.

Firmę tę wybrano, na podstawie badań wstępnych, spośród 21 firm produkujących brykiety/pelety (w Polsce południowej). Przy wyborze firmy uwzględniono skalę produkcji oraz zrobiono rozeznanie co do wyrażenia zgody przez właściciela na współpracę. W pozostałych firmach właściciele nie wyrazili zgody na współpracę lub skala produkcji peletów lub brykietów była zbyt mała, aby wykonać badania do pracy albo firma zajmowała się tylko dystrybucją biopaliw. Badane firmy to:

- Ekopelet w Bieńkowicach, firma zajmująca się dystrybucją, nie produkcją biopaliw,
- Demp Sp.z.o.o. w Jaworznie, firma zajmująca się dystrybucją, nie produkcją biopaliw,
- Ivet w Knurowie, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Berkin Pelet w Czeladzi, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Ecomasa w Czeladzi, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Feniks z Miasteczka Śląskiego, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Pasternak centrum peletu, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Ekogrant ze Sławkowa, firma zajmująca się produkcją brykietu,
- Brykiet Pol 2 w Goleszowie, firma zajmująca się produkcją brykietu,
- Dropała Grzegorz producent brykietu z węgla drzewnego z Kolonowskie, firma zajmująca się produkcją brykietu,
- F.H. Elstar-trans Export-Import w Miasteczku Śląskim, producent brykietu i peletu,
- Prodrewex w Węgierskiej Górze, producent peletu,
- Feniks pellets premium w Niemodlinie, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Politrade Ekspert w biomasie w Tychach, firma zajmująca się produkcją peletu,
- **Firma X z województwa lubelskiego, zajmująca się produkcją peletu,**
- Skalec w Koniecpolu, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Bioperfect w Łące, firma zajmująca się dystrybucją, nie produkcją biopaliw,
- Pelet Production w Starachowicach, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Barlinek w Kielcach, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Tartak Olczyk w Świdnie, firma zajmująca się produkcją peletu,
- Propellet w Opolu, firma zajmująca się produkcją peletu.

2. Metodyka pracy

2.1. Metodyka badań

Na podstawie wywiadu kierowanego z prezesem firmy oraz uzyskanych materiałów z firmy zebrano dane dotyczące logistyki dostaw surowca w latach 2018-2021, takie jak:

- liczba dostaw i forma surowca (kostki, bele),
- liczba bel i kostek surowca transportowanych w trakcie jednej dostawy,
- masa przewożonego surowca do produkcji peletów w badanych latach (z podziałem na miesiące),
- wykorzystywane środki transportowe i środki do rozładunku surowca,
- masa samochodu z ładunkiem i masa przewiezionego ładunku w jednym cyklu ładunkowym,
- liczba dostaw i odległości transportowe.

Numery rejestracyjne środków transportowych wykorzystywanych w badanej firmie do transportu zostały pozyskane poprzez wniosek do Centralnej Ewidencji Pojazdów i Kierowców (CEPiK), gdzie po wniesieniu opłaty zostały przypisane każdej rejestracji odpowiednie informacje:

- marka i model samochodu,
- rodzaj środka transportowego,
- rok produkcji samochodu,
- pojemność silnika,
- dopuszczalna masa całkowita,
- moc samochodu,
- liczba osi.

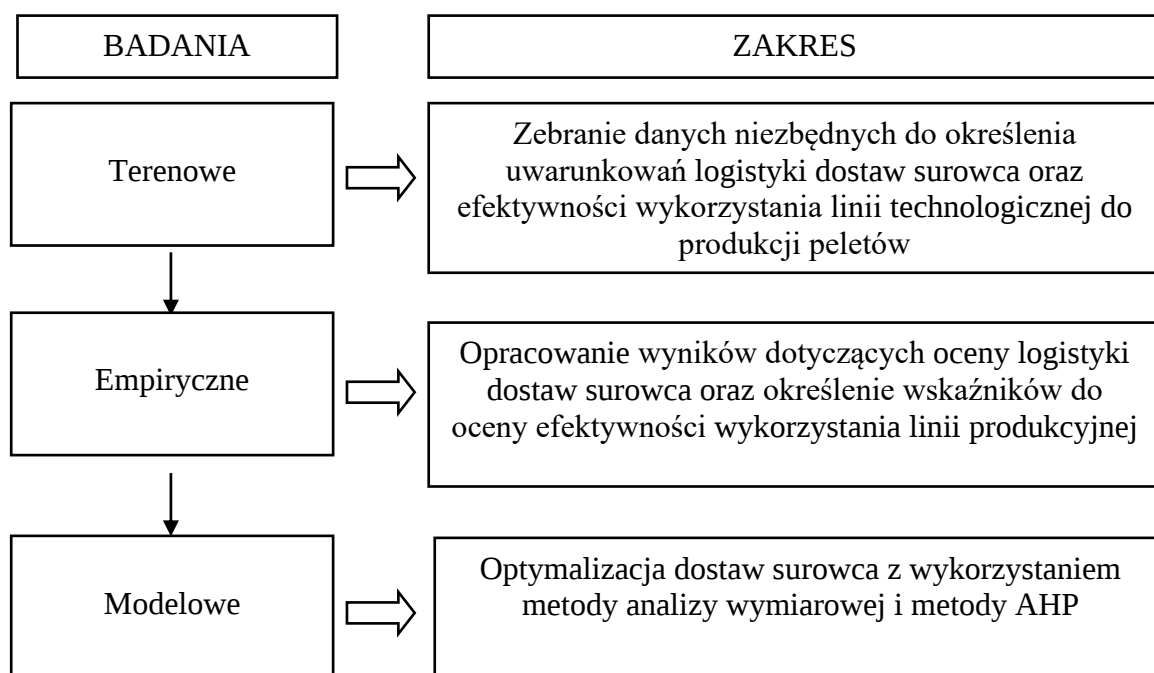
Dodatkowo do określenia efektywności wykorzystania linii technologicznej zostały zebrane informacje i dane dotyczące stosowanej technologii produkcji. Dotyczyły one:

- wydajności maszyn i parametrów urządzeń, które tworzą linię technologiczną,
- mocy zainstalowanej na linii,
- czasu wykorzystania linii technologicznej w ciągu dnia, miesiąca, roku,
- trybu pracy w ciągu miesiąca (liczba zmian) i liczby pracowników potrzebnych do obsługi linii,
- utrzymywanych zasobów surowca,
- organizacji dnia pracy z uwzględnieniem planowanych przestojów linii technologicznej,

- obsługi serwisowej maszyn i urządzeń,
- parametrów surowca wykorzystywanego do produkcji.

Schemat procesu badawczego i realizacji niniejszej pracy pokazano na rysunku 2.1. Wyniki badań terenowych w firmie wykorzystano do określenia i przedstawienia uwarunkowań logistyki dostaw surowca do produkcji peletów. Natomiast w drugim etapie badań wykonano obliczenia, które pozwoliły na ocenę systemu logistycznego dostaw surowca oraz określenie wskaźników, które posłużyły do oceny efektywności wykorzystania linii produkcyjnej.

Końcowy etap badań to badania modelowe związane z próbą optymalizacji dostaw surowca do zakładu produkującego pelety.



Rysunek 2.1. Schemat procesu badawczego i realizacji pracy

2.2. Metodyka obliczeń

W analizie wyników badań w pracy wykorzystano następujące metody:

- metoda wskaźnikowa,
- metoda analizy wymiarowej,
- metoda AHP.

W metodzie wskaźnikowej wykorzystano wskaźnik OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), który służy do oceny efektywności wykorzystania linii produkcyjnej. Podstawę tej metody stanowi określenie efektywnego czasu pracy w godzinach, w którym uwzględniony powinien być kalendarzowy czas pracy, czas wolny od pracy, czas trwania pracy w godzinach w ciągu doby i czas przeznaczony na remonty.

Wskaźniki obliczone dodatkowo to: wskaźnik czasu przestojów technologicznych i wskaźnik wykorzystania surowca do produkcji.

Metoda analizy wymiarowej pozwala na analizę logistyki dostaw surowca w przedsiębiorstwie (Zelkowski i inni, 2016). Umożliwia ona wyciągnięcie wniosków dotyczących procesu wyłącznie na podstawie założenia, iż proces ten może być opisany w postaci funkcji pewnych zmiennych tylko za pomocą równania poprawnego pod względem wymiarowym. Jest ona matematyczną metodą określania związków funkcyjnych między wielkościami fizycznymi na podstawie ich wymiarów i to w sposób niezależny od zastosowanych jednostek miar. Do podstawowych założeń analizy wymiarowej należą:

- wymiar każdej wielkości pochodnej da się wyrazić za pomocą iloczynu potęgowego wymiarów wielkości podstawowych,
- twierdzenie Buckinghama.

Kolejną metodą wykorzystaną w pracy do analizy systemu logistyki dostaw surowca była metoda AHP, która została sformułowana przez Satty'ego (1990). Służy ona do oceny wieloaspektowego problemu decyzyjnego, którym w tym przypadku jest złożony system logistyki dostaw surowca do zakładu produkującego pelety. Powyższa metoda ułatwia podejście analityczne do złożonego problemu decyzyjnego oraz pomaga stworzyć finalny ranking dla skończonego zbioru wariantów. Metoda ta jest wykorzystywana w wielu dziedzinach nauki - między innymi w transporcie, zarządzaniu, finansach i rachunkowości oraz socjologii. Analiza zaczyna się od nadania wag charakteryzujących ważność poszczególnych elementów. Realizacja metody polega na przejściu etapów:

- budowa modelu reprezentującego hierarchię analizowanych kryteriów,
- ocena za pomocą 9-stopniowej skali Saaty'ego,
- określenie wag lokalnych i globalnych,
- klasyfikacja wariantów rozwiązań decyzyjnych.

Wykorzystanie tej metody daje możliwości aby zoptymalizować dostawy surowca oraz pokazać ich wpływ na efektywność wykorzystania zdolności produkcyjnej linii do produkcji peletów na przykładzie wybranej firmy.

2.2.1. Metoda wskaźnikowa

Efektywność wykorzystania maszyn (OEE) to złożony wskaźnik, który pozwala mierzyć efekty z uwzględnieniem zdolności produkcyjnych, dostępności procesów, wydajności i jakości. Dzięki temu, że agreguje różne źródła niedoskonałości procesu produkcji (straty) do

postaci jednego miernika, stanowi dobre, intuicyjne narzędzie zarządzania szeroko rozumianą efektywnością produkcji.

Ponadto dzięki ogólnej formule wskaźnika możliwe jest łatwe porównywanie działów i przedsiębiorstw z różnych branż. Nie należy jednak korzystać z niego wyłącznie na poziomie zagregowanym, ale starać się używać go do identyfikacji możliwości wprowadzenia ulepszeń w zakresie efektywności procesów. Analizy powinny obejmować nie tylko wartość samego wskaźnika, lecz także jego komponentów, na które składają się pomiary dostępności, wydajności i jakości.

$$\text{Efektywność wykorzystania maszyn} = \text{dostępność} \times \text{wydajność} \times \text{jakość}$$

Gdzie:

- Dostępność uwzględnia straty z tytułu przestojów w produkcji, a oblicza się ją według wzoru:

$$\text{dostępność} = \text{czas pracy} / \text{planowany czas produkcji}$$

- Wydajność uwzględnia straty z tytułu obniżenia tempa produkcji, a oblicza się ją z wykorzystaniem wzoru:

$$\text{wydajność} = \text{średnia wydajność produkcji} / \text{teoretyczna maksymalna wydajność}$$

W pracy przyjęto, że wydajność linii technologicznej to wydajność peletarki.

- Jakość uwzględnia straty z tytułu nieodpowiedniej jakości, a oblicza się ją według wzoru:

$$\text{jakość} = \text{liczba sztuk bez defektów} / \text{łączna liczba sztuk}$$

W pracy do oceny jakości wyprodukowanych peletów wykorzystano uśrednione dane udostępnione przez firmę, której pracownicy oceniali wizualnie straty z tytułu nieodpowiedniej jakości produktu (przykładowo jakość oceniona na 0,97 oznacza w 97% wysoką jakość produktu, a 3% to straty z tytułu nieodpowiedniej jakości).

Przykład obliczeń OEE:

$$\text{efektywność wykorzystania maszyn} = \text{dostępność} \times \text{wydajność} \times \text{jakość}$$

$$\text{efektywność wykorzystania maszyn} = 0,88 \times 0,86 \times 0,97 = 0,74, \text{ czyli } 74\%$$

Optimalny czas cyklu to minimalny czas trwania cyklu, którego można oczekiwać w ramach danego procesu w optymalnych warunkach. Czasem nazywa się go projektowanym czasem cyklu, teoretycznym czasem cyklu albo zdolnością znamionową. Wydajność nie może

przekraczać 100%, co pozwala zagwarantować, że jeśli błędnie określi się idealny czas cyklu albo optymalne tempo wykonania, jego wpływ na wartość OEE będzie ograniczony.

Efektywność wykorzystania maszyn dla całego zakładu albo przedsiębiorstwa oblicza się jakoś średnią arytmetyczną albo ważoną indywidualnych wskaźników OEE.

Częstotliwość obliczania efektywności i wykorzystania maszyn zależy w pewnym stopniu od okoliczności. Dla poszczególnych maszyn można ją obliczać co tydzień, natomiast dla większych procesów lub zakładów wystarczy dokonywać obliczeń co miesiąc.

W niniejszej pracy wskaźnik OEE był obliczany dla miesięcznej produkcji w każdym badanym roku (w okresie 2018-2021).

Dane do obliczania efektywności wykorzystania maszyn pochodzą z wewnętrznych procesów operacyjnych i są gromadzone automatycznie lub ręcznie.

W niniejszej pracy dane pochodziły głównie z prowadzenia papierowej dokumentacji w firmie.

Dokonywanie obliczeń efektywności wykorzystania maszyn ręcznie i prowadzenie papierowej dokumentacji wymaga dużych nakładów finansowych oraz pracy. Jednak wielu dostawców rozwiązań dla produkcji oferuje zintegrowane automatyczne systemy do gromadzenia danych, które ograniczają związane z tym koszty i nakłady pracy. Efektywność wykorzystania maszyn na poziomie 90% można by uznać za mistrzostwo świata. Jest to jednak wynik trudny do osiągnięcia w praktyce. Znacznie lepiej jest ustalać wartości docelowe z użyciem informacji o najwyższej dostępności, wydajności i jakości na podstawie historycznych danych dotyczącej danej maszyny lub zakładu, dla których obliczano już efektywność wykorzystania maszyn. Dzięki temu obrane wartości docelowe stają się realistyczne, wiemy bowiem, jaki poziom efektywności wykorzystania maszyn można z ich zastosowaniem osiągnąć.

Tak jak w przypadku bardziej skomplikowanych czy złożonych kluczowych wskaźników efektywności wykorzystania maszyn może być niepoprawnie interpretowana, jeśli źle się ją rozumie albo źle z niej korzysta. Efektywność wykorzystania maszyn to miernik, który można stosować do poprawy wydajności maszyn, co oznacza, że nie powinno się go używać do porównywania różnych maszyn, procesów ani zakładów, ponieważ może to być mylące. Jeżeli celem jest poprawa efektywności wykorzystania maszyn na poziomie ogólnym (a nie komponentów OEE), może to doprowadzić do niechcianych zachowań, czyli manipulowania danymi, by osiągnąć pożądaný wynik (np. rejestrowania awarii jako planowanej konserwacji) co prawdopodobnie nigdy nie wyjdzie na jaw (Marr, 2012).

Każde przedsiębiorstwo chce zminimalizować czas mijający bezproduktywnie. Jeżeli maszyny albo procesy są niedostępne, gdy akurat są potrzebne, skutkuje to zmniejszeniem produkcji, co negatywnie wpływa na rentowność.

Przestój to czas przeznaczony na produkcję, w trakcie którego maszyna lub proces są niedostępne ze względu na okoliczności takie jak awaria czy konserwacja.

Przestoje maszyn występują w branży produkcyjnej, natomiast przestoje procesów mogą dotyczyć każdej branży. Na przykład w call center ważne są przestoje procesów działów wsparcia, a w szpitalach liczy się niedostępność sprzętu diagnostycznego.

Marr (2012) stwierdza, że wiedza o czasie przestojów pozwala przedsiębiorstwu dowiedzieć się, jak efektywne są jego procesy wewnętrzne (związane ze sprzętem lub z procesami).

Dane do obliczania wskaźnika czasu przestojów pochodzą bezpośrednio z monitoringu maszyn lub procesów bądź z dokumentacji.

W niniejszej pracy dane do obliczeń pochodziły głównie z dokumentacji udostępnionej przez badaną firmę.

Wskaźnik czasu przestojów można obliczyć jako stosunek:

$$\text{Wskaźnik czasu przestojów} = \frac{\text{rzeczywisty czas produkcji}}{\text{planowany czas produkcji}} \cdot 100\%$$

Gdzie:

- rzeczywisty czas produkcji (h), czas w którym proces lub maszyna były dostępne w założonym okresie,
- planowany czas produkcji (h), czas w którym proces lub maszyna były planowane, że będą dostępne w założonym okresie.

Czas przestojów to wskaźnik, który można śledzić na bieżąco, zwłaszcza jeśli monitorowanie go zostało zautomatyzowane, i ujmować w raportach, jeśli osiągnięte ustalony wcześniej poziom. Zazwyczaj wystarczy ujmowanie go w raportach co miesiąc albo co kwartał.

Wartością docelową dla wskaźnika czasu przestojów powinno być zero, a celem - eliminacja, a przynajmniej minimalizacja nieplanowanych przerw w procesie produkcji, zwłaszcza jeśli proces lub maszyna nie pracuje całą dobę, a konserwację można zaplanować poza godzinami pracy.

Ważne jest, by obliczając wskaźnik czasu przestojów, rozumieć jego wpływ na koszty ponoszone przez firmę, takie jak bezpośrednie koszty pracy. Pracownikom bowiem trzeba

wypłacić wynagrodzenie nawet wtedy, gdy maszyny mają nieplanowany bądź planowany przestój.

Do oceny zasobów surowca do produkcji peletów w pracy określono wskaźnik wykorzystania surowca, który obliczono jako stosunek:

$$\text{Wskaźnik wykorzystania surowca} = \frac{\text{zużyty surowiec do produkcji}}{\text{zasoby surowca do produkcji}} \cdot 100\%$$

Gdzie:

- zużyty surowiec do produkcji (t), surowiec zużyty do produkcji w założonym okresie,
- zasoby surowca do produkcji (h), zasoby surowca możliwe do wykorzystania w założonym okresie.

2.2.2. Metoda analizy wymiarowej

Ocena właściwości projektowanych procesów logistycznych, technologicznych i innych często jest bardzo utrudniona. Głównymi powodami mogą być kosztowne lub nawet niemożliwe do wykonania eksperymenty oraz niedostateczny stan teorii i/lub zbyt mała liczba danych pozwalających w prosty sposób opracować model matematyczny analizowanego procesu. W takich przypadkach do oceny wykorzystać można jedną z metod teorii modelowania, tj. teorię podobieństwa.

Jak wiadomo, w modelowaniu rzeczywistych procesów można wykorzystać podobieństwo teksturalne, strukturalne, zachowania, kombinowane (Gutenbaum, 1987) lub tylko wymiarowe (Müller, 1983; Pabis, 1985; Kasprzak i Lysik, 1986; Złokarnik, 1991; Awrejcewicz, 2007; Łunarski, 2010; Gibbings, 2011; Flaga, 2015; Zelkowski i inni, 2016; Tan Q.-M., 2011). Oczywiście dla uzyskania podobieństwa całkowitego konieczne jest zachowanie podobieństwa wymiarowego, gdyż wtedy można wyznaczyć warunki wiążące wielkości charakteryzujące procesy rzeczywiste z procesami modelowymi. Warunki te nazywa się kryteriami podobieństwa. Można je uzyskać na podstawie równań opisujących badany proces lub w przypadku braku tych równań, dzięki analizie wymiarowej. Analiza wymiarowa, jako dział matematyki stosowanej, umożliwia bowiem wyprowadzenie równań opisujących model danego procesu oraz uogólnienie tych równań. Dzięki temu ułatwione jest porównywanie modeli procesów podobnych i tym samym (po ustaleniu podziałek wielkości) porównywanie procesów rzeczywistych. Należy tutaj zaznaczyć, że analiza wymiarowa umożliwia wyprowadzenie poprawnych postaci równań pod względem wymiarowym z wykorzystaniem najmniejszej liczby zmiennych niezależnych m .

W analizie wymiarowej każdą wielkość wymiarową Q przedstawia się w postaci (Müller, 1983; Awrejcewicz, 2007; Łunarski, 2010; Gibbings, 2011):

$$Q = q \cdot (X_1)^{a_1} \cdot \dots \cdot (X_m)^{a_m}, \quad (1)$$

gdzie q jest wielkością bezwymiarową, a_i są liczbami rzeczywistymi ($i = 1, \dots, m$), $X_1, \dots, X_m$ jest układem jednostek (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Układ jednostek X_k wybranych wielkości wymiarowych Q_i

Wielkość wymiarowa Q_i	Układ jednostek X_k			
	m	h	kg	szt.
	a_1	a_2	a_3	a_4
Droga	1	-	-	-
Czas	-	1	-	-
Prędkość	1	-1	-	-
Masa	-	-	1	-
Wydajność	-	-1	1	-
Liczba pojazdów	-	-	-	1
Ładowność	-	-	1	-1

Z dowolnego zbioru wielkości wymiarowych $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ($n \geq m$) należy wyodrębnić największy podzbiór $\{A_m\} = A_1, \dots, A_m$ wielkości wymiarowo niezależnych. Liczba m jest równa liczbie przyjętych jednostek. Sprawdzenie niezależności wymiarowej wielkości $A_1, A_2, \dots, A_m$ można przeprowadzić dwoma sposobami:

- wielkości podzbioru $A_1, \dots, A_m$ są liniowo niezależne, gdy liczba m elementów tego podzbioru jest równa największemu rzędowi m wyznacznika $W_i \neq 0$ utworzonego z macierzy wykładników a_i ,
- wielkości podzbioru $A_1, \dots, A_m$ są liniowo niezależne, gdy z tożsamości:

$$(A_1)^{r_1} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_m} = \pi \quad (2)$$

wynika $r_1 = \dots = r_m = 0$ oraz $\pi = 1$.

Gdy otrzyma się $m < n$ wielkości wymiarowo niezależnych $A_1, \dots, A_m$, to z pozostałych $n - m$ wielkości układu się $n - m = j$ bezwymiarowych iloczynów:

$$\begin{aligned} P_1 \cdot (A_1)^{r_{11}} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_{m1}} &= \pi_1, \\ P_2 \cdot (A_1)^{r_{12}} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_{m2}} &= \pi_2, \\ &\dots, \\ P_j \cdot (A_1)^{r_{1j}} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_{mj}} &= \pi_j, \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie $P_1, \dots, P_j$ są liczbami, wykładniki $r_{11}, \dots, r_{mj}$ - liczbami rzeczywistymi.

Uwaga: należy rozpatrywać wyłącznie wymiarowo niezmiennicze i wymiarowo jednorodne funkcje wielkości wymiarowych, gdzie:

- a) wymiarowa niezmienniczość funkcji oznacza, że jej postać nie zależy od wyboru jednostek, pod warunkiem, że zawiera wszystkie zmienne od których zależy.
- b) wymiarowa jednorodność funkcji oznacza, że wymiar funkcji nie ulega zmianie, jeżeli jej argumenty zostaną pomnożone przez dowolne liczby dodatnie, czyli:

$$f(a_1 \cdot Q_1, \dots, a_n \cdot Q_n) = a \cdot f(Q_1, \dots, Q_n). \quad (4)$$

Wykładniki potęgowe $r_{11}, \dots, r_{mj}$ należy tak dobierać, aby iloczyny $\pi_1, \dots, \pi_j$ były bezwymiarowe.

Twierdzenie Buckinghama (znane również jako twierdzenie π) z 1914 roku mówi, że liczba modułów bezwymiarowych równa jest liczbie niezależnych parametrów fizycznych ($\pi_1, \dots, \pi_j$) pomniejszonych o liczbę wymiarów podstawowych wykorzystanych w danej analizie.

Dlatego też to twierdzenie jest wykorzystywane do:

- a) ustalenia struktury wzorów,
- b) ustalenia kryteriów podobieństwa,
- c) zmniejszenia liczby zmiennych niezależnych, czyli jednocześnie zmniejszenia koniecznej liczby pomiarów g^k (gdzie g jest liczbą punktów pomiarowych potrzebnych do ustalenia wpływu jednej zmiennej niezależnej, natomiast k jest zmniejszenia zmiennych niezależnych).

Założenia twierdzenia Buckinghama:

- a) funkcja wielkości wymiarowych $F(A_1, \dots, A_m, P_1, \dots, P_j)$ jest wymiarowo niezmiennicza i jednorodna,
- b) argumenty $A_1, \dots, A_m$ są wymiarowo niezależne,
- c) argumenty $P_1, \dots, P_j$ są wymiarowo zależne od argumentów $A_1, \dots, A_m$:

$$\begin{aligned} P_1 &= \pi_1 \cdot (A_1)^{r_{11}} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_{m1}}, \\ &\dots, \\ P_j &= \pi_j \cdot (A_1)^{r_{1j}} \cdot \dots \cdot (A_m)^{r_{mj}}, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie $\pi_1, \dots, \pi_j$ są liczbami czyli wielkościami bezwymiarowymi oraz wykładniki $r_{11}, \dots, r_{mj}$ - liczbami rzeczywistymi.

Twierdzenie Buckinghama:

Zgodnie z zależnościami (3–5) wymiarowo niezmienniczą i jednorodną funkcję wielkości wymiarowych $F(A_1, \dots, A_m, P_1, \dots, P_j)$ można wyrazić w postaci:

$$F(A_1, \dots, A_m, P_1, \dots, P_j) = \varphi(\pi_1, \dots, \pi_{jm}) \cdot (A_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (A_m)^{f_m}, \quad (6)$$

gdzie $\varphi(\pi_1, \dots, \pi_{jm})$ jest funkcją liczbową czyli bezwymiarową argumentów $\pi_1, \dots, \pi_{jm}$ oraz dodatkowo niezależną od argumentów $A_1, \dots, A_m$, natomiast wykładniki $f_1, \dots, f_m$ są liczbami rzeczywistymi niezależnymi od argumentów $\pi_1, \dots, \pi_{jm}$ oraz od argumentów $A_1, \dots, A_m$.

Zależność Buckinghama (6) pozwala na wyznaczenie wielkości charakterystycznych badanego (projektowanego) procesu rzeczywistego pod warunkiem, że znane są wielkości procesu modelowego. Wymagane jest bowiem podobieństwo procesu modelowego do procesu rzeczywistego. Zależność Buckinghama (6) dla procesu modelowego przyjmuje wtedy postać:

$$F'(A'_1, \dots, A'_m, P'_1, \dots, P'_j) = \varphi(\pi'_1, \dots, \pi'_{jm}) \cdot (A'_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (A'_m)^{f_m}. \quad (7)$$

gdzie wielkości wymiarowo niezależne $A'_1, \dots, A'_m$ oraz wymiarowo zależne $P'_1, \dots, P'_j$ wyznaczone z badań modelowych będą miały inne wartości.

Dla argumentów procesu rzeczywistego oraz modelowego, jako procesów podobnych, należy wprowadzić podziałki:

a) przyjęte dowolnie:

$$\lambda_i = \frac{A_i}{A_i} \quad 1 \leq i \leq m, \quad (8)$$

b) obliczone:

$$\mu_i = \frac{P_i}{P_i} \quad 1 \leq i \leq j. \quad (9)$$

Zgodnie z teorią podobieństwa dwa procesy są podobne, gdy z zadanych wielkości charakterystycznych procesu modelowego można wyznaczyć wielkości charakterystyczne procesu rzeczywistego.

Mianowicie z dwóch ostatnich zależności na podziałki można wyznaczyć podziałki wielkości funkcji F oraz F' :

$$v_i = \frac{F_i}{\bar{F}} = \frac{\varphi(\pi_1, \dots, \pi_{jm}) \cdot (A_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (A_m)^{f_m}}{\varphi(\pi'_1, \dots, \pi'_{jm}) \cdot (A'_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (A'_m)^{f_m}} = \frac{\varphi(\pi_1, \dots, \pi_{jm})}{\varphi(\pi'_1, \dots, \pi'_{jm})} \cdot (\lambda_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (\lambda_m)^{f_m}. \quad (10)$$

Warunkiem prawidłowego zaprojektowania badań modelowych jest równość argumentów procesów rzeczywistego i modelowego:

$$\pi_i = \pi'_i, \quad (11)$$

którą można zapewnić przez odpowiedni dobór podziałek λ_i .

Dlatego liczby π_i są niezmiennikami a równość $\pi_i = \pi'_i$ kryterium podobieństwa. Zależności na podziałki funkcji F przyjmują postać:

$$v = \frac{F}{\tilde{F}} = (\lambda_1)^{f_1} \cdot \dots \cdot (\lambda_m)^{f_m}. \quad (12)$$

Jak widać podziałka v funkcji F nie zależy od funkcji φ , czyli nie wymagana jest jej znajomość, bowiem po wyznaczeniu funkcji F' z eksperymentu możliwe jest wyznaczenie funkcji F ze wzoru:

$$F = v \cdot \tilde{F} \quad . \quad (13)$$

2.2.3. Metoda AHP

AHP (*Analytic Hierarchy Process*) jest jedną z najpopularniejszych metod wspomagania decyzji na świecie. Została opracowana ponad 50 lat temu przez amerykańskiego matematyka Thomasa L. Saaty'ego. Prace nad opracowaniem tej metody zaczęły się nieco wcześniej, gdy Saaty pracował w Amerykańskiej Agencji Kontroli Zbrojeń i Rozbrojenia. Wtedy narodził się pomysł opracowania uniwersalnego narzędzia wspomagającego decydentów w podejmowaniu złożonych decyzji. Założeniem było klasyfikowanie decyzji decydenta przez rekomendację działania, które z punktu widzenia celów i założeń jest optymalne. W połowie XX wieku powstało wiele podobnych metod, oprócz metody AHP i podobnej ANP, zostały także stworzone Electre, Promethee&Gaia, MacBeth, VDA. Obecnie metoda AHP oprócz wykorzystania w wielu dziedzinach nauki jest także powszechnie stosowana w wielu przedsiębiorstwach, na przykład: IBM, British Airways, Xerox, Ford (Prusak i Stefanów, 2014). Oprócz firm metoda ta wykorzystywana jest także przez jednostki rządowe Stanów Zjednoczonych, na przykład Departament Obrony Stanów Zjednoczonych, który wspomina o wykorzystywaniu tej metody oraz wiele agencji, które poprzez charakter działalności nie zdradzają narzędzi i metod, które wykorzystują na potrzeby swojej działalności (Prusak i Stefanów, 2011). Do wzrostu popularności AHP w ostatnich latach przyczyniła się wszechstronność, uniwersalność i elastyczność tej metody, której zastosowanie można znaleźć w prawie każdym obszarze nauki i praktyki. Przykładowo AHP stosowana jest w podejmowaniu decyzji dotyczących wyrobu paliwa w światowych koncernach, ubezpieczeniach i dostawców usług, między innymi transportowych. Literatura wspomina także, że rząd turecki zastosował tę metodę do wskazania nowej lokalizacji miasta Adapazari zburzonego w wyniku trzęsienia ziemi. Wspomaganie decyzji można uznać za klasyfikację możliwości decyzyjnych przez wyodrębnienie działań, które są optymalne z punktu widzenia celów i oczekiwań decydentów (Roy, 2005). Należy zaznaczyć, że każde procesy decyzyjne mogą się od siebie różnić, lecz zasada ich wspomagania jest usystematyzowana i w literaturze przedmiotu można znaleźć siedem etapów poprawnego rozwiązywania problemów decyzyjnych (Anholcer, 2009; Levin, 1986):

1. Sformułowanie problemu obejmującego opis – na czym polega problem, co ma być optymalizowane (cel), jakie kryteria warunkują osiągnięcie celu, jakie są ograniczenia przedsięwzięcia.
2. Skonstruowanie modelu decyzyjnego w postaci matematycznej lub graficznej z uwzględnieniem wszelkich ograniczeń rzeczywistości decyzyjnej.
3. Dobór odpowiedniej metody i zebranie wiarygodnych danych na podstawie faktów, opinii i istniejących oraz dostępnych baz danych.
4. Rozwiązanie modelu i jego weryfikacja.
5. Interpretacja wyników.
6. Analiza wrażliwości pozwalająca na przykład ocenić, jak zmieni się optymalne rozwiązanie wraz ze zmianą wartości parametrów.
7. Wdrożenie rozwiązania.

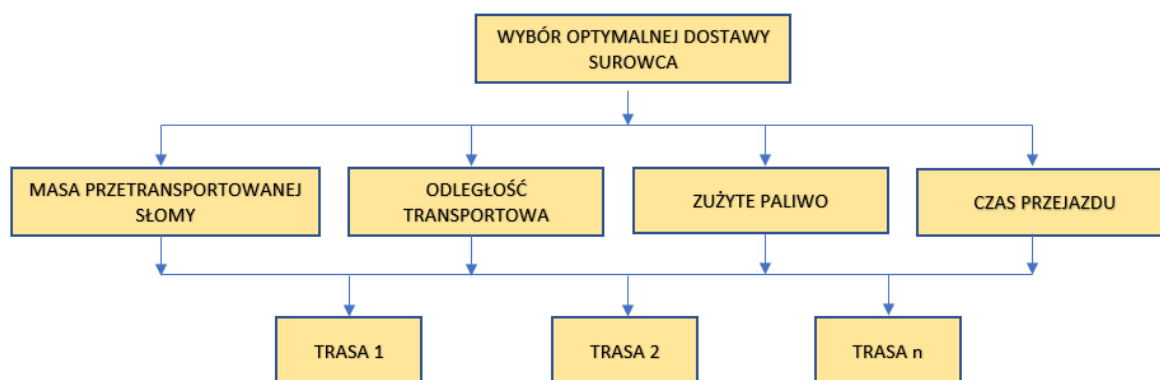
Należy zaznaczyć, że mimo zastosowania i poprawnego wykonania modelowania, nie zawsze zagwarantowana jest optymalizacja problemu stawianego metodzie, a co za tym idzie, w niektórych przypadkach problem może nie być w pełni rozwiązany. Jest to spowodowane kilkoma przyczynami:

- modele, dzięki którym podejmuje się decyzje są uproszczoną rzeczywistością,
- nie jesteśmy w stanie w 100% uwzględnić wszystkich uwarunkowań,
- nie jesteśmy w stanie poznać zdania/opinii wszystkich osób, które mogą mieć wpływ na proces decyzyjny,
- eksperci mogą się mylić lub posiadać błędne informacje, które bezpośrednio wpłyną na decyzję,
- ocena ekspercka zawsze jest subiektywna, ponieważ jest dokonywana przez człowieka, którego wybór zależy od indywidualnych preferencji, motywów i intuicji.

Dlatego pomimo wiedzy i doświadczenia ekspertów, niezależnie kto podejmuje decyzję musimy założyć, że zawsze towarzyszy jej większa lub mniejsza niepewność, która wpływa na przyszłe konsekwencje.

Aby zastosować metodę AHP należy zbudować model decyzyjny, który w tej metodyce nosi miano „struktury hierarchicznej” (w literaturze widnieje także pojęcie „hierarchia decyzyjna”). Etap ten wymaga poświęcenia najwięcej czasu oraz wiedzy, która jest wykorzystywana w dokonaniu ocen przez ekspertów. W metodzie zakłada się, że problem decyzyjny można rozłożyć na mniejsze elementy, których rozkład przedstawia się w postaci hierarchii. W literaturze przedstawia się to najczęściej jako czteropoziomowa struktura złożona z celu decyzyjnego, który jest umiejscowiony na górze (Saaty i Forman, 1992). Model

hierarchiczny, charakteryzujący omawiany problem wyboru optymalnej dostawy surowca został pokazany na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2. Model hierarchiczny

Źródło: Opracowanie własne

Poprawne wykorzystanie metody AHP niesie ze sobą określenie kilku kluczowych składowych (Saaty, 2008a; Saaty, 2008b):

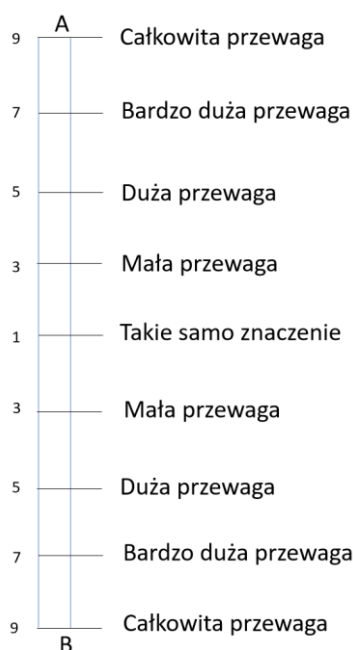
1. Cel decyzyjny, który rozumiany jest jako odpowiedź na pytanie, „jaki stan decydent chce osiągnąć?”. Stanowi to główny element hierarchii, który wynika z problemu decyzyjnego. W niniejszej pracy, jako cel decyzyjny przyjmuje się wskazanie optymalnego rozwiązania transportu biomasy do zakładu przetwarzającego biomasę na biopaliwo stałe, jakim są w tym przypadku pelety.
2. Warianty, które w literaturze są określane jako „alternatywy decyzyjne”, zbudowane są minimum z dwóch elementów, wśród których decydent musi dokonać wyboru. W badanym przypadku są to składowe procesu transportowego biomasy do przedsiębiorstwa.
3. Kryteria decyzyjne, są składowymi wpływającymi na ocenę i porównanie wariantów decyzyjnych. W strukturze hierarchicznej AHP jako czynniki uważane są kryteria, które mają przełożenie na cel decyzyjny.

Nieodłącznym elementem metody AHP jest korzystanie z wiedzy eksperckiej (Saaty, 2010). Wynika to ze złożoności problemu, skutków oraz zasięgów działań. Literatura przedmiotu wspomina, że eksperci powinni być zaangażowani od momentu budowy modelu hierarchicznego. Za ekspertów uważa się osoby posiadające wiedzę i doświadczenie w dziedzinie przeprowadzania badań, które mogą być pomocne w rozwiązaniu problemu decyzyjnego. W przypadku niniejszej pracy i wykonanych badań, ekspertem był autor pracy.

Kolejnym elementem metody AHP jest skala opracowana przez Saaty’ego (Saaty’s fundamental scale) przedstawiona na rysunku 2.3. Jest to jedyna skala wykorzystywana do oceny w tej metodzie. Skala liniowa, dwubiegunowa złożona z dziewięciu stopni, stąd jej

nazwa-dziewięciostopniowa skala porównań parami (ang. 9-point pairwise comparison scale). Posługując się tą skalą, decydent (którym w tym przypadku jest ekspert) określa, który spośród dwóch elementów posiada przewagę. Stopnie przewagi są opisane poniżej:

- A i B mają takie samo znaczenie,
- A ma małą przewagę nad B (lub B ma małą przewagę nad A),
- A ma dużą przewagę nad B (lub B ma dużą przewagę nad A),
- A ma bardzo dużą przewagę nad B (lub B ma bardzo dużą przewagę nad A),
- A ma całkowitą przewagę nad B (lub B ma całkowitą przewagę nad A).



Rysunek 2.3. Dziewięciostopniowa skala

Źródło: opracowanie własne

Stopniami parzystymi oznaczone są wartości znajdujące się pomiędzy kategoriami nadrzędnymi. Liczby parzyste wykorzystywane są do analizy, gdy osoba oceniająca nie jest pewna swojej decyzji. Zgodne przeprowadzenie metody AHP wiąże się z porównaniem wszystkich elementów ze sobą (każdy z każdym). Liczba tych utworzonych par elementów jest obliczana na podstawie poniższego wzoru:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} . \quad (14)$$

gdzie:

n -liczba porównywanych elementów.

Literatura przedmiotu wskazuje, że grupa elementów nie powinna przekraczać 9 pozycji. Wynika to z faktu, iż przykładowo przy 7 elementach, jest utworzonych 21 kombinacji, przy 10, jest aż 45. Duża ilość porównywanych rzeczy niesie ze sobą dużą ilość porównań, co zwiększa ryzyko popełnienia błędu. Aby go uniknąć, ich liczba powinna być możliwie jak najmniejsza. Analiza modelu hierarchicznego z wykorzystaniem porównań zachodzi w układzie poszczególnych grup elementów z poziomu niższego, w odniesieniu do ich elementu macierzystego, który zajmuje pozycję wyżej w hierarchii.

Skonstruowanie macierzy, zawierających wyniki porównywania parami, jest następnym etapem metodyki AHP. Macierz powinna przybierać postać macierzy kwadratowej o wymiarach $(n \times n)$. Na podstawie tej macierzy dokonywane są obliczenia współczynników wagowych, które w literaturze przedmiotu noszą także nazwę priorytetów.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Współczynniki leżące na przekątnej macierzy zawsze są jedynkami, ponieważ wynika to ze skali Saaty'ego, gdzie porównywalne te same elementy przybierają wartość jedności.

$$a_{ij} = 1 \quad \text{dla} \quad i = j \quad (16)$$

Następnym etapem w metodyce AHP jest wyznaczenie priorytetów (priorities), który w terminologii tej metodyki jest synonimem współczynników wagowych. Otrzymywane są po wykonaniu określonych operacji matematycznych na przedstawionej powyżej macierzy porównań (Forman i Gass 2001; Gao i Hailu, 2013). Aby je obliczyć, metodyka dopuszcza wybór kilku sposobów obliczania współczynników wagowych. Wśród nich można wymienić:

- rachunek macierzowy,
- średnia arytmetyczna,
- średnia geometryczna.

Możliwe jest także skorzystanie z oprogramowania powszechnie dostępnego i darmowego. Jednym z nich jest program o nazwie Super Decisions. Jest on o tyle prosty, że wystarczy wprowadzić bezpośrednio dane do rubryk a wyniki obliczą się automatycznie. Najpowszechniejszą metodą wyznaczania wartości współczynników wagowych jest stosowanie średniej geometrycznej (Finan i Hurley, 1997).

Poniżej został przedstawiony schemat postępowania zaproponowany przez autora metody Thomasa Saaty'ego:

1. Wprowadzenie wyników porównań parami do macierzy kwadratowej o rozmiarze $n \times n$.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2. Obliczenie średniej geometrycznej jako pierwiastek n -tego stopnia (n jest to liczba porównywanych elementów) iloczynu wyrazów macierzy w poszczególnych wierszach.

$$r = \sqrt[n]{1 \times a_{12} \dots \times a_{1n}} \quad (18)$$

3. Zsumowanie średnich geometrycznych.

$$\sum_{i=1}^n r_i \quad (19)$$

4. Obliczenie współczynników wagowych (priorytetów) przez normalizację wyników, czyli dzielenie wartości poszczególnych pierwiastków przez ich sumę (suma po poprawnym obliczeniu powinna wynosić 1).

$$w_n = r_n / \sum_{i=1}^n r_i \quad (20)$$

W literaturze można się też spotkać z pojęciami priorytetów globalnych i lokalnych, które odpowiadają za ich miejsce w układzie hierarchicznym oraz relacji do celu decyzyjnego. Priorytety lokalne to te, które pochodzą z macierzy porównań, mówią o znaczeniu danego elementu względem elementu macierzystego (Saaty i Ozdemir, 2003; Saaty i Peniwati 2007; Prusak i Stefanów, 2011). Priorytety globalne to te, które ukazują udział każdego elementu w realizacji celu, czyli środka znajdującego się w najwyższym poziomie decyzyjnym (Saaty, 1996; Saaty, 2000).

Ostatnim elementem metody AHP jest weryfikacja modelu. Według Saate'go ten etap jest największą zaletą tej metody, ponieważ pozwala na weryfikację logiczności priorytetów (spójność, zgodność), które zostały obliczone na podstawie wyników porównywania parami

(Saaty, 1980; Saaty, 1990; Saaty i Forman, 1992). Tak jak zostało to opisane wcześniej, konieczność uwzględnienia wszystkich kombinacji par podczas porównań powoduje możliwość popełnienia błędu, czego efektem jest otrzymanie nielogicznych osądów na skutek dużej liczby elementów. Błędy są efektem spadku koncentracji przez dużą liczbę porównań tych samych elementów w różnych konfiguracjach. Jest to zarazem zaleta jak i wada tej metody, ale pozwala sprawdzić, jak bardzo spójni są eksperci w swoich ocenach. Do obliczenia stopnia logiczności dokonanych porównań wykorzystywany jest współczynnik zgodności oznaczony literami CR (Consistency Ratio), którego metodyka obliczeń jest wyszczególniona poniżej (Saaty, 1994):

1. Wyznaczenie największej wartości własnej macierzy λ_{max} . Jest to suma iloczynów sumy wartości porównań w każdej kolumnie macierzy A oraz odpowiedniego dla danego elementu współczynnika wagowego.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_i \quad (21)$$

2. Obliczenie indeksu niezgodności IC (Inconsistency Index), który jest ilorazem różnicy największej wartości własnej macierzy i liczby porównywanych elementów (n) przez różnicę (n-1).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (22)$$

3. Oblicza się współczynnik CR dzieląc CI przez stabilizowaną wartość indeksu losowego RI (Random Index). Stabilizowane wartości RI zostały wygenerowane przez Saaty'ego na podstawie symulacji 500 000 macierzy i ich wartości przyjmują, w zależności od liczby porównywanych elementów następujące wartości: Im większa liczba elementów, tym większa tolerancja dla niespójności.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (23)$$

Poniżej zostały zaprezentowane stabilizowane wartości współczynnika Random Index (RI):

- $n = 2$; $RI = 0,00$;
- $n = 3$; $RI = 0,52$;
- $n = 4$; $RI = 0,89$;
- $n = 5$; $RI = 1,11$;

- $n = 6$; $RI = 1,25$;
- $n = 7$; $RI = 1,35$;
- $n = 8$; $RI = 1,40$;
- $n = 9$; $RI = 1,45$.

Według literatury, im większa jest liczba elementów, tym większa jest tolerancja dla niespójności dla modelu. Metodyka AHP uznaje zgodność wyników w przypadku, gdy współczynnik CR nie przekracza wartości 0,10 lub 10%. W przypadku mniejszej ilości elementów, tolerowana wartość CR jest jeszcze pomniejszona i nie powinna przekroczyć

- 0,08 lub 8%, dla $n = 4$,
- 0,05 lub 5%, dla $n = 3$.

Gdy wartość współczynnika przekracza wartość graniczną, literatura nie uznaje wyników za zgodne i zaleca powtórzenie analizy.

Po wyznaczeniu współczynników, należy przeprowadzić analizę wrażliwości wyników, która pozwala zbadać wpływ zmiany wartości macierzy na wyniki końcowe obliczonych elementów takich jak współczynnik CR i współczynniki wagowe. Poprawnie przeprowadzona analiza jest bardzo wrażliwa na minimalne zmiany wartości porównań. Analiza wrażliwości pomaga odpowiedzieć na pytanie, który element macierzy wywiera największy wpływ na wysokość współczynnika CR.

3. Przedmiot badań

3.1. Charakterystyka firmy i produkowanych peletów

Badany zakład produkcyjny znajduje się w województwie lubelskim, niestety nie uzyskano zgody właściciela na podanie dokładnej lokalizacji i nazwy firmy. Zakład rozpoczął produkcję w roku 2017, lecz dokładna analiza danych zaczyna się od roku 2018. W skład budynków na terenie firmy wchodzi:

- hala produkcyjna,
- wiata otwarta do przechowywania słomy bezpośrednio przed procesem produkcji,
- hala produktu gotowego,
- stacja TRAFO, która służy do pomiarów parametrów słomy przewiezionej do zakładu.

Oprócz budynków w firmie istnieje także taka infrastruktura jak:

- miejsca parkingowe,
- drogi wewnętrzne, chodniki,
- silos,
- place składowe do słomy i innych materiałów,
- ogrodzenie i brama wjazdowa,
- oświetlenie terenu,
- przyłącze wodno-kanalizacyjne, sanitarne i deszczowe.

Cały zakład obejmuje trzy budynki (A, B, C) podzielone ze względu na funkcjonalność.

Budynek A posiada poniżej wymienione części:

- hala produkcyjna i przyjęcie surowca do wstępnego rozdrabniania,
- hala produkcyjna z głównym ciągiem technologicznym,
- pomieszczenie sterowni i szaf zasilających,
- pomieszczenie ze strefą socjalną,
- pomieszczenie serwisowe z wydzieloną strefą warsztatową,
- pomieszczenie biurowe z częścią socjalną i archiwum.

Budynek B tworzy powierzchnię składową, czyli wiaty dla surowca do produkcji peletów, natomiast budynek C stanowi powierzchnie magazynowe dla składowania peletu czyli produktu gotowego.

Produkcja peletów w firmie uzależniona jest od zapotrzebowania przez odbiorców. W zależności od zapotrzebowania na pelety i trwania sezonu grzewczego produkcja odbywa się w cyklach na jedną lub dwie zmiany (bez pracy w niedziele).

Zakład otrzymuje słomę w formie sprasowanej i parametrach zbliżonych do podanych w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Parametry jakościowe słomy dostarczanej do zakładu produkcyjnego

Parametr	Wartość	Jednostka
średnia wilgotność słomy	15-25	(%)
średni ciężar usypowy sprasowanej słomy	0,13	(t·m ⁻³)
średni ciężar usypowy po szarpaczu	0,045	(t·m ⁻³)
średni ciężar usypowy po rozdrabniaczu bijakowym	0,065	(t·m ⁻³)

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów z badanej firmy

Gotowym produktem otrzymywanym po procesie produkcji jest granulata o średnicy od 6 mm do 10 mm i długości powyżej 25 mm. Pelety są składowane w magazynie o powierzchni 17x33 m². Ciężar usypowy gotowego materiału waha się w granicach od 0,44 do 0,68 Mg/m³ i jest zależny od jakości surowca poddanego obróbce. Najważniejsze parametry fizykochemiczne granulatu produkowanego w badanej firmie to:

- ciepło spalania wynosi 19818 kJ·kg⁻¹,
- wartość opałowa 18093 kJ·kg⁻¹,
- wilgotność 10,5%,
- zawartość popiołu 6%,
- ciężar właściwy 0,750 MJ·m⁻³.

Skład elementarny produkowanego peletu ze słomy zawiera między innymi:

- węgiel 47,71%,
- tlen 46,8%,
- wodór 4,59%,
- azot 0,52%,
- siarkę 0,10%,
- chlor 0,2712%.

Podane dane są wartościami przybliżonymi, a rzeczywiste wartości mogą się różnić i zależą od parametrów użytego do produkcji surowca oraz stanu i jakości urządzeń technicznych zamontowanych na linii technologicznej zakładu. Dla porównania w tabeli 3.2

została przedstawiona charakterystyka jakościowa zawierająca zestawienie parametrów różnego rodzaju biomasy, która trafia na linie technologiczne w innych zakładach.

Tabela 3.2. Zestawienie parametrów jakościowych różnego typu biomasy

Lp.	Rodzaj biomasy	Wilgotność biomasy	Wartość opałowa w stanie świeżym	Wartość opałowa w stanie suchym
		(%)	(MJ·kg ⁻¹)	(MJ·kg ⁻¹)
1	słoma pszenna	15-20	12,9-14,1	17,3
2	słoma jęczmienna	15-22	12-13,9	16,1
3	słoma rzepakowa	30-40	10,3-12,5	17,5
4	słoma kukurydziana	45-60	5,3-8,2	18,6
5	pył drzewny	3,8-6,4	15,2-19,1	15,2-20,1
6	trociny	39,1-47,3	5,3	19,3
7	zrębki wierzby	40-55	8,7-11,6	16,5
8	pelety	3,6-12	16,5-17,3	17,8-19,6
9	brykiety ze słomy	9,7	15,2	17,1
10	brykiety drzewne	3,8-14,1	15,2-19,7	16,9-20,4

Źródło: opracowanie własne

Zakład produkcyjny zużywa także energię różnego rodzaju. Najważniejsza to energia elektryczna, woda i sprężone powietrze. Zapotrzebowanie podstawowych nośników w zakładzie oscyluje na poziomie:

- energia elektryczna ok. 11000 MWh·rok⁻¹,
- powietrze sprężone ok. 280000 Nm³·rok⁻¹,
- woda na potrzeby technologiczne i bytowe ok. 1500 m³·rok⁻¹.

Ponadto do prawidłowego funkcjonowania urządzeń i instalacji konieczne jest zakupienie odpowiedniej ilości materiałów eksploatacyjnych w postaci:

- olejów przekładniowych,
- smarów łożyskowych,
- paliwa,
- płynów.

Ilość tych materiałów zależy jest od wytycznych zawartych w DTR (Dokumentacja Techniczno-Ruchowa) urządzeń i ilości roboczogodzin pracy maszyn i urządzeń. Wielkość zapotrzebowania na surowiec jest stosowna do wielkości produkcji peletu. Jest ona ograniczona ogólnie możliwościami produkcyjnymi oraz ilością zamówień z uwzględnieniem możliwości składowania zarówno produktu gotowego, jak i surowca do produkcji peletu.

Podstawowe założenia i parametry dotyczące procesu produkcji peletów w badanej firmie przedstawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Założenia i parametry dotyczące procesu produkcji peletów

Lp.	Parametr	Wartość	Jednostka
1	Minimalna wydajność w punkcie rozładunku samochodów	45	t·h ⁻¹
2	Przewidywana maksymalna liczba samochodów z biomasą	6	szt·h ⁻¹
3	Łączna wydajność podawania słomy	do 11,5	Mg·h ⁻¹
4	Liczba linii podawania słomy	2	szt.
5	Rozdrabnianie wstępne	do 140	mm
6	Rozdrabnianie właściwe	do 12	mm
7	Wydajność produkcji peletów	do 5,5	t·h ⁻¹
8	Liczba zabudowanych granulatorów	1	szt.
9	Dyspozycyjność instalacji	85	%
10	Moc urządzeń technologicznych zainstalowanych w instalacji	2400	kW
11	Minimalna wydajność załadunku samochodów	60	Mg·h ⁻¹
12	Przewidywana ilość środków transportowych do załadunku peletem	3	szt·h ⁻¹
13	Emisja pyłu z urządzeń odpylających	do 10	mg·Nm ⁻³

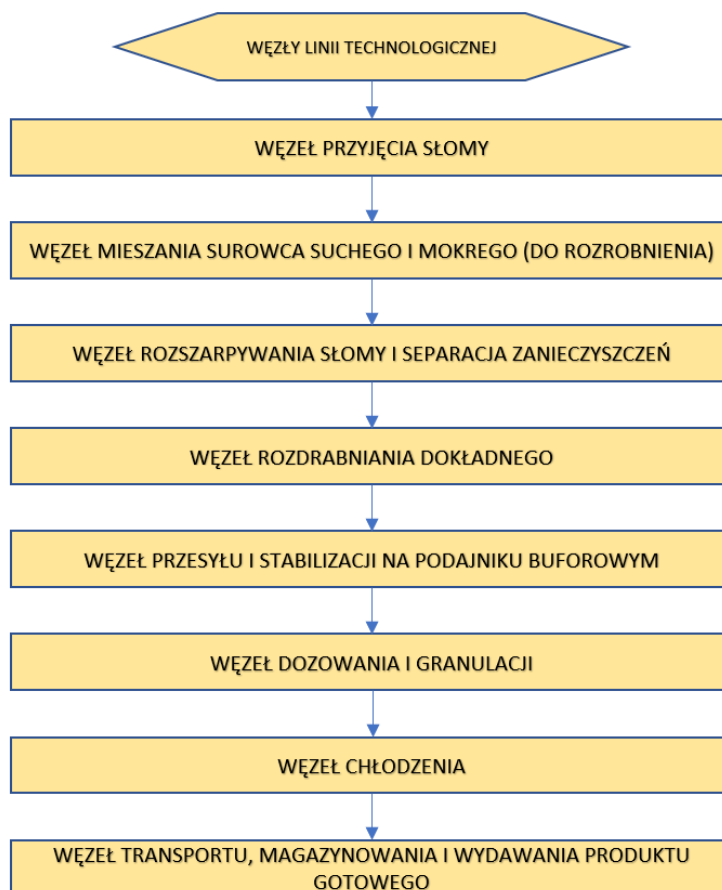
Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów z badanej firmy

3.2. Charakterystyka i parametry eksploatacyjne linii technologicznej

W badanej firmie produkcja peletów odbywa się na jednej linii technologicznej, która cechuje się tym, że posiada dodatkowe miejsce gdzie wprowadzany zostaje surowiec rozdrobniony do podajnika buforowego, przez co możliwy jest proces produkcji z pominięciem dodatkowego rozdrabniania surowca. Linia zamontowana w badanej firmie jest wyposażona w węzły (rysunek 3.1), które zostały poniżej wymienione:

- węzeł przyjęcia sprasowanej słomy,
- węzeł mieszania surowca suchego i mokrego oraz podawania go do wstępnego rozdrobnienia,
- węzeł rozszarpywania słomy i separacji zanieczyszczeń,
- węzeł rozdrabniania dokładnego,
- węzeł przesyłu i stabilizacji na podajniku buforowym,
- węzeł dozowania i granulacji,
- węzeł chłodzenia,

- węzeł transportu, magazynowania oraz wydawania peletów z magazynu.

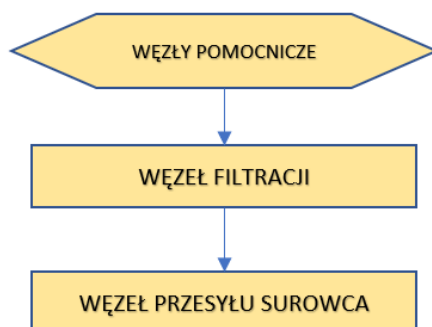


Rysunek 3.1. Linia technologiczna do produkcji peletów z podziałem na węzły

Źródło: opracowanie własne

W zakładzie zostały także utworzone węzły pomocnicze (przedstawione na rysunku 3.2), które są nieodłącznym elementem każdej linii produkcyjnej, spośród nich należy wyróżnić:

- węzeł filtracji przestrzeni urządzeń,
- węzeł przesyłu surowca rozdrobnionego na podajniku buforowym.



Rysunek 3.2. Węzły pomocnicze zamontowane na linii technologicznej

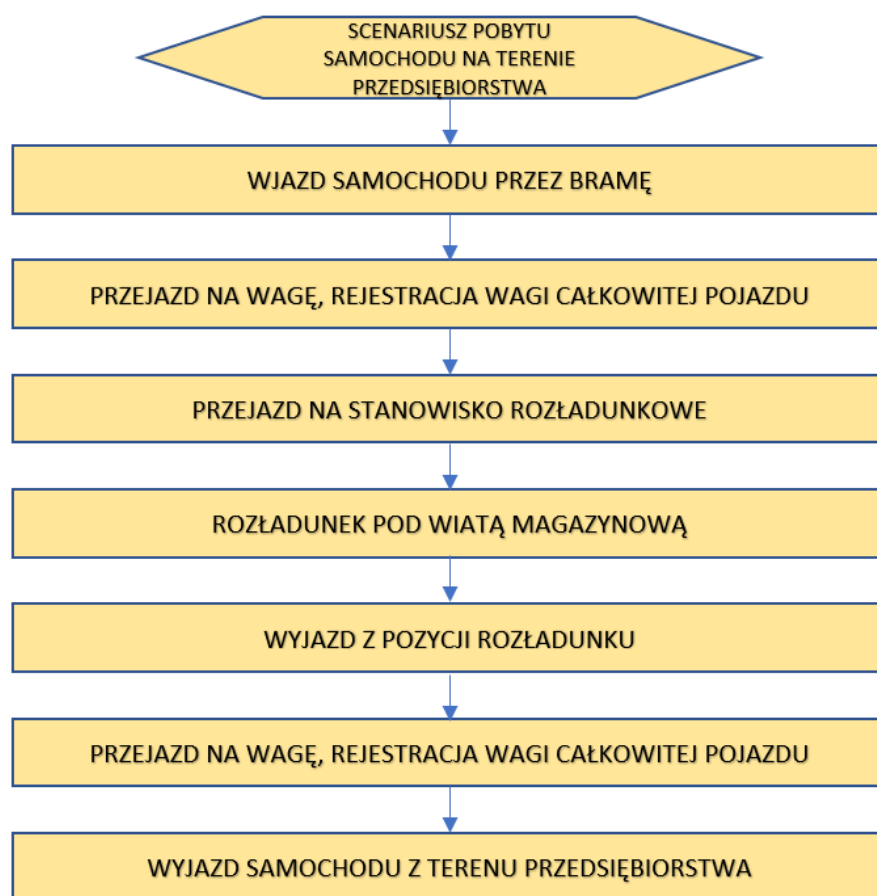
Źródło: opracowanie własne

Dostawy biomasy do firmy są realizowane transportem samochodowym i ciągnikami rolniczymi z przyczepami. Biomasa jest dostarczana w postaci sprasowanej i powiązanej słomy. Stopień sprasowania oraz kształt nie ma specjalnych wymagań w badanej firmie. Transport odbywa się pojazdami samochodowymi i ciągnikowymi, tj.:

- ciągnik siodłowy z naczepą platformową,
- samochód ciężarowy skrzyniowy z przyczepą,
- ciągnik rolniczy z przyczepami.

Praca węzła przyjmowania słomy jest oparta o harmonogram, aby nie powodować utrudnień w ruchu na terenie zakładu (także poza nim), nie powodować przestojów oraz zbędnego oczekiwania na rozładunek. Istnieje również scenariusz pobytu samochodu dostarczającego słomę na terenie zakładu i został on przedstawiony poniżej oraz na rys. 3.3:

1. Wjazd pojazdu przez bramę.
2. Przejazd na wagę automatyczną, przy której następuje elektroniczna rejestracja wagi całkowitej pojazdu.
3. Pomiar wilgotności słomy (pomiar ten został wprowadzony po 2020 roku).
4. Przejazd na stanowisko rozładunkowe.
5. Rozładunek według wskazań obsługi pod wiatą magazynową.
6. Wyjazd z pozycji rozładunku.
7. Przejazd na wagę automatyczną, przy której następuje elektroniczna rejestracja wagi „tara” pojazdu.
8. Wyjazd pojazdu z terenu zakładu.



Rysunek 3.3. Scenariusz pobytu samochodu dostarczającego słomę na terenie badanej firmy

Źródło: Opracowanie własne

Ciężar biomasy dostarczonej do zakładu jest określany na podstawie wagi zainstalowanej na terenie zakładu. Pomiar czyli ważenie dokonywane jest dwukrotnie. Pierwsze, gdy samochód wjeżdża na teren zakładu z ładunkiem, drugie gdy go opuszcza. Różnica tych dwóch pomiarów jest wartością (wagą) surowca jaki został dostarczony do firmy. Waga jest dostosowana do pracy automatycznej i zostaje uruchomiona przez kierowców pojazdu. Urządzenie oprócz pomiaru wagi samochodów ze słomą, obsługuje również pozostałe dostawy samochodowe oraz dystrybucję produktu gotowego. Po 2020 roku, stanowisko do ważenia samochodów zostało wyposażone również w urządzenie do pomiaru wilgotności.

Słoma składowana pod wiatą magazynową jest przemieszczania za pomocą wózków jezdnych z wysięgnikiem hydraulicznym przed kosze zasypowe z podajnikiem zgrzeblowym. Przygotowaną biomasę należy zsunąć do kosza zasypowego przy pomocy wózka jezdnego podczas podstawiania kolejnej partii materiału. Następnie jest ona wybierana z kosza podajnikiem łańcuchowym i transportowana do węzła rozdrabniania wstępnego. Słoma z podajnika zostaje przekazana do komory rozdrabniacza, tam zostaje ona rozdrobniona wstępnie na odcinki do 140 mm.

Następnym etapem jest przełożenie pociętej słomy na ciąg transportowy, który rozpoczyna się separatorem kamieni i piasku. Odseparowane elementy trafiają do pojemnika blaszanego, a biomasa ciągiem kanałów w sposób pneumatyczny jest transportowana do cyklonu. Transport pneumatyczny jest umożliwiony poprzez działanie wentylatorów. Minimalna prędkość w kanałach aspiracyjnych nie może być niższa od wartości 28 m/s. Kolejnym etapem jest wrzucenie rozdrobnionej słomy do komory rozdrabniacza poprzez cyklon na podajnik dwuślimakowy. Słoma w podajniku jest transportowana do separatora powietrznego w celu usunięcia innych zanieczyszczeń, a po opuszczeniu go jest bezpośrednio podawana do komory rozdrabniacza bijakowego, który rozdrabnia materiał na frakcje o postaci właściwej nadającej się już do granulacji. Materiał opuszczający rozdrabniacz nie jest większy niż 12 mm. Następnie powietrze ciągiem kanałów aspiracyjnych, rozpoczynających się płytą pneumatyczną młyna pobiera biomase z komory ciśnieniowej i transportuje ją do cyklonu. Transport pneumatyczny możliwy jest przez zainstalowany w układzie wentylator.

Słoma zbierająca się w dolnej części cyklonu trafia do komory rozprężnej, skąd podajnikiem celkowym dozowana jest na ciąg transportowy przenośnika zgrzeblowego. Zadaniem przenośnika jest stabilizacja materiału poprzez uśrednienie wilgoci oraz buforowanie materiału. Na podajnik stabilizujący podawana jest również biomasa w postaci pyłu odzyskana z układu filtracyjnego umieszczona w przestrzeni urządzeń oraz na hali produkcyjnej.

Słoma z podajnika stabilizującego podana jest do zbiornika granulatorów wyposażonego w mieszadło zapobiegające sklejęciu się materiału oraz ujednolicenie jego struktury. Ze zbiornika materiał jest pobierany za pośrednictwem podajnika ślimakowego i przemieszczany do kondycjonera granulatora a dalej do komór matryc granulatorów. Granulowanie jest jednym z głównych etapów produkcji peletów i aby zapewnić prawidłowość wykonania tego procesu, biomasa przechodzi najpierw przez kondycjoner, którego zadaniem jest nasycenie surowca odpowiednią ilością pary wodnej ułatwiającej skleikowanie w przypadku bardziej suchego surowca. Dalej kondycjoner dostarcza surowiec poprzez wymuszony zsyp do komory zespołu granulującego, w której materiał dostaje się pomiędzy pierścieniową matrycę i rolki dociskowe. Rolki wtłaczają surowiec w otwory matryc o średnicy 6,0 mm lub innej gdzie następuje ich kompresja. Podczas procesu granulacji wytwarza się gorąca para wodna, która jest usuwana z komory granulującej za pomocą specjalnie do tego przystosowanego systemu wyciągów. System ten posiada zbiornik rozprężny powodujący wykraplanie pary i ograniczenie jej penetracji wewnątrz systemu odciągu pyłów. Gorący, gotowy granulat z granulatorów podawany jest w dalszej kolejności na pojedynczy ciąg transportowy, jest to poziomy redler wykonany z materiału kwasoodpornego.

Gorące pelety wypadają z redlera do podajnika kubelkowego i dalej do chłodnicy przeciwprądowej. Chłodzenie ma na celu obniżenie temperatury produktu gotowego do wartości 6-10°C powyżej temperatury otoczenia oraz odparowanie nadmiaru wody zawartej w materiale. Wynikiem tych procesów jest zmniejszenie wilgotności peletu poniżej 12%, zwiększenie twardości i odporności granulek na kruszenie i inne urazy mechaniczne, którym podlegają granulki w dalszej części linii transportowych, magazynowaniu, przeładowywaniu na środki transportowe i ostateczny transport do klienta. Szczególnie w okresie zimowym, bardzo ważne jest, aby temperatura peletu po schłodzeniu nie wynosiła więcej niż 4-6°C od temperatury otoczenia. Z chłodnicy, poprzez wagę i podajnik ślimakowy, pelet przekazywany jest na podajnik kubelkowy i dalej na rozdzielacz. Pelety z linii produkcyjnej kierowane są na przenośnik zgrzeblowy, który transportuje gotowy wyrób do hali magazynowej, która jest umieszczona bezpośrednio przy hali z zamontowaną linią technologiczną. Gotowy produkt jest usypywany na przysywie za pomocą czterech dysz wylotowych.

Rozładunek magazynu peletów składowanych luzem odbywa się za pomocą ładowarki kołowej wyposażonej w łyżkę o pojemności ok. 2,5 m³. Gdy następuje proces ładowania, drzwi magazynu zostają otwarte, należy zwykle odczekać stosowny okres czasu, który trwa zwykle ok. 10 min, aby przestrzeń została przewietrzona. Poziom zapylenia powinien osiągnąć poziom bezpieczny, czyli wartość pyłu o granulacji 120 µm nie powinna przekraczać 0,05 kg·m⁻³. Przestrzeganie tego ograniczenia jest bardzo ważne, ponieważ dolna granica wybuchowości dla pyłu drzewnego wynosi 0,14 kg·m⁻³. Istnieje także możliwość skrócenia czasu oczekiwania na przewietrzenie magazynu pod warunkiem umieszczenia w hali systemu odciągów pyłu do filtrocyklona linii produkcyjnej. Rozwiązanie to może zapewnić także wyższy komfort pracy na hali produktu gotowego. W miarę opróżniania magazynu pomiędzy kolejnymi przejazdami ładowarki, obsługa ma obowiązek czyszczenia miejsca przejazdu, aby zapobiegać przedostawaniu się do powietrza pyłu i zanieczyszczeń. W przypadku większego wzburzenia pyłu praca na hali magazynowej jest przerywana na czas przewietrzenia lub opadnięcia pyłu. W strefie magazynowej ładowarka powinna poruszać się w sposób płynny i powolny bez gwałtownych ruchów. Zabrania się także przerzucania produktu z miejsca na miejsce, materiał powinien być wybierany kolejno po sobie. Pelety załadowane na łyżkę są wywożone poza obręb magazynu w celu zapobiegania nadmiernemu zapyleniu w pomieszczeniu.

Podczas transportowania i rozdrabniania surowca powstają pyły o różnym stopniu granulacji. W wytwórni zainstalowano system filtracyjny urządzeń i powietrza wewnątrz wytwórni. Usuwa on niebezpieczne pyły biomasy i dawkuje je odpowiednio do łącznego przetwarzania z biomasą w procesie granulacji. Odciały pyłów wykonano jako system

pneumatyczny podciśnieniowy z rur sztywnych i elastycznych karbowanych. Minimalna prędkość przepływu powietrza w rurach wynosi $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podciśnienie wytworzone przez wentylator zasysa pył z przestrzeni urządzeń i z ich otoczenia. Pył filtrowany jest za pomocą filtrocyklona. Drugi system przesyłu pyłów odbiera go z cyklonów komory granulacji i filtrocyklona. Za pomocą cyklonu wyłapuje go do zbiornika pyłów z wbudowanym mieszadłem zapobiegającym sklejeniom i ułatwiającym jego opróżnianie. Ze zbiornika z podajnikiem ślimakowym pył jest dozowany na podajnik biomasy jako dodatek obniżający wilgotność surowca w dalszym procesie wytwarzania peletów. Cały układ odpylania jest wyposażony w szereg elementów sterujących przepływem w postaci zaworów, redukcji, rozdzielaczy wielodrogowych, kominów wyciągowych, śluz i innych urządzeń, które są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania całej linii technologicznej. Dla zapewnienia prawidłowej pracy układów zostały też wbudowane maszyny sprężające powietrze, które zasilają układy pneumatyczne.

Do magazynu surowca rozdrobnionego dostarczany jest surowiec możliwy do granulacji bez procesu dokładnego rozdrabniania. Surowiec jest proporcjonalnie dosypywany do właściwego medium produkcyjnego czyli rozdrobnionej słomy na linii technologicznej. W magazynie jest wykonany dół załadowczy, z którego surowiec jest wybierany podajnikiem zgrzeblowym buforowym i transportowany na podajnik zgrzeblowy główny. Magazyn surowca rozdrobnionego podlega tym samym wymaganiom bezpieczeństwa co magazyn wyrobów gotowych. Stopień zapylenia jednak jest uzależniony od właściwości i jakości dostarczonego do zakładu surowca.

Praca wszystkich maszyn i urządzeń pracujących na linii w wytwórni peletów jest kontrolowana przez centralny komputer, który jest odpowiedzialny za prawidłowy i bezpieczny przebieg procesu produkcyjnego. Sekwencje sterowania są podzielone na sekcje załączania z wyprowadzonymi ścisłymi zależnościami. W instalacji można wyodrębnić układy, według kolejności załączania, dla linii technologicznej:

- układ składowania peletów,
- układ odpylania,
- układ chłodzenia,
- układ dozowania biomasy i granulacji,
- układ podawania pyłów i odsiewek,
- układ mieszania i stabilizacji w podajniku buforowym,
- układ rozdrabniania właściwego,
- układ podawania, rozdrobnienia wstępnego i separacji zanieczyszczeń.

Przed załączeniem instalacji następuje zgłoszenie gotowości całego systemu do uruchomienia poszczególnych układów zamontowanych na linii technologicznej. Uruchomienie i praca kolejnego układu jest poprzedzona prawidłową pracą układu wcześniejszego, przy czym układy dozowania wapna i układy podawania pyłów i odsiewek załączają się dopiero w czasie właściwej produkcji. Podczas uruchamiania linii sprawdzana jest jedynie gotowość do uruchomienia. Urządzenia w danym układzie załączają się odwrotnie do przebiegu surowca.

Schemat działania linii produkcyjnej na terenie badanej firmy zamieszczono na rys. 3.4.



Rysunek 3.4. Schemat działania linii produkcyjnej na terenie badanej firmy

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie urządzenia na linii produkcyjnej są zabezpieczone wyłącznikami automatycznymi powodującymi zatrzymanie układu od miejsca awarii do miejsca podawania

biomasy. Załączenie urządzeń w trybie automatycznym odbywa się w panelu sterowania każdego urządzenia zamontowanego na linii technologicznej.

Praca zakładu produkującego pelety jest sterowana przez centralny komputer nadzorujący wszystkie parametry pracy urządzeń zamontowanych na linii technologicznej. Sekwencje sterowania są podzielone na odcinki załączania z wprowadzonymi ścisłymi zależnościami powiązanymi ze sobą. Każda czynność na linii jest zabezpieczona wyłącznikami automatycznymi, które powodują zatrzymanie układu od miejsca wystąpienia awarii do miejsca podawania surowca.

W tabeli 3.4 zostały przedstawione główne maszyny i urządzenia zamontowane na linii technologicznej w firmie oraz ich parametry eksploatacyjne.

Wykorzystywana technologia nie posiada urządzeń do suszenia surowca (słomy) tak jak to jest stosowane na innych liniach technologicznych (Grochowicz i inni, 2004; Hejft i Obidziński, 2012, Manii i inni, 2006).

Linia składa się z ponad 43 maszyn i urządzeń. Natomiast w tabeli 3.4 zostały przedstawione tylko kluczowe dla danego procesu maszyny. Pominięte zostały urządzenia takie jak cyklony, które służą do oczyszczania i odpylenia powietrza wychodzącego z urządzeń oraz niektóre wentylatory oraz mniejsze urządzenia takie jak kompresor śrubowy. Najmocniejszą maszyną zamontowaną na linii jest granulator, którego moc wynosi 315 kW, a teoretyczna wydajność 5,5 tony peletu na godzinę. Drugą maszyną pod względem zapotrzebowania na moc jest szarpacz z odkamieniaczem, którego zapotrzebowanie na moc wynosi 269,5 kW, a wydajność to $6 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$. Kolejnym urządzeniem, jeżeli chodzi o pobór mocy, jest młyn młotkowy, którego moc to 250 kW, a wydajność to 3 tony na godzinę pracy urządzenia. Reszta urządzeń ma tej linii nie przekracza mocy 50 kW.

Analizując linię technologiczną w przedsiębiorstwie należy brać pod uwagę rodzaj medium, czyli rozmiar surowca na danym etapie przetwarzania. Na początku do kosza zasypowego zostaje włożona bela słomy przez operatorów linii. Następnie zostaje rozdrobniona przez szarpacz do frakcji od długości nie większej niż 4 centymetry. Gdy przechodzi przez podajnik dwuślimakowy zostaje wstępnie osuszona i przetransportowana do młyna młotkowego. Opuszczając młyn rozmiar surowca zostaje zmniejszony i nie przekracza wartości 8 mm. Tak przygotowany materiał jest transportowany przez przenośnik zgrzeblowy do zbiornika, gdzie wybierak ślimakowy transportuje rozdrobnioną słomę do kondycjonera granulatora.

Tabela 3.4. Wykaz maszyn i urządzeń na linii technologicznej oraz ich parametry eksploatacyjne

Wykaz i parametry eksploatacyjne			
Maszyna/Urządzenie	Moc (kW)	Wydajność (t·h ⁻¹)	Rodzaj medium
Kosz zasypowy z podajnikiem	5,5	6,00	baloty słomy
Szarpacz z odkamieniaczem	269,5	6,00	rozdrobiona słoma <4cm
Wentylator transportowy ze wzmocnionym wirnikiem	22	6,00	rozdrobiona słoma <4cm
Podajnik dwuślimakowy, buforowy	11	-	sucha rozdrobniona słoma<4cm
Młyn młotkowy	250	3,00	sucha rozdrobniona słoma<8mm
Wentylator transportowy	30	-	sucha rozdrobniona słoma<8mm
Śluza	3	-	sucha rozdrobniona słoma<8mm
Przełożnik zgrzebłowy	6,05	5,00	rozdrobiona słoma
Zbiornik siewczy do granulatorów	11	5,00	mieszanka rozdrobnionej słomy
Wybierak ślimakowy	3	3,00	mieszanka rozdrobnionej słomy
Kondycjoner granulatora	15	-	mieszanka rozdrobnionej słomy
Granulator	315	5,50	gorący pelet
Redler	3	7,00	gorący pelet
Podnośnik kubelkowy	4	7,00	gorący pelet
Chłodnica	1,85	6,00	gorący pelet
Przełożnik ślimakowy	1,5	6,00	pelet
Podnośnik kubelkowy	4	8,00	pelet
Rozdzielacz dwudrogowy	0,55	8,00	pelet
Redler	13	10,00	pelet
Wentylator aspiracyjny	22	-	powietrze
Filtrocyklon pulsacyjny	1,5	-	pył
Śluza	0,55	-	pył
Wentylator transportowy wzmocniony	4	-	powietrze z pyłem
Śluza	0,55	1,00	pył
Zbiornik pyłu i odsiewek	15	4,00	ciepły pelet
Dozownik ślimakowy	2,2	4,00	ciepły pelet
Wentylator aspiracyjny	37	-	powietrze ciepłe
Śluza	0,55	-	pył
Przełożnik ślimakowy	3	-	pelet
Zbiornik magazynowy	-	-	pelet
Zbiornik technologiczny	1,5	0,20	pelet
Wybierak spiralny	0,55	0,10	pelet
Dozownik spiralny	0,55	0,10	pelet
Magazyn wyrobów gotowych	-	-	pelet

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów z badanej firmy

Odpowiednio przygotowana mieszanka słomy zostaje załadowana do granulatora, gdzie zostaje przerobiona na pelety o wysokiej temperaturze (El-Sayed i inni, 2018). Po opuszczeniu matrycy granulatora, wyrób trafia do chłodnicy, gdzie oddaje nadmiar temperatury. Następnie jest transportowana do rozdzielacza, w którym za pomocą filtrocyklona, granulaty zostaje

oczyszczony z nadmiaru pyłu. Gotowe czyli schłodzone i oczyszczone pelety trafiają do magazynu, gdzie czekają na transport do odbiorcy.

W tabeli 3.5 zostały przedstawione stanowiska pracy przy linii technologicznej.

Tabela 3.5. Stanowiska pracy przy linii technologicznej

Lp.	Liczba stanowisk pracy	
1	Operator urządzeń technologicznych	3 stanowiska
2	Obsługa wózka widłowego	1 stanowisko
3	Obsługa rozładunku słomy, szarpaka	3 stanowiska
4	Obsługa załadunku peletów (ładowarki)	1 stanowisko
5	Kierownik zmiany, brygadzysta	bez stanowiska

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów z badanej firmy

Najwięcej osób jest zatrudnionych przy obsłudze urządzeń, a ich minimalna liczba to trzy osoby. Taka sama liczba osób pracuje przy obsłudze rozładunku słomy i szarpaka. Po jednym pracowniku jest zatrudnionych przy obsłudze wózka widłowego oraz załadunku peletów, gdzie wykorzystuje się ładowarkę. Kierownik zmiany nie bierze czynnego udziału przy produkcji, dlatego firma nie zalicza jego stanowiska do obsługi linii.

4. Wyniki badań

4.1. Charakterystyka środków transportowych wykorzystywanych do transportu surowca

W pracy została przeprowadzona charakterystyka środków transportowych wykorzystywanych do transportu słomy w badanej firmie. W tabeli 4.1 przedstawiono liczbę samochodów danej marki w poszczególnych latach.

Tabela 4.1. Marki i liczba samochodów wykorzystywanych do transportu słomy

Lp.	Marka samochodu	Rok			
		2018	2019	2020	2021
1	SCANIA	1	2	3	12
2	RENAULT	2	6	3	7
3	MAN	1	3	3	6
4	DAF	2	1	4	5
5	VOLVO	0	2	1	1
6	IVECO	0	0	0	2
-	Razem	6	14	14	33

Z danych w tabeli wynika, że w roku 2018 użytkowano w sumie tylko 6 samochodów, z czego 2 były marki Renault i DAF. W roku 2019 nastąpiła podobna sytuacja i również samochody marki Renault były najczęściej wykorzystywaną marką do transportu słomy, a suma pojazdów zwiększyła się przeszło dwukrotnie i wynosiła 14 sztuk. W roku 2020 liczba samochodów nie uległa zmianie ale najczęściej używaną marką były samochody firmy DAF (4 sztuki). Natomiast zdecydowanie należy podkreślić, że w roku 2021 liczba samochodów powiększyła się, w porównaniu z latami 2019 i 2020, ponad dwukrotnie i wynosiła 33 sztuki, a pojazdy marki Scania były najczęściej wykorzystywane (12 sztuk). Parametry eksploatacyjne środków transportowych wykorzystywanych w latach 2018-2021 w firmie zostały pokazane w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Parametry eksploatacyjne wykorzystywanych środków transportowych

Rok	Parametr	Parametry eksploatacyjne			
		Rok produkcji	Pojemność silnika	Dopuszczalna masa całkowita	Moc silnika
		(rok)	(cm ³)	(kg)	(KM)
2018	minimum	1998	10083	24000	265,0
	średnia	2006	11853	24883	308,8
	maksimum	2009	12902	25700	353,0
	odch. stand.	4	1018	657	27,7
2019	minimum	1996	1199	1455	55,0
	średnia	2004	8777	14925	253,3
	maksimum	2012	12902	25700	368,0
	odch. stand.	4	4441	8951	104,3
2020	minimum	1998	10084	16000	265,0
	średnia	2005	12096	20996	321,7
	maksimum	2009	15607	25700	426,0
	odch. stand.	4	1346	3662	37,6
2021	minimum	1994	1149	1610	55,0
	średnia	2006	10316	18449	285,6
	maksimum	2014	12902	26000	353,0
	odch. stand.	4	3463	7373	82,4

Na podstawie danych zawartych w tabeli wynika, że rok produkcji samochodów wykorzystywanych do transportu surowca mieścił się od 1994 do 2014 roku. Analizując poszczególne lata należy zwrócić uwagę, że średnia data produkcji użytkowanych aut była najniższa dla roku 2019 co świadczy, że w tym roku samochody transportujące słomę były najstarsze. Najmłodsze auta były wykorzystywane w roku 2021 i 2018, a ich rok produkcji to średnio 2006. W 2020 średnia data produkcji aut to rok 2005. Należy zwrócić uwagę, że dla każdego z badanych lat odchylenie standardowe roku produkcji pojazdów wyniosło 4 lata. Kolejnym parametrem eksploatacyjnym jest pojemność silnika, która dla środków transportowych była zróżnicowana i wynosiła średnio od 10316 cm³ (dla roku 2021) do 12096 (dla roku 2020). W roku 2018 średnia pojemność silnika była na poziomie 11853 cm³, a w roku 2019 było to 8777 cm³.

Jednym z najważniejszych parametrów wpływających na efektywność transportu była dopuszczalna masa całkowita wykorzystywanych w procesie samochodów. W 2018 roku wynosiła średnio 24883 kg co było wartością większą o 6434 kg w porównaniu z rokiem 2021. W 2019 roku średnia dopuszczalna masa całkowita wyniosła 14925 kg i była wartością

mniejszą o 3524 kg w porównaniu do 2021 roku. Natomiast dla roku 2020 średnia wyniosła 20996 kg i była wartością większą w porównaniu z rokiem 2021 o 2547 kg.

Ostatnim parametrem, który był charakterystyczny dla środków transportowych, którymi transportowano słomę zbóż w badanej firmie była moc silników. Najwyższa moc była w roku 2020, gdzie wynosiła średnio 321,7 KM (co w porównaniu do roku 2021 było wartością większą o ponad 36 KM). Z kolei najmniejsza średnia moc silników była w roku 2019 i wynosiła 253,3 KM, co w porównaniu do roku 2021 było wartością mniejszą o ponad 32 KM.

4.2. Organizacja dostaw surowca do produkcji peletów

Organizacja dostaw słomy, jako surowca do produkcji peletów, w badanej firmie dotyczyła przede wszystkim:

- formy dostarczonego surowca (bele lub kostki),
- masy ładunku przewiezonego w jednym cyklu transportowym,
- liczby dostaw surowca w skali roku w formie bel i kostek,
- masy dostarczonej słomy w ciągu roku w formie bel i kostek,
- odległości transportowych realizowanych dostaw surowca.

W tabeli 4.3 zostały przedstawione dane dotyczące formy surowca i masy samochodów z ładunkiem i bez ładunku w poszczególnych latach z podziałem na formę dostarczonego surowca.

Tabela 4.3. Masa samochodu z ładunkiem i masa ładunku przewiezonego w jednym cyklu transportowym

Forma surowca	Parametr	2018		2019		2020		2021	
		Masa samochodu z ładunkiem	Masa ładunku	Masa samochodu z ładunkiem	Masa ładunku	Masa samochodu z ładunkiem	Masa ładunku	Masa samochodu z ładunkiem	Masa ładunku
		(t)							
Bele	minimum	14,46	4,20	13,28	0,00	21,98	0,00	21,92	0,00
	średnia	28,51	13,27	25,59	11,39	29,98	14,92	29,41	14,87
	maksimum	35,14	20,06	33,14	17,72	37,64	21,80	39,34	23,38
	odch. stand.	3,58	3,23	2,55	2,04	3,34	3,26	3,37	2,92
Kostki	minimum	28,40	12,66	21,90	0,00	25,00	0,00	23,58	9,22
	średnia	32,13	16,87	27,25	13,26	28,09	13,23	30,64	16,00
	maksimum	39,70	25,54	35,58	19,28	33,26	17,94	35,80	22,00
	odch. stand.	2,74	2,91	2,31	2,16	2,15	2,71	2,68	2,31

Z przedstawionej tabeli wynika, że średnia masa samochodu z ładunkiem bel słomy mieściła się od 25,59 t (dla roku 2019) do 29,98 t (dla roku 2021). Natomiast średnia masa samochodu z ładunkiem kostek słomy wynosiła od 27,25 t (dla roku 2019) do 32,13 t (dla roku 2018). Biorąc pod uwagę masę ładunku (słomy) w formie bel należy stwierdzić, że mieściła się ona średnio od 11,39 (dla roku 2019) do 14,92 ton (dla roku 2020). Z kolei masa słomy transportowanej w formie kostek wynosiła średnio od 13,23 (dla roku 2020) do 16,87 ton (dla roku 2018). Należy także zwrócić uwagę na fakt, ile w rzeczywistości zostało przetransportowane surowca. W roku 2018 średnia różnica pomiędzy masą ładunku a samochodu z ładunkiem bel słomy wynosiła 15,24 t, a dla kostek 15,26, dlatego różnica była

bardzo mała. Natomiast dla roku 2019, różnica dla bel transportowanej słomy wynosiła 14,2 a dla kostek 13,9 t. Różnica, podobnie jak dla roku poprzedniego, była mała i wynosiła 0,21 t. Różnica masy samochodu z ładunkiem, z masą ładunku dla bel, wynosiła średnio 15,06 t a dla kostek 14,86. Ostatni badany rok czyli 2021 to odpowiednio 14,54 t dla bel i 14,64 t dla kostek.

Liczba dostaw oraz masa dostarczonej słomy w formie bel i kostek w latach 2018-2021 została przedstawiona w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Liczba dostaw i masa dostarczonej słomy w formie bel i kostek

Wyszczególnienie	Jednostka	Rok				Średnia
		2018	2019	2020	2021	
transport w formie bel						
liczba dostaw	(szt.)	120	731	325	823	500
masa przewiezionego surowca	(t)	1593	8323	4634	11319	6467
transport w formie kostek						
liczba dostaw	(szt.)	24	233	43	117	104
masa przewiezionego surowca	(t)	405	3089	552	1855	1475
transport razem w formie bel i kostek						
razem liczba dostaw	(szt.)	144	964	368	940	604
razem masa dostarczonego surowca	(t)	1997	11410	5186	13174	7942

Na podstawie danych zawartych w tabeli można wnioskować, że od 2018 do 2021 roku liczba dostaw słomy w formie bel wzrastała. W roku 2018 wynosiła 120 dostaw. Może to sugerować, że przedsiębiorstwo było na początkowych etapach działalności z małym zapotrzebowaniem na surowce. W kolejnym roku 2019 liczba dostaw znacznie wzrosła, osiągając poziom 731 dostaw. Rok 2020 okazał się trudnym okresem dla wielu przedsiębiorstw, a powodem tego był początek pandemii koronawirusa w Polsce i na świecie. Suma transportów spadła do wartości 325 dostaw, co stanowiło zaledwie 38% dostaw z roku poprzedniego. W 2021 roku liczba dostaw surowca do firmy ponownie wzrosła, tym razem znacznie ponad poziom z roku 2019, osiągając 823 dostawy. Liczba transportów słomy w formie bel, w latach 2018-2021, wynosiła średnio 500 na rok.

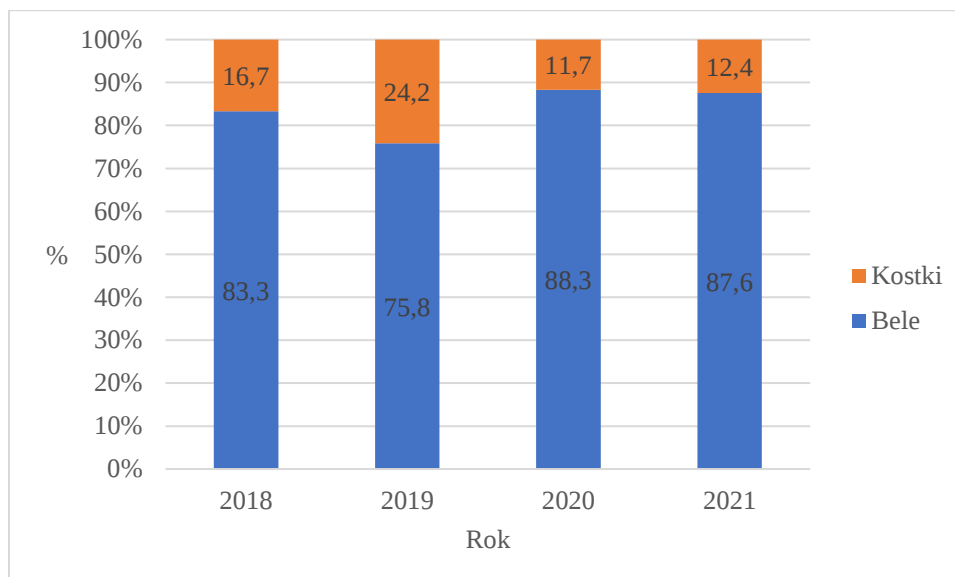
Biorąc pod uwagę dostawę surowca w formie kostek należy stwierdzić, że w 2018 roku były tylko 24 dostawy do zakładu. Następny rok przyniósł znaczny wzrost liczby transportów i w 2019 roku było ich 233 w formie kostek, co było podobnym wzrostem, jak w przypadku dostaw słomy w formie bel w omawianym roku. Rok 2020 był znacznie uboższy w dostawy kostek słomy, a ich suma to tylko 43 dostawy. W ostatnim badanym roku, czyli 2021, liczba przewozów wzrosła i wynosiła 117. Dla badanego okresu liczba przewozów słomy w formie kostek to średnio 104. A masa przewiezionego surowca w formie bel była średnio na poziomie 6467 t. Dostarczona słoma w formie bel w roku 2018 wynosiła 1593 t i była mniejsza

w porównaniu do roku 2021 o 9726 t. Z kolei w roku 2019 masa przewiezonego surowca była dużo większa i wynosiła 8323 t słomy w formie bel, natomiast w porównaniu do roku 2021 była mniejsza o 2996 t. W kolejnym ocenianym roku, czyli 2020, masa dostarczonych bel wynosiła 4634 t, a w porównaniu do roku 2021 różnica wynosiła 6685 t materiału.

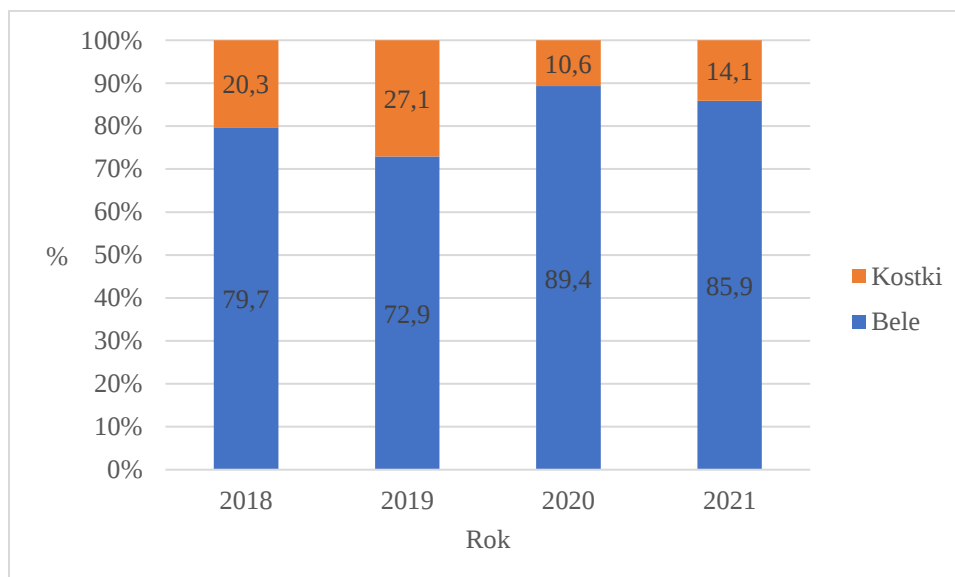
Analizując realizację transportu surowca w formie kostek w latach 2018-2021 należy podkreślić, że w roku 2018 masa słomy wynosiła 404 t i była mniejsza w porównaniu do roku 2021 o 1450 t. Dostarczona słoma w formie prasowanych kostek w 2019 roku wynosiła 3088 t i była większa w porównaniu do roku 2021 o 1233 t. Kolejny rok przyniósł jednak spadek przewozów, co w konsekwencji przełożyło się na niższą masę, dlatego w 2020 roku było to 552 t (masa mniejsza o 1303 t w porównaniu z rokiem 2021). Masa słomy przetransportowanej do przedsiębiorstwa w formie kostek w latach 2018-2021 wynosiła średnio 1475 t.

Reasumując należy stwierdzić, że łącznie dostarczona masa słomy w poszczególnych latach dla roku 2018 wynosiła 1997 ton, a dla 2019 było to już 11410 ton. Z kolei w 2020 odnotowano spadek i dowieziono do zakładu 5186 ton. Natomiast najwięcej słomy w badanym okresie, bo aż 13174 tony, dostarczono w 2021 roku.

Strukturę liczby dostaw surowca w formie bel i kostek przedstawiono na rysunku 4.1. Natomiast na rysunku 4.2 została zamieszczona struktura masy przewiezonego surowca w formie bel i kostek. Na ich podstawie można stwierdzić, że słoma w formie bel była częściej transportowana w każdym z badanych lat. Największa różnica była w roku 2021, gdzie procentowy udział słomy w formie bel wynosił 87,6% przy jedynie 12,4% słomy w formie kostek. Najmniejsza dysproporcja przewozu form surowca była w roku 2019, gdzie liczba bel wynosiła 75,8%, a liczba kostek była na poziomie 24,2%. Struktura przewiezonej masy wygląda podobnie jak struktura zaopatrzenia surowca, ponieważ mieści się od 72,9 % do 89,4% masy przewiezonego surowca w formie bel. Inaczej jest dla przewiezonego surowca w formie kostek, gdzie wartości mieszczą się od 14,1% do 27,1%.



Rysunek 4.1. Struktura liczby dostaw słomy w formie bel i kostek



Rysunek 4.2. Struktura masy przewiezonego surowca w formie bel i kostek

W tabeli 4.5 została przedstawiona liczba bel i kostek słomy transportowanych w trakcie jednej dostawy. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wyniki nie ulegały znacznym zmianom dla bel, jak i dla kostek.

Średnia liczba bel w trakcie dostawy mieściła się w zakresie od 34,9 do 37 szt. w jednym transporcie. W 2018 roku liczba bel wynosiła średnio 37 szt., co było większą wartością niż w roku 2021 o 1,8 szt. Natomiast w roku 2019 liczba ta wyniosła średnio 34,9 szt., co było mniejszą wartością o 0,3 beli. Rok 2020 w którym było 36,6 szt. ponownie przekroczył o 1,4 wartość z roku 2021.

Z powodu mniejszych rozmiarów sprasowanego surowca, liczba kostek w czasie transportu mieściła się w przedziale od 35,6 do 43,2 szt., co było większą wartością o 3,4 szt. w porównaniu z transportem w formie bel.

Tabela 4.5. Liczba bel i kostek słomy transportowanych w trakcie jednej dostawy

Rodzaj ładunku	Parametr	Rok			
		2018	2019	2020	2021
		(szt.)			
Bele	minimum	18,0	26,0	26,0	26,0
	średnia	37,0	34,9	36,6	35,2
	maksimum	68,0	68,0	68,0	66,0
	odch. stand.	6,7	7,3	5,2	3,3
Kostki	minimum	36,0	29,0	30,0	18,0
	średnia	43,2	36,3	42,0	35,6
	maksimum	48,0	50,0	48,0	48,0
	odch. stand.	5,1	5,4	5,9	4,8

W roku 2018 liczba wynosiła średnio 43,2 szt. (więcej o 7,6 w porównaniu z 2021 rokiem). W 2019 roku wartość wyniosła średnio 36,3 kostki w przejeździe (więcej o 0,7 szt. w porównaniu z rokiem 2021). Z kolei roku 2020 wartość średnia wyniosła 42 szt. w pojedynczym transporcie, co w porównaniu do roku 2021 było większą średnią o 6,4 szt.

Liczba dostaw i masa dostarczonej słomy w poszczególnych miesiącach została pokazana w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Liczba dostaw i masa dostarczonej słomy w poszczególnych miesiącach

Miesiąc	Rok							
	2018		2019		2020		2021	
	liczba dostaw	masa słomy	liczba dostaw	masa słomy	liczba dostaw	masa słomy	liczba dostaw	masa słomy
	(szt.)	(t)	(szt.)	(t)	(szt.)	(t)	(szt.)	(t)
I	21	308	142	1757	100	1452	21	370
II	10	142	65	809	28	407	56	835
III	7	114	49	652	18	320	49	694
IV	7	88	46	503	18	213	43	620
V	18	237	117	1353	66	936	60	748
VI	17	224	116	1279	71	947	45	548
VII	7	98	48	560	27	379	25	330
VIII	13	173	86	986	5	66	155	2109
IX	18	249	122	1418	16	214	197	2736
X	13	179	87	1024	14	176	133	1910
XI	9	127	59	728	4	67	105	1510
XII	4	59	27	339	1	8	51	763
razem	144	1997	964	11410	368	5186	940	13174
minimum	4	59	27	339	1	8	21	330
średnia	11	154	75	877	24	339	84	1164
maksimum	21	308	142	1757	100	1452	197	2736
odch. stand.	6	75	37	430	31	446	56	778

Z danych przedstawionych w tabeli wynika, że największa liczba dostaw oraz masa słomy miały miejsce w styczniu roku 2019, kiedy liczba dostaw osiągnęła 142, a masa dostarczonej słomy wyniosła 1757 t. Z kolei rok 2020 charakteryzował się wyraźnym spadkiem liczby dostaw, gdzie najwyższy wynik odnotowano w miesiącu maju (66 dostaw), natomiast maksymalna masa dostarczonej słomy w tym roku to 1452 t w miesiącu styczniu. Rok 2021 przyniósł ponowny wzrost dostaw w stosunku do roku poprzedniego, z maksymalną liczbą 197 dostaw i masą słomy wynoszącą 2736 t we wrześniu.

Analizując wyniki dla całego okresu, można zauważyć, że średnio liczba dostaw wahała się od 11 (w 2018) do 84 (w 2021). Natomiast średnia masa dostarczonej słomy wzrosła z 154 t w 2018 roku do 1164 t w 2021 roku. Najmniejsze wartości zarówno liczby dostaw, jak i masy słomy odnotowano w grudniu 2020 roku, z jedynie jedną dostawą o masie 8 t. Z kolei rok 2021 charakteryzował się bardziej stabilnym rozkładem, gdzie minimalna liczba dostaw to 21 w styczniu, a najmniejsza masa słomy była w lipcu (330 t).

Reasumując, należy podkreślić, że w badanym okresie widać wyraźne zmiany w dynamice dostaw słomy, gdzie największe wahania miały miejsce między latami 2019 a 2020, natomiast rok 2021 przyniósł wyraźną poprawę zarówno pod względem liczby dostaw, jak i masy dostarczonej słomy.

W tabeli 4.7 zostały zaprezentowane odległości transportowe realizowanych dostaw surowca w poszczególnych latach.

Tabela 4.7. Odległości transportowe realizowanych dostaw słomy

Wyszczególnienie	Jednostka	Rok			
		2018	2019	2020	2021
transport w formie bel					
minimalna odległość transportowa	(km)	41,8	40,8	40,2	32,0
średnia odległość transportu	(km)	100,2	107,6	105,3	120,0
maksymalna odległość transportowa	(km)	195,0	200,0	176,0	220,0
odchylenie standardowe	(km)	20,0	32,0	38,0	37,0
transport w formie kostek					
minimalna odległość transportowa	(km)	70,0	47,0	100,0	40,0
średnia odległość transportu	(km)	107,5	107,1	118,9	128,2
maksymalna odległość transportowa	(km)	136,0	153,0	131,0	185,0
odchylenie standardowe	(km)	16,0	28,1	5,1	26,7

W roku 2018 średnia ta to 100,2 km, co było mniejszą wartością o 19,8 km w porównaniu z rokiem 2021. Wzrost średniej nastąpił w roku 2019 i wynosił 107,6 km, lecz także był mniejszą wartością w porównaniu z rokiem 2021 o 12,4 km. Zbliżona wartość była w roku 2020, gdzie wynosiła 105,3 km oraz była mniejsza w porównaniu do roku 2021 o 14,7.

Analizując kolejne lata, należy stwierdzić, że najmniejsza średnia wartość odległości przemieszczania słomy w formie kostek była w roku 2019 i wynosiła 107,1 km, co w porównaniu z rokiem 2021 było mniejsze o 21,1 km. Największa wartość była w roku 2021, a średnia odległość to 128,2 km. W 2018 roku średnia odległość była na poziomie 107,5 km.

W tabeli 4.8 zostały przedstawione sumy odległości transportowych realizowanych dostaw słomy do zakładu w poszczególnych latach z podziałem na miesiące.

Tabela 4.8. Sumy odległości transportowych realizowanych dostaw słomy w poszczególnych miesiącach

Miesiąc	Rok			
	2018	2019	2020	2021
	(km)			
I	2094	14872	10721	2140
II	993	7055	2949	7107
III	813	5773	2430	5767
IV	791	5617	2434	5413
V	1864	13235	7552	7574
VI	1635	11614	7093	5319
VII	728	5172	2895	3121
VIII	1321	9383	361	19603
IX	1716	12188	1502	22519
X	1307	9282	1610	15820
XI	934	6636	356	13576
XII	393	2788	60	5960
minimum	393	2788	60	2140
średnia	1216	8635	3330	9493
maksimum	2094	14872	10721	22519
odch.stand.	524	3723	3347	6695

W badanym okresie 2018–2021 suma odległości transportu słomy w poszczególnych miesiącach wynosiła odpowiednio: w 2018 roku 1216 km, w 2019 roku 8635 km, w 2020 roku 3330 km, a w 2021 roku 9493 km. Największa średnia suma odległości transportu wystąpiła w 2019 roku i osiągnęła 14872 km w styczniu, co stanowiło wzrost o 12778 km względem minimalnej wartości zanotowanej w grudniu 2020 roku równej 60 km. Porównując minimalne wartości odległości w badanych latach, najniższą wartość zanotowano w 2020 roku (było to 60 km). Maksymalne wartości w poszczególnych latach wyniosły odpowiednio: 2094 km w 2018 roku, 14872 km w 2019 roku, 10721 km w 2020 roku i 22519 km w 2021 roku.

Podsumowując, należy stwierdzić, że szczególnie w 2021 roku nastąpił duży wzrost maksymalnej odległości transportu w porównaniu z wcześniejszymi latami. Odchylenie standardowe wskazuje na dużą zmienność w sumach odległości transportowych. W 2021 roku

było to 6695 km, co stanowiło największą zmienność w porównaniu do pozostałych lat. Dla porównania, w 2018 roku odchylenie to osiągnęło jedynie 524 km, co wskazuje na mniejszą rozpiętość w tym okresie.

4.3. Zasoby i zużycie surowca a produkcja peletów

W rozdziale została przedstawiona charakterystyka zasobów słomy jako surowca do produkcji peletów. Zasoby słomy zostały określone jako zapasy słomy na stanie firmy i masa słomy, która pochodzi z organizowanych i realizowanych dostaw. Posiadane przez firmę zasoby surowca to bardzo istotne zagadnienie ponieważ zabezpieczenie odpowiedniej wielkości zasobów wpływa na ciągłość procesu produkcji peletów. Ewentualne braki surowca rzutują na przerwanie procesu produkcji. Analizowane dane obejmują lata 2018-2021 z podziałem na zasoby słomy i jej zużycie miesięczne w procesie produkcji peletów (tabela 4.9). W zestawieniu zaprezentowano wpływ sezonowości oraz pandemii koronawirusa, która miała istotny wpływ na wyniki w roku 2020.

Tabela 4.9. Zasoby i zapasy słomy oraz zużycie słomy do produkcji peletów

Miesiąc	Rok											
	2018			2019			2020			2021		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	(t)											
I	1258	950	307	2088	1142	946	2420	998	1422	1384	889	495
II	1149	915	233	1755	1056	699	1829	1100	729	1330	905	425
III	1198	1033	165	1351	945	406	1048	969	79	1119	894	225
IV	1173	854	320	909	760	149	293	96	197	845	729	116
V	1007	288	719	1502	342	1160	1133	95	1038	864	370	494
VI	1463	458	1005	2439	398	2041	1985	106	1880	1042	418	624
VII	1573	573	1000	2601	350	2250	2259	115	2144	954	475	479
VIII	1802	964	839	3236	960	2276	2211	149	2062	2588	995	1593
IX	1537	946	592	3696	988	2708	2276	311	1965	4330	1565	2764
X	1360	891	469	3732	1945	1787	2141	353	1788	4674	2054	2620
XI	1267	943	323	2515	1113	1403	1855	394	1462	4130	1711	2419
XII	1183	852	331	1742	774	968	1469	455	1014	3182	1789	1394
razem	15968	9666	6302	27565	10773	16792	20919	5140	15779	26442	12795	13647

Gdzie: A – zasoby słomy; B – słoma zużyta do produkcji peletów; C – zapasy surowca

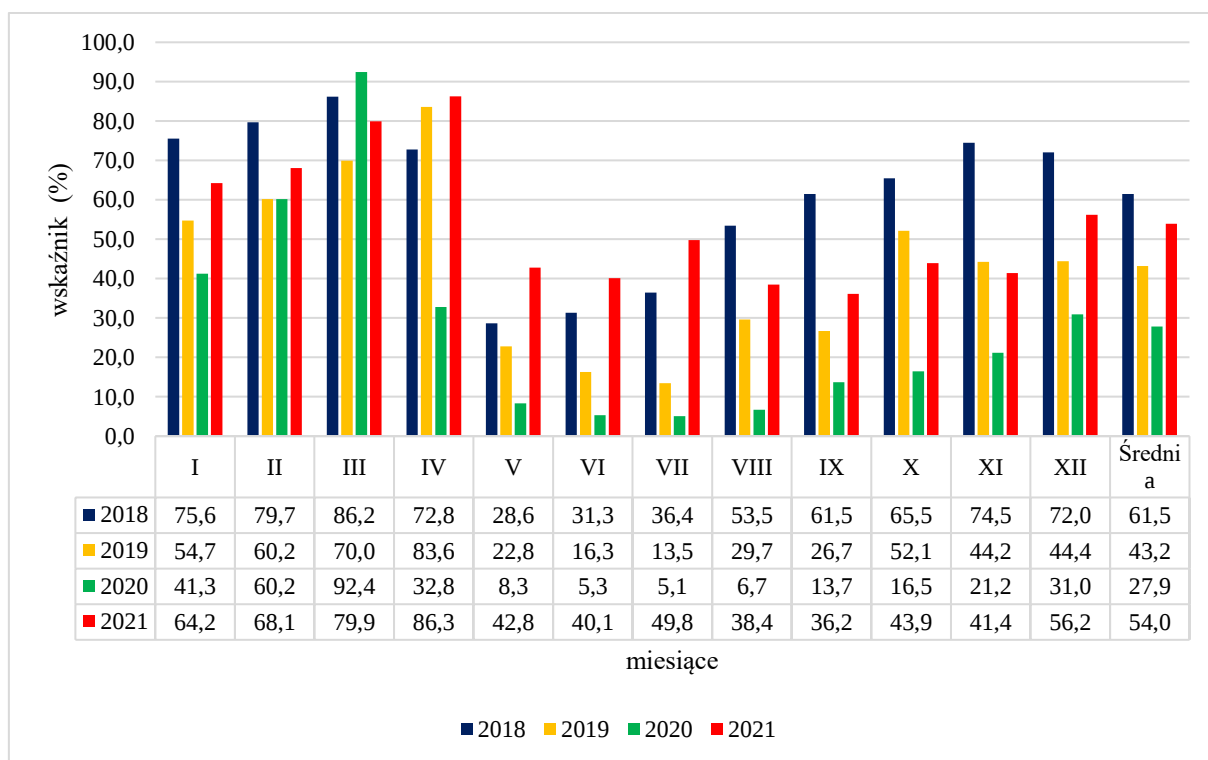
Uwaga: zasoby słomy = zapasy słomy + dostawy słomy

Największe roczne zasoby surowca były w roku 2019 i wynosiły 27565 t słomy, a najmniejsze (15968 t) były w roku 2018, który był pierwszym rokiem działania firmy pod kierownictwem nowego właściciela. Najwięcej słomy zużytej do produkcji peletów

odnotowano w roku 2021, gdzie przerobiono 12795 t surowca, a najmniej wykorzystano w roku pandemicznym 2020 (tylko 5140 t).

Analiza danych miesięcznych pokazała, że dostępność surowca w 2018 roku wzrastała systematycznie w okresie od maja do sierpnia, osiągając najwyższą wartość 1802 t w sierpniu. Pod koniec roku, w grudniu, poziom zasobów wynosił 1183 t. Inaczej przedstawiała się sytuacja w roku 2019, gdzie szczyt dostępności słomy (zasobów słomy) odnotowano w październiku (3732 t), a najmniejsze rezerwy w kwietniu, tylko 909 t. Natomiast pod koniec roku, w grudniu, poziom zasobów wynosił 1742 t. W roku pandemicznym czyli 2020, najmniejsze zasoby słomy do produkcji były (podobnie jak w poprzednim roku) w kwietniu (tylko 293 t), a największe w styczniu (2420 t). Pod koniec roku, w grudniu, poziom zasobów to 1469 t. Ostatnim analizowanym okresem był 2021 rok, gdzie można zauważyć duży wzrost zapotrzebowania i wykorzystania słomy w stosunku do poprzednich lat – przede wszystkim w stosunku do roku 2020 roku. Największe stany magazynowe odnotowano w październiku (4674 t), a najmniejsze w kwietniu gdzie było tylko 845 t.

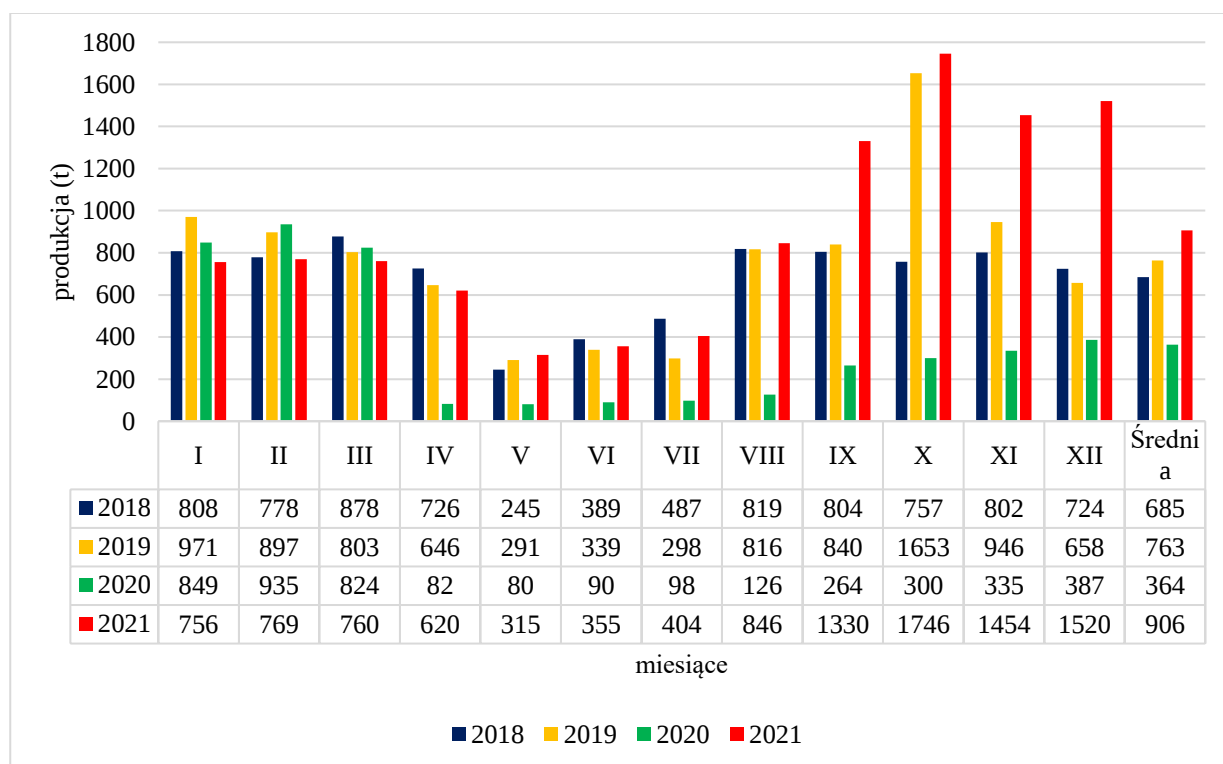
Na rysunku 4.3 zaprezentowano wskaźnik wykorzystania surowca do produkcji peletów, który pokazuje udział procentowy zużytego do produkcji surowca w stosunku do całkowitych zasobów surowca.



Rysunek 4.3. Wskaźnik wykorzystania surowca do produkcji

Na podstawie wyników pokazanych na rysunku należy stwierdzić, że okresami o największym wykorzystaniu surowca do produkcji były pierwsze cztery miesiące każdego badanego roku. Najwyższa średnia wykorzystania surowca do produkcji była w 2018 roku i wyniosła 61,5%, a najmniejsza dla roku pandemicznego 2020 gdzie było to jedynie 27,9%. Rozpatrując osobno miesiące, zaczynając od początku roku (dla każdego roku w latach 2018-2021) największe wykorzystanie w styczniu i lutym było w roku 2018 (styczeń – 75,6%, luty – 79,7%). Z kolei najwyższy wskaźnik dla marca odnotowano w 2020 roku (92,4%), a dla kwietnia w 2021 roku (aż 86,3%). Od maja do sierpnia w każdym badanym roku oceniany wskaźnik był najniższy, ponieważ zapotrzebowanie na pelety w tych miesiącach było niskie. Od września widać wzrost popytu, co wiąże się bezpośrednio ze zbliżającym się okresem grzewczym i zwiększonym zapotrzebowaniem na paliwo. W każdym analizowanym roku, wskaźnik od września do grudnia był największy w 2018 roku (IX- 61,5% ; X- 65,5%; XI- 74,5%; XII- 72%).

Wykorzystanie surowca do produkcji w poszczególnych miesiącach dla badanych lat było ściśle związane z produkcją peletów. Dlatego na rysunku 4.4 została przedstawiona miesięczna produkcja peletów, a na rysunku 4.5 roczna produkcja w latach 2018- 2021.

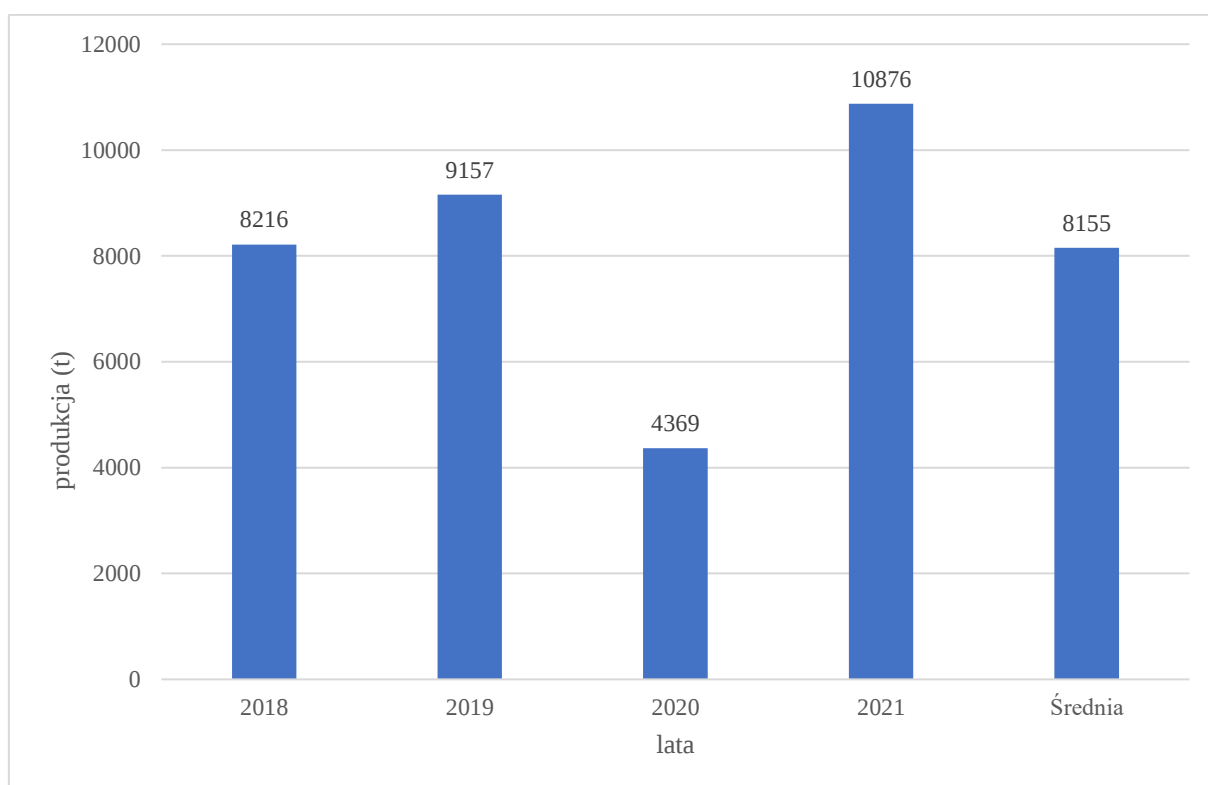


Rysunek 4.4. Miesięczna produkcja peletów w latach 2018-2021

Największa miesięczna produkcja peletów wynosiła średnio 906 t dla roku 2021, a najmniejsza 364 t dla roku 2020. Analizując uzyskane wyniki można zauważyć

charakterystyczne cykle produkcji w badanej firmie. W każdym roku najmniejsza produkcja przypadała na okres od maja do lipca, gdzie wartości wahały się od 80 t (maj 2020) do 487 t (lipiec 2018). Najważniejsze okresy produkcyjne przypadały na pierwsze i ostatnie cztery miesiące każdego roku tzn. od stycznia do kwietnia oraz od września do grudnia. Należy zauważyć, że najsłabszym rokiem pod względem produkcji peletów był rok 2020 gdzie, jak już wcześniej wspomniano, wystąpiła w tym roku pandemia koronawirusa. Początek pandemii oraz jej wpływ na wyniki produkcyjne firmy widać na rysunku. Po wprowadzeniu obostrzeń nastąpiło od kwietnia znaczne obniżenie produkcji, a do końca roku 2020 nie przekroczyła ona poziomu 400 t miesięcznie.

Reasumując, na rysunku 4.5 przedstawiono roczną produkcję peletów w badanych latach, a średnio dla czterech lat wyniosła ona 8155 t.



Rysunek 4.5. Roczna produkcja peletów w latach 2018-2021

Oceniając uzyskane wyniki produkcyjne można zaobserwować trend wzrostowy począwszy od roku 2018, gdzie roczna produkcja była na poziomie 8216 t. W kolejnym roku 2019 nastąpił wzrost produkcji o 941 t. Natomiast rok 2020 był okresem, w którym nastąpił kryzys produkcyjny spowodowany wirusem COVID-19, a badana firma obniżyła produkcję do poziomu 4369 ton. Z kolei, ostatni badany rok 2021 można określić jako powrót do trendu wzrostowego z lat 2018 i 2019, ponieważ wystąpił wzrost produkcji w stosunku do roku 2019

o 1719 ton. Produkcja w 2021 roku osiągnęła najwyższy poziom, spośród czterech ocenianych lat, a wyniosła 10876 t.

Reasumując należy stwierdzić, że zgromadzone w badanym okresie zasoby surowca i zapasy, w postaci słomy zbóż, w pełni pozwoliły na zrealizowanie zaplanowanego poziomu produkcji peletów. Wyjątkiem był rok 2020 gdzie wprowadzone obostrzenia wynikające z pandemii koronawirusa mocno ograniczyły od kwietnia do grudnia produkcję peletów ale należy zaznaczyć, że zasoby surowca w tym roku były wystarczające.

4.4. Ocena efektywności wykorzystania linii technologicznej

Do oceny efektywności wykorzystania linii produkcyjnej wykorzystano wskaźnik efektywności wykorzystania maszyn (OEE) oraz wskaźnik czasu przestojów linii.

OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) czyli ogólna efektywność maszyn wykorzystywanych w produkcji – jest to ogólnie przyjęty standard określania i oceny wydajności procesu produkcyjnego w przedsiębiorstwie. OEE wyrażany jest jako wskaźnik procentowy, który powinien dążyć do 100%. Im wyższa wartość OEE, tym większa efektywność produkcji danej firmy. Efektywne zarządzanie tym wskaźnikiem to ograniczanie strat produkcji, w tym jakościowych czy ograniczanie przestojów. Jest to przede wszystkim zgodne z filozofią Lean Manufacturing, której podstawą jest ograniczanie strat i zwiększanie efektywności procesów. Mając informację o OEE możemy zdefiniować obszary do optymalizacji pracy całego przedsiębiorstwa czy konkretnego gniazda produkcji. Ze względu na trzy obszary, jakie składają się na wskaźnik ogólnej efektywności maszyn (dostępność, wydajność oraz jakość) zmiana jego wartości jest sygnałem dla kierownika produkcji o zmianie jakości procesu produkcyjnego. Ze względu na jakość zmiennych, od których zależy OEE, wskaźnik ten dostarcza informacji o wąskich gardłach w procesie produkcji, a tym samym o możliwych obszarach optymalizacji produkcji. Posiadając wiedzę o wąskich gardłach danego procesu produkcji, możemy przystąpić do dalszych działań związanych z optymalizacją procesu i sprawdzić tym samym wskaźnikiem wpływ realizowanych zmian na ogólną efektywność wykorzystywania maszyn i urządzeń na linii produkcyjnej.

Aby przedstawić i ocenić wskaźnik OEE dla linii technologicznej do produkcji peletów w badanej firmie, zgodnie z przyjętą metodyką obliczeń, określono w kolejności trzy obszary jakie składają się na ten wskaźnik tj. dostępność, wydajność i jakość.

W tabeli 4.10 przedstawiono rzeczywisty i planowany czas pracy oraz obliczoną na tej podstawie dostępność linii technologicznej do produkcji peletów.

Tabela 4.10. Czas pracy i dostępność linii technologicznej do produkcji peletów

Miesiąc	Rok											
	2018			2019			2020			2021		
	Czas pracy i dostępność linii technologicznej do produkcji peletów											
	D	E	F	D	E	F	D	E	F	D	E	F
	(h)		(-)	(h)		(-)	(h)		(-)	(h)		(-)
I	198	208	0,95	224	248	0,90	192	208	0,92	171	184	0,93
II	180	192	0,93	207	224	0,92	220	240	0,92	181	192	0,94
III	207	216	0,96	189	208	0,91	190	240	0,79	172	184	0,93
IV	190	200	0,95	149	160	0,93	20	184	0,11	143	152	0,94
V	60	192	0,31	76	160	0,48	21	152	0,14	74	168	0,44
VI	92	200	0,46	83	184	0,45	22	176	0,13	82	168	0,49
VII	108	208	0,52	72	184	0,39	23	192	0,12	99	200	0,50
VIII	193	200	0,96	192	216	0,89	31	168	0,18	199	208	0,96
IX	182	192	0,95	190	208	0,91	61	176	0,35	301	328	0,92
X	180	192	0,94	374	400	0,94	72	176	0,41	395	416	0,95
XI	178	192	0,93	214	232	0,92	82	160	0,51	329	344	0,96
XII	167	176	0,95	146	176	0,83	91	160	0,57	344	360	0,96
razem	1933	2368	-	2116	2600	-	1025	2232	-	2490	2904	-
średnia	158	196	0,82	172	214	0,79	76	184	0,43	211	247	0,83

Gdzie - D – rzeczywisty czas pracy; E – planowany czas pracy; F – dostępność wykorzystana do obliczeń OEE

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych i materiałów z badanej firmy

Na podstawie uzyskanych wyników zamieszczonych w tabeli można jednoznacznie zaobserwować okresy, w których efektywnie i nieefektywnie wykorzystywano czas pracy. Dostępność linii w 2018 wynosiła średnio 0,82 czyli 82%, najmniejszą wartość odnotowano w maju gdzie wynosiła ona tylko 31%, a największa dostępność była w marcu i sierpniu, osiągając poziom po 96%. W następnym ocenianym roku 2019 średnia dostępność zmalała do 0,79 czyli 79%, natomiast najmniejsza wartość wystąpiła w lipcu (39%), a największa w październiku (94%). Rok pandemii koronawirusa, czyli 2020 – tu odnotowano największe spadki. Średnia obliczona dostępność w porównaniu do poprzedniego roku spadła aż o 0,36 (36%) i wynosiła tylko 0,43 czyli 43%. Największe wartości odnotowano w styczniu i lutym (po 92%) a najmniejszą, wynoszącą zaledwie 0,11 w kwietniu, który był pierwszym miesiącem po wprowadzeniu restrykcji związanych z pandemią. Powrót do normalności widać w ostatnim badanym okresie, czyli roku 2021. Średnia dostępność to 0,83 czyli 83%. Największa została odnotowana w listopadzie i grudniu (96%), a najmniejsza w maju (44%).

W tabeli 4.11 zostały przedstawione wydajności linii technologicznej do produkcji peletów w latach 2018-2021.

Tabela 4.11. Wydajność linii technologicznej obliczona z uwzględnieniem wydajności rzeczywistej i maksymalnej wydajności teoretycznej granulatora na poziomie $5,5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$

Miesiąc	Rok							
	2018		2019		2020		2021	
	Wydajność linii technologicznej do produkcji peletów							
	G	H	G	H	G	H	G	H
	(t·h ⁻¹)	(-)	(t·h ⁻¹)	(-)	(t·h ⁻¹)	(-)	(t·h ⁻¹)	(-)
I	4,80	0,87	5,10	0,93	5,20	0,95	5,20	0,95
II	5,10	0,93	5,10	0,93	5,00	0,91	5,00	0,91
III	5,00	0,91	5,00	0,91	5,10	0,93	5,20	0,95
IV	4,50	0,82	5,10	0,93	4,80	0,87	5,10	0,93
V	4,80	0,87	4,50	0,82	4,50	0,82	5,00	0,91
VI	5,00	0,91	4,80	0,87	4,80	0,87	5,10	0,93
VII	5,30	0,96	4,90	0,89	5,00	0,91	4,80	0,87
VIII	5,00	0,91	5,00	0,91	4,80	0,87	5,00	0,91
IX	5,20	0,95	5,20	0,95	5,10	0,93	5,20	0,95
X	4,95	0,90	5,20	0,95	4,90	0,89	5,20	0,95
XI	5,30	0,96	5,20	0,95	4,80	0,87	5,20	0,95
XII	5,10	0,93	5,30	0,96	5,00	0,91	5,20	0,95
średnia	5,00	0,91	5,03	0,92	4,92	0,89	5,10	0,93

Gdzie: G – wydajność rzeczywista; H - wydajność wykorzystana do obliczeń OEE

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych i materiałów z badanej firmy

W przeciwieństwie do dostępności (tabela 4.10), gdzie wyniki są bardzo zróżnicowane i dosyć znacznie odbiegają od siebie, tabela (4.11) przedstawia wyniki wydajności rzeczywistej pelecarki w poszczególnych miesiącach, które mogą wydawać się bardzo zbliżone. Wszystkie wyniki średnie roczne dla badanych lat znajdują się w podobnych zakresach, co oznacza, że gdy linia pracowała, to jej wydajność była na porównywalnym poziomie. Wydajność rzeczywista w roku 2018 wynosiła średnio $5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, a wydajność procentowa (brana do obliczeń) była na poziomie 91% (0,91). Najmniejszy wskaźnik odnotowano w styczniu ($4,8 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, 87%), a największą w lipcu i listopadzie ($5,3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, 96%).

W następnym ocenianym roku 2019 zanotowano większą o 0,03 średnią wydajność rzeczywistą, natomiast największa wartość miesięczna została zarejestrowana w grudniu ($5,3 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$). Z kolei najmniejsza wydajność w 2019 roku była w maju – tylko $4,5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. Dla roku 2020, podobnie jak przy wskaźniku dostępności linii technologicznej, odnotowano najniższe wyniki, a średnia wydajność to $4,92 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ czyli 89% (0,89). Maksymalną wartość w roku pandemicznym zanotowano w styczniu ($5,2 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, 95%), a najniższą w maju ($4,5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, 82%).

Ostatni analizowany rok, czyli 2021 był ponadprzeciętny, ponieważ średnia wydajność pelecarki była największa spośród wszystkich badanych lat i wynosiła $5,1 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ (93%). Najślabszym miesiącem pod względem wydajności był lipiec, gdzie odnotowano tylko

4,8 t·h⁻¹ (87%). Maksymalna wartość wystąpiła jednocześnie w sześciu miesiącach (styczeń, marzec, wrzesień, październik, listopad i grudzień) i wynosiła 5,2 t·h⁻¹ czyli 95%.

W tabeli 4.12 została przedstawiona jakość na linii technologicznej do produkcji peletów.

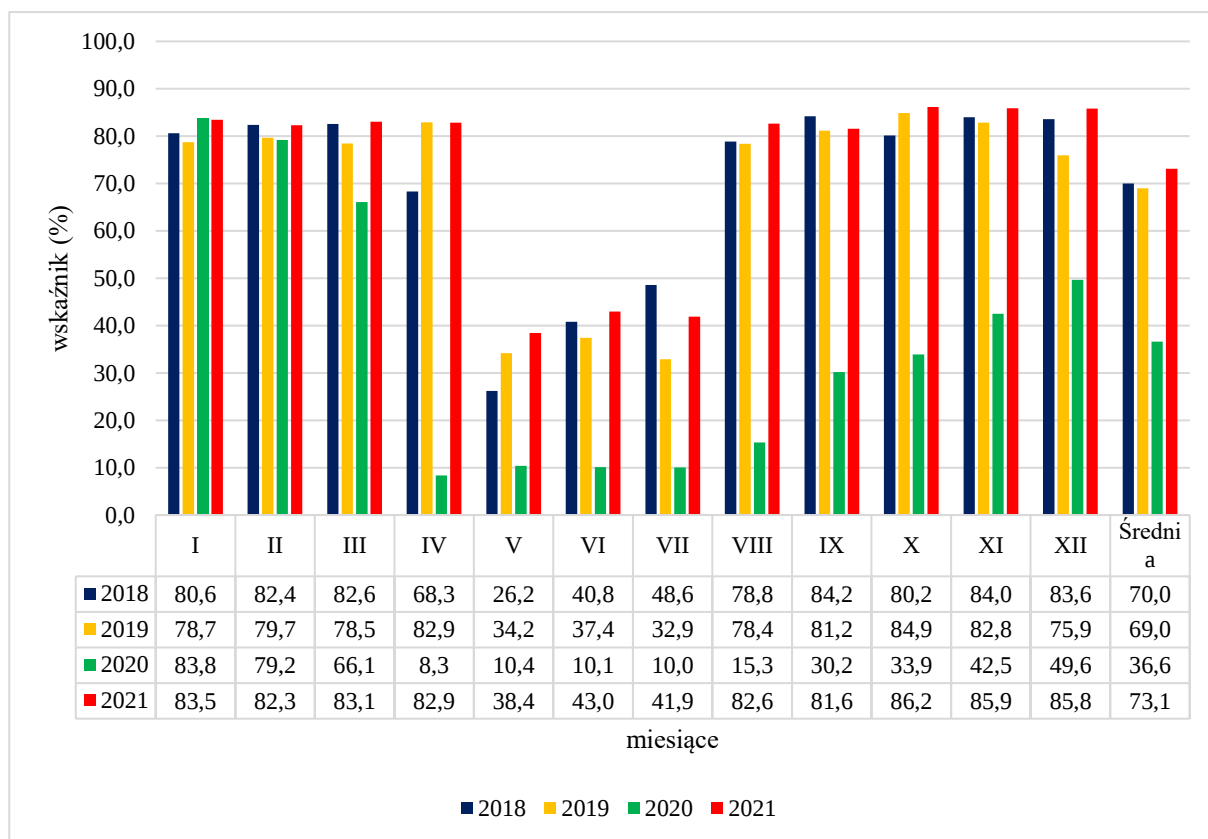
Tabela 4.12. Jakość na linii technologicznej do produkcji peletów

Miesiąc	Rok			
	2018	2019	2020	2021
	Jakość na linii technologicznej			
	(-)			
I	0,97	0,94	0,96	0,95
II	0,95	0,93	0,95	0,96
III	0,95	0,95	0,90	0,94
IV	0,88	0,96	0,88	0,95
V	0,96	0,88	0,92	0,96
VI	0,98	0,95	0,93	0,95
VII	0,97	0,95	0,92	0,97
VIII	0,90	0,97	0,95	0,95
IX	0,94	0,94	0,94	0,94
X	0,95	0,96	0,93	0,96
XI	0,94	0,95	0,95	0,95
XII	0,95	0,95	0,96	0,95
średnia	0,95	0,94	0,93	0,95

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych i materiałów z badanej firmy

Z danych zamieszczonych w tabeli wynika, że w roku 2018 jakość produkowanych na linii technologicznej peletów wynosiła średnio 0,95 czyli 95%. Najmniejszą wartość odnotowano w kwietniu – tylko 0,88 (88%), a największą w czerwcu – 0,98 (98%). Podobne wskaźniki jakości można znaleźć w pozostałych latach, gdzie średnie roczne plasowały się od 0,93 (93%) dla roku 2020 oraz 0,94 (94%) dla 2019 i 0,95 (95%) dla ostatniego badanego czyli 2021. Najmniejsze wartości były takie same i wynosiły 0,88 (88%) w maju dla 2019 roku i w kwietniu w 2020 roku. Dla roku 2021 najmniejszą liczbę odnotowano w marcu i wrześniu – 0,94 (94%). Natomiast największe miesięczne wolumeny wskaźnika jakości linii technologicznej (0,97) odnotowano dla 2019 w sierpniu i dla 2021 roku w lipcu. W 2020 roku okresem z największą wartością był styczeń i grudzień (0,96).

Na rysunku 4.6 został przedstawiony graficzny rozkład wskaźnika OEE efektywności wykorzystania linii technologicznej dla badanego okresu w układzie miesięcznym z podaniem wartości średniej dla każdego roku.



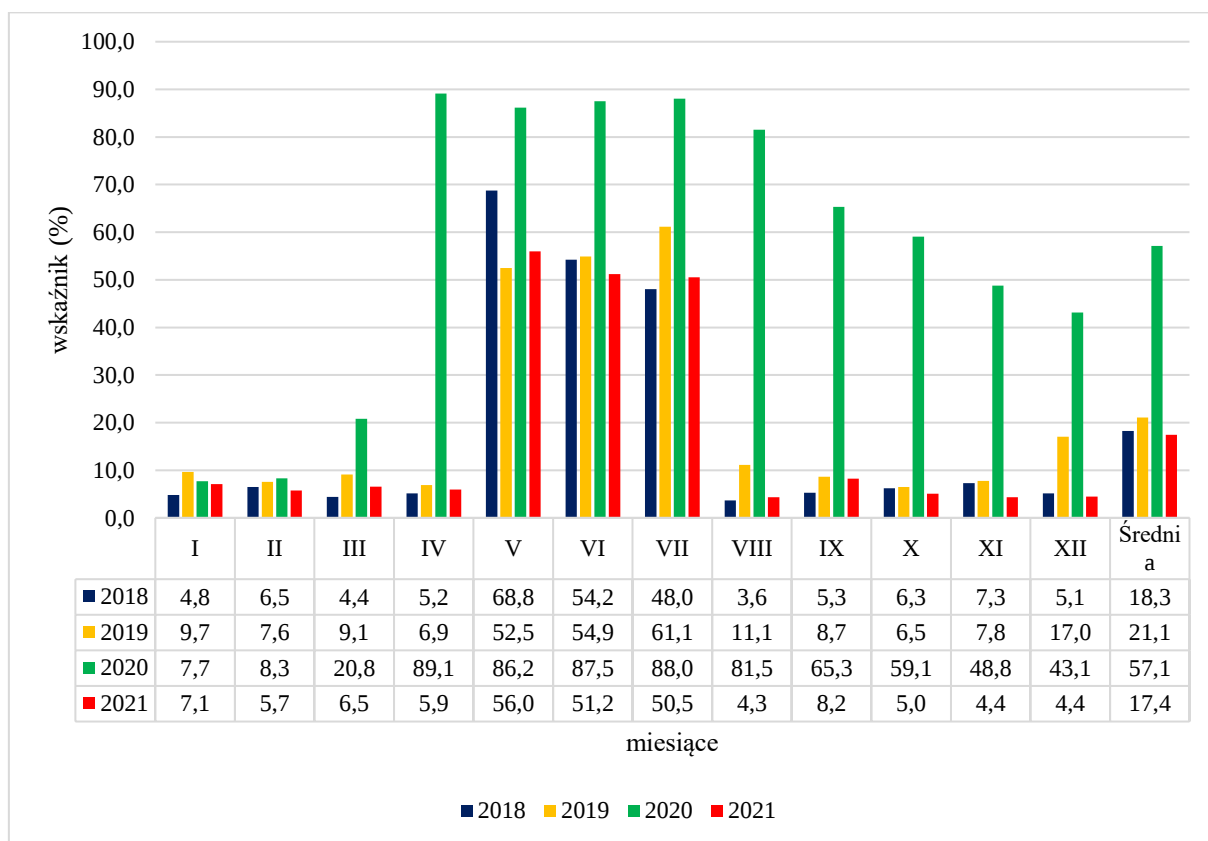
Rysunek 4.6. Wskaźnik OEE efektywności wykorzystania linii technologicznej (%)

Na rysunku można zauważyć okresy obniżonej efektywności wykorzystania linii technologicznej. Należy stwierdzić i podkreślić, że w każdym roku, miesiącem o najniższym wskaźniku OEE był maj, czerwiec i lipiec. Miesiące te były okresem w roku, gdzie popyt na pelety był niski. Czas w tych miesiącach wykorzystywany był przede wszystkim na planowane serwisy oraz remonty maszyn i urządzeń, a także przebrojenia oraz ustawiania urządzeń w celu poprawienia ich pracy w okresach, gdzie ich praca będzie bardziej intensywna. Wskaźnik OEE w 2018 roku wynosił średnio 70%, najmniejszy odnotowano w maju (tylko 26,2%), a największy we wrześniu, gdzie było to aż 84,2%. Z kolei w 2019 roku OEE wyniosło średnio 69%, (najwięcej w październiku – 84,9%, a najmniej w lipcu – 32,9%).

Rok 2020 był okresem odbiegającym od normalnych warunków pracy oraz zachowania się rynku, ponieważ w marcu tego roku ogłoszono obostrzenia w całym kraju związane z pandemią koronawirusa. Dlatego także po wskaźniku efektywności widać duży spadek (średnio tylko 36,6%) w porównaniu z poprzednimi dwoma analizowanymi latami. Najmniejsze wartości ocenianego wskaźnika były w kwietniu – tylko 8,3% (zaraz po wprowadzeniu obostrzeń), a miesiącem o najwyższej efektywności był styczeń – 83,8%, ponieważ firma, jak i cała gospodarka w kraju funkcjonowały jeszcze normalnie. Ostatni

badany rok 2021 miał najwyższy oceniany wskaźnik OEE, który utrzymywał się na poziomie średnio aż 73,1%. Najlepszy miesiąc to październik (86,2%), a najgorszy – maj (38,4%).

Wskaźniki czasu przestojów linii technologicznej, które także wykorzystano do oceny efektywności wykorzystania linii produkcyjnej zamieszczono na rysunku 4.7. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadę, że w tych miesiącach gdzie wskaźniki czasu przestojów były najniższe to linia technologiczna była efektywnie wykorzystana.



Rysunek 4.7. Wskaźnik czasu przestojów linii technologicznej (%)

Analizując dane na rysunku, można zauważyć także miesięczne okresy, w których określone wskaźniki odbiegały od niskiego pozytywnego trendu. Były to miesiące od kwietnia do grudnia w roku 2020, dla których wskaźniki czasu przestojów były bardzo wysokie (od aż 89,1% w kwietniu do 43,1% w grudniu) a wspomniany już wcześniej okres pandemii spowodował, że roczny wskaźnik dla roku 2020 wynosił średnio aż 57,1%. Należy także podkreślić, że niezmiennym co roku (w latach 2018, 2019 i 2021) był okres trzech miesięcy (maj, czerwiec i lipiec) w którym na linii technologicznej dokonywane były przeglądy serwisowe, renowacje malarskie, wymiany matryc granulatora oraz inne niezbędne czynności wykonywane w celu utrzymania prawidłowego funkcjonowania linii technologicznej.

Podsumowując należy stwierdzić, że wskaźnik czasu przestojów w roku 2018 wynosił średnio 18,3%. Najniższy odnotowano w sierpniu (tylko 3,6%), natomiast najwyższy w maju

(68,8%). Z kolei oceniany wskaźnik dla roku 2019 to średnio 21,1% (najniższy w październiku – 6,5%, a najwyższy w lipcu – 61,1%). Wskaźnik czasu przestojów linii technologicznej dla roku 2021 to średnio 17,4%, co było najniższym wynikiem spośród badanych czterech lat. Miesiącem o najniższym czasie przestoju był sierpień (tylko 4,3%) a najwyższy wskaźnik uzyskano w maju (56%).

5. Optymalizacja dostaw surowca

5.1. Zastosowanie analizy wymiarowej w modelowaniu procesu dostaw

5.1.1. Oznaczenie głównych parametrów procesu

Zgodnie z podrozdziałem 2.2.2 pierwszym ważnym punktem algorytmu analizy wymiarowej dowolnego procesu jest wybór funkcji wielkości wymiarowo niezależnych oraz wymiarowo zależnych $F(A_1, \dots, A_m, P_1, \dots, P_j)$. Funkcja ta spełnia rolę modelu matematycznego, czyli pozwala na określenie najważniejszej charakterystyki (cechy) analizowanego procesu. Poniżej są podane wielkości wymiarowo niezależne i zależne wraz z oznaczeniami. W praktyce wybrane wielkości są najczęściej nazywane głównymi parametrami procesu.

W procesie dostawy wybrano następujące główne parametry z oznaczeniami:

d - odległość między punktami A i B, odpowiednio miejscem załadunku i wyładunku bel słomy	km
t_c - całkowity czas dostarczenia (wraz załadunkiem i wyładunkiem) wymaganej masy słomy M_s	h
t_z - czas załadunku słomy	h
t_p - czas przewozu (transportu) słomy	h
t_w - czas wyładunku słomy	h
M_s - wymagana masa słomy konieczna do przewozu z A do B	kg
E_p - wydajność przewozu słomy z punktu A do punktu B	$kg \cdot h^{-1}$
E_z - wydajność załadunku słomy	$kg \cdot h^{-1}$
E_w - wydajność wyładunku słomy	$kg \cdot h^{-1}$
E - wydajność całkowita dostarczenia wymaganej masy słomy	$kg \cdot h^{-1}$
i - kolejny numer grupy pojazdów o tej samej ładowności i prędkości, gdzie $(1 \leq i \leq n)$, n jest liczbą grup samochodów	
p_i - liczba pojazdów o ładowności m_i (z grupy i -tej)	$szt.$
v_i - prędkość średnia pojazdu z grupy i -tej	$km \cdot h^{-1}$
m_i - ładowność jednego pojazdu z grupy i -tej	$kg \cdot p_i^{-1}$
p_i - liczba pojazdów o ładowności m_i (z grupy i -tej)	$szt.$
p - liczba wszystkich pojazdów $p = \sum_{i=1}^n p_i$	szt

Zależności pomocnicze:

E_z - wydajność załadunku słomy $kg \cdot h^{-1}$

E_w - wydajność wyładunku słomy $kg \cdot h^{-1}$

E_c - wydajność całkowita dostarczenia wymaganej masy słomy

$$E_c = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_w}} \quad \text{w } kg \cdot h^{-1} \quad (24)$$

t_c - czas dostarczenia wymaganej masy słomy M_s .

$$t_c = t_z + t_p + t_w = \frac{M_s}{E_z} + \frac{M_s}{E_p} + \frac{M_s}{E_w} \quad \text{w } h \quad (25)$$

5.1.2. Algorytm analizy wymiarowej procesu dostaw słomy

Założenia do analizy wymiarowej:

dane: $M_s, d, n, p_i, v_i, m_i, E_z, E_w$,

poszukiwane: E_p, E_c, t_c .

Hipoteza:

Efektywność transportu słomy z punktu A do punktu B można wyrazić funkcją:

$$E_p = f(M_s, d, n, p_i, v_i, m_i, t_p). \quad (26)$$

Przyjęte założenia nie zależą od analizy wymiarowej, lecz od stanu wiedzy techniczno-logistycznej i podlegają weryfikacji doświadczalnej.

Z prawidłowości założeń wynika wniosek, że istnieje funkcja E_p wymiarowo niezmiennicza i jednorodna (funkcja wielkości wymiarowych niezależnych $f(d, v, M, s)$ oraz zależnych.

1) Utworzenie macierzy potrzebnej do wyznaczenia wielkości podstawowych

$m \quad h \quad kg \quad szt.$

- a) Przypadek wykorzystania tylko jednej grupy pojazdów $i = 1$ o tej samej lub bardzo zbliżonej ładowności w ilości $p_i = p_1$ pojazdów wystarczającej do jednego nawrotu, czyli $p_i \leq p_{ci}$ (gdzie p_{ci} - całkowita liczba pojazdów z grupy $i = 1$)

$m \quad h \quad kg \quad szt.$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} M_s \\ d \\ p_1 \\ v_1 \\ m_1 \\ t_p \\ E_p \end{matrix}. \quad (27)$$

Przy czterech jednostkach teoretycznie może istnieć najwyżej:

$$\binom{6}{4} = \frac{6!}{4! \cdot (6-4)!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 2} = 15 \quad (28)$$

możliwości wyboru wielkości wymiarowo niezależnych.

Należy jednak sprawdzić, czy każda z tych możliwości będzie niezależna. Ponadto niektóre możliwości wyboru wielkości wymiarowo niezależnych mogą być mało praktyczne lub całkowicie niepraktyczne.

b) W przypadku konieczności wykorzystania w procesie dostawy słomy pojazdów o różnej ładowności należy je podzielić na grupy pojazdów o tej samej lub bardzo zbliżonej ładowności. Mogą to być np. dwie grupy $i = 1$ oraz $i = 2$ o liczbach pojazdów odpowiednio p_1 oraz p_2 . Wtedy proces analizy wymiarowej musi być podzielony na tyle podetapów, ile istnieje grup samochodów. Brak spełnienia jednego lub obydwu warunków $p_i \leq p_{ci}$, gdzie $i = 1$ i/lub $i = 2$ skutkuje skorygowaniem (zwiększeniem) czasu dostawy z powodu konieczności powtórnego przejazdu pojazdu/pojazdów w liczbie $(p_{ci} - p_i)$.

2) Wyznaczenie wartości wyznacznika macierzy dla pierwszej kombinacji wielkości wymiarowo niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) :

$$W_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0. \quad (29)$$

Wartość wyznacznika W_1 jest różna od zera, czyli warunek wymiarowej niezależności jest spełniony.

Uwaga: wyznaczników W_i można utworzyć aż 15 ($i = 1, 2, \dots, 15$), tzn. tyle, ile jest kombinacji czwórek rozważanych wielkości wymiarowo niezależnych spośród sześciu wszystkich wielkości. Oczywiście nie każda kombinacja wielkości wymiarowo niezależnych spośród możliwych piętnastu W_1 do W_{15} musi nadawać się do praktycznego zastosowania a ewentualną dyskusją, które wielkości wymiarowo niezależne są bardziej praktyczne oraz trudniejsze do zmiany w trakcie badań).

Jako wielkości wymiarowo niezależne wybrano:

d - odległość między A i B,

v_1 - prędkość (średnia) jedynej grupy pojazdów,

m_1 - ładowność jednego pojazdu z jedynej grupy,

p_1 - liczba pojazdów z jednej grupy.

Czyli wielkościami wymiarowo zależnymi będą:

M_s - wymagana masa słomy konieczna do transportu z A do B,

t_p - czas przewozu (transportu) słomy z A do B.

Jako funkcję wymiarowo niezmienniczą i niezależną przyjęto wydajność przewozu słomy z punktu A do punktu B:

$$E_p = \varphi(d, n, v_1, m_1, p_1, M_s, t_p). \quad (30)$$

3) Wyznaczenie funkcji E_p na wydajność przewozu słomy z punktu A do punktu B zgodnie z twierdzeniem Buckinghama przy założeniu wystarczającej liczbie pojazdów, czyli przy liczbie nawrotów $n = 1$)

a) Ponieważ są 4 jednostki i 4 wielkości wymiarowo niezależne (d, v_1, m_1, p_1) oraz 2 wielkości wymiarowo zależne (M_s, t_p) , więc zgodnie z twierdzeniem Buckinghama (inaczej twierdzeniem π) funkcję f wyrazić można następująco:

$$E_p = f(\pi_1, \pi_2) \cdot (d^x \cdot (v_1)^y \cdot (m_1)^q \cdot (p_1)^r), \quad (31)$$

gdzie $f(\pi_1, \pi_2)$ jest zwykłą funkcją bezwymiarowych argumentów (π_1, π_2) niezależną od wielkości wymiarowo niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) . Także wykładniki x, y, q, r nie zależą ani od (π_1, π_2) ani od (d, v_1, m_1, p_1) .

b) Obliczenie bezwymiarowego argumentu π_1 z zależności na wymiar pierwszej wielkości wymiarowo zależnej M_s

$$[M_s] = \pi_1 \cdot [d^{x_M} \cdot (v_1)^{y_M} \cdot (m_1)^{q_M} \cdot (p_1)^{r_M}]. \quad (32)$$

Z porównania wymiarów (jednostek) obydwu stron powyższego równania otrzymuje się równanie wymiarowe dla M_s :

$$m^0 \cdot h^0 \cdot kg^1 \cdot szt^0 = (m^{x_M} \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^{y_M} \cdot h^{-y_M} \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^{q_M} \cdot szt^{-q_M}) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^{r_M}), \quad (33)$$

z którego wyznacza się równania wykładników (x_M, y_M, q_M, r_M) wielkości wymiarów niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) :

$$0 = x_M + y_M, \quad (34)$$

$$0 = -y_M \quad (35)$$

$$1 = q_M \quad (36)$$

$$0 = -q_M + r_M. \quad (37)$$

Rozwiązaniami tych równań są następujące wartości wykładników:

$$x_M = y_M = 0 \quad (38)$$

oraz

$$q_M = r_M = 1. \quad (39)$$

Tak więc mając zależność na M_s :

$$M_s = \pi_1 \cdot (m_1)^1 \cdot (p_1)^1 \quad (40)$$

można wyznaczyć wzór na bezwymiarowy argument π_1 :

$$\pi_1 = \frac{M_s}{m_1 \cdot p_1}, \quad (41)$$

gdzie współczynnik π_1 jest rzeczywiście bezwymiarowy.

- c) Obliczenie bezwymiarowego argumentu π_2 z zależności na wymiar drugiej wielkości wymiarowo zależnej t_p (dla grupowego przejazdu pojazdów z miejsca załadunku do zakładu przeróbki słomy):

$$[t_p] = \pi_2 \cdot [d^{x_t} \cdot (v_1)^{y_t} \cdot (m_1)^{q_t} \cdot (p_1)^{r_t}]. \quad (42)$$

Z porównania wymiarów (jednostek) obydwu stron powyższego równania otrzymuje się równanie wymiarowe dla t_p :

$$m^0 \cdot h^1 \cdot kg^0 \cdot szt^0 = (m^{x_t} \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^{y_t} \cdot h^{-y_t} \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^{q_t} \cdot szt^{-q_t}) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^{r_t}) \quad (43)$$

z którego wyznacza się równania wykładników (x_t, y_t, q_t, r_t) wielkości wymiarów niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) :

$$0 = x_t + y_t, \quad (44)$$

$$1 = -y_t, \quad (45)$$

$$0 = q_t, \quad (46)$$

$$0 = -q_t + r_t. \quad (47)$$

Rozwiązaniem tych równań są następujące wartości wykładników:

$$x_t = -y_t = 1 \quad (48)$$

oraz

$$q_t = r_t = 0. \quad (49)$$

Tak więc mając zależność na t_p :

$$t_p = \pi_2 \cdot d^1 \cdot (v_1)^{-1} \quad (50)$$

można wyznaczyć wzór na bezwymiarowy argument π_2 :

$$\pi_2 = \frac{t_p \cdot v_1}{d_1}, \quad (51)$$

gdzie współczynnik π_2 jest rzeczywiście bezwymiarowy.

- d) Obliczenie bezwymiarowego argumentu π_2 z zależności na wymiar drugiej wielkości wymiarowo zależnej t_p (dla pojedynczego przejazdu pojazdów z miejsca załadunku do zakładu przeróbki słomy):

$$[t_p] = \pi_2 \cdot [d^{x_t} \cdot (v_1)^{y_t} \cdot (m_1)^{q_t} \cdot (p_1)^{r_t}]. \quad (52)$$

Z porównania wymiarów (jednostek) obydwu stron powyższego równania otrzymuje się równanie wymiarowe dla t_p :

$$m^0 \cdot h^1 \cdot kg^0 \cdot szt^0 = (m^{x_t} \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^{y_t} \cdot h^{-y_t} \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^{q_t} \cdot szt^{-q_t}) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^{r_t}) \quad (53)$$

z którego wyznacza się równania wykładników (x_t, y_t, q_t, r_t) wielkości wymiarów niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) :

$$0 = x_t + y_t, \quad (54)$$

$$1 = -y_t, \quad (55)$$

$$0 = q_t, \quad (56)$$

$$0 = -q_t + r_t. \quad (57)$$

Rozwiązaniami tych równań są następujące wartości wykładników:

$$x_t = -y_t = 1 \quad (58)$$

oraz

$$q_t = r_t = 0. \quad (59)$$

Tak więc mając zależność na t_p :

$$t_p = \pi_2 \cdot d^1 \cdot (v_1)^{-1} \quad (60)$$

można wyznaczyć wzór na bezwymiarowy argument π_2 :

$$\pi_2 = \frac{t_p \cdot v_1}{d_1}, \quad (61)$$

gdzie współczynnik π_2 jest rzeczywiście bezwymiarowy.

e) Obliczenie wartości wykładników (x, y, q, r) wielkości wymiarów niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) w funkcji E_p

$$[E_p] = f(\pi_1, \pi_2) \cdot [d^x \cdot (v_1)^y \cdot (m_1)^q \cdot (p_1)^r]. \quad (62)$$

Z porównania wymiarów (jednostek) obydwu stron powyższego równania otrzymuje się równanie wymiarowe dla E_p :

$$m^0 \cdot h^{-1} \cdot kg^1 \cdot szt^0 = (m^x \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^y \cdot h^{-y} \cdot kg^0 \cdot szt^0) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^q \cdot szt^{-q}) \cdot (m^0 \cdot h^0 \cdot kg^0 \cdot szt^r) \quad (63)$$

z którego wyznacza się równania wykładników (x, y, q, r) wielkości wymiarów niezależnych (d, v_1, m_1, p_1) :

$$m^0 = m^x \cdot m^y = m^{(x+y)} \Rightarrow 0 = x + y, \quad (64)$$

$$h^{-1} = h^{-y} \Rightarrow -1 = -y, \quad (65)$$

$$kg^1 = kg^q \Rightarrow 1 = q \quad (66)$$

$$(szt)^0 = (szt)^{-q} \cdot (szt)^r = (szt)^{(-q+r)} \Rightarrow 0 = -q + r. \quad (67)$$

Rozwiązaniami tych równań są następujące wartości wykładników:

$$x = -y = -1 \quad \text{oraz} \quad q = r = 1. \quad (68)$$

Tak więc znana jest postać funkcji E_p .

- f) Ostateczna postać funkcji E_p na wydajność przewozu słomy z punktu A do punktu B zgodnie z twierdzeniem Buckinghama

$$E_p = f(\pi_1, \pi_2) \cdot (d^{-1} \cdot (v_1)^1 \cdot (m_1)^1 \cdot (p_1)^1). \quad (69)$$

- 4) Postać funkcji $\tilde{E}_p$ na wydajność przewozu w badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych na modelu (przy założeniu podobieństwa procesu modelowego oraz procesu rzeczywistego)

$$\tilde{E}_p = f(\tilde{\pi}_1, \tilde{\pi}_2) \cdot (\tilde{d}^{-1} \cdot (\tilde{v}_1)^1 \cdot (\tilde{m}_1)^1 \cdot (\tilde{p}_1)^1), \quad (70)$$

gdzie wielkości wymiarów niezależnych i zależnych będą miały inne wartości oznaczone odpowiednio przez $(\tilde{d}, \tilde{v}_1, \tilde{m}_1, \tilde{p}_1)$ oraz $(\tilde{M}_s, \tilde{t}_p)$.

5.1.3. Algorytm modelowania procesu dostaw słomy

- 1) Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo niezależnych $(\lambda_d, \lambda_{v1}, \lambda_{m1}, \lambda_{p1})$ dla założonych parametrów procesu modelowego $(\tilde{d}, \tilde{v}_1, \tilde{m}_1, \tilde{p}_1)$ oraz $(\tilde{M}_s, \tilde{t}_p)$:

$$\lambda_d = \frac{d}{\tilde{d}}, \quad \lambda_{v1} = \frac{v_1}{\tilde{v}_1}, \quad \lambda_{m1} = \frac{m_1}{\tilde{m}_1}, \quad \lambda_{p1} = \frac{p_1}{\tilde{p}_1}. \quad (71)$$

Powyższe podziałki są niezależne, można więc przyjąć dowolne ich wartości lub narzucić na nie warunki dodatkowe.

- 2) Wyznaczenie podziałki funkcji E_p (wykorzystując kryteria podobieństwa $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$)

$$\begin{aligned} \zeta_{E_p} = \frac{E_p}{\tilde{E}_p} &= \frac{f(\pi_1, \pi_2) \cdot (d^{-1} \cdot (v_1)^1 \cdot (m_1)^1 \cdot (p_1)^1)}{f(\tilde{\pi}_1, \tilde{\pi}_2) \cdot (\tilde{d}^{-1} \cdot (\tilde{v}_1)^1 \cdot (\tilde{m}_1)^1 \cdot (\tilde{p}_1)^1)} = \frac{d^{-1} \cdot (v_1) \cdot (m_1) \cdot (p_1)}{\tilde{d}^{-1} \cdot (\tilde{v}_1) \cdot (\tilde{m}_1) \cdot (\tilde{p}_1)} = \\ &= \frac{\tilde{d}^1 \cdot (\tilde{v}_1) \cdot \lambda_{v1} \cdot (\tilde{m}_1) \cdot \lambda_{m1} \cdot (\tilde{p}_1) \cdot \lambda_{p1}}{\tilde{d}^1 \cdot \lambda_d \cdot (\tilde{v}_1) \cdot (\tilde{m}_1) \cdot (\tilde{p}_1)} = (\lambda_d)^{-1} \cdot \lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1}, \end{aligned} \quad (72)$$

Uwaga: $f(\pi_1, \pi_2) = f(\tilde{\pi}_1, \tilde{\pi}_2)$ ponieważ $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$.

Ostatecznie efektywność planowanego przewozu (gdyż bez uwzględnienia czasu załadunku i wyładunku) wynosi:

$$E_p = \zeta_{E_p} \cdot \tilde{E}_p = (\lambda_d)^{-1} \cdot \lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} \cdot \tilde{E}_p, \quad (73)$$

gdzie $\tilde{E}_p$ wyznacza się ze wzoru (73) dla dostawy modelowej.

- 3) Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo zależnych μ_{Ms} oraz μ_{tp} wykorzystując kryteria podobieństwa $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$

$$\mu_{Ms} = \frac{M_s}{\tilde{M}_s} = \frac{\pi_1 \cdot m_1 \cdot p_1}{\tilde{\pi}_1 \cdot \tilde{m}_1 \cdot \tilde{p}_1} = \frac{\lambda_{m1} \cdot \tilde{m}_1 \cdot \lambda_{p1} \cdot \tilde{p}_1}{\tilde{m}_1 \cdot \tilde{p}_1} = \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} \quad (74)$$

$$\mu_{tp} = \frac{t_p}{\tilde{t}_p} = \frac{\pi_2 \cdot d^1 \cdot (v_1)^{-1}}{\tilde{\pi}_2 \cdot \tilde{d}^1 \cdot (\tilde{v}_1)^{-1}} = \frac{\lambda_d \cdot \tilde{d} \cdot \tilde{v}_1}{\tilde{d} \cdot \tilde{\lambda}_{v1} \cdot \tilde{v}_1} = \lambda_d \cdot (\tilde{\lambda}_{v1})^{-1} \quad (75a)$$

lub

$$\mu_{tp} = \frac{t_p}{\tilde{t}_p} = \frac{\pi_2 \cdot p_1 \cdot d^1 \cdot (v_1)^{-1}}{\tilde{\pi}_2 \cdot \tilde{p}_1 \cdot \tilde{d}^1 \cdot (\tilde{v}_1)^{-1}} = \frac{\lambda_d \cdot \tilde{d} \cdot \tilde{v}_1}{\tilde{d} \cdot \tilde{\lambda}_{v1} \cdot \tilde{v}_1} = \lambda_{p1} \cdot \lambda_d \cdot (\tilde{\lambda}_{v1})^{-1} \quad (75b)$$

Wzór (75a) stosuje się w przypadku równoczesnego (grupowego) przejazdu pojazdów z miejsca załadunku do zakładu przeróbki słomy dzięki np. wykorzystaniu własnych nośników umożliwiających równoczesny załadunek i wyładunek bel lub odpowiedniej liczby specjalnych nośników bel, jak np. typu T367, zawieszanych na podnośnikach hydraulicznych ciągników. Natomiast wzór (75b) stosuje się w przypadku pojedynczego przejazdu pojazdów (bezpośrednio po załadunku), gdyż załadunek i wyładunek zapewnia tylko jeden specjalny nośnik bel z ciągnikiem.

Uwaga: Wzór (75b) można uogólnić na inne przypadki, gdy np. istnieje możliwość zastosowania większej liczby nośników bel do załadunku i wyładunku (niż jeden).

- 4) Obliczenie czasu dostawy t_c oraz wydajności dostawy E_d zadanej masy słomy M_s przy danych wydajnościach załadunku i wyładunku oraz przy założeniu, że załadunek i wyładunek oraz przejazd wszystkich samochodów od A do B odbywa się jednocześnie (zapewniona jest bowiem odpowiednia liczba pojazdów (poj) z podnośnikami:

$$t_c = t_z + t_p + t_w = \frac{M_s}{E_z} + \frac{M_s}{E_p} + \frac{M_s}{E_w}, \quad (76)$$

$$t_c = M_s \cdot \left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_w} \right) \Rightarrow \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_w}} = \frac{M_s}{t_c}. \quad (77)$$

gdzie:

konieczna liczba pojazdów poj zapewniająca dostawę w jednym nawrocie:

$$poj \geq \frac{M_s}{m_1} \text{ w sztukach,}$$

wydajność przewozu masy słomy E_p : wyznaczona z zależności (73),

czas średni przewozu równoczesnego masy słomy M_s : $t_p = \frac{d}{v}$ w godzinach,

czas średni załadunku masy słomy M_s : $t_z = \frac{M_s}{E_z}$ w godzinach,

czas średni wyładunku masy słomy M_s : $t_w = \frac{M_s}{E_w}$ w godzinach.,

Efektywność wypadkowa, czyli efektywność dostawy:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_w}}, \quad (78)$$

gdzie: E_z, E_w - obliczone wydajności odpowiednio załadunku i wyładunku słomy na podstawie danych z pomiaru średnich czasów załadunku i wyładunku oraz załadowanej całkowitej masy słomy:

$$E_z = \frac{M_s}{t_z}, \quad (79)$$

$$E_w = \frac{M_s}{t_w}. \quad (80)$$

Przykład do punktu 4

Wyznaczenie efektywności wypadkowej $E_{wyp} = E_d$ dla danych losowych otrzymanych z firmy oraz zaczerpniętych z protokołu transportu słomy:

$M_s = 144900 \text{ kg}$; $d = 141 \text{ km}$; $p_1 = p_c = 10 \text{ pojazdów}$, $v_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,

Ponieważ w protokole pominięto czasy załadunku i wyładunku, dlatego też do dalszych obliczeń przyjęto średnie wartości tych czasów dla tego typu pojazdów: $t_{z1} = t_{w1} = 0,25 \text{ godz.}$

Czas przejazdu grupowego pojazdów:

$$t_p = \frac{d}{v_1} = \frac{141}{33} = 4,273 \text{ h.}$$

Wydajność przewozu grupowego:

$$E_p = \frac{M_s}{t_p} = \frac{144900}{4,273} = 33910,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{ (tutaj obliczona z definicji, bo znany jest czas przewozu słomy),}$$

Wydajność załadunku i wyładunku równocześnie wszystkich samochodów przy założeniu, że $t_{z1} = 0,25 \text{ h}$ oraz $t_{w1} = 0,25 \text{ h}$.

$$E_z = \frac{M_s}{t_z} = \frac{144900}{0,25} = 579600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_w = \frac{M_s}{t_w} = \frac{144900}{0,25} = 579600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Efektywność wypadkowa:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_w}} = \frac{1}{\frac{1}{579600} + \frac{1}{33910,6} + \frac{1}{579600}} = 30358,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

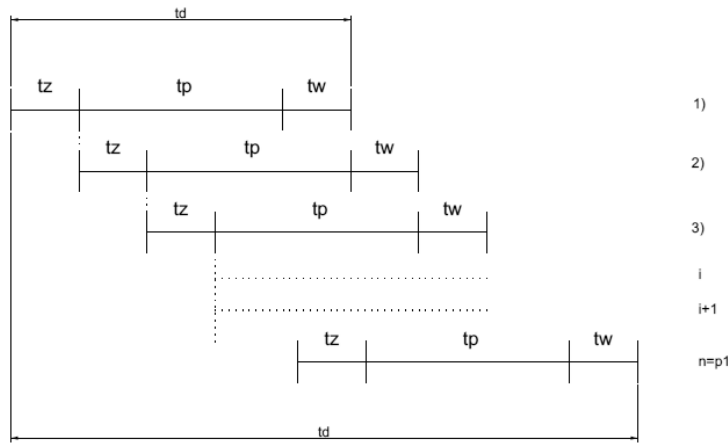
Sprawdzenie:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{M_s}{t_c} = \frac{144900}{4,773} = 30358,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

gdzie $t_c = 0,25 + 4,273 + 0,25 = 4,773 \text{ h}$.

Z porównania wartości efektywności przewozu ($33910,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$) z efektywnością dostawy ($30358,3 \text{ kg/h}$) wynika, że wartości efektywności załadunku i wyładunku w przypadku równoczesnego załadunku i wyładunku pojazdów w niewielkim stopniu wpływają na efektywność dostawy słomy.

- 5) Obliczenie czasu dostawy t_c oraz efektywności dostawy E_d zadanej masy słomy M_s przy danych wydajnościach załadunku i wyładunku oraz przy założeniu, że załadunek i wyładunek zapewniony jest tylko przez jeden nośnik bel, natomiast przejazd pojazdów odbywa się bezpośrednio po załadunku – zgodnie z rysunkiem 5.1:



Rysunek 5.1. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku ($n = p_1$) pojazdów

Źródło: Opracowanie własne

Czas dostawy t_c wg rys. 5.1:

$$t_c = t_{d1} + (n - 1) \cdot t_{w1} = (t_{z1} + t_{p1} + t_{w1}) + (n - 1) \cdot t_{w1} = t_{z1} + t_{p1} + n \cdot t_{w1}, \quad (81)$$

gdzie t_{z1} , t_{p1} , t_{w1} – odpowiednio czasy załadunku, przewożenia i wyładunku jednego pojazdu, $n = p_1$ – liczba pojazdów przewożąca słomę w ciągu jednego nawrotu, czyli:

$$t_c = t_{z1} + t_{p1} + p_1 \cdot t_{w1} = \frac{M_s}{E_z} + \frac{M_s}{E_p} + p_1 \cdot \frac{M_s}{E_w}. \quad (82)$$

$$t_c = M_s \cdot \left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + p_1 \cdot \frac{1}{E_w} \right) \Rightarrow \frac{M_s}{t_c} = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1}{E_w}}.$$

Efektywność wypadkowa dla drugiego sposobu dostawy słomy (przy jednym nośniku bel):

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + p_1 \cdot \frac{1}{E_w}}. \quad (83)$$

Przykład do punktu 5

Dane: $M_s = 144900 \text{ kg}$; $d = 141 \text{ km}$; $p_1 = p_c = 10 \text{ pojazdów}$, $v_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
 $t_{z1} = t_{w1} = 0,25 \text{ godz.}$

Czas przejazdu t_p pojazdu:

$$t_p = \frac{d}{v_1} = \frac{141}{33} = 4,273 \text{ h.}$$

Efektywność przewozu, załadowania i wyładowania słomy w jednym nawrocie pojazdów:

$$E_p = \frac{M_s}{t_p} = \frac{144900}{4,273} = 33910,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_z = \frac{M_s}{t_z} = \frac{144900}{0,25} = 579600,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_w = \frac{M_s}{t_w} = \frac{144900}{0,25} = 579600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Efektywność wypadkowa:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + p_1 \cdot \frac{1}{E_w}} = \frac{1}{\frac{1}{579600} + \frac{1}{33910,6} + \frac{10}{579600}} = 20632,2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Sprawdzenie:

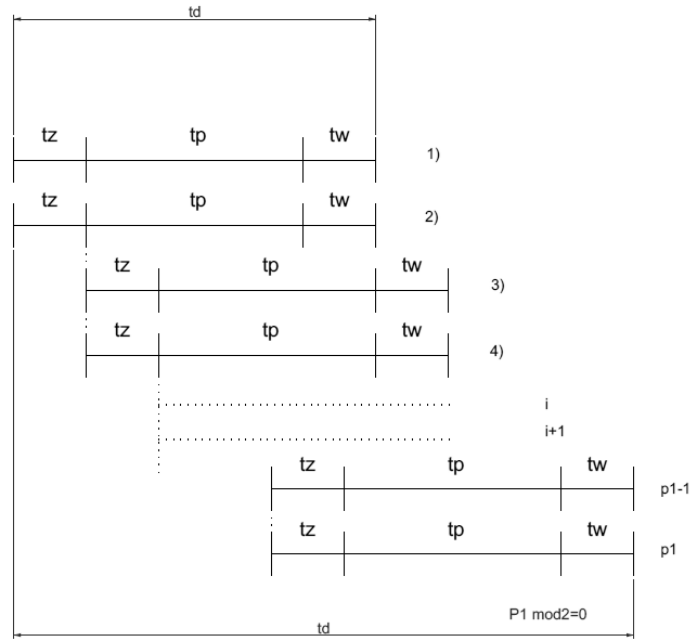
$$E_{wyp} = E_d = \frac{M_s}{t_c} = \frac{144900}{7,023} = 20632,2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

gdzie $t_c = t_{z1} + t_{p1} + n \cdot t_{w1} = 0,25 + 4,273 + 10 \cdot 0,25 = 7,023 \text{ h.}$

- 6) Obliczenie czasu dostawy t_c oraz efektywności dostawy E_d zadanej masy słomy M_s przy danych wydajnościach załadunku i wyładunku oraz przy założeniu, że załadunek i wyładunek zapewniony jest przez dwa nośniki bel, natomiast przejazd pojazdów odbywa się bezpośrednio po załadowaniu.

W takim przypadku efektywność dostawy zależy od tego, czy przewóz słomy przeprowadza się parzystą ($p_1 \bmod 2=0$) lub nieparzystą ($p_1 \bmod 2=1$) liczbą pojazdów.

6a) Efektywność dostawy słomy w przypadku parzystej liczby pojazdów wyznacza się zgodnie z rysunkiem 5.2.



Rysunek 5.2. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku $p_1 \bmod 2 = 0$ pojazdów

Źródło: Opracowanie własne

Przy wykorzystaniu dwóch nośników bel przejazd pojazdów po załadowaniu parzystej liczby pojazdów odbywa się parami. Stąd czas dostawy t_c wyraża się wzorem (zgodnie z rys. 5.2):

$$t_c = t_{d1,2} + \frac{p_1 - 2}{2} \cdot t_{w1,2} = (t_{z1,2} + t_{p1,2} + t_{w1,2}) + \frac{p_1 - 2}{2} \cdot t_{w1,2} =$$

$$= t_{z1,2} + t_{p1,2} + \frac{p_1}{2} \cdot t_{w1,2} = \frac{M_s}{E_z} + \frac{M_s}{E_p} + \frac{p_1}{2} \cdot \frac{M_s}{E_w}$$

a następnie z definicji wyznacza się wzór na efektywność dostawy:

$$t_c = M_s \cdot \left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1}{2} \cdot \frac{1}{E_w} \right) \Rightarrow \frac{M_s}{t_c} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1}{2 \cdot E_w} \right)}$$

gdzie $t_{d1,2}$, $t_{w1,2}$, $t_{p1,2}$, $t_{z1,2}$ – odpowiednio czasy dostawy, wyładowania, przewozu i załadowania równoległe 2. pojazdów.

Tak więc efektywność wypadkowa przy zastosowaniu 2. nośników słomy oraz $p_1 \bmod 2 = 0$ pojazdów wyznacza się ze wzoru:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{M_s}{t_c} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1}{2 \cdot E_w} \right)}. \quad (84)$$

Przykład do punktu 6a

Dane: $M_s = 144900 \text{ kg}$; $d = 141 \text{ km}$; $p_1 = p_c = 10 \text{ pojazdów}$, $v_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
 $t_{z1} = t_{w1} = 0,25 \text{ godz.}$

Czas przejazdu t_p pojazdu:

$$t_p = \frac{d}{v_1} = \frac{141}{33} = 4,273 \text{ h.}$$

Efektywność przewozu, załadowania i wyładowania słomy w jednym nawrocie pojazdów:

$$E_p = \frac{M_s}{t_p} = \frac{144900}{4,273} = 33910,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_z = \frac{M_s}{t_z} = \frac{144900}{0,25} = 579600,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_w = \frac{M_s}{t_w} = \frac{144900}{0,25} = 579600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Efektywność wypadkowa:

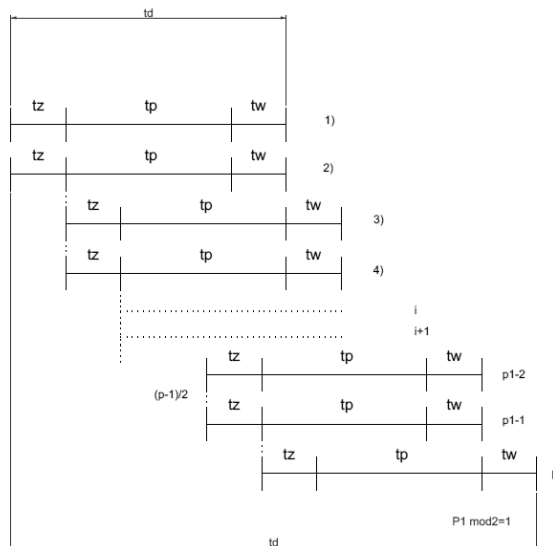
$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + p_1 \cdot \frac{1}{E_w}} = \frac{1}{\frac{1}{579600} + \frac{1}{33910,6} + \frac{5}{579600}} = 25099,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Sprawdzenie:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{M_s}{t_c} = \frac{144900}{5,775} = 25099,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

gdzie $t_c = t_{z1,2} + t_{p1,2} + \frac{p_1}{2} \cdot t_{w1,2} = 0,25 + 4,273 + 5 \cdot 0,25 = 5,775 \text{ h.}$

6b) Czas dostawy oraz efektywność dostawy słomy w przypadku nieparzystej liczby pojazdów wyznacza się zgodnie z rysunkiem 5.3.:



Rysunek 5.3. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku $p_1 \bmod 2 = 1$ pojazdów

Źródło: Opracowanie własne

Wiadomym jest, że przy wykorzystaniu dwóch nośników bel do załadowywania słomy na nieparzystą liczbę pojazdów przejazd ostatniego pojazdu odbywa się w pojedynkę. Dlatego też czas dostawy t_c takiego przypadku wyraża się wzorem (zgodnie z rys. 5.3):

$$\begin{aligned} t_c &= t_{d1,2} + \frac{p_1 - 3}{2} \cdot t_{w1,2} + t_{w1} = (t_{z1,2} + t_{p1,2} + t_{w1,2}) + \frac{p_1 - 3}{2} \cdot t_{w1,2} + t_{w1} = \\ &= t_{z1,2} + t_{p1,2} + \frac{p_1 - 1}{2} \cdot t_{w1,2} + t_{w1} = \frac{M_s}{E_z} + \frac{M_s}{E_p} + \frac{p_1 - 1}{2} \cdot \frac{M_s}{E_w} + \frac{M_s}{E_w} \end{aligned}$$

Wzór na efektywność dostawy :

$$t_c = M_s \cdot \left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \left(\frac{p_1}{2} + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1}{E_w} \right) \Rightarrow \frac{M_s}{t_c} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1 + 1}{2 \cdot E_w} \right)}.$$

Tak więc efektywność wypadkowa przy zastosowaniu 2. nośników słomy oraz $p_1 \bmod 2 = 1$ pojazdów wyznacza się ze wzoru:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + \frac{p_1 + 1}{2 \cdot E_w} \right)}, \quad \text{gdy } p_1 \bmod 2 = 1., \quad (85)$$

Przykład do punktu 6b

Dane: $M_s = 144900 \text{ kg}$; $d = 141 \text{ km}$; $p_1 = p_c = 11 \text{ pojazdów}$, $v_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
 $t_{z1} = t_{w1} = t_{z1,2} = t_{w1,2} = 0,25 \text{ godz.}$

Czas przejazdu t_p pojazdu:

$$t_p = \frac{d}{v_1} = \frac{141}{33} = 4,273 \text{ h.}$$

Efektywność przewozu, załadowania i wyładowania słomy w jednym nawrocie pojazdów:

$$E_p = \frac{M_s}{t_p} = \frac{144900}{4,273} = 33910,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_z = \frac{M_s}{t_z} = \frac{144900}{0,25} = 579600,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E_w = \frac{M_s}{t_w} = \frac{144900}{0,25} = 579600 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Efektywność wypadkowa:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{1}{\frac{1}{E_z} + \frac{1}{E_p} + p_1 \cdot \frac{1}{E_w}} = \frac{1}{\frac{1}{579600} + \frac{1}{33910,6} + \frac{6}{579600}} = 24057,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Sprawdzenie:

$$E_{wyp} = E_d = \frac{M_s}{t_c} = \frac{144900}{6,023} = 24057,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1},$$

gdzie $t_c = t_{z1,2} + t_{p1,2} + \frac{p_1 - 1}{2} \cdot t_{w1,2} + t_{w1} = 0,25 + 4,273 + 5 \cdot 0,25 + 0,25 = 6,023 \text{ h.}$

5.1.4. Przykłady testowe wykorzystania analizy wymiarowej

Przykład testowy 1a

Jest to bardzo prosty przykład testowy, podobnie jak pozostałe przykłady. Parametry modelowych dostaw zostały tak dobrane w tych przykładach, aby była możliwość sprawdzenia poprawności obliczeń efektywności transportu bel słomy do zakładu pracy przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu analizy wymiarowej.

Przyjęte parametry modelowej dostawy:

$\tilde{M}_s = M_s = 144900 \text{ kg}$ - równe masy bel słomy w procesach rzeczywistym i modelowym,
 $\tilde{d} = 2 \cdot d = 282 \text{ km}$ - dwukrotnie większa odległość dostawy w procesie modelowym,
 $\tilde{p}_1 = \tilde{p}_c = 10$ samochodów o tej samej ładowności, podobnie jak w procesie rzeczywistym,
 $\tilde{v}_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ - ta sama średnia prędkość średnia samochodów w obydwu procesach,
Z powyższych danych wynika, że efektywność procesu modelowego powinna być dwukrotnie mniejsza niż efektywność procesu rzeczywistego, ponieważ droga dostawy zwiększyła się dwukrotnie.

Tak więc czas dostawy zwiększył się dwukrotnie w stosunku do czasu procesu dostawy rzeczywistej:

$$\tilde{t}_p = \tilde{p}_1 \cdot \frac{\tilde{d}}{\tilde{v}_1} = 10 \cdot \frac{282}{33} = 85,45 \text{ h}$$

i tym samym efektywność procesu modelowej dostawy zmniejszyła się dwukrotnie:

$$\tilde{E}_p = \frac{\tilde{M}_s}{\tilde{t}_p} = \frac{144900}{85,45} = 1695,65 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Obliczenia efektywności dostawy modelowej wg analizy wymiarowej zostały przedstawione poniżej.

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo niezależnych $(\lambda_d, \lambda_{v1}, \lambda_{m1}, \lambda_{p1})$ wg (60):

$$\lambda_d = \frac{d}{\tilde{d}} = \frac{141}{282} = 0,5 \text{ - odległość 2 razy większa w analizie modelowej,}$$

$$\lambda_{v1} = \frac{v_1}{\tilde{v}_1} = \frac{33}{33} = 1 \text{ - ta sama prędkość samochodów w obydwu procesach,}$$

$$\lambda_{m1} = \frac{m_1}{\tilde{m}_1} = 1 \text{ - wykorzystano samochody o tej samej ładowności w obydwu procesach,}$$

$$\lambda_{p1} = \frac{p_1}{\tilde{p}_1} = \frac{10}{10} = 1 \text{ - liczba pojazdów taka sama.}$$

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo zależnych μ_{Ms} oraz μ_{tp} :

$$\mu_{Ms} = \frac{M_s}{\tilde{M}_s} = \frac{\pi_1 \cdot m_1 \cdot p_1}{\tilde{\pi}_1 \cdot \tilde{m}_1 \cdot \tilde{p}_1} = \frac{\lambda_{m1} \cdot \tilde{m}_1 \cdot \lambda_{p1} \cdot \tilde{p}_1}{\tilde{m}_1 \cdot \tilde{p}_1} = \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} = 1 \cdot 1 = 1,$$

$$\mu_{tp} = \frac{t_p}{\tilde{t}_p} = \lambda_d \cdot (\tilde{\lambda}_{v1})^{-1} = 0,5 \cdot 1 = 0,5.$$

Wyznaczenie podziałki funkcji E_p (wykorzystując kryteria podobieństwa $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$) (zgodnie z (73):

$$\frac{E_p}{\tilde{E}_p} = (\lambda_d)^{-1} \cdot \lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \Rightarrow$$

$$\tilde{E}_p = E_p \cdot (\lambda_d)^1 \cdot (\lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1})^{-1} = 3391,3 \cdot 0,5 \cdot 1 = 1695,657 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Otrzymano wynik obliczenia efektywności procesu modelowej dostawy zgodnie z oczekiwaniem.

Przykład testowy 1b

Przyjęte parametry modelowej dostawy:

$\tilde{M}_s = M_s = 289800 \text{ kg}$ - dwukrotnie większa masa bel słomy w procesie modelowej dostawy niż rzeczywistej dostawy,

$\tilde{d} = 2 \cdot d = 282 \text{ km}$ – dwukrotnie większa odległość dostawy w procesie modelowym,

$\tilde{p}_1 = \tilde{p}_c = 20$ – dwukrotnie większa liczba samochodów o tej samej ładowności w procesie modelowym,

$\tilde{v}_1 = 33 \text{ km/h}$ - ta sama średnia prędkość średnia samochodów w obydwu procesach.

Z powyższych danych wynika, że efektywność procesu modelowego powinna być równa efektywność procesu rzeczywistego, ponieważ:

czas dostawy zwiększył się czterokrotnie:

$$\tilde{t}_p = \tilde{p}_1 \cdot \frac{\tilde{d}}{\tilde{v}_1} = 20 \cdot \frac{282}{33} = 170,9 \text{ h}$$

i tym samym efektywność procesu modelowej dostawy zmniejszyła się dwukrotnie:

$$\tilde{E}_p = \frac{\tilde{M}_s}{\tilde{t}_p} = \frac{289800}{170,9} = 1695,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Obliczenia efektywności dostawy modelowej wg analizy wymiarowej zostały przedstawione poniżej.

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo niezależnych $(\lambda_d, \lambda_{v1}, \lambda_{m1}, \lambda_{p1})$ wg (60):

$$\lambda_d = \frac{d}{\tilde{d}} = \frac{141}{282} = 0,5 - \text{odległość 2 razy większa w analizie modelowej,}$$

$$\lambda_{v1} = \frac{v_1}{\tilde{v}_1} = \frac{33}{33} = 1 - \text{ta sama prędkość samochodów w obydwu procesach,}$$

$$\lambda_{m1} = \frac{m_1}{\tilde{m}_1} = 1 - \text{samochody o tej samej ładowności,}$$

$$\lambda_{p1} = \frac{p_1}{\tilde{p}_1} = \frac{10}{10} = 1 - \text{liczba pojazdów taka sama.}$$

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo zależnych μ_{Ms} oraz μ_{tp} (zgodnie z (62) i (63):

$$\mu_{Ms} = \frac{M_s}{\tilde{M}_s} = \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} = 1 \cdot 1 = 1, \quad \mu_{tp} = \frac{t_p}{\tilde{t}_p} = \lambda_d \cdot (\tilde{\lambda}_{v1})^{-1} = 0,5 \cdot 1 = 0,5.$$

Wyznaczenie podziałki funkcji E_p (wykorzystując kryteria podobieństwa $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$) (zgodnie z (73):

$$\frac{E_p}{\tilde{E}_p} = (\lambda_d)^{-1} \cdot \lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \Rightarrow$$

$$\tilde{E}_p = E_p \cdot (\lambda_d)^1 \cdot (\lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1})^{-1} = 3393,4 \cdot 0,5 \cdot 1 = 1695,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Otrzymano wynik obliczenia efektywności procesu modelowej dostawy zgodnie z oczekiwaniem.

Dane modelowe – wersja 2 – (bardzo prosta do sprawdzenia metody)

$$\tilde{M}_s = 434700 \text{ kg}, \quad \tilde{d} = 282 \text{ km}, \quad \tilde{p}_1 = p_c = 30 \text{ samochodów}, \quad v_1 = 33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$t_p = p_1 \cdot \frac{d}{v_1} = 30 \cdot \frac{282}{33} = 256.36(36) \text{ h}$$

$$\tilde{E}_p = \frac{\tilde{M}_s}{t_p} = \frac{434700}{256.36(36)} = 1695,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Obliczenia wg analizy wymiarowej

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo niezależnych $(\lambda_d, \lambda_{v1}, \lambda_{m1}, \lambda_{p1})$ wg (60):

$$\lambda_d = \frac{d}{\tilde{d}} = \frac{141}{282} = 0,5, \quad \lambda_{v1} = \frac{v_1}{\tilde{v}_1} = \frac{33}{33} = 1, \quad \lambda_{m1} = \frac{m_1}{\tilde{m}_1} = 3, \quad \lambda_{p1} = \frac{p_1}{\tilde{p}_1} = \frac{30}{10} = 3.$$

Wyznaczenie podziałek wielkości wymiarowo zależnych μ_{Ms} oraz μ_{tp} (zgodnie z (62) i (63):

$$\mu_{Ms} = \frac{M_s}{\tilde{M}_s} = \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} = 1 \cdot 1 = 1, \quad \mu_{tp} = \frac{t_p}{\tilde{t}_p} = \lambda_d \cdot (\tilde{\lambda}_{v1})^{-1} = 0,5 \cdot 1 = 0,5.$$

Wyznaczenie podziałki funkcji E_p (wykorzystując kryteria podobieństwa $\tilde{\pi}_1 = \pi_1$ oraz $\tilde{\pi}_2 = \pi_2$) (zgodnie z (73):

$$\frac{E_p}{\tilde{E}_p} = (\lambda_d)^{-1} \cdot \lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1} \Rightarrow$$

$$\tilde{E}_p = E_p \cdot (\lambda_d)^1 \cdot (\lambda_{v1} \cdot \lambda_{m1} \cdot \lambda_{p1})^{-1} = 3393,4 \cdot 0,5 \cdot 1 = 1696,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Obliczenia testowe z wykorzystaniem analizy wymiarowej zostały poprzedzone analitycznymi obliczeniami wydajności dostawy słomy (transportu łącznie z załadunkiem i wyładunkiem) dla kilku przypadków przejazdu pojazdów z miejsca załadunku do zakładu przeróbki słomy. Były to przejazdy:

- a) grupowe (równoczesne), gdy np. każdy pojazd posiadał własny nośnik bel,

- b) pojedyncze, gdy załadunek i wyładunek słomy był zapewniony tylko przez jeden nośnik bel,
- c) częściowo grupowe, gdy sprzedawca słomy i producent peletów dysponowali dwoma nośnikami bel (oczywiście czasem najbardziej opłacalne jest zastosowanie większej liczby nośników).

W każdym z powyższych sposobów transportu słomy należało zastosować inny wzór na czas dostawy oraz na wydajność dostawy słomy. Wzory te wraz z niezbędnymi podziałkami wielkości niezależnych i zależnych generuje się z macierzy współczynników zgodnie z algorytmem analizy wymiarowej analizowanego procesu, czyli w tym przypadku dostawy słomy wybranym sposobem transportu (grupowym, pojedynczym lub częściowo-grupowym). Taka analiza wszystkich przypadków jest bardzo pracochłonna, a sposobów dostawy wiele. Dlatego też zaproponowana metoda wyznaczania czasów dostaw a zwłaszcza efektywności dostaw (nazwana tutaj metodą „wg definicji”) pozwala bardzo szybko wybrać wstępnie jeden lub dwa interesujące sposoby dostawy słomy (załadunek, transport i wyładunek).

W przykładach modelowania czasu i wydajności dostaw słomy rozpatrywano typowe zdeterminowane procesy. Wydajności dostaw dla bardziej złożonych sposobów organizacji transportu, jak np. produktów, które muszą być dostarczone dokładnie w wyznaczonym terminie często dodatkowo w bardzo dużych ilościach i z dużych odległości lub np. krótkotrwałych powinno się wyznaczać z uwzględnieniem czynnika losowości, jak np.:

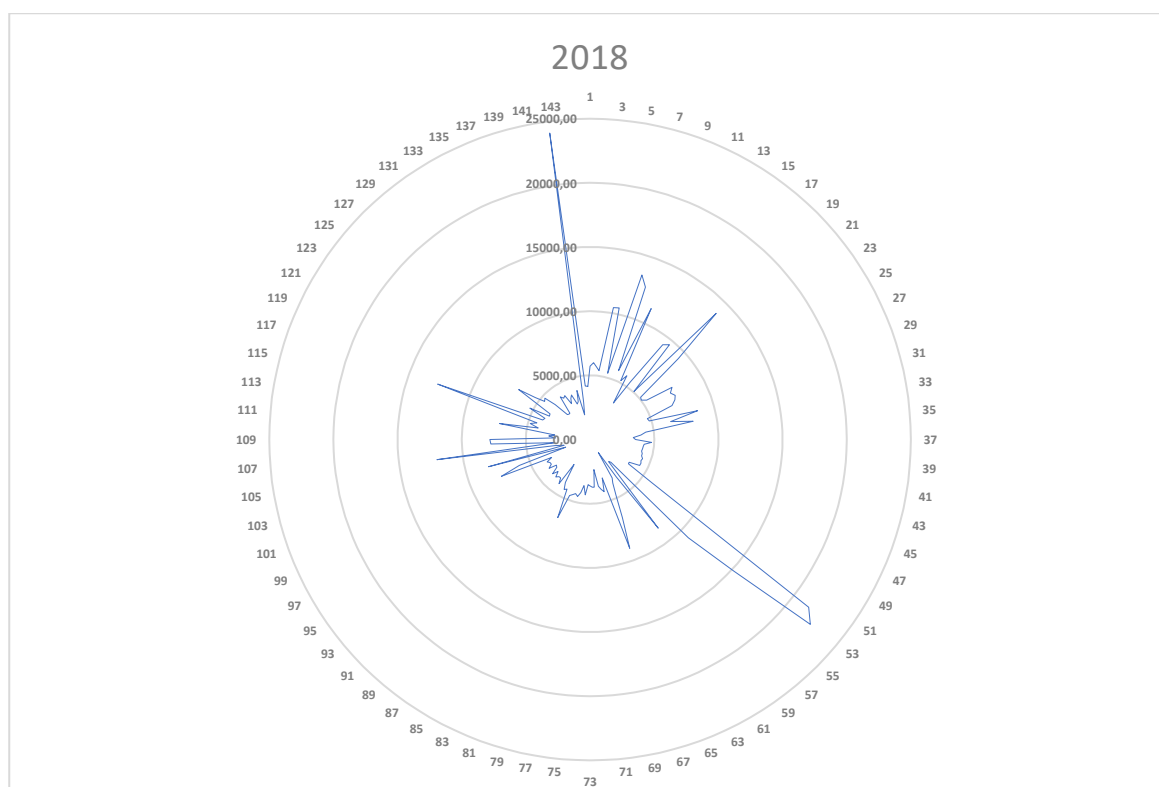
- a) przy założeniu, że załadunek, przejazd (dowóz) i wyładunek odbywają się sukcesywnie (kolejno po załadowaniu, jeden po drugim pojeździe) przy wystarczającej liczbie pojazdów $poj \geq \frac{M_s}{M}$ w sztukach, czyli tylko przy jednym nawrocie $n = 1$,
- b) przy założeniu załadunku, przejazdu i wyładunku sukcesywnego (kolejno, jeden po drugim pojeździe) mniejszej liczby pojazdów $(poj)_1$ niż wymagana liczba $poj \geq \frac{M_s}{M} > (poj)_1$, czyli przy $n \geq \frac{poj}{(poj)_1}$ nawrotach,
- c) przy założeniu, że załadunek, przejazd i wyładunek odbywają się w sposób losowy, czyli czas dowozu słomy w wymaganej ilości jest zmienną losową o założonym rozkładzie prawdopodobieństwa,
- d) przy założeniu, że załadunek, przejazd i wyładunek odbywają się przy nieprecyzyjnych, niepełnych lub niepewnych danych, co oznacza, że nie posiada się dostatecznej ilości wiedzy, aby móc określić przynajmniej prawdopodobieństwo dowozu wymaganej ilości słomy w określonym czasie (konieczność zastosowania logiki rozmytej).

Wyniki oceny wydajności transportu słomy przeprowadzonej na podstawie analizy wymiarowej i na podstawie danych rzeczywistych uzyskanych z firmy zostały przedstawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Wyniki analizy wymiarowej

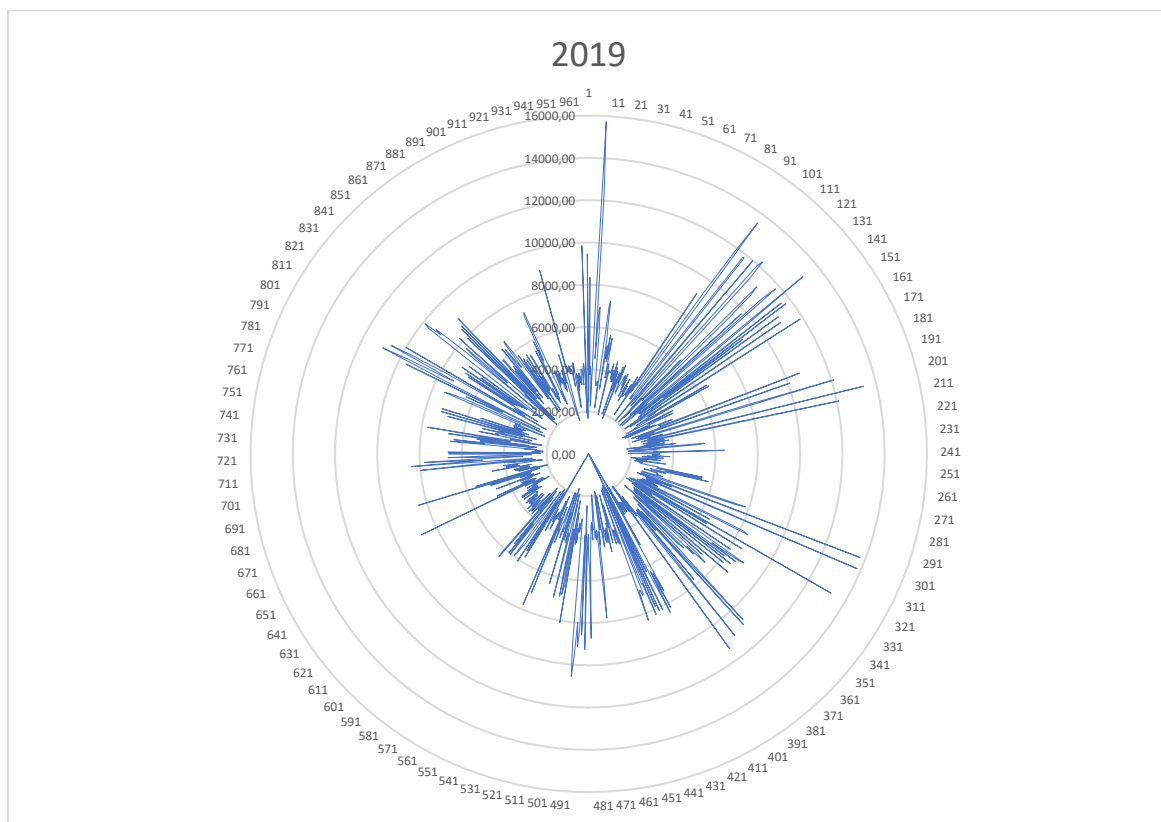
Przyjęte parametry analizy wymiarowej				
Parametr	M	d	v	Ocena sumaryczna
	Masa przewiezionej słomy	Przejechana droga	prędkość	
	t	km	km·h ⁻¹	
Rok 2018				
minimum	4200,0	20,0	33,0	1218,8
średnia	13870,3	101,3	33,0	5490,9
maksimum	25540,0	195,0	33,0	24090,0
odch. stand.	3448,3	38,8	0,0	3595,5
Rok 2019				
minimum	0,0	32,0	33,0	0,0
średnia	11837,8	107,5	33,0	4308,3
maksimum	19280,0	200,0	33,0	15736,9
odch. stand.	2218,4	38,1	0,0	2289,2
Rok 2020				
minimum	0,0	32,0	33,0	0,0
średnia	14718,7	108,6	33,0	5432,7
maksimum	21800,0	189,0	33,0	17778,8
odch. stand.	3247,7	41,9	0,0	2915,2
Rok 2021				
minimum	0,0	32,0	33,0	0,0
średnia	14236,0	121,2	33,0	4329,3
maksimum	23380,0	220,0	33,0	15314,3
odch. stand.	2811,8	35,6	0,0	1951,8

W roku 2018 średnia wartość ocenianych tras była na poziomie 5490,9 jednostek co było wartością większą od tej z 2021 (o 1161,6 jednostek). Na tej podstawie należy stwierdzić, że wydajności wykorzystania środków transportowych była większa w roku 2018 niż 2021. Wartość dla roku 2019 wynosiła 4308,3 co w porównaniu z rokiem 2021 było wartością zbliżoną a różnica to tylko 21. Rok 2020 otrzymał jedną z najwyższych ocen spośród badanych lat, a wynik wyniósł 5432,7 co jest wartością większą od obliczonej średniej dla roku 2021 (o 1103,4). Ostatni badany rok, w którym było najwięcej transportów spośród badanych lat, otrzymał wynik na poziomie 4329,3. Na rysunku 5.4 zostały przedstawione wyniki analizy wymiarowej dla roku 2018.



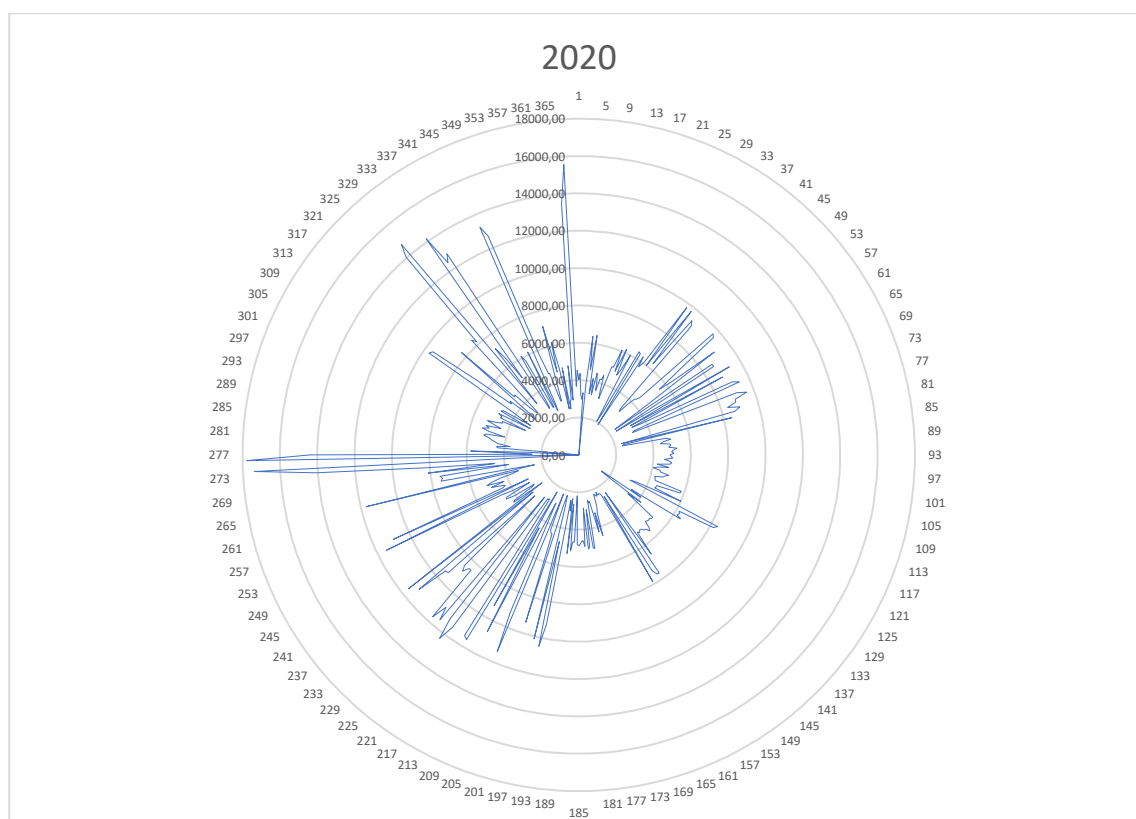
Rysunek 5.4. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2018

Na rysunku widać rozkład ocen sumarycznych przeprowadzonych dla wszystkich tras (143 przejazdy) w 2018, większość ocen przejazdów nie przekraczała wartości 15000 jednostek oraz żadna z nich nie wskazuje wartości 0 co jest dowodem na to, że wszystkie przejazdy związane z transportem surowca do produkcji peletów były przyjęte w badanej firmie. Trzy transporty słomy przekroczyły wartość 20000 jednostek z czego najwyżżej oceniony transport uzyskał ocenę 24090 jednostek. Na rysunku 5.5 zostały przedstawione wyniki analizy wymiarowej dla roku 2019.



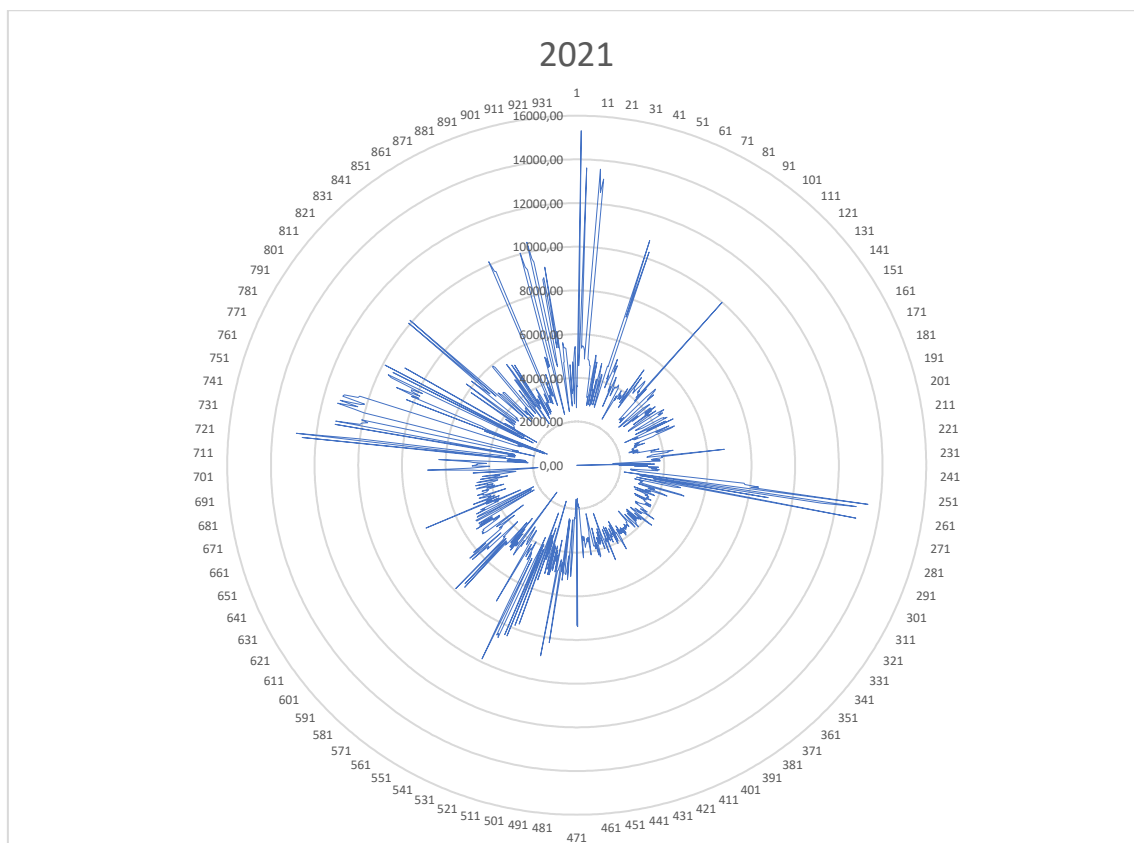
Rysunek 5.5. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2019

Na diagramie można zauważyć, że większość tras nie osiągała wartości 14000 i tylko jedna trasa tę wartość przekroczyła (15736 jednostek). W przeciwieństwie do roku 2018, rok 2019 miał transporty słomy ocenione na 0 jednostek, co świadczy o tym, że występowały przypadki (3 dostawy) kiedy ładunek nie został przyjęty. Powodem tego mogła być zbyt duża wilgotność, nadmierne zanieczyszczenie lub inne nieokreślone czynniki wpływające na jakość dostarczanego surowca w formie bel i kostek. Na rysunku 5.6 zostały przedstawione wyniki analizy wymiarowej dla roku 2020.



Rysunek 5.6. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2020

Jak można zauważyć na diagramie, większość tras mieściła się w granicy 12000 jednostek co było podobnym zjawiskiem jak w roku 2019. Ważną wiadomością jest, że więcej tras przekracza tą wartość w porównaniu do roku poprzedniego. Istotną rzeczą w omawianym roku była ilość transportów, które nie zostały przyjęte (4 dostawy) czego powodem było nie spełnianie norm jakościowych obowiązujących w badanej firmie. Faktem jest, że w roku 2020 było mniej transportów o 596 niż w roku 2019. Na rysunku 5.7 zostały przedstawione wyniki analizy wymiarowej dla roku 2021.



Rysunek 5.7. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2021

Na wykresie można zobaczyć, że najczęściej tras mieściło się w granicy 6000 jednostek co może świadczyć o mniejszej wydajności w porównaniu do lat poprzednich. W roku 2021 zostało wykonane 940 transportów słomy do przedsiębiorstwa co jest liczbą mniejszą tylko o 24 transporty w porównaniu z rokiem 2019 w którym ta liczba była najwyższa. Istotną rzeczą jest to, że widać więcej transportów, których ocena jest w granicach 12000 jednostek, co świadczy o wyższej wydajności tych transportów. Na podstawie wyników na wykresie oraz wyników analizy wymiarowej dla roku 2021, należy stwierdzić, że tylko jeden transport słomy nie został przyjęty do zakładu czego powodem, tak jak w innych latach, było nie spełnianie norm jakościowych w ocenianej firmie.

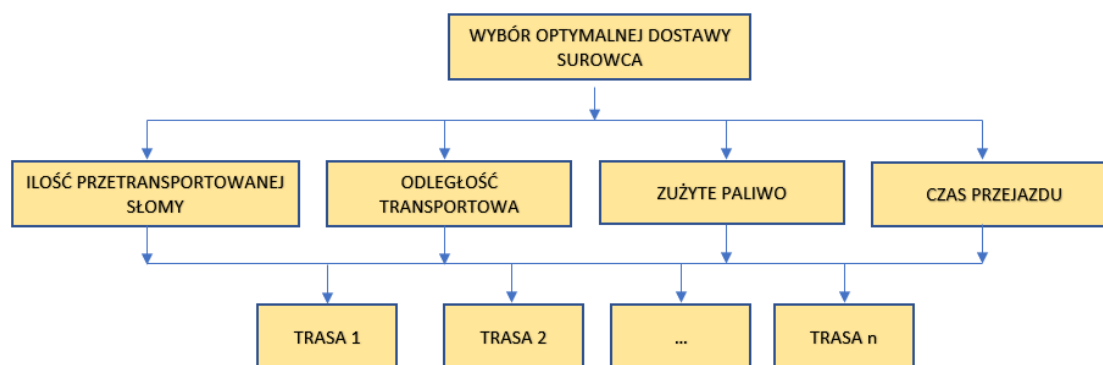
5.2. Ocena logistyki dostaw surowca z wykorzystaniem metody AHP

Podstawę metody AHP stanowi przede wszystkim sformułowane przez Saaty'ego założenie, że oceny dokonywane przez człowieka zależą od podejścia każdego z osobna, przekonań, stopnia doświadczenia i są ocenami relatywnymi. Konsekwencją powyższego założenia jest konieczność wieloaspektowego analizowania problemu decyzyjnego, który jest rozpatrywany.

Transport słomy w badanej firmie dokonywany był przy wykorzystaniu środków transportowych, których dopuszczalna masa całkowita wynosiła 40 ton. Skup słomy był prowadzony pięć dni w tygodniu, od poniedziałku do piątku. Najwięcej dostaw było jednak realizowanych w okresie późniejszym, a najmniej dostaw w okresie zimy. W prowadzonej analizie wyróżniono dla każdego roku inną liczbę dostaw, które były prowadzone nieregularnie i niezależnie od zapotrzebowania. Analizie poddano każdą trasę z osobna, przy uwzględnieniu takich parametrów jak:

- P1, ilość dostarczonej słomy (tony),
- P2, odległość przejechanej drogi (kilometry),
- P3, ilość zużytego paliwa (litry na 100 kilometrów),
- P4, czas od wyjazdu samochodu do przyjazdu na wagę w przedsiębiorstwie (godziny).

Analizę rozpoczęto od budowy modelu hierarchicznego, który pokazano się na rysunku 5.8 (wcześniej także na rys. 2.1):



Rysunek 5.8. Model hierarchiczny

Źródło: Opracowanie własne

Zbudowano macierze porównań parami osobno dla każdego roku, tzn. 2018, 2019, 2020, 2021. Do oceny porównań wykorzystano dziewięć-stopniową skalę Saaty'ego. W wyniku podobieństwa i charakterystyki transportu w badanym przedsiębiorstwie, ranking kryteriów oceny parametrów dokonany był przez autora niniejszej pracy i był ten sam dla każdego roku. W tabeli 5.2 zostały zaprezentowane oceny dla wydzielonych parametrów.

Tabela 5.2. Wyniki oceny dla poszczególnych parametrów

Parametry	Dostarczona słoma	Przejechana droga	Zużyte paliwo	Czas jazdy
Dostarczona słoma	1,00	3,00	5,00	7,00
Przejechana droga	0,33	1,00	0,50	2,00
Zużyte paliwo	0,17	2,00	1,00	3,00
Czas jazdy	0,14	0,33	0,25	1,00
SUMA	1,68	6,50	6,83	13,00

Zamieszczono wartości znormalizowane dla liczb zawartych w tabeli 5.2 i dokonano obliczeń współczynników wagowych metodą średniej arytmetycznej.

$$z_{11} = \frac{1}{1,68} = 0,5966$$

$$z_{21} = \frac{0,33}{1,68} = 0,1989$$

$$z_{31} = \frac{0,17}{1,68} = 0,1193$$

$$z_{41} = \frac{0,14}{1,68} = 0,0852$$

Całość wyników została umieszczona w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Współczynniki wagowe dla poszczególnych parametrów

Parametr	Dostarczona słoma	Przejechana droga	Zużyte paliwo	Czas jazdy
Dostarczona słoma	0,5966	0,4615	0,7317	0,5385
Przejechana droga	0,1989	0,1538	0,0732	0,1538
Zużyte paliwo	0,1193	0,3077	0,1463	0,2308
Czas jazdy	0,0852	0,0769	0,0488	0,0769

Obliczanie średniej arytmetycznej każdego wiersza znormalizowanych danych jest ostatnim etapem procedury metodyki AHP. Tak obliczone wartości traktowane są jako współczynniki wagowe (priorytety) poszczególnych elementów. Wartości te otrzymano dzieląc sumy wyrazów w poszczególnych wierszach przez liczbę porównywanych elementów (n=4).

Dla dostarczonej słomy:

$$w_1 = \frac{0,5966 + 0,4615 + 0,7317 + 0,5385}{4} = 0,5820$$

Dla przejechanej drogi:

$$w_2 = \frac{0,1989 + 0,1538 + 0,0732 + 0,1538}{4} = 0,1449$$

Dla zużytego paliwa:

$$w_3 = \frac{0,1193 + 0,3077 + 0,1463 + 0,2308}{4} = 0,2010$$

Dla czasu jazdy:

$$w_4 = \frac{0,0852 + 0,0769 + 0,0488 + 0,0769}{4} = 0,0719$$

Z danych zamieszczonych w tabeli 5.4, można wnioskować, iż największe znaczenie w obliczanej metodzie ma masa dostarczonej słomy, a najmniejsze znaczenie ma czas jazdy samochodu ze słomą.

Zastosowanie metod numerycznych opisanych powyżej prowadzi do uzyskania konkretnych wartości współczynników wagowych. Każdy wynik musi być poddany weryfikacji w celu sprawdzenia jakości rezultatów (weryfikacja merytoryczna i formalna). Dzięki temu uzyskane wyniki można podzielić na grupy, na podstawie których podejmowanie decyzji może być bardzo niepewne lub rekomendowane. Weryfikacja merytoryczna polega na sprawdzeniu, czy uzyskane rezultaty są spójne i logiczne. Gdy rezultat w jakimś stopniu nie zgadza się z przewidywaniami, można przypuszczać, że został popełniony jakiś błąd i należy metodę jeszcze raz przeprowadzić lub dokonać weryfikacji modelu na szerszą skalę. W razie niezgodności wyników z rzeczywistością należy przerwać badania i zdiagnozować przyczyny tych rezultatów. Gdy otrzymane wyniki przejdą weryfikację merytoryczną, przeprowadzana jest weryfikacja formalna. Polega na sprawdzeniu, czy poddana analizie macierz nie jest wewnętrznie sprzeczna. W literaturze przedmiotu często można znaleźć określenie niespójności macierzy, niezgodności lub braku logiczności (Saaty, 1980). Dokonywanie ostatecznych wyborów na podstawie metody AHP jest wiążące jedynie, gdy wszystkie porównywania parami zostały wykonane zgodnie z logiką. Dlatego konieczne jest badanie zgodności wyników. Do tego celu wykorzystuje się współczynnik zgodności CR (ang. consistency ratio).

Tabela 5.4. Ocena poszczególnych wariantów oraz otrzymane wagi

Parametr	Dostarczona słoma	Przejechana droga	Zużyte paliwo	Czas jazdy	Wagi (%)
Dostarczona słoma	1,00	3,00	5,00	7,00	58,20
Przejechana droga	0,33	1,00	0,50	2,00	14,49
Zużyte paliwo	0,17	2,00	1,00	3,00	20,10
Czas jazdy	0,14	0,33	0,25	1,00	7,19
suma	1,68	6,50	6,83	13,00	1,00

Najpierw jednak został policzony indeks zgodności CI i λ_{max} (ang. consistency index), który jest niezbędny do policzenia współczynnika CR .

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Gdzie:

λ_{max} – suma iloczynów sumy kolumny macierzy porównań parami,

$$\lambda_{max} = 1,68 * 0,582 + 6,5 * 0,1448 + 6,83 * 0,201 + 13 * 0,071 = 4,2269$$

Obliczona wartość λ_{max} jest w niewielkim stopniu większa od wartości n ($n=4$) co oznacza, że wytyczne nałożone przez autora metody (Saaty, 1980) akceptują wartość i może być ona wykorzystana do dalszych obliczeń.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CI = \frac{4,2269 - 4}{4 - 1} = 0,0756$$

Obliczony indeks zgodności (CI) posłuży do kolejnego etapu obliczeń. Aby poprawnie obliczyć ostatni współczynnik należy posłużyć się stabilizowanymi wartościami współczynnika RI (ang. random index) przedstawionymi w tabeli 5.5 (Saaty, 1980; Saaty i inni, 1992).

Tabela 5.5. Współczynniki RI

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54

Źródło: (Saaty, 1980)

Dla badanego przykładu, z tablicy została odczytana wartość dla $n=4$, czyli 0,89.

Podstawiając do poniższego wzoru otrzymuje się ostateczny wynik.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = \frac{0,0756}{0,89} = 0,0849$$

Otrzymana wartość współczynnika CR jest porównywana z wartością graniczną (Saaty, 1980, Saaty i inni, 1992). Jeżeli otrzymana liczba jest mniejsza od wskazanej przez Saaty'ego wartości krytycznej wynoszącej 0,10, to można posłużyć się stwierdzeniem, że porównania w macierzy zostały dokonane we właściwy sposób. Wartość 0,0849 jest mniejsza od wartości 0,10, więc zależność jest spełniona dla badania, a wyniki analizy AHP mogą być wykorzystane dalej. Konsekwencją poprawnej wartości CR jest fakt, że decyzje podjęte na podstawie modelu mają właściwe umocowanie. W przypadku gdy współczynnik przekroczyłby wartość krytyczną, wtedy macierz uznaje się za niezgodną, co w konsekwencji uniemożliwia kontynuowanie wykonywania metodyki AHP.

Wyniki oceny sumarycznej metodą AHP dla ocenianych lat zamieszczono w tabeli 5.6.

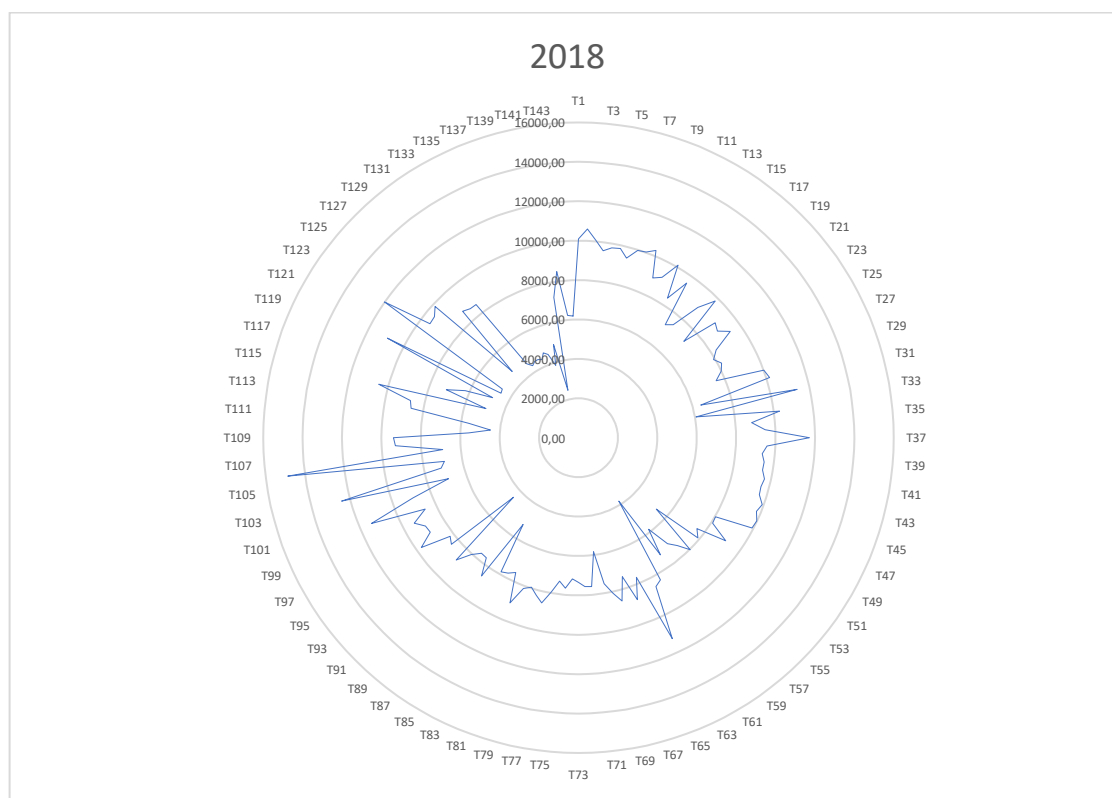
Tabela 5.6. Wyniki sumarycznej oceny metodą AHP

Wskaźniki metody AHP					
Parametr	P1	P2	P3	P4	Ocena sumaryczna
	Masa przewiezionej słomy	Przejechana droga	Zużyte paliwo	Czas pracy	
	(t)	(km)	(l·100 km ⁻¹)	(h)	
Rok 2018					
Min.	4200,00	20,00	6,60	0,44	2455,13
Śred.	13870,28	101,32	33,44	2,25	8078,76
Max.	25540,00	195,00	64,35	4,33	14849,62
Odch. St.	3448,28	38,82	12,81	0,86	2004,61
Rok 2019					
Min.	0,00	32,00	10,56	0,71	19,33
Śred.	11837,78	107,48	35,47	2,39	6899,66
Max.	19280,00	200,00	66,00	4,44	11208,58
Odch. St.	2218,42	38,09	12,57	0,85	1289,21
Rok 2020					
Min.	0,00	32,00	10,56	0,71	7,19
Śred.	14718,70	108,60	35,84	2,41	8573,17
Max.	21800,00	189,00	62,37	4,20	12690,65
Odch. St.	3247,71	41,91	13,83	0,93	1888,47
Rok 2021					
Min.	0,00	32,00	10,56	0,71	42,70
Śred.	14236,04	121,19	39,99	2,69	8295,67
Max.	23380,00	220,00	72,60	4,89	13635,8
Odch. st.	2811,77	35,58	11,74	0,79	1635,05

Za pomocą analizy zostały określone wagi dla kryteriów, na podstawie których można określić, która trasa jest optymalna i posiada najwyższą ocenę sumaryczną. Posłużyło to do

przyporządkowania liniowego tras. Dane otrzymane z firmy zostały podzielone na dostawy w latach 2018-2021. Optymalizacja została wykonana dla każdego roku osobno z uwagi na różną liczbę transportów oraz wykorzystywane różne środki transportowe.

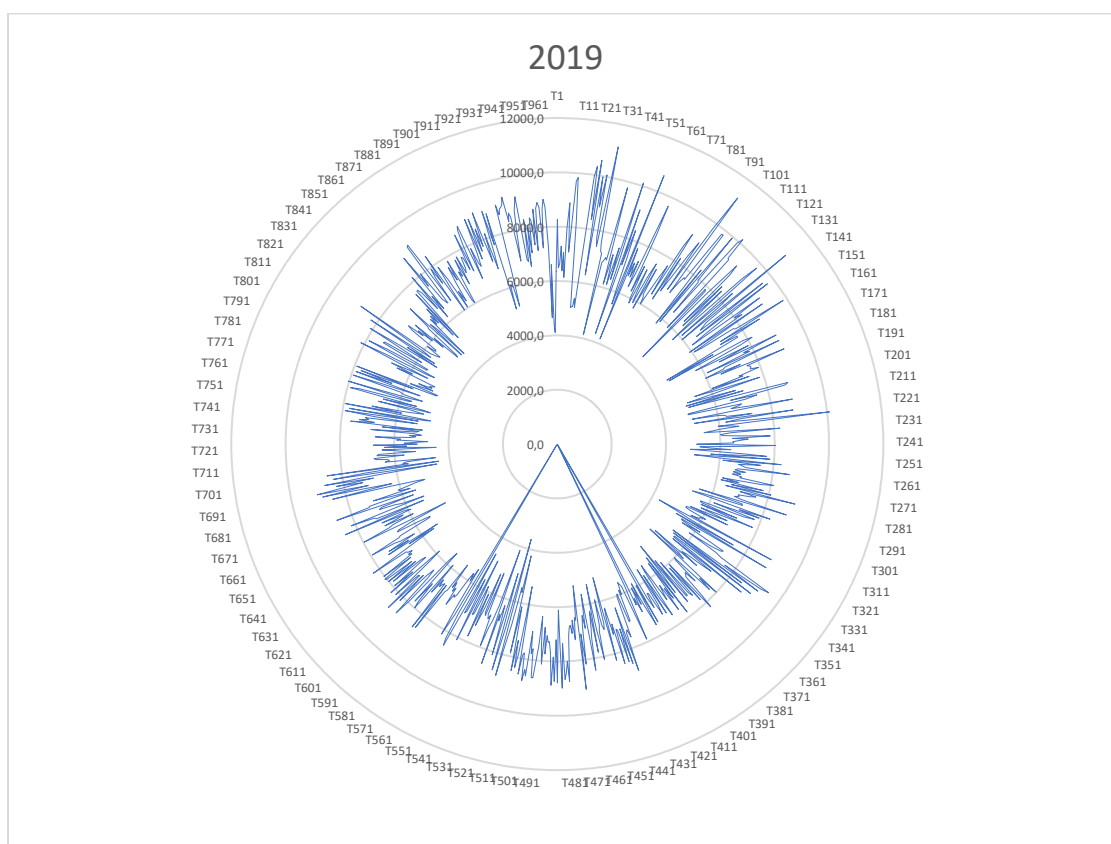
Wszystkie trasy zrealizowane w roku 2018 zostały przedstawione na rysunku 5.9. Analizując dane, w roku 2018 średnia ilość przewiezionej słomy w czasie jednego transportu wynosiła prawie 14 ton na odległość ponad 100 kilometrów przy zużyciu paliwa wynoszącym 33 litry (średnia przyjęta na podstawie danych serwisu webfleet) w czasie przejazdów przekraczającym 2 godziny. Taka trasa została oceniona na wartość 8095 jednostek. Faktem jest, że w omawianym roku, najlepszy transport słomy został oceniony na wartość 14881 jednostek, gdzie ładunek wynoszący 25 ton został przetransportowany na odległość 70 kilometrów, spalając przy tym 23 litry paliwa na 100 km, a czas jazdy wyniósł około 1,5 godziny. W tym samym roku najniżej oceniona została trasa z wynikiem 2559 jednostek, gdzie przewieziono ładunek o masie 4,2 ton na odległość 70 kilometrów w czasie 1,5 godziny przy zużyciu 23 litrów paliwa.



Rysunek 5.9. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2018 roku

Rozkład ocen sumarycznych dla roku 2019 przedstawia rysunek 5.10. W roku 2019 średnia ilość przewiezionej słomy w pojedynczym transporcie była mniejsza w porównaniu z rokiem ubiegłym i wynosiła prawie 12 ton. Wyższa była średnia odległość transportu, która była na

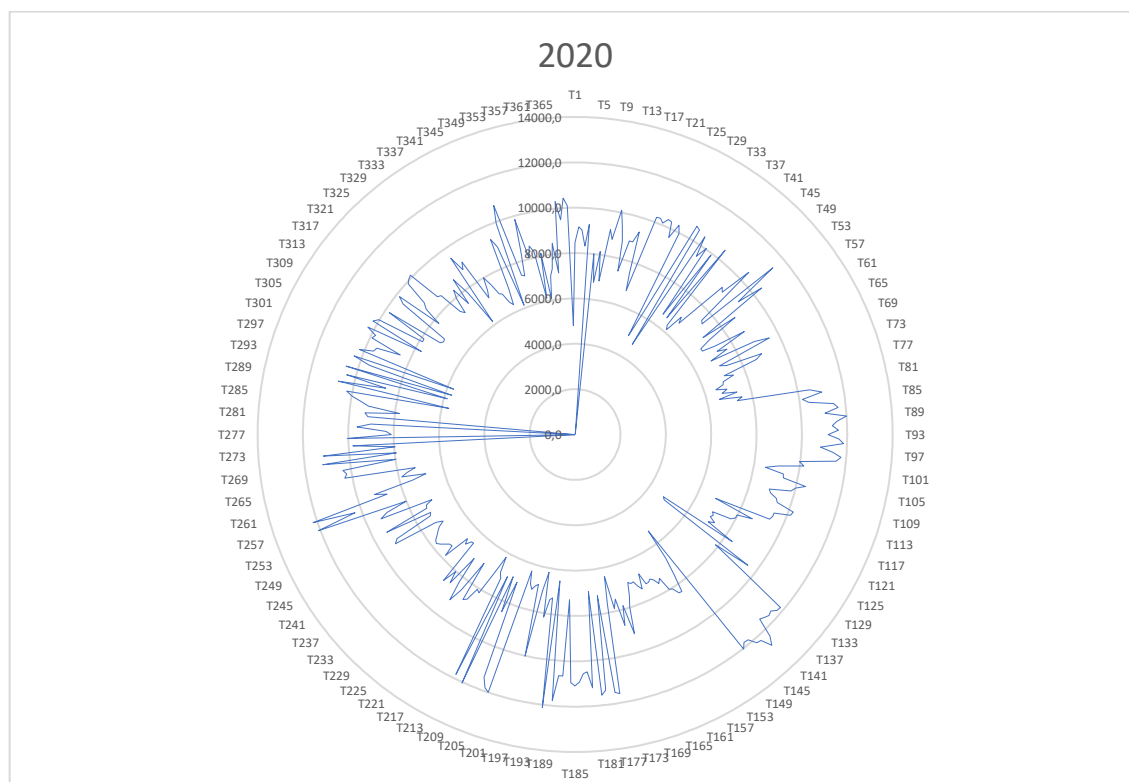
poziomie 107 kilometrów. Średnie zużycie paliwa było równe 35 litrów na 100 km, a średnia ocena sumaryczna była znacząco niższa i wynosiła 6913 jednostek. Warto zauważyć, że w 2019 roku było prawie 1000 transportów, a w roku wcześniejszym około 150, co pokazuje znaczny wzrost liczby dostaw od w przeciągu jednego roku. Najwyższą ocenę sumaryczną w roku 2019 uzyskała trasa, której wynik to 11232 jednostek, gdzie przemieszczono słomę o masie nieprzekraczającej 20 ton na odcinku 47 kilometrów w czasie godziny, spalając przy tym ponad 15 litrów paliwa. Najgorzej ocenioną trasą był wynik na poziomie prawie 18 jednostek, który jest efektem nie przyjęcia towaru ze względu na brak spełniania norm jakościowych w badanym przedsiębiorstwie.



Rysunek 5.10. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2019 roku

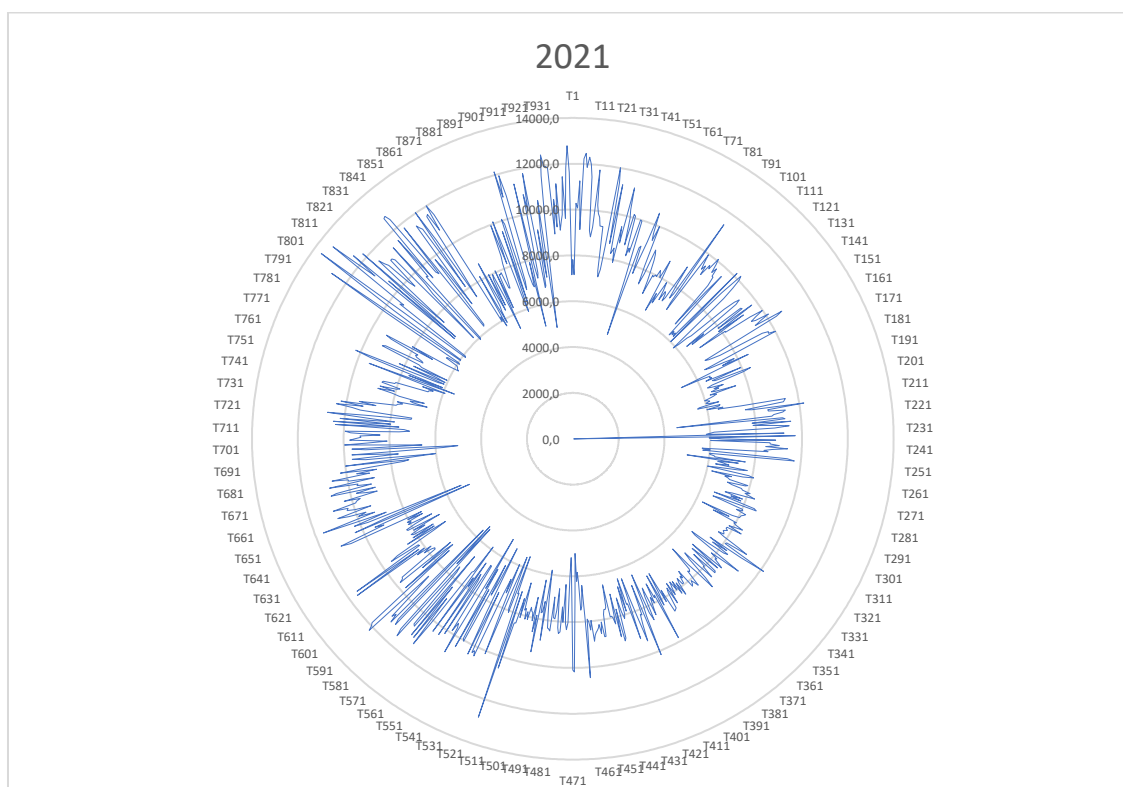
Wszystkie oceny sumaryczne tras realizowanych w roku 2020 zostały przedstawione na rysunku 5.11. Rok 2020 przyniósł spadek transportów w porównaniu do roku 2019 i wyniósł dokładnie 368 dostaw surowca. W stosunku do transportu z roku 2019 wzrosła ocena sumaryczna, co można łączyć z podniesieniem jakości przewozów. Średnia ocena sumaryczna dla roku 2020 wynosiła 8590 jednostek. Średnia masa przewożonego ładunku słomy w jednej dostawie dla opisywanego roku wynosiła prawie 15 ton, natomiast średnia odległość transportowa wzrosła do 108 kilometrów. Zużycie paliwa wynosiło 35 litrów na 100 km, a czas

dostawy prawie 2,5 godziny. Najlepiej oceniona trasa w roku 2020 uzyskała wartość sumaryczną na poziomie 12716 jednostek, gdzie przemieszczono ładunek o masie prawie 22 ton na odległość 129 kilometrów w czasie prawie 3 godzin, zużywając przy tym ponad 42 litry paliwa. Najniższy wynik – 6,8 jednostek oceny sumarycznej – uzyskał transport, w którym ładunek nie został przyjęty z powodu niespełnienia wymogów jakościowych.



Rysunek 5.11. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2020 roku

Oceny sumaryczne wszystkich tras realizowanych w roku 2021 zostały pokazane na rysunku 5.12. Średnia ocena sumaryczna dla tego roku wyniosła 8312 jednostek, co w porównaniu z rokiem 2020 jest wartością mniejszą o 200 jednostek. Efektem spadku tej oceny może być wzrost ilości dostaw, ponieważ w roku 2021 było ich 940. Średnia masa słomy w pojedynczym transporcie dostarczanej do przedsiębiorstwa dla roku 2021 wyniosła ponad 14 ton. Wysoka była średnia odległość transportu biomasy równa 121 kilometrów, natomiast średnie zużycie paliwa wyniosło prawie 40 litrów na 100 km, a czas dostawy ponad 2,5 godziny. Najlepiej ocenionym transportem w roku 2021 była trasa, której wartość sumaryczna wynosiła 13635 jednostek, gdzie przewieziono ładunek o masie prawie 24 ton na odległość 123 kilometrów, spalając w czasie jazdy 40 litrów paliwa, a czas dostawy nie przekroczył 3 godzin. Najniżej ocenioną trasą była dostawa określona na 40 jednostek, wynikająca z nieprzyjęcia słomy do magazynu, ponieważ surowiec nie spełniał wymogów jakościowych.



Rysunek 5.12. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2021 roku

Biorąc pod uwagę oceny sumaryczne można stwierdzić, że najwyższa średnia ocena była w roku 2020 i była wyższa niż w roku 2021 o 278 punktów. Drugą najwyższą ocenę uzyskał rok 2021. Na trzecim miejscu znajduje się rok 2018 którego ocena była mniejsza o 217 punktów niż w 2021. Najmniejszą wartość uzyskał rok 2019 gdzie wartość 6899 punktów znacząco odbiega od roku 2021.

6. Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania dotyczące oceny systemu logistyki dostaw surowca z użyciem metody AHP oraz analizy wymiarowej, a także oceny efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów z wykorzystaniem wskaźnika OEE dostarczyły nowych wyników i są porównywalne z wynikami, które można spotkać w literaturze przedmiotu. Należy także podkreślić, że stosowany system logistyki dostaw surowca związany jest ściśle z uwarunkowania zewnętrznymi, które wpływają na organizację dostaw surowca.

W literaturze przedmiotu wskazuje się na dużą zmienność w dostępności surowców do produkcji biopaliw, w tym słomy, zależnie od sezonowości i lokalnych uwarunkowań gospodarczych (Zwolińska i Kubica, 2017; Kania i inni, 2019). Wyniki uzyskane w badanej firmie wykazały podobną tendencję – zasoby słomy rosły w miesiącach letnich, osiągając szczyt w sierpniu i wrześniu, a najniższe wartości odnotowano w okresach zimowych. W literaturze podkreśla się znaczenie sezonowości w planowaniu zasobów, co w niniejszej pracy zostało potwierdzone wynikami z lat 2018-2021. Najwyższa dostępność surowca wystąpiła w 2019 roku, co umożliwiło osiągnięcie stabilnej produkcji peletów w okresach o najwyższym zapotrzebowaniu. Przeprowadzone analizy potwierdziły, że ograniczenia w dostępności słomy, szczególnie w 2020 roku z uwagi na pandemię COVID-19, wpływają na produkcję. W literaturze (Maja, 2015), takie czynniki jak niespodziewane przerwy w dostawach (np. z powodu awarii lub kryzysów gospodarczych) są wymieniane jako główne ryzyka, co także potwierdzają wyniki dla roku 2020 uzyskane w pracy.

W swoich pracach, Maja (2015) oraz Hansen i in. (2009) zwracają uwagę na wzrost zapotrzebowania na biopaliwa w okresach zimowych, co jest powiązane z sezonem grzewczym i wzmożonym popytem na źródła energii odnawialnej. Wyniki uzyskane w badanej firmie potwierdzają tę zależność – największa produkcja przypadała na miesiące jesienno-zimowe (od października do lutego) i wiosenne (marzec-kwiecień). Co należy podkreślić, w analizowanym okresie 2018-2021, roczna produkcja peletów wykazywała tendencję wzrostową, z wyjątkiem roku 2020, kiedy pandemia ograniczyła zdolność produkcyjną o ok. 52% (z 9157 t w 2019 roku do 4369 t w 2020 roku). W literaturze przedmiotu podkreśla się, że takie fluktuacje mogą być kompensowane poprzez tworzenie strategicznych rezerw surowcowych jako istotny element strategii produkcyjnej (Kołodziej i Matyka, 2012), a potwierdzają to uzyskane w pracy wyniki badań i wykonane analizy.

Badania wykazały również, że firma produkująca pelety dynamicznie zwiększyła w badanym okresie (2018-2021) liczbę wynajmowanych środków transportowych i zwracała uwagę na ich parametry techniczne i dostosowanie ich do wymagań transportu surowca, co

przyczyniło się do poprawy wydajności logistycznej dostaw. Zwiększenie liczby wynajmowanych pojazdów w 2021 roku do 33 umożliwiło transport większej masy surowca, co było kluczowe dla zwiększenia efektywności produkcji peletów. Uzyskane wyniki wskazują również na istotne różnice w strukturze dostaw między formami surowca (bele i kostki). Forma surowca w postaci bel była dominująca i optymalna z logistycznego punktu widzenia. Jednocześnie, zaobserwowano różnice w dopuszczalnej masie i mocy silnika środków transportowych między rokiem 2018 a 2021. Stwierdzono, że konieczne jest dalsze dostosowanie pojazdów do zmieniających się warunków transportu, zwłaszcza w odniesieniu do różnorodnych form surowca i warunków terenowych.

Dokonany w pracy przegląd literatury wskazuje na wartość wskaźnika OEE jako podstawowego parametru oceny wydajności linii technologicznej, szczególnie w produkcji paliw kompaktowych (Adamczyk, 2010; Kwaśniewski, 2019). Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że wskaźnik OEE na poziomie 85% jest wskaźnikiem efektywności charakterystycznym dla dobrze zorganizowanych linii produkcyjnych, a wartości niższe wskazują na konieczność optymalizacji procesu (Grochowicz, 1996; Hansen i in., 2009). Uzyskane wyniki dowodzą, że wskaźnik OEE osiągnął średnią wartość ok. 70% dla lat 2018, 2019 i 2021. W roku 2020 OEE spadł do zaledwie 36,6% z powodu ograniczeń pandemicznych. Natomiast w układzie miesięcznym oceniane wskaźniki były zbliżone do zalecanych w literaturze standardów i mieściły się w granicach od 80 do nawet 86%.

Na podstawie literatury przedmiotu można stwierdzić także o dużym znaczeniu analizy wymiarowej w określaniu kluczowych parametrów transportowych, szczególnie w kontekście sezonowości i kosztów związanych z magazynowaniem i dostawą biomasy (Kowalewski, 2009). W badanej firmie analiza wymiarowa umożliwiła wyznaczenie optymalnych wartości dla parametrów logistycznych, takich jak czas dostawy, odległość transportu oraz planowanie magazynowania słomy w oparciu o prognozy popytu. Natomiast zastosowanie metody AHP pozwoliło na zidentyfikowanie priorytetów logistycznych oraz wskazało na konieczność dostosowania częstotliwości dostaw w okresach letnich i ich intensyfikacji w okresie zimowym. W literaturze metoda AHP jest wskazywana jako skuteczne narzędzie do podejmowania decyzji w procesach logistycznych (Jeżowski, 2001), co potwierdziły wyniki uzyskane w pracy. A optymalizacja tras transportowych i zarządzanie zapasami magazynowymi pozwoli na zwiększenie efektywności logistycznej i zmniejszenie ryzyka przestojów linii produkcyjnej w okresach najwyższego zapotrzebowania na produkt.

Przeprowadzone badania wykazały, że optymalne odległości z których wydajne może być dowożenie surowca, określone metodą AHP mieszczą się w granicach 70-129 kilometrów, natomiast według analizy wymiarowej w granicach 101-121 kilometrów. W tych zakresach

liczbowych trasy miały najwyższe oceny. Są to większe wartości liczbowe w porównaniu z tymi wskazywanymi przez literaturę, gdzie sugerowana odległość to ok. 50 kilometrów (Nowacka-Blachowska i in., 2016). Różnica może wynikać z ograniczonej dostępności surowca oraz wydajniejszego transportu w badanej firmie, dlatego w takich przypadkach też możliwy jest transport z większych odległości niż ta wskazana w literaturze (Bartosiewicz-Burczy, 2012).

Reasumując należy stwierdzić, że skuteczne zarządzanie procesami logistycznymi i produkcyjnymi w branży biopaliw kompaktowych wymaga zarówno wysokiej elastyczności operacyjnej, jak i zastosowania nowoczesnych metod optymalizacji (Kulig i Laskowski, 2006). Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły, że zastosowanie metod AHP i analizy wymiarowej umożliwiło osiągnięcie wyników zbliżonych do tych, które można spotkać w literaturze – wniosek: lepsze dostosowanie organizacji procesów logistycznych do sezonowego zapotrzebowania na surowiec oraz optymalizacja wskaźnika OEE poprzez lepsze zarządzanie czasem pracy linii technologicznej. Wskaźniki dostępności surowca do produkcji osiągnęły wartości wyższe niż przed zastosowaniem tych metod, co w literaturze jest wskazywane jako główny efekt skutecznego zastosowania optymalizacji (Niedziółka, 2010).

Przeprowadzone badania, wykonane analizy i porównania wyników z literaturą wskazują na potrzebę dalszej optymalizacji procesów logistycznych i technologicznych w celu osiągnięcia pełnej stabilności operacyjnej w procesie produkcji peletów. Wyniki literaturowe, które podkreślają znaczenie tworzenia rezerw strategicznych, minimalizacji strat w procesach produkcyjnych oraz zastosowania metod zarządzania zasobami, znajdują potwierdzenie w uzyskanych wynikach w pracy, szczególnie w kontekście sezonowych różnic w dostępności słomy i wskaźnika OEE. Można zatem rekomendować dalsze stosowanie oraz rozwijanie metod monitorowania wskaźnika OEE a także metod analitycznych, takich jak AHP i analiza wymiarowa, które pozwalają lepiej kontrolować system logistyki dostaw surowca i efektywność wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów ze słomy.

7. Stwierdzenia i wnioski

W pracy dokonano oceny uwarunkowań zewnętrznych dostaw surowca oraz oceny efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów w wybranej firmie znajdującej się w województwie lubelskim.

Wyniki wykonanych badań oraz przeprowadzone analizy potwierdzają sformułowaną w rozprawie hipotezę zakładającą, że system logistyki dostaw surowca istotnie wpływa na efektywność wykorzystania linii do produkcji peletów. Dowodem na to są m.in. uzyskane wyniki badań:

- Masa dostarczonej słomy wzrosła w badanym okresie, z 1997 t w 2018 roku do 13174 t w 2021 roku. Wzrost ten świadczy o zwiększonym zapotrzebowaniu na paliwa kompaktowe i rosnącej skali produkcji, co wskazuje na rozwój firmy i zwiększony popyt na pelety.
- Stwierdzono dużą fluktuację zapotrzebowania na surowiec co wymaga od firmy ciągłej kontroli zasobów i analizy poziomu zapasów. Największe roczne zasoby surowca (27565 t), wynikające z dostaw oraz zgromadzonych zapasów magazynowych, odnotowano w roku 2019, a najmniejsze (15968 t) w roku 2018.
- Odnotowane zapasy surowca w latach 2018-2021 pozwoliły na zachowanie ciągłości produkcji i pokrycie zapotrzebowania rynkowego na paliwo kompaktowe w ciągu roku. Największa produkcja w każdym roku przypadała na miesiące styczeń-kwiecień oraz wrzesień-grudzień, co związane było z trwającym w tym czasie sezonem grzewczym i zwiększonym zapotrzebowaniem na pelety jako paliwo.
- Stwierdzono, że roczna produkcja peletów w badanym okresie wynosiła średnio 8155 t. W 2019 roku produkcja wzrosła do 9157 t (o 10,3% więcej niż w 2018), a w 2020 roku, na skutek pandemii COVID-19 i ogłoszenia lockdown'u w Polsce, produkcja znacząco spadła do 4369 t. Natomiast, po złagodzeniu obostrzeń pandemicznych, w 2021 roku osiągnęła najwyższy poziom 10876 t.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

- Analiza dostępności surowca w latach 2018-2021 pokazała sezonowe wahania, które powinny być uwzględniane w planowanej produkcji peletów, a także brane pod uwagę w gromadzonych zapasach surowca.
- Efektywność linii technologicznej była istotnie zależna od dostępności zasobów surowca i systemu logistyki dostaw surowca czego dowodem są określone wskaźniki OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Wskaźnik OEE wynosił średnio: 70% w 2018 roku, 69% w 2019,

36,6% w 2020 oraz 73,1% w 2021 roku. Niski wskaźnik w 2020 roku wynikał z przestojów linii w związku z pandemią koronawirusa i ogłoszeniem lockdown'u w Polsce.

- Na efektywność wykorzystania linii technologicznej, oprócz systemu logistyki dostaw surowca, wpływały również planowane przestoje linii technologicznej. Uwidaczniało się to w określonym wskaźniku czasu przestojów technologicznych. Przestoje te były planowane i nie wynikały z awarii linii czy też braku surowca do produkcji.
- Analiza wymiarowa wykazała, że podstawowe parametry logistyczne jak czas dostawy, odległość dostawy oraz sezonowe różnice w dostępności surowca w istotny sposób wpływają na efektywność i elastyczność organizacji dostaw surowca.
- Zastosowana metoda AHP wykazała, że priorytetem dla optymalizacji logistyki dostaw jest skrócenie czasu transportu i odległości transportowej. Ponadto wyniki analizy logistyki dostaw metodą AHP wskazały na konieczność opracowania bardziej złożonego systemu monitoringu stanu dostaw i zapasów magazynowych oraz systemu przewidywania zapotrzebowania na surowiec, aby zmniejszyć ryzyko braku surowca w okresach o zwiększonym popycie na pelety. Pomocne może być utworzenie większych rezerw strategicznych słomy i podpisanie umów na dostawy alternatywne surowca.
- Określony poziom wskaźnika OEE dowodzi, że istnieją rezerwy w wykorzystaniu linii technologicznej a przyjęty system logistyki dostaw surowca zapewnia stabilność procesu produkcji peletów. Natomiast w celu zwiększenia efektywności wykorzystania linii produkcyjnej konieczne są dobrze rozplanowane przeglądy techniczne, które ograniczą czas przestojów i wpłyną na wykorzystanie potencjału produkcyjnego.
- Potrzebna jest dalsza optymalizacja procesów logistycznych oraz automatyzacja działań związanych z monitoringiem zasobów surowcowych. Wprowadzenie algorytmów przewidywania zużycia i zarządzania zapasami mogłoby przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji i zwiększenia efektywności. Ponadto, zastosowanie elastycznych modeli transportu (np. przy współpracy z lokalnymi dostawcami) i umów długoterminowych zapewniłoby stabilne dostawy surowca.
- Określona w pracy efektywność wykorzystania linii produkcyjnej dowodzi, że stosowany system logistyki dostaw jest prawidłowy i zapewnia odpowiedni poziom zapasów magazynowych oraz gwarantuje osiągnięcie zakładanego miesięcznego i rocznego poziomu produkcji peletów.

8. Literatura

1. Adamczyk F. 2010. Wpływ wilgotności słomy zbożowej na stopień zagęszczania uzyskiwanych brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 1(119), 7 – 13.
2. Alexander Y., Putra F. E. 2024. Implementation of Total Productive Maintenance on Frame Welding Machine Maintenance Using the Overall Equipment Effectiveness (OEE) Method at PT Electronics Components Indonesia. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*
3. Anholcer M. 2009. *Badania operacyjne*, Poznań.
4. Awrejcewicz J. 2007. *Matematyczne modelowanie systemów*. Warszawa: WNT.
5. Barcik R., Jakubiec M. 2011. Systemy logistyczne – podstawy funkcjonowania. *Logistyka*, 4, 74 – 79.
6. Bartoszewicz-Burczy H. 2012. Potencjał i energetyczne wykorzystanie biomasy w krajach Europy Środkowej. *Energetyka*, 12(702), 860 – 866.
7. Baum R., Wajszczuk K., Wawrzynowicz J. 2012. Modelowe rozwiązanie logistyczne dla lokalnego rynku biomasy. *Logistyka*, 4, 846 – 854.
8. Bendkowski J., Pietrucha-Pacut M. 2003. *Podstawy logistyki w dystrybucji*, Gliwice.
9. Bendkowski J. 2015. Stochastyczne problemy magazynowania. Wybrane zagadnienia. *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej – Seria: Organizacja i Zarządzanie*, 78.
10. Bioenergy Europe Statistical Report, 2021. Policy Brief: Pellets. Bioenergy Europe.
11. Blaik P. 2010. Koncepcja zintegrowanego zarządzania. *Logistyka*, 3, 93 – 119.
12. Borowski S., Żarski W., Dulcet E., Kaszkowiak J., Zastempowski M. 2015. Logistyka dostaw surowca w produkcji biopaliw. *Logistyka*, 4, 1821 – 1828.
13. Brochu D.L. 2007. OEE w praktyce zakładowej, *Inżynieria & Utrzymanie ruchu*.
14. Brzeski J., Figas M. 2006. Wprowadzenie do TPM. *Inżynieria & Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych*, Czerwiec.
15. Budzyński W., Bielski S., 2004. Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego cz. II. Biomasa jako paliwo stałe. (Artykuł przeglądowy). *Acta Sci. Pol. Agricultura*, 3(2), 15 – 26.
16. Chung D. K., Yun W.Y. 2015. A Case Study on Productivity Improvement for Conveyor Assembly Production Line in Medium and Small-Sized Manufacturing Factories. *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*. 209-219.
17. Ciesielski M. 2006. *Logistyka w biznesie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne Warszawa.
18. Czerkawi R., Rosak J. 2006. Efektywność pracy urządzeń w procesie przetwórstwa mleka. W: S. Borkowski (red.), *Efektywność eksploatacji maszyn i zdolność jakościowa procesu*, Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemśle „ORGMASZ”, Warszawa.
19. Czerska J. 2015. Total Productive Maintenance. <http://leanmanufacturing.pl/artykuly/lean-w-teorii/total-productive-maintenance.html> /.
20. Demirbas A. 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. Elsevier: *Energy Conversion and Management*. 42. 1357-1378.
21. Denisiuk W. 2009. Słoma jako paliwo. *Inżynieria Rolnicza*. R. 13, nr 1.
22. Dinesha, P., Shiva Kumar, Marc A., Rosen. 2018. Biomass Briquettes as an alternative Fuel: A Comprehensive Review. *Energy Technology*, 7(5), 1 – 8.
23. Dubas J. W., Grzybek A., Kotowski W., Tomczyk A. 2004. *Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania*. Wyd. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu.
24. Duca, D., Riva, G., Foppa Pedretti, E., Toscano, G. 2014. Wood pellet quality with respect to EN 14961–2 standard and certifications. *Fuel*, 135, 9 – 14.

25. Duda-Kękuś A. 2011. Transport biomasy w logistyce dostaw paliw dla elektrowni systemowych realizujących program zielonej energetyki. *Logistyka* 2/2011.
26. Dyczkowska J. 2012. Logistyka zaopatrzenia i produkcji – wpływ na logistykę dystrybucji. *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*.
27. El-Sayed S.A., Mohammed Khairy Elsaid Mohamed. 2018. Mechanical properties and characteristics of wheat straw and pellets. *Energy & Environment*, 29/7, 1224 – 1246.
28. Faaij A.P.C. 2006. Bio-Energy in Europe: Changing Technology Choices. *Energy Policy*, 34, 322-342.
29. Fertsch M. 2003. *Logistyka produkcji*, Biblioteka Logistyka, Poznań.
30. Fertsch M. 2008. *Podstawy logistyki. Podręcznik do kształcenia w zawodzie technik logistyk.*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
31. Ficoń K. 2001. *Procesy logistyczne w przedsiębiorstwie.*, Wyd. Impuls Plus Consulting.
32. Finan J.S., Hurley W.J. 1997. The analytic hierarchy process: Does adjusting a pairwise comparison matrix to improve the consistency ratio help? *Computers & Operations Research*, 24/8, 749 – 755.
33. Flaga A. 2015. Basic principles and theorems of dimensional analysis and the theory of model similarity of physical phenomena. *Technical Transaction Civil Engineering*, 2-B/2015, 241 – 272.
34. Forman E.H., Gass S. I. 2001. The Analytic Hierarchy Process – An Exposition. *Operations Research*, 49/4, 469 – 486.
35. Frączek J. i inni 2010a. Rozwój i technologie produkcji biopaliw stałych. *Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne*. Wyd. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, 161 – 173.
36. Frączek J. i inni 2010b. Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowanych wytwarzanych z roślin energetycznych. *Wyd. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej*, Kraków.
37. Gabryelczyk R. 2006. *ARIS w modelowaniu procesów biznesu.*, Wyd. DiFin, Warszawa.
38. Gao L., Hailu A. 2013. Identifying preferred management options: An integrated agentbased recreational fishing simulation model with an AHP-TOPSIS evaluation method. *Ecological Modelling*, 249, 75 – 83.
39. Gibbins J.C. 2011. *Dimensional Analysis*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York DOI 10.1007/978-1-84996-317-6.
40. Główny Urząd Statystyczny. 2017. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2017 roku*.
41. Główny Urząd Statystyczny. 2021. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2021 roku*.
42. Główny Urząd Statystyczny. 2023. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2023 roku*.
43. Gołos J., Kaliszewski A. 2015. Wybrane aspekty wykorzystania biomasy drzewnej do celów energetycznych. *Leśne Prace Badawcze*, 76 (1).
44. Gostomczyk W. 2012. Organizacja systemu logistycznego w produkcji i wykorzystaniu biomasy energetycznej. *Czasopismo Logistyka*, 4, 939 – 946.
45. Grochowicz J. 1996. *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. PWRiL, Warszawa.
46. Grochowicz J., Andrejko D., Mazur J. 2004. Wpływ wilgotności i stopnia rozdrobnienia na energię zagęszczania i wytrzymałość brykietów łubinowych. *Motrol*, 6, 96 – 103.
47. Grzybek A. 2004. Potencjał biomasy możliwej do wykorzystania na produkcję pelet. *Czysta Energia*, 6, 24-25.
48. Gutenbaum J. 1987. *Analiza i synteza wymiarowa. Modelowanie matematyczne systemów*. PAN IBS, Warszawa.
49. Hansen M. T., Rosentoft Jein A., Wach E., Bastian M. 2009. *The Polish Wood Pellet Handbook (Poradnik użytkownika pelet drzewnych)*. Pelletsatlas – opracowanie w ramach projektu Komisji Europejskie.

50. Hejft R. 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Biblioteka Problemów Eksploatacji ITE Radom.
51. Hejft R. 2006. Wytwarzanie brykietów z odpadów roślinnych w ślimakowym układzie roboczym. *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 231.
52. Hejft R. 2011. Granulowanie i brykietowanie słomy. *Inż. Ap. Chem.*, 50, 13-14.
53. Hejft R., Obidziński S. 2012. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych-Innowacje technologiczno-techniczne. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(1), 63 – 65.
54. Jakubiak M., Kordylewski W. 2008. Pelety podstawowym biopaliwem dla energetyki. *Archiwum Spalania*, 8(3 – 4), 107 – 118.
55. Jeżowski S. 2001. Rośliny energetyczne – ogólna charakterystyka, uwarunkowania fizjologiczne i znaczenie w produkcji ekopaliwa. *Post. Nauk Roln.* 2, 18 – 27.
56. Jeżowski S. 2003. Rośliny energetyczne - produktywność oraz aspekt ekonomiczny, środowiskowy i socjalny ich wykorzystania jako ekobiopaliwa. *Postępy nauk rolniczych*, 3/2003.
57. Jonek-Kowalska I., Tchórzewski S. 2016. Wskaźniki efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń w górnictwie węgla kamiennego – krytyczne podejście do unifikacji i normalizacji. *Inżynieria Mineralna*.
58. Kachel-Jakubowska M., Szpryngiel M. 2014. Badania własne właściwości surowców biomasowych. w: *Zrównoważone wykorzystanie surowców roślinnych i przemysłowych do produkcji peletów*. 104 – 115.
59. Kaliyan, N., Morey, R.V. 2009. Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass and bioenergy*, 33, 337-359.
60. Kania P., Koper A., Stefaniak G. 2019. Rynek biopaliw w aspekcie prawno-środowiskowym, *NAUKA MŁODYCH Przeszłość, teraźniejszość, przyszłość*, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach.
61. Kasprzak W., Lysik B. 1986. *Analiza wymiarowa*. WNT, Warszawa.
62. Kołodziej B., Matyka M. 2012. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. PWRiL
63. Kornacki A., Maj G. 2011. Wybrane właściwości peletów wytworzonych z trawy pozyskanej z trawnika przydomowego. *Inżynieria Rolnicza*, I(126), 103-108.
64. Kowalewski L. 2009. Produkcja peletów od A do Z. *Kurier Drzewny*, 18, 16 – 19.
65. Kowalik P. 2002. Perspektywy paletyzacji biomasy w Polsce. *Czysta Energia*, 10, 14 – 15.
66. Krasoń P. 2016. Wykorzystanie wskaźnika OEE w koncepcji kompleksowego utrzymania ruchu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*.
67. Kraszkiewicz A., Lorencowicz E., Kachel-Jakubowska M. 2015. Koszty produkcji peletów z biomasy roślinnej pochodzenia rolniczego. *Artykuły Konferencji Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji 2015*, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, I, 470 – 479.
68. Kulig R., Laskowski J. 2006. Nakłady energii w procesie granulowania śrut pszenicy o różnym stopniu rozdrobnienia. *Motrol*, 8A, 187 – 192.
69. Kulig R., Laskowski J. 2006. Wpływ parametrów matrycy na efektywność granulowania mieszanek pszenicy z rzepakiem. *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 375 – 384.
70. Kuś L., Matyka M. 2008. Produkcja biomasy na cele energetyczne jako alternatywny kierunek produkcji. *Wieś Jutra*, 8 – 9 (121 – 122), 8 – 10.
71. Kwaśniewski D. 2019. Logistic and economical preconditions for production of pellets from sawdust. *Agricultural Engineering*, 2(23), 5 – 14.
72. Levin R.I. 1986. *Quantitative Approaches to Management*, Nowy Jork.

73. Łunarski, J. 2010. Inżynieria systemów i analiza systemowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
74. Maj G. 2015. Warunki logistyki dystrybucji surowca do zakładów przetwórczych biomasy roślinnej. *Logistyka*, 5, 357 – 364.
75. Mani S., Tabil L., Sokhansanj S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648 – 654.
76. Marciniak T., Szkoda M. 2013. Analiza łańcucha dostaw surowca drzewnego. *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 3/2013.
77. Marr B. (2012). KPI, czyli kluczowe wskaźniki efektywności. 75 mierników ważnych dla każdego menadżera. Wyd. Helion S.A. ISBN: 978-83-283-8658-7.
78. Michałowicz E. 2002. Podstawy logistyki przemysłowej. Wyd. AGH, Kraków.
79. Mikler J. 2005. Dostępność i wykorzystanie urządzeń. *Inżynieria & Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych*.
80. Müller, L. 1983. Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli. PWN, Warszawa.
81. Niedziółka I. 2010. Możliwości wykorzystania biomasy roślinnej do produkcji brykietów i peletów. *Wiś Jutra*, 8/9, 145 – 146.
82. Niedziółka I., Szpryngiel M., Zaklika B. 2012. Analiza właściwości fizycznych i mechanicznych peletów wytworzonych z wybranych surowców roślinnych. *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe*, 11, 79-86.
83. Niedziółka, I., Szpryngiel M., 2014. Możliwości wykorzystania biomasy na cele energetyczne. *Agricultural Engineering*, 1(18), 155 – 164.
84. Nowacka-Blachowska A., Resak M., Rogosz B., Tomaszewska H. 2016. Zrównoważone wykorzystanie biomasy na terenie Dolnego Śląska. *Poltegor Instytut Górnictwa Odkrywkowego*. 6/2016.
85. Nowakowski T. 2011. Niezawodność Systemów Logistycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
86. Nowicka-Skowron M. 2000. Efektywność systemów logistycznych. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
87. Obidziński S., Hejft R. 2007. Wpływ parametrów aparaturowo-procesowych na wartości nacisków zagęszczających w procesie granulowania pasz. *Inżynieria Rolnicza*, 5(93), 313 – 319.
88. Obidziński S., Hejft R. 2012. The influence of technical and technological factors of the fodders pelleting process on the quality of botained. *Jurnal of Research and Applications in Agricultural Engeineering*, 57(1), 109-114.
89. Olkusiński T., Stala-Szlugaj K., 2018./ Międzynarodowy rynek peletów drzewnych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 105, 75 – 84.
90. Osiak J., Dwórznik M. 2015. System magazynowania, dystrybucji i sprzedaży biomasy. *Towarzystwo Amicus*, Białystok.
91. Ożadowicz A. 2006. Obrazy termograficzne usprawniające profilaktykę i utrzymanie ruchu. *Inżynieria & Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych*, Październik.
92. Pabis, S. 1985. Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa.
93. PN-EN 14588:2011. Biopaliwa stałe – Terminologia, definicje i określenia.
94. PN-EN 14778:2011. Biopaliwa stałe – Pobieranie próbek.
95. PN-EN 14780:2011. Biopaliwa stałe – Przygotowanie próbek.
96. PN-EN 14961-1:2011. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne.

97. PN-EN 14961-2:2011. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 2: Pellety drzewne.
98. PN-EN 15234:2012. Biopaliwa stałe. Zapewnienie jakości paliw.
99. PN-EN ISO 17225-1:2014-07. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne.
100. PN-EN ISO 17225-2:2014-07. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 2: Klasy peletów drzewnych.
101. PN-EN ISO 17225-1:2021-10. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 1: Wymagania ogólne.
102. PN-EN ISO 17225-2:2021-11. Biopaliwa stałe. Specyfikacje paliw i klasy. Część 2: Klasy peletów drzewnych.
103. Prabovo H. Hutmi, R., Dewata, I. 2023. Optimizing Digging Equipment Productivity Using Overall Equipment Effectiveness (OEE) Method in Coal Overburden Mining Activities. INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi.
104. Prusak A., Stefanów P. 2014. AHP – analityczny proces hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych krok po kroku. C.H. Beck, Warszawa.
105. Prusak A., Stefanów P. 2011. Badania nad właściwościami operacyjnymi metody AHP. Folia Oeconomica Cracoviensia, 52, 87–104.
106. Purzycki G. 2003. Wskaźnik OEE, czyli jak w ciągu kilku miesięcy znacząco zwiększyć efektywność produkcji. Biuletyn Automatyki Astor, 3/2003.
107. Putera A. R., Marodiyah I. 2024. Optimizing Maintenance Efficiency with OEE Method.
108. Putra F. E., Andreamara A. 2022. Effect of Combined Processing Lines on Production Efficiency and Productivity.
109. Raju, Ch. A. I., Satya, M., Praveena U. and Jyothi, K.R. 2014. Studies on Development of Fuel Briquettes Using Locally Available Waste. Journal of Engineering Research and Applications, 4, 3(1), 553 – 559.
110. Rembowski Ł. 2007. Brykieciarka rotacyjna, tzw. pelecziarka. Agroenergtyka.
111. Rizal A., Pandria A.T.M. 2023. Maintenance Analysis of Sterilizer Machine Treatment at PT. Karya Tanah Subur (KTS) Using the Overall Equipment Effectiveness (OEE) Method. Jurnal Inovasi Teknologi Dan Rekayasa.
112. Roszkowski A. 2012. Biomasa i bioenergia - bariery technologiczne i energetyczne. Problemy Inżynierii Rolniczej, 3(77).
113. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- 114.
115. Roy B. 2005. Paradigms and Challenges. In Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. International Series in Operations Research & Management Science, 78, 3–24.
116. Rychter A. 2005. Miejsce TPM w kształtowaniu jakości produktu. W: S. Borkowski (red.), Zarządzanie jakością wyrobów i usług, PTM, Warszawa.
117. Saaty T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process, Nowy Jork.
118. Saaty T.L. 1990. How to make a decision. The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, 48.
119. Saaty T.L., Forman E.H. 1992. The Hierarchon: A Dictionary of Hierarchies, RWS Publications, Pittsburgh.
120. Saaty T.L. 1994. A ratio scale metric and the compatibility of ratio scales: The possibility of arrow's impossibility theorem, Applied Mathematics Letters, 7/6, 45 – 49.

121. Saaty T.L. 1996. Decision Making with Dependence and Feedback, Pittsburgh.
122. Saaty T.L. 2000. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. 6, Pittsburgh.
123. Saaty T.L., Ozdemir M. 2003. Why the magic number seven plus or minus two. Mathematical and Computer Modeling, 38.
124. Saaty T.L., Peniwati K. 2007. Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences, Pittsburgh.
125. Saaty T.L. 2008a. Decision Making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World, Pittsburgh.
126. Saaty T.L. 2008b. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The Analytic Hierarchy/Network Process, Revista de la Real Academia de Ciencias Exactes, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas, 102(2).
127. Saaty T.L. 2010. Principia Mathematica Decernendi: Mathematical Principles of Decision Making. Generalization of the Analytic Network Process to Neural Firing and Synthesis, Pittsburgh.
128. Saletnik A., Saletnik B., Puchalski C. 2021. Modification of Energy Parameters in Wood Pellets with the Use of Waste Cooking Oil, Energies, 14(20), 6486.
129. Setyawan W., Sutoni A., Munandar T. 2021. Calculation and Analysis of Overall Equipment Effectiveness (OEE) Method and Six Big Losses toward the Production of Corter Machines in Oni Jaya Motor. Journal of Physics.
130. Shaaban S., Hudson S. 2010. Production Line Efficiency: A Comprehensive Guide for Managers.
131. Skonecki S., Potręć M. 2008. Wpływ wilgotności łusek kolb kukurydzy na parametry zagęszczania. Acta Agrophysica, 11(3), 725 – 732.
132. Skowronek Cz., Saryusz-Wolski Z. 2007. Logistyka w przedsiębiorstwie. PWE Warszawa.
133. Sławiński K., Bujaczer R., Fleczer J. 2015. Transport drogowy biomasy dla celów energetycznych. Logistyka, 4, 5685 – 5689.
134. Sobolewski H., Marcinkowski B. 2017. Zarządzanie ryzykiem w praktyce gospodarczej. Studia i Prace WNEiZ US, 50(3).
135. Stajniak M., Hajdul M., Foltyński M., Krupa A. 2007. Transport i spedycja. Biblioteka Logistyka.
136. Stuckey C., Schuck S., Sims R., Bland J., Marino B., Borowitzka M., Abadi A., Bartle J., Giles R., Thomas Q. 2012, Bioenergy in Australia. Status and Opportunities. Bioenergy Australia.
137. Sutrisno T., Anggono W., Suprianto F.D., Kasrun A., Siahaan I.H. 2017. The effects of particle size and pressure on the combustion characteristics of cerbera manghasleaf briquettes. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(4), 931 – 936.
138. Szafranski M. 2007. Elementy ekonomiki jakości w przedsiębiorstwach. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
139. Szkoda J. 2002. Diagnozowanie stanów zdolności jakościowej procesu produkcyjnego. Wydawnictwo Diagnostyka, 27, 89 – 94.
140. Szpryngiel M., Kraszkiewicz A., Kachel-Jakubowska M., Niedziółka I. 2011. Ocena gęstości usypowej i energochłonności produkcji peletów w peletarce z dwustronną matrycą płaską. Inżynieria Rolnicza, 6(131), 215-221.
141. Szyszlak-Bargłowicz J., Zajac G., Słowik T. 2014. Łańcuch dostaw biomasy na cele energetyczne. Logistyka, 6, 354 – 359.

142. Tan Q.-M. 2011. *Dimensional Analysis With Case Studies in Mechanics*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York DOI 10.1007/978-3-642-19234-0.
143. Trangkaprasith K. and Chavalparit O. 2011. Heating Value Enhancement of Fuel Pellets from Frond of Oil Palm. 2010 International Conference on Biology, Environment and Chemistry IPCBEE, 1.
144. Tumuluru J.S., Wright C. T., J., Hess R., Kenney L. K., 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
145. Twaróg J. 2004. Logistyczne wskaźniki oceny transportu w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Logistyka* 2/2004.
146. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. Opracowano na podstawie: t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1378, 1383.
147. Wach E. 2005. Jakość granulatu drzewnego. Normy, wymagania, właściwości. Bałtycka Agencja Poszanowania Energii S.A.
148. Wach E. 2006. Techniczno-ekonomiczne aspekty wykorzystania drewna i paliw pochodnych do celów grzewczych. Regionalne Forum Energetyki Odnawialnej, Przysiek.
149. Webfleet Solutions – Skuteczne rozwiązania telematyczne. Czy wiesz ile oleju napędowego zużywa ciężarówka na km? Dostęp: 2020, 28 lutego 2020. https://www.webfleet.com/pl_pl/webfleet/blog/czy-wiesz-ile-oleju-napedowego-zuzywa-ciezarówka-na-km/
150. Wieruszewski M., Górna A., Stanula Z., Adamowicz K. 2022. Energy Use of Woody Biomass in Poland: Its Resources and Harvesting Form. *Energies*, 15(18), 6812.
151. Witt J., Kaltschmitt M. 2007. Mass pellets for the Power plant section, VGB Powertech, 9 101.
152. Wróbel M., Mudryk K. 2010. Jakość biopaliw stałych. Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne. *Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej*, 207 – 219.
153. Wrzosek J., Gworek B. 2010. Biomasa w energetyce odnawialnej. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 43, 104-115.
154. Zawistowski J. 2003. Współspalanie biomasy drzewnej z węglem – szybszy rozwój energetyki odnawialnej. *Ekologia Praktyczna*, 7/8, 8.
155. Zelkowski J., Gontarczyk M., Kijek M., Jóźwiak A. 2016. Modelowanie procesów logistycznych – wprowadzenie do problematyki podobieństwa procesów. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, 5, 858 – 868.
156. Zlokarnik M. 1991. *Dimensional Analysis and Scale-up in Chemical Engineering*. Springer Verlag, Berlin DOI: 10.1007/978-3-642-76673-2.
157. Zwolińska B., Kubica Ł. 2017. Model wyznaczania uszkodzeń krytycznych, Część 1: opis i analiza systemu produkcyjnego. *Journal of KONBiN*, 42, 329 – 352.
158. Żarski W. 2015. Logistyka zaopatrzenia i możliwości jej wspomagania w przedsiębiorstwie produkującym biopaliwa, *Logistyka*, 5, 9987 – 9993.
159. Żurawska A., Kulińska E. 2015. Koszty logistyki produkcji – relacja: decyzja – ryzyko – koszt. *Logistyka*, 6, 975 – 984.

9. Spis tabel

Tabela 1.1. Charakterystyka parametrów słomy	14
Tabela 1.2. Podstawowe parametry techniczne pojazdów wykorzystywanych do transportu biomasy stałej	34
Tabela 2.1. Układ jednostek X_k wybranych wielkości wymiarowych Q_i	49
Tabela 3.1. Parametry dotyczące procesu produkcji peletów	61
Tabela 3.2. Zestawienie parametrów jakościowych różnego typu biomasy	62
Tabela 3.3. Założenia i parametry dotyczące procesu produkcji peletów	63
Tabela 3.4. Wykaz maszyn i urządzeń na linii technologicznej oraz ich parametry eksploatacyjne	72
Tabela 3.5. Stanowiska pracy przy linii technologicznej	73
Tabela 4.1. Marki i liczba samochodów wykorzystywanych do transportu słomy.....	74
Tabela 4.2. Parametry eksploatacyjne wykorzystywanych środków transportowych	75
Tabela 4.3. Masa samochodu z ładunkiem i masa ładunku przewiezonego w jednym cyklu transportowym	77
Tabela 4.4. Liczba dostaw i masa dostarczonej słomy w formie bel i kostek	78
Tabela 4.5. Liczba bel i kostek słomy transportowanych w trakcie jednej dostawy.....	81
Tabela 4.6. Liczba dostaw i masa dostarczonej słomy w poszczególnych miesiącach.....	81
Tabela 4.7. Odległości transportowe realizowanych dostaw słomy.....	82
Tabela 4.8. Sumy odległości transportowych realizowanych dostaw słomy w poszczególnych miesiącach	83
Tabela 4.9. Zasoby i zapasy słomy oraz zużycie słomy do produkcji peletów	84
Tabela 4.10. Czas pracy i dostępność linii technologicznej do produkcji peletów	89
Tabela 4.11. Wydajność linii technologicznej obliczona z uwzględnieniem wydajności rzeczywistej i maksymalnej wydajności teoretycznej granulatora na poziomie $5,5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$	90
Tabela 4.12. Jakość na linii technologicznej do produkcji peletów	91
Tabela 5.1. Wyniki analizy wymiarowej	113
Tabela 5.2. Wyniki oceny dla poszczególnych parametrów	119
Tabela 5.3. Współczynniki wagowe dla poszczególnych parametrów	119
Tabela 5.4. Ocena poszczególnych wariantów oraz otrzymane wagi	120
Tabela 5.5. Współczynniki RI	121
Tabela 5.6. Wyniki sumarycznej oceny metodą AHP	122

10. Spis rysunków

Rysunek 1.1. Pelet ze słomy	13
Rysunek 1.2. Układ roboczy maszyny do peletyzacji z płaską matrycą	18
Rysunek 1.3. Schemat działania maszyny do peletyzacji z matrycą pierścieniową, 1-matryca; 2-rolka; 3-komora prasująca	19
Rysunek 1.4. Schemat instalacji do produkcji peletu	20
Rysunek 2.1. Schemat procesu badawczego i realizacji pracy.....	43
Rysunek 2.2. Model hierarchiczny.....	54
Rysunek 2.3. Dziesięciostopniowa skala.....	55
Rysunek 3.1. Linia technologiczna do produkcji peletów z podziałem na węzły	64
Rysunek 3.2. Węzły pomocnicze zamontowane na linii technologicznej	64
Rysunek 3.3. Scenariusz pobytu samochodu dostarczającego słomę na terenie badanego przedsiębiorstwa	66
Rysunek 3.4. Schemat działania linii produkcyjnych na terenie badanej firmy	70
Rysunek 4.1. Struktura liczby dostaw słomy w formie bel i kostek.....	80
Rysunek 4.2. Struktura masy przewiezionego surowca w formie bel i kostek.....	80
Rysunek 4.3. Wskaźnik wykorzystania surowca do produkcji.....	85
Rysunek 4.4. Miesięczna produkcja peletów w latach 2018-2021.....	86
Rysunek 4.5. Roczna produkcja peletów w latach 2018-2021.....	87
Rysunek 4.6. Wskaźnik OEE efektywności wykorzystania linii technologicznej (%)	92
Rysunek 4.7. Wskaźnik czasu przestojów linii technologicznej (%)	93
Rysunek 5.1. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku ($n = p_1$) pojazdów	104
Rysunek 5.2. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku $p_1 \bmod 2 = 0$ pojazdów	106
Rysunek 5.3. Schemat załadunku, przejazdu i wyładunku $p_1 \bmod 2 = 1$ pojazdów	107
Rysunek 5.4. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2018.....	114
Rysunek 5.5. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2019	115
Rysunek 5.6. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2020.....	116
Rysunek 5.7. Wyniki analizy wymiarowej dla roku 2021.....	117
Rysunek 5.8. Model hierarchiczny	118
Rysunek 5.9. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2018 roku.....	123
Rysunek 5.10. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2019 roku.....	124
Rysunek 5.11. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2020 roku.....	125
Rysunek 5.12. Wskaźniki oceny sumarycznej tras w 2021 roku.....	126

11. Streszczenie

W pracy dokonano oceny uwarunkowań zewnętrznych dostaw surowca w kontekście efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów.

Celem badań było określenie efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów ze słomy zbóż w zależności od jej potencjału produkcyjnego oraz stosowanego systemu logistyki dostaw surowca. Realizacja celu została oparta na trzyetapowych badaniach: terenowych, empirycznych oraz modelowych. W pierwszym etapie dokonano szczegółowej charakterystyki firmy oraz scharakteryzowano jej linię technologiczną i określono parametry. Etap drugi skupiał się na określeniu charakterystyki środków transportowych wykorzystywanych do transportu słomy, organizacji dostaw surowca oraz określeniu zasobów i zużycia surowca. W tym etapie wykorzystano metodę OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) do oceny efektywności wykorzystania linii technologicznej.

W ostatnim etapie przeprowadzono analizę dostaw surowca do zakładu produkcyjnego z wykorzystaniem metody analizy wymiarowej i metody AHP. Metody te pozwoliły na ocenę funkcjonowania logistyki dostaw w firmie i wskazanie obszarów, gdzie można dokonać poprawy efektywności zaopatrzenia w surowiec.

Wyniki badań wykazały, że efektywność produkcji peletów w dużym stopniu zależy od organizacji dostaw surowca. Analizy dowodzą również, że system logistyki dostaw surowca w badanej firmie był dobrze zaplanowany i zapewniał efektywne wykorzystanie linii technologicznej. Przeprowadzona analiza wymiarowa i metoda AHP pozwoliły na wyznaczenie kluczowych parametrów transportowych, które obejmowały m.in. czas dostawy, odległość oraz sezonowe różnice w dostępności transportowanej masy słomy. Wskaźniki OEE w latach 2018–2021 potwierdziły, że efektywność linii technologicznej była istotnie zależna od dostępności zasobów surowca.

Przeprowadzone badania wykazały, że system logistyki dostaw surowca ma kluczowe znaczenie dla efektywności wykorzystania linii technologicznej do produkcji peletów. Prawidłowa organizacja dostaw surowca w postaci słomy zapewnia ciągłość pracy linii technologicznej, czego wynikiem są możliwości zwiększenia efektywności jej wykorzystania.

Praca stanowi również istotny wkład w rozwój wiedzy na temat integracji logistyki i technologii produkcji w branży biomasy. W pracy przedstawiono dyskusję wyników oraz wnioski końcowe, które wynikają z przeprowadzonych badań i wykonanych analiz.

12. Abstract

In this study, an evaluation of the external conditions affecting raw material supply was conducted in the context of the efficiency of utilizing a technological line for pellet production.

The research aimed to determine the efficiency of utilizing a technological line for straw pellet production based on its production potential and the implemented raw material logistics system. The study was carried out through a three-stage process: fieldwork, empirical studies, and modeling analyses. In the first stage, a detailed characterization of the company and its technological line was conducted, including identifying operational parameters. The second stage focused on describing the transport means used for straw transportation, analyzing the organization of raw material deliveries, and assessing the resources and consumption of raw materials. During this stage, the Overall Equipment Effectiveness (OEE) method was employed to evaluate the efficiency of the technological line.

In the final stage, an analysis of raw material deliveries to the production facility was performed using dimensional analysis and the Analytical Hierarchy Process (AHP). These methods enabled an evaluation of the company's supply logistics and identified areas where the efficiency of raw material provisioning could be improved.

The research findings indicated that pellet production efficiency largely depends on the organization of raw material supply. The analyses also demonstrated that the logistics system for raw material supply in the studied company was well-designed, ensuring effective utilization of the technological line. Dimensional analysis and the AHP method identified critical transport parameters, including delivery time, distance, and seasonal variations in the availability of transported straw mass. The OEE indicator for the years 2018–2021 confirmed that the efficiency of the technological line was significantly influenced by the availability of raw material resources.

The conducted research highlighted that the raw material supply logistics system plays a crucial role in the efficiency of utilizing a technological line for pellet production. Proper organization of straw supply ensures the continuity of the technological line's operation, resulting in opportunities to increase its utilization efficiency.

This work also makes a significant contribution to the development of knowledge on the integration of logistics and production technology in the biomass sector. The study includes a discussion of the results and final conclusions derived from the conducted research and analyses.