



PROJEKT AUTOMATYCZNEGO SYSTEMU KONTROLI SEGREGACJI ODPADÓW ZBIERANYCH SELEKTYWNIE Z WYKORZYSTANIEM METODY AHP

DESIGN OF AN AUTOMATED WASTE SEGREGATION CONTROL SYSTEM USING THE AHP METHOD

Dominik PAŁKA¹, Mateusz MALINOWSKI¹, Rafał JOŃCZY¹

STRESZCZENIE

Selektywne gromadzenie odpadów komunalnych w systemie „u źródła” stanowi jedno z podstawowych narzędzi zwiększania poziomu recyklingu, a także zmniejszania zużycia energii i nakładów pracy związanych z późniejszym doczyszczaniem odpadów w sortowniach. Istotnym problemem tego systemu pozostaje jednak obecność zanieczyszczeń w workach i pojemnikach przeznaczonych do selektywnej zbiórki odpadów. W artykule przedstawiono obowiązujące wymagania prawne w zakresie selektywnego zbierania odpadów w Polsce oraz omówiono problemy i główne przyczyny błędów popełnianych przez mieszkańców podczas segregacji odpadów komunalnych. Celem pracy było zaprojektowanie automatycznego systemu kontroli segregacji odpadów zbieranych selektywnie, umożliwiającego weryfikację poprawności segregacji odpadów trafiających do pojemników zlokalizowanych w altanach śmietnikowych poprzez analizę kodów kreskowych umieszczonych na opakowaniach oraz bazy danych przypisującej kodom EAN rodzaju materiału. Opracowany system integruje rozwiązania mechaniczne (klapa wrzutowa, system podnoszenia wciągarką łańcuchową), elementy automatyki i elektroniki (moduł skanujący kody kreskowe) oraz nowoczesną architekturę wiat śmietnikowych. Dobór modułu skanującego przeprowadzono z zastosowaniem metody AHP, umożliwiającej wielokryterialną ocenę dostępnych na rynku rozwiązań. W procesie projektowania uwzględniono wymagania funkcjonalne, eksploatacyjne, ergonomiczne oraz aspekty bezpieczeństwa użytkowania.

Słowa kluczowe: segregacja odpadów, wiaty śmietnikowe, metoda AHP

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Polska

ABSTRACT

Selective collection system of municipal solid waste at the source is one of the key measures for increasing recycling rates and also reducing energy consumption and labor requirements associated with waste purification in waste sorting facilities. However, a significant challenge of this system is the presence of contaminants in bags and containers intended for separately collected waste. This paper presents the current legal requirements governing selective municipal waste collection in Poland and discusses the main problems and causes of incorrect waste segregation by residents. The aim of the study was to design an automated control system for selectively collected waste segregation, enabling the verification of waste deposited in containers located in waste collection enclosures through the analysis of barcodes printed on product packaging. The proposed system integrates mechanical components (a loading hatch and a chain hoist lifting mechanism), automation and electronic components (a barcode scanning module), and a modern waste enclosure design. The barcode scanning module was selected using the Analytic Hierarchy Process (AHP), which enables the multi-criteria evaluation of available solutions. The system design considered functional, operational, ergonomic, and user safety requirements.

Keywords: waste segregation, waste collection enclosures, Analytic Hierarchy Process (AHP)

WSTĘP

W dobie rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa i jednocześnie zaostrzających się unijnych celów recyklingu (55% odpadów komunalnych do 2025 r., a 65% do 2035 r.) tradycyjne pojemniki na selektywną zbiórkę odpadów coraz częściej okazują się niewystarczające. Jednym z najistotniejszych problemów pozostaje zanieczyszczenie odpadów zbieranych selektywnie u źródła oraz w systemie gniazdowym w wyniku wrzucania odpadów do niewłaściwego pojemnika, co ostatecznie obniża jakość surowców wtórnych (odzyskiwanych w sortowniach) i zwiększa koszty przetwarzania tych odpadów. Rozwiązaniem stają się systemy automatycznej klasyfikacji poprawności sortowania odpadów oparte na sztucznej inteligencji, systemach wizualizacji komputerowej, sensorach i robotyce.

Zgodnie z definicją zawartą w ustawie o odpadach, odpadami są wszelkie substancje lub przedmioty, których posiadacz się pozbywa, zamierza pozbyć lub do których pozbycia się został zobowiązany. Jedną z podstawowych grup odpadów powstających w każdym gospodarstwie domowym są odpady komunalne. Zgodnie z przepisami, odpady te obejmują odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niebędące odpadami niebezpiecznymi, pochodzące od innych wytwórców, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów domowych. (Dz. U. 2013, poz. 21, z późn. zm.). Wśród odpadów komunalnych wyróżnia się w szczególności: niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne, odpady zbierane selektywnie (w tym papier i tekturę, szkło, metale, tworzywa sztuczne, bioodpady, drewno, tekstylia, opakowania, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, zużyte baterie i akumulatory) oraz odpady wielkogabarytowe, takie jak meble, rowery, wózki i materace (Hryb i Ceglarz, 2021). Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja

2018 r. zmieniającą dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów, od 1 stycznia 2025 r. państwa członkowskie Unii Europejskiej są zobowiązane do zapewnienia selektywnej zbiórki tekstyliów. Do tego samego terminu kraje te powinny również wprowadzić selektywną zbiórkę odpadów niebezpiecznych, tak aby nie zanieczyszczały one innych strumieni odpadów komunalnych.

Analizy funkcjonowania systemów selektywnej zbiórki odpadów w małopolskich gminach wykazały, że system wieloworkowego (wielopojemnikowego) selektywnego zbierania odpadów zapewnia znacznie wyższą czystość frakcji (zanieczyszczenia na poziomie 6,4–7,7%) niż system jedno-workowy (17,0%). Najczęstszymi zanieczyszczeniami są odpady organiczne oraz niebezpieczne (Łukasiewicz i Malinowski, 2018). Zmniejszenie udziału zanieczyszczeń pozwoli na uzyskanie większego strumienia odpadów nadającego się do wykorzystania w procesach recyklingu. Ważnymi elementami polskiego systemu gospodarki odpadami komunalnymi (które mają prowadzić do zwiększenia poziomu recyklingu) są od 2015 roku stacjonarne Punkty Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych (Malinowski i in., 2021) oraz aktualnie wdrażany system kaucyjny.

Około 60% ludności Polski mieszka w budynkach wielorodzinnych, odsetek ten w niektórych miastach osiąga poziom 80% populacji (GUS, 2023). W związku z tym dominującą formą gromadzenia odpadów w Polsce są osiedlowe wiaty śmietnikowe wyposażone w różnokolorowe pojemniki. Stanowią one element systemu zbierania odpadów komunalnych typu „od drzwi do drzwi” lub „u źródła”, polegający na umiejscowieniu pojemników w bezpośrednim sąsiedztwie budynków mieszkalnych (Hryb i Ceglarz, 2021). Selektywne gromadzenie odpadów u źródła jest korzystne ze względu na walory edukacyjne, niemniej rozwiązanie to generuje szereg problemów i wyzwań, które istotnie ograniczają efektywność całego systemu gospodarki odpadami komunalnymi (d’Obyrn i Szalińska, 2005). Do najważniejszych wyzwań należą (Generowicz, 2025):

- realne ryzyko zanieczyszczenia frakcji odpadów gromadzonych w konkretnym pojemniku lub worku. W zabudowie wielorodzinnej w szczególności w blokach mieszkalnych z wydzielonymi wiatami śmietnikowymi istnieje wysokie ryzyko wymieszania frakcji odpadów segregowanych. Wspólnoty mieszkaniowe są formami organizacyjnymi skupiającymi setki czy nawet tysiące mieszkańców. Występujące w związku z tym zjawisko anonimizacji i rozproszenia odpowiedzialności wpływa negatywnie na możliwość weryfikacji poprawności segregacji odpadów poprzez poszczególne gospodarstwa domowe (Dudek i in, 2023),
- niewystarczająca kubatura obiektów i ich niedostosowanie do selektywnej zbiórki odpadów,
- niewłaściwe lub nieergonomiczne ułożenie pojemników,
- występowanie niedostatecznych warunków oświetleniowych,
- czynnik ludzki, rozumiany jako niewystarczająca świadomość ekologiczna mieszkańców, czy wręcz brak motywacji do prowadzenia właściwej segregacji, będący konsekwencją braku wewnętrznej motywacji do właściwego zarządzania domowym strumieniem odpadów (Hryb i Ceglarz, 2021).

Przykładem nieprawidłowego gromadzenia odpadów w pojemnikach umieszczonych w wiatach śmietnikowych jest fotografia 1. Aktualnie na

terenie całego kraju stosowany jest jednolity system selektywnej zbiórki odpadów komunalnych, obejmujący pięć frakcji: metale i tworzywa sztuczne, papier, szkło, bioodpady oraz odpady zmieszane (Hryb i Ceglarz, 2021). Udział odpadów komunalnych zbieranych selektywnie w 2023 r. w strukturze wszystkich wytworzonych odpadów wynosił 41%, jednak poziom segregacji w gospodarstwach domowych wynosił jedynie 27% (GUS, 2023). W związku z tym konieczne jest podjęcie działań mających na celu zwiększenie poziomu segregacji odpadów.



Rysunek 1. Pojemnik na tworzywa sztuczne w altanie śmietnikowej

Figure 1. Container for plastic waste located in a waste collection enclosure

Źródło / Source: Fotografia własna/ Author's own photograph

W dobie rozwoju technologii cyfrowych, mechatroniki, automatyzacji oraz koncepcji przemysłu 4.0, dostępnych jest na rynku wiele rozwiązań umożliwiających precyzyjną identyfikację odpadów. Połączenie wizji komputerowej, sensorów, robotyki i technologii IoT pozwala osiągać dokładność klasyfikacji powyżej 95–98% i skutecznie wspierać realizację celów gospodarki o obiegu zamkniętym. Współczesne systemy kontroli segregacji łączą kilka warstw technologii, tworząc kompleksowy mechanizm nie tylko klasyfikacji, ale także monitoringu, feedbacku i egzekucji poprawnego postępowania z odpadami. Systemy dostępne komercyjnie wykorzystują wizję komputerową, przetwarzanie obrazu oraz konwolucyjne sieci neuronowe oparte o architektury takie jak YOLO, ResNet, ConvNeXt czy MobileNet, umożliwiające zaawansowane rozpoznawanie kształtu, koloru, tekstury oraz etykiet opakowań w czasie rzeczywistym. Zaawansowane systemy wizyjne wymagają jednak znacznego nakładu pracy związanego z trenowaniem modeli oraz zaangażowania specjalistów IT (Ahmad i in., 2025). Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie zaawansowanych sensorów spektroskopii NIR (w bliskiej podczerwieni), które umożliwiają precyzyjną identyfikację rodzaju tworzywa sztucznego (PET, HDPE, PP i innych). Technologia ta jest często uzupełniana czujnikami pojemnościowymi, indukcyjnymi oraz optycznymi, co zwiększa skuteczność detekcji danego materiału (Kwaśniewski i Zajac 2004).

Brak skutecznych metod w zakresie poprawienia „czystości” selektywnej zbiórki, a więc ograniczenia możliwości błędnego wyrzucenia odpadu do konkretnego pojemnika, wymaga zupełnie nowego podejścia. Zasadnym rozwiązaniem może być wdrożenie systemu technicznego wykorzystującego

skaner optyczny rozpoznający rodzaj materiałów, kod kreskowy, kolor, fakturę przedmiotu wyrzucanego do konkretnego pojemnika (kontenera). W niniejszej pracy podjęto próbę zaprojektowania automatycznego systemu lub urządzenia (w formie dedykowanej klapy pojemnika wyposażonej w skaner) uniemożliwiającego błędną segregację odpadów.

Celem pracy było zaprojektowanie systemu zintegrowanego z pojemnikiem o objętości 1100 dm³ wyposażonego w skaner identyfikujący wrzucane odpady (na podstawie analizy kodów kreskowych oraz bazy danych z przypisanymi kodom EAN rodzajami materiału opakowaniowego) oraz mechanizm automatycznego otwarcia i blokowania klapy wrzutowej. Zakres pracy obejmuje: analizę wymagań funkcjonalnych i użytkowych dla projektowanego urządzenia (analiza projektowanego systemu technicznego), przegląd dostępnych technologii skanowania odpadów, opracowanie kryteriów oceny i zastosowanie metody AHP w kierunku wybrania optymalnego rozwiązania w zakresie skanera, wykonanie zapisu konstrukcji klapy i obudowy urządzenia.

MATERIAŁ I METODY

Zaprojektowanie nowego systemu lub urządzenia wymagało dokonania przeglądu istniejących i dostępnych na rynku rozwiązań. Na podstawie przeprowadzonych wizji lokalnych w altanach śmietnikowych stwierdzono, że urządzenie powinno się składać z następujących elementów:

- pojemnika na odpady o pojemności 1100 dm³ wykonanego z tworzywa sztucznego (polietylenu wysokiej gęstości – HDPE),
- modułu skanera odpadów składającego się z: matrycy CMOS do odczytu kodów 1D/2D (np. QR, DataMatrix), układu optycznego z diodami doświetlającymi pole skanowania oraz oprogramowania dekodującego i klasyfikującego odpady,
- wzmocnionej obudowy i konstrukcji mechanicznej odpornej na warunki zewnętrzne wraz z elementami montażowymi do integracji z pojemnikiem,
- czujników pomocniczych takich jak: czujnik pozycji do kontroli stanu klapy (otwarta/zamknięta) oraz czujnik przejścia odpadu przez gardziel,
- mechanizmu klapy wrzutowej: napędu elektrycznego, przekładni i mechaniki otwierania/zamykania klapy oraz systemu zabezpieczeń przed przytrzaśnięciem dłoni,
- modułu sterującego elektroniką,
- diod LED sygnalizujących status (zielony – akceptacja, czerwony – odmowa) oraz sygnału dźwiękowego informującego o wyniku procesu,
- modułu rejestracji i komunikacji danych,
- oprogramowania sterującego,
- systemu podnoszącego urządzenie przymocowanego do dźwigara altany śmietnikowej.

Podstawowe założenia projektowe obejmują automatyczne rozpoznawanie odpadów przy użyciu skanera, zsynchronizowane otwieranie klapy wyłącznie po prawidłowej identyfikacji, odporność konstrukcji na warunki zewnętrzne (wilgoć, pył, zmienne temperatury), zapewnienie bezpieczeństwa użytkownika poprzez eliminację ryzyka przytrzaśnięcia dłoni, zastosowanie energooszczędnych komponentów oraz standardowych interfejsów komunikacyjnych umożliwiających integrację z systemami monitoringu odpadów.

Projektowany system techniczny powinien oprócz zdefiniowanego powyżej wejścia i wyjścia, realizować kolejne funkcje pozwalające na osiągnięcie celu, którym w tym przypadku jest zminimalizowanie błędów w segregacji odpadów zbieranych selektywnie w altanach śmietnikowych.

Układ funkcjonalny działania projektowanego urządzenia powinien uwzględniać następujące elementy:

- umieszczenie odpadu w strefie skanowania – odpad znajduje się przed oknem skanera,
- aktywacja skanera – czujnik obecności (fotodetektor) uruchamia skanowanie,
- identyfikacja odpadu – skaner analizuje kod/oznaczenie,
- przekazanie danych do modułu sterującego – mikrokontroler odbiera wynik skanowania,
- decyzja logiczna – algorytm klasyfikacji sprawdza, czy odpad spełnia kryteria wrzutu,
- sterowanie mechanizmem klapy – w przypadku pozytywnej identyfikacji następuje otwarcie klapy wrzutowej,
- wrzut odpadu do pojemnika – użytkownik umieszcza odpad wewnątrz pojemnika,
- zamknięcie klapy,
- rejestracja zdarzenia – system zapisuje informację o wrzucie (np. liczba, rodzaj odpadu),
- gotowość do kolejnego cyklu – urządzenie wraca do stanu oczekiwania na następny odpad.

Ponadto sprawne funkcjonowanie urządzenia powinno obejmować następujące wymagania: średni czas obsługi jednego wrzutu powinien zawierać się w zakresie od 2 do 3 s (skanowanie oraz otwarcie i zamknięcie klapy), temperatura pracy: od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, stopień ochrony obudowy: IP65 (odporność na pył i wodę), zasięg odczytu skanera: 5–10 cm w zależności od kontrastu i wielkości kodu, szybkość dekodowania: ≥ 60 odczytów na sekundę, pobór mocy na poziomie: 10–30 W (w trybie pracy) oraz maks. 5 W (w trybie czuwania), natomiast napięcie nominalne: 12–24 V DC. Takie postawienie problemu ogranicza do minimum możliwość niewłaściwego, omyłkowego wrzutu odpadów do pojemnika.

W wyniku analizy i wizji lokalnych w wiatach śmietnikowych ustalono, że zintegrowany system techniczny powinien charakteryzować się możliwością skanowania kodów kreskowych, kodów QR i DataMatrix dzięki zastosowaniu skanera kodów. Skanowane kody powinny być przetwarzane przez sterownik, który na podstawie zdefiniowanych wzorców dokonuje identyfikacji odpadu i steruje systemem mechatronicznym kontrolującym pozycję klapy wrzutowej przymocowanej do pojemnika na odpady o pojemności 1100 dm³.

Kluczowym elementem projektowanego systemu jest dobór optymalnego skanera. Do wyboru skanera zastosowano metodę Analytic Hierarchy Process (AHP). Jest to strukturalna technika wielokryterialnego podejmowania decyzji, pozwalająca na porównanie alternatyw w sposób obiektywny i powtarzalny (Adamus i Łasak, 2009). Jej istotą jest dekompozycja złożonego problemu decyzyjnego na hierarchię złożoną z celu głównego, kryteriów oceny oraz alternatyw (wariantów rozwiązań), a następnie przeprowadzenie porównań parami elementów na każdym poziomie hierarchii (Prusak i Stefanów, 2014; Malinowski, 2021).

W wyniku analizy literatury, rozmów i ocen dokonanych przez 5 ekspertów z branży komunalnej, specyfikacji producentów skanerów oraz wymagań projektu przyjęto cztery kryteria optymalizacyjne:

- K1 – cena zakupu urządzenia (skanera) wyrażona w PLN. Im niższa cena, tym korzystniejsze rozwiązanie (kryterium minimalizujące).
- K2 – liczba obsługiwanych kodów (1D i 2D). Im większa liczba kodów, tym skaner jest bardziej uniwersalny i korzystniejszy.
- K3 – szybkość odczytu wyrażona w milisekundach (ms). Im niższa wartość (szybsza reakcja), tym korzystniej.
- K4 – zakres temperatur pracy (°C). Im szerszy dopuszczalny zakres temperatur, tym skaner jest bardziej odporny na warunki zewnętrzne i korzystniejszy pod kątem wykorzystania (kryterium maksymalizujące).

Wyżej wymienione kryteria wykorzystano do oceny 4 wariantów decyzyjnych, którymi były 4 skanery dostępne na rynku. Ich charakterystykę przedstawiono w rozdziale wyniki. Kolejny etap analizy stanowiła budowa macierzy porównań: najpierw kryteriów (w celu wyznaczenia wag każdego z nich), a następnie wariantów decyzyjnych w obrębie każdego z kryteriów. Do oceny zastosowano fundamentalną skalę Saaty'ego (1–9), gdzie:

- 1 oznacza elementy równoważne,
- 3 – umiarkowaną przewagę,
- 5 – silną przewagę,
- 7 – bardzo silną przewagę,
- 9 – ekstremalną przewagę.
- wartości parzyste (2, 4, 6, 8) jako pośrednie.

Dla każdej pary kryteriów tworzą macierz kwadratową. Przykładowo, jeśli ekspert uznał, że K1 (cena) ma umiarkowaną przewagę nad K2, wpisywano wartość 3, a w pozycji odwrotnej przypisywano wartość: 1/3. Dla każdej macierzy obliczono wektor własny ($\lambda_{\max}$). Następnie przeprowadzono normalizację i obliczanie priorytetów (wag). Wagi kryteriów względem celu głównego oraz wagi alternatyw względem poszczególnych kryteriów zostały wyznaczone iteracyjnie (Adamus i Łasak, 2009). Po wykonaniu obliczeń na podstawie wskazań 5 ekspertów obliczono wskaźnik spójności $CR = CI / RI$, gdzie $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$. Wartość RI pobierano z tabeli indeksów Saaty'ego (Adamus i Łasak, 2009). Warunkiem akceptacji wyników porównań było osiągnięcie wskaźnika spójności $CR \leq 0,1$. W pracy wszystkie macierze spełniały ten warunek, co potwierdziło wiarygodność ocen ekspertów. Uśrednienie ocen ekspertów pozwoliło na wskazanie najkorzystniejszego skanera.

WYNIKI I DYSKUSJA

Kluczowym elementem systemu jest skaner identyfikujący wrzucane odpady do pojemnika. Spośród przyjętych kryteriów oceny doboru skanera największe znaczenie przypisano kosztowi zakupu urządzenia (K1: waga 44%). Drugim pod względem istotności kryterium okazała się szybkość odczytu (K3: waga 36%), następnie liczba obsługiwanych kodów (K2: waga 15%). Najmniejszą wagę (5%) przypisano zakresowi temperatur pracy (K4). Wskaźnik spójności macierzy porównań kryteriów wyniósł 0,037, co potwierdza wysoką wiarygodność dokonanych ocen przez ekspertów. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę wybranych do analizy skanerów.

Na podstawie przeprowadzonej syntezy ocen globalnych najwyższy priorytet uzyskał wariant W1 (ocena globalna 0,370). Drugie miejsce zajął wariant W3 (0,312). Różnica między najlepszym a drugim w kolejności wariantem wyniosła zaledwie 0,058 punktu. Pozostałe rozwiązania uzyskały wyraźnie niższe oceny: wariant W2: 0,174, natomiast wariant W4: 0,143. Średni wskaźnik spójności dla macierzy alternatyw względem kryteriów wyniósł 0,078 i również mieścił się w granicach dopuszczalnych dla metody AHP. Warianty W1 i W3 uzyskały tak wysoki priorytet ze względu na bardzo niską cenę zakupu, porównywalnie dużą szybkość odczytu oraz najkorzystniejszy zakres temperatur pracy. Skaner typu W1 byłby rekomendowany do zainstalowania na kłapie pojemnika.

Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych cech analizowanych skanerów pod względem przyjętych kryteriów optymalizacyjnych

Table 1. Summary of the characteristic features of the analyzed scanners in terms of the adopted optimization criteria

Wariant Variant code	K1 – Cena zakupu / Acquisition price	K2 – Liczba obsługiwanych kodów / Supported codes quantity	K3 – Szybkość odczytu / Read speed	K4 – Zakres temperatur pracy / Operating temperature range
	[PLN]	[szt.]	[ms]	[°C]
W1	478,00	20	2,5	-20 ÷ +60
W2	2799,00	14	2	-20 ÷ +50
W3	550,00	18	2	-20 ÷ +55
W4	2799,48	22	3	-20 ÷ +50

Źródło/ Source: Opracowanie własne / Own elaboration

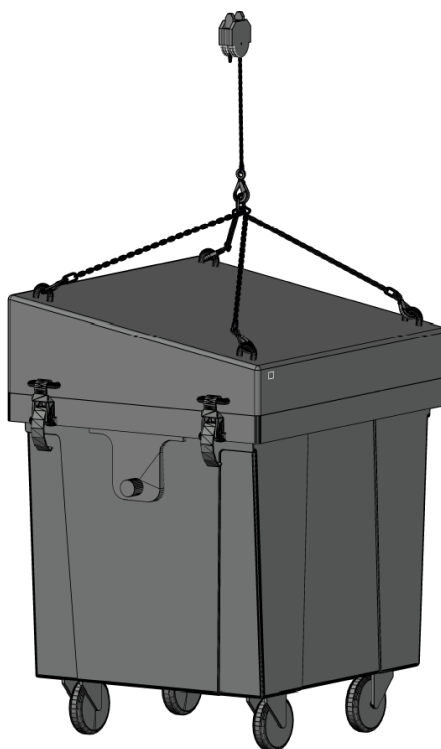
Kłapa wrzutowa z automatycznym systemem otwierania i zamykania stanowi ruchomy element pojemnika umożliwiający kontrolowany wrzut odpadów. W zaprojektowanym rozwiązaniu zastosowano system automatycznego otwierania aktywowany wyłącznie po pozytywnej identyfikacji odpadu za pomocą skanera. Dzięki temu dostęp do wnętrza pojemnika jest możliwy dopiero po pomyślnej weryfikacji, co zapobiega wrzucaniu odpadów do niewłaściwej frakcji. Zamykanie klapy odbywa się automatycznie przy użyciu czujników ruchu monitorujących aktywność użytkownika w strefie otworu wrzutowego. Takie podejście zwiększa ergonomię i bezpieczeństwo, ogranicza emisję zapachów oraz chroni zawartość przed dostępem zwierząt i warunkami atmosferycznymi.

Zaprojektowany system posiada również zintegrowane czujniki optyczne lub ultradźwiękowe pełniące kluczową rolę w rejestracji wrzutu odpadów poprzez wykrycie momentu przejścia przedmiotu przez otwór wrzutowy i przekazanie sygnału do sterownika. Przerwanie wiązki świetlnej lub zmiana sygnału generuje impuls potwierdzający prawidłowy wrzut. Czujniki poziomu napełnienia (ultradźwiękowe lub Time-of-Flight) umożliwiają bieżące monitorowanie stopnia zapełnienia i automatyczne blokowanie klapy po osiągnięciu maksymalnego poziomu. Urządzenia te charakteryzują się wysoką odpornością na warunki zewnętrzne (IP67–IP69).

System uzupełniają elementy mocujące oraz system podnoszenia klapy (łańcuchy stalowe ocynkowane, zaczepy uniwersalne), umożliwiające stabilną integrację z konstrukcją wiaty śmietnikowej oraz bezpieczne

opróżnianie pojemnika z zachowaniem wymagań BHP. Na rysunku 2 przedstawiono model postaci konstrukcyjnej systemu składający się z:

- klapy wrzutowej z widokiem na jej tylną ściankę, w której umieszczony jest punkt podpięcia elektryki, tym punktem jest gniazdko sieciowe 230 V
- dwóch z czterech zaczepów 310 mm x 30 mm z zabezpieczeniem klamrą wykonaną z płaskownika,
- czterech punktów mocujących ABA 1,6t do zawiesi łańcuchowych,
- do podnoszenia klapy wrzutowej zastosowano zawiesia łańcuchowe czterocięgnowe stalowe ocynkowane ($\varnothing$ 6mm), długość robocza pojedynczego cięgna wynosi około 1000 mm, co umożliwia stabilne i równomierne przenoszenie obciążenia,
- elementem nośnym zawiesi jest ogniwo główne średnicy 140mm o symbolu VSAK 4 – 6/140, przeznaczone do współpracy z hakiem VIP Cobra z zabezpieczeniem wyposażonym w mechanizm zapadkowy VCGH (RUD),
- wciągnik łańcuchowy o nośności 3 Mg oraz długości łańcucha 3 m (Star-Lift).

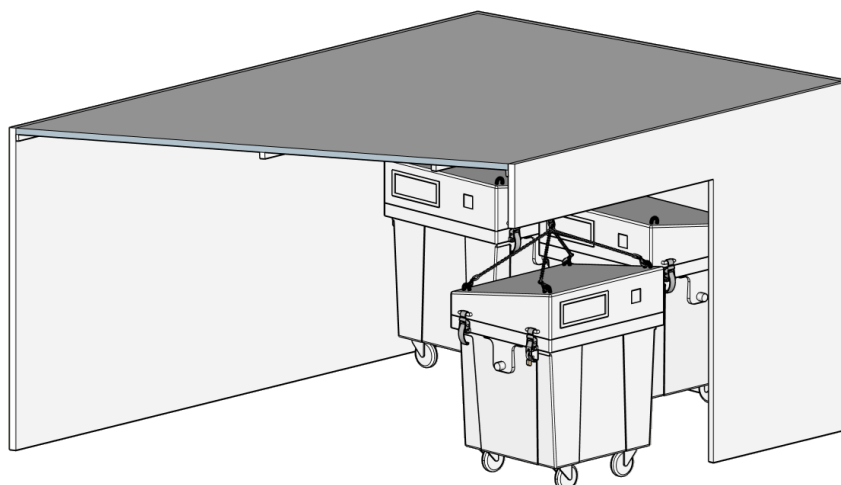


Rysunek 2. Model pojemnika na odpady z klapą oraz systemem podnoszenia

Figure 2. Model of a waste container with a lid and lifting mechanism

Źródło / Source: Opracowanie własne / Own elaboration

Na rysunku 3 zilustrowano wiatę śmietnikową wyposażoną w mechaniczny system z napędem podnoszenia klapy wrzutowej, umieszczony przy wejściu do wiaty. System zaprojektowano z uwzględnieniem przepisów BHP. Ze względu na różnorodność typów istniejących wiat śmietnikowych, rozwiązanie ma charakter koncepcyjny i wymaga indywidualnego montażu w zależności od warunków danej lokalizacji.



Rysunek 3. Model wiaty śmietnikowej z zaprojektowanym systemem

Figure 3. Model of a waste shelter with a designed container system

Źródło / Source: Opracowanie własne / Own elaboration

PODSUMOWANIE

Celem pracy było zaprojektowanie zautomatyzowanego systemu zapobiegającego błędom w segregacji odpadów na osiedlach mieszkaniowych. Opracowany system ma swoje ograniczenia i w przyszłości może być rozwijany np. z zastosowaniem sprzężonych kamer i wytrenowanych algorytmów CNN w kierunku zwiększenia dokładności i niezawodności rozpoznawania odpadów.

1. Zaprojektowany system, składający się z klapy wrzutowej ze zintegrowanym skanerem oraz mechanizmu podnoszenia, stanowi spójne i technicznie wykonalne rozwiązanie, które może być montowane zarówno w nowych, jak i istniejących altanach śmietnikowych oraz pojemnikach o pojemności 1100 dm³. Rozwiązanie poprawia ergonomię pracy służb komunalnych dzięki zastosowaniu mechanizmu podnoszenia zespołu klapy podczas opróżnienia pojemnika oraz stwarza możliwości dalszej integracji z nowoczesnymi technologiami, takimi jak systemy IoT, monitoring poziomu napełnienia czy aplikacje mobilne wspierające edukację i motywację mieszkańców.
2. Zastosowanie metody AHP umożliwiło obiektywny wybór skanera (wariant W1) jako rozwiązania optymalnego pod względem stosunku ceny zakupu do parametrów technicznych, takich jak szybkość odczytu oraz liczba obsługiwanych standardów kodów.
3. Następnym krokiem powinno być wdrożenie pilotażowe w wybranych altanach śmietnikowych spółdzielni mieszkaniowych, co umożliwi weryfikację działania systemu w warunkach rzeczywistych oraz ocenę jego akceptacji społecznej i potencjału wdrożeniowego na szerszą skalę.

LITERATURA

1. Ahmad, G., Aleem, F. M., Alyas, T. (2025). *Intelligent waste sorting for urban sustainability using deep learning*. Scientific Reports, 15, 27078. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08461-w>.
2. d'Obyrn, K., Szalińska, E. (2005). *Odpady komunalne – zbiórka, recykling, unieszkodliwianie*. Wyd. Politechniki Krakowskiej.

3. Dudek, K., Bodziacki, S., Bieszczad, A., Malinowski, M. (2023). *Characteristics of illegal dumping sites on the example of the Trzebinia municipality*. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*, 18(1), 278–293.
4. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów. (2018). *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 150, 109–140.
5. Generowicz, A. (red.). (2025). *Wtyczne dla technologii gromadzenia, odbioru i transportu odpadów komunalnych – praktyczny poradnik*. Wyd. Politechniki Krakowskiej. Kraków
6. Główny Urząd Statystyczny. (2023). *Ochrona środowiska 2023*. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa
7. Hryb, W., Ceglarsz, K. (2021). *Odpady komunalne w aspekcie gospodarki w obiegu zamkniętym*. Wyd. Politechniki Śląskiej.
8. Kwaśniewski, S., Zając, P. (2004). *Automatyczna identyfikacja w systemach logistycznych*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
9. Łukasiewicz, M., Malinowski, M., Młodnicki, K., Religa, A. (2018). *The share of impurities in selectively collected waste in one- and multi-sack systems*. *Ecological Chemistry and Engineering A*, 25(2), 187–195.
10. Malinowski, M., Guzdek, S., Petryk, A., Tomaszek, K. (2021). *A GIS and AHP-based approach to determine potential locations of municipal solid waste collection points in rural areas*. *Journal of Water and Land Development*, 51, 94–101.
11. Pałka D. (2025). Projekt systemu kontroli segregacji odpadów zbieranych selektywnie. Dysertacja pracy dyplomowej inżynierskiej. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
12. Petryk, A., Malinowski, M. (2019). *Inżynieria i ochrona środowiska – wybrane zagadnienia*. Wyd. Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
13. Prusak, A., Stefanów, P. (2014). *AHP – Analityczny Proces Hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych krok po kroku*. Wyd. C.H. Beck. Warszawa.
14. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013 r. poz. 21, z późn. zm.).

Autor korespondencyjny: Mateusz Malinowski
ORCID: 0000-0003-1364-1256
e-mail: mateusz.malinowski@urk.edu.pl

Dominik Pałka

Rafał Jończy
ORCID: 0009-0004-9094-4597
e-mail: rafal.jonczy@urk.edu.pl

Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatyzacji
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116 b,
30-149 Kraków

Otrzymano: 29.06.2026
Zwrócono po recenzji: 17.07.2026
Opublikowano: 21.07.2026