Zastosowanie metody FMEA w analizie cyklu życia folii polietylenowej w rolnictwie

Weronika Rogowska

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 85541@student.pb.edu.pl

Natalia Mikolik

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 85444@student.pb.edu.pl

Łukasz Dragun

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: l.dragun@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0034

Streszczenie

Celem artykułu jest identyfikacja oraz analiza kluczowych zagrożeń prowadzących do uszkodzeń folii polietylenowej wykorzystywanej w rolnictwie, przy zastosowaniu metody FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Folia polietylenowa (HDPE, LDPE, LLDPE) stanowi niezbędny element nowoczesnej agrotechniki, pełniąc funkcje ochronne, stabilizujące mikroklimat oraz wspomagające procesy zakiszania pasz. Mimo wysokiej funkcjonalności, materiał ten jest podatny na degradację wynikającą z błędów procesowych, czynników mechanicznych oraz oddziaływania środowiska naturalnego. W pracy przeanalizowano cztery główne etapy cyklu życia produktu: produkcję metodą cast (wylewu), transport i magazynowanie, instalację oraz eksploatację polową. Przeprowadzona analiza FMEA pozwoliła na wyznaczenie Liczby Priorytetu Ryzyka (WPR) dla poszczególnych wad. Najwyższe wartości wskaźnika krytyczności odnotowano w fazie eksploatacji, gdzie uszkodzenia spowodowane gradobiciem osiągnęły WPR = 224, oraz w fazie produkcji, gdzie niewłaściwa stabilizacja UV (WPR = 180) została uznana za kluczowe zagrożenie dla trwałości materiału. Istotne ryzyka zidentyfikowano również w obszarze montażu (uszkodzenia od elementów konstrukcyjnych) oraz logistyki (deformacje termiczne). Na podstawie wyników analizy oraz opracowanego wykresu Pareto wskazano, że priorytetowe działania korygujące powinny koncentrować się na optymalizacji dozowania dodatków stabilizujących UV, automatyzacji kontroli

jakości surowca oraz wdrożeniu rygorystycznych procedur montażowych i ochronnych w warunkach polowych. Wykazano, że systematyczne podejście do analizy ryzyka pozwala nie tylko na ograniczenie strat ekonomicznych i materiałowych, ale również przyczynia się do zmniejszenia negatywnego wpływu zużytych tworzyw sztucznych na środowisko poprzez wydłużenie czasu ich użytkowania.

Słowa kluczowe

FMEA, WPR, folia polietylenowa

Wstęp

Folia polietylenowa odgrywa istotną rolę jako środek produkcji w rozwoju rolnictwa. Japonia, będąca pionierem w badaniach nad materiałami do jej wytwarzania, zaczęła wykorzystywać ją już w 1951 roku. W późniejszym czasie rozwiązanie to zostało przyjęte także w krajach rozwiniętych, takich jak Stany Zjednoczone, Włochy czy Francja [Sun i in., 2020].

Materiały te znajdują zastosowanie między innymi w postaci folii ściółkujących, które hamują wzrost chwastów, redukują utratę wody z gleby poprzez parowanie oraz pomagają w utrzymaniu odpowiedniej temperatury podłoża [Zhao i in., 2023]. Ponadto folie polietylenowe stosowane są do produkcji folii kiszonkarskich oraz do owijania bel sianokiszonki, co umożliwia zabezpieczenie pasz przed dostępem tlenu i zapewnia prawidłowy przebieg procesu fermentacji. W rolnictwie wykorzystuje się je również jako osłony rzędów roślin oraz w konstrukcjach niskich i wysokich tuneli foliowych, gdzie pełnią funkcję ochronną przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi i sprzyjają tworzeniu korzystnego mikroklimatu dla wzrostu roślin [Hayes, 2025].

Pomimo licznych zalet, materiały te są narażone na różnego rodzaju uszkodzenia, wynikające zarówno z czynników mechanicznych, jak i oddziaływania promieniowania UV, temperatury czy wilgotności. Uszkodzenia te mogą prowadzić do obniżenia funkcjonalności folii, strat ekonomicznych oraz negatywnego wpływu na środowisko naturalne, zwłaszcza w kontekście problemów z ich utylizacją.

Celem artykułu jest zastosowanie metody FMEA do analizy cyklu życia folii polietylenowej w rolnictwie w celu identyfikacji kluczowych zagrożeń prowadzących do jej uszkodzeń oraz opracowania działań minimalizujących ryzyko ich występowania.

1. Przegląd literatury

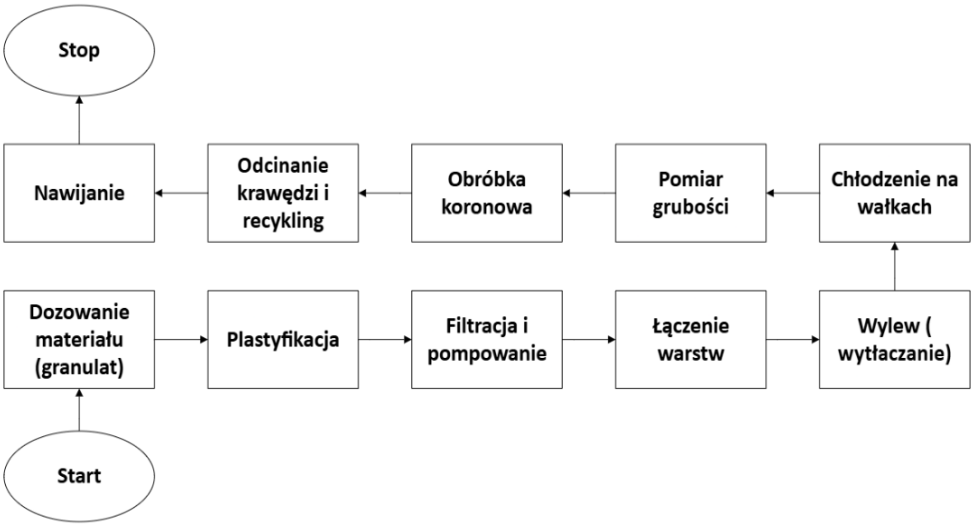
Podstawowymi odmianami polietylenu stosowanymi w produkcji folii elastycznych są HDPE, LDPE oraz LLDPE. HDPE (polietylen o wysokiej gęstości) charakteryzuje się gęstością przekraczającą 0,94 g/cm³, natomiast LDPE (polietylen o niskiej gęstości) posiada gęstość w przedziale 0,915–0,939 g/cm³. Z kolei LLDPE, czyli liniowy polietylen o niskiej gęstości, ma gęstość wynoszącą 0,88–0,93 g/cm³ i jest kopolimerem etylenu z α-olefinami (C4–C8), otrzymywanym z wykorzystaniem katalizatorów Zieglera–Natty lub układów metalocenowych. W produkcji folii stosuje się również dodatki poprawiające właściwości użytkowe tworzyw, do których należą [Gibas, 2014]:

- Stabilizatory UV – to substancje chroniące polimery przed degradacją wywołaną promieniowaniem UV, które pochłaniają energię, wygaszają wzbudzone cząsteczki lub neutralizują wolne rodniki, dzięki czemu spowalniają proces starzenia materiału. Stosuje się między innymi salicyniany, oksoaniliny oraz orto-hydroksybenzofenony;
- Dodatki antyblokingowe – zapobiegają sklejaniu się warstw folii polietylenowych poprzez zwiększenie chropowatości powierzchni i ograniczenie adhezji między nimi, a do ich najczęstszych należą krzemionka syntetyczna, talk, kaolin oraz kreda;
- Dodatki antyfoggingowe – przeciwdziałają powstawaniu efektu zamglenia na foliach, ponieważ zmieniają sposób kondensacji pary wodnej i powodują tworzenie równomiernej, cienkiej warstwy zamiast kropli, a wykorzystuje się w tym celu między innymi estry gliceryny, poli(estry gliceryny), estry kwasu sorbitowego i ich eto ksylany;
- Dodatki antyelektrostatyczne – ograniczają gromadzenie się ładunków elektrostatycznych w tworzywach sztucznych poprzez poprawę przewodnictwa powierzchniowego lub tworzenie warstwy ułatwiającej ich rozpraszanie. W tym celu stosuje się antystatyki zewnętrzne, antystatyki wewnętrzne oraz wypełniacze przewodzące;
- Dodatki przedłużające świeżość żywności – to rozwiązania stosowane w opakowaniach, które ograniczają przenikanie tlenu i wilgoci, dzięki czemu spowalniają proces psucia się produktów i wydłużają ich trwałość.

Folia produkowana jest dwiema głównymi metodami blown oraz cast, które różnią się zarówno sposobem wytwarzania, jak i właściwościami końcowego produktu. Metoda blown czyli rozdmuchu polega na podgrzaniu żywicy a następnie jej rozdmuchiwaniu w dwóch kierunkach wzdłużnym i poprzecznym. Po uformowaniu materiał jest chłodzony powietrzem. Folia uzyskana w ten sposób cechuje się dobrą

odpornością na przebicia i uszkodzenia oraz wysoką kleistością, jednak ma ograniczoną elastyczność i po przekroczeniu określonego stopnia rozciągnięcia może ulec nagłemu zerwaniu. Natomiast metoda cast zwana również wylewem maszynowym polega na wylewaniu stopionego tworzywa przez specjalne szczelinowe matryce, a następnie jego rozciąganiu i szybkim chłodzeniu przy użyciu rolek. W procesie tym często stosuje się polietylen, niekiedy z dodatkiem innych tworzyw lub barwników, co umożliwia produkcję folii kolorowych. Metoda ta jest szybsza i bardziej wydajna niż blown dzięki czemu folia cast jest tańsza w produkcji. Wyróżnia się ona dużą elastycznością wytrzymałością oraz odpornością na rozdarcia [https://cast.pl/, 08.04.2026].

Proces wytwarzania folii metodą cast przebiega w kilku etapach technologicznych, które przedstawiono na rysunku 1. Na początku następuje dozowanie surowca, czyli polimeru wzbogaconego o stabilizatory, które chronią materiał przed utlenianiem oraz degradacją termiczną. Surowiec jest podawany najczęściej w sposób grawimetryczny do układów plastyfikujących wytłaczarek. Następnie dochodzi do plastyfikacji, czyli stopienia materiału w temperaturze dobranej do rodzaju polimeru. W kolejnym etapie stopione tworzywo przechodzi przez system filtracji oraz pompy, co pozwala oczyścić i ustabilizować jego przepływ. Potem materiał trafia do bloku zasilającego, gdzie możliwe jest precyzyjne połączenie kilku warstw różnych polimerów. Tak przygotowana masa kierowana jest do szerokiej dyszy wylewowej, z której jest równomiernie wytłaczana w formie płynnej folii. Następnie materiał trafia na obracające się wałki chłodzące. Pierwsze z nich są intensywnie schładzane, co pozwala szybko ustabilizować strukturę folii, a kolejne utrzymują temperaturę otoczenia. Bezpośrednio po tym etapie odbywa się kontrola grubości folii, która pozwala na bieżące monitorowanie jej jakości i parametrów. Kolejno folia przechodzi obróbkę koronową, której celem jest zwiększenie jej zwilżalności oraz poprawa przyczepności powierzchni. Następnie usuwane są krawędzie materiału, a powstałe odpady są rozdrabniane i ponownie wykorzystywane w procesie produkcji, co pozwala ograniczyć straty surowca. Ostatnim etapem jest nawijanie gotowej, schłodzonej folii na rolki, co umożliwia jej dalszy transport i zastosowanie w różnych branżach [Dziadowiec i in., 2023].



Rys. 1. Schemat blokowy procesu produkcji folii polietylenowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Dziadowiec i in., 2023, s. 10-12].

Zużyte folie polietylenowe w rolnictwie stanowią trudny odpad, ponieważ często są zabrudzone ziemią, resztkami roślin oraz wilgocią, co utrudnia ich ponowne przetworzenie. Zanim trafią do recyklingu, wymagają właściwego przygotowania: trzeba je oczyścić z większych zanieczyszczeń, posortować według rodzaju oraz przechowywać w suchych warunkach. [https://ekologistyka24.pl/,08.04.2026]. Dopiero wtedy są przekazywane do zakładów przetwórczych, gdzie przechodzą proces mycia, rozdrabniania i przetwarzania na regranulat wykorzystywany później do produkcji nowych wyrobów z tworzyw sztucznych, na przykład worków czy rur. Recykling folii polietylenowych jest wymagający i kosztowny, głównie ze względu na ich rozproszenie w gospodarstwach oraz wysoki stopień zabrudzenia. Mimo to ma duże znaczenie dla ochrony środowiska, ponieważ pozwala ograniczyć ilość odpadów trafiających na składowiska oraz zmniejsza zużycie surowców pierwotnych. Dlatego właściwa zbiórka i zagospodarowanie folii rolniczych jest bardzo istotna [Jakubowska i in. 2012]

2. Metodyka badań

Metoda FMEA to podejście analityczne służące do określania zależności przyczynowo skutkowych, które prowadzą do powstawania możliwych wad produktu, z uwzględnieniem poziomu ryzyka i jego krytyczności. Jej głównym celem jest systematyczne i uporządkowane wykrywanie potencjalnych niezgodności w produkcie lub procesie, a następnie podejmowanie działań mających na celu ich wyeliminowanie lub ograniczenie ryzyka ich wystąpienia [Rychły-Lipińska, 2007].

W literaturze, oprócz analizy FMEA wyrobu i procesu (PFMEA), wyróżnia się także inne jej odmiany, takie jak SFMEA (dotycząca systemu), MFMEA (odnosząca się do maszyn) czy EFMEA (związana ze środowiskiem), a także kilka dodatkowych typów. Metoda FMEA jest efektywnym narzędziem doskonalenia produktu, ponieważ systematyczne identyfikowanie potencjalnych niezgodności pozwala na wdrażanie nowych rozwiązań. Rozwiązania te nie tylko eliminują istniejące problemy, lecz również mogą inspirować powstawanie innowacyjnych usprawnień danego wyrobu [Kowalik, 2018]. Wspiera również wybór alternatywnych rozwiązań już na etapie projektowania, co pozwala na optymalizację procesu. Dzięki jej zastosowaniu można eliminować zbędne operacje w produkcji, a także dobrać właściwe metody kontroli i badań w trakcie realizacji procesu. Ponadto przyczynia się ona do doskonalenia jakości oraz właściwości oferowanych produktów i usług [Dragun, 2016]. Aby prawidłowo zastosować metodę FMEA, należy wykonać następujące kroki [Batko i in., 2023]:

- określić analizowany system;
- przygotować listę możliwych wad lub usterek w obrębie tego systemu;
- wskazać potencjalne skutki tych wad;
- zidentyfikować ich możliwe przyczyny;
- przeprowadzić analizę potencjalnych problemów;
- oszacować ryzyko związane z poszczególnymi wadami;
- zaplanować i wdrożyć działania zapobiegawcze oraz ocenić ich efektywność.

Dla każdej wady należy przeanalizować jej przebieg. Trzeba określić, co powoduje daną wadę i jakie skutki ona wywołuje. Następnie należy przypisać jej trzy parametry oceny: Z – oznaczający wagę problemu z punktu widzenia odbiorcy według tabeli 1, R – czyli prawdopodobieństwo pojawienia się błędu zgodnie z tabelą 2 oraz, W – określający stopień trudności jego wykrycia zgodnie z tabelą 3.

Tab. 1. Wskazówki do przyjmowania wskaźnika Z

Z	**Znaczenie wady**	**FMEA wyrobu/konstrukcji/procesu**
1	Bardzo małe	Wada wyrobu nie wpływa na warunki użytkowania. Wada procesu nie wpływa na jakość wyrobu lub usługi
2–3	Małe	Wada ma niewielkie znaczenie i prowadzi jedynie do drobnego pogorszenia właściwości wyrobu. Wada procesu w nieznacznym stopniu wpływa na jakość wyrobu/usługi.
4–6	Przeciętne	Wada wywołuje wyraźne niezadowolenie użytkownika. Wyrób nie zaspokaja potrzeb lub jest uciążliwy. Użytkownik dostrzega mankamenty. Wada procesu znacząco wpływa na jakość wyrobu, a naprawa wiąże się z przeciętnymi kosztami.
7–8	Duże	Niezadowolenie użytkownika jest duże i wynika z niemożności użycia wyrobu zgodnie z przeznaczeniem (bez zagrożenia bezpieczeństwa lub naruszenia prawa). Wada procesu powoduje powstanie wyrobu niezgodnego, którego naprawa jest kosztowna.
9–10	Bardzo duże – krytyczne	Wada zagraża bezpieczeństwu użytkownika lub narusza przepisy prawa. Wada procesu uniemożliwia naprawę wyrobu.

Źródło: [Hamrol, 2013, s. 382].

Tab. 2. Wskazówki do przyjmowania wskaźnika R

R	**Wystąpienie**	
1	Nieprawdopodobne	Nie występuje.
2	Prawie nieprawdopodobne	Wyprodukowanie wyrobu niezgodnego (braku) jest prawie wykluczone; w procesach realizowanych wcześniej nie występowało. Bardzo wysoka zdolność jakościowa procesu i maszyny.
3	Rzadko	Zdarzają się braki, ale rzadko. Wysoka zdolność jakościowa procesu i maszyny.
4 5 6	Przeciętnie	Pojawienie się braku jest bardzo prawdopodobne. Proces cechuje się dobrą zdolnością jakościową, ale jest niestabilny.
7 8	Często	Należy spodziewać się, że często pojawiają się braki.
9 10	Bardzo często	Błąd prawie nie do uniknięcia.

Źródło: [Hamrol, 2013, s. 383].

Tab. 3. Wskazówki do przyjmowania wskaźnika W

W	Wykrywalność wad	Opis
1–2	Bardzo wysoka	Stosowane środki kontroli i nadzorowania dają prawie pewność wykrycia wady wyrobu lub zakłócenia procesu, które może ją wywołać.
3–4	Wysoka	Stosowane środki kontroli i nadzorowania dają dużą szansę wykrycia wady wyrobu lub zakłócenia procesu.
5–6	Przeciętna	Stosowane środki kontroli i nadzorowania dają szansę wykrycia wady, jednak ze względu na ograniczone możliwości kontroli 100% są one ograniczone.
7–8	Niska	Jest bardzo prawdopodobne, że stosowane środki kontroli i nadzorowania nie wykryją wady wyrobu lub zakłócenia procesu.
9	Bardzo niska	Z dużą pewnością można sądzić, że stosowane środki kontroli nie wykryją wady wyrobu lub zakłócenia procesu.
10	Niemożliwa	Nie są znane środki kontroli i nadzorowania umożliwiające wykrycie danej wady wyrobu lub zakłócenia procesu.

Źródło: [Hamrol, 2013, s. 384].

Po obliczeniu poszczególnych wskaźników wyznacza się wskaźnik priorytetu ryzyka (WPR), korzystając ze wzoru:

$$\mathbf{WPR = Z \times R \times W}$$

Wartość tego wskaźnika pozwala uporządkować przyczyny problemów według ich ważności. Im wyższy wynik WPR, tym dana wada jest bardziej istotna i tym szybciej należy podjąć działania, aby ją wyeliminować lub ograniczyć. Takie podejście ma sens szczególnie wtedy, gdy różnice pomiędzy wartościami wskaźników są wyraźne. To zespół prowadzący analizę FMEA decyduje, jakie przedziały i progi uznaje za właściwe [Rogowska, 2023].

Określenie zakresu analizy FMEA ma duże znaczenie dla jej wyników. Gdy obejmuje ona zbyt mało elementów, może nie dostarczyć żadnych nowych wniosków. Z kolei zbyt szeroki zakres wiąże się z dużym nakładem czasu i wysokimi kosztami. Zwykle nie ma potrzeby ponownego analizowania części dobrze znanych z wcześniejszych produktów, chyba że istnieje ryzyko ich niezgodności z nowymi rozwiązaniami. Ważne jest także dobranie odpowiedniego poziomu szczegółowości. Zbyt dokładne rozbicie systemu na elementy nie zawsze jest korzystne, ponieważ może utrudnić dostrzeżenie problemów wynikających z zależności między poszczególnymi częściami produktu [https://mfiles.pl/, 15.04.2026].

3. Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonej analizy procesu zidentyfikowano kluczowe etapy cyklu życia folii polietylenowej stosowanej w rolnictwie. Obejmuje on produkcję folii, realizowaną najczęściej metodą wylewu, a następnie jej transport oraz magazynowanie przed zastosowaniem. Kolejnym etapem jest instalacja w warunkach gospodarstw rolnych, w tym w konstrukcjach takich jak tunele foliowe lub w procesie owijania bel z wykorzystaniem owijarek rolniczych. Po wdrożeniu folia przechodzi fazę eksploatacji w warunkach polowych, gdzie podlega oddziaływaniu czynników środowiskowych i użytkowych. Ostatnim etapem cyklu życia jest demontaż materiału oraz jego zagospodarowanie poużytkowe, obejmujące procesy recyklingu lub unieszkodliwiania.

Każdy z wymienionych etapów charakteryzuje się specyficznymi zagrożeniami mogącymi prowadzić do uszkodzeń materiału. Folia polietylenowa, mimo swojej wszechstronności i odporności na wilgoć oraz chemikalia, wykazuje podatność na czynniki mechaniczne, termiczne oraz promieniowanie UV w warunkach eksploatacji rolniczej [https://agrowrap.pl/,12.04.2026].

W fazie produkcji folii metodą cast zidentyfikowano następujące potencjalne wady, do których należą: niejednorodna grubość folii, zbyt mała ilość dodatku antyblokowego, wtrącenia obce w strukturze oraz niewłaściwa stabilizacja UV [Dziadowiec i in., 2023]. Analiza tych wad została przedstawiona w tabeli 4.

Tab. 4. Analiza ryzyka wad w etapie produkcji folii – FMEA

Potencjalna wada	Potencjalna przyczyna	Skutek wady	Z	R	W	WPR
Niejednorodna grubość folii	Niewłaściwe parametry wytłaczania	Osłabienia strukturalne, pęknięcia	7	4	5	140
Zbyt mała ilość dodatku antyblokwego	Błąd w dozowaniu komponentów	Sklejanie się warstw folii	6	5	4	120
Wtrącenia obce w strukturze	Zanieczyszczenia surowca	Punktowe osłabienia, pęknięcia	8	3	6	144
Niewłaściwa stabilizacja UV	Niedostateczna ilość stabilizatorów	Przyspieszona degradacja fotochemiczna	9	4	5	180

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza FMEA wykazała zróżnicowany poziom ryzyka dla zidentyfikowanych niezgodności procesu produkcji folii. Najwyższą wartość liczby priorytetu ryzyka (WPR = 180) odnotowano dla niewłaściwej stabilizacji UV, co wskazuje na krytyczne znaczenie tego czynnika ze względu na możliwość przy-

spieszonej degradacji materiału. Wysokie wartości WPR uzyskały również wtrącenia obce w strukturze (144) oraz niejednorodna grubość folii (140), które wpływają na obniżenie właściwości mechanicznych produktu. Najniższe spośród analizowanych ryzyk (WPR = 120) dotyczyło niewystarczającej ilości dodatku antyblokowego, skutkującej pogorszeniem właściwości użytkowych.

W celu ograniczenia zidentyfikowanych ryzyk zaleca się wdrożenie działań korygujących. Przede wszystkim należy zapewnić dokładną kontrolę dozowania stabilizatorów UV oraz sprawdzać jakość surowców. Warto także zastosować systemy filtracji i dbać o czystość procesu, aby wyeliminować wtrącenia obce. Należy również zoptymalizować parametry wytłaczania oraz wprowadzić ciągły pomiar grubości folii. W przypadku dodatków antyblokowych wskazana jest automatyzacja ich dozowania oraz wprowadzenie prostych procedur kontrolnych.

W analizie ryzyka wad na etapie transportu i magazynowania zidentyfikowano potencjalne problemy obejmujące uszkodzenia mechaniczne rolek, deformacje termiczne oraz zawilgocenie opakowania[https://agrowrap.pl/,12.04.2026]. Dokładna analiza tych wad została przedstawiona w tabeli 5.

Tab. 5. Analiza ryzyka wad w etapie transportu i magazynowania – FMEA

Potencjalna wada	Potencjalna przyczyna	Skutek wady	Z	R	W	WPR
Uszkodzenia mechaniczne rolek	Niewłaściwe zabezpieczenie ładunku	Perforacje, rozdarcia krawędzi	6	5	3	90
Deformacja termiczna	Przechowywanie w zbyt wysokiej temperaturze	Sklejenie warstw, utrata właściwości	7	4	4	112
Zawilgocenie opakowania	Niewłaściwe przechowywanie	Rozwój pleśni, degradacja powierzchni	5	3	5	75

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza FMEA dla etapu transportu i magazynowania wskazuje na umiarkowany poziom ryzyka analizowanych niezgodności. Najwyższą wartość liczby priorytetu ryzyka (WPR = 112) odnotowano dla deformacji termicznej, wynikającej z przechowywania materiału w zbyt wysokiej temperaturze, co może prowadzić do sklejenia warstw oraz pogorszenia właściwości użytkowych folii. Kolejnym istotnym zagrożeniem są uszkodzenia mechaniczne rolek (WPR = 90), spowodowane niewłaściwym zabezpieczeniem ładunku, skutkujące perforacjami i rozdarciami krawędzi. Najniższe ryzyko (WPR = 75) dotyczy zawilgocenia opakowania, które może prowadzić do degradacji powierzchni oraz rozwoju mikroorganizmów.

Aby zminimalizować rozpoznane zagrożenia, należy wprowadzić rygorystyczny nadzór nad łańcuchem dostaw. Kluczowe jest monitorowanie temperatury na każdym etapie składowania i transportu oraz dbałość o stabilność ładunku poprzez poprawne procedury logistyczne. Dodatkowo, w celu ochrony przed wilgocią,

wymagane jest stosowanie hermetycznych opakowań oraz stała kontrola parametrów powietrza w magazynach.

W fazie instalacji folii wyróżniono potencjalne wady obejmujące rozdarcia podczas rozwijania, niewłaściwe naprężenie folii oraz uszkodzenia spowodowane kontaktem z konstrukcją. Analiza tych wad została przedstawiona w tabeli 6.

Tab. 6. Analiza ryzyka wad w etapie instalacji folii – FMEA

Potencjalna wada	Potencjalna przyczyna	Skutek wady	Z	R	W	WPR
Rozdarcia podczas rozwijania	Zbyt duże naprężenie podczas montażu	Konieczność wymiany, straty materiałowe	6	6	3	108
Niewłaściwe naprężenie folii	Brak przeszkolenia personelu	Powstawanie fałd, gromadzenie wody	5	5	4	100
Uszkodzenia od konstrukcji	Ostre krawędzie elementów mocujących	Punktowe perforacje, pęknięcia	7	5	4	140

Źródło: opracowanie własne.

Analiza FMEA dla etapu instalacji folii wskazuje na istotne zróżnicowanie poziomu ryzyka poszczególnych niezgodności. Najwyższą wartość liczby priorytetu ryzyka (WPR = 140) odnotowano dla uszkodzeń wynikających z kontaktu z elementami konstrukcyjnymi, takimi jak ostre krawędzie, co prowadzi do punktowych perforacji i pęknięć materiału. Wysokie ryzyko wiąże się również z rozdarciami podczas rozwijania folii (WPR = 108), spowodowanymi nadmiernym naprężeniem w trakcie montażu, co generuje straty materiałowe. Nieco niższe, lecz nadal istotne ryzyko (WPR = 100) dotyczy niewłaściwego naprężenia folii wynikającego z braku odpowiedniego przeszkolenia personelu, prowadzącego do powstawania fałd i gromadzenia się wody.

Aby skutecznie ograniczyć zidentyfikowane ryzyka, rekomenduje się wdrożenie działań korygujących obejmujących kontrolę oraz właściwe przygotowanie elementów konstrukcyjnych, w tym usuwanie ostrych krawędzi lub ich odpowiednie zabezpieczanie. Kluczowe jest również przestrzeganie standardów dotyczących prawidłowego naprężenia folii oraz stosowanie narzędzi umożliwiających jego precyzyjną kontrolę podczas montażu. Istotnym uzupełnieniem tych działań jest przeprowadzenie szkoleń w zakresie właściwych technik montażowych, co pozwoli zminimalizować ryzyko błędów operacyjnych i podnieść ogólną jakość wykonywanych instalacji.

Na etapie użytkowania folii zidentyfikowano potencjalne wady obejmujące degradację fotochemiczną, uszkodzenia od gradu, degradację termiczną oraz uszkodzenia spowodowane przez zwierzęta. Dokładna analiza tych wad została przedstawiona w tabeli 7.

Tab. 7. Analiza ryzyka wad w etapie eksploatacji folii – FMEA

Potencjalna wada	Potencjalna przyczyna	Skutek wady	Z	R	W	WPR
Degradacja fotochemiczna	Ekspozycja na promieniowanie UV	Kruszenie, utrata elastyczności	8	7	3	168
Uszkodzenia od gradu	Zjawiska atmosferyczne	Perforacje, utrata szczelności	8	4	7	224
Degradacja termiczna	Ekstremalne warunki pogodowe (temperatura)	Utrata elastyczności, pękanie	7	6	4	168
Uszkodzenia od zwierząt	Działalność ptaków, gryzoni	Lokalne perforacje	5	5	6	150

Źródło: opracowanie własne.

Analiza FMEA dla etapu eksploatacji folii wskazuje na wysoki poziom ryzyka związany z oddziaływaniem czynników środowiskowych. Najwyższą wartość liczby priorytetu ryzyka (WPR = 224) odnotowano dla uszkodzeń spowodowanych przez grad, które prowadzą do perforacji i utraty szczelności materiału, a jednocześnie są trudne do wykrycia. Wysokie wartości WPR (168) dotyczą również degradacji fotochemicznej oraz termicznej, wynikających z długotrwałej ekspozycji na promieniowanie UV oraz ekstremalne warunki pogodowe, co skutkuje kruszeniem i utratą elastyczności folii. Istotnym zagrożeniem są także uszkodzenia powodowane przez zwierzęta (WPR = 150), prowadzące do lokalnych perforacji.

W celu ograniczenia ryzyka zaleca się stosowanie folii o zwiększonej odporności na promieniowanie UV oraz skrajne temperatury, a także prowadzenie regularnych kontroli jej stanu podczas eksploatacji. W przypadku zagrożeń związanych z warunkami atmosferycznymi warto rozważyć zastosowanie dodatkowych wzmocnień konstrukcyjnych, które zmniejszą skutki ewentualnych opadów gradu. Aby zminimalizować ryzyko uszkodzeń biologicznych, wskazane jest wykorzystanie środków odstraszających zwierzęta oraz odpowiednie zabezpieczenie obiektu przed ich dostępem.

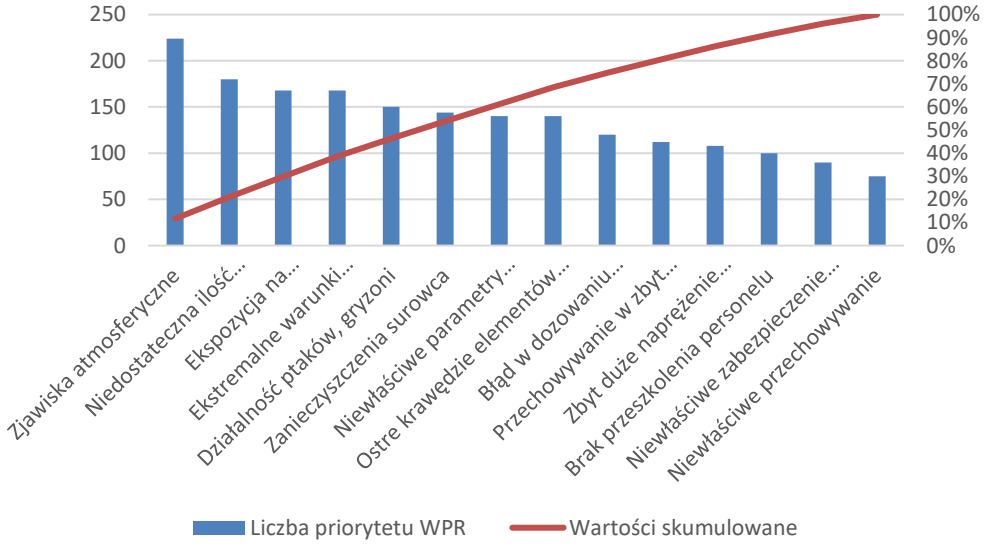
W ramach przeprowadzonej analizy FMEA dokonano oceny wszystkich zidentyfikowanych potencjalnych wad pod kątem ich znaczenia, prawdopodobieństwa wystąpienia oraz możliwości wykrycia. Na podstawie obliczonego wskaźnika priorytetu ryzyka (WPR) wyłoniono niezgodności, które stanowią największe zagrożenie dla stabilności jakości wyrobu. Zestawienie przedstawione w tabeli 8 obejmuje cztery wady o najwyższych wartościach WPR, co pozwala skupić uwagę na obszarach wymagających pilnej interwencji, działań korygujących lub dodatkowych zabezpieczeń procesowych.

Tab. 8. Zestawienie wyników dla czterech potencjalnych wad, które uzyskały najwyższy wskaźnik priorytetu

Potencjalna wada	Potencjalna przyczyna	WPR
Uszkodzenia od gradu	Zjawiska atmosferyczne	224
Niewłaściwa stabilizacja UV	Niedostateczna ilość stabilizatorów	180
Degradacja fotochemiczna	Ekspozycja na promieniowanie UV	168
Degradacja termiczna	Ekstremalne warunki pogodowe (temperatura)	168

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 2 został przedstawiony wykres Pareto dla analizy metody FMEA, przedstawiający rozkład liczby priorytetów (WPR) dla zidentyfikowanych przyczyn niezgodności oraz ich skumulowany udział procentowy. Wykres pozwala na wizualne wskazanie najważniejszych czynników wpływających na ryzyko i ułatwia określenie obszarów wymagających priorytetowych działań korygujących.



Rys. 2. Wykres PARETO dla folii polietylenowej wykorzystywanej w rolnictwie.

Źródło: opracowanie własne.

Z analizy wynika, że niewielka liczba przyczyn generuje największą część całkowitego ryzyka. Około 20% najważniejszych czynników odpowiada za zdecydowaną większość problemów, co oznacza, że działania naprawcze powinny w pierwszej kolejności koncentrować się na takich obszarach jak: zjawiska atmosferyczne,

niewystarczająca liczba stabilizatorów, ekspozycja na promieniowanie UV oraz ekstremalne warunki pogodowe. Eliminacja lub ograniczenie tych przyczyn przyniesie największą redukcję ryzyka w analizowanym procesie.

4. Dyskusja wyników

Analiza właściwości mechanicznych folii poużytkowych wykazała, że czas ich eksploatacji oraz warunki otoczenia mają kluczowy wpływ na degradację materiału polietylenowego. W badaniach folii silosowej (folia I) odnotowano spadek modułu Younga o około 25% po ośmiu miesiącach użytkowania, przy czym najbardziej gwałtowne obniżenie parametrów sprężystych nastąpiło w okresie zimowym, co potwierdza destrukcyjny wpływ niskich temperatur rzędu -6,82°C na strukturę polimeru. Jednocześnie zaobserwowano, że spadkowi modułu Younga towarzyszy wzrost odporności na przebicie, co wynika ze zmian zachodzących w obszarze sprężystym folii pod wpływem czasu. W przypadku folii do owijania bel (folia II) wykazano wyraźne różnice między warstwą zewnętrzną (IIB) a wewnętrzną (IIA); folia poddana bezpośredniemu działaniu czynników atmosferycznych cechowała się mniejszą wytrzymałością przy zerwaniu niż ta mająca kontakt z kiszonką, choć jednocześnie posiadała wyższy moduł Younga, co może być efektem zróżnicowania procesów degradacji fotochemicznej i fermentacyjnej. Odnotowano również, że wydłużenie względne przy zerwaniu ulega zmniejszeniu wraz z upływem czasu, spadając w przypadku folii silosowej z 290% do 250% [Kloziński i Jakubowska, 2012].

Przenosząc te dane na grunt analizy ryzyka przeprowadzonej w niniejszym artykule, najwyższą wartość Liczby Priorytetu Ryzyka przypisano uszkodzeniom od gradu (WPR = 224), co bezpośrednio wiąże się z badaną w literaturze odpornością na przebicie i działanie sił prostopadłych do powierzchni. Wyniki eksperymentalne dotyczące degradacji pod wpływem temperatury i słońca potwierdzają zasadność wysokich wskaźników krytyczności dla degradacji fotochemicznej oraz termicznej (WPR = 168 dla każdego czynnika), a także dla niewłaściwej stabilizacji UV na etapie produkcji (WPR = 180), która została uznana za kluczowe zagrożenie procesowe. Zidentyfikowane w badaniach polowych mikrorozciągnięcia folii kontaktującej się z kiszonką oraz błędy montażowe znajdują odzwierciedlenie w analizie FMEA w obszarze uszkodzeń od konstrukcji (WPR = 140) oraz rozdarć podczas instalacji (WPR = 108). Opracowany wykres Pareto wskazuje, że priorytetowe działania korygujące, takie jak optymalizacja dozowania stabilizatorów UV oraz wdrożenie rygorystycznych procedur montażowych, pozwolą zminimalizować te najistotniejsze ryzyka mechaniczne i środowiskowe, na które wskazują zarówno testy wytrzymałościowe, jak i analiza systemowa.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza FMEA w połączeniu z przeglądem właściwości mechanicznych folii poużytkowych pozwala na sformułowanie kompleksowych wniosków dotyczących trwałości materiałów polimerowych w rolnictwie. Z naukowego punktu widzenia badania potwierdzają, że polietylen (PE-LD, LLDPE) ulega sukcesywnej degradacji strukturalnej pod wpływem synergistycznego działania promieniowania UV oraz zmiennych warunków termicznych. Kluczowym spostrzeżeniem jest korelacja między spadkiem modułu Younga (Et) a zmianą odporności na przebicie, co wskazuje na przedefiniowanie właściwości sprężysto-plastycznych materiału w trakcie jego cyklu życia. Wyniki te wpisują się w nurt literatury przedmiotu, wskazujący na istotne różnice w tempie starzenia się warstw folii w zależności od ich ekspozycji na czynniki atmosferyczne lub agresywne środowisko fermentacyjne (kiszonkę).

Z praktycznego punktu widzenia, najwyższa wartość Liczby Priorytetu Ryzyka (WPR = 224 dla gradu oraz WPR = 180 dla stabilizacji UV) jednoznacznie wskazuje obszary wymagające natychmiastowej interwencji jakościowej. Implikacją tych wyników jest konieczność zautomatyzowania procesu dozowania dodatków uszlachetniających już na etapie produkcji metodą cast, co pozwoli wyeliminować wady procesowe o najwyższej krytyczności. Ponadto, zidentyfikowanie kluczowych zagrożeń na etapie montażu i eksploatacji sugeruje potrzebę opracowania bardziej rygorystycznych procedur instalacyjnych oraz systemów ochronnych, które zminimalizują ekonomiczne skutki uszkodzeń mechanicznych. Optymalizacja tych 20% kluczowych przyczyn błędów, zgodnie z opracowanym wykresem Pareto, umożliwi nie tylko wydłużenie czasu życia folii, ale także realne zmniejszenie obciążenia środowiska naturalnego odpadami z tworzyw sztucznych.

ORCID iD

Łukasz Dragun: https://orcid.org/0000-0001-6768-6818

Literatura

1. Agrowrap, *Instrukcja obsługi*, https://agrowrap.pl/wp-content/uploads/2019/09/instrukcja_agrowrap_pl.pdf/ [12.04.2026].
2. Batko M., Konieczny J., Butor A. (2023), *Ocena ryzyka zastosowania bezdotykowej metody kontroli nawierzchni kolejowej jako metody alternatywnej dla kontroli infrastruktury przeprowadzanej przez pracowników*, Problemy Kolejnictwa 198, s. 12.

3. CAST,https://cast.pl/magazyn/cast-i-blown-dwie-metody-produkcji-folii-strtch/ [08.04.2026].
4. Dragun Ł. (2016), *Analiza ryzyka metodą FMEA pracy wentylatora powietrza świeżego jako elementu systemu skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, nr 4, s. 23.
5. Dziadowiec D., Matykiewicz D., Szostak M., Andrzejewski J. (2023*), Overview of the Cast Polyolefin Film Extrusion Technology for Multi-Layer Packaging Applications*, Materials (Basel, Switzerland) 16 (3), s. 10–12.
6. Ekologistyka24, https://ekologistyka24.pl/recykling-folii-rolniczej-na-co-uwazac/ [08.04.2026].
7. Encyklopedia Zarządzania, https://ekologistyka24.pl/recykling-folii-rolniczej-na-co-uwazac/ [15.04.2026].
8. Gibas E. (2014), *Folie polietylenowe: surowce i niezbędne dodatki*, Przetwórstwo Tworzyw 20 (3), s. 224-232.
9. Hamrol A. (2013), *Zarządzanie jakością z przykładami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s.382-384.
10. Hayes D. G. (2025), *Impact of Plastics in Agriculture*, Agriculture 15(3), s. 1–2.
11. Jakubowska P., Kloziński A. (2012), *Recykling folii papieropodobnych wytworzonych z kompozytów polimerowych o wysokim stopniu napełnienia węglanem wapnia*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, s. 224-225.
12. Kloziński, A., Jakubowska, P. (2012). Właściwości mechaniczne folii poużytkowych stosowanych w rolnictwie. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, (5), 231-232.
13. Kowalik K. (2018), *Metoda FMEA w teorii i praktyce zarządzania jakością*, Archiwum Wiedzy Inżynierskiej 3, s. 24.
14. Rogowska P. (2023), *Wdrożenie narzędzi kontroli jakości w wybranym procesie produkcji–studium przypadku*, Akademia Zarządzania, 7(2), s.323–324.
15. Rychły-Lipińska A. (2007), *FMEA – analiza rodzajów błędów oraz ich skutków*, Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych 1 (11), s. 47.
16. Sun D., Li H., Wang E., He W., Hao W., Yan C., Li Y., Mei X., Zhang Y., Sun Z., Jia Z., Zhou H., Fan T., Zhang X., Liu Q., Wang F., Zhang C., Shen J., Wang Q., Zhang F. (2020), *An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency*, National Science Review 7 (10), s. 1523.
17. Zhao Y., Mao X., Li S., Huang X., Che J., Ma C. (2023), *A review of plastic film mulching on water, heat, nitrogen balance, and crop growth in farmland in China*, „Agronomy" 13 (10), s.1-2.

Application of the FMEA Method in the Life Cycle Analysis of Polyethylene Film in Agriculture to Reduce the Risk of Damage

Abstract

The aim of the article is to identify and analyze the key risks leading to damage of polyethylene film used in agriculture, using the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) method. Polyethylene film (HDPE, LDPE, LLDPE) is an essential component of modern agrotechnology, serving protective functions, stabilizing the microclimate, and supporting silage processes. Despite its high functionality, this material is susceptible to degradation resulting from process errors, mechanical factors, and environmental influences. The study analyzes four main stages of the product life cycle: production using the cast method, transport and storage, installation, and field operation. The conducted FMEA analysis made it possible to determine the Risk Priority Number (RPN) for individual defects. The highest criticality values were recorded in the operation phase, where damage caused by hail reached an RPN of 224, and in the production phase, where improper UV stabilization (RPN = 180) was identified as a key threat to material durability. Significant risks were also identified in the installation stage (damage from structural elements) and in logistics (thermal deformations). Based on the analysis results and the developed Pareto chart, it was indicated that priority corrective actions should focus on optimizing the dosing of UV stabilizing additives, automating raw material quality control, and implementing rigorous installation and protective procedures in field conditions. It was demonstrated that a systematic approach to risk analysis not only reduces economic and material losses but also contributes to minimizing the negative environmental impact of used plastics by extending their service life.

Key words

FMEA, RPN, polyethylene film