DOSKONALENIE PROCESU PRODUKCJI MEBLI Z WYKORZYSTANIEM METODY FMEA – STUDIUM PRZYPADKU

Paulina ZWOLENIK[1], Andrzej PACANA[2*]

[1] Szkoła Doktorska Nauk Inżynieryjno-Technicznych na Politechnice Rzeszowskiej, Rzeszów; d564@stud.prz.edu.pl; 0000-0001-6154-2194
[2] Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów; app@prz.edu.pl; 0000-0003-1121-6352
* Korespondencja: app@prz.edu.pl; Tel.: +48-178-651-390

Streszczenie: Celem artykułu było zidentyfikowanie oraz przeanalizowanie głównych niezgodności, które wpływać mogą negatywnie na przebieg procesu produkcji mebli. W opracowaniu wykorzystano metodę FMEA, która zaliczana jest do metod zarządzania jakością, a w celu graficznego przedstawienia wyników, stworzono diagram Pareto-Lorenza. Rezultatem działań było zidentyfikowanie głównych niezgodności, wraz z ich przyczynami oraz skutkami. Uzyskane informacje pozwoliły na zaproponowanie działań korygujących, które będą minimalizować wystąpienie ryzyka.

Słowa kluczowe: metoda FMEA, diagram Pareto-Lorenza, zarządzanie jakością, inżynieria produkcji

MPROVING THE FURNITURE MANUFACTURING PROCESS USING THE FMEA METHOD - A CASE STUDY

Abstract: The aim of the article was to identify and analyze the main threats that may negatively influence the flow of the furniture production process. The paper uses the FMEA method, which is included in the quality management methods, and in order to present the results graphically, a Pareto-Lorenz diagram was created. The result of the activities was the identification of the main threats, along with their causes and effects. The information obtained allowed to propose corrective actions that will minimize the risk occurrence.

Keywords: FMEA method, Pareto-Lorenz diagram, quality management, mechanical engineering

1. Wprowadzanie

Jednym z głównych dążeń przedsiębiorstw jest uzyskanie wyrobu gotowego, który będzie spełniał wymagania i oczekiwania, a równocześnie charakteryzować się będzie wysoką jakością i niskim kosztem wytwarzania (Czerwińska, and Pacana, 2020a; Hamrol, 2017). Powstała w latach 60-tych XX wieku metoda FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), poprzez analityczne ustalenie związków przyczynowo-skutkowych, pozwala na wskazanie miejsca powstawania potencjalnych wad w procesie. Dzięki temu zabiegowi, możliwe jest wyeliminowanie niezgodności i dostarczenie nowych pomysłów na ulepszenie właściwości wyrobu, doskonaląc badany produkt lub proces (Pałubicki, and Kukiełka, 2017).

Zastosowanie w praktyce metody FMEA pozwala na zbliżenie do osiągnięcia zasady zera defektów. Metoda FMEA zaliczana jest do instrumentów zarządzania jakością i ma celu ma redukcję występowania błędów, poprzez wprowadzenie działań zapobiegawczych. Produkcja bezusterkowa jest równocześnie nieobciążona dodatkowymi kosztami, w tym finansami przeznaczonymi na czas koniecznych przeróbek, a także zmarnowanych materiałów i robocizny (Brondoni, 2018). Dzięki wykorzystaniu zero defektów możliwe jest uzyskanie zadowolenia klienta oraz pewnych przychodów, bez obciążenia pieniężnego wymaganego na poprawki. Działania zapobiegawcze, wchodzące w skład tej zasady, obejmują regularną kontrolę i raportowanie, zaangażowanie pracowników w wychwytywanie błędów, w tym poprzez określony sposób komunikacji, specjalnie do tego wykorzystywany (Brondoni, 2014; Brondoni, 2018; Czerwińska, and Pacana, 2020; Halpin, 1966; Psarommatis, 2021).

Przedmiotem badań było przedsiębiorstwo z branży meblowej, realizujące proces produkcji mebli. Celem opracowania była identyfikacja niezgodności, występujących w trakcie wytwarzania produktów oraz zaproponowanie działań doskonalących, umożliwiających eliminację problemów.

2. Istota analizy FMEA

Celem FMEA jest rozpoznanie i eliminowanie występujących wad w procesie produkcyjnym, począwszy od elementów wejściowych po wyjściowe, wskazując i stosując odpowiednie środki zapobiegawcze. Wykorzystanie tej metody pozwala na użycie wiedzy i doświadczeń z wcześniej przeprowadzanych analiz, w celu uniknięcia nierozpoznanych wad (Pacana et al., 2018a; Rychły-Lipińska, 2007; Skotnicka-Zasadzień, and Wolniak, 2011).

Implementacja FMEA pozwala na poprawę funkcjonowania procesów zachodzących w przedsiębiorstwie, co przekłada się na podniesienie ich jakości oraz wyższy standard wyrobu gotowego. Działanie to skutkuje osiągnięciem zadowolenia klienta, a proces, w którym następuje iteracja FMEA realizowany jest w konwencji ciągłego doskonalenia (Hamrol, and Mantura, 2002; Pacana et al., 2018b; Skotnicka-Zasadzień, and Wolniak, 2011).

FMEA zaliczane jest do metod zarządzania jakością. Analiza ma na celu doskonalenie jakości procesu produkcyjnego. Ponadto, do innych powodów stosowania tej analizy należy:

- chęć spełnienia oczekiwań klienta,
- dostosowywanie się do obowiązujących wymagań i przepisów,
- eliminację marnotrawstwa czasu potrzebnego na wdrożenie nowych technologii czy wprowadzenie produktów na rynek,
- większą ilość produkowanych wyrobów, a co za tym idzie, zwiększoną możliwość wystąpienia błędów i niezgodności (Rychły-Lipińska, 2007).

Analiza FMEA przeprowadzana jest na drodze pracy zespołowej, w odpowiednio do tego powołanej grupie osób, z całego obszaru przedsiębiorstwa, na czele z koordynatorem. Stosowanie FMEA służyć ma do:

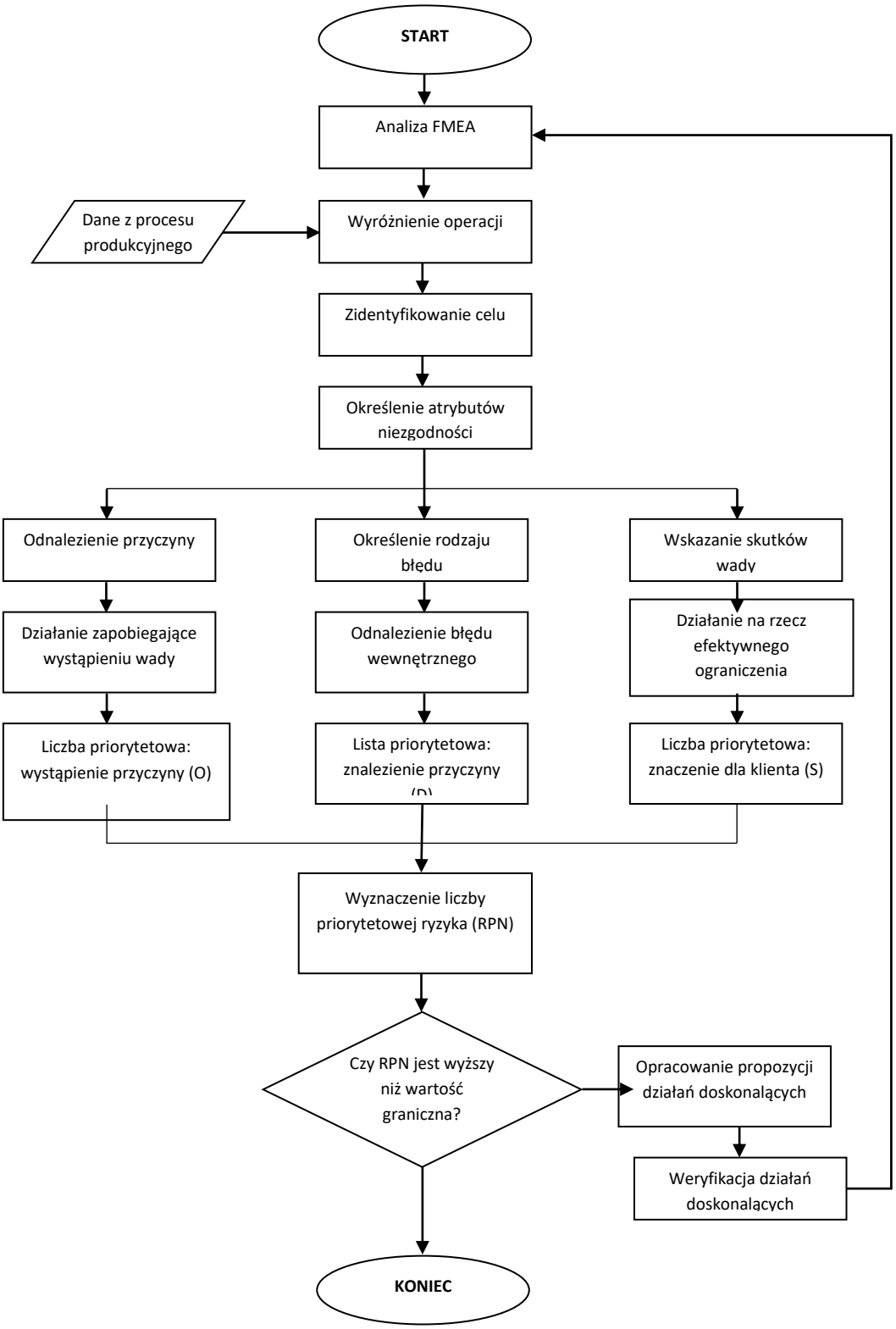
- identyfikacji niezgodności oraz ukazania konsekwencji, jakie za sobą niosą,
- poszukiwania działań zapobiegawczych do już wykrytych problemów,
- wykrycia słabych punktów, które powodują zwiększenie kosztów produkcji,
- nacisku na prowadzenie odpowiedniej dokumentacji, która służyć ma usunięciu powtarzających się błędów,
- planowania kontroli (Rychły-Lipińska, 2007).

Wyróżnia się sześć podstawowych odmian FMEA, tj.:

- PFMEA – analiza planowania procesu,
- DFMEA – analiza projektowania wyrobu,
- EFMEA – analiza środowiska i otoczenia,
- MFMEA – analiza maszyn i urządzeń,
- sofFMEA – wykorzystanie oprogramowania software,
- SFMEA – analiza systemu (Pacana, 2020; Zimon et al., 2019).

Szczególnie duży nacisk na należy przyłożyć na dwie pierwsze odmiany. PFMEA (FMEA procesu) jest analizą działań prowadzących do powstania produktu. Przeprowadzona jest na etapie projektowania nowego procesu lub podczas doskonalenia istniejącego, w celu eliminacji wad wpływających na proces oraz produkt (McDeermott, 2009; Zdanowicz, and Kost, 2001). DFMEA, dotyczące konstrukcji wyrobu, następuje podczas początkowego etapu projektowania, w celu uzyskania informacji o wyrobie. Wynikiem jest wprowadzenie zmian koncepcyjnych przed rozpoczęciem prac konstrukcyjnych, skutkujące ograniczeniem

potencjalnych niezgodności (Bueno et al., 2020; Hamrol, 2012; Pacana, and Czerwińska, 2018; Pacana et al., 2018a). Schemat przeprowadzania FMEA przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Schemat przebiegu FMEA. Opracowanie własne na podstawie: Pacana et al., 2018a; Siwiec et al., 2017.

Korzyścią z analizy FMEA jest ograniczenie wystąpienia ryzyka, dzięki identyfikacji niezgodności. Wskazanie powiązań z przyczynami powstawania, prawdopodobieństwem wystąpienia oraz znaczeniem dla klienta, skutkować może uzyskaniem produktu o wysokiej jakości, przekładając się do wzrostu efektywności procesu produkcyjnego i obniżenie kosztów jego realizacji (AIAG & VDA, 2019; Zain et al., 2017).

3. Etapy analizy FMEA

Przebieg analizy FMEA składa się z trzech etapów: przygotowania, właściwej analizy oraz wprowadzenia działań zapobiegawczych i ich monitorowania (Mazur, and Gołaś, 2010; Pałubicki, and Kukiełka, 2017; Wyrąbek, 2012). Rozpoczęcie działań zaczyna się od stworzenia zespołu, w skład którego należeć będą przedstawiciele różnych działów przedsiębiorstwa, a niekiedy reprezentanci klienta (w razie potrzeby), którzy posiadać będą niezbędną wiedzę i doświadczenie. Istotnym jest fakt, że FMEA przyjmuje, że to pracownicy biorący bezpośredni udział w produkcji mogą przekazać unikalne informacje na temat możliwości i uchybień w pracy parku maszynowego, dlatego powinni zostać włączeni w analizę (Mazur, and Gołaś, 2010; Pacana et al., 2018a; Pałubicki, and Kukiełka, 2017; Wyrąbek, 2012).

W trakcie etapu pierwszego, konieczne jest określenie granic analizowanego systemu, co pozwolić może na zaznajomienie się z rozważanym zagadnieniem. Kolejnym krokiem jest dekompozycja systemu, czyli podejście systemowe do danego wyrobu/procesu – umożliwia rozróżnienie podsystemów i analizę na określonym poziomie. Dzięki identyfikacji elementów składowych, w postaci zestawień, a także relacji między nimi (funkcjonalnych/procesowych), możliwe jest utworzenie listy potencjalnych błędów, wraz z ich skutkami. Pozwala to na wybór części lub operacji do dalszej analizy (Mazur, and Gołaś, 2010; Pacana et al., 2018a; Pałubicki, and Kukiełka, 2017; Wyrąbek, 2012).

Podczas etapu drugiego następuje właściwa analiza, obejmująca zasadniczą część FMEA. Pierwszym wykonywanym zadaniem jest identyfikacja potencjalnych niezgodności, wyróżniając ich przyczyny i skutki, bazując na informacjach z poprzedniego etapu. Przez niezgodność rozumie się działanie wyrobu, które określane jest jako wadliwe i nieprawidłowe z przewidzianą funkcją, przez przyczynę, znajdującą źródło w działaniu podsystemu niższego rzędu i rzutującą na funkcjonowanie podsystemu wyższego rzędu. Wyniki pozwalają na zdefiniowanie relacji przyczyna-wada-skutek (Mazur, and Gołaś, 2010; Pacana et al., 2018a; Pałubicki, and Kukiełka, 2017; Wyrąbek, 2012). Do każdego

z rozpoznanych elementów przypisuje się liczby priorytetowe, inaczej oceny, punktowane w skali od 1 do 10:

- prawdopodobieństwo wystąpienia błędu (occurance, O),
- prawdopodobieństwo wykrycia wady (detection, D),
- znaczenie wady dla odbiorcy (severity, S) (AIAG & VDA, 2019; Mazur, and Gołaś, 2010; Pacana et al., 2018a; Rychły-Lipińska, 2007; Wyrąbek, 2012).

Przypisanie liczb priorytetowych zależne jest od informacji pozyskanych z aktualnego funkcjonowania przedsiębiorstwa. W trakcie przydzielania wartości poszczególnym elementom, istotne jest by posiłkować się pozyskanymi danymi o problemach z przeszłości. Pozwala to na odpowiednie zobrazowanie problemu, ewidencjonując przyczyny i skutki (Galliková et al., 2016; Pacana et al., 2018a).

W trakcie pracy należy korzystać z kryteriów oceny, które przypisują dany wynik w oparciu o określone informacje. Kryteria te mogą być różnie interpretowane, dlatego przedsiębiorstwa mają możliwość utworzenia własnego zestawienia. Przykładowe kryteria zostały zobrazowane w tabelach 1-3.

Tabela 1.
Kryterium oceny dla prawdopodobieństwa wystąpienia błędu (O) w przypadku FMEA procesu.

PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYSTĄPIENIA BŁĘDU – FMEA procesu		
Ocena	**Współczynnik możliwego uszkodzenia w trakcie trwałości konstrukcji**	**Kryteria oceny**
1	<1 na 1 000 000	Nigdy nie wystąpiły uszkodzenia związane z podobnymi procesami, uszkodzenie jest bardzo mało prawdopodobne.
2	1 na 20 000	Proces pod stałą kontrolą statystyczną, wystąpiły sporadyczne przypadki uszkodzenia związane z podobnymi procesami.
3	1 na 4 000	Proces pod stałą kontrolą statystyczną, pojawiły się odosobnione uszkodzenia towarzyszące podobnym procesom.
4	1 na 1 000	Proces pod kontrolą statystyczną, odnotowano incydentalne uszkodzenia towarzyszące podobnym procesom.
5	1 na 400	Proces pod kontrolą statystyczną, sporadycznie pojawiły się uszkodzenia towarzyszące podobnym procesom.
6	1 na 80	Proces pod kontrolą statystyczną, wystąpiły częste uszkodzenia towarzyszące podobnym procesom.
7	1 na 40	Proces pod kontrolą statystyczną, zaistniały częste uszkodzenia.
8	1 na 20	Proces nie jest objęty kontrolą statystyczną, wystąpiły bardzo częste uszkodzenia.
9	1 na 8	Pojawienie się uszkodzenia jest prawie nieuniknione.
10	1 na 2	Uszkodzenie jest nieuniknione

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: AIAG & VDA, 2019; Hamrol, and Mantura, 2002; Łańcucki et al., 1995; Rychły-Lipińska, 2007.

Tabela 2.
Kryterium oceny ze względu na prawdopodobieństwo wykrycia (D) w przypadku FMEA procesu.

PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYKRYCIA BŁĘDU – TRUDNOŚĆ WYKRYCIA - FMEA procesu	
Ocena	**Kryteria oceny**
1-2	Działania kontrolne z dużą pewnością wykryją istnienie uszkodzenia lub proces jest zautomatyzowany w takim stopniu, że sam wykaże miejsce problemu.
3-4	Działania kontrolne posiadają duże szanse wykrycia istnienia uszkodzenia.
5-6	Działania kontrolne są w stanie wykryć istnienie uszkodzenia.
7-8	Działania kontrolne posiadają małą szansę wykrycia uszkodzenia.
9	Działania kontrolne prawdopodobnie nie wykażą uszkodzenia.
10	Działania kontrolne nie wykażą uszkodzenia.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: AIAG & VDA, 2019; Hamrol, and Mantura, 2002; Łańcucki et al., 1995; Rychły-Lipińska, 2007.

Tabela 3.
Kryterium oceny ze względu na znaczenie wady dla odbiorcy (S) w przypadku FMEA procesu.

ZNACZENIE WADY DLA ODBIORCY - FMEA procesu	
Ocena	**Kryteria oceny**
1	Proces posiada niewielkie uszkodzenie, które nie powoduje znaczącego skutku w funkcjonowaniu urządzenia lub układu, a także nie posiada realnego wpływu na proces technologiczny czy operacje montażowe.
2-3	Proces posiada niewielkie uszkodzenie, ale nie przekłada się to w dużym stopniu na zadowolenie klienta; istnieje prawdopodobieństwo, iż odbiorca odczuje niewielkie pogorszenie działania urządzenia lub układu, które mogą zostać zlikwidowane w wyniku niewielkich przeróbek w procesie technologicznym lub operacjach montażowych.
4-6	Proces posiada uszkodzenie, co przekłada się na pewne niezadowolenie klienta; obiorca zauważa pogorszenie pracy urządzenia lub jest zdenerwowany niedociągnięciami; skutkiem mogą być nieplanowane przeróbki, serwisy lub uszkodzenia sprzętu.
7-8	Proces posiada istotne uszkodzenie, które rzutuje na wysoki stopień niezadowolenia klienta; choć awaria nie powoduje niebezpieczeństwa eksploatacji lub naruszania obowiązujących przepisów, to rzutuje na poważne zakłócenia w następujących operacjach technologicznych lub montażowych, przez co wymaga przeróbek.
9-10	Występujące w procesie uszkodzenie wpływa na bezpieczeństwo eksploatacji lub narusza obowiązujące przepisy, dlatego proces nie może być kontynuowany.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: AIAG & VDA, 2019; Hamrol, and Mantura, 2002; Łańcucki et al., 1995; Rychły-Lipińska, 2007.

Pozyskane liczby priorytetowe służą do obliczenia współczynnika poziomu ryzyka (RPN), który prezentuje poziom prawdopodobieństwa ryzyka, związanego z wystąpieniem błędu. Jest to iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia błędu, znaczenia wady dla odbiorcy oraz prawdopodobieństwa wykrycia wady przez dostawcę, producenta i wyrażany jest wzorem (AIAG & VDA, 2019; Łańcucki et al., 1995; Mazur, and Gołaś, 2010; Pacana et al., 2018a):

$$RPN = O \times D \times S \tag{1}$$

Uzyskany wynik mieści się w zakresie od 1 do 1000. Wartość ta jest podstawą do określenia rangi przyczyn pod względem ich krytyczności – wzrost współczynnika poziomu ryzyka oddziałuje wprost proporcjonalnie na istotę wady/uszkodzenia. Dla danego procesu

przyjmuje się indywidualny, akceptowalny poziom ryzyka. Przekroczenie tej liczby skutkuje koniecznością podjęcia kroków w celu wyeliminowania niezgodności dzięki działaniom zapobiegawczym i/lub korekcyjnym (Pacana et al., 2018a; Pacana et al., 2018b).

W trakcie etapu 3 następuje wprowadzenie i nadzorowanie działań zapobiegawczych. Poprzedzone jest to określeniem rodzajów błędów, na co składa się:

- analiza raportów z przeprowadzanych reklamacji czy wykorzystanych gwarancji,
- zapoznanie się z protokołami z przeprowadzanych kontroli,
- wykorzystanie wiedzy pracowników,
- użycie nabytych doświadczeń w trakcie produkcji, świadczenia podobnych wyrobów, itp. (Galliková et al., 2016; Mazur, and Gołaś, 2010; Pałubicki, and Kukiełka, 2017).

Czynności realizowane w trakcie działań zapobiegawczych, dążą do możliwie całkowitego usunięcia występowania wad, jednakże zdarza się, iż przyczyny są nie do wyeliminowania. Konieczne jest zatem równoczesne minimalizowanie skutków błędów (Galliková et al., 2016).

Bazując za pozyskanych wynikach z określenia rodzajów pomyłek, konieczne jest wydanie odpowiednich zaleceń, wyszczególniając środki, osoby odpowiedzialne oraz terminy, które zapobiegać będą występowaniu niezgodności. W ramach trzeciego etapu, uprawnione osoby zobowiązane są do nadzoru nad realizacją zaleceń oraz przestrzeganiem terminów. Dodatkowo warto podjąć działania w celu obniżenia kosztów spowodowanych wystąpieniem wad, które poprzedzone są wykonaniem bilansu nakładów oraz korzyści (Galliková et al., 2016; Hamrol, 2012; Hamrol, and Mantura, 2002).

W trakcie analizy FMEA korzysta się z arkusza, które są modyfikowane i dostosowywane dla danego przedsiębiorstwa i analizowanego problemu. Przykładowy arkusz przedstawia tabela 4.

Tabela 4.
Przykładowy arkusz FMEA wykorzystywany w trakcie analizy wyrobu/procesu.

FMEA WYROBU/PROCESU …						Nr:…
Osoba odpowiedzialna:				Zespół:		Data
Lp.	Wyrób/proces/operacja/funkcja	Niezgodność	Przyczyny	Skutki	Ocena	Proponowane działania doskonalące

					O	D	S	RPN	

Źródło: Opracowane własne na podstawie (Galliková et al., 2016; Hamrol, and Mantura, 2002; Nierzwicki, 1999; Pacana et al., 2018a).

Warunkiem efektywnej analizy FMEA oraz pozyskania miarodajnych wyników jest zaangażowanie przeszkolonych pracowników, przy aprobacie najwyższego kierownictwa. W trakcie pracy grupowej, pod nadzorem kierownika, możliwe jest uzyskanie rezultatów, które wyeliminują przyczynę i skutki błędów, a co za tym idzie, podniosą jakość wyrobów oraz zadowolenie klienta (Galliková et al., 2016; Pacana et al., 2018a; Pałubicki, and Kukiełka, 2017; Rychły-Lipińska, 2007).

4. Analiza FMEA procesu produkcji mebli

Przedmiotem analizy była produkcja małoseryjna, dostosowana pod zamówienie klienta, w przedsiębiorstwie z branży meblowej. Na asortyment firmy składają się szafy przesuwne, komody, biurka oraz łóżka. Wyroby wykonywane są z płyt HDF oraz ze szkła i lustra. Bazując na uzyskanych danych, należy stwierdzić, iż konieczne jest wypracowanie odpowiedniego sposobu identyfikacji niezgodności. Ustalenie ciągów przyczynowo-skutkowych, a następnie wskazanie rozwiązań zapobiegających wystąpieniu błędów, jest kluczowym elementem do uzyskania efektywnej produkcji, która w analizowanym przedsiębiorstwie, nie jest odpowiednio ustandaryzowana (F.U.H. Maestro, 2021).

Ze względu na charakter działalności - koszyk zleceń produkcyjnych jest mocno uzależniony od zamówień klientów – podjęto próbę analizy procesu, przyjmując, iż jest analogiczny, mimo uzyskiwania elementów o odrębnych właściwościach (F.U.H. Maestro, 2021). Proces produkcyjny przedstawia tabela 5.

Produkcja wyrobów przebiega na terenie niewielkiego zakładu produkcyjnego, przez co przemieszczanie się surowców przebiega płynnie. Zaznaczone są pola odkładcze, wykorzystywane głównie przez pracownika piły CNC, który po obróbce dostarcza półprodukty na wnętrze mebli oraz ich fasadę.

Realizowane w przedsiębiorstwie procesy produkcyjne cechują się umiarkowaną złożonością. Wyroby - ich rodzaj i ilość – uzależnione są od planu produkcyjnego, opracowywanego na podstawie umów podpisanych z klientami. Każde zamówienie traktowane jest indywidualnie i wymaga odpowiedniego rozplanowania środków pracy.

Tabela 5.
Przebieg procesu produkcji mebli.

Wykonywane procesy produkcyjne (obieg procesu montażu)	**Czynność (symbol)**				
	Wytwarzanie	Przemieszczanie	Składowanie	Kontrola	Oczekiwanie
	◇	○	▲	■	D
1. Rozcinanie materiału (płyt HDF) na pile CNC	◇	○	▲	■	
2. Oklejanie elementów na urządzeniu do zarabiania naroży (okleiniarka)	◇	○	▲	■	
3. Montaż elementów wnętrza (kontenerki)	◇	○		■	
4. Montaż elementów zewnętrznych (rama drzwi)	◇	○	▲		
5. Finalny montaż wyrobu		○	▲	■	
6. Etap końcowy - pobranie wyrobu przez montażystę					D

Źródło: Opracowane własne.

Ze względu na wymagania dotyczące jakości dostarczanych mebli, procesy produkcyjne muszą pozwolić na uzyskanie produktów pozbawionych wad. W przeciwnym wypadku, zamówienia obarczone byłyby ryzykiem zwrotów i reklamacji, a w konsekwencji wzrostem kosztów produkcji. Konieczne jest zatem opracowanie odpowiedniego sposobu identyfikacji niezgodności w trakcie przebiegu procesu. Ustalenie ciągów przyczynowo-skutkowych, a następnie wskazanie rozwiązań zapobiegających wystąpieniu błędów, jest kluczowym elementem do uzyskania efektywnej produkcji. W tym celu opracowano arkusz FMEA, bazując na danych pozyskanych od przedsiębiorstwa, który przedstawia tabela 6. Przyjmuje się, że akceptowalnym poziomem ryzyka jest wynik 125.

Tabela 6.
Analiza FMEA procesu produkcji mebli.

FMEA PROCESU									Nr: 1
	Osoba odpowiedzialna: XXX		Zespół: XXX						Data: 3.11.2021 r.
Lp.	Proces/operacja / funkcja	Niezgodności	Przyczyny	Skutki	Ocena				Proponowane działania doskonalące
					O	D	S	RPN	
1	Rozcinanie materiału (płyt HDF) na pile formatowej CNC	Awaria maszyny	1.1 Niewłaściwa konserwacja maszyny	1.1.1 Przestój nieplanowany	4	3	5	60	-
				1.1.2 Błędne funkcjonowanie podzespołów	4	3	5	60	-
				1.1.3 Uzyskanie niewłaściwych produktów	3	3	5	45	-
			1.2 Błędnie wykonane przezbrojenie	1.2.1 Opóźnienia w planowanej produkcji	4	3	4	48	-
				1.2.2 Błędne funkcjonowanie podzespołów	3	4	5	60	-
			1.3 Uszkodzenie podzespołów urządzenia	1.3.1 Naprawa maszyny	6	5	6	**180**	- Cykliczna i szczegółowa kontrola podzespołów maszyny - Naprawa w celu usunięcia awarii
				1.3.2 Opóźnienia	4	5	5	100	-
			1.4 Nieprawidłowe działanie wentylatora	1.4.1 Wadliwe funkcjonowanie lasera wyłapującego formatkę	3	2	3	18	-

				1.4.2 Wydłużone przestoje planowane	2	2	3	12	-
2		Przedłużone przestoje planowane	2.1 Przedłużenie czasu trwania zaplanowanych czynności, tj. rozruchu, przezbrojenia, konserwacji	2.1.1 Opóźnienia	5	5	3	75	-
3		Błędne funkcjonowanie elementów maszyny	3.1 Nieprzeprowadzone czynności konserwacyjne	3.1.1 Potencjalna awaria	2	4	4	32	-
				3.1.2 Uszkodzenie podzespołów urządzenia	3	4	4	48	-
4		Niedostępność surowców	4.1 Opóźnienia z wydaniem produktu z magazynu	4.1.1 Nieprawidłowy przebieg procesu	4	5	3	60	-
5		Uzyskanie nieakceptowalnych wyrobów	5.1 Niewłaściwa konserwacja elementów maszyny (m.in. ostrzy)	5.1.1 Uszkodzenia uzyskiwanego materiału	4	4	7	112	-
				5.1.2 Straty finansowe	3	3	7	63	-
6		Błędne wymiary uzyskanych półproduktów	6.1 Przekazanie niewłaściwych informacji do pracownika	6.1.1 Konieczność wykonania poprawek	3	5	6	90	-
				6.1.2 Opóźnienia	3	4	6	72	-
			6.2 Błąd pracownika	6.2.1 Ponowne wykonanie elementu	4	4	6	96	-
				6.2.2 Straty finansowe	4	3	6	72	-
7	Oklejanie elementów na urządzeniu do zarabiania naroży (okleiniarka)	Awaria maszyny	1.1 Niewłaściwa konserwacja maszyny	1.1.1 Przestój nieplanowany	4	3	5	60	-
				1.1.2 Błędne funkcjonowanie podzespołów	4	3	5	60	-

				1.1.3 Uzyskanie niewłaściwych produktów	3	3	5	45	-
			1.3 Uszkodzenie podzespołów urządzenia	1.3.1 Naprawa maszyny	6	5	6	**180**	-
				1.3.2 Opóźnienia	4	5	5	100	-
8		Przestoje	8.1 Złe ułożenie surowca w urządzeniu (okleiny)	8.1.1 Nieprawidłowości dotyczące półproduktu	6	3	5	90	-
				8.1.2 Opóźnienia	3	3	5	45	-
9		Wydłużony czas rozruchu	9.1 Zbyt niska temperatura otoczenia	9.1.1 Czas potrzebny na podwyższenie temperatury otoczenia powyżej 13°C	4	2	2	16	-
				9.1.2 Opóźnienia	2	2	2	8	-
10		Brak materiału	10.1 Wydłużony czas pracy na stanowisku stanowiska piły formatowej CNC	10.1.1 Opóźnienia w planie produkcyjnym	5	2	3	30	-
11		Uzyskanie nieakceptowalnych wyrobów	11.1 Uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy	11.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	7	63	-
				11.1.2 Straty finansowe	3	3	7	42	-
12		Użycie okleiny w złym kolorze	12.1 Błąd pracownika	12.1.1 Wymagana jest wymiana na poprawny surowiec	6	2	5	60	-
				12.1.2 Straty finansowe	4	2	5	40	-

13		Niewłaściwe oklejenie elementów	13.1 Wadliwe funkcjonowanie maszyny	13.1.1 Konieczność ponownego oklejenia elementu	6	5	6	**180**	- Dbałość o cykliczną konserwację maszyny, w celu uzyskania poprawnej jej funkcjonalności - Ocena uszkodzeń i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				13.1.2 Przestoje nieplanowane	4	4	6	96	-
				13.1.3 Straty finansowe	4	4	7	112	-
			13.2 Błąd pracownika	13.2.1 Ponowne wykonanie operacji oklejania	5	5	5	**125**	- Zadbanie o jasne przekazywanie informacji, - Przeprowadzenie dodatkowego szkolenia - Ocena uszkodzeń i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				13.2.2 Przestoje nieplanowane	3	3	4	36	-
				13.2.3 Straty finansowe	4	3	5	60	-
14	Montaż elementów wnętrza (kontenerki)	Brak materiału	14.1 Wydłużony czas pracy na poprzedzających stanowiskach	14.1.1 Opóźnienia w planie produkcji	5	2	3	30	-
15		Uzyskanie nieakceptowalnych wyrobów	11.1 Uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy	11.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	7	63	-
				11.1.2 Straty finansowe	3	3	7	42	-
16		Uzyskanie wyrobu o błędnych wymiarach	16.1 Błąd pracownika	16.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	3	3	5	45	-
				16.1.2 Straty finansowe	2	3	5	30	-
				16.1.3 Opóźnienia	3	3	5	45	-

			16.2 Błędne informacje	16.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	6	5	6	**180**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Ocena wyrobu i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				16.2.2 Straty finansowe	5	4	6	120	-
				16.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	3	6	90	-
17		Wyrób w błędnym kolorze	17.1 Błąd pracownika	17.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	5	30	-
				17.1.2 Straty finansowe	2	2	5	20	-
				17.1.3 Opóźnienia	2	2	5	20	-
			17.2 Błędne informacje	17.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	5	5	7	**175**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Odłożenie elementu do późniejszego ewentualnego wykorzystania, - Wykonanie procesu od nowa
				17.2.2 Straty finansowe	4	4	6	96	-
				17.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	4	6	120	-
18		Awaria urządzeń na stanowisku (m.in. wkrętarki)	18.1 Brak odpowiedniej konserwacji	18.1.1 Wydłużenie czasu produkcji	4	3	3	36	-
				18.1.2 Konieczność naprawy	3	3	3	27	-
				18.1.3 Uzyskanie nieodpowiednich produktów	2	3	3	18	-

			18.2 Zużycie sprzętu	18.2.1 Dodatkowe koszty finansowe	3	5	3	45	-
				18.2.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-
			18.3 Uszkodzenia części	18.3.1 Uzyskanie wadliwych produktów	3	5	3	45	-
				18.3.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-
19	Montaż elementów zewnętrznych (rama drzwi)	Brak materiału	14.1 Wydłużony czas pracy na poprzedzających stanowiskach	14.1.1 Opóźnienia w planie produkcji	5	2	3	30	-
			19.2 Zaległa dostawa od dostawcy zewnętrznego	19.2.1 Opóźnienia	2	4	7	56	-
20		Uzyskanie nieakceptowalnych wyrobów	11.1 Uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy	11.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	7	63	-
				11.1.2 Straty finansowe	3	3	7	42	-
21		Uzyskanie wyrobu o błędnych wymiarach	16.1 Błąd pracownika	16.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	3	3	5	45	-
				16.1.2 Straty finansowe	2	3	5	30	-
				16.1.3 Opóźnienia	3	3	5	45	-
			16.2 Błędne informacje	16.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	6	5	6	**180**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Ocena wyrobu i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				16.2.2 Straty finansowe	5	4	6	120	-
				16.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	3	6	90	-

22		Wyrób w błędnym kolorze	17.1 Błąd pracownika	17.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	5	30	-
				17.1.2 Straty finansowe	2	2	5	20	-
				17.1.3 Opóźnienia	2	2	5	20	-
			17.2 Błędne informacje	17.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	5	5	7	**175**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Ponowne wykonanie elementu
				17.2.2 Straty finansowe	4	4	6	96	-
				17.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	4	6	120	-
23		Awaria urządzeń na stanowisku (m.in. wkrętarki)	18.1 Brak odpowiedniej konserwacji	18.1.1 Wydłużenie czasu produkcji	4	3	3	36	-
				18.1.2 Konieczność naprawy	3	3	3	27	-
				18.1.3 Uzyskanie nieodpowiednich produktów	2	3	3	18	-
			18.2 Zużycie sprzętu	18.2.1 Dodatkowe koszty finansowe	3	5	3	45	-
				18.2.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-
			18.3 Uszkodzenia części	18.3.1 Uzyskanie wadliwych produktów	3	5	3	45	-
				18.3.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-
24	Finalny montaż wyrobu	Brak materiału	14.1 Wydłużony czas pracy na poprzedzających stanowiskach	14.1.1 Opóźnienia w planie produkcji	5	2	3	30	-

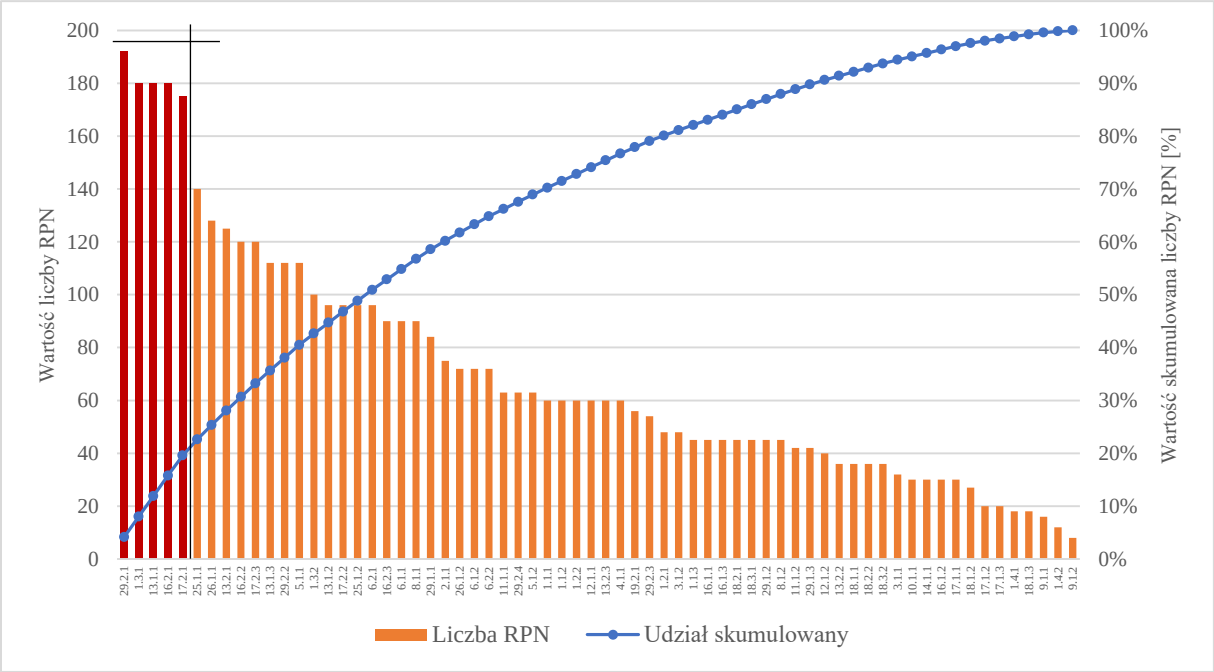
25		Nieodpowiednie półprodukty	25.1 Niewłaściwe instrukcje w procesie	25.1.1 Konieczność wykonania ponownie elementów	5	4	7	**140**	- Przeprowadzenie dodatkowego szkolenia, - Stworzenie standardów wykonywania pracy - Ponowne wykonanie elementów, - Przejście do montażu innego wyrobu
				25.1.2 Straty finansowe	4	4	6	96	-
26		Uzyskanie nieakceptowalnych produktów	26.1 Uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy	26.1.1 Konieczność wykonania ponownie elementów	4	4	8	**128**	- Przeprowadzenie dodatkowego szkolenia, - Stworzenie standardów wykonywania pracy - Ocena uszkodzeń i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				26.1.2 Straty finansowe	3	4	6	72	-
27		Uzyskanie wyrobu o błędnych wymiarach	16.1 Błąd pracownika	16.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	3	3	5	45	-
				16.1.2 Straty finansowe	2	3	5	30	-
				16.1.3 Opóźnienia	3	3	5	45	-
			16.2 Błędne informacje	16.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	6	5	6	**180**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Ocena wyrobu i dalsze zadecydowanie o półprodukcie, - Skorygowanie możliwych elementów
				16.2.2 Straty finansowe	5	4	6	120	-
				16.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	3	6	90	-

28		Wyrób w błędnym kolorze	17.1 Błąd pracownika	17.1.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	2	3	5	30	-
				17.1.2 Straty finansowe	2	2	5	20	-
				17.1.3 Opóźnienia	2	2	5	20	-
			17.2 Błędne informacje	17.2.1 Konieczność ponownego wykonania elementu	5	5	7	**175**	- Automatyzacja przekazywanych danych - Ponowne wykonanie elementu
				17.2.2 Straty finansowe	4	4	6	96	-
				17.2.3 Wydłużenie czasu produkcji	5	4	6	120	-
29		Produkt niezgodny z wymaganiami klienta	29.1 Błąd pracownika	29.1.1 Konieczność ponownego wykonania produktu	3	4	7	84	-
				29.1.2 Straty finansowe	3	3	5	45	-
				29.1.3 Spadek renomy przedsiębiorstwa	2	3	7	42	-
			29.2 Błędne informacje	29.2.1 Opóźnienia w dostawie do klienta	6	4	8	**192**	- Wykorzystanie odpowiedniego programu do planowania produkcji, - Użycie wizualnego przekazania informacji, np. tablic - Ponowne wykonanie elementu z ponownym wykorzystaniem niektórych części
				29.2.2 Konieczność ponownego wykonania produktu	4	4	7	112	-
				29.2.3 Straty finansowe	3	3	6	54	-
				29.2.4 Spadek renomy przedsiębiorstwa	3	3	7	63	-

30		Awaria urządzeń na stanowisku (m.in. wkrętarki)	18.1 Brak odpowiedniej konserwacji	18.1.1 Wydłużenie czasu produkcji	4	3	3	36	-
				18.1.2 Konieczność naprawy	3	3	3	27	-
				18.1.3 Uzyskanie nieodpowiednich produktów	2	3	3	18	-
			18.2 Zużycie sprzętu	18.2.1 Dodatkowe koszty finansowe	3	5	3	45	-
				18.2.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-
			18.3 Uszkodzenia części	18.3.1 Uzyskanie wadliwych produktów	3	5	3	45	-
				18.3.2 Opóźnienia	3	4	3	36	-

Źródło: Opracowanie własne

Pozyskane wyniki pozwalają na odpowiednie uszeregowanie wartości wskaźnika poziomu ryzyka (RPN), by otrzymać dane niezbędne do wyznaczenia grupy krytycznych niezgodności. Wyznaczenie udziału względnego, a następnie udziału skumulowanego pozwoliło na określenie, które z 20% potencjalnych niezgodności odpowiadać będzie za 80% możliwych negatywnych skutków. Diagram Pareto-Lorenza, zawierający ukazany stosunek 80/20, przedstawia rysunek 2.



Rysunek 2. Diagram Pareto-Lorenza dla niezgodności zidentyfikowanych w ramach analizy FMEA. Opracowanie własne.

Niezgodności poniżej lub równe progu 20% wartości skumulowanej zostały wyróżnione na diagramie. Do tej grupy zaliczają się:

- 29.2.1: Produkt niezgodny z wymaganiami klienta (błędne informacje - opóźnienia w dostawie do klienta), występujące podczas finalnego montażu wyrobu; RPN=192,
- 1.3.1: Awaria maszyny (uszkodzenie podzespołów urządzenia - naprawa maszyny); RPN=180; niezgodność ta może wystąpić w trakcie dwóch czynności:
    - rozcinania materiału (płyt HDF) na pile formatowej CNC,
    - oklejania elementów na urządzeniu do zarabiania naroży (okleiniarka),
- 13.1.1: Niewłaściwe oklejenie elementów (wadliwe funkcjonowanie maszyny - konieczność ponownego oklejenia elementu) w trakcie oklejania elementów na urządzeniu do zarabiania naroży (okleiniarka); RPN=180,
- 16.2.1: Uzyskanie wyrobu o złych wymiarach (błędne informacje - konieczność ponownego wykonania elementu); RPN=180; niezgodność ta może wystąpić w trakcie:
    - montażu elementów wnętrza (kontenerki),

    - montażu elementów zewnętrznych (rama drzwi),
    - finalnego montażu wyrobu,
- 17.2.1: Wyrób w błędnym kolorze (błędne informacje - konieczność ponownego wykonania elementu); RPN=175; niezgodność ta może wystąpić w trakcie:
    - montażu elementów wnętrza (kontenerki),
    - montażu elementów zewnętrznych (rama drzwi),
    - finalnego montażu wyrobu.

Zwracając uwagę na fakt, iż akceptowalny poziom ryzyka wynosi 125, zdecydowano się rozszerzyć listę niezgodności o elementy z wartością RPN większą lub równą tej liczby. Są to:

- 25.1.1: Nieodpowiednie półprodukty (niewłaściwe instrukcje w procesie - konieczność wykonania ponownie elementów), występujące podczas finalnego montażu wyrobu; RPN=140;
- 26.1.1: Uzyskanie nieakceptowalnych produktów (uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy - konieczność wykonania ponownie elementów), pojawiające się w trakcie finalnego montażu wyrobu; RPN=128;
- 13.2.1: Niewłaściwe oklejenie elementów (błąd pracownika - ponowne wykonanie operacji oklejania) podczas oklejania elementów na urządzeniu do zarabiania naroży (okleiniarka); RPN=125.

Zdecydowana większość przyczyn zaistnienia niezgodności spowodowana jest przez przekazywanie błędnych informacji. Kolejnym czynnikiem, który należy wyróżnić, jest wadliwe funkcjonowanie maszyny lub jej podzespołów, wpływające na awaryjność urządzenia oraz rzutujące na jakość uzyskiwanych elementów. Problemy spowodowane są również przez dostarczenie na dane stanowisko pracy nieodpowiednich półproduktów, uzyskanie nieakceptowalnych wyrobów oraz błąd pracownika.

W celu eliminacji niezgodności lub zmniejszenia prawdopodobieństwa ich wystąpienia, przedsiębiorstwo powinno skupić się na odpracowaniu systemu przekazywania informacji, który aktualnie nie jest skomputeryzowany. Dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie odpowiedniego oprogramowania lub uproszczonych kart Kanban. Kolejnym krokiem jest wprowadzenie dziennika cyklicznych konserwacji oraz napraw urządzeń, który może pozwolić na skontrolowanie częstotliwości wykonywania koniecznych działań związanych z pracą parku maszyn oraz zaplanować niezbędne regeneracje. Finalnie, działaniem zapobiegawczym byłoby przeprowadzenie cyklu dodatkowych szkoleń, które pozwoliłyby na zmniejszenie prawdopodobieństwa błędów pracowników.

Przyczyny krytycznych niezgodności, które odpowiadają za skutki powstałe w wyniku procesu, znajdują się w każdej operacji przeprowadzonej w celu uzyskania produktów. By zminimalizować ich powstawanie, albo całkowicie je uniemożliwić, należy podjąć

odpowiednie kroki, zwane działaniami zapobiegawczymi. Stosowne rozplanowanie tych czynności pozwoli na przebieg procesu zgodnie z harmonogramem, jednocześnie przyczyniając się do zwiększenia poziomu zadowolenia klienta oraz minimalizacji kosztów z tytułu przestojów.

5. Podsumowanie

Dzięki szczegółowej analizie, uzyskiwanej w ramach FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), możliwe jest ustalenie przyczyn oraz skutków potencjalnych niezgodności, identyfikując je w procesie produkcyjnym. Wykorzystanie metody umożliwia uzyskanie produktu gotowego, o wysokiej jakości i niskim koszcie wytwarzania, spełniającego wszystkie wymagania i oczekiwania klienta.

W pracy poddano analizie przebieg procesu produkcji mebli, identyfikując relację przyczyna-wada-skutek. Według wcześniej przyjętych kryteriów, niezgodnościom przypisano wartości liczbowe, dotyczące prawdopodobieństwa wystąpienia błędu, znaczenia wady dla odbiorcy oraz prawdopodobieństwa wykrycia wady przez dostawcę czy producenta. Dzięki takiemu działaniu uzyskano współczynnik poziomu ryzyka (RPN), dla którego dolną akceptowalną granicę wyznaczono 125.

Wynikiem analizy była identyfikacja pięciu niezgodności, które według zasady 80/20, stanowią największe zagrożenie dla płynnego przebiegu procesu i uzyskania produktów o odpowiedniej jakości. Najwyższą wartość uzyskał problem 29.2.1, związany z produktem niezgodnym z wymaganiem klienta, który dostrzeżony został podczas finalnego montażu wyrobu – powiązany jest on z błędnymi informacjami, a w konsekwencji wymaga ponowne wykonanie produktu (RPN=192). Kolejno wyznaczono trzy niezgodności o wartości RPN=180. W trakcie pracy na maszynach (pile formatowej CNC czy okleiniarce), wystąpić może awaria maszyny, spowodowana przez uszkodzenie podzespołów urządzenia, wymagająca naprawy maszyny (1.3.1). Podczas oklejania elementów na urządzeniu do zarabiania naroży występuje problem (13.1.1) z niewłaściwym oklejeniem elementów, mający swoją przyczynę w wadliwym funkcjonowaniu maszyny, skutkującym koniecznością ponownego oklejenia elementu. Kolejne wartości z RPN=180 dotyczą uzyskania elementu o złych wymiarach (16.2.1), co spowodowane jest przekazaniem błędnych informacji, wymagające ponownego wykonania półproduktu. Niezgodność ta wystąpić może w trakcie montażu elementów wnętrza, montażu elementów zewnętrznych oraz finalnego montażu wyrobu. Ostatnie czynności zaliczające się do ustalonych 20%, tyczą się uzyskania wyrobu w błędnym kolorze (17.2.1), przez błędne informacje, wymagające ponownego wykonania elementu. Niezgodności te, z wyznaczonym RPN=175, odnotowano podczas montażu elementów wnętrza, montażu elementów zewnętrznych oraz finalnego montażu wyrobu.

Ponadto, dodatkowej interpretacji poddano kolejne trzy niezgodności, które posiadały RPN powyżej akceptowalnej wartości równej 125. Z RPN=140 występuje niezgodność dotycząca nieodpowiednich półproduktów (25.1.1), występująca w trakcie finalnego montażu wyrobu, spowodowana przez niewłaściwe instrukcje i skutkująca koniecznością ponownego wykonania elementów. Podczas tej samej czynności, mogą pojawić się nieakceptowane produkty (26.1.1), których przyczyną jest uszkodzenie mechaniczne w trakcie pracy, przez co niezbędne jest ponowne wykonanie elementów (RPN=128). Ostatnią wyróżnioną niezgodnością, z RPN równym 125, jest niewłaściwe oklejenie elementów (13.2.1) w trakcie pracy przy urządzeniu do zarabiania naroży – spowodowane jest błędem pracownika i wymaga ponownej operacji oklejania.

Bazując na uzyskanych informacjach, zaproponowano działania korygujące w postaci stworzenia odpowiedniego systemu przekazywania najważniejszych informacji, dotyczących zarówno rozpowszechniania wytycznych co do produktów, jak i systematyzujących dane odnośnie konserwacji maszyn. Równocześnie wskazano potrzebę przeprowadzenia cyklu szkoleń, które minimalizować miałyby błędy popełniane przez pracowników.

Efektem przedstawionych działań byłaby eliminacja niezgodności, przyczyniająca się do wytworzenia produktu o wysokim poziomie jakości, zgodnym z wymaganiami klienta, co przekłada się na wzrost efektywności procesu produkcyjnego i obniżenie kosztów jego realizacji.

Bibliografia

1. AIAG & VDA (2019). Failure Mode and Effects Analysis - FMEA Handbook.
2. Brondoni S. M. (2018). Planned Obsolescence, Total Quality, Zero Defects and Global Competition. Symphonya. Emerging Issues in Management, (2), 8-20.
3. Brondoni S.M. (2014). Global Capitalism and Sustainable Growth. From Global Products to Network Globalisation, Symphonya. Emerging Issues in Management, (1), 10 – 31.
4. Bueno F. C.; de Toledo, J. C.; da Silva, S. L. (2020). The role of DFMEA in the integration between product development and quality engineering: cases in large companies. Product: Management and Development, 17(2), 85-95.
5. Czerwińska K.; Pacana A. (2020). Analiza niezgodności w procesie produkcyjnym z wykorzystaniem wskaźników KPI i narzędzi zarządzania jakością. Wybrane zagadnienia funkcjonowania logistyki (red. Olejarz T.). Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
6. Czerwińska K.; Pacana A. (2020). Analysis of the internal door technological process. Production Engineering Archives. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia, Vol. 26, Iss. 1.
7. F.U.H. Maestro. (2021). Dane z przedsiębiorstwa – niepublikowane. Cieniawa.
8. Galliková J.; Poprocký R.; Volna P. (2016). Implementation of FMEA method in maintenance of semi-trailer combination. Diagnostyka, 17.
9. Halpin J.F. (1966). Zero Defects: A New Dimension in Quality Assurance. New York: McGraw-Hill.
10. Hamrol A. (2012). Zarządzanie jakością z przykładami. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
11. Hamrol A. (2017). Zarządzanie i inżynieria jakości. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
12. Hamrol A.; Mantura W. (2002). Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
13. Łańcucki J.; Kowalska D.; Łuczak J. (1995). Zarządzanie jakością w przedsiębiorstwie. Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego.
14. Mazur A.; Gołaś H. (2010). Zasady i techniki wykorzystywane w zarządzaniu jakością. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
15. McDeermott R.E. (2009). Basics of FMEA. New York: Productivity Press.
16. Nierzwicki W. (1999). Zarządzanie jakością: wybrane zagadnienia. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr.
17. Pacana A. (2020). Wybrane techniki zarządzania jakością w logistyce przedsiębiorstw. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.

18. Pacana A.; Czerwińska K. (2018). Zastosowanie narzędzi zarządzania jakością do analizy przyczyn wadliwości wyrobu. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie. Politechnika Śląska, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, t. 117.
19. Pacana A.; Czerwińska K.; Siwiec D. (2018). Narzędzia i wybrane metody zarządzania jakością: teoria i praktyka. Częstochowa: Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji.
20. Pacana A.; Zimon D.; Zimon G. (2018). Wybrane metody zarządzania logistycznego. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
21. Pałubicki S.; Kukiełka K. (2017). Zarządzanie jakością w wybranym procesie produkcyjnym z zastosowaniem metody FMEA. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 18.
22. Psarommatis F. (2021). A generic methodology and a digital twin for zero defect manufacturing (ZDM) performance mapping towards design for ZDM. Journal of Manufacturing Systems, 59, 507-521.
23. Rychły-Lipińska A. (2007). FMEA – analiza rodzajów błędów oraz ich skutków. Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych, 1(11), 47-59.
24. Siwiec D.; Pacana A.; Czerwińska K. (2017). Eliminacja przyczyn powstawania wyrobów niezgodnych w hurtowni motoryzacyjnej z wykorzystaniem narzędzi zarządzania jakością. Nástroje environmentálnej politiky 2017: Recenzovaný zborník príspevkov zo VII. medzinárodnej vedeckiej konferencie: Bratislava, 5. máj 2017, 2017 Žilina, STRIX n. f. Žilina.
25. Skotnicka-Zasadzień B.; Wolniak R. (2011). Metody i narzędzia zarządzania jakością: teoria i praktyka. Gliwice: Politechnika Śląska.
26. Wyrąbek H. (2012). Znaczenie metody FMEA w zarządzaniu jakością w przedsiębiorstwach. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, nr 81, Seria: Administracja i Zarządzanie.
27. Zain S.; Ismail A. F.; Ahmad, Z.; Adesta, E. Y. T. (2018). Analysis of design tool attributes with regards to sustainability benefits. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 290, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
28. Zdanowicz R.; Kost G. (2001). Wykorzystanie metody FMEA do poprawy jakości produktów. Problemy jakości. Sigma-Not, nr 7, 35-40.
29. Zimon G.; Pacana A.; Zimon D. (2019). Inżynierskie metody i narzędzia doskonalenia procesów logistycznych w przedsiębiorstwie. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.