

# **WSPÓŁPRACA NAUKI I BIZNESU W INŻYNIERII PRODUKCJI**

**Tom IV**

**Redakcja**

**Justyna Patalas-Maliszewska  
Julian Jakubowski  
Karol Dąbrowski**

**Uniwersytet Zielonogórski**

**WSPÓŁPRACA NAUKI I BIZNESU  
W INŻYNIERII PRODUKCJI**

**Tom IV**

## Komitet naukowy konferencji

**prof. dr hab. inż. Justyna Patalas Maliszewska**, Przewodnicząca Komitetu, Uniwersytet Zielonogórski, **prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak** Politechnika Koszalińska, **dr hab. inż. Waldemar Bojar** Uniwersytet Techniczno Przyrodniczy w Bydgoszczy, **dr hab. inż. Anna Budruk** Politechnika Wroclawska, **dr hab. inż. Jarosław Brodny** Politechnika Śląska, **dr hab. inż. Ewa Dostatni** Politechnika Poznańska, **dr hab. inż. Jan Duda** Politechnika Krakowska, **prof. dr hab. inż. Józef Gawlik** Politechnika Krakowska, **dr hab. inż. Waclaw Gierulski** Politechnika Świętokrzyska, **dr hab. inż. Arkadiusz Gola** Politechnika Lubelska, **dr hab. inż. Aleksander Gwiazda** Politechnika Śląska, **dr hab. inż. Katarzyna Halicka** Politechnika Białostocka, **prof. dr hab. inż. Adam Hamrol** Politechnika Poznańska, **dr hab. inż. Andrzej Jardzioch** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, **dr hab. inż. Bożena Kaczmarek** Politechnika Świętokrzyska, **dr hab. inż. Marcin Knapiński** Politechnika Częstochowska, **prof. dr hab. inż. Ryszard Knosala**, **prof. dr hab. inż. Sławomir Kocira** Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, **prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń** Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, **prof. dr hab. inż. Józef Kuczmarski** Politechnika Lubelska, **prof. dr hab. inż. Jerzy Lewandowski** Politechnika Warszawska, **prof. dr hab. inż. Edmund Lorencowicz** Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, **dr hab. inż. Marek Maczek** Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, **prof. dr hab. inż. Maria Mrówczyńska** Uniwersytet Zielonogórski, **prof. dr hab. inż. Andrzej Jerzy Marczuk** Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, **prof. dr hab. inż. Joanicjusz Nazarko** Politechnika Białostocka, **dr hab. inż. Przemysław Niewiadomski** Uniwersytet Zielonogórski, **dr hab. inż. Krzysztof Nowacki** Politechnika Śląska, **prof. dr hab., czł. koresp. PAN Lucjan Pawłowski** Politechnika Lubelska, **dr hab. inż. Krzysztof Pietruszewicz** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, **dr hab. inż. Dariusz Plinta** Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku Białym, **dr hab. inż. Izabela Rojek** Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, **dr hab. inż. Sebastian Saniuk** Uniwersytet Zielonogórski, **prof. dr hab. inż. Krzysztof Ryszard Santarek** Politechnika Warszawska, **prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec** Politechnika Krakowska, **prof. dr hab. inż. Bożena Skołod** Politechnika Śląska, **dr hab. inż. Dorota Stadnicka** Politechnika Rzeszowska, **prof. dr hab. inż. Antoni Świć** Politechnika Lubelska, **dr hab. inż. Marek Wirkus** Politechnika Gdańska, **dr hab. inż. Zbigniew Wiśniewski** Politechnika Łódzka

## Komitet Organizacyjny Konferencji

**dr Katarzyna Skrzypek**, Przewodnicząca Komitetu, Uniwersytet Zielonogórski, **mgr Karol Dabrowski** Z –ca przewodniczącej, Centrum przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytet Zielonogórski, **dr inż. Hanna Łosyk**, sekretarz Uniwersytet Zielonogórski, **dr Daria Moskwa-Bęczkowska** Politechnika Świętokrzyska, **dr inż. Julian Jakubowski**, Uniwersytet Zielonogórski, **mgr inż. Robert Janowski**, Uniwersytet Zielonogórski, **mgr inż. Mirosław Adamczyk**, Uniwersytet Zielonogórski, **dr inż. Agnieszka Kaczmarek-Pawelska**, Uniwersytet Zielonogórski, **mgr Monika Chochół**, Centrum przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytet Zielonogórski, **dr inż. Małgorzata Śliwa**, Uniwersytet Zielonogórski, **mgr Małgorzata Motykiewicz**, Centrum przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytet Zielonogórski, **mgr Sylwia Graça**, Centrum przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytet Zielonogórski.



INSTYTUT INŻYNIERII MECHANICZNEJ



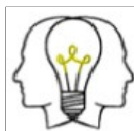
UNIWERSYTET  
ZIELONOGÓRSKI



POLSKA AKADEMIA NAUK  
Komitet Inżynierii i Produkcji



CENTRUM PRZEDSIĘBIORCZOŚCI  
I TRANSFERU TECHNOLOGII  
UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO



Polskie Towarzystwo Zarządzania Innowacjami  
Polish Association for Innovation Management

# **WSPÓŁPRACA NAUKI I BIZNESU W INŻYNIERII PRODUKCJI**

**Tom IV**

## **Redakcja**

Justyna Patalas- Maliszewska

Julian Jakubowski

Karol Dąbrowski

Zielona Góra 2025

## **RADA WYDAWNICZA**

Mariusz Naczek (przewodniczący), Paweł Andrzejewski, Andrzej Bisztyga, Bogumiła Burda, Joanna Dec-Pietrowska, Beata Gabryś, Mariusz Jenek, Aleksandra Kruk, Franciszek Runiec (sekretarz)



## **RECENZENCI**

Aleksander Gwiazda  
Bożena Kaczmarska

## **REDAKCJA**

Ewa Popiłka

## **KOREKTA**

Aldona Reich

## **REDAKCJA TECHNICZNA**

Arkadiusz Sroka

## **PROJEKT OKŁADKI**

Julian Jakubowski

© Copyright by Uniwersytet Zielonogórski  
Zielona Góra 2025

**ISBN 978-83-7842-589-2**

**DOI <https://doi.org/10.5944/uz.9788378425892>**

## **OFICyna WYDAWNICZA UNIwersYTETU ZIElONOGóRSKIEGO**

65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50, tel. (68) 328 78 64  
[www.ow.uz.zgora.pl](http://www.ow.uz.zgora.pl), e-mail: [sekretariat@ow.uz.zgora.pl](mailto:sekretariat@ow.uz.zgora.pl)

## SPIS TREŚCI

<b>Przedmowa</b> .....	9
<b>Andrzej Marek Lasota</b> , Zastosowanie cyfrowego modelowania człowieka w projektowaniu i rozwoju produktu .....	11
<b>Magdalena Dąbrowska, Dominika Wysocka</b> , Analiza przyczyn powstawania wyrobów niezgodnych z wykorzystaniem metody 8D – studium przypadku .....	21
<b>Jacek Habel</b> , Analiza procesu wypalania blach na maszynie trulaser 3030 L20 w celu wzrostu wskaźnika wykorzystania sprzętu OEE .....	37
<b>Mariola Drozda, Magdalena Dąbrowska</b> , Zbiórka i segregacja zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego – analiza niezgodności z wykorzystaniem diagramu Ishikawy .....	53
<b>Dominika Matuszek, Karol Bierczyński</b> , Wykorzystanie ciepła odpadowego ze sprężarek do odgrzewania wody technologicznej .....	75
<b>Marcin Knapieński, Bartosz Koczurkiewicz, Anna Kawalek, Marcin Kwapisz, Sylwester Sawicki</b> , Model numeryczny procesu wyciskania profili miedzianych w technologii Conform .....	89
<b>Maria Agnieszka Paszkowicz</b> , Bezpieczeństwo i higiena pracy w raportach CSR polskich przedsiębiorstw .....	107
<b>Karol Dąbrowski</b> , Kompetencje inżyniera produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030 – panel dyskusyjny 1 .....	117
<b>Karol Dąbrowski</b> , Jak skutecznie transferować technologię z nauki do biznesu – panel dyskusyjny 2 .....	123



## PRZEDMOWA

Szanowni Państwo,

W dobie tak szybkiego rozwoju zaawansowanych technologii i jednocześnie rosnących problemów i trudności w adaptacji przedsiębiorstw do zmieniających się warunków w otoczeniu społecznym, ekonomicznym, prawnym i technologicznym prowadzenie prac oraz dyskusji naukowych w inżynierii produkcji staje się niewątpliwie koniecznością.

Prace przedstawiane w niniejszej książce zostały zaprezentowane podczas obrad w ramach piątej konferencji pt.: „Współpraca Nauki i Biznesu w Inżynierii Produkcji”, która odbyła się w formie hybrydowej w dniach 12-13 grudnia 2024 r. na Uniwersytecie Zielonogórskim (UZ). Konferencja miała miejsce w roku, w którym Komitet Inżynierii Produkcji Polskiej Akademii Nauk (KIP PAN) obchodził swoje 15 -lecie działalności. Przewodniczący KIP PAN, prof. Sebastian Skoczypiec, jak również Prezes Polskiego Towarzystwa Zarządzania Innowacjami (PTZI), prof. Bożena Kaczmarska wraz z Przewodniczącą komitetu naukowego konferencji, prof. Justyną Patalas-Maliszewską podkreśliły wagę i potrzebę integracji środowiska w inżynierii produkcji w kontekście tak wielu wyzwań w Polsce, jak i na arenie międzynarodowej. Uroczystego otwarcia obrad dokonał J.M. Rektor Uniwersytetu Zielonogórskiego prof. Wojciech Strzyżewski. Znaczenie i rolę inżynierii produkcji w rozwoju innowacji podkreśliła prof. dr hab. inż. Maria Mrówczyńska, Wiceminister w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego, która wzięła udział w konferencji i wygłosiła wykład dotyczący innowacji i rozwoju w szkolnictwie wyższym. Następnie wykład inauguracyjny poprowadził prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski z Politechniki Lubelskiej a wykład rozpoczynający drugi

dzień obrad prof. Ewa Dostatni z Politechniki Poznańskiej. W wydarzeniu wzięło udział ponad 100 uczestników z całej Polski, w tym Prezydium i Członkowie KIP PAN, członkowie PTZI, przedstawiciele ośrodków akademickich z całej Polski, prezesi, właściciele i przedstawiciele wielu przedsiębiorstw produkcyjnych oraz jednostek okołobiznesowych.

W trakcie konferencji zbudowano przestrzeń dla wartościowych dyskusji dotyczących współpracy nauki i biznesu w inżynierii produkcji. Tegoroczna konferencja podejmowała bardzo ważny temat budowania kompetencji inżynierii produkcji zgodnie z potrzebami przedsiębiorstw w perspektywie 2030 oraz wykorzystania sztucznej inteligencji w zarządzaniu i organizacji produkcji. Ponadto dyskutowano na temat zrównoważonej produkcji i szans i zagrożeń dla współpracy biznesu i nauki w dobie przemysłu 4.0 i nawet 5.0.

Książka składa się z ośmiu rozdziałów. W rozdziale pierwszym zaprezentowano przykład prac badawczych w obszarze badań ergonomicznych wykonywanych w środowisku wirtualnym, które mogą pozwolić na ograniczenie lub eliminację badania prototypu i makiet fizycznych miejsc pracy w warunkach rzeczywistych. Cyfrowe antropometryczne bazy danych zostały zastosowane w cyfrowym modelowaniu człowieka wspomagając analizę ergonomiczną w procesie rozwoju produktu i stanowiska pracy. Przedstawiono przejście od „klasycznej” ergonomii do wirtualnej na podstawie cyfrowych modeli człowieka w projektowaniu i rozwoju produktu. Kolejny rozdział to analiza praktycznych aspektów wykorzystania metody inżynierii jakości: raportu 8D na przykładzie wybranego elementu wytwarzanego przez przedsiębiorstwo produkcyjne branży motoryzacyjnej. Celem artykułu jest identyfikacja niezgodności w wyrobie gotowym oraz dokonanie analizy przyczyn jego powstawania. Rozdział trzeci to analiza procesu wypalania blach na maszynie TruLaser 3030 L20 w celu wzrostu wskaźnika wykorzystania sprzętu. Niniejsza praca była realizowana w ramach projektu realizowanego dla rzeczywistego przedsiębiorstwa i przedstawia bardzo dobry przykład współpracy nauki i biznesu w obszarze inżynierii produkcji. Produkcja obejmowała wytwarzanie komponentów do maszyn rolniczych. W wyniku analizy zebranych danych przedstawiono przyczyny niskiej efektywności realizowanego procesu oraz zalecenia dotyczące poprawy. W rozdziale czwartym dokonano analizy niezgodności występujących w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Pokazano zastosowanie wybranych narzędzi zarządzania jakością w odniesieniu do analizy przyczynowo-skutkowej występowania niezgodności w omawianych procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Kolejny rozdział to zaprezentowanie założeń wykorzystania ciepła odpadowego oraz analiza możliwości praktycznej implementacji. Badaniu poddano układ sprężarek powietrza Atlas Copco GA37 pracujących naprzemiennie. Badanie wykazało, że zastosowanie

układu odzysku ciepła odpadowego pozwoliło na zmniejszenie ilości energii zużywanej do podgrzania wody. Otrzymane wyniki wskazują, że ciepło, które stanowi odpad procesu wytwarzania sprężonego powietrza, pozwala zredukować zużycie gazu wpisując się w koncepcję zrównoważonej gospodarki, jednocześnie zmniejsza koszty ponoszone na nośniki energii (gaz) pozwalając na zwiększenie rentowności prowadzonej działalności. W rozdziale szóstym przedstawiono opracowanie numerycznego modelu procesu Conform przystosowanego do analizy procesów wyciskania pełnych profili miedzianych o różnych polach przekroju. Model opracowano we współpracy z przedsiębiorstwem Metall-Expres sp. z o.o. z Rzeszowa, stosując oprogramowanie do symulacji procesów przeróbki plastycznej. Rozdział siódmy stanowi przegląd raportów społecznej odpowiedzialności biznesu przedsiębiorstw.

W rozdziale ósmym i dziewiątym dokonano opisu istotnej dyskusji prowadzonej w ramach dwóch paneli dyskusyjnych w trakcie konferencji. Pierwszy z nich dotyczył kompetencji inżynierii produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030. Dyskusję, w której udział wzięli prof. Sebastian Skoczypiec – Politechnika Krakowska, prof. Anna Burduk – Politechnika Wrocławska, prof. Grzegorz Bocewicz – Politechnika Koszalińska, dr Łukasz Piechowcz – Dyrektor R&D SECO Warwick S.A., Dariusz Tront – Dyrektor R&D Lumel S.A., Joanna Foksa – Manager Smulders Projects Poland Sp. z o. o., poprowadziła prof. Justyna Patalas-Maliszewska. Uczestnicy drugiego panelu podjęli próbę dyskusji dotyczącej transferu technologii z nauki do biznesu. Dyskusję tą poprowadził prof. Sławomir Kłós z Uniwersytetu Zielonogórskiego, a w roli ekspertów wystąpili dr Tomasz Marcinişzyn – Wrocławskie Centrum Transferu Technologii Politechniki Wrocławskiej, Karol Dąbrowski – Dyrektor Centrum Przedsiębiorczości i transferu Technologii Uniwersytetu Zielonogórskiego, prof. Arkadiusz Gola – Politechnika Lubelska, prof. Dorota Stadnicka – Politechnika Rzeszowska oraz Piotr Gramza – Dyrektor ds. Badań i Rozwoju Lamel Technology Sp. z o.o. Pragnę podkreślić w tym miejscu rolę i znaczenie Centrum Przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytetu Zielonogórskiego, które w roku konferencji obchodziło 25-lecie swojej działalności.

Życząc interesującej i inspirującej lektury, pozostaję z wyrazami szacunku

*Justyna Patalas-Maliszewska*



**Andrzej Marek Lasota**

# **ZASTOSOWANIE CYFROWEGO MODELOWANIA CZŁOWIEKA W PROJEKTOWANIU I ROZWOJU PRODUKTU**

## **Wprowadzenie**

Pomimo postępów w automatyzacji procesów przemysłowych operatorzy nadal odgrywają kluczową rolę w większości systemów produkcyjnych ze względu na ich zdolność adaptacji i elastyczność. Ponadto powszechnie rozwijane koncepcje: Przemysł 4.0 i 5.0, zrównoważona produkcja, masowa personalizacja produktu powodują, że rozwiązanie problemów wykonywania manualnych podprocesów produkcyjnych realizowanych przez człowieka poprzez zrobotyzowanie może być kosztowne i ekonomicznie nieuzasadnione [20].

Operator, wykonując zadania robocze, jest narażony na ryzyko ergonomiczne, które może skutkować w postaci problemów zdrowotnych. Najbardziej rozpowszechnionymi problemami zdrowotnymi w miejscu pracy są zaburzenia mięśniowo-szkieletowe związane z wykonywaną pracą (ZMSz) [1]. Obawy związane z pojawieniem się ZMSz u operatorów są szczególnie większe w miejscach pracy, gdzie występują niekorzystne warunki pracy, brak dostatecznie wykwalifikowanej siły roboczej, nieskuteczne podejścia do zapobiegania ZMSz w pracy, nieprzestrzeganie podstawowych zasad ergonomii.

Głównymi czynnikami ryzyka ergonomicznego są: niewygodne, szkodliwe pozycje pracy operatora i czas ich utrzymywania, powtarzalność czynności roboczych, stosowana siła [12]. Praktyczne stosowanie zasad ergonomii w miejscu pracy może obniżyć lub wyeliminować ryzyko zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego związanych z pracą zawodową. Ponadto ergonomia przyczynia się do poprawy wydajności pracy, zwiększenia bezpieczeństwa oraz dobrostanu człowieka, realizując tym samym zrównoważony rozwój w miejscu pracy. Uwzględnienie ergonomii w projektowaniu systemu

pracy może zapewnić równowagę między operatorem a wymaganiami dotyczącymi wykonywanych zadań [11].

Cyfrowe Modelowanie Człowieka (CMCz) oraz wirtualna ergonomia to szybko rozwijające się narzędzia w obszarze projektowania ergonomicznego i analizy ergonomii. Umożliwiają one przeprowadzanie analiz ergonomicznych oraz ocen poziomów narażenia operatorów na ZMSz [6]. Przyczyniają się do zmiany sposobu projektowania produktów lub systemów oraz ich ciągłego doskonalenia. Należy nadmienić, że konwencjonalne metody, takie jak badanie prototypu, fizyczne tworzenie makiet miejsc pracy do badań ergonomicznych [21], są czasochłonne i mogą być kosztowne.

Istotne jest, aby zaprojektowane miejsce pracy było zarówno funkcjonalne, efektywne, jak i ergonomiczne. Zastosowanie cyfrowego modelowania człowieka we wczesnych fazach procesu projektowania i rozwoju produktu wspomaga uwzględnić wymogi ergonomiczne w realizowanym projekcie oraz ocenę ergonomii, co pozwala na wyeliminowanie badań ergonomicznych fizycznych prototypów. Wczesne zastosowanie ergonomii wirtualnej i cyfrowych narzędzi do modelowania człowieka może obniżyć koszty zmian poprojektowych i skrócić związany z tym czas cyklu, co przekłada się na niższe koszty dla organizacji [17].

W artykule przedstawiono przejście od „klasycznej” ergonomii do wirtualnej, opierając się na cyfrowych modelach człowieka w projektowaniu i rozwoju produktu.

## **Ergonomia w projektowaniu**

### **Dane antropometryczne**

Projektanci, projektując systemy produkcji, stanowiska pracy z udziałem operatora, potrzebują niezbędnych danych. Jednym z ich podstawowych źródeł są atlasy antropometryczne na potrzeby projektowania i oceny ergonomicznej. Zawierają one dane cech antropometrycznych człowieka (np. zasięg kończyn górnych, wysokość barkowa, wysokość płaszczyzny widzenia) określonej populacji obu płci dla centyli: C5, C50, C95, przestrzeń pracy kończyn górnych, przestrzeń pracy wzroku [5].

Dane te są niezbędne do zaprojektowania struktury przestrzennej maszyny, urządzenia, miejsca pracy. Strukturę przestrzenną tworzy konstrukcja, kształt, wielkość, konfiguracja elementów. Z punktu widzenia ergonomii istotna jest forma obudowy, ukształtowanie, rozmieszczenie elementów sterowniczych, sygnalizacyjnych i informacyjnych. Kluczowe jest również rozmieszczenie materiałów i narzędzi pracy. Struktura stanowiska pracy wraz z wyposażeniem determinuje przestrzeń dla czynności rąk i nóg oraz obserwacji wzroku. Ponadto może decydować o pozycjach roboczych operatora oraz możliwościach przemieszczania się.

## Metody oceny ergonomii

Istnieje wiele technik oceny ergonomii fizycznej, które znalazły szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej. Zaliczamy do nich listy kontrolne, metodę Ovako Working posture Analysis System (OWAS), która została opracowana przez fińskich badaczy [9]. OWAS służy do oceny narażenia na ryzyko wystąpienia ZMSz związane z przyjmowanymi pozycjami roboczymi przez operatorów podczas pracy. Z kolei McAtamney i Corlett zaproponowali ergonomiczne podejście w postaci szybkiej oceny obciążenia kończyn górnych Rapid Upper Limb Assessment (RULA). Narzędzie służy do oceny poziomu ryzyka wystąpienia zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego podczas wykonywania różnego rodzaju zadań w miejscu pracy. Metoda koncentruje się przede wszystkim na zaangażowaniu kończyn górnych operatora podczas wykonywania zadań roboczych [15]. Kolejni badacze zaproponowali metodę do szybkiej oceny narażenia obciążenia całego ciała na ryzyko ergonomiczne Rapid Entire Body Assessment (REBA) [7]. Natomiast David ze współpracownikami opracowali podejście do szybkiego sprawdzenia narażenia pracownika na ZMSz Quick Exposure Check (QEC). Metoda w odróżnieniu od poprzednich łączy w sobie obiektywną i subiektywną ocenę ryzyka i ukie-runkowana jest na działania praktyczne w miejscu pracy [3]. Natomiast Occupational Repetitive Action (OCRA) została opracowana przez Occhipinti i Colombini [16] i jest stosowana do oceny ryzyka zaburzeń mięśniowo-szkieletowych kończyn górnych związanych z pracą z dużą częstością powtórzeń. Jest to jedno z najdoskonalszych narzędzi analitycznych, które zostało zaprojektowane pod kątem oceny ergonomii miejsca pracy z uwzględnieniem rotacji pracowników na stanowiskach.

Schaub z zespołem opracował metodę do oceny ergonomii w montażu European Assembly WorkSheet (EAWS) [18]. Metoda została opracowana w celu zapewnienia pożądanego poziomu ergonomii, biorąc pod uwagę różne zadania manualnego montażu wykonywane w cyklu czasowym przez operatora. EAWS składa się z czterech różnych sekcji: pozycja i ruchy operatora, stosowana siła, transport ręczny i dźwiganie, obciążenie kończyn górnych, co umożliwia odpowiednią identyfikację działań korygujących o największym pozytywnym wpływie na ogólną ergonomię operatora.

Wspomniane metody najczęściej występują w postaci arkusza oceny, który wypełnia specjalista i zgodnie z algorytmem określonej metody ocenia ryzyko ergonomiczne.

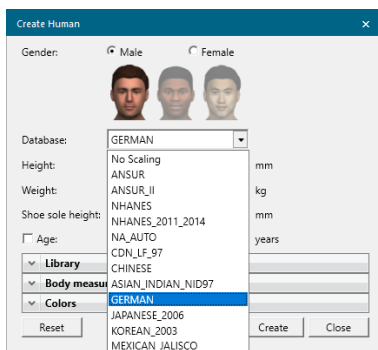
## Technika cyfrowego modelowania człowieka

W ostatnich dekadach wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów, powszechniejszym dostępem do nich pojawiło się komercyjne oprogramowanie oparte na numerycznych modelach człowieka. Oprogramowanie do cyfrowego modelowania

człowieka zostało wprowadzone do przemysłu przede wszystkim w celu ułatwienia szybszego procesu projektowania. Wraz z postępem technologicznym wykorzystanie oprogramowania CMCz stało się nieuniknione w całym cyklu życia produktów, gdzie projekt musi odpowiadać oczekiwaniom użytkownika końcowego, w tym jego potrzebie użyteczności. Dzięki iteracyjnemu procesowi projektowania i oceny produktu, korekty i dostosowania są szybsze, co stwarza warunki do otrzymania lepszego wyniku końcowego [17].

## Modelowanie antropometryczne

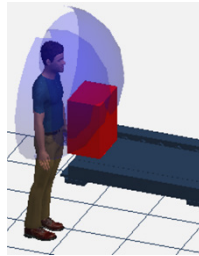
Antropometria jako technika dokonywania pomiarów ciała uwzględnia m.in. wiek, płeć i typ budowy ciała, pochodzenie etniczne. Dane antropometryczne są fundamentalnym elementem we wszystkich narzędziach CMCz do badań ergonomicznych. Dane z atlasów antropometrycznych zasilają danymi cyfrowe bazy antropometryczne. Dzięki temu oprogramowanie CMCz posiadające bazę antropometrycznych danych różnych populacji może tworzyć modele manekinów cyfrowych: 5, 50 oraz 95 centyla. Projektanci, inżynierowie mogą wybierać cyfrowe manekiny człowieka o określonych wymiarach ciała, płci, centylach i populacji (rys. 1, rys. 2), a także mają możliwość modyfikacji wymiarów modelu manekina. Funkcje programów CMCz umożliwiają zastosowanie cyfrowych obszarów pracy kończyn górnych (rys. 37), pola widzenia (rys. 4), pozycji pracy operatora (rys. 5), co umożliwia zastosowanie ergonomii na różnych etapach projektowania systemu.



Rys. 1. Wybór cech manekinów cyfrowych różnych populacji (Jack)



Rys. 2. Cyfrowe manekiny populacji chińskiej, meksykańskiej, amerykańskiej (Jack)



Rys. 3. Cyfrowa przestrzeń pracy kończyn górnych (Jack)



Rys. 4. Cyfrowe pole widzenia (Jack)



Rys. 5. Cyfrowe manekiny – przykładowe pozycje robocze (Jack)

## Oprogramowanie CAD 3D do modelowania i symulacji człowieka

Dzięki postępom w zakresie wczesnego udziału oprogramowania CAD 3D w rozwoju produktu, obecnie możliwe jest projektowanie i ocena ergonomiczna na wczesnych jego etapach. Istnieje wiele programów, które wspomaga projektowanie 3D. Pośród komercyjnego oprogramowania można wymienić Process Simulate Human – Jack, CATIA-DELMIA, RAMSIS, SAMMIE [14].

Wymienione oprogramowanie przeznaczone jest do analizy ergonomii człowieka, oceny i prognozowania potencjalnych postaw ciała operatora oraz analiz ergonomicznych podczas wykonywania zadań w wirtualnym środowisku pracy (rys. 6). Wspiera ono szczegółową symulację zadań 3D i analizę ergonomii, opierając się na cyfrowym manekinie człowieka, aby zaprojektować i zoptymalizować operacje wykonywane przez operatora z uwzględnieniem bezpieczeństwa i wydajności pracy. Oprogramowanie komputerowe zapewnia narzędzia do modelowania i określania rozmiaru wirtualnych manekinów, projektowania stanowisk pracy ręcznej, planowania ich operacji i procesów w dynamicznym i wirtualnym środowisku 3D [13]. Umożliwia również realistyczną symulację ruchu i wydajności człowieka różnych populacji pracowników oraz ocenę wskaźników ergonomicznych dla operacji i czynności wykonywanych ręcznie. Zapewniają także walidację stanowisk pracy pod kątem komfortu, bezpieczeństwa, wydajności operatora, biorąc pod uwagę ryzyko obrażeń, komfort, wydatek energetyczny i zmęczenie pracownika.



Rys. 6. Projektowanie i analiza ergonomiczna miejsca pracy (Jack)

## Zastosowanie cyfrowego modelowania człowieka

Cyfrowe modelowanie człowieka znalazło zastosowanie w wielu obszarach w tym w zakładach przemysłowych, przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, wojskowym, energetycznym.

Hogberg przedstawił zastosowanie CMCz do projektowania pojazdu, wskazując na trudności związane ze zmiennością antropometryczną przyszłych użytkowników [8]. Kremser i współpracownicy stwierdzili, że cyfrowe modele człowieka są niezbędne do rozwoju wnętrz pojazdów i miejsc pracy kierowców. Mogą być one zastosowane do opracowywania zakresów regulacji fotela, kierownicy i pedałów, aby zapewnić optymalną pozycję dla pasażerów o różnych wymiarach antropometrycznych. Mogą być również używane do projektowania koncepcji wyświetlacza i sterowania na wczesnych etapach procesu rozwoju produktu [10]. Spada i współpracownicy zauważyli, że zmiany w procesie produkcji samochodów spowodowały, że ergonomia systemu produkcyjnego stała się kluczowym czynnikiem poprawy jakości produktu, bezpieczeństwa i organizacji pracy. Przedstawili podejście, opierając się na narzędziach symulacyjnych do analizy aspektów ergonomicznych gniazd produkcyjnych już w fazie projektowania. Podkreślili, że narzędzia symulacyjne umożliwiają głęboką analizę pozycji ciała, która jest jednym z elementów krytycznych w fazie projektowania. Cyfrowe modele człowieka pozwalają projektantom symulować najbardziej prawdopodobne pozycje przyjmowane przez operatora podczas wykonywania zadań, a także weryfikować ulepszenia i działania naprawcze [19]. Natomiast Feyen z zespołem zademonstrowali zastosowanie symulacji w proaktywnej analizie zadania na projektowanym stanowisku montażu samochodów. Ich wyniki wskazują, że proaktywne wykorzystanie modelowania może być ważnym narzędziem w ocenie proponowanych projektów miejsc pracy [4]. Z kolei Bernard i współpracownicy badali zastosowanie modelowania i symulacji oraz fizycznych makiet na wczesnym etapie projektowania, aby przeanalizować, czy projekt jest dobrze dostosowany do operatorów do spraw utrzymania produktu. Przeanalizowali jedenaście zadań konserwacyjnych z zastosowaniem cyfrowego modelowania człowieka i symulacji oraz udziałem operatorów ds. utrzymania. Ocenili różne wskaźniki ergonomiczne. Podkreślili potrzebę bardziej efektywnej integracji ergonomii z procesem projektowania oraz potrzebę nowej metodologii i narzędzi dla działu utrzymania [2]. Kolejni badacze dokonali przeglądu literatury pod kątem zastosowania cyfrowego modelowania człowieka w lotnictwie i przemyśle kosmicznym. Wyniki ich pracy wskazują, że technologie wirtualnego modelowania człowieka zostały wykorzystane do oceny zasięgu i dostępności w kokpitach samolotów, tworzenia dokładnych bibliotek pozycji operatorów, przeprowadzania analizy widzenia dla pilotów, określania modyfikacji projektu w celu dostosowania do użytkowników płci żeńskiej,

przewidywania prawdopodobnego zachowania pilota w proponowanym projekcie kokpitu, symulowania przepływu powietrza i wymiany ciepła w kokpicie myśliwca, oceny komfortu siedzeń pasażerów w samolocie, badań konserwacyjnych, szkolenia w zakresie lotów kosmicznych, weryfikacji dostępności komponentów, badania wpływu części skafandrow kosmicznych i uprząży itp. Stwierdzili, że tradycyjne podejście do badań ergonomicznych (obejmujące kosztowne makiety fizyczne i próby z udziałem ludzi) można skutecznie zastąpić ocenami ułatwionymi przez makiety cyfrowe i cyfrowych manekiny ludzi [17].

## Podsumowanie

Cyfrowe modelowanie człowieka ma przed sobą obiecującą przyszłość w zakresie ergonomicznych badań, projektowania produktów, miejsc pracy w inżynierii produkcji. Tradycyjne narzędzia, metodologie projektowania i analizy ergonomicznej migrowały w kierunku narzędzi cyfrowych. CMCz w rozwoju produktu, projektowaniu systemów pracy i narzędzi analizy ergonomii ciągle się rozwija. Przemysł 5.0, cyfrowe bliźniaki człowieka, systemy przechwytywania ruchu, interakcja człowieka z cobotami stawiają przed CMCz nowe możliwości, a zarazem wyzwania w inżynierii produkcji.

## Literatura

- [1] Bernard B.P., & Putz-Anderson V. (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors; a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. National Institute for Occupational Safety and Health: Cincinnati.
- [2] Bernard F., Zare M., Sagot J.-C., & Paquin R. (2020). *Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability*. Human Factors, 62(1), 37-54.
- [3] David G., Woods V., Li G., & Buckle P. (2008). *The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders*. Applied Ergonomics, 39(1), 57-69.
- [4] Feyen R., Liu Y., Chaffin D., Jimmerson G., & Joseph B. (2000). *Computer-aided ergonomics: A case study of incorporating ergonomics analyses into workplace design*. Applied Ergonomics, 31(3), 291-300.
- [5] Gedliczka A., Pochopień P., Szklarska A. i Welon Z. (2001). *Atlas miar człowieka: Dane do projektowania i oceny ergonomicznej*. CIOP.
- [6] Grobelny J., & Michalski R. (2020). *Preventing work-related musculoskeletal disorders in manufacturing by digital human modeling*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(22), 8676.
- [7] Hignett S. i McAtamney L. (2000). *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*. Applied Ergonomics, 31(2), 201-205.

- [8] Hogberg D. (2009). *Digital human modelling for user-centred vehicle design and anthropometric analysis*. International Journal of Vehicle Design, 51(3-4), 306-323.
- [9] Karhu O., Kansi P., & Kuorinka I. (1977). *Correcting working postures in industry: A practical method for analysis*. Applied Ergonomics, 8(4), 199-201.
- [10] Kremser F., Guenzkofer F. i Bengler K. (2012). User-centred interior design of a small electric vehicle using RAMSIS. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 3(3-4), 329-345.
- [11] Lasota A.M. (2020). *A new approach to ergonomic physical risk evaluation in multi-purpose workplaces*. Tehnički vjesnik, 27(2), 467-474.
- [12] Lasota A.M. (2023a). *Ergonomiczna analiza ryzyka w oparciu o cykl czasowy pracy operatora-studium przypadku*. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, 12(2).
- [13] Lasota A.M. (2023b). *Ocena ryzyka ergonomicznego z zastosowaniem komputerowego modelowania i symulacji-studium przypadku*. Zarządzanie Przedsiębiorstwem, 26(2).
- [14] Lasota A.M. i Hankiewicz K. (2024). *Digital Human Modeling in Improving the Ergonomics of Industrial Workplace – a Methodological framework*. Management and Production Engineering Review.
- [15] McAtamney L., & Nigel Corlett E. (1993). *RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*. Applied Ergonomics, 24(2), 91-99.
- [16] Occhipinti E. i Colombini D. (1996). *Proposal of a concise index for the evaluation of the exposure to repetitive movements of the upper extremity (OCRA index)*. La Medicina del lavoro, 87(6), 526-548.
- [17] Sanjog J., Karmakar S., Patel T. i Chowdhury A. (2015). *Towards virtual ergonomics: Aviation and aerospace*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 87(3), 266-273.
- [18] Schaub K., Caragnano G., Britzke B. i Bruder R. (2013). *The European Assembly Worksheet*. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 14(6), 616-639.
- [19] Spada S., Germanà D., Ghibaudo L. i Sessa F. (2017). *Applications and benefits of digital human models to improve the design of workcells in car's manufacturing plants according to international standards*.
- [20] Szajna A. i Dąbrowski K. (2024). *Indywidualizacja produktów poprzez wsparcie pracownika produkcji narzędziami opartymi na technologii rozszerzonej rzeczywistości – przykład współpracy nauki i biznesu*. Polskie Towarzystwo Zarządzania Innowacjami, 19. [w:] *Współpraca nauki i biznesu w inżynierii produkcji*, Justyna Patalas-Maliszewska, Julian Jakubowski, Katarzyna Skrzypek (red.), Zielona Góra: Wydaw. Naukowe Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, 19-26,
- [21] Tytyk E. (2001). *Projektowanie ergonomiczne*. Wydaw. Naukowe PWN: Warszawa.



**Magdalena Dąbrowska**  
**Dominika Wysocka**

## **ANALIZA PRZYCZYŃ POWSTAWANIA WYROBÓW NIEZGODNYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY 8D – STUDIUM PRZYPADKU**

### **Wprowadzenie**

W warunkach funkcjonowania dzisiejszych gospodarek, borykających się z problemami ekonomicznymi (inflacja), czy społecznymi (pandemia, działania wojenne, brak stabilności zatrudnienia), wiele przedsiębiorstw jest zmuszonych do poszukiwania nowych rozwiązań umożliwiających przetrwanie na rynkach. Wyznaczanie nowych kierunków może przybierać różnorodny charakter, m.in. związany z implementacją innowacyjnych rozwiązań, poszukiwaniem źródeł marnotrawstwa występujących w procesach, czy stosowania narzędzi inżynierii jakości w celu ustalenia przyczyn występowania niezgodności w wyrobach bądź świadczonych usługach. Wyroby niezgodne są niewątpliwym źródłem marnotrawstwa (zasobów, środków, czasu) i należy nie tylko monitorować liczebność ich wytwarzania, ale także szukać przyczyn powodujących ich powstawanie. W literaturze przedmiotu istnieje mnogość metod, technik i narzędzi, których celem jest m.in. diagnoza przyczynowo-skutkowa powstawania niezgodności w wyrobie bądź usłudze. W artykule przedstawiono praktyczne aspekty wykorzystania metody inżynierii jakości – raportu 8D na przykładzie wybranego elementu dekoracyjnego wytwarzanego przez przedsiębiorstwo produkcyjne branży motoryzacyjnej.

Celem artykułu jest identyfikacja niezgodności w wyrobie gotowym oraz dokonanie analizy przyczyn ich powstawania wraz z oceną wprowadzonych działań korygujących z wykorzystaniem raportu 8D.

## Metodyka raportu 8D

W roku 1974 Departament Obrony USA opracował metodę raportowania problemów zwaną metodą 8D [4] [16]. Wymagania dla tej metody zostały opisane w normie MIL-STD 1520 Corrective Action and Disposition System for Nonconforming Material. Norma ta była stosowana do roku 1995, a rozpowszechnił ją koncern Ford [5]. Obecnie jest ona wykorzystywana nie tylko w branży motoryzacyjnej, ale również w innych sektorach gospodarki, o czym niewątpliwie świadczą liczne publikacje w tym zakresie (m.in. [13]).

Metoda 8D (nazywana jest również raportem 8D) jest jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych w sytuacji wystąpienia problemu jakościowego. Zadaniem tej metody jest identyfikacja przyczyn wystąpienia niezgodności wyrobu, jej celem zaś wdrożenie działań zapobiegawczych oraz ocena ich efektywności. Zaletą metody 8D jest uogólniona struktura raportu, który może być wykorzystywany do rozwiązywania problemów i odchyłeń w procesach różnych sfer, np. zaopatrzenia, produkcji, dystrybucji [16]. Należy podkreślić, że raport 8D nie jest wyłącznie kolejną metodą w zarządzaniu jakością, lecz jest uporządkowanym procesem, który tworzy schemat postępowania [7]. Schemat postępowania w metodzie 8D został zaprezentowany na rys. 1 [11].

Metodyka raportu 8D opiera się na ośmiu krokach (tab. 1) [2].

Tab. 1. Metodyka raportu 8 D

Krok	Interpretacja	Działania w ramach metody 8D
1D – wyznaczenie zespołu do rozwiązywania problemu (grupa robocza)	ustalenie zespołu 2-10 osób z różnych działów i wybór lidera.	wskazanie kierownika, sponsora oraz pozostałych członków zespołu z odpowiednimi kompetencjami, dołączenie specjalistów, których wybór jest dostosowany do specyficznego przypadku, uzupełnienie raportu w polu D1
2D – zdefiniowanie problemu	dokładne opisanie problemu	dokładne sporządzenie opisu wraz z podaniem skali, jeżeli sytuacja tego wymaga, to należy uwzględnić otoczenie problemu, uzupełnienie raportu w polu D2
3D – działania natychmiastowe (akcja natychmiastowa)	wprowadzenie różnych działań adekwatnych do problemu	określenie, jakie działania natychmiastowe muszą zostać podjęte, w celu całkowitego wyeliminowania skutków problemu, zanim zostaną wdrożone działania usuwające ich przyczynę, uzupełnienie raportu w polu D3

Krok	Interpretacja	Działania w ramach metody 8D
4D – analiza przyczyn źródłowych	ustalenie faktycznej przyczyny wystąpienia problemu	ustalenie faktycznych przyczyn problemu w odniesieniu do ustaleń z kroków D2 oraz D3, identyfikacja nie tylko przyczyn technicznych, ale również tych leżących po stronie systemu, uzupełnienie raportu w polu D4
5D – określenie działań korygujących (akcja korekcyjna)	ustalenie i wprowadzenie działań korygujących (akcji zapobiegawczych)	opracowanie, wybranie i zweryfikowanie działań korygujących dla określenia w kroku D4 przyczyn o charakterze technicznym i systemowym, dobór skutecznych działań korygujących, uzupełnienie raportu w polu D5
6D – wdrożenie działań korygujących i ich walidacja (weryfikacja akcji korekcyjnej)	weryfikacja wprowadzonych działań korekcyjnych	implementacja założonych w kroku D5 działań, obserwacja wyników podjętych działań w dłuższym horyzoncie czasowym, uzupełnienie raportu w polu D6
7D – zapobieganie ponownemu wystąpieniu błędu (akcja zapobiegawcza)	wprowadzenie działań zapobiegawczych, aby problem w przyszłości nie wystąpił	udokumentowanie działań, dzięki którym możliwe jest długotrwałe zapobieganie zarówno temu, jak i podobnym problemom w przyszłości, dostosowanie systemu do nowego standardu, uzupełnienie raportu w polu D7
8D – zakończenie i uznanie sukcesu zespołu (ocena i raport 8D)	ocena wszystkich działań oraz sporządzenie raportu 8D.	podsumowanie wykonanej przez zespół pracy, ocena wysiłków włożonych w rozwiązanie problemu zarówno całego składu zespołu, jak i każdego członka zespołu indywidualnie, uzupełnienie raportu w polu D8

Na poszczególnych etapach realizacji metody 8D, w praktyce funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych, najczęściej wykorzystywane są następujące techniki i narzędzia jakości [1], [8], [10], [15] (tab. 2):

Tab. 2. Techniki i narzędzia wspierające realizację metody 8D

Etap	Narzędzia i techniki wspierające realizację etapu metody 8D
1D	poprzednie raporty 8D, diagram Ishikawy, diagram relacji
2D	poprzednie raporty 8D, burza mózgów, arkusz kontrolny, analiza porównawcza, histogram, diagram Ishikawy, analiza FMEA, wykres Pareto, metoda ABCD, zdolność procesu, dane SPC
3D	poprzednie raporty 8D, analiza porównawcza, analiza ryzyka, analiza FMEA, zdolność procesu, wykres Gantta
4D	poprzednie raporty 8D, analiza FMEA, diagram Ishikawy, diagram relacji, diagram macierzowy
5D	poprzednie raporty 8D, metoda ABCD
6D	poprzednie raporty 8D, schemat blokowy, wykres PDCA, wykres Gantta
7D	poprzednie raporty 8D, analiza FMEA, wykres Pareto, dane SPC
8D	poprzednie raporty 8D

Podsumowując, należy podkreślić, że metoda 8D:

- to uporządkowany proces obejmujący określone działania [4], [7],
- powinna być wykorzystywana nie tylko w odniesieniu do rozwiązywania problemów zewnętrznych, ale również wewnętrznych [3],
- ułatwia nie tylko określenie przyczyn powstawania niezgodności, ale również wskazuje sposób rozwiązania problemu, a dodatkowo umożliwia walidację dokonanych działań [9],
- kładzie nacisk na pracę zespołową [1].

### **Opis badanego problemu**

Przedsiębiorstwo poddane analizie jest częścią globalnej spółki działającej w branży automotive. Przedmiotem działalności badanego przedsiębiorstwa jest produkcja elementów dekoracyjnych wyposażenia samochodów w klasie marki premium. Bieżąca oferta produktowa przedsiębiorstwa ulega zmianom i jest zależna od zleceń produkcyjnych. Do głównych klientów badanego przedsiębiorstwa należą producenci marek m.in. Audi, BMW, Ford, Volkswagen, Volvo.

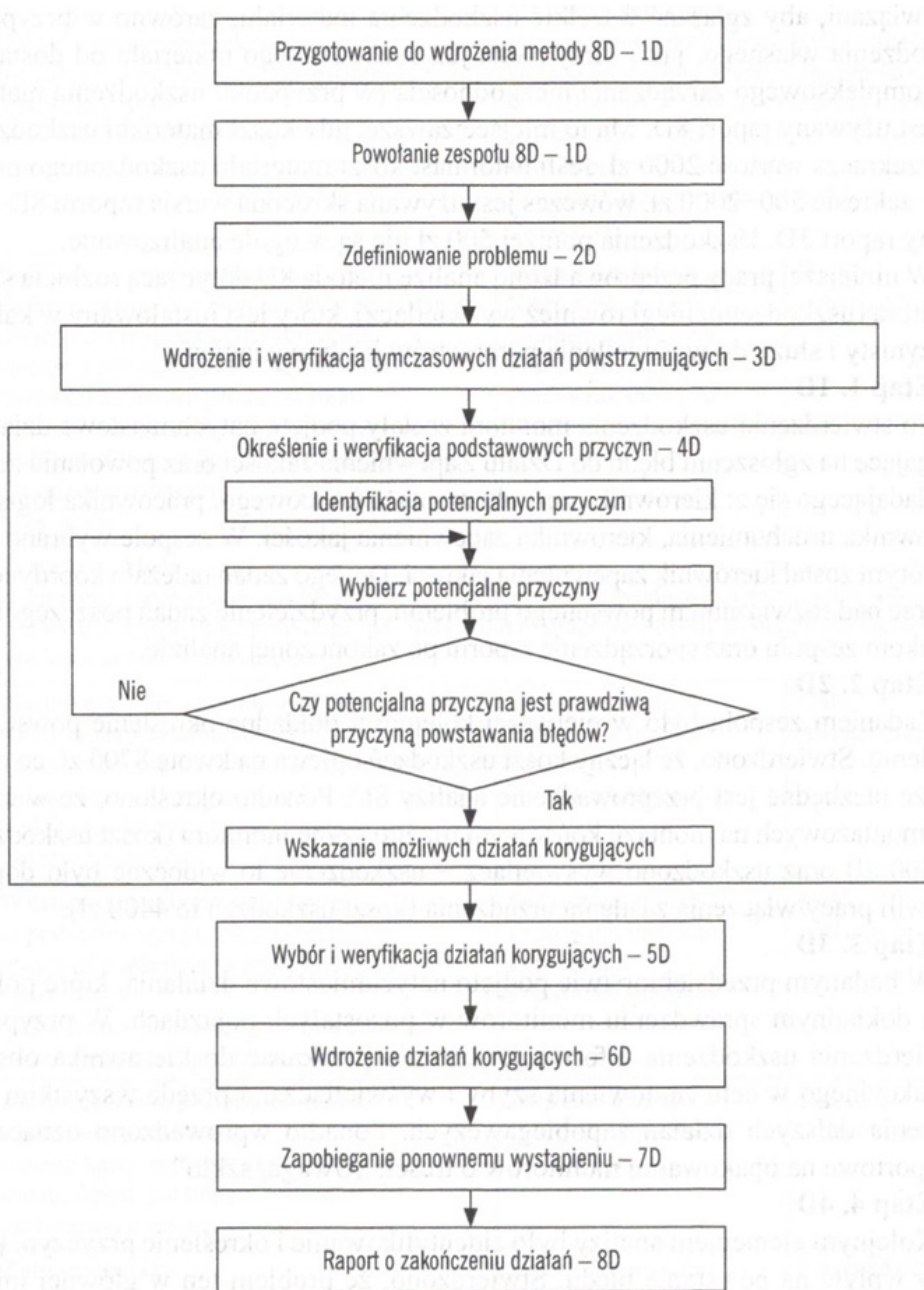
Należy podkreślić, iż w badanym przedsiębiorstwie reklamacje mają charakter reklamacji wewnętrznych (wykrytych przez pracowników, którzy są traktowani jako klienci wewnętrzni) oraz reklamacji zewnętrznych (wykrytych przez klientów zewnętrznych przedsiębiorstwa).

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę metodą 8D odnoszącą się do niezgodności – nadlew w wybranym elemencie dekoracyjnym wytwarzanym przez badane przedsiębiorstwo.

Proces produkcyjny badanego elementu dekoracyjnego wytwarzanego przez przedsiębiorstwo obejmuje operacje technologiczne i operacje manipulacyjne. Na rys. 2 została zaprezentowana karta przebiegu procesu produkcyjnego badanego elementu dekoracyjnego.

W katalogu niezgodności dla badanego elementu dekoracyjnego wymieniono:

- czarne kropki,
- deformacje,
- nadlew,
- nierówna powierzchnia lakieru,
- odgazowanie na utwardzonej lakierowanej powierzchni,
- rysy,
- uszkodzenie pinów montażowych – pęknięcie, wyłamanie,
- wada lakieru – różnego rodzaju wady lakiernicze,
- wgnioty,



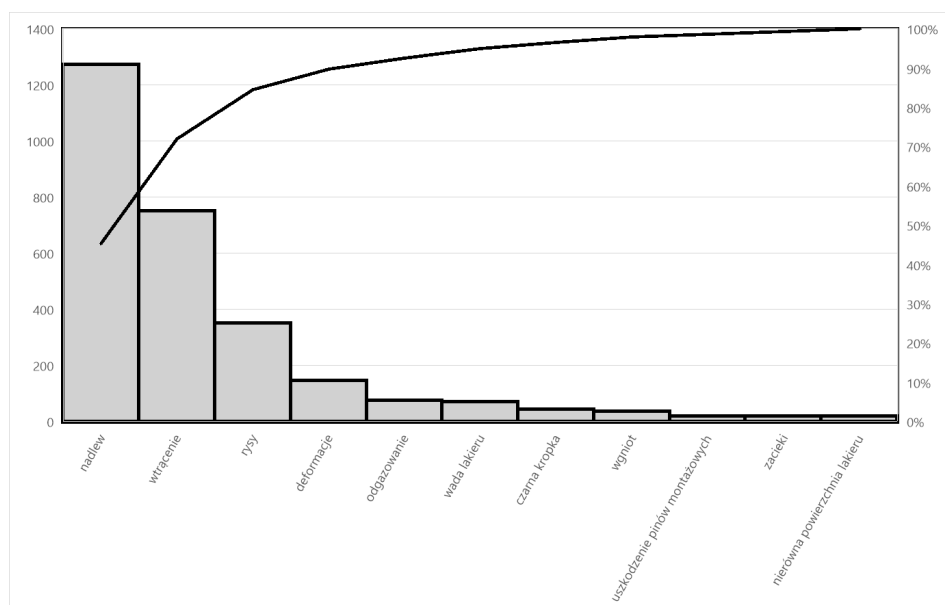
Rys. 1. Schemat postępowania w metodzie 8D

Lp.	Nazwa operacji procesu produkcyjnego	Charakterystyka urządzeń	Projektowany schemat przebiegu			
			○	⇒	□	▽
1.	Pobranie wyrobu z działu wtrysku	Pobranie ręczne	●			
2.	Transport międzydziałowy	Wózek widłowy				
3.	Załadunek	Specjalistyczne wieszaki	●			
4.	Oczyszczanie części	Pistolet ze sprężonym powietrzem				
5.	Transport międzyoperacyjny	Wózek widłowy				
6.	Lakierowanie	Pistolet ciśnieniowy	●			
7.	Suszenie	Specjalistyczne wieszaki	●			
8.	Transport międzyoperacyjny	Wózek widłowy				
9.	Kontrola wstępna	Kontrola wizualna				
10.	Magazynowanie międzyoperacyjne	Regał przepływowy				
11.	Montaż	Montaż ręczny, maszyna	●			
12.	Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego	Kontrola wizualna i kontrola metrologiczna – kropkomierz, szczelnomierz				
13.	Kontrola przez pracownika zewnętrznego	Kontrola wizualna i kontrola metrologiczna – kropkomierz, szczelnomierz				
14.	Transport na strefę magazynowania	Wózek paletowy ręczny				
15.	Magazynowanie	Regały magazynowe				

Rys. 2. Karta przebiegu procesu produkcyjnego badanego elementu dekoracyjnego

- wtrącenia – są to ciała obce znajdujące się na lub pod powierzchnią warstwy lakieru, ich usunięcie bez uszkodzenia lakieru jest niemożliwe,
- zacieki – jest to nadmierna ilość farby spływająca po powierzchni lakierowanego elementu.

Na podstawie raportów wewnętrznych pochodzących z etapu „Kontrola przez pracownika zewnętrznego” w okresie trzech miesięcy opracowano tabelę (tab. 3), która następnie posłużyła do przygotowania wykresu Pareto-Lorenza (rys. 3).



Rys. 3. Diagram Pareto-Lorenza dla niezgodności występujących w elemencie dekoracyjnym w badanym okresie

Tab. 3. Liczba niezgodności występujących w elemencie dekoracyjnym w badanym okresie

Niezgodność	Liczba wystąpień*	Skumulowana liczba wystąpień	Udział procentowy	Skumulowany udział procentowy
Nadlew	1274	1274	45%	45%
Wtrącenie	752	2026	27%	72%
Rysy	353	2379	13%	85%
Deformacje	148	2527	5%	90%
Odgazowanie	75	2602	3%	92%
Wada lakieru	71	2673	3%	95%
Czarna kropka	45	2718	2%	97%
Wgniot	36	2754	1%	98%

Nie zgodność	Liczba wystąpień*	Skumulowana liczba wystąpień	Udział procentowy	Skumulowany udział procentowy
Uszkodzenie pinów montażowych	20	2774	1%	99%
Zacieki	20	2794	1%	99%
Nierówna powierzchnia lakieru	19	2813	1%	100%
Suma	2813	2813	100%	100%

\* Dane zostały zakodowane.

Na podstawie danych zebranych w badanym okresie, przeprowadzono analizę metodą 8D dotyczącą niezgodności - nadlew w wybranym elemencie dekoracyjnym.

## Praktyczne aspekty zastosowania raportu 8D

### KROK 1 – 1D

Po otrzymaniu zgłoszeń (reklamacji zewnętrznych) dotyczących nadlewów powołany został zespół do rozwiązania problemu. W skład grupy roboczej weszli: lider działu montażu, lider działu wtrysku, szef produkcji, inżynier jakości oraz lider kontroli zewnętrznej. Liderem zespołu wybrany został inżynier jakości.

### KROK 2 – 2D

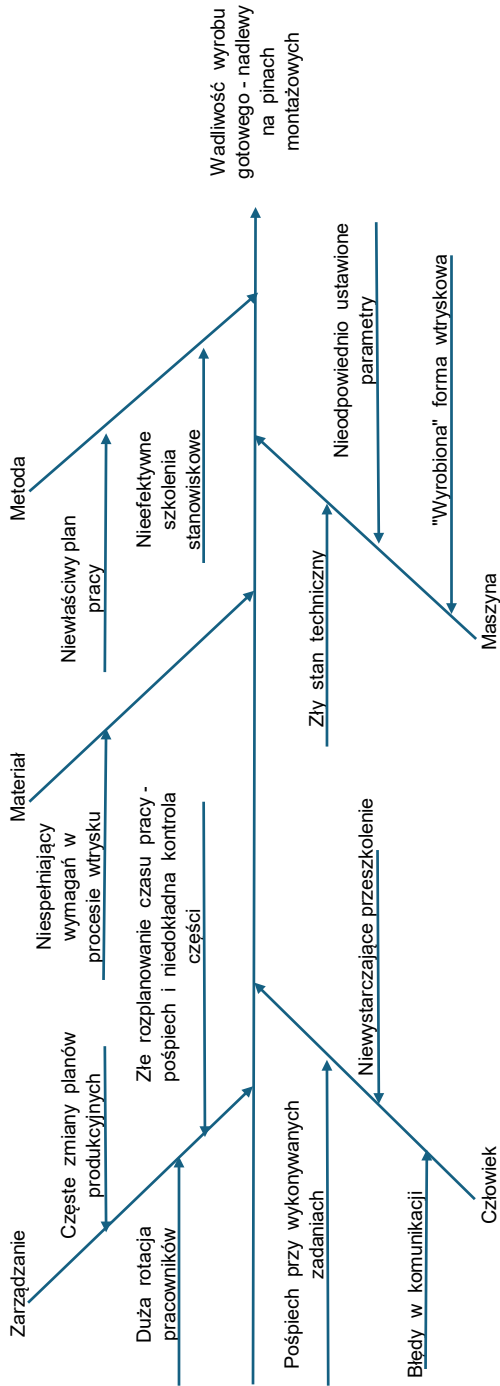
Zespół roboczy został zaznajomiony ze zgłoszonym problemem. Zgłoszona przez klienta zewnętrznego reklamacja dotyczyła nadlewów, które uniemożliwiały poprawny montaż elementu dekoracyjnego w pojeździe. Należy dodać, iż stanowiska „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego oraz „Kontrola końcowa przez pracownika zewnętrznego” nie odnotowały w swoich raportach wystąpienia tej niezgodności.

### KROK 3 – 3D

Zespół roboczy opracował oraz wprowadził działania natychmiastowe, których celem było zabezpieczenie klienta przed ponownym otrzymaniem niezgodnych wyrobów. Jako działania natychmiastowe wprowadzono:

- kontrolę form wtryskowych,
- kontrolę stanów magazynowych oraz
- rework w odniesieniu do wykrycia niezgodnych wyrobów.

Rework polegał na usunięciu nadlewu z wykorzystaniem specjalistycznego pilnika. Dodatkowo wprowadzono alarm jakości oraz przeszkolono w tym zakresie wszystkich pracowników zmian produkcyjnych w obszarze działów wtrysku oraz montażu. Odbyte szkolenie pracownicy potwierdzali podpisami. Alarmy jakości zostały wywieszane przy stanowiskach pracy. W ten sposób umożliwiono pracownikom bieżący i stały wgląd w dokumentację.

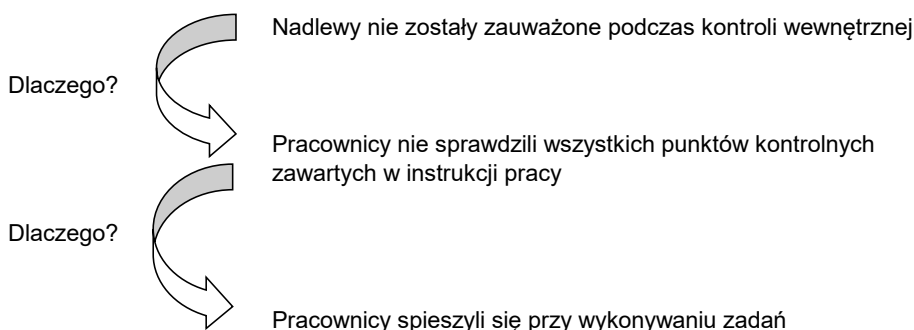


Rys. 4. Diagram Ishikawy dla niezgodności nadlewy

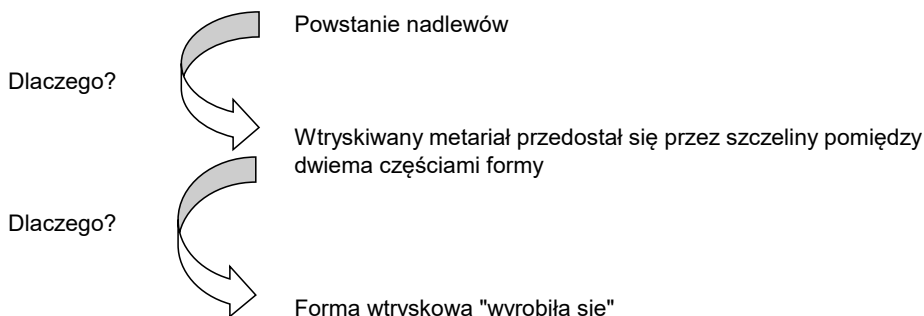
#### KROK 4 – 4D

Podczas burzy mózgów, zespół roboczy ustalił pierwotne przyczyny wystąpienia problemu. W kroku tym wykorzystano również takie narzędzia jak: diagram Ishikawy (rys. 4) oraz metodę 5Why (rys. 5 oraz rys. 6). Ustalono, że istotnymi przyczynami źródłowymi dla tego problemu są:

- w kategorii „człowiek” – „pośpiech przy wykonywanych zadaniach” oraz
- w kategorii „maszyna” – „wyrobiona forma wtryskowa”.



Rys. 5. Analiza 5W dla grupy „człowiek”



Rys. 6. Analiza 5W dla grupy „maszyna”

#### KROK 5 – 5D

Wśród akcji zapobiegawczych rekomendowanych przez grupę roboczą i wdrożonych w badanym przedsiębiorstwie znalazły się następujące działania:

- regularne kontrole parametrów wtrysku,
- regularne kontrole stanu form wtryskowych,
- ustalenie dla pracowników kontroli zewnętrznej harmonogramów przeprowadzenia testów Skip Lot (polegają one na pobraniu przez przeszkolonego pracownika

losowo wybranej partii wyrobu gotowego i jej kontrola – kontrola odbywać się ma codziennie na każdej zmianie),

- wprowadzenie audytów LPA,
- przeprowadzenie ponownego szkolenia z katalogu niezgodności dla pracowników wszystkich zmian produkcyjnych z działów wtrysku i montażu.

#### KROK 6 – 6D

Podczas walidacji skuteczności akcji korygujących otrzymano raport z kontroli Skip Lot. Raport potwierdził skuteczność działań. W skontrolowanych częściach nie wykryto wyrobów niezgodnych (tab. 4).

#### KROK 7 – 7D

Wprowadzone zostały standardy dotyczące:

- regularnego przeprowadzania kontroli Skip Lot dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”,
- regularnego przeprowadzania audytów LPA dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”,
- przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego”,
- przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”.

Celem testów R&R jest ustalenie bieżącego poziomu wiedzy pracowników w zakresie katalogu niezgodności, wprowadzonych standardów w oparciu o raport 8D oraz alarmów jakości.

Tab. 4. Raport Skip Lot

Raport Skip Lot						
Data	Zmiana	Numer części*	Kontrolowany pracownik	Kontroler	Liczba części pobrana do kontroli (szt.)**	Liczba części NOK
00.00.0000	A	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	36	0
00.00.0000	B	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	40	0
00.00.0000	C	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	32	0
00.00.0000	C	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	44	0
00.00.0000	A	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	44	0
00.00.0000	B	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	36	0
00.00.0000	C	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	36	0
00.00.0000	A	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	40	0
00.00.0000	B	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	36	0

Raport Skip Lot						
Data	Zmiana	Numer części*	Kontrolowany pracownik	Kontroler	Liczba części pobrana do kontroli (szt.)**	Liczba części NOK
00.00.0000	C	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	28	0
00.00.0000	A	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	32	0
00.00.0000	B	0X00000000XX	A.A.	Z.Z.	32	0

\* Numer części został zakodowany.

\*\* Liczba została zakodowana.

## KROK 8 – 8D

Zespół roboczy zamknął raport 8D i pozytywnie ocenił swoje działania (tab. 5).

Tab. 5. Ukończony raport 8D

RAPORT 8D		
TYTUŁ PROBLEMU	NUMER RAPORTU	DATA WYSTĄPIENIA
Nadlewy	00/0000	00.00.0000
NUMER REFERENCYJNY WYROBU		NAZWA
0X00000000XX 0X00000000XX 0X00000000XX 0X00000000XX		element dekoracyjny wnętrza pojazdu marki premium
1D – POWOŁANIE ZESPOŁU		
Lider zespołu – inżynier jakości Członkowie: lider działu montażu, lider działu wtrysku, szef produkcji, inżynier jakości, lider kontroli zewnętrznej.		
2D – OPIS PROBLEMU		
Zgłoszona przez klienta zewnętrznej reklamacja dotyczyła nadlewów, które uniemożliwiły poprawny montaż elementu dekoracyjnego w pojeździe. Należy dodać, iż stanowiska „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego oraz „Kontrola końcowa przez pracownika zewnętrznego” nie odnotowały w swoich raportach wystąpienia tej niezgodności.		
3D – AKCJE NATYMIASTOWE		
kontrola form wtryskowych, kontrola stanów magazynowych, rework w odniesieniu do wykrycia niezgodnych wyrobów, wprowadzenia alarmów jakości, przeszkolenie pracowników.		

<b>4D- PRZYCZYNY ŹRÓDŁOWE</b>	
w kategorii „człowiek” – pośpiech przy wykonywanych zadaniach” oraz w kategorii „maszyna” – „wyrobiona forma wtryskowa”.	
<b>5D – DZIAŁANIA KORYGUJĄCE</b>	
regularne kontrole parametrów wtrysku, regularne kontrole stanu form wtryskowych, ustalenie dla pracowników kontroli zewnętrznej harmonogramów przeprowadzenia testów Skip Lot (polegają one na pobraniu przez przeszkolonego pracownika losowo wybranej partii wyrobu gotowego i jej kontrola – kontrola odbywać się ma codziennie na każdej zmianie), wprowadzenie audytów LPA, przeprowadzenie ponownego szkolenia z katalogu niezgodności dla pracowników wszystkich zmian produkcyjnych z działów wtrysku i montażu.	
<b>6D-WERYFIKACJA AKCJI KORYGUJĄCYCH</b>	
Raport potwierdził skuteczność działań. W skontrolowanych częściach nie wykryto wyrobów niezgodnych.	Skuteczność akcji: 100%.
<b>7D – AKCJE ZAPOBIEGAWCZE</b>	
regularne przeprowadzania kontroli Skip Lot dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”, regularne przeprowadzania audytów LPA dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”, przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego”, przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”.	
<b>8D – ZAMKNIĘCIE RAPORTU</b>	
Data zamknięcia: 00.00.0000 Podpis: D.D.	

## Podsumowanie

Celem artykułu była identyfikacja niezgodności w wyrobie gotowym oraz dokonanie analizy przyczyn ich powstawania wraz z oceną wprowadzonych działań korygujących z wykorzystaniem raportu 8D.

Analizując proces produkcyjny elementu dekoracyjnego wyposażenia pojazdów marki premium, wykorzystano kartę przebiegu procesu. Na jej podstawie dokonano podziału operacji na operacje technologiczne oraz operacje manipulacyjne. Dodatkowo dokonano diagnozy maszyn i urządzeń wykorzystywanych w badanym procesie produkcyjnym. Następnie dokonano charakterystyki niezgodności występujących w wyrobie gotowym oraz przedstawiono w formie tabelarycznej liczbę niezgodności stwierdzonych w okresie trzech miesięcy. Na tej podstawie, z wykorzystaniem wykresu Pareto-Lorenza, wskazano niezgodności powodujące blisko 80% niezgodności. Zaliczono do nich „nadlew” oraz „wtrącenie”.

Biorąc pod uwagę reklamacje od klientów zewnętrznych, a także fakt, iż nie zostały one wykryte zarówno przez stanowisko „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego” oraz „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”, dla niezgodności „nadlewy” wdrożono procedurę metody 8D.

Dzięki zastosowaniu metody 8D osiągnięto następujące korzyści:

- w zakresie akcji natychmiastowych podjęto działania odnoszące się do kontroli form wtryskowych, kontroli stanów magazynowych, reworku w odniesieniu do wykrycia niezgodnych wyrobów, wprowadzenia alarmów jakości oraz przeszkolenia pracowników,
- w zakresie określenia przyczyn źródłowych posłużono się diagramem Ishikawy oraz metodą 5Why; do znaczących przyczyn w kategorii „człowiek” wskazano „pośpiech przy wykonywanych zadaniach”, w kategorii zaś „maszyna” – „wyrobiona forma wtryskowa”; tworząc diagram Ishikawy oraz metodę 5Why wykorzystano burzę mózgów,
- w zakresie działań korygujących zaproponowano: regularne kontrole parametrów wtrysku, regularne kontrole stanu form wtryskowych, ustalenie dla pracowników kontroli zewnętrznej harmonogramów przeprowadzenia testów Skip Lot, wprowadzenie audytów LPA, przeprowadzenie ponownego szkolenia z katalogu niezgodności dla pracowników wszystkich zmian produkcyjnych z działów wtrysku i montażu,
- walidację wprowadzonych działań i ocenę ich skuteczności potwierdzono w raporcie Skip Lot,
- w zakresie akcji zapobiegawczych wprowadzono regularne przeprowadzania kontroli Skip Lot dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”, regularne przeprowadzania audytów LPA dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”, przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola końcowa przez pracownika wewnętrznego”, przeprowadzenie testów R&R dla pracowników stanowiska „Kontrola przez pracownika zewnętrznego”.

## Literatura

- Babica M., & Pająk E. (2006). *Model efektywnej metody rozwiązywania problemów, Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 1, R. Knosala (red.), Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 46-54.
- Barosz P., Dudek-Burlikowska M., & Roszak M. (2018). *Systemowe ujęcie doskonalenia procesu i produktu z wykorzystaniem metod i narzędzi zarządzania jakością*. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, (118), 13-28.

- Francik K., & Pudło M. (2016). *Systemy wspomaganie decyzji w aspekcie zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie*. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Zarządzanie, (22), 23-32.
- Gajdzik B. (2016). *Raportowanie 8D w obsłudze reklamacji na przykładzie wyrobów hutniczych*. Organizacja i Zarządzanie: kwartalnik naukowy, (2), 47-63.
- Golińska E. (2018). *Doskonalenie procesu postępowania z niezgodnością bazujące na raporcie 8D*. Zarządzanie Przedsiębiorstwem, 21(3), 9-17.
- Hamrol A. (2012). *Zarządzanie jakością z przykładami*. Warszawa: PWN.
- Kluczek A., & Babuśka, Ł. (2009). *Rozwiązywanie problemów w motoryzacji*. Przegląd Techniczny, wkładka: Inżynieria Jakości, 24, 7-8.
- Krajnc M. (2012). *With 8D method to excellent quality*. Journal of Universal Excellence, 3(10), 118-129.
- Łasiński G. (2007). *Rozwiązywanie problemów w organizacji: moderacje w praktyce*. Warszawa: PWE.
- Łuczak J., & Maćkiewicz E. (2006). *8D oraz inne metody zarządzania jakością w branży motoryzacyjnej (OE/OES) – analiza przypadku*. Problemy Jakości, 38, 35-43.
- Łuczak J., & Matuszak-Flejszman A. (2007). *Metody i techniki zarządzania jakością*. Poznań: Quality Progress.
- Mróz J. (2007). *8D (8 dyscyplin) – Proces rozwiązywania problemów*. [w:] J. Łuczak, A. Matuszak-Flejszman (red.). *Metody i techniki zarządzania jakością*. Poznań: Quality Press, 271-281.
- Nęcki Ł. (2016). *Kontrola jakości procesu produkcji z wykorzystaniem metody wizualnej*. Studium przypadku. Zeszyty Naukowe. Quality. Production. Improvement, 1(2), 40-53.
- Olszewska B., & Szewczyk P. (2012). *Skuteczne i efektywne zarządzanie reklamacjami na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, 275-289.
- Pacana A., Czerwińska K. (2017). *Wykorzystanie metody 8D do rozwiązywania problemu jakościowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Zarządzanie, 2(28), 73-86.
- Pacana A., & Siwiec D. (2018). *Analiza rozwiązania problemu wyrobów niezgodnych z wykorzystaniem metody 8D*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, (117), 433-446.
- Pacana A., Siwiec, D. & Czerwińska K. (2023). *Zmodyfikowana metoda doskonalenia jakości produktów z wykorzystaniem raportu 8D*. Inżynieria Zarządzania. Cyfryzacja Produkcji. Aktualności badawcze 5. R. Knosala (red.), Warszawa: PWE, 433-441.
- Plinta D., Golińska E., Więzik, D. (2022). *Zmodyfikowany raport 8D jako skuteczna metoda odpowiedzi na reklamację w branży motoryzacyjnej*. Inżynieria Zarządzania. Cyfryzacja Produkcji. Aktualności badawcze 4. R. Knosala (red.), Warszawa: PWE, 319-329.
- Siwiec D., Pacana A., & Liberko I. (2018). *Analiza niezgodności związanych z grubością ściany wyrobu*. Management of Environment, 90-102.
- Strycharska D., & Wyczółkowski R. (2022). *Analiza problemu wyrobów niezgodnych z wykorzystaniem metody 8D*. Inżynieria Zarządzania. Cyfryzacja Produkcji. Aktualności badawcze 4. Red. R. Knosala, Warszawa: PWE, 351-358.
- Szałek A., & Madej-Kielbik L. (2021). *Wybrane metody oceny kontroli jakości wyrobu gotowego*. Technologia i Jakość Wyrobów, 66, 20-32.
- Szczepańska K. (2011). *Zarządzanie jakością. W dążeniu do doskonałości*, Warszawa: CH Beck.
- Zasadzień M. (2016). *Wykorzystanie metody 8D do doskonalenia procesu remontowego wagonów kolejowych*. Systemy Wspomaganie w Inżynierii Produkcji, 2(14), 392-399.



**Jacek Habel**

## **ANALIZA PROCESU WYPALANIA BLACH NA MASZYNIE TRULASER 3030 L20 W CELU WZROSTU WSKAŹNIKA WYKORZYSTANIA SPRZĘTU OEE**

### **Wprowadzenie**

Współpraca uczelni i przemysłu ma kluczowe znaczenie w rozwoju obu partnerów. Uczelnie, szczególnie techniczne, powinny realizować program nauczania powiązany z praktyką, gdzie kierunek inżynieria produkcji jest bardzo dobrym przykładem. Zakłady przemysłowe również powinny korzystać z nowoczesnych rozwiązań, w których wdrażaniu powinny im pomagać ośrodki naukowe.

Współpraca ta nie zawsze była na odpowiednim poziomie. Przez wiele lat była dość ograniczona i powszechny był dystans pomiędzy nauką a biznesem wynikający z różnych poglądów i oceny stanu wiedzy drugiej strony. Ponadto brakowało systemowych mechanizmów wspomagających tę współpracę w postaci dedykowanych projektów. Sytuacja ta zaczęła się zmieniać kilkanaście lat temu wraz z wprowadzaniem kolejnych programów wsparcia, jak na przykład mały czy duży bon na innowacje. Współcześnie sytuacja jest o wiele lepsza, gdyż zakłady przemysłowe mogą aplikować o duże granty wartości wielu milionów złotych. Ważne jest, aby w takich przypadkach wsparciem przy pisaniu i realizacji takich projektów byli również pracownicy naukowcy. Dobrym przykładem są tutaj współprace uczelni i zakładów produkcyjnych w Niemczech czy Danii, co powinno być inspiracją i kierunkiem rozwoju dla Polski [4].

Realizacja wspólnych zadań może być realizowana na różnych płaszczyznach. Z punktu widzenia uczelni cenną jest możliwość pozyskania tematów (problemów) z przemysłu, które mogą być realizowane w ramach prac dyplomowych czy kół naukowych. Pożądaną możliwością jest odbywanie praktyk studenckich w zakładach pracy. Z drugiej strony oczekiwania są skierowane na konkretne rozwiązania, które można

od razu wdrożyć i obserwować ich korzyści. Intrygujący jest fakt, że sporo problemów zgłaszanych przez zakłady przemysłowe nie ma wyraźnego charakteru naukowego, a niektóre wręcz wydają się trywialne, ale do momentu, w którym nie spróbujemy ich rozwiązać. W przypadku zadań o mniejszej skali nadal możliwe jest podpisywanie bezpośrednich umów na realizację projektów zamawianych. Taki właśnie przykład zostanie opisany w tym artykule.

## Opis projektu

Niniejsze opracowanie jest wynikiem realizacji projektu zamawianego przez zakład produkujący komponenty do maszyn rolniczych. Umowa została zawarta bezpośrednio z uczelnią bez funduszy zewnętrznych. Ustalono następujący temat projektu: *Analiza procesu wypalania blach na laserze typu TruLaser 3030 L20 w celu wzrostu dziennego spływu wypalanych elementów*. W ramach budżetu zaplanowano dwa wyjazdy studyjne.



Rys. 1. Przykładowy wyrób produkowany w zakładzie

Głównym asortymentem produkcji były komponenty do maszyn rolniczych (przykładowy wyrób przedstawia rys. 1), które zasadniczo były składane z elementów blach i łączone w procesie spawania. Dlatego materiałem wejściowym do produkcji były arkusze blach wykonane z różnych materiałów i o różnych grubościach. Arkusze blachy poddawane były procesowi rozkroju, w tym przypadku wypalania na laserze. W zasadzie proces ten jest zautomatyzowany, polega na załadowaniu suwnicą odpowiedniego arkusza blachy, wgraniu odpowiedniego programu sterującego i uruchomieniu. Wówczas maszyna powinna wykonać całość programu i bez przerw w zadanym czasie. Problem zgłoszony przez zamawiającego dotyczył, ich zdaniem, niskiego

procentu wykorzystania maszyny. Po kilku latach eksploatacji z danych odczytanych ze sterownika wynikało, że maszyna w dostępnym czasie pracy uzyskiwała około 62% wykorzystania.

Celem projektu było zidentyfikowanie przyczyn niskiego poziomu wykorzystania lasera oraz przedstawienie rozwiązań, które pozwoliłyby docelowo zwiększyć ilość wypalanych elementów. Jak łatwo zauważyć tak postawiony cel, przedstawiający liczbę sztuk dziennie, jest nieadekwatny ze względu na występujące różnice stopnia skomplikowania kształtów wypalanych elementów, jak i ich rozmiarów (od kilku do kilkudziesięciu centymetrów). Lepszą wersją byłoby mierzenie liczby arkuszy, ale to też nie jest miarodajne w sztukach, gdyż nie zawsze jest wypalany cały arkusz, a ponadto dla różnych grubości są zamawiane arkusze o różnych rozmiarach. Dlatego ostatecznie zdecydowano się zastosować wskaźnik OEE informujący o efektywności wykorzystania maszyny [1, 2, 5]. Za cel postawiono zwiększenie jego wartości o 5%.

## Realizacja projektu

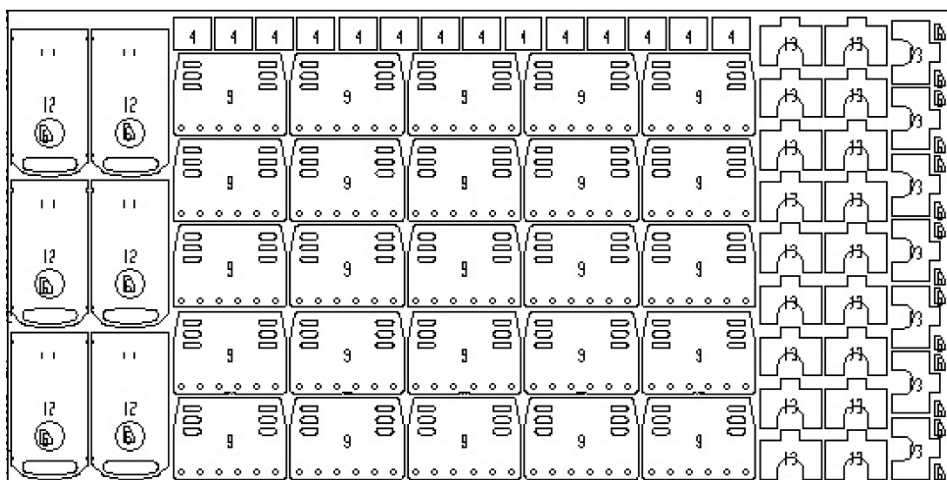
Realizację projektu podzielono na trzy etapy. Dwa pierwsze dotyczyły realizacji wyjazdów studyjnych celem zebrania potrzebnych danych, a ostatni dotyczył wykonania analizy i opracowania zaleceń.

W ramach projektu zrealizowano dwa wyjazdy studyjne po 3 dni na miejscu w zakładzie. W trakcie wizyt przeprowadzono rozmowy z kierownictwem i pracownikami, zebrano dane w postaci plików różnego typu oraz wykonano nagrania wideo za pomocą dwóch kamer.

## Opis procesu

Cięcie blach laserem jest etapem przygotowawczym produkcji zleconych wyrobów. Następnie te elementy są obrabiane: mechanicznie (wiercenie, frezowanie, toczenie) lub gięte, potem są najczęściej spawane. Operacje palenia (wycinania laserowego) są zazwyczaj realizowane z tygodniowym wyprzedzeniem, aby utworzyć bufor dla spawalni. Musi być więc realizowane z wyprzedzeniem do terminu realizacji.

Zakres wypalanych blach na laserze jest szeroki. Ogólnie używane są blachy o grubości od 1 do 20 mm. Używane są głównie stale: miękkie S235, twarde S355MC oraz S500MC. Używa się również stale kwasoodporne w zakresie od 1,5 mm do 15 mm oraz blachy aluminiowe w grubościach: 2,5 mm, 4 mm, 8 mm i 10 mm.



Rys. 2. Przykładowy program rozkroju generowany programem TruTops

Planowanie produkcji tych elementów zostało zmodyfikowane. Początkowo zlecenia na laser były łączone po wyrobie, ze względu na dalszy przebieg realizacji procesu. Wówczas wszystkie potrzebne elementy były wytwarzane razem, ale powodowało to następujące niedogodności: duża ilość materiałów wejściowych (blach) o różnych grubościach, co powoduje zwiększenie liczba przebrojeń, duża liczba zaczętych arkuszy (większe straty materiału lub ich odkładanie na później, co zwiększa WIP), czasem brakowało miejsca na wypalenie wszystkich elementów i tak trzeba było czekać na wypalenie elementu przy następnym zleceniu – czyli w zasadzie to się nie sprawdzało. Zdecydowano się więc na łączenie zleceń po grubości blachy w celu eliminacji zbędnych przebrojeń.

Tworzeniem programów zajmuje się technolog-planista, który układa elementy ze zleceń na arkusze blachy. W ujęciu tygodniowym (to zależy od wielkości detali) planowanych jest do wypalenia od 5000 do 10000 sztuk. Detale mogą się powtarzać, pochodzić od różnych zleceń klientów na ten sam wyrób, pochodzić z różnych wyrobów. Planista jednak robi wstępną agregację po detalach z różnych zleceń, ale dla tej samej grubości blachy. Technolog pracuje w dedykowanym dla maszyny programie *TruTops*. Ten program generuje rozkrój blachy. Z otrzymanej od planisty listy zleceń, dla wybranej grubości blachy, wpisuje ID elementów do wykonania. Następnie program sam wczytuje zarysy wszystkich elementów w formacie DXF. Program sam generuje rozkrój i są tu dwie opcje: automatyczne rozmieszczenie oraz rozmieszczanie w polach prostokątnych. Rysunek 2 przedstawia przykładowy program rozkroju arkusza blachy.

## Stan zastany

Podczas uzgadniania projektu ustalono, że miernikiem będzie wskaźnik OEE, który obliczany jest na podstawie wzorów [1, 2, 5]:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q \quad (1)$$

gdzie:

- *A* – *Availability*, czas dostępny pracy maszyny w odniesieniu do czasu kalendarzowego, wyrażony w procentach [%],
- *P* – *Performance rate*, wskaźnik wykorzystania maszyny, wyrażony w procentach w odniesieniu do pracy w warunkach idealnych bez zakłóceń [%],
- *Q* – *Quality*, liczba poprawnie wykonanych elementów w procentach [%].

Układ sterowania na laserze rejestruje czasy UP/DOWN TIME. Niestety producent maszyny wykluczył możliwość samodzielnego pobrania danych. Można było jednak odczytać ze sterownika, że laser przepracował 13 520 h, natomiast samo cięcie (włączona wiązka) trwało 8340 h. Ten czas nie uwzględnia jednak ruchów jałowych głowicy. Z danych technicznych ustalono, że prędkość ruchów jałowych wynosi 141 m/min. Prędkość wypalania jest różna i zależy głównie od grubości blachy. Doświadczalnie jednak stwierdzono, że średnia prędkość posuwu roboczego wynosi 2,8 m/min. W generowanych zleceniach (programach) podawany był tylko czas główny, dlatego do wyniku należy doliczyć również czas ruchów jałowych. Przyjmując uproszczenie, że stosunek prędkości roboczej do jałowej wynosi:  $2,8 / 141 = 0,01985$ , czyli około 2%, to o tyle należy zwiększyć czas pracy maszyny:

$$8\,340 \text{ [h]} + 2\% = 8340 + 167 = 8\,507 \text{ [h]}$$

Od kierownika produkcji uzyskano informację, że średni poziom brakowości wynosi 0,03%, stąd wskaźnik jakości wynosi  $Q = 99,97\%$ .

Z tego wynika, że uzyskane wykorzystanie (ang. *Utilization*) jest na poziomie:

$$U = A \cdot P = 8507/13520 = 62,92\%$$

Stąd wartość wskaźnika OEE wynosi:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q = 62,92\% \cdot 99,97\% = \mathbf{62,9\%}$$

Zatem straty (bez czasu dostępnego) wynoszą aż 37,1%. Ponieważ parametr jakościowy *Q* jest bardzo wysoki, należy się skupić na wykorzystaniu *P*, gdyż wszystkie przestoje zwalniają tempo pracy maszyny. Dodatkowo można również zwiększyć czas dostępną *A*, co spowoduje również wzrost liczby wycinanych elementów.

## Prace studyjne

Głównym celem prac studyjnych było zebranie szerokiego spektrum informacji. Część potrzebnych danych pozyskano bezpośrednio od pracowników zakładu. Podstawą

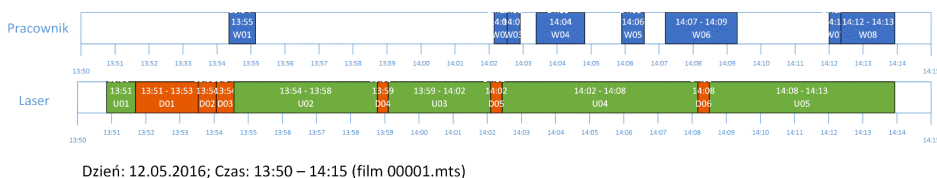
analiz są jednak informacje zbierane samodzielnie, aby wykluczyć wpływ osób trzecich na poprawność wyników. W tym celu, w ciągu dwóch wizyt, sześciu dni i pracy na dwie kamery wykonano ponad 34 godziny nagrań wideo.

Na podstawie nagrań można sprawdzić, jak faktycznie są realizowane procesy. Dla przykładu można zaobserwować, jak wygląda praca maszyny i pracownika ją obsługującego, co dla jednego z nagrań zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie zaobserwowanych zdarzeń

ID zad.	Rozpoczęcie zadania	Zakończenie zadania	Długość zadania	Status	Opis słowny
U01	13:50:51	13:51:42	00:00:51	UpTime	laser pracuje
D01	13:51:42	13:53:32	00:01:50	DownTime	przerwa, pracownik tłumaczy nam zasady pracy stanowiska
D02	13:53:32	13:54:04	00:00:32	DownTime	automatyczna wymiana stołu
D03	13:54:04	13:54:35	00:00:31	DownTime	uruchomienie nowego programu, kalibracja położenia
U02	13:54:35	13:58:47	00:04:12	UpTime	laser pracuje
W01	13:54:21	13:55:08	00:00:47	Work	rozładowanie – segregowanie, odłożenie wyciętych elementów
D04	13:58:47	13:59:06	00:00:19	DownTime	czyszczenie głowicy
U03	13:59:06	14:02:06	00:03:00	UpTime	laser pracuje
W02	14:02:09	14:02:32	00:00:23	Work	rozładowanie – segregowanie, odłożenie wyciętych elementów
D05	14:02:06	14:02:26	00:00:20	DownTime	czyszczenie głowicy
W03	14:02:32	14:02:55	00:00:23	Work	zabranie ażuru na pole odkładcze
W04	14:03:23	14:04:49	00:01:26	Work	rozładowanie – segregowanie, odłożenie wyciętych elementów
U04	14:02:26	14:08:10	00:05:44	UpTime	laser pracuje
W05	14:05:54	14:06:34	00:00:40	Work	rozładowanie – segregowanie, odłożenie wyciętych elementów
W06	14:07:11	14:09:18	00:02:07	Work	rozładowanie – segregowanie, odłożenie wyciętych elementów
D06	14:08:10	14:08:30	00:00:20	DownTime	czyszczenie głowicy
U05	14:08:30	14:13:56	00:05:26	UpTime	laser pracuje
W07	14:12:00	14:12:21	00:00:21	Work	pobranie arkusza suwnicą i załadunek na stół
W08	14:12:21	14:13:56	00:01:35	Work	muda – usuwa naklejkę z blachy, rzeczy leżące na arkuszu; rozmawia

Na tej podstawie zestawiono zdarzenia w formie harmonogramu Gantta, co przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Zestawienie realizowanych zadań w postaci harmonogramu Gantta

Na podstawie przedstawionych obserwacji sklasyfikowano obserwowane zdarzenia. Ponadto na podstawie analizy filmów utworzono prawidłowy przebieg pracy stanowiska i operatora z eliminacją czynności munda (zbędnych) (zgodnie z zasadami 5S [6]).

W trakcie pracy stanowiska roboczego można wyróżnić dwa stany [5]:

- *UpTime* – czas pracy – reprezentuje czas nieprzerwanej pracy maszyny bądź całej fabryki, inaczej jest to czas, w którym urządzenie może przynieść wartość dodaną,
- *DownTime* – przestój – reprezentuje czas, w którym maszyna bądź fabryka nie wykonuje swojej pracy lub jest ona wykonywana w nieprawidłowy sposób.

Praca na stanowisku lasera odbywa się na trzy zmiany. Zmiana robocza trwa 8 godzin. W trakcie zmiany laser powinien pracować ciągle, ale występuje cały szereg obiektywnych przyczyn, które to uniemożliwiają i mają wpływ na wartość wskaźnika OEE. Do głównych strat można zaliczyć:

- strata czasu wynikająca z przekazania pracy pomiędzy zmianami. Występuje ona (w stosunku do jednej zmiany roboczej i jednego pracownika) na początku i końcu zmiany,
- strata czasu pomiędzy kolejnymi zleceniami (pracownik musi wykonać kilka czynności zanim uruchomi kolejne zlecenie),
- strata czasu w trakcie realizacji zlecenia na różne zdarzenia (które są rejestrowane przez program – opisane w dalszej części),

Ponadto z obserwacji wynika, że nie ma możliwości, aby w trakcie pracy laser zwalniał (prędkość posuwu). Liczba czyszczeń soczewki (głowicy) zależy od grubości blachy. Na przykład dla blachy 7,5 mm czyszczenie jest co 40 wkłuc – to ustawia ręcznie operator – ten czas też nie jest ujęty w czasie realizacji programu. Na laserze jest magazyn na 18 soczewek (dysze). Każda dysza ma mierzony czas pracy – do sprawdzenia na pulpicie. Jeśli się skończy, to następuje wymiana. Wymiana dyszy może przypaść w trakcie realizacji zlecenia – nie ma to uwzględnienia w czasie trwania programu.

Problemem są wstające elementy (przykład na rys. 8). Jak element się postawi to może wystąpić kolizja z głowicą i trzeba proces wypalania nadzorować, ręcznie zatrzymać i skorygować. Zaobserwowano ponadto następujący problem: jeśli są bardzo małe detale umieszczone przy bardzo dużych, to po wycięciu dużego elementu blacha

może się podnieść i jest wtedy problem z wycinaniem małych (z powodu przemieszczenia w pionie – albo wadliwe elementy małe albo niemożliwe wycinanie) – jest to zalecenia dla technologa, aby unikać takich sytuacji. Minimalna odległość pomiędzy wycinanymi elementami to 10 mm, i tego bezwzględnie należy przestrzegać.

Zaobserwowano przestoje, gdy następuje:

- wyciąganie drobnych elementów,
- wymiana beczki (do jej wymiany musi najpierw spaść ciśnienie),
- rozgrzanie lasera, jeśli przerwa była dłuższa niż 30 minut (szczególnie w zimie),
- czyszczenie lasera, przypada co dwa tygodnie na około 4 godziny,
- czyszczenie rusztu frezarką (są również problemy z frezarką, która się psuje), ale to jest wykonywane zazwyczaj w trakcie pracy lasera i może jej nie przerywać,
- zlecenia z krótkim czasem realizacji, bo się nie zdąży odebrać i opisać wypalonych elementów i wówczas jest nieplanowany postój.

Jeśli program obróbki jest dobry – czyli nie będzie robił problemów (mikroprze-stoi) – to realizacja zlecenia trwa również w trakcie przerwy pracownika, czyli nie zawsze jest to przerwa w pracy.

Programy cięcia są opracowywane przez technologa i przesyłane na maszynę, tzn. operator z pulpitu ma do nich dostęp i poprzez numer zlecenia może je wybierać. Pod koniec zlecenia przygotowuje sobie następny program. Wybiera odpowiednie polecenia na ekranie dotykowym, a z klawiatury podaje numer zlecenia. Jeśli sieć nie działa, to programy są przenoszone na pendrive. Na maszynie jest telediagnoza, więc w razie wystąpienia awarii maszyny, dane są pobierane do serwisu poprzez sieć i dużo awarii można usuwać zdalnie poprzez sieć. Przy zmianie zlecenia, nawet przy innych grubościach blach nie ma straty czasu na przebrojenie maszyny – tego tu nie ma.

W dyszy jest soczewka, którą maksymalnie co 40 godzin pracy należy czyścić. Przy blachach aluminiowych i ocynkowanych częściej, bo nawet co 8 godzin. Po każdym cięciu aluminium trzeba wymienić beczkę.

Aby uwiarygodnić statystycznie otrzymane wyniki, postanowiono o dalszym zbieraniu danych. W tym celu zakupiono poleasingowy komputer przemysłowy z ekranem dotykowym, który zamontowano obok panelu sterującego lasera. Na potrzeby dalszej realizacji projektu, opracowano i udostępniono program, którego zadaniem jest zbieranie danych ze stanowiska cięcia laserem. Program został zainstalowany na zakupionym komputerze. Pod sufitem dodatkowo zamontowano kamerę przemysłową, która nagrywała pracę maszyny (głównym obiektem była lampka, która świecąc, świadczy o pracy lasera) w celu weryfikacji zapisanych zdarzeń (głównie sytuacji wyjątkowych).

## Analiza zebranych danych

Opracowany program jest obsługiwany ręcznie przez operatora (co powoduje pewien margines błędów) i sprowadza się do wybierania kolejnych zdarzeń, które są automatycznie rejestrowane do pliku z danymi.

Opracowano więc program, za pomocą którego przez kolejny miesiąc zbierano dane. Program został zaimplementowany w języku VBA (ang. Visual Basic for Application) jako makroprogramu MS Excell. Po włączeniu arkusza Excel program uruchamia się automatycznie.

W pełnej wersji programu rejestrowane są następujące informacje (potrzebne do dalszej analizy, czyli wyznaczenia wskaźnika OEE oraz innych wskaźników określających częstość zdarzeń jak np. MTTF):

- IDA – numer kolejny zdarzenia (program sam je numeruje),
- Station – identyfikator maszyny, dla której są rejestrowane zdarzenia (bo mogą być dla kilku maszyn),
- Date – data wystąpienia zdarzenia,
- Category – kategoria zdarzenia,
- Code – kod zdarzenia,
- T1 – czas rozpoczęcia/wystąpienia zdarzenia,
- T2 – czas, w którym podjęto czynności naprawcze/zaradcze,
- T3 – czas zakończenia zdarzenia i podjęcia ponownie pracy przez maszynę,
- IDO – identyfikator zlecenia, przy którym doszło do zdarzenia,
- IDW – identyfikator pracownika obsługującego maszynę w trakcie zdarzenia,

Główne okno przygotowanego programu przedstawia rysunek 4.

Pełna wersja programu służy zarówno do rejestracji zdarzeń, jak i do raportowania produkcji. Po uruchomieniu należy wybrać pracownika (jeśli status jest nieznan) – klawiszem *Zmiana operatora* (zmiana zakładek odbywa się automatycznie w zależności od kontekstu pracy z programem).

Jeśli zachodzi jakieś zdarzenie, np. powodujące mikroprzestój należy wcisnąć wybrany klawisz, wówczas program przejdzie do trybu wyboru kodu zdarzenia. Wystarczy wskazać zdarzenie na liście, a następnie określić czy podjęto czynności naprawcze (zatwierdzenie klawiszem powoduje automatyczne zapisanie czasu T2) oraz zatwierdzić, kiedy te czynności zakończono (czas T3). Przykładowe zdarzenia zdefiniowane w programie przedstawia rysunek 5. Wszystkie dane, po naciśnięciu powyższego klawisza, są automatycznie zapisywane do arkusza. Program przechodzi ponownie do trybu oczekiwania.

Laszer OEE - wersja testowa Beta

Oczekiwanie | Wybór zdarzenia | Dane zlecenia | Realizacja działania | Dane pracownika

<b>Dostępność</b> <i>Przestoje planowane i nieplanowane</i>	<b>Wykorzystanie</b> <i>Straty logistyczne i mikroprzestoje</i>	<b>Jakość</b> <i>Braki naprawialne i ponowne zlecenia</i>
--	--	--

Nowe zlecenie      Zakończenie zlecenia      Zmiana operatora

Ostatnie zdarzenie:

Czas wystąpienia zdarzenia T1:  Data:

Czas podjęcia działania T2:  Nr zdarzenia:

Czas ponownego uruchomienia T3:  Kod zdarzenia:

Pracownik: W01      Zlecenie: 20\_55\_11

Status maszyny: **Up Time**

Status zlecenia:

Status pracownika:

Konieczne działania:

**Zakończ**

Rys. 4. Okno główne opracowanego programu

Laszer OEE - wersja testowa Beta

Oczekiwanie | Realizacja działania

<b>Dostępność</b> <b>Przestoje planowane i nieplanowane</b>	<b>Wykorzystanie</b> <b>Straty logistyczne i mikroprzestoje</b>	<b>Jakość</b> <b>Braki naprawialne i ponowne zlecenia</b>
--	--	--

A01: Uszkodzenie głowicy A02: Naprawa serwisowa A03: Kompleksowe czyszczenie las A04: Szkolenie operatora A05: Absencja pracownika A99: Inne	P01: Postawienie wypalanego elen P02: Odształcenie blachy P03: Brak materiału P04: Zmiana planu wypalania P05: Wyciąganie elementów z rym P06: Wymiana beczki P07: Zła jakość materiału P08: Wprowadzenie programu P09: Nowe zlecenie, załadunek ma P99: Inne	Q01: Niedopalenie elementu Q02: Powtórne wypalanie Q03: Błąd programu Q04: Czyszczenie krawędzi po wyp Q99: Inne
---	--	--

Ostatnie zdarzenie:

Czas wystąpienia zdarzenia:  Data:  Kod zdarzenia:

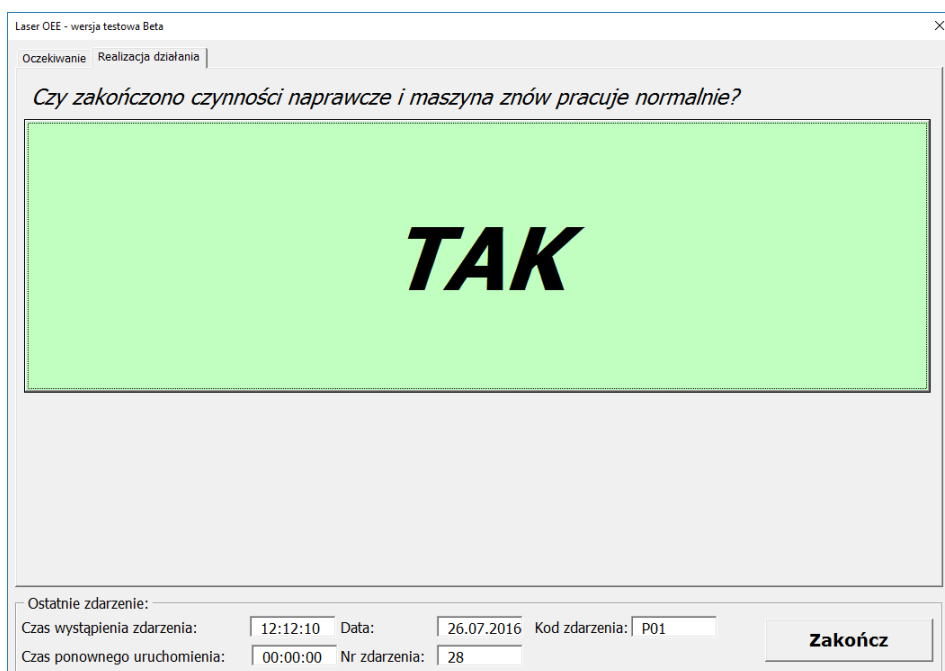
Czas ponownego uruchomienia:  Nr zdarzenia:

**Zakończ**

Rys. 5. Predefiniowane typy zdarzeń w programie

Jeśli realizacja danego zlecenia jest zakończona, należy wybrać klawisz *Zakończenie zlecenia* – informacja ta automatycznie jest zapisana od odpowiedniego arkusza. Realizując kolejne zlecenie, znowu trzeba podać jego identyfikator.

Rozmiar okna programu jest dopasowany do ekranu i rozdzielczości zakupionego komputera. Na pierwszym ekranie od razu widoczne są możliwe do wyboru zdarzenia. Interakcja użytkownika ogranicza się więc do wyboru zdarzenia z list (ich zawartość może być zmieniana bezpośrednio w arkuszach Excela). Po wskazaniu zdarzenia rejestrowany jest czas rozpoczęcia T1, jego kod oraz program oczekuje na wskazanie zakończenia działań zaradczych – klawisz *TAK* – co przedstawia rysunek 6 (rejestrowany jest czas zakończenia T3).



Rys. 6. Zatwierdzenie wykonanych czynności przez operatora

Po zatwierdzeniu program wraca do trybu oczekiwania na kolejne zdarzenia. Wszystkie dane zdarzenia są automatycznie zapisywane do arkusza Excela oraz dodatkowo arkusz ten jest fizycznie nadpisywany na dysku tak, aby nie utracić danych. Przykład zebranych danych przedstawia rysunek 7.

1	IDA	Station	Date	Code	T1	T2	IDO
2	1	Laser	2016.07.25	A01	12:55:11	12:55:12	Unknown
3	2	Laser	2016.07.25	P06	12:55:14	12:55:15	Unknown
4	3	Laser	2016.07.25	P01	13:57:33	13:57:35	Unknown
5	4	Laser	2016.07.25	A01	13:58:10	13:58:12	Unknown
6	5	Laser	2016.07.25	P01	13:58:13	13:58:14	Unknown
7	6	Laser	2016.07.25	A01	14:00:57	14:00:59	Unknown
8	7	Laser	2016.07.25	A01	14:01:00	14:01:01	Unknown
9	8	Laser	2016.07.25	A01	14:01:03	14:01:04	Unknown
10	9	Laser	2016.07.25	A01	14:22:00	14:22:02	Unknown
11	10	Laser	2016.07.25	A01	14:25:23	14:25:27	Unknown
12	11	Laser	2016.07.25	A01	14:25:37	14:25:40	Unknown
13	12	Laser	2016.07.25	P01	14:25:43	14:25:46	Unknown
14	13	Laser	2016.07.25	P01	14:25:49	14:25:52	Unknown
15	14	Laser	2016.07.25	P02	14:26:21	14:26:22	Unknown
16	15	Laser	2016.07.25	P02	14:26:44	14:26:46	Unknown
17	16	Laser	2016.07.25	P02	14:26:48	14:26:49	Unknown

Rys. 7. Przykładowa zawartość arkusza Excel po zebraniu danych

Po okresie miesiąca otrzymaliśmy plik Excela do dalszych analiz. Pierwotnie plik miał 1206 rekordów, po naprawie 1150, czyli usunięto 56 rekordów nieprawidłowych wpisów. Ponadto plik zawierał początkowo 404 (lub 410, jeśli liczyć rozpoczęte) zlecenia, jednak po korekcie jest ich 371, z czego 256 było planowanych, a 115 nieplanowanych.

Po wyczyszczeniu danych nieprawidłowych zaimportowano je do bazy MS Access. Tam za pomocą kwerend SQL wykonano odpowiednie grupowanie danych i obliczenia (podobną procedurę opisano w [3]). Na podstawie przetworzonych danych wykonano analizę zdarzeń pod względem ilościowym i czasowym oraz wykonano ich klasyfikację Pareto, co pokazano w tabeli 2.

Tab. 2. Klasyfikacja Pareto zdarzeń zachodzących na stanowisku lasera

Zdarzenie	Liczba	Proc.	Narast. w [%]	Klasa
Odształcenie blachy	90	22,33%	22,33%	A
Wyciąganie z ryny	58	14,39%	36,72%	A
Postawienie elementu	56	13,90%	50,62%	A
Ręczne cięcie materiału	36	8,93%	59,55%	A
Brak blachy (wózka)	24	5,96%	65,51%	A
Sortowanie elementów	21	5,21%	70,72%	A
Wymiana becзки	19	4,71%	75,43%	B

Zdarzenie	Liczba	Proc.	Narast. w [%]	Klasa
Inna przyczyna przerwy: błąd operatora	18	4,47%	79,90%	B
Inna przyczyna przerwy: ręczne ustawianie	17	4,22%	84,12%	B
Inna przyczyna przerwy: przerwa	15	3,72%	87,84%	B
Wstawianie soczewek przez operatora	10	2,48%	90,32%	B
Oddelegowanie pracownika	7	1,74%	92,06%	C
Inne czynności serwisowe: wymiana dyszy	6	1,49%	93,55%	C
Inne usterki jakościowe: wymiana dyszy	5	1,24%	94,79%	C
Inne usterki jakościowe: centrowanie	3	0,74%	95,53%	C
Powtórne wypalanie	2	0,50%	96,03%	C
Inne czynności serwisowe: czyszczenie lasera	1	0,25%	96,28%	D
Inna przyczyna przerwy: transport automatu suwnica	1	0,25%	96,53%	D
Inna przyczyna przerwy: awaria trawersy	1	0,25%	96,77%	D
Inna przyczyna przerwy: brak prądu	1	0,25%	97,02%	D
Inna przyczyna przerwy: opisywanie	1	0,25%	97,27%	D
Inne czynności serwisowe: odpalenie lasera	1	0,25%	97,52%	D
Inna przyczyna przerwy: wyłączanie	1	0,25%	97,77%	D
Inna przyczyna przerwy: problem z załadunkiem blachy	1	0,25%	98,01%	D
Inne czynności serwisowe: centrowanie promienia	1	0,25%	98,26%	D
Inna przyczyna przerwy: targi	1	0,25%	98,51%	D
Inna przyczyna przerwy: odcinanie	1	0,25%	98,76%	D
Inne czynności serwisowe: ręczne ustawianie	1	0,25%	99,01%	D
Inna przyczyna przerwy: uzupełnianie płynu spryskiwacza	1	0,25%	99,26%	D
Inna przyczyna przerwy: zdejmowanie foli z aluminium	1	0,25%	99,50%	D
Inna przyczyna przerwy: opisywanie detali	1	0,25%	99,75%	D
Inna przyczyna przerwy: brak programu na cały arkusz	1	0,25%	100,00%	D

Z punktu widzenia rozkładu Pareto bardzo ważne zdarzenia należą do kategorii A (do 70%) oraz ważne do kategorii B (do 90%). Pozostałe są mało ważne (kategoria C) i nieważne (kategoria D).



Rys. 8. Zdjęcie pokazujące postawienie elementu wycinanego

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najważniejsze zdarzenia to:

- odkształcenie blachy,
- postawienie elementu,
- wyciąganie z rynny,
- brak blachy (wózka).

Równie istotne zdarzenia to:

- wstawianie soczewek przez operatora,
- wymiana beczki,
- sortowanie elementów.

## Podsumowanie

Najwięcej problemów jest z blachami cienkimi 5,5 mm oraz 3,5 mm {A: dopisłmam}, bo jest w nich dużo małych detali, a te łatwo „wstają” (przykład zdarzenia przedstawia rys. 8). Czasem powodem problemów jest zła jakość blachy. Zaobserwowano, że na stosie kupionych blach często te w środku są gorszej jakości. Od spodu bywają podrdzewiałe, a to zwiększa ich grubość i laser ich nie przepala – nie ma kontroli jakości blach w pakietach (za odbiór odpowiada zaopatrzenie). Problemem są również domieszki w stali: im więcej węgla w stali, tym gorzej.

Podsumowując, główną obserwacją jest to, że **czas rzeczywisty** realizacji programu (zlecenia) **jest zawsze dłuższy** od podanego na zleceniu o kilka lub kilkanaście minut.

Czasy realizacji programów są źle oszacowane i nie uwzględniają:

- czasu ruchów jałowych (tylko czas wypalania laserem),
- czasu i liczba czyszczeń głowicy. Liczba czyszczeń soczewki (głowicy) zależy od grubości blachy,
- wymiany dyszy, która może przypaść w trakcie realizacji zlecenia,
- mikroprzestoi powodowanych przez wstawianie elementów. Jak element się postawi, to trzeba ręcznie zatrzymać maszynę i to skorygować.

Rekordowy pomiar różnicy wystąpił dla zlecenia, gdzie czas zadany na programie wynosił 60 minut, rzeczywisty zmierzony czas realizacji ponad 120 minut.

Wyróżniono główne straty powodujące największy wpływ na wycinaną liczbę elementów oraz OEE:

- **Wstawianie elementów** – zdecydowanie najczęściej występujące. Jest to mikroprzebieg. Operator musi zatrzymać maszynę, odsunąć osłonę, wejść do maszyny, usunąć wycięty element, wyjść, zamknąć drzwi i ponownie uruchomić program. Działanie to jest konieczne, gdyż może dojść do kolizji pomiędzy głowicą lasera a wystającymi elementami.
- **Wyginanie się elementów pod wpływem ciepła od lasera.** Ma to miejsce szczególnie przy blachach o większej grubości. Powodem jest też duże zagęszczenie elementów małych. Producent zaleca rozpraszenie ścieżek, co nie zawsze jest uwzględniane.

- **Zlecenia krótkie po długich** – taka sytuacja ma miejsce w przypadku, gdy przechodzi się z grubości małej na dużą. Średnio zaobserwowano, że dla cienkich blach czas wypalania arkusza trwa 15-20 minut, natomiast grubych 1-2 godzin. Szczególnie, gdy (a to ma często miejsce) wypalanych na cienkiej blasze jest dużo małych elementów, wówczas pracownik nie zdąży ich pozbiierać i maszyna nawet kilkanaście minut przymusowo stoi.

W końcowym raporcie przedstawiono wnioski z realizacji projektu i oraz opisano szereg wytycznych do praktycznego zastosowania.

## Literatura

- Czerska J. (2009). *Doskonalenie strumienia wartości*. Warszawa: Wydawnictwo Difin.
- Czerska J. (2011). *Pozwól płynąć swojemu produktowi. Tworzenie ciągłego przepływu*. Warszawa: Wydawnictwo Placet.
- Habel J. (2015). *Zastosowanie baz danych w analizie danych historycznych sprzedaży na potrzeby klasyfikacji pozycji materiałowych i sterowania zapasami*. *Czasopismo Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, t. 18, 6-14.
- Habel J. (2013). *Projekt CD-DIP, projektowanie i rozwój innowacyjnych wyrobów w przemyśle Duńskim*. VI międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna: Wiedza i zarządzanie przedsiębiorstwami w inżynierii produkcji, Kraków: Inteltrans, 53-62.
- Kukiz J., Piszczek A. (2020). *OEE Podejście praktyczne*. Warszawa: Wydawnictwo LeanCert.
- Leszczyk-Kabacińska M. (2013). *Warsztaty 5S*. Warszawa: Wydawnictwo Wiedza i Praktyka.

**Mariola Drozda**  
**Magdalena Dąbrowska**

# **ZBIÓRKA I SEGREGACJA ZUŻYTEGO SPRZĘTU ELEKTRYCZNEGO I ELEKTRONICZNEGO – ANALIZA NIEZGODNOŚCI Z WYKORZYSTANIEM DIAGRAMU ISHIKAWY**

## **Wprowadzenie**

Wzrost konsumpcyjnego stylu życia społeczeństw spowodował wzrost produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego, który uwarunkowany był stale rosnącymi wymaganiami klientów związanymi z wygodą i oszczędnością czasu. Dotyczy to również rosnących potrzeb klientów odnośnie do funkcjonalności i nowoczesnego wyglądu tych produktów.

W konsekwencji tempo zmieniających się potrzeb klientów wywarło wpływ na skracanie cykli życia sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Obecnie pozbywanie się tego rodzaju sprzętu nie wynika wyłącznie z braku możliwości jego dalszej eksploatacji, a jest przyczyną pojawiania się na rynku innowacyjnych rozwiązań w sprzętach nowej generacji wspartych agresywnymi kampaniami reklamowymi. Wspomniane wcześniej przyczyny doprowadziły do gwałtownego wzrostu liczby zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, klasyfikowany jako odpad niebezpieczny, jest szczególnie uciążliwy dla współczesnego świata i stanowi zagrożenie nie tylko ekologiczne, ale również społeczne i ekonomiczne. Z tego względu opracowane zostały zasady postępowania ze zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym w odniesieniu m.in. do procesu ich zbiórki, segregacji, demontażu, recyklingu, utylizacji pozostałości i bezpiecznego składowania. Należy jednak podkreślić, że wspomniane zasady mają charakter regulacji prawnych, które nie odnoszą się do działań wykonawczo-egzekucyjnych. Poziom poprawności zbiórki oraz segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego jest mocno powiązany z końcowym

użytkownikiem sprzętu i stanowi problem nie tylko w rozumieniu prawnym, ekologicznym czy etycznym, ale przede wszystkim organizacyjnym.

W artykule dokonano analizy niezgodności występujących w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

Celem artykułu jest zastosowanie diagramu Ishikawy w odniesieniu do analizy przyczynowo-skutkowej występowania niezgodności w omawianych procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

## **Legislacyjne uwarunkowania gospodarowania zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym**

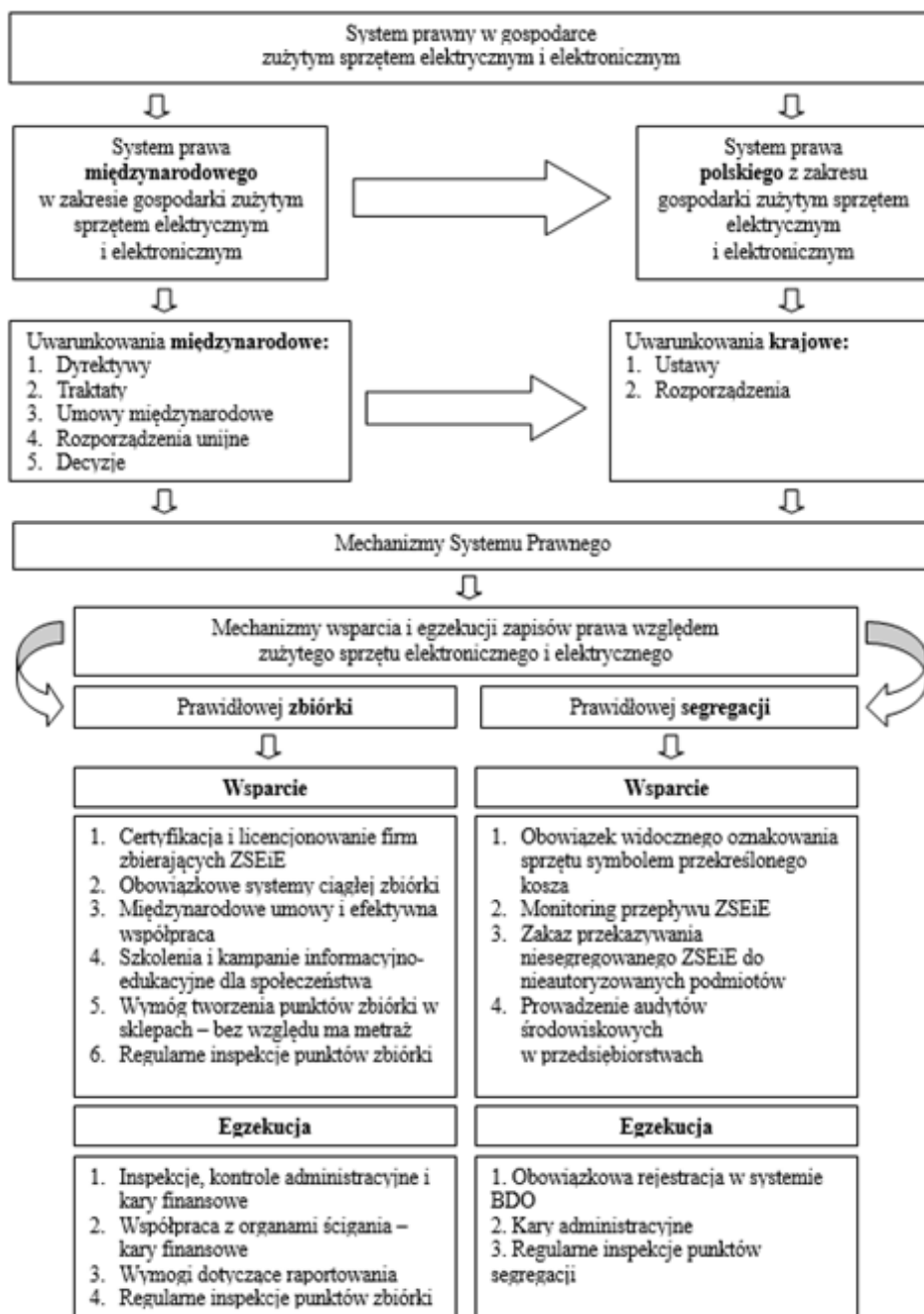
Gospodarowanie zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym jest przedmiotem szczegółowych regulacji prawnych, zarówno w zakresie uregulowań krajowych, jak i międzynarodowych. Podstawowym celem zapisów prawnych jest minimalizacja negatywnego wpływu tego rodzaju odpadów na środowisko przyrodnicze. Na rysunku 1 zaprezentowano schemat relacji i mechanizmów międzynarodowego i krajowego systemu prawnego w odniesieniu do zbiórki oraz segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Należy podkreślić, że zapisy zawarte w międzynarodowym systemie prawnym wywierają wpływ na system prawa polskiego. Dodatkowo mechanizmy obowiązującego systemu prawnego w zakresie zbiórki oraz segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego są działaniami o charakterze wspierającym, jak również egzekucyjnym. Uwarunkowania międzynarodowe w zakresie gospodarowania zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym zostały zawarte m.in. w [5], regulacje krajowe zaś w tym zakresie zostały określone m.in. w [17].

Należy podkreślić, że zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny jest szczególnym rodzajem odpadu i został zakwalifikowany do kategorii odpadów niebezpiecznych. Zgodnie z ustawową definicją za zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny uznaje się

[...] zużyty sprzęt pochodzący z gospodarstw domowych oraz zużyty sprzęt pochodzący ze źródeł innych niż gospodarstwa domowe, który ze względu na charakter i ilość jest podobny do zużytego sprzętu pochodzącego z gospodarstw domowych; za zużyty sprzęt pochodzący z gospodarstw domowych uznaje się odpady powstałe ze sprzętu, który z dużym prawdopodobieństwem będzie używany zarówno przez gospodarstwa domowe, jak i przez użytkowników innych niż gospodarstwa domowe [39].

Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny uznaje się za odpad niebezpieczny, ponieważ [4]:

- zawiera liczne substancje szkodliwe oraz trujące, tj. rtęć, związki bromu, ołów, kadm, nikiel, azbest, czy też PCB,



Rys. 1. System prawny w gospodarce zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym

Tab. 1. Identyfikacja niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego

Proces	Nazwa niezgodności	Opis
Zbiórka	nieosiągnięcie limitów zbiórki ZSEiE	limit wynosi od dnia 1 stycznia 2021 r. – nie mniej niż 65% średniorocznej masy sprzętu wprowadzonego do obrotu albo 85% masy zużytego sprzętu wytworzonego na terytorium kraju.
	ograniczony dostęp do punktów zbiórki ZSEiE	konieczność pokonywania znacznych odległości wynikających z lokalizacji punktów zbiórki i ograniczonej ich mobilności
	nieprawidłowe warunki składowania	brak zabezpieczenia składowanego ZSEiE
	porzucenie ZSEiE w nielegalnych miejscach	niedostarczenie ZSEiE do wyspecjalizowanych punktów zbiórki lub przeznaczonej do tego infrastruktury
	rozmontowywanie ZSEiE na podzespoły	częściowy demontaż elementów składowych ZSEiE skutkuje brakiem możliwości jego przyjęcia w wyspecjalizowanych punktach zbiórki
	nieautoryzowana zbiórka ZSEiE	przyjmowanie przez przedsiębiorstwa nieposiadające zezwoleń i uprawnień ZSEiE
	brak dostępnej infrastruktury	brak specjalistycznych pojemników przeznaczonych na zbiórkę ZSEiE w miejscach zbiórki odpadów komunalnych
Segregacja	zmieszanie ZSEiE z innymi frakcjami odpadów	umieszczanie ZSEiE w pojemnikach na odpady komunalne
	niewłaściwa segregacja ZSEiE w ramach kategorii odpadów niebezpiecznych	umieszczanie ZSEiE w pojemnikach należących do innej kategorii odpadów niebezpiecznych, np. baterie w świetłówkach
	niewłaściwe oznakowanie ZSEiE	brak lub niewidoczny symbol „przekreślonego kosza” na zużytych sprzęcie elektrycznym lub elektronicznym
	brak prawidłowego rozdzielania na poszczególne kategorie odpadów niebezpiecznych	niewsuniecie baterii lub akumulatorów ze ZSEiE
	brak możliwości samodzielnego demontażu podzespołów zasilających	konstrukcja uniemożliwiająca samodzielną segregację podzespołów zasilających ZSEiE w odniesieniu do kategorii odpadów niebezpiecznych

- integralną częścią odpadów elektrycznych i elektronicznych bywają różnego rodzaju baterie i akumulatory, szczególnie niebezpieczne, takie jak: ołowiowe, niklowo-kadmowe, zawierające rtęć, elektrolit z baterii i akumulatorów,
- wymaga specjalistycznych technik i technologii mających na celu ich odpowiednie zagospodarowanie, np. odzysk, recykling,
- stanowi poważne bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka oraz środowiska.

Legislacyjne uwarunkowania gospodarowania użytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym odgrywają kluczową rolę w ograniczaniu negatywnego wpływu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na środowisko przyrodnicze oraz życie i zdrowie społeczeństw. Dalszy rozwój regulacji powinien koncentrować się na usprawnieniu systemów zbierania i segregowania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego w celu ułatwienia procesów przetwarzania tego odpadu, a także na finansowaniu i wspieraniu badań nad opracowywaniem nowych rozwiązań technicznych i technologicznych dotyczących efektywnej i skutecznej zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

Identyfikacja niezgodności w zbiorce i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEiE)

Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, ze względu na zawartość niebezpiecznych substancji, takich jak m.in. ołów, rtęć czy kadm, wymaga odpowiedzialnego i efektywnego zbierania oraz segregowania.

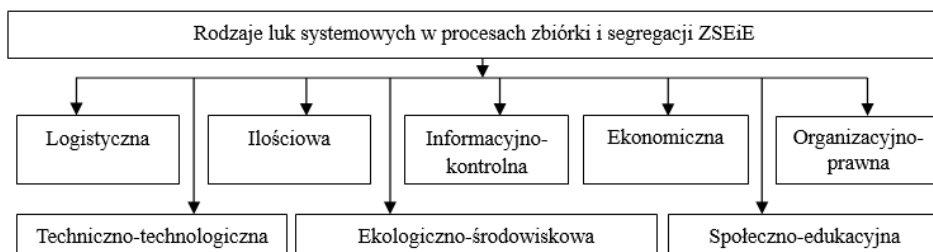
Zidentyfikowane niezgodności w zbiorce i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego zostały zaprezentowane w tabeli 1.

Identyfikacja niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego pozwala na wskazanie głównych problemów z nich wynikających (tab. 2), a także wskazujących na luki systemowe występujące w dotychczasowych rozwiązaniach w zakresie zbiórki i segregacji (rys. 2, tab. 3).

**Tab. 2.** Główne problemy wynikające z niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

Proces	Nazwa niezgodności	Problem
Zbiórka	nieosiągnięcie limitów zbiórki ZSEiE	ponoszenie administracyjnych kar finansowych wynikających z osiągnięcia zbyt niskich wskaźników zbiórki ZSEiE
	ograniczony dostęp do punktów zbiórki ZSEiE	pozbywanie się ZSEiE w miejscach do tego nieprzeznaczonych powodujące zagrożenie ekologiczno-środowiskowe
	nieprawidłowe warunki składowania	zagrożenie ekologiczno-środowiskowe
	porzucenie ZSEiE w nielegalnych miejscach.	zagrożenie ekologiczno-środowiskowe
	rozmontowywanie ZSEiE na poddespoły	Zaniżenie poziomu zwrotności ZSEiE z rynku
	nieautoryzowana zbiórka ZSEiE	Zbiórka ZSEiE poza systemem i ewidencją
	brak dostępnej infrastruktury	konieczność angażowania dodatkowych sił i środków w aspekcie zwrotu ZSEiE do wyspecjalizowanych punktów

Proces	Nazwa niezgodności	Problem
Segregacja	zmieszanie ZSEiE z innymi frakcjami odpadów.	zanieczyszczenie innych frakcji, np. papieru, szkła, metalu oraz zagrożenie ekologiczno-środowiskowe
	niewłaściwa segregacja ZSEiE w ramach kategorii odpadów niebezpiecznych	poniesienie dodatkowych kosztów związanych z ponowną segregacją
	niewłaściwe oznakowanie ZSEiE	poniesienie dodatkowych kosztów związanych z ponowną segregacją
	brak prawidłowego rozdzielania na poszczególne kategorie odpadów niebezpiecznych	poniesienie dodatkowych kosztów związanych z ponowną segregacją oraz zagrożenie ekologiczno-środowiskowe
	brak możliwości samodzielnego demontażu podzespołów zasilających	niewłaściwa segregacja oraz brak możliwości przeniesienia dodatkowych kosztów demontażu na konsumenta



Rys. 2. Luki systemowe w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego

Tab. 3. Interpretacja luk systemowych wynikających z niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego

Luka	Interpretacja
Logistyczna	– ograniczony dostęp do mobilnej infrastruktury umożliwiającej podniesienie poziomu zbiórki ZSEiE, – brak dodatkowych pojemników przeznaczonych na frakcję ZSEiE
Ilościowa	– brak możliwości zbiórki zniszczonego, niekompletnego ZSEiE
Informacyjno-kontrolna	– brak zintegrowanego systemu sprzedaży pierwotnej i wtórnej z systemem zwrotów i zbiórki ZSEiE, – brak informacji odnośnie zmiany właściciela produktu podczas jego eksploatacji
Ekonomiczna	– brak programów wspierających segregację i zwrot ZSEiE
Organizacyjno-prawna	– brak przejrzystości procedur, – brak zintegrowanych systemów organizacyjnych wynikających z zapisów legislacyjnych, – brak programów wspierających segregację i zwrot ZSEiE, – nieprzestrzeżenie regulacji prawnych

Luka	Interpretacja
Techniczno-technologiczna	<ul style="list-style-type: none"> <li>– brak wsparcia aplikacyjnego umożliwiającego prawidłową zbiórkę oraz segregację ZSEiE,</li> <li>– brak konstrukcji ZSEiE umożliwiającej samodzielny demontaż podzespołów zaliczanych do innej kategorii odpadów niebezpiecznych</li> </ul>
Ekologiczno-środowiskowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zanieczyszczenie gleb,</li> <li>– zanieczyszczenie wód powierzchniowych i gruntowych,</li> <li>– zanieczyszczenie powietrza,</li> <li>– zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt.</li> </ul>
Społeczno-edukacyjna	<ul style="list-style-type: none"> <li>– brak bieżącej edukacji podnoszących proekologiczną świadomość społeczeństw,</li> <li>– brak edukacji w zakresie postępowania ze zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym,</li> <li>– brak konsultacji społecznych w zakresie udogodnień związanych ze zbiórką i segregacją odpadów niebezpiecznych</li> </ul>

Ograniczenie niezgodności w zakresie zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego jest istotnym wyzwaniem dla dzisiejszych gospodarek i społeczeństw. Wymaga to skoordynowanych działań w zakresie legislacji, logistyki, edukacji oraz rozwoju techniczno-technologicznego, mających na celu podniesienie poziomu osiągnięcia limitów zbiórki ZSEiE dodatkowo opartych na zintegrowanych systemach informacyjno-kontrolnych.

### **Analiza przyczynowo-skutkowa niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego**

Diagram Ishikawy, nazywany również diagramem rybiej ości, diagramem przyczynowo-skutkowym oraz wykresem jodełkowym [20] jest jednym z tradycyjnych narzędzi zarządzania jakością [13] (tab. 4).

Tab. 4. Metody, techniki i narzędzia wykorzystywane w zarządzaniu jakością

Tradycyjne	Nowe	Dodatkowe	Pozostałe
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Diagram procesu,</li> <li>– Karta kontrolna,</li> <li>– Arkusze kontrolne,</li> <li>– Diagram przyczynowo-skutkowy Ishikawy,</li> <li>– Diagram Pareto-Lo-renza,</li> <li>– Histogram,</li> <li>– Punktowy diagram korelacji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– diagram pokrewieństwa,</li> <li>– diagram relacji,</li> <li>– diagram macierzowy,</li> <li>– diagram strzałkowy,</li> <li>– drzewo decyzyjne,</li> <li>– wykres programowy procesu decyzji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wizualizacja danych,</li> <li>– analiza pola sił,</li> <li>– analiza ABC,</li> <li>– burza mózgów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– analiza FMEA,</li> <li>– analiza MSA,</li> <li>– statystyczne sterowanie procesem SPC,</li> <li>– metoda QFD,</li> <li>– Six Sigma</li> </ul>

Diagram rybiej ości został opracowany w roku 1943 przez K. Ishikawę – profesora Uniwersytetu Tokijskiego. Po raz pierwszy został on użyty przez Sumitomo Electric [1]. Głównym zadaniem narzędzia jest graficzna prezentacja wzajemnych zależności pomiędzy skutkami i przyczynami, które mogą je wywołać. Diagram Ishikawy pozwala na uszeregowanie przyczyn występowania danego problemu i wzajemne powiązanie tych przyczyn przy zastosowaniu wykresu [11].

K. Ishikawa opracowując diagram rybiej ości wyodrębnił pięć podstawowych kategorii przyczyn, tzw. 5M [10]. Należy zaznaczyć, że rozbudowa narzędzia na przestrzeni lat spowodowała dodawanie kolejnych przyczyn [13] (tabela 5).

Tab. 5. Kategorie przyczyn wykorzystywane w diagramie Ishikawy

Nazwa kategorii (ang.)	Tłumaczenie	Charakterystyka
kategorie podstawowe		
Man	człowiek	– najbardziej złożona kategoria, – obejmuje wiedzę, kompetencje, doświadczenia, motywację i przyzwyczajenia pracowników
Machinery	maszyny	– stanowi grupę techniczną, – odnosi się do przyczyn związanych z maszynami i urządzeniami wykorzystywanymi w analizowanym procesie, tj. cechy, nowoczesność, bezpieczeństwo, wydajność, możliwości
Methods	metody	– obejmuje przyczyny związane z procesem produkcyjnym/ świadczenia usługi, w której zidentyfikowano problem, tj. procedury, instrukcje, regulacje, normy, prawo
Materials	materiały	– obejmuje przyczyny wynikające z problemów surowcowych, materiałowych, półfabrykatów wykorzystywanych do produkcji danego dobra lub świadczenia usługi
Management	zarządzanie	– obejmuje problemy z zarządzaniem i jego funkcjami, tj. organizacją pracy, przewodzeniem, motywacją, kontrolą, strukturą organizacyjną, kulturą organizacyjną
kategorie dodatkowe		
Mother nature – Environment	otoczenie	– obejmuje przyczyny z otoczenia – środowiska pracy, np. hałas, temperatura, wilgotność, ergonomia, wibracje
Measurement	pomiar	– obejmuje procedury pomiarowe
Maintenance	utrzymanie	– obejmuje przyczyny związane z utrzymaniem maszyny, urządzenia, obiektu
Money	pieniądze	– obejmuje zasoby finansowe, inwestycje
Members	członkowie	– obejmuje podmioty wywierające wpływ na organizację i funkcjonowanie procesu
Safety	Bezpieczeństwo	– obejmuje przyczyny związane z bezpieczeństwem m.in. użytkownika wyrobu

Metodyka tworzenia diagramu Ishikawy została zaprezentowana w tabeli 6 [22].

Tab. 6. Metodyka tworzenia diagramu Ishikawy

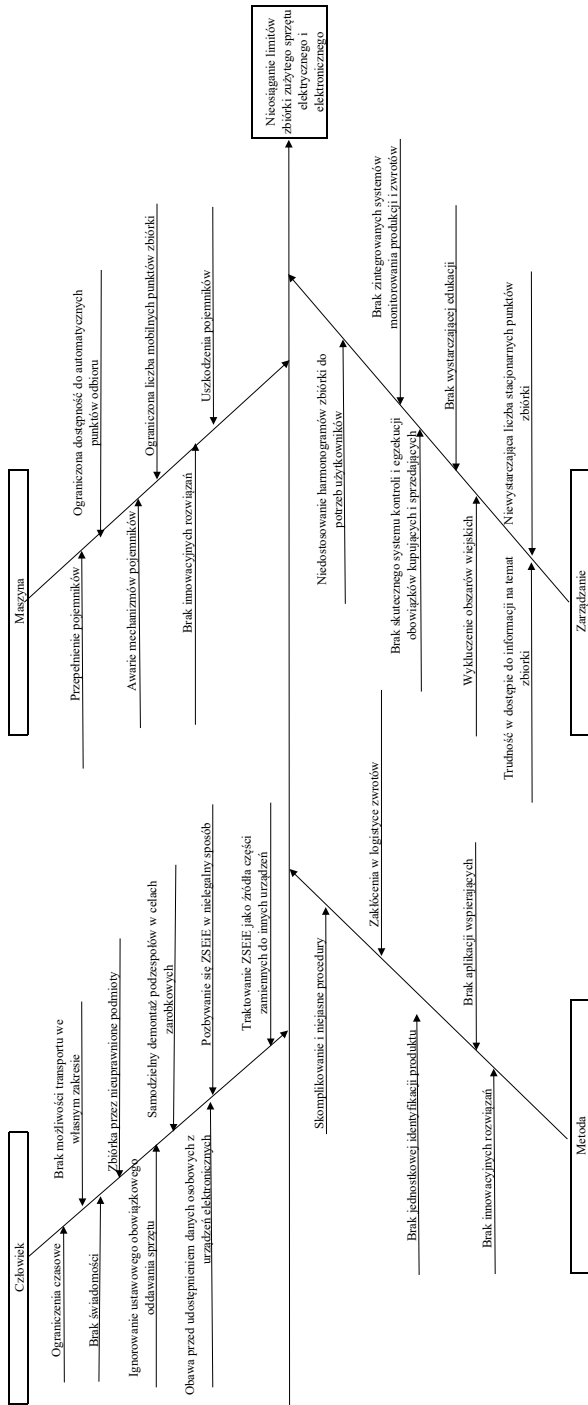
Krok	Nazwa	Opis
1	zdefiniowanie problemu	w sposób jasny i krótki, jako wynik analizy rozważanego zagadnienia i zbierania informacji
2	ustalenie głównych kategorii możliwych przyczyn	opierając się na teorii 5M+1E lub innym istniejącym podziale
3	burza mózgów	– analizowanie każdej kategorii po kolei poprzez identyfikację przyczyn, – poszukiwanie i hierarchizacja przyczyn do momentu ustalenia przyczyny, która będzie możliwa do usunięcia lub która zakwalifikuje problem do problemów nierozwiązywalnych
4	tworzenie diagramu	– na podstawie ustalonych przyczyn
5	analiza techniczna diagramu	– sprawdzenie kompletności przyczyn, – dodanie przyczyn pominiętych, – zmiana przyczyn źle sklasyfikowanych
6	analiza danych z diagramu	– wybór kilku (2-4) przyczyn mających wpływ na powstawanie problemu
7	sformułowanie wniosków	

Zalety i bariery w wykorzystaniu diagramu Ishikawy zostały zaprezentowane w tabeli 7 [13].

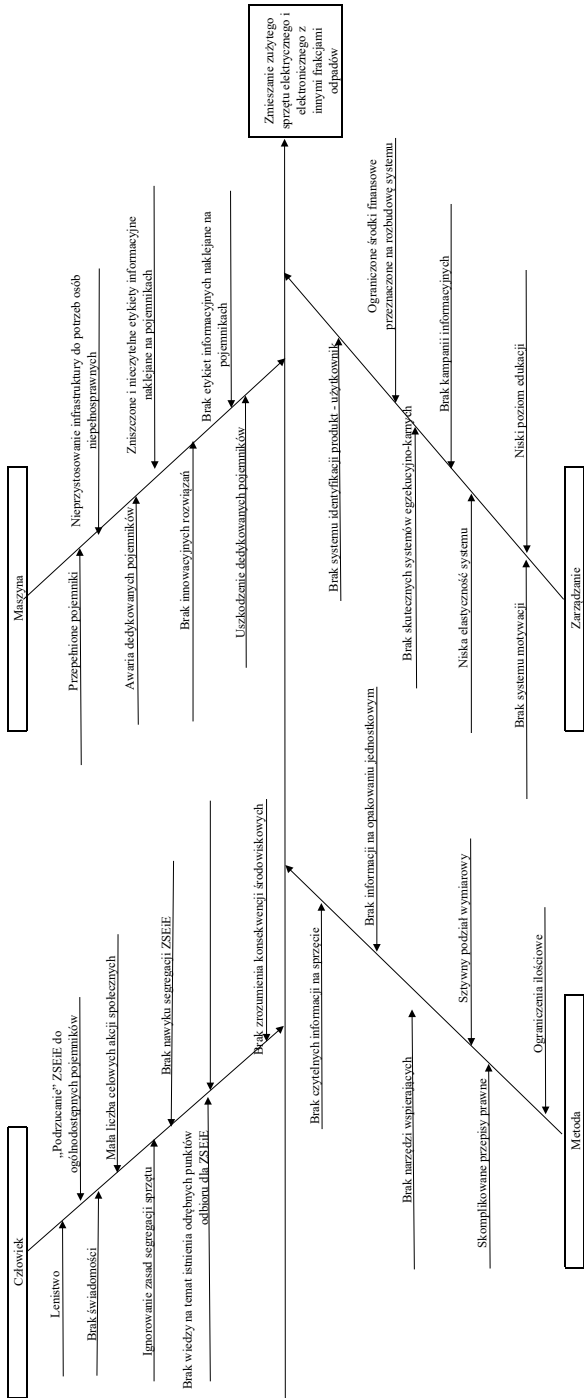
Tab. 7. Zalety i bariery zastosowania diagramu Ishikawy

Zalety	Bariery
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prostota analizy,</li> <li>– Możliwość identyfikacji, klasyfikacji i hierarchizacji przyczyn występowania problemów w jednej analizie,</li> <li>– Przejrzystość wyników (uporządkowany, czytelny schemat),</li> <li>– Zastosowanie burzy mózgów w celu identyfikacji większej liczby przyczyn,</li> <li>– Niewłaściwa klasyfikacja przyczyn nie przekreśla poprawności narzędzia,</li> <li>– diagram można rozbijać na poszczególne kategorie poprawiając jego czytelność,</li> <li>– praca grupowa podnosi efektywność narzędzia zmniejszając liczbę błędnych przyporządkowań</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– niedostateczna analiza problemu (zbyt powierzchowna),</li> <li>– problem w przyporządkowaniu informacji – klasyfikacji przyczyn do danych kategorii,</li> <li>– klasyfikacja przyczyn pierwszorzędnych i przyczyn dalszego rzędu,</li> <li>– trafne formułowanie wniosków</li> </ul>

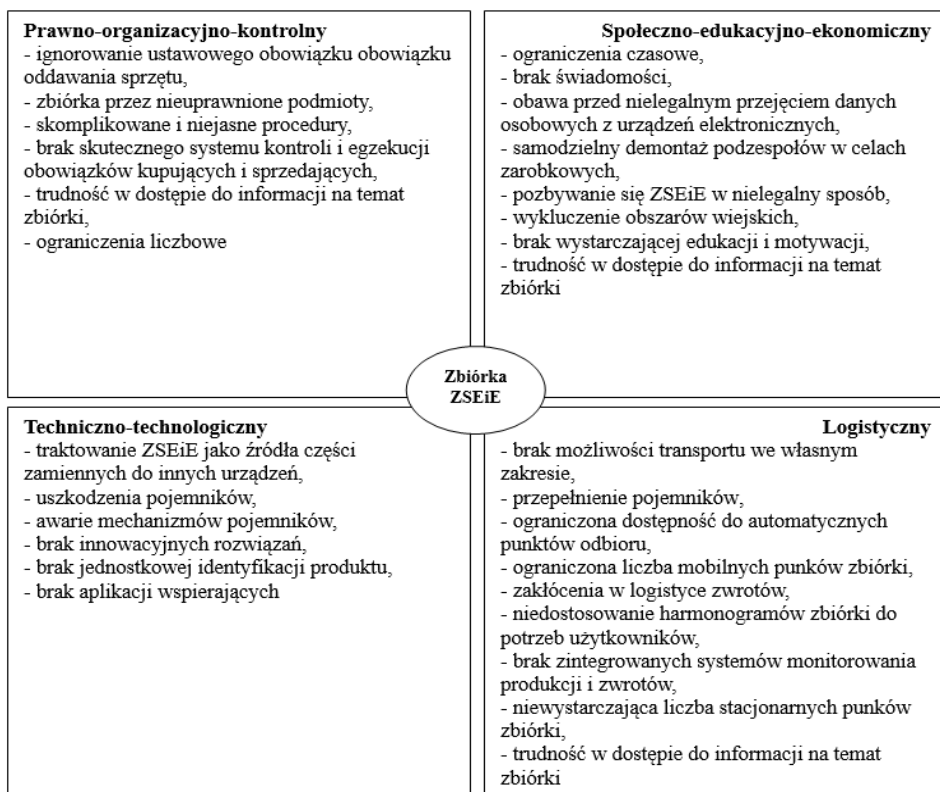
Należy podkreślić, że pomimo barier wynikających z możliwości zastosowania diagramu, jest on szeroko wykorzystywany w praktyce funkcjonowania gospodarek, organizacji oraz przedsiębiorstw. Praktyczna implementacja tego narzędzia została przedstawiona w wielu publikacjach, m.in. w: [2].



Rys. 3. Diagram Ishikawy dla niezgodności „Nieosiągnięcie limitów zbiórki ZSEiE” dla procesu zbiórki



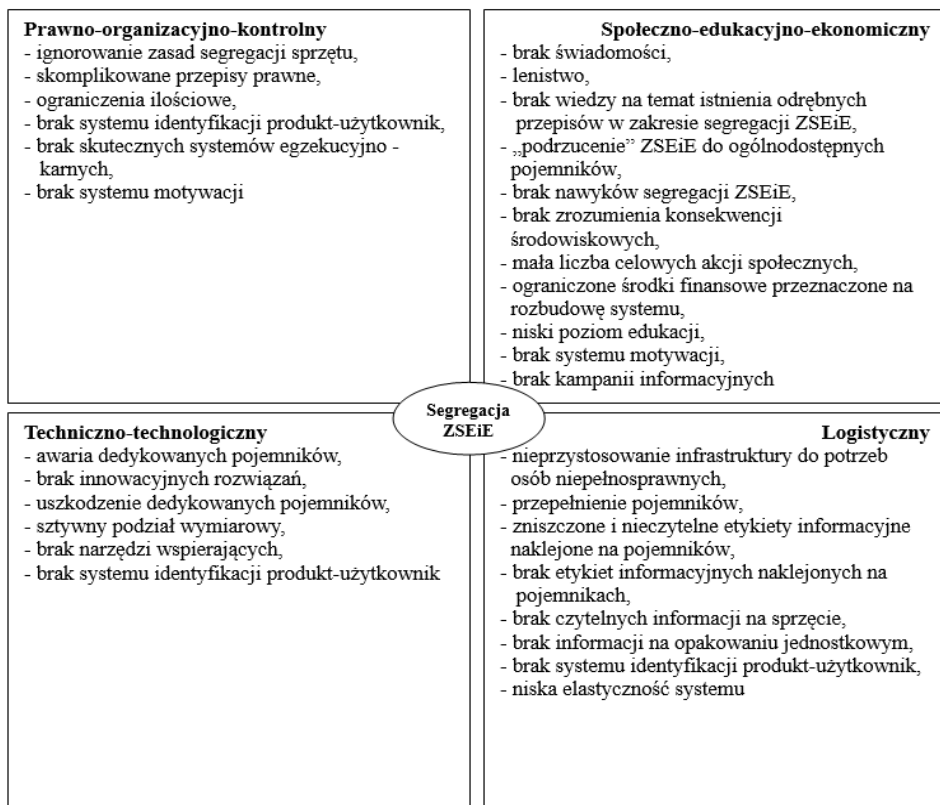
Rys. 4. Diagram Ishikawy dla niezgodności „Zmieszanie ZSEiE z innymi frakcjami odpadów” dla procesu segregacji



Rys. 5. Obszary przyczyn niezgodności występujących w procesie zbiórki ZSEiE

Procesy zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego stanowią kluczowy element w systemie minimalizacji negatywnego wpływu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na środowisko przyrodnicze. Na podstawie zidentyfikowanych przyczyn niezgodności w procesach zbiórki i segregacji, opierając się na burzy mózgów, dokonano analizy przyczynowo-skutkowej z zastosowaniem diagramu Ishikawy dla dwóch niezgodności: w procesie zbiórki – „nieosiągnięcie limitów zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego” (rys. 3) oraz w procesie segregacji – „zmieszany zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny z innymi frakcjami odpadów” (rys. 4).

Na podstawie przeprowadzonej analizy z wykorzystaniem diagramu Ishikawy wywnioskowano, że przyczyny powodujące występowanie niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego mają różne źródła. Przeprowadzona analiza jest przyczynkiem do wskazania kierunków doskonalenia obecnych rozwiązań w celu minimalizacji występowania niezgodności w omawianych procesach.



Rys. 6. Obszary przyczyn niezgodności występujących w procesie segregacji ZSEiE

Odautorskie propozycje działań korygujących względem zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego

Dynamiczny rozwój technologii oraz szybkie starzenie się urządzeń elektrycznych i elektronicznych prowadzą do wzrostu liczby elektrośmieci wytwarzanych przez społeczeństwa na całym świecie. Skuteczna zbiórka ZSEiE nie tylko przyczynia się do ochrony środowiska przyrodniczego, ale również pozwala na odzysk cennych surowców, takich jak metale szlachetne czy surowce nieodnawialne, jak i rzadkie. Jednak obecne rozwiązania w ramach systemów zbiórki nie przynoszą oczekiwanych rezultatów w zakresie m.in. osiągania limitów zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, co wskazuje na konieczność wdrożenia innowacyjnych rozwiązań.

Zidentyfikowane na rysunkach 3 i 4 przyczyny niezgodności w procesach zbiórki i segregacji można pogrupować w czterech obszarach (rys. 5 i 6).

Propozycje odautorskich rozwiązań w zakresie zmniejszenia występowania przyczyn niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego zaprezentowano w tabelach 8 oraz 9.

Tab. 8. Odautorskie propozycje w zakresie zmniejszenia występowania przyczyn niezgodności w procesie zbiórki ZSEiE

Obszar	Niezgodność	Propozycje	Interpretacja
Prawno-organizacyjno-kontrolny.	zbiórka przez nieuprawnione podmioty	wprowadzenie na każdym produkcie wybitego unikalnego kodu produktu	możliwość jednoznacznej identyfikacji produktu wraz z jego nabywcą
	brak skutecznego systemu kontroli i egzekucji obowiązków kupujących i sprzedających	– wprowadzenie obowiązkowych certyfikatów dla przedsiębiorstw zajmujących się zbiórką i przetwarzaniem ZSEiE, – wprowadzenie obowiązkowych umów między producentami a certyfikowanymi punktami zbiórki	certyfikaty obejmowałyby zgodność z normami środowiskowymi oraz etycznymi
	ograniczenia liczbowe	zmiana zapisów w aktach prawnych.	dotychczasowy zapis ogranicza możliwość odbioru ZSEiE w stosunku 1:1
Techniczno-technologiczny.	brak innowacyjnych rozwiązań	finansowanie start-upów związanych z implementacją innowacyjnych rozwiązań w zakresie zbiórki ZSEiE	finansowanie rozwoju start-upów w ramach programów proekologicznych z funduszy europejskich
	brak aplikacji wspierających.	darmowa aplikacja możliwa do zainstalowania na smartfonie/laptopie	funkcjonalność aplikacji oparta o dane w zakresie: – lokalizacji i godzin pracy punktu zbiórki, – zintegrowanie z innymi aplikacjami monitorującymi miejsce, w którym znajduje się produkt, – informacje techniczne o użytym/zdanym sprzęcie, – historia zdanego ZSEiE, – możliwość skanowania kodu produktu na podstawie zunifikowanego systemu znaków
	brak jednostkowej identyfikacji produktu.	wprowadzenie na każdym produkcie wybitego unikalnego kodu produktu	zunifikowany system znaków (liter, cyfr) pozwalających na dokładną identyfikację producenta sprzętu oraz grupy ZSEiE jako odpadu niebezpiecznego

Obszar	Niezgodność	Propozycje	Interpretacja
Społeczno- -edukacyjno- -ekonomiczny	<p>pozbywanie się ZSEiE w nielegalny sposób</p> <p>brak świadomości</p> <p>brak wystarczającej edukacji</p> <p>i motywacji</p>	<p>wprowadzenie zwrotnej kaucji za zakupiony sprzęt</p> <p>- organizowanie kampanii informacyjnych i edukacyjnych w mediach społecznościowych i placówkach oświatowych poprzez szkolenia i webinariów,</p> <p>- wprowadzenie następujących programów: „Ulgi podatkowe dla podmiotów przekazujących ZSEiE”, programy lojalnościowe</p>	<p>odzyskanie kaucji możliwe po zwrocie ZSEiE do certyfikowanego punktu zbiórki</p> <p>- kampanie informacyjne z wykorzystaniem różnych sił i środków,</p> <p>- wprowadzenie zapisów dotyczących ulg podatkowych dla podmiotów przekazujących ZSEiE do autoryzowanych punktów zbiórki,</p> <p>- wprowadzenie programów lojalnościowych opartych na preferencyjnych warunkach zakupu nowego sprzętu elektrycznego i elektronicznego</p>
	<p>obawa przed nielegalnym przejęciem danych osobowych z urządzeń elektronicznych</p>	<p>- wprowadzenie certyfikatu zniszczenia danych,</p> <p>- stworzenie aplikacji umożliwiającej zniszczenie danych oraz uniemożliwiającej ich odzyskanie (odczytanie)</p>	<p>zgodnie z RODO przeniesienie odpowiedzialności na punkt zbiórki lub twórcy aplikacji</p>
Logistyczny	<p>ograniczona dostępność do automatycznych punktów odbioru</p>	<p>finansowanie start-upów związanych z rozwojem innowacyjnych rozwiązań technicznych w zakresie zbiórki ZSEiE</p>	<p>finansowanie rozwoju start-upów w ramach programów proekologicznych z funduszy europejskich</p>
	<p>Ograniczona liczba mobilnych punktów zbiórki.</p>	<p>finansowanie start-upów związanych z rozwojem mobilnych punktów w zakresie zbiórki ZSEiE</p>	<p>finansowanie rozwoju start-upów w ramach programów proekologicznych z funduszy europejskich</p>
	<p>Niedostosowanie harmonogramów zbiórki do potrzeb użytkowników.</p>	<p>stworzenie platformy informacyjnej umożliwiającej zgłaszanie potrzeby oddania ZSEiE</p>	<p>automatyczna możliwość zarezerwowania terminu przekazania ZSEiE w oparciu o opracowany kalendarz (dzienny, godzinowy)</p>
	<p>niewystarczająca liczba stacjonarnych punktów zbiórki</p> <p>przepełnienie pojemników</p> <p>Zakłócenia w logistyce zwrotów.</p>	<p>finansowanie start-upów związanych z rozwojem stacjonarnych punktów w zakresie zbiórki ZSEiE</p> <p>instalowanie inteligentnych pojemników z wbudowanymi czujnikami</p> <p>wprowadzenie na każdym produkcie wybiętego unikalnego kodu produktu zintegrowanego z systemem monitorowania przepływu sprzętu</p>	<p>Finansowanie rozwoju start-upów w ramach programów proekologicznych z funduszy europejskich.</p> <p>czujniki mające na celu określenie stopnia wypełnienia pojemnika jako system wczesnego ostrzegania</p> <p>zuniifikowany system znaków (liter, cyfr) pozwalających na dokładną identyfikację producenta sprzętu oraz grupy ZSEiE jako odpadu niebezpiecznego</p>

Tab. 9. Odautorskie propozycje w zakresie zmniejszenia występowania przyczyn niezgodności w procesie segregacji ZSEiE

Obszar	Niezgodność	Propozycje	Interpretacja
Prawno-organizacyjno-kontrolny	brak systemu identyfikacji produkt-użytkownik	wprowadzenie wirtualnych paszportów produktu z informacjami na temat jego statusu	system rejestracji i monitorowania zakupionego sprzętu w bazie danych w odniesieniu do relacji zakupiony sprzęt-nabywca
	Brak systemu motywacji	połączenie systemu zbiórki z systemem segregacji w oparciu o programy lojalnościowe	podniesienie poziomu motywacji w zakresie zachowania zasad segregacji w odniesieniu do wymiernych korzyści ekonomicznych
	brak innowacyjnych rozwiązań	– tworzenie interaktywnych kampanii edukacyjnych z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości, – głębinowe pojemniki zaautomatyzowane, – głosowe systemy informacyjne	– wykorzystanie rozwiązań Przemysłu 4.0 minimalizujących ryzyko pomyłki w procesie segregacji, – niezaburzenie przestrzeni oraz ograniczenie bałaganu dookoła pojemników naziemnych, – pojemniki z systemami głosowymi zawierającymi instrukcje odnośnie sposobu segregacji ZSEiE
Techniczno-technologiczny	sztynny podział wymiarowy	automatyczne pojemniki dla sprzętu średnio- i małowymiarowego	pojemniki automatycznie dostosowujące „otwór wrzutowy” do wymiarów zewnętrznych ZSEiE połączone z kodem QR produktu identyfikującym jego wymiar
	brak narzędzi wspierających	– aplikacje oraz kody QR produktu, – interaktywne poradniki	– stworzenie aplikacji mobilnej z wbudowaną funkcją kodu QR produktu, – aplikacje mobilne z interaktywnymi poradnikami dotyczącymi prawidłowej segregacji ZSEiE
	brak systemu identyfikacji produkt-użytkownik	wprowadzenie wirtualnych paszportów produktu z informacjami na temat jego statusu	system rejestracji i monitorowania zakupionego sprzętu w bazie danych w odniesieniu do relacji zakupiony sprzęt-nabywca

Obszar	Niezgodność	Propozycje	Interpretacja
<p>Spoleczno- -edukacyjno- -ekonomiczny</p>	<p>brak świadomości niski poziom edukacji mała liczba celowych akcji społecznych brak systemu motywacji brak wiedzy na temat istnienia odrębnych przepisów w zakresie segregacji ZSEiE brak zrozumienia konsekwencji środowiskowych brak kampanii informacyjnych</p>	<p>– kampanie edukacyjne z wykorzystaniem VR i AR do edukowania użytkowników na temat segregacji ZSEiE, – wprowadzenie gier edukacyjnych dla dzieci i młodzieży, – regularne warsztaty w placówkach oświatowych, społecznościach lokalnych, mediach społecznościowych, – wsparcie ze strony znanych osobistości ze świata sztuki, kultury, nauki, filmu – konkursy pod patronatem właściwego ministerstwa, – organizowanie festiwali ekologicznych</p>	<p>– rozwój praktycznej edukacji i kampanii informacyjnych poprzez system nieustannej ciągłej motywacji, – realizacja podstawy programowej z wykorzystaniem narzędzi edukacyjnych, – angażowanie znanych osób w promowanie sposobów właściwej segregacji ZSEiE, – podnoszenie ważności problematyki negatywnego wpływu ZSEiE na środowisko przyrodnicze</p>
	<p>ograniczone środki finansowe przeznaczone na rozbudowę systemu</p>	<p>efektywne wykorzystanie programów pomocowych</p>	<p>– absorbcja środków z funduszy Unii Europejskiej, – stworzenie wyspecjalizowanych komórek wspierających lokalne inicjatywy</p>

Obszar	Niezgodność	Propozycje	Interpretacja
Logistyczny.	nieprzystosowanie infrastruktury do potrzeb osób niepełnosprawnych.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rozbudowa infrastruktury wspierającej (podjazdy, barierki, platformy),</li> <li>- dostosowanie infrastruktury punktowej,</li> <li>- systemy głosowe,</li> <li>- systemy wizyjne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rozbudowanie pojemników o system podajników,</li> <li>- ułatwienie dla osób słabo lub niesłyszących,</li> <li>- ułatwienia dla osób słabo lub niewidzących.</li> </ul>
	przepelnienie pojemników	instalowanie inteligentnych pojemników z wbudowanymi czujnikami	czujniki mające na celu określenie stopnia wypełnienia pojemnika jako system wczesnego ostrzegania
	zniszczone i nieczytelne etykiety informacyjne naklejone na pojemników	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zastosowanie innowacyjnych materiałów do produkcji etykiet,</li> <li>- zmiany w dotychczasowych przepisach prawnych odnośnie oznakowania pojemników,</li> <li>- kody QR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- etykiety wykonane z materiałów odpornych na działanie warunków atmosferycznych,</li> <li>- ustawowy obowiązek dotyczący nakazu naklejania etykiet informacyjnych odnośnie sposobu segregacji,</li> <li>- umieszczanie na pojemnikach kodów QR zawierających instrukcję prawidłowej segregacji ZSEiE</li> </ul>
	brak etykiet informacyjnych naklejonych na pojemnikach	widoczny system piktogramów	<ul style="list-style-type: none"> <li>- umieszczanie piktogramów na opakowaniu jednostkowym oraz obudowie sprzętu,</li> <li>- zamieszczanie zapisów informujących i piktogramów o zawarciu elementów elektronicznych w sprzęcie</li> </ul>
	brak czytelnych informacji na sprzęcie	wprowadzenie wirtualnych paszportów produktu z informacjami na temat jego statusu	system rejestracji i monitorowania zakupionego sprzętu w bazie danych w odniesieniu do relacji zakupiony sprzęt–nabywca
	brak informacji na opakowaniu jednostkowym	brak systemu identyfikacji produkt-użytkownik	

## Podsumowanie

Celem artykułu było zastosowanie diagramu Ishikawy w odniesieniu do analizy przyczynowo-skutkowej występowania niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

W artykule dokonano przeglądu legislacyjnych uwarunkowań gospodarowania użytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym (ZSEiE). Przytoczono ustawową definicję zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz wskazano jego cechy charakterystyczne uznające go za odpad niebezpieczny. Dokonano przeglądu mechanizmów systemu prawnego w odniesieniu do wsparcia i egzekucji zapisów prawa w aspekcie prawidłowej zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

Następnie przeprowadzono identyfikację niezgodności w odniesieniu do omawianych procesów. Wskazano główne problemy wynikające ze zdiagnozowanych niezgodności. Zdiagnozowano luki systemowe występujące w procesie zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Dokonana identyfikacja była podstawą do opracowania analizy przyczynowo-skutkowej z wykorzystaniem diagramów Ishikawy. Diagramy „rybiej ości” zastosowano w odniesieniu do dwóch niezgodności:

- w procesie zbiórki „nieosiągnięcie limitów zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego” oraz
- w procesie segregacji „zmieszany zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny z innymi frakcjami odpadów”.

Zidentyfikowane przyczyny niezgodności w procesach zbiórki i segregacji pogrupowano w czterech obszarach: prawno-organizacyjno-kontrolnym, techniczno-technologicznym, społeczno-edukacyjno-ekonomicznym oraz logistycznym. Na tej podstawie zaproponowano odautorskie rozwiązania w zakresie zmniejszenia występowania przyczyn niezgodności w procesach zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego.

Wśród rozwiązań w procesie zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego zaproponowano m.in.: wprowadzenie na każdym produkcie wybitego unikalnego kodu produktu, finansowanie start-upów związanych z implementacją innowacyjnych rozwiązań w zakresie zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, wprowadzenie zwrotnej kaucji za zakupiony sprzęt oraz instalowanie inteligentnych pojemników z wbudowanymi czujnikami.

Wśród rozwiązań w procesie segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego zaproponowano m.in.: wprowadzenie wirtualnych paszportów produktu z informacjami na temat jego statusu, tworzenie interaktywnych kampanii edukacyjnych z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości, głębinowe pojemniki zautomatyzowane, systemy głosowe, systemy wizyjne oraz kody QR.

Zdaniem autorek realizacja postulowanych działań pozwoli na usprawnienie procesów zbiórki i segregacji zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, przyczyniając się do zmniejszenia negatywnego wpływu tego rodzaju odpadu na środowisko przyrodnicze, tym samym umożliwiając osiągnięcie wyższego poziomu ponownego zagospodarowania surowców wtórnych.

## Literatura

- Chądzyńska M., & Klimecka-Tatar D. (2017). *Wykorzystanie narzędzia zarządzania jakością jakim jest Diagram Ishikawy na przykładzie małego przedsiębiorstwa kaletniczego*. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 2(1), 20-22.
- Czajkowski T., & Michalski K. (2023). *Zarządzanie projektem informatycznym na przykładzie wdrożenia w środowisku magazynowym*. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 8(3), 61-80.
- Dolniak M., & Knop K. (2020). *Wykorzystanie narzędzi i metod doskonalenia jakości do analizy i rozwiązania problemu związanego z bezpieczeństwem pracy*. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 5(2), 12-17.
- Drozda M., & Dąbrowska M. (2023). *Gospodarowanie zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym w świetle zapisów Konwencji Bazylejskiej*. *Innovative economy and industry*. D. Medyński, K. Kolbusz, J. Lewandowska-Bratek, M. Dąbrowska (red.), Poznań: PTE, 32-55.
- Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów (Dz. U. UE. L. z 1999 r. Nr 182, str. 1 z późn. zm.).
- Dyrektywa 2004/35/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 r. w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu (Dz. U. UE. L. z 2004 r. Nr 143, str. 56 z późn. zm.).
- Dyrektywa 2006/66/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 września 2006 r. w sprawie baterii i akumulatorów oraz zużytych baterii i akumulatorów oraz uchylająca dyrektywę 91/157/EWG (Dz. U. UE. L. z 2006 r. Nr 266, str. 1 z późn. zm.).
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/65/UE z dnia 8 czerwca 2011 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (wersja przekształcona) (Dz. U. UE. L. z 2011 r. Nr 174, str. 88 z późn. zm.).
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE) (wersja przekształcona) (Dz. U. UE. L. z 2012 r. Nr 197, str. 38 z późn. zm.).
- Fabiś-Domagała J. (2017). *Application of Ishikawa diagram for failure analysis of a car water pump*. *Technical Transactions*, 8, 193-198.
- Hamrol A., & Mantura W. (2008). *Zarządzanie jakością: teoria i praktyka*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Ishikawa K. (1976). *Guide to Quality Control*, Tokyo: Asian Productivity Organization.
- Jagaczyński D., & Dąbrowska M. (2023). *Identyfikacja przyczyn niezgodności w wyrobie gotowym z wykorzystaniem diagramu Ishikawy – studium przypadku*. *Innovative economy and industry*. D. Medyński, K. Kolbusz, J. Lewandowska-Bratek, M. Dąbrowska (red.), Poznań: PTE, 222-244.
- Jasiaczyk W., Staniec I., & Depta A. (2023). *Projekt narzędzia usprawniającego proces kontroli niezgodności w zakładzie produkcyjnym*. *Journal of Management Challenges*, 1(2), 87-103.

- Jędras A., & Knop K. (2021). *Analiza i ocena jakości serka homogenizowanego*. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 6, 34-38.
- Jękał A., & Małyś T. (2022). *Zastosowanie wybranych narzędzi Lean Manufacturing i jakości w zakresie poprawy organizacji produkcji*. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, 25(1-2), 2-6.
- Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz. U. Nr 78, poz. 483 z późn. zm.), Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2022 r. poz. 2556).
- Konwencja bazylejska o kontroli transgranicznego przemieszczania i usuwania odpadów niebezpiecznych, sporządzona w Bazylei dnia 22 marca 1989 r. (Dz. U. z 1995 r., Nr 19, poz. 88).
- Kowalik K. (2018). *Diagram Ishikawy w teorii i praktyce zarządzania jakością*. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 3, 15-17.
- Kowalska M., & Paździor M. (2015). *Zastosowanie diagramu Ishikawy jako narzędzia doskonalenia jakości produktów spożywczych*. *Postępy techniki przetwórstwa spożywczego*, 1, 136-139.
- Lasota A.M. (2023). *Ocena ryzyka ergonomicznego z zastosowaniem komputerowego modelowania i symulacji-studium przypadku*. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, 26(2), 22-26.
- Łunarski J. (2008). *Zarządzanie jakością. Standardy i zasady*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- Nems J., & Knop K. (2023). *Doskonalenie procesu realizacji zamówień z wykorzystaniem wybranych metod*. *Management and Quality*, 5(2), 202-217.
- Pacana A., Czerwińska K., & Siwiec D. (2018). *Narzędzia i wybrane metody zarządzania jakością: teoria i praktyka*. Częstochowa: Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji.
- Pacana A., & Siwiec D. (2020). *Improving the process of analysing the causes of problem by integrating the Ishikawa diagram and FAHP method*. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, (143), 247-257.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 lipca 2017 r. w sprawie minimalnych rocznych poziomów zbierania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (Dz. U. poz. 1499).
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 7 listopada 2020 r. w sprawie metody oraz szczegółowego sposobu obliczania minimalnego rocznego poziomu zbierania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (Dz. U. poz. 2035),
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 25 kwietnia 2019 r. w sprawie rocznego audytu zewnętrznego organizacji odzysku sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz zakładu przetwarzania (Dz. U. poz. 798).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2018 r. w sprawie szczegółowych stawek opłaty produktowej dla grup sprzętu (Dz. U. poz. 1194).
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 26 lipca 2021 r. w sprawie zakresu i wzoru rocznego raportu o funkcjonowaniu systemu gospodarki zużyтым sprzętem (Dz. U. poz. 1461).
- Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 21 grudnia 2016 r. w sprawie zasadniczych wymagań dotyczących ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2021 r. poz. 1513 z późn. zm.).
- Siwiec D., & Pacana A. (2019). *The use of quality management techniques to analyse the cluster of porosities on the turbine outlet nozzle*. *Production Engineering Archives*, 24(24), 33-36.
- Siwiec D., & Pacana A. (2020). *Analiza niezgodności w procesie produkcji płyt meblowych*. *Przegląd Mechaniczny*, (7-8), 44-46.
- Siwiec D., & Pacana A. (2022). *A new model supporting stability quality of materials and industrial products*. *Materials*, 15(13), 4440.

- Smith G.F. (1998). *Quality problem solving*. Milwaukee: ASQ Quality Press.
- Szczeńsiak B., Zasadzień M., & Wapienik Ł. (2012). *Zastosowanie analizy Pareto oraz diagramu Ishikawy do analizy przyczyn odrzutów w procesie produkcji silników elektrycznych*. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, 63a, 125-147.
- Ustawa z dnia 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. z 2022 r. poz. 2519).
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2022 r. poz. 699 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2022 r. poz. 1622).
- Ustawa z dnia 24 kwietnia 2009 r. o bateriach i akumulatorach (Dz. U. z 2022 r. poz. 1113).
- Ustawa z dnia 29 czerwca 2007 r. o międzynarodowym przemieszczaniu odpadów (Dz. U. z 2020 r. poz. 1792).
- Wolniak R., & Skotnicka B. (2011). *Metody i narzędzia zarządzania jakością: teoria i praktyka*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

**Dominika Matuszek  
Karol Bierczyński**

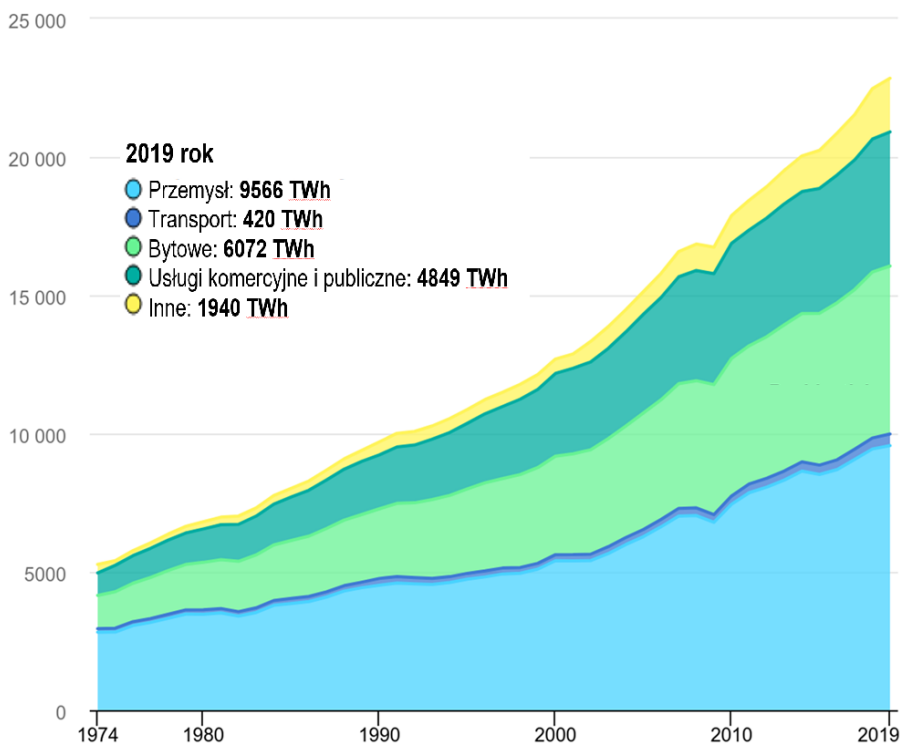
# **WYKORZYSTANIE CIEPŁA ODPADOWEGO ZE SPRĘŻAREK DO ODGRZEWANIA WODY TECHNOLOGICZNEJ**

## **Wprowadzenie**

Polityka energetyczna to zakres działań, podejmowanych przez poszczególne państwa lub ich grupy w celu zaspokojenia zapotrzebowania własnych obywateli na energię. Współczesna gospodarka, pomimo stałego rozwoju, uzależniona jest w dalszym ciągu od energii [1], która wciąż w znacznym stopniu pochodzi ze źródeł nieodnawialnych [2, 3]. Mając na uwadze politykę zrównoważonego rozwoju, której filarem jest zapewnienie równego dostępu do naturalnych zasobów dla obecnych i przyszłych pokoleń, przy zachowaniu niezmiennego lub lepszego niż obecny stanu środowiska, współcześnie dąży się do zwiększenia ilości energii, która pozyskiwana jest ze źródeł odnawialnych [4]. Promowana jest także polityka zmniejszania zapotrzebowania na energię [5], co prowadzi do unowocześniania technologii wytwarzania, poprzez wykorzystanie materiałów z recyklingu, redukcję ilości energii potrzebnej w samym procesie, czy wykorzystanie pochodzących z procesu produkcji odpadów. Celem niniejszego badania jest analiza możliwości wykorzystania ciepła odpadowego powstającego w procesie sprężania powietrza jako źródła ogrzewania wody używanej w procesie przygotowania elementów do malowania proszkowego.

## **Globalne zapotrzebowanie na energię**

Globalne zapotrzebowanie na energię elektryczną wyniosło w 2019 roku 22847 TWh i ciągle wzrasta [6]. Znaczna część wytworzonej przez całą światową gospodarkę energii wykorzystywana jest na cele produkcyjne (rys. 1). Przemysł pochłonął 9566 TWh, czyli



Rys. 1. Globalne zużycie energii w latach 1974-2019 [8]

42% całej wytwarzanej energii elektrycznej. Warto zatem przedsięwziąć działania, które pozwolą ograniczyć energochłonność procesów przemysłowych.

Oczywiście nie może się to odbyć poprzez spadek ilości wytwarzanych produktów. Należy podjąć inicjatywy, które pozwolą utrzymać wolumen produkcyjny, przy jednoczesnym zmniejszeniu zapotrzebowania na energię. Działania takie przyniosą wielorakie korzyści podmiotowi, który je podejmie oraz jego otoczeniu, co koreluje ze współczesnym podejściem do roli jaką przedsiębiorstwa powinny odgrywać w otoczeniu społecznym, środowiskowym oraz korporacyjnym. Ideą, która łączy te trzy elementy, jest ESG (środowiskowy, ang. *environmental*, społecznie odpowiedzialny, ang. *social responsibility*, ład korporacyjny, ang. *corporate governance*), wykorzystywana do oceny oddziaływania oraz przyszłych wyników finansowych organizacji [7]. Wysokie i pozytywne noty ESG budują pozycję podmiotu wśród jego interesariuszy, w tym potencjalnych inwestorów, kredytodawców oraz przedstawicieli organów państwa i społeczeństwa. Warto zatem przeprowadzić szczegółowe badania w zakresie wpływu, jaki organizacja wywiera na swoje otoczenie, uwzględniając w nich również zapotrzebowanie i sposób wykorzystania energii.

Analiza struktury kosztów mediów w przemyśle wskazuje, że najkosztowniejszym z nich jest sprężone powietrze [9], co powinno stanowić podstawę do eliminowania tego rodzaju nośnika energii z procesów przemysłowych. Jednak łatwość zastosowania, bezpieczeństwo oraz dostępność powodują, że sprężone powietrze jest medium wykorzystywanym w procesach wytwórczych powszechnie [10]. Około 10% energii, która zużywana jest przez przemysł, wykorzystywana jest do wytworzenia sprężonego powietrza [11, 12], co w 2019 roku przełożyło się na ponad 956 TWh, czyli ekwiwalent prawie 120 milionów ton węgla [13]. Popularność i energochłonność powietrza o podniesionym ciśnieniu zachęca do analizy procesu jego wytwarzania w celu ograniczenia zużycia energii i strat związanych z dystrybucją tego medium. A same straty są ogromne. Jedynie niewielka część energii zużywanej do produkcji sprężonego powietrza jest rzeczywiście wykorzystywana w procesach przemysłowych. Nawet 90% energii jest tracona [14]. Budowa układów sprężonego powietrza, ich wielkość, a przede wszystkim różnorodność (łączenie różnego rodzaju przewodów, układów, odejścia) powodują, że są one narażone na liczne przecieki, które zmniejszają efektywność działania całego układu [15]. Jednak podstawowym problemem w układach sprężonego powietrza jest samo serce tego sytemu, czyli kompresor.

## Kompresory – rodzaje i zasada działania

Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń, których zadaniem jest podniesienie ciśnienia gazów. Różnią się one między sobą budową, a co za tym idzie sposobem sprężania. Podstawowy podział oparty jest na ogólnej zasadzie działania urządzenia, wyróżnia się kompresory wyporowe oraz kompresory przepływowe. Należy również zwrócić uwagę, że poszczególne rodzaje sprężarek mogą różnić się między sobą sposobem chłodzenia samego urządzenia. Wykorzystanie oleju do zmniejszenia temperatury i smarowania elementów ruchomych wpływa na czystość sprężanego medium, temperaturę pracy oraz żywotność kompresora [16, 17].

Sprężarki wyporowe, to urządzenia, których zasada działania opiera się na procesie zmniejszenia objętości sprężanego gazu w zamkniętej komorze, co skutkuje zwiększeniem ciśnienia. Ten sposób działania powoduje, że na wyjściu sprężane medium jest wytłaczane w częściach, których objętość odpowiada objętości komory sprężającej. W tej grupie kompresorów wyróżnić można następujące urządzenia [19]:

- sprężarki membranowe – elastyczna przepona wprawiana jest w ruch zmniejszając wymiary komory sprężającej (jej objętość), co zwiększa ciśnienie znajdującego się tam powietrza,

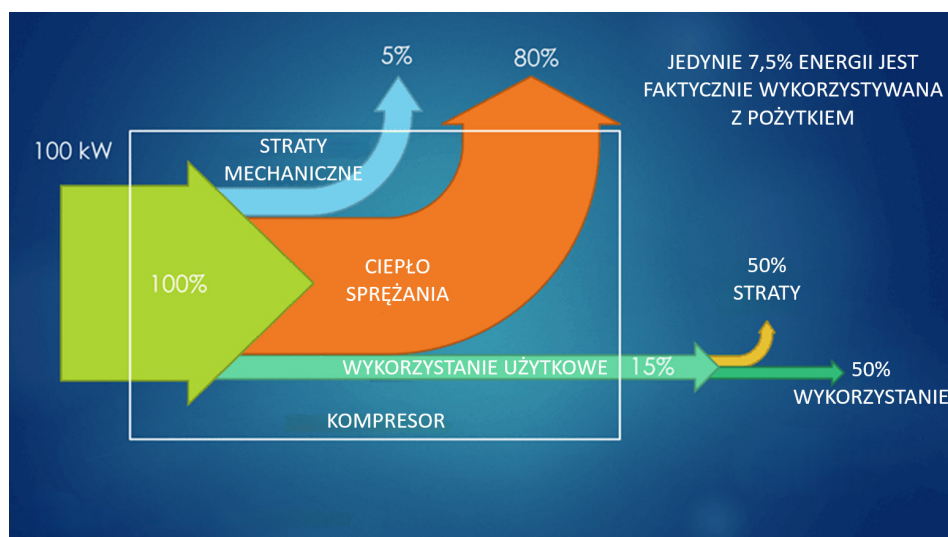
- sprężarki śrubowe – składają się z układu dwóch śrub (napędzającej i napędzanej), które mogą być chłodzone olejem. Podczas ich ruchu zmniejszana jest przestrzeń między śrubami a komorą, co podnosi ciśnienie sprężanego gazu,
- sprężarki łopatkowe – swoją budową przypominają śrubowe, jednak zastosowany jest tutaj jedynie jeden wirnik. W komorze sprężającej obraca się wał mimośrodowy, dzieląc ją na mniejsze przestrzenie, co powoduje wzrost ciśnienia gazu,
- sprężarki spiralne składają się z dwóch elementów spiralnych: stałego oraz ruchomego. Ruch mimośrodowy spirali powoduje zassanie powietrza i zamknięcie go w komorach tworzonych pomiędzy łopatkami stałego i ruchomego wirnika. Wtłoczenie powietrza do mniejszych komór powoduje wzrost jego ciśnienia,
- sprężarki tłokowe – ich zasada działania opiera się na ruchu tłoka umieszczonego w cylindrze. W trakcie pracy tłok przesuwa się, zmniejszając objętość cylindra, co powoduje zwiększenie ciśnienia znajdującego się w środku gazu.

Kompresory przepływowe to urządzenia, w których zwiększenie ciśnienia następuje poprzez zwiększenie prędkości przepływu gazu. Zastosowanie takiej metody podnoszenia ciśnienia pozwala na uzyskanie ciągłego wypływu gazu z kompresora. Do tego rodzaju urządzeń należą [18]:

- sprężarki osiowe – to urządzenia, w których sprężane medium przepływa wzdłuż osi komory sprężającej, obracający się wirnik podnosi prędkość przepływu, co zwiększa ciśnienie na wylocie ze sprężarki,
- sprężarki promieniowe – w kompresorach tego typu przepływ gazu przez wirnik jest prostopadły do jego osi. Prędkość powietrza jest podnoszona i opuszcza ono urządzenie poprzez spiralnie ukształtowany dyfuzor wylotowy,
- sprężarki osiowo-promieniowe – łączą w sobie oba wymienione powyżej rozwiązania, najpierw powietrze przepływa przez wirniki osiowe, a następnie przez wirnik odśrodkowy, proces ma więc charakter stopniowy.

## **Problematyka badawcza**

Rodzaj urządzenia, które wykorzystywane jest do produkcji sprężonego powietrza uzależniony jest do wielu zmiennych. Podstawowe kryteria to maksymalne ciśnienie robocze, wielkość przepływu powietrza oraz stopień zanieczyszczenia sprężanego gazu. Niezależnie od rodzaju wybranego urządzenia, pod uwagę należy wziąć sprawność jaką charakteryzuje się proces wytwarzania sprężonego gazu. Energia, którą pobiera z sieci pracujący kompresor w większości przetwarzana jest na ciepło, które traktowane jest w procesie wytwarzania powietrza o podwyższonym ciśnieniu jako produkt uboczny. Taki odpad stanowi około 80% (rys. 2) energii wykorzystywanej przez sprężarkę, co przekłada się na 8% całej energii wykorzystywanej przez przemysł. Zagospodarowanie



Rys. 2. Schemat bilansu energetycznego sprężarki [21]

**{A: proszę przerobić rysunek – polskie opisy}**

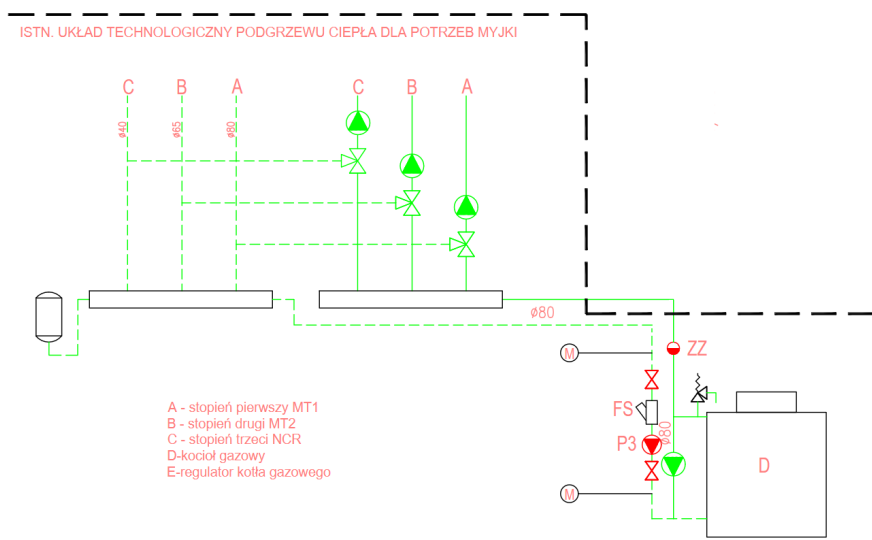
tej energii stanowi wyzwanie i szansę dla wszystkich podmiotów wykorzystujących ten nośnik energii [20].

## Badany układ

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę działania systemu podgrzewania wody do celów technologicznych oraz rozbudowę tego układu o instalację odzysku ciepła z pracujących niezależnie kompresorów. Badania przeprowadzono na istniejącej linii do malowania proszkowego elementów z aluminium. Przebieg całego procesu można podzielić na 4 etapy:

- 1) chemiczne przygotowanie powierzchni malowanych detali,
- 2) suszenie detali,
- 3) malowanie (nakładanie powłoki proszkowej),
- 4) wygrzewanie powłoki.

W przeprowadzonym badaniu skupiono uwagę na pierwszym etapie, który składa się z trzech następujących po sobie kąpeli (MT1, MT2 oraz NCR). Ich zadaniem jest odfłuszczenie powierzchni detalu, płukanie wstępne oraz płukanie końcowe w wodzie zdemineralizowanej o odpowiednich parametrach przewodności. Proces ten przeprowadzany jest w pełni automatycznie poprzez system sterowania, który dozjuje odpowiednie odczynniki i dostosowuje temperaturę poszczególnych kąpeli. W podstawowym układzie, podgrzewanie wody wykonywane jest poprzez kocioł gazowy



Rys. 3. Schemat układu podgrzewania wody technologicznej (oprac. własne)

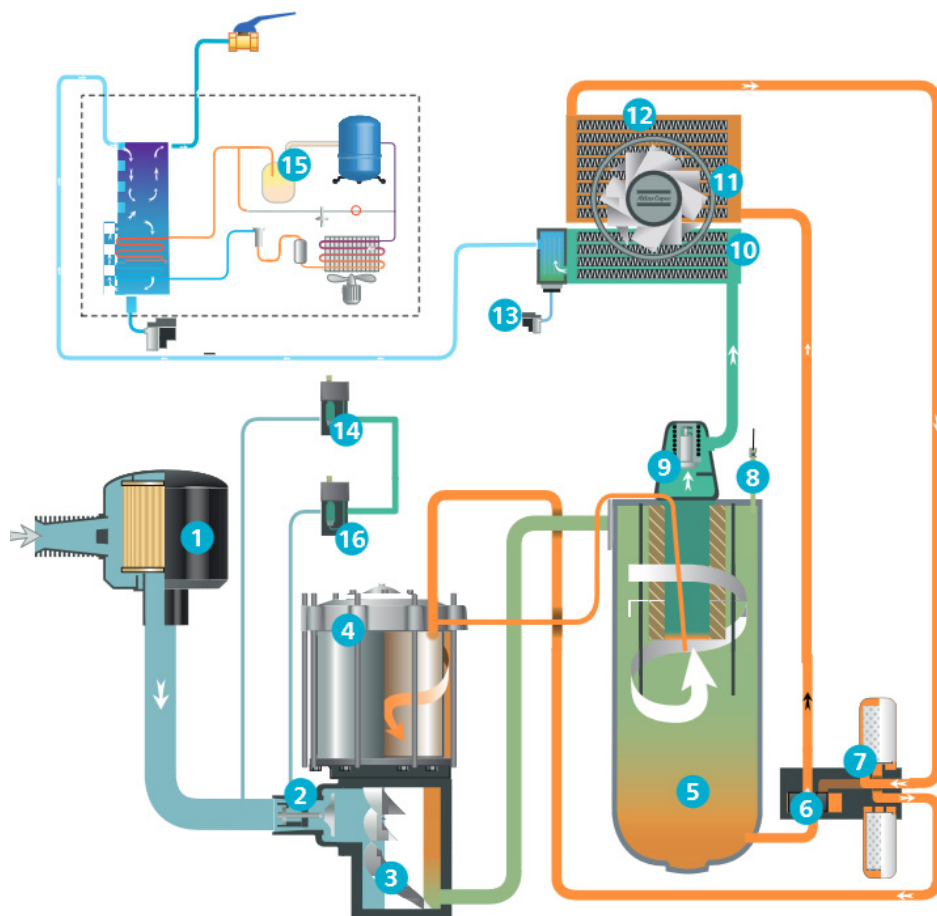
Viessmann Vitoplex 100 o mocy 250 kW (rys. 3). Ogrzana woda transportowana jest do kolektorów, z których poprzez rurociągi A, B i C przekazywana jest do wymienników ciepła poszczególnych stref myjki.

Na każdym z rurociągów zamontowana jest pompa oraz zawór trójdrogowy, poprzez który temperatura wody dostosowywana jest do potrzeb poszczególnych kąpeli. Działanie układu przed instalacją systemu odzysku: kocioł gazowy D podgrzewa wodę do osiągnięcia zadanej temperatury (70 °C), kiedy czujnik temperatury wody w kotle wykryje jej osiągnięcie, kocioł przestaje pracować (podgrzewać). W momencie, kiedy któraś ze stref myjki (MT1, MT2 oraz NCR) rozpoczyna pracę (pobór ciepłej wody), następuje wychłodzenie wody w rozdzielaczu, czujnik temperatury przekazuje tę informację do regulatora kotła gazowego, który rozpoczyna proces podgrzewania.

Niezależnie od linii do malowania proszkowego w badanym zakładzie wykorzystywane jest sprężone powietrze, które wytwarzane jest za pośrednictwem dwóch kompresorów Atlas Copco GA37 pracujących naprzemiennie. Podjęto zatem próbę spożytkowania powstającego w trakcie ich pracy ciepła, do celów podgrzania wody technologicznej wykorzystywanej przez myjkę malarni.

System wytwarzania sprężonego powietrza

Jak już wspomniano, w zakładzie sprężone powietrze wytwarzane jest przy użyciu dwóch kompresorów Atlas Copco GA37, które pracują naprzemiennie. GA37 to rotacyjne sprężarki śrubowe z wtryskiem oleju. Dokładny schemat działania takiego kompresora przedstawiono na rysunku 4.

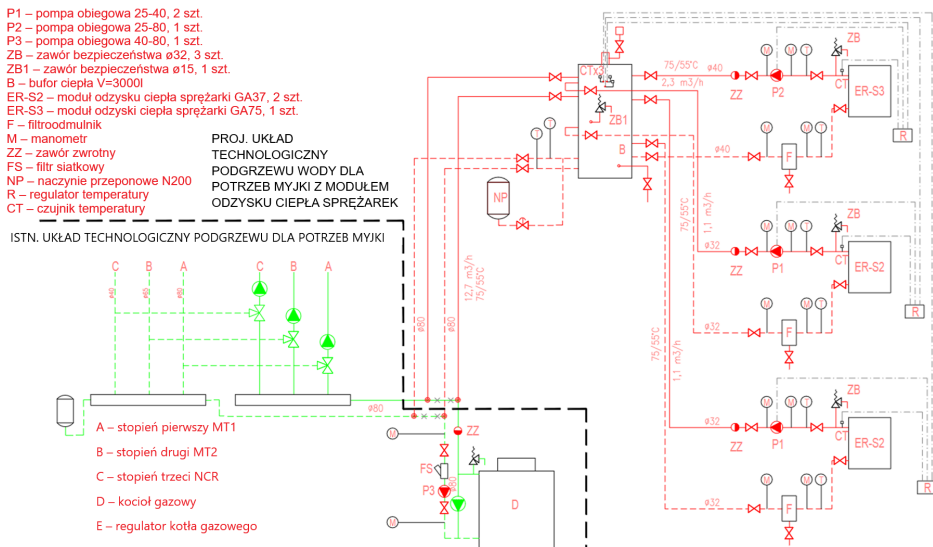


Rys. 4. Schemat działania sprężarki śrubowej [22]

Powietrze zasysane jest poprzez filtr wejściowy (1) i przechodząc przez zawór (2) dostaje się do komory sprężającej (3), w której śruby chłodzone olejem, poruszane są przez silnik (4). Mieszanka oleju i powietrza dostaje się następnie do separatora oleju (5), w którym następuje jej rozdzielenie. Rozgrzany olej poprzez zawór termostacyjny (6) kierowany jest przez filtr ponownie (7) do komory sprężającej, lub jeżeli jego temperatura jest zbyt wysoka, do chłodnicy (12), która za pomocą wentylatora (11) odbiera ciepło z układu. Sprężone powietrze wydostaje się poprzez zawór minimalnego ciśnienia, który pełni również rolę zaworu zwrotnego (9) do chłodnicy, a stamtąd do osuszacza (15). Kompresor wyposażony jest dodatkowo w zawór bezpieczeństwa (8) oraz automatyczne zawory, których zadaniem jest eliminacja kondensatu powstającego w trakcie procesu sprężania powietrza (13, 14 i 16) [22].

## Proponowany układ odzysku ciepła

W celu zmniejszenia poboru gazu oraz wykorzystania ciepła wytwarzanego przez kompresory, zaprojektowano układ odzysku ciepła odpadowego z pracujących sprężarek (rys. 5). Budowę podzielono na dwa etapy. W pierwszej kolejności istniejące kompresory GA37 wyposażono w dodatkowe wolnostojące moduły ER-S2 – wymienniki ciepła woda-olej. W drugim etapie (nie został jeszcze wykonany) do układu dwóch kompresorów zostanie dołożone trzecie urządzenie – sprężarka Atlas Copco GA75 wraz z modułem odzysku ER-S3, która będzie pracować w trybie ciągłym (kompresory GA37 nadal będą załączały się naprzemiennie).



Rys. 5. Schemat układu podgrzewania wody technologicznej z wykorzystaniem systemu odzysku ciepła (oprac. własne)

{A: opisy na rysunku będą nieczytelne w książce - są zbyt małe}

Układy myjki będą pobierać ciepłą wodę poprzez rozdzielacz z bufora B. Woda w buforze będzie podgrzewana za pomocą zarówno kotła gazowego, jak i systemu odzysku ciepła ze sprężarek. System odzysku załączany będzie w momencie, gdy sprężarki będą pracowały, a czujnik temperatury zainstalowany w buforze poda sygnał na regulatory R, że temperatura w buforze spadła poniżej  $75^{\circ}\text{C}$ . Wówczas załączona zostanie pompa P1 (ta przy pracującym kompresorze). Nastąpi przepływ wody przez wymiennik zainstalowany w sprężarce. Regulator kotła gazowego posiada osobny czujnik temperatury zainstalowany w buforze, w momencie wykrycia przez niego

spadku temperatury wody w buforze poniżej 70 °C, kocioł gazowy zostanie załączony i rozpocznie proces podgrzewania wody. Kocioł pracować będzie do momentu osiągnięcia w buforze B zadanej temperatury (70 °C), a system odzysku pracować będzie do momentu osiągnięcia w buforze temperatury 75 °C.

W przypadku, kiedy brak jest poboru ciepła z buforu B (układy myjki A, B i C nie pracują) i układ odzysku ciepła nie pracuje, sprężarki przełączane są automatycznie na chłodzenie powietrzem.

## Parametry pracy układu, założenia do projektu

Rzeczywista zmierzona temperatura wody ogrzanej przez kocioł gazowy wynosi 70 °C, temperatura wody na powrocie do kotła przyjęta do obliczeń to 50 °C, więc  $\Delta t = 20$  K (temperatury rzeczywiste powrotu podane przez Inwestora wahają się pomiędzy 46-50 °C). Taką samą różnicę temperatur założono na wymienniku w module odzysku, jednak przyjęto, że temperatura zasilania z wymiennika wynosić będzie 75 °C, a powrót 55 °C ( $\Delta t = 20$  K), aby osiągnąć takie parametry olej na wymienniku musi być rozgrzany do temperatury 95 °C.

Dokonano również pomiarów temperatury wody w poszczególnych strefach myjki oraz wielkości przepływów pomiędzy kolektorem a poszczególnymi strefami, wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Pomiary temperatur i przepływów dla poszczególnych stref myjki

Strefa myjki	Zmierzona temperatura wody, °C	Zmierzony przepływ minimalny, m <sup>3</sup> /h	Zmierzony przepływ maksymalny, m <sup>3</sup> /h
MT1	42,1	4,7	6,2
MT2	35,5	4,1	4,2
NCR	32,7	1,3	2,3

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 określono łączny minimalny (10,1 m<sup>3</sup>/h) i maksymalny (12,7 m<sup>3</sup>/h) przepływ pomiędzy kolektorem a trzema strefami myjki. Według danych producenta moduł ER-S2 pozwala odzyskać do 75% energii zużywanej przez kompresor [23], przy zachowaniu parametrów po stronie wtórnej 60/50°C (temperatury wody na wyjściu i powrocie z wymiennika olej/woda), co w przypadku sprężarki GA37 da nam odzysk na poziomie 27,8 kW. W projektowanym układzie przewidziano parametry 75/55°C. Zgodnie z informacją uzyskaną od producenta należy przyjąć, że moc do odzyskania będzie przy takich parametrach mniejsza o około 1-2 kW. Do obliczeń przyjęto więc, że z każdej ze sprężarek GA37 odzyskać będzie można 25,8 kW.

Znając masę wody, jaka przepływa przez cały układ (pomiędzy kolektorami a wszystkimi strefami myjki), używając wzoru 1 obliczono ilość energii jaka zużywana jest w ciągu 1 godziny na ogrzanie wody.

$$Q = m \cdot C_w \cdot \Delta t \quad (1)$$

$Q_{\min}$  – ilość energii potrzebnej do ogrzania wody przy minimalnym przepływie,

$Q_{\max}$  – ilość energii potrzebnej do ogrzania wody przy maksymalnym przepływie,

$m_{\min} = 10,1 \text{ m}^3 = 10100 \text{ kg}$  – minimalna ilość przepływająca w ciągu 1 h wody,

$m_{\max} = 12,7 \text{ m}^3 = 12700 \text{ kg}$  – maksymalna ilość przepływającej w ciągu 1h wody,

$\Delta t = 20 \text{ K}$  – różnica temperatury między wodą wyjściową, a powracającą do kotła gazowego,

$$C_w = 4200 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] - \text{ciepło właściwe wody.}$$

$$Q_{\min} = 10100 \cdot 4200 \cdot 20 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K} \right] = 0,8484 \cdot 10^9 [\text{J}] = 0,848 [\text{GJ}]$$

$$Q_{\max} = 12700 \cdot 4200 \cdot 20 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K} \right] = 1,0668 \cdot 10^9 [\text{J}] = 1,067 [\text{GJ}]$$

Przyjmując przelicznik  $1 \text{ GJ} = 277,78 \text{ kWh}$  oraz deklarowaną przez producenta możliwość do odzyskania na wymienniku energii (25,8 kW), obliczono, że:

- przy maksymalnym przepływie do ogrzania wody potrzebne jest 296,39 kW, a można odzyskać z tego 25,8 kW, co stanowi 8,7% zużytej energii,
- przy minimalnym przepływie do ogrzania wody potrzebne jest 235,66 kW, a odzyskać z tego można 25,8 kW, co stanowi 9,1% zużytej energii.

## Wyniki pomiarów

Przedstawione powyżej obliczenia pozwalają szacować, że zastosowanie modułu odzysku pozwoli na oszczędności na poziomie około 9% zużywanej do podgrzania wody energii. Z uzyskanych od inwestora informacji wynika, że w roku 2020, przed zainstalowaniem systemu odzysku, średnio, na  $1 \text{ m}^2$  pomalowanych detali zużywane było  $0,273 \text{ m}^3$  metanu. Po wdrożeniu pierwszego etapu inwestycji ilość gazu zużywana na pomalowanie  $1 \text{ m}^2$  wyniosła  $0,255 \text{ m}^3$ .

Przedstawione dane wskazują, że zastosowanie systemu odzysku pozwoliło na realne zmniejszenie zużycia gazu o 7% względem zużycia przed zastosowaniem odzysku. Biorąc pod uwagę cenę 1 MWh energii pochodzącej z gazu, która w 2021 roku wyniosła

222 zł, obliczono, że zastosowanie systemu odzysku pozwoliło na oszczędności rzędu 37 000 zł na przestrzeni całego 2021 roku.

Stosując wskazany tok obliczeniowy, można dokonać obliczeń dla drugiego etapu inwestycji, tj. instalacji kompresora GA75 do pracy ciągłej oraz pozostawienie dwóch sprężarek GA37 pracujących naprzemiennie. Podobnie jak w przypadku modułu ER-S2, przy zastosowaniu wymiennika ER-S3 należy zmniejszyć katalogową wielkość możliwej do odzyskania energii. Deklarowana wielkość możliwego odzysku to 56,3 kW (75% tej, zużywanej przez kompresor), przy założeniu parametrów po stronie wtórnej 60/50 °C. Zmiana parametrów na 75/55 °C spowoduje zmniejszenie możliwej do odzyskania energii o 2 kW (informacja od producenta modułu i kompresora), więc realnie możliwe będzie odzyskanie 54,3kW.

Przy równoczesnej pracy kompresora GA75 oraz jednej ze sprężarek GA37 ilość energii możliwej do odzyskania może wynieść 80,1kW. Przy maksymalnym przepływie możliwe więc będzie zmniejszenie ilości zużywanej energii o 27%, natomiast przy przepływie minimalnym zużycie będzie można zmniejszyć o prawie 34%.

## Podsumowanie

Sprężone powietrze to najdroższa forma przekazywania energii wykorzystywana w przemyśle [24]. W obliczu stawianych gospodarce wyzwań związanych z ideą zrównoważonego rozwoju, ESG oraz gospodarki o obiegu zamkniętym [25], kluczowym staje się podjęcie działań, które pozwolą na redukcję strat związanych z wytwarzaniem i przesyłem sprężonego powietrza. Przeprowadzona analiza wykazała, że rozwiązaniem, które przynosi wymierne rezultaty, jest zastosowanie systemu odzysku ciepła z pracujących kompresorów. Instalacja modułów z wymiennikami ciepła (olej/woda) pozwoliła na odzyskanie 7% energii zużywanej w trakcie procesu malowania proszkowego. Dalsza rozbudowa systemu o kolejną sprężarkę z odzyskiem skutkować będzie możliwością odzysku na poziomie 27%. W podmiocie poddanym badaniu odzyskane ciepło zużywane jest do podgrzania wody wykorzystywanej w procesie technologicznym, jednak jest to tylko jedno z możliwych rozwiązań. Przedsiębiorstwa, które w swoich procesach wykorzystują sprężone gazy, mogą podjąć decyzję o instalacji systemu odzysku, a otrzymaną w ten sposób ciepłą wodę spożytkować na cele bytowe pracowników: ogrzewanie w okresie zimowym lub produkcję ciepłej wody użytkowej przez cały rok [26].

Wdrożenie systemu odzysku ciepła wpływa nie tylko na redukcję ponoszonych kosztów i zużywanych zasobów naturalnych, pozwala również na budowę wizerunku przedsiębiorstwa jako podmiotu, dla którego nadrzędnym celem nie jest zysk, ale rozwój z poszanowaniem własnego otoczenia społecznego.

## Literatura

- [1] Bluszcz A. (2017). *European economies in terms of energy dependence*. Quality & Quantity, 51(4), 1531-1548, doi: 10.1007/s11135-016-0350-1.
- [2] *Global primary energy consumption in 2023* (2023). MSCI Sustainability Institute, <https://www.msci-institute.com/chart/global-primary-energy-consumption-generation-in-2023/> [17.12.2024].
- [3] Shedding light on energy in the EU. A guided tour of energy statistics (2019). *Where does our energy come from?*. Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/digpub/energy/2019/index.html> [28.11.2024].
- [4] Zeng Q., Li C., Magazzino C. (2024). *Impact of green energy production for sustainable economic growth and green economic recovery*, Heliyon, 10(17), e36643, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36643.
- [5] Balcerzak P., Mroziński A. (2012). *Analiza efektywności systemu odzysku ciepła ze sprężarek powietrza*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 3, 68-69.
- [6] Ritchie H., Rosado P., Roser M. (2020). *Energy Production and Consumption*, Our World Data, Dostępne na: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> [17.12.2024].
- [7] Li T.-T., Wang K., Sueyoshi T., Wang D.D. (2021). *ESG: Research Progress and Future Prospects*, Sustainability, 13(21), 116663 doi: 10.3390/su132111663.
- [8] *Electricity Information: Overview* (2021). IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption> [23.12.2024].
- [9] Yuan C.Y., Zhang T., Rangarajan A., Dornfeld D., Ziemba B., Whitbeck R. (2006). *A decision-based analysis of compressed air usage patterns in automotive manufacturing*, Journal of Manufacturing Systems, 25(4), 293-300, doi: 10.1016/S0278-6125(06)80241-4.
- [10] Unger M., Radgen P. (2017). *Energy Efficiency in Compressed Air Systems – A review of energy efficiency potentials, technological development, energy policy actions and future importance*, Proceedings of the 10th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 2017), 207-233.
- [11] Nadel S., Wanxing W., Liu P., McKane A. (2001). *The China Motor Systems Energy Conservation Program: A major national Initiative to reduce motor system energy use in China*, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [12] Saidur R., Rahim N.A., Hasanuzzaman M. (2010), *A review on compressed-air energy use and energy savings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(4), 1135-1153, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.013.
- [13] *ENERGY Units Conversion*, <https://www.justintools.com/unit-conversion/energy.php?k1=terawatt-hour&k2=ton-of-coal-equivalent> [17.12.2024].
- [14] Ilko J., Rusko M., Kollar V. (2018). *Measurement of Compressed Air Flow in the Production Technology for the Purpose of Leak detection in the Air Distribution systems using Ultrasonic Flowmeter*, M. Rusko, & J. Müllerová [Eds.], Motivation – Education – Trust – Environment – Safety. Proceedings of the 3rd International Conference METES, Bratislava, 139-142.
- [15] Cabello Eras J.J., Sagastume Gutiérrez A., Sousa Santos V., Cabello Ulloa M.J. (2020). *Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry*, Energy, 213, 118662, <https://doi.org/10.1016/j.energy.118662>.
- [16] Biessikirski A., *Prowadzenie transportu kopaliny w eksploatacji otworowej*, E-bok, <https://zpe.gov.pl/a/sprezarki/DVMT4VABR> [17.12.2024].

- [17] Bill Forsthoffer W.E. (2005). *Compressor types and applications*, Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks, 3, 13-27. doi: 10.1016/B978-185617472-5/50054-X.
- [18] Sarbu I., Sebarchievici C. (2016). *Types of Compressors and Heat Pumps*, Ground-Source Heat Pumps, 47-70. doi: 10.1016/B978-0-12-804220-5.00004-7.
- [19] Woznak D. (2021) *Rodzaje sprężarek – Opisujemy 8 rodzajów kompresorów*, Dostępne na: <https://blog.pneumatig.eu/kompresory/rodzaje-sprezarek/> [17.12.2024].
- [20] *How to choose the right compressor – 7 key factor*, <https://ivysads.com/how-to-choose-the-right-compressor-7-key-factors/> [23.12.2024].
- [21] *Schemat bilansu energetycznego sprężarki*, Dostęp: 23 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.air-compressor-guide.com/optimization>.
- [22] *Atlas Copco GA 37-110 VSD+ oil-injected rotary screw compressors. Instrukcja obsługi*. Dostęp: 23 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: [https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/compressors/ga7-37\\_vsd\\_plus/2935081743\\_L.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/compressors/ga7-37_vsd_plus/2935081743_L.pdf).
- [23] *Odzysk energii - Atlas Copco Polska*. Dostęp: 22 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.atlascopco.com/pl-pl/compressors/odzysk-energii>.
- [24] H. Q. Shanghai, A. McKane, *Improving Energy Efficiency of Compressed Air System Based on System Audit*, Lawrence Berkeley National Laboratory, California Digital Library, 2007.
- [25] C. Franciosi, B. Iung, S. Miranda, S. Riemma, (2018) *Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a Scoping Literature Review*, 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018, t. 51, nr 11, 2018, pp. 903–908, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.459.
- [26] M. Broniszewski, S. Werle, (2018) *The study on the heat recovery from air compressors*, International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, t. 70, 2018, 03001, doi: 10.1051/e3sconf/20187003001.



**Marcin Knapiński**  
**Bartosz Koczurkiewicz**  
**Anna Kawałek**  
**Marcin Kwapisz**  
**Sylwester Sawicki**

## **MODEL NUMERYCZNY PROCESU WYCISKANIA PROFILI MIEDZIANYCH W TECHNOLOGII CONFORM**

### **Wprowadzenie**

Proces ciągłego wytłaczania obrotowego został opracowany przez nieżyjącego już Dereka Greena z Urzędu Energii Atomowej Wielkiej Brytanii w 1971 roku [1]. Zaprojektowane przez niego urządzenia posiadało pojedyncze koło obrotowe z rowkiem na obwodzie. W trakcie procesu materiał jest wciskany do rowka za pomocą rolki dociskowej i transportowany w dół przez tarcie pomiędzy obracającym się kołem a materiałem. Koło jest wyposażone w ruchomą część tzw. but, z występem (obcasem), który zamyka rowek. Wewnątrz buta opór blokuje rowek, wymuszając podawanie materiału do komory wstępnej, stanowiący bufor materiału i przez matrycę nadającą kształt. Ze względu na wysokie ciśnienie ściskające na długości uchwytu urządzenia, pewna część materiału wsadowego jest w sposób ciągły wyciskana jako wypływka do szczeliny między butem a kołem. Ponadto mała warstwa materiału wsadowego nieustannie krąży w procesie jako wyłożenie rowka transportującego. Ciągłe wyciskanie z zastosowaniem koła obrotowego (proces Conform) prętów z metali lekkich jest znanym procesem komercyjnym od lat 70 [1÷3]. Na przełomie wieków proces ten stał się opłacalną metodą wyciskania produktów z miedzi. Ta wszechstronna metoda umożliwiła wytwarzanie długich produktów o różnych przekrojach poprzecznych i praktycznie nieograniczonych długościach, przy stosowaniu jako wsadu prętów okrągłych, umożliwiając jednocześnie zmianę mikrostruktury wyrobów odlewanych lub charakteryzujących się grubym ziarnem w drobnoziarnisty metal ( $10\div 20\ \mu\text{m}$ ) w jednym przejściu. Odształcanie miedzi w takich warunkach, w przeciwieństwie do aluminium, prowadzi do znacznie wyższych nacisków na narzędzia i wyższej temperatury procesu. Proces Conform został

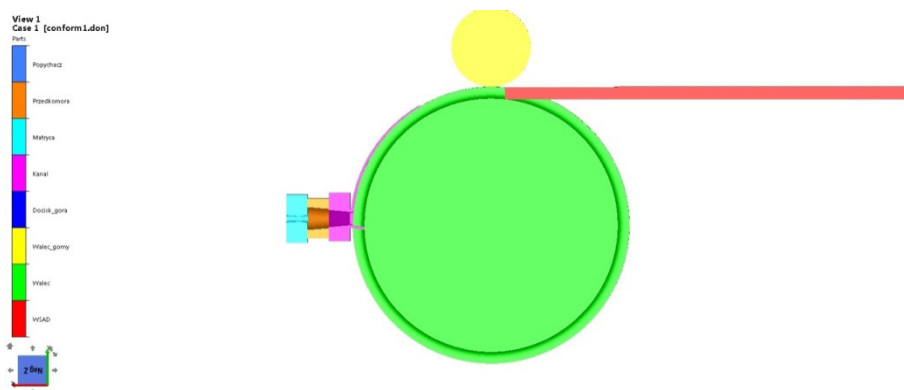
przeanalizowany teoretycznie przez Greena [1] i Etherington [3]. Z kolei Peng [4] przeprowadzili pierwsze badania fizycznego modelowania procesu, analizując sposób płynięcia materiału w procesie, wykorzystując ołów. Model elementów skończonych 2D do wyciskania miedzi metodą Conform został opublikowany w 1993 roku przez Reinikainen i in. [5]. Rozwój technik numerycznych symulacji umożliwił przedstawienie przez Velay [6] i Cho [7] wyników badań w pełni trójwymiarowego modelu elementów skończonych. Na podstawie zaprezentowanych w literaturze [1÷8] wyników badań można stwierdzić, że istotnym czynnikiem wpływającym na możliwość wytwarzania wyrobów płaskich metodą Conform jest temperatura oraz kształt komory pośredniej, która w procesie spełnia rolę buforu materiału niezbędnego do uzyskania równomiernego wypełnienia matrycy kształtującej płaskownik. Zbyt niska temperatura prowadzi do nierównomiernego płynięcia materiału w kierunku poprzecznym w matrycy, a zbyt wysoka powoduje, że materiał jest zbyt plastyczny i obserwowany jest nierównomierny rozkład prędkości płynięcia na wyjściu z matrycy kształtującej. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność kształtu płaskowników wytwarzanych metodą Conform ma kształt komory pośredniej. Nieodpowiednio ukształtowana nie zapewnia spełnienia warunku ciągłości strugi, co prowadzi do niewypełnienia całego przekroju matrycy. Wszystkie te czynniki mają znaczący wpływ na poprawne zaprojektowanie technologii wytwarzania płaskowników z miedzi.

## Model numeryczny procesu

Model geometryczny procesu Conform został zbudowany na podstawie danych pozyskanych od użytkownika urządzenia. W symulacji procesu rzeczywisty układ mechaniczny urządzenia został nieznacznie uproszczony ze względu na złożoność procedur obliczeniowych. Kształty narzędzi zastosowanych w analizie numerycznej przedstawiono na rysunku 1.

Na rysunku tym pokazano rzut obiektów geometrycznych wykorzystanych w symulacjach na płaszczyznę XY. Podstawowymi elementami geometrycznymi wykorzystanymi w symulacjach są:

- wsad – pręt o przekroju kołowym i średnicy 25 mm,
- koło z rowkiem obwodowym,
- walec górny – rolka zaprasowująca pręt wsadowy w obwodowym rowku koła,
- kanał – obiekt odzwierciedlający domykający komorę procesu Conform,
- „but” (element zamykający rowek koła) wraz z dolnym kowadłem nazywanym „obcasem” oraz otworem wyjściowym o przekroju kwadratowym z zaokrąglonymi narożami,



Rys. 1. Kształty narzędzi zastosowanych w symulacjach numerycznych procesu Conform

- przedkomora – narzędzie, wewnątrz którego gromadzi się miedź po opuszczeniu komory koła, a przed wejściem do matrycy kształtującej gotowy wyrób,
- matryca – płyta zamykająca przedkomorę z odpowiednim otworem wyjściowym, przez który wyciskany jest gotowy wyrób.

W symulacjach wprowadzono płaszczyznę symetrii prostopadłą do osi koła, umieszczoną w połowie szerokości rowka obwodowego. Dzięki takiemu zabiegowi zmniejszono o połowę liczbę elementów skończonych niezbędnych do analizy numerycznej procesu, co wpłynęło na skrócenie czasu obliczeń.

Podstawowym uproszczeniem w symulacjach było zastosowanie kształtu U w konstrukcji obwodniowego rowka prowadzącego materiał na kole napędowym. W rzeczywistości kształt tego rowka jest bardziej złożony, jednak po pierwszym obrocie koła z podanym materiałem zostaje częściowo wypełniony miedzią i przybiera zarys zgodny z zastosowanym w analizie numerycznej. W badaniach nie analizowano szczeliny pomiędzy butem, a kołem, przyjmując, że komora powstająca z rowka wypełnionego materiałem odkształcanym oraz zamykającego but posiada tylko otwór wyjściowy o przekroju kwadratowym z niewielkim zaokrągleniem krawędzi. Uproszczenie takie było konieczne z powodu bardzo małej szerokości szczeliny w stosunku do wymiarów wsadu i pozostałych narzędzi. Jej uwzględnienie powodowało konieczność bardzo silnego zgęszczenia siatki elementów skończonych w obszarach szczeliny pomiędzy kołem i butem zamykającym komorę, a tym samym zwielokrotnienie czasu obliczeń, który w przyjętych warunkach symulacji wynosił dla jednego analizowanego przypadku około 100 godzin.

Do analizy wykorzystano przestrzenny ciepło-mechaniczny model odkształcanego ośrodka za pomocą komercyjnego oprogramowania Forge NxT opartego na

metodzie elementów skończonych. W symulacjach wykorzystano siatkę elementów objętościowych w postaci czworościanów, a do numerycznego modelowania trójwymiarowego plastycznego płynięcia metalu podczas symulacji wykorzystywano model matematyczny, w którym stan mechaniczny odkształcanego materiału opisany jest za pomocą prawa Nortona-Hoffa:

$$S_{ij} = 2K(T, \dot{\epsilon}_i, \epsilon_i)(\sqrt{3}\dot{\epsilon}_i)^{m_m-1} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

gdzie:

$S_{ij}$  – dewiator tensora naprężenia,  $\dot{\epsilon}_i$  – intensywność prędkości odkształcenia,  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – tensor prędkości odkształcenia,  $\epsilon_i$  – intensywność odkształcenia,  $T$  – temperatura,  $K$  – opór odkształcenia zależny od naprężenia uplastyczniającego  $\sigma_p$ ,  $m_m$  – współczynnik charakteryzujący odkształcenie metalu na gorąco ( $0 < m_m < 1$ ).

Warunki tarcia panujące na powierzchni styku materiału z narzędziami są opisane za pomocą modeli tarcia Coulomba i Treski, w których przyjmuje się odpowiednie wartości współczynników:

$$\tau_j = \mu \cdot \sigma_n \quad (2) \quad \text{dla} \quad \mu \cdot \sigma_n \leq \frac{\sigma_{p0}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

$$\tau_j = m \frac{\sigma_{p0}}{\sqrt{3}} \quad (4) \quad \text{dla} \quad \mu \cdot \sigma_n > \frac{\sigma_{p0}}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

gdzie:  $\tau_j$  – wektor jednostkowych sił tarcia,  $\sigma_{p0}$  – bazowe naprężenie uplastyczniające,  $\sigma_n$  – naprężenie normalne,  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $m$  – czynnik tarcia.

Zjawiska cieplne w wykorzystanym programie modelowane są, opierając się na przytoczonych dalej zależnościach.

Zmiana temperatury wewnątrz systemu fizycznego jest wynikiem współdziałania zjawisk wewnętrznego przewodzenia ciepła oraz wewnętrznego generowania ciepła, przy ograniczeniach narzuconych przez zdefiniowane warunki brzegowe wymiany ciepła (promieniowanie, przewodzenie i unoszenie) lub przez warunki założonej stałej temperatury.

Taka zmiana temperatury systemu fizycznego może być opisana przez następujące równanie powiązane z szeregiem nałożonych na nie warunków brzegowych:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \dot{W} \quad (6)$$

Zjawiska wydzielania wewnętrznego ciepła występujące w systemie fizycznym są typowo generowane przez odkształcenie plastyczne, które wydziela moc cieplną, którą można opisać dla materiału, używając prawa Nortona-Hoffa w sposób następujący:

$$\dot{W} = \eta K \sqrt{3} \dot{\varepsilon}^{m+1} \quad (7)$$

Czynnik  $\eta$  reprezentuje tutaj zdolność wydzielania ciepła podczas odkształcenia. Na powierzchni brzegowe zostały nałożone następujące warunki brzegowe. Efekt promieniowania powierzchni brzegowej uwzględniono poprzez czynnik strumienia wymiany ciepła  $\Phi_r$ , który opisano w następujący sposób:

$$\Phi_r = k \xi (T^4 - T_o^4) \quad (8)$$

Czynnik  $\xi$  jest emisyjnością materiału w jego określonych warunkach (otoczenie, temperatura itp.),  $k$  jest stałą Boltzmanna. To jest temperaturą zewnętrznego otoczenia, a  $T$  jest temperaturą powierzchni brzegowej ciała. Oba warunki brzegowe: przewodzenia i unoszenia ciepła uwzględnione są przez strumień wymiany  $\Phi_c$ , który opisany jest wzorem:

$$\Phi_c = h(T - T_o) \quad (9)$$

Czynnik  $h$  jest tutaj całkowitym współczynnikiem przewodzenia (przewodności i unoszenia). To jest temperaturą zewnętrznego otoczenia, a  $T$  jest lokalną temperaturą powierzchni brzegowej ciała. Wymiana ciepła na granicy ciała może również pochodzić od procesu wydzielania ciepła na skutek tarcia pomiędzy dwoma współpracującymi powierzchniami  $\Phi_f$ . Wydzielana przez te zjawiska moc cieplna na styku ciał jest wspólna dla obu współpracujących ciał ze strumieniem cieplnym zależnym od ich indywidualnych efuzyjności ( $b_1$  oznacza efuzyjność ciała pierwszego, dla którego stan równowagi cieplnej jest obliczany, a  $b_2$  efuzyjność ciała drugiego – współpracującego).

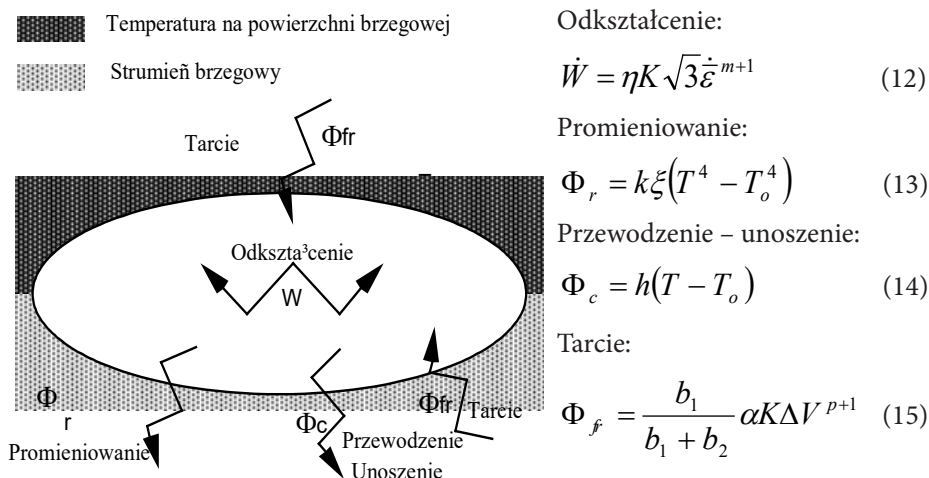
$$\Phi_f = \frac{b_1}{b_1 + b_2} \alpha K \Delta V^{p+1} \quad (10)$$

Wartości efuzyjności ciał obliczane są z następującej zależności:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (11)$$

gdzie:  $\lambda$  oznacza przewodność cieplną materiału,  $\rho$  gęstość materiału, a  $c$  ciepło właściwe.

Rysunek 2 przedstawia zjawiska cieplne zachodzące na powierzchni ciała w części cieplnie ustalonej (z nałożoną temperaturą powierzchni) oraz w części ze strumieniem wymiany ciepła. Ponadto ciało może być odkształcane plastycznie, na skutek czego generowane jest dodatkowe ciepło odkształcenia.



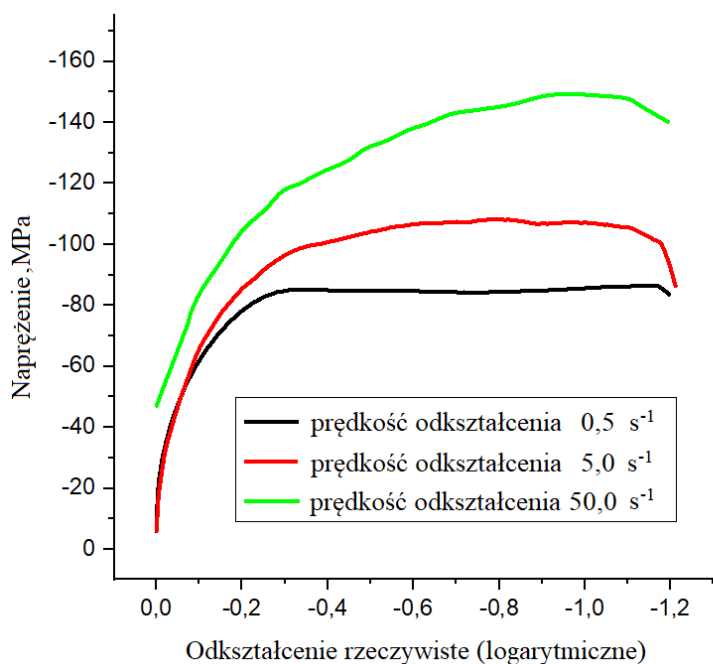
Rys. 2. Schemat wymiany ciepła w modelu zastosowanym w symulacji numerycznej

Model cieplny może współpracować z modelem reologicznym ciała, który wykorzystywany jest do numerycznej analizy odkształceń sprężystych i plastycznych. W takich warunkach, w każdym kroku obliczeniowym wartości oporu plastycznego w modelu reologicznym ciała korygowane są zgodnie z temperaturą ciała uzyskaną z modelu cieplnego.

W ramach pracy przeprowadzono symulacje komputerowe procesu Conform dla miedzi beztlenowej. Jako wsad przyjęto pręty okrągłe o średnicy  $d_o = 25$  mm. Doboru współczynników materiałowych dokonano na podstawie badań plastometrycznych oraz danych literaturowych i doświadczenia członków zespołu badawczego.

Zasadniczym elementem przygotowania danych wejściowych do symulacji procesu przeróbki plastycznej materiału jest poprawne przyjęcie jego reologii, rozumianej jako zależność wartości naprężenia płynięcia odkształcanego materiału od wielkości odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury. W procesie Conform podczas wyciskania materiału przemieszczanego za pomocą koła z obwiedniowym rowkiem przez matrycę kwadratową do komory pośredniej (przedkomory) występuje duża niejednorodność jego temperatury. W stanie ustalonym procesu do rowka koła poprzez współpracującą rolę górną wprasowywany jest pręt o temperaturze otoczenia. Następnie w skutek tarcia oraz ciśnienia występującego w komorze utworzonej przez

rowek oraz współpracujący „but” wraz z kowadłem (obcasem) zamykającym rowek następuje intensywne nagrzewanie materiału, którego temperatura osiąga nawet około 900°C. W takich warunkach konieczne było opisanie reologii odkształcanej miedzi przy użyciu danych tabelarycznych, a nie, jak w innych przypadkach, gdy temperatura zmienia się w znacznie mniejszym zakresie za pomocą równania matematycznego. Wykorzystując dane uzyskane podczas badań plastometrycznych, wyniki wcześniejszych badań autorów opracowania oraz dane literaturowe [9] opracowano skwantyfikowaną tabelę zawierającą wartości naprężenia uplastyczniającego miedzi w zakresie odkształceń rzeczywistych  $0,001 \div 15$ , prędkości odkształceń w zakresie  $0,5 \div 50$  oraz temperatur w zakresie  $20 \div 900^\circ\text{C}$ . Przykładowe wyniki uzyskane z badań plastometrycznych pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Krzywe plastycznego płynięcia miedzi odkształcanej w temperaturze 600°C

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność przeprowadzenia symulacji numerycznych jest prawidłowe zdefiniowanie współczynników tarcia występujących w procesie. Opierając się na danych literaturowych oraz wynikach uzyskiwanych w symulacjach wstępnych, przyjęto następujące współczynniki tarcia pomiędzy odkształcaną miedzią i narzędziami:

koło –  $\mu = 0,6$ ,  $m = 0,9$ ;

„but” wraz z „obcasem” –  $\mu = 0,3$ ,  $m = 0,6$ ;

przedkomora –  $\mu = 0,15$ ,  $m = 0,3$ ;

matryca kształtująca wyrób –  $\mu = 0,15$ ,  $m = 0,3$ .

Wartości takie zastosowano we wszystkich przeprowadzonych symulacjach.

Dla poprawności pracy modułu obliczającego zmiany temperatury odkształcanego materiału konieczne było wprowadzenie wartości parametrów fizycznych miedzi, które pobrano z bazy materiałowej programu Forge i przyjęto: gęstość wynoszącą  $8100 \text{ kg/m}^3$ , ciepło właściwe  $435 \text{ J/(kg K)}$  oraz przewodność cieplną  $385 \text{ W/(m K)}$ . W analizie numerycznej przyjęto we wszystkich przypadkach temperaturę narzędzi wynoszącą  $400^\circ\text{C}$  oraz w większości przypadków współczynnik wnikania ciepła pomiędzy odkształcanym materiałem i narzędziami wynoszący  $10000 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ . Współczynnik ten zmieniano podczas analizy wpływu jego wartości na płynięcie materiału opuszczającego matrycę tylko w przypadku matrycy kształtującej wyrób gotowy. Wartość współczynnika wnikania ciepła do otoczenia przyjęto równą  $10 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ , natomiast podczas symulacji wyciskania różnych wariantów płaskowników za wyjściem z matrycy wprowadzono intensywne chłodzenie materiału, odpowiadające zanurzeniu w cieczy i ustalono współczynnik wnikania ciepła o wartości  $50\,000 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

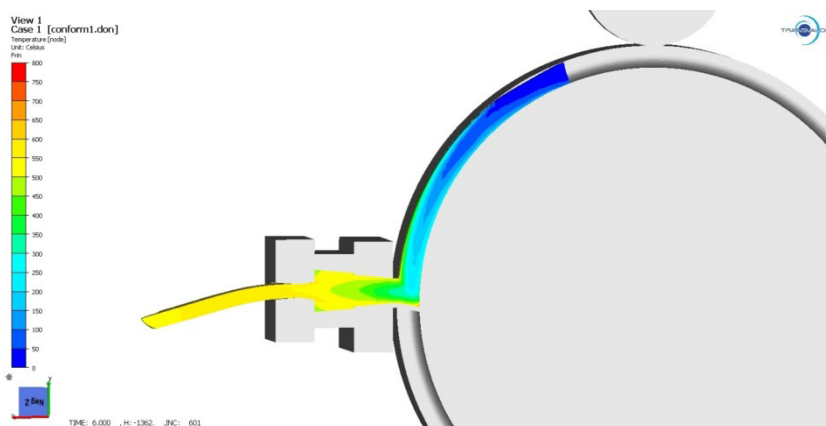
Biorąc pod uwagę fakt, że w warunkach rzeczywistych proces Conform uruchamiany jest poprzez podanie nagrzanego do temperatury  $800^\circ\text{C}$  wsadu, a po uzyskaniu stabilnego wypływu wyciskanej strugi materiału operatorzy podają wsad o temperaturze otoczenia, a ponadto uwzględniając uproszczenia wprowadzone w analizie numerycznej związane z zastosowaniem wstępnie ukształtowanego rowka obwodowego na kole, przyjęto następującą strategię ustalania temperatury materiału wsadowego w symulacjach. Początkowy odcinek pręta wsadowego o długości  $800 \text{ mm}$  podawano do koła w temperaturze  $650^\circ\text{C}$  (większość symulacji), a pozostałą część materiału wsadowego w temperaturze otoczenia. Przyjęcie temperatury  $650^\circ\text{C}$  dla początku wsadu wynikało z faktu, że materiał trafia do wstępnie ukształtowanego już rowka, a początkowa niska temperatura koła powoduje jego intensywne chłodzenie. Ustalenie w taki sposób temperatury wsadu umożliwiło wypełnienie przedkomory miedzią o wyższej temperaturze i jednocześnie analizę zachowania materiału, gdy do komory z koła dopływa wsad o początkowej temperaturze otoczenia.

W symulacjach przyjęto stałą prędkość koła urządzenia wynoszącą i nie analizowano wpływu prędkości koła na schemat płynięcia miedzi. Ponadto szczegółowa analiza wyników symulacji numerycznych oraz analiza procesu Conform umożliwiła wyróżnienie w nim kilku istotnych faz kształtowania materiału. Należą do nich: proces startowy, polegający na kształtowaniu zarysu rowka koła oraz wstępnym wypełnianiu przedkomór miedzią, proces przepychania materiału przez kanał kątowy, który realizowany jest

w komorze utworzonej przez rowek obwodowy koła zamknięty „obcasem” i „butem”, w którym znajduje się otwór wyjściowy o przekroju kwadratowym z zaokrąglonymi narożnikami, proces wypełniania miedzią przedkomór matrycy kształtującej gotowy profil oraz zbliżony do klasycznego, proces wyciskania gotowego wyrobu przez matrycę wyjściową. Poważnym problemem związanym z przeprowadzeniem możliwie realistycznej symulacji procesu Conform jest brak możliwości wprowadzenia czujników pomiarowych, dzięki którym możliwe byłoby zmierzenie temperatur wewnątrz komory matrycy koła oraz przedkomór matrycy kształtującej wyrób gotowy. Ponadto występujące w procesie przepychanie przez kanał kątowy powoduje silne rozdrobnienie struktury odkształcanego materiału, wpływając jednocześnie na jego właściwości mechaniczne, a w szczególności ciągliwość i wartość naprężenia uplastyczniającego. Z tego powodu w analizie wyników symulacji numerycznych procesu skupiono się bardziej na charakterze plastycznego płynięcia miedzi w komorach i matrycy oraz rozkładach temperatury w charakterystycznych punktach procesu niż na występujących w nim parametrach energetyczno-siłowych.

### Przykładowe wyniki symulacji

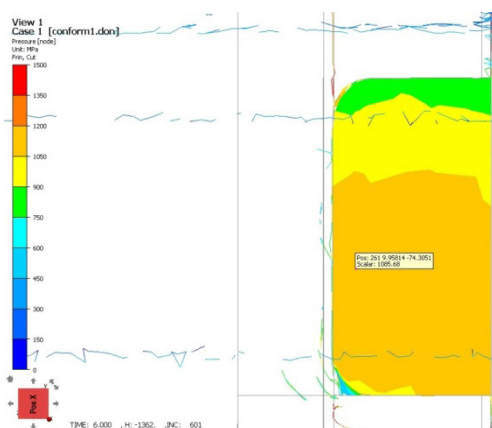
Spośród wielu parametrów materiału odkształcanego w procesie Conform, które można analizować na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych do bardziej szczegółowej analizy wybrano: temperaturę miedzi, prędkości płynięcia miedzi w komorach matrycy oraz naprężenie średnie występujące w matrycy komory Conform. Analizę tych parametrów przeprowadzono w różnych częściach odkształcanego materiału. Rozkłady temperatury analizowano w przekroju przyjętej płaszczyzny symetrii procesu, na powierzchni odkształcanego materiału oraz w przekroju zdefiniowanym przez płaszczyznę prostopadłą do wysokości matrycy wyjściowej i przechodzącą przez środek tej wysokości. Prędkości płynięcia materiału, istotne ze względu na zachowanie ciągłości i kształtu wyciskanego produktu analizowano w przekroju zdefiniowanym przez płaszczyznę prostopadłą do wysokości matrycy wyjściowej i przechodzącą przez środek tej wysokości, przy czym analizowano prędkość w kierunku wyciskania i kierunku szerokości matrycy oraz prędkość płynięcia materiału w kierunku wyciskania wewnątrz wyjścia matrycy Conform (o przekroju kwadratowym) w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wyciskania, umieszczonej w odległości 3,5 mm od wyjścia do przedkomór. W ostatnim opisanym przekroju analizowano również wartość naprężenia średniego występującego w materiale (nazywanego również ciśnieniem hydrostatycznym). Ponadto opisane parametry badano w trzech różnych, charakterystycznych chwilach procesu: gdy początkowa część wstępnie nagrzanego wsadu dotarła do matrycy wyjściowej, gdy nastąpiło wypełnienie przedkomór oraz gdy do komór docierał



Rys. 4. Rozkład temperatury materiału w płaszczyźnie symetrii procesu w stanie cieplnym „ustalonym” w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

wsad o początkowej temperaturze otoczenia (przyjęto to za stan ustalony procesu). Ze względu na fakt, że wyniki przeprowadzonej pracy badawczej, a także szczegółowe parametry wyciskania zastosowane w procesie chronione są tajemnicą przedsiębiorstwa, w opracowaniu nie ujawniono bezwzględnych wielkości wyciskanych płaskowników oraz wymiarów i kształtu komór matrycy. W dalszej części pokazano jedynie przykładowe wyniki uzyskane z przeprowadzonych symulacji wykorzystujących opracowany model procesu dla przypadku wyciskania płaskownika o stosunku szerokości (B) do wysokości (H) wynoszącym około 5,7.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład temperatury w płaszczyźnie symetrii materiału wyciskanego w procesie. Widoczne jest, że dopływający do matrycy kształtującej materiał charakteryzuje się temperaturą około 500°C i jest to temperatura niższa niż początkowa z jaką został podany do procesu. Nastąpiło wyraźne wystudzenie gorącego początku pręta odkształcanego. Jednak można stwierdzić, że po wypełnieniu przedkomory wstępnie nagrzaną miedzią, temperatura materiału trafiającego do matrycy wyjściowej w dalszym ciągu utrzymuje się na poziomie powyżej 500°C, który to stan staje się stabilny, pomimo trafiaania do rowka koła materiału o temperaturze otoczenia. Stwierdzono także, że w początkowym stadium procesu miedź nie wypełnia w całości komory matrycy utworzonej przez rowek i domykający „but”. Stan ten zmienia się podczas wypełniania przedkomory matrycy wyjściowej, gdy wzrasta ciśnienie w matrycy na kole. Tym samym tworzą się warunki sprzyjające nagrzewaniu chłodnego wsadu podawanego do procesu. Pojawia się tarcie pomiędzy zamykającą komorę matrycy „butem” i transportowanym przez rowek materiałem. Wraz ze wzrastającym wewnątrz

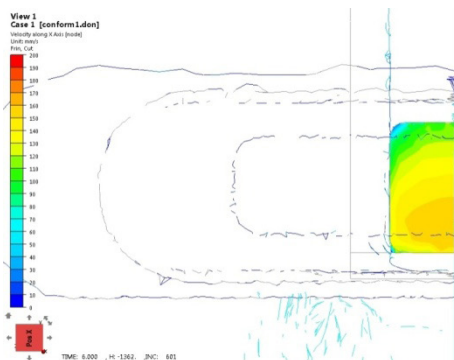


Rys. 5. Rozkład naprężenia średniego (ciśnienia hydrostatycznego) w płaszczyźnie normalnej do kierunku wyciskania w odległości 3,5 mm przed wejściem do komór matrycy w stanie cieplnym „ustalonym” w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

komory ciśnieniem powoduje to intensywny wzrost temperatury materiału i umożliwia ciągle prowadzenie procesu.

Te obserwacje potwierdzają rozkłady naprężenia średniego, których przykład przedstawiono na rysunku 5. W początkowej fazie transportu materiału z matrycy koła do matrycy wyjściowej wartość naprężenia średniego wewnątrz matrycy koła nie przekracza 300 MPa. Natomiast po wypełnieniu przedkomory matrycy wyjściowej osiąga już wartość bliską 1000 MPa, a następnie stabilizuje się na poziomie około 1100 MPa.

Istotnym elementem procesu jest poprawne i pełne wypełnianie matrycy wyjściowej procesu, gwarantujące zachowanie ciągłości wyciskanego płaskownika. Czynniki wpływającymi na właściwe dostarczanie materiału do matrycy wyjściowej są: rozkład temperatury w miedzi w przedkomorze matrycy oraz rozkłady prędkości jej płynięcia. Ze względu na różnice w kształcie materiału dostarczanego do przedkomory, którym jest pręt o przekroju kwadratowym z zaokrąglonymi narożami, tłoczony z matrycy koła oraz produktu wyciskanego, którym jest zazwyczaj płaskownik o znacznie większej szerokości i nieznacznie mniejszej wysokości niż włączany pręt kwadratowy, konieczne jest zapewnienie pełnego wypełnienia miedzią przedkomór matrycy wyjściowej. Proces wypełniania przebiega w sposób następujący: początek materiału ze względu na kształt komory matrycy Conform wypływa z jej otworu wyjściowego niesymetrycznie, ulegając zaginięciu ku górze. Po napotkaniu oporu w postaci płyty matrycy wyjściowej część materiału zostaje wprowadzona do otworu matrycy i dość szybko ochłodzona, zmienia się wówczas sposób płynięcia miedzi, która ze względu na brak ograniczeń ściankami przedkomory zaczyna płynąć w kierunkach prostopadłych do

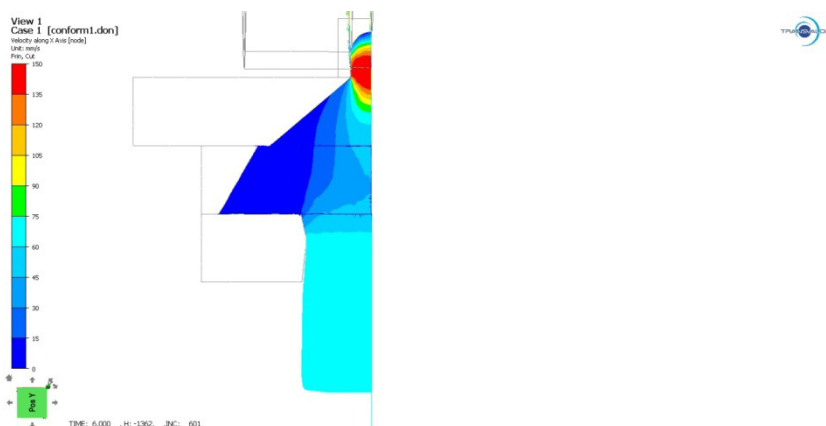


Rys. 6. Rozkład prędkości płynięcia materiału w kierunku wyciskania w płaszczyźnie normalnej do kierunku wyciskania w odległości 3,5 mm przed wejściem do komór matrycy w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

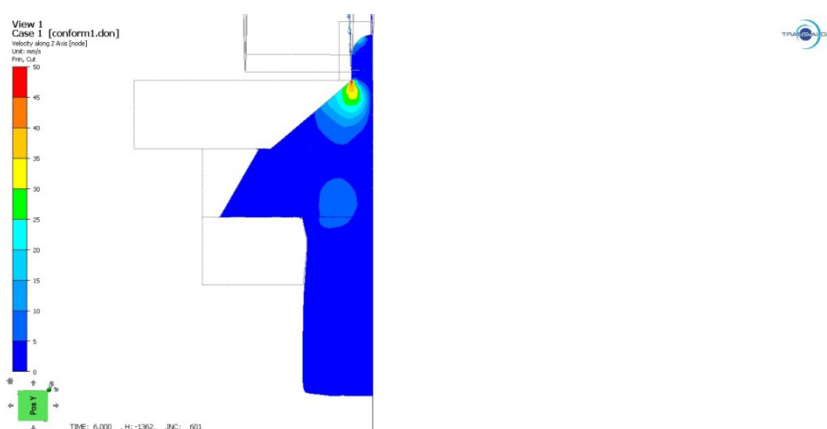
kierunku wyciskania. Stan taki sprzyja wypełnieniu przedkomory matrycy i utrzymuje się do chwili, gdy matryca zostanie wypełniona na tyle, że pojawia się wewnątrz niej ciśnienie wystarczające do rozpoczęcia wyciskania materiału przez otwór wyjściowy. Rozpoczyna się wówczas proces wyciskania wyrobu gotowego. Charakterystyczną cechą tego procesu wyciskania, różniącą go od klasycznych procesów, jest większe pole przekroju wyciskanego wyrobu niż pole przekroju wsadu zasilającego przedkomory matrycy. Oznacza to, że w stanie ustalonym procesu prędkość wypływu wyciskanego, gotowego wyrobu jest mniejsza, niż prędkość podawanego wsadu, proporcjonalnie do ilorazu ich pól przekrojów.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy rozkład prędkości płynięcia miedzi w kierunku wyciskania występujący w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wyciskania w otworze matrycy zasilającej przedkomorę. Widoczne jest wyraźnie zróżnicowanie prędkości wzdłuż wysokości matrycy, spowodowane kształtem komory matrycy koła. W miarę jej wypełniania i w warunkach procesu ustalonego rozkład tej staje się bardziej równomierny (rys. 6), przy czym trzeba zauważyć, że prędkość płynięcia materiału w tych warunkach jest nieznacznie niższa w odniesieniu do startu procesu, gdyż część materiału wsadowego znajdującego się w rowku koła zaczyna wypełniać komorę matrycy koła.

Rysunki 7 i 8 przedstawiają rozkłady prędkości płynięcia materiału wewnątrz przedkomory w warunkach ustalonego procesu. Ich charakter oraz rozkład wartości są zasadniczo taki sam, jak w przypadku stanu w chwili prawie całkowitego wypełnienia przedkomory. Rozkład przedstawiony na rysunku 7 wskazuje, że największe prędkości płynięcia materiału w kierunku wyciskania występują w pobliżu płaszczyzny symetrii



Rys. 7. Rozkład prędkości płynięcia materiału w kierunku wyciskania w płaszczyźnie symetrii części kalibrującej matrycy, normalnej do wysokości płaskownika w stanie cieplnym „ustalonym” w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

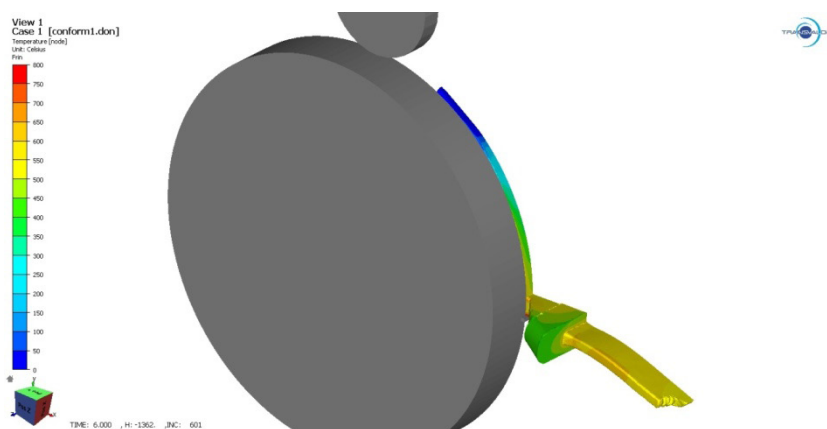


Rys. 8. Rozkład prędkości płynięcia materiału w kierunku szerokości płaskownika w płaszczyźnie symetrii części kalibrującej matrycy, normalnej do wysokości płaskownika w stanie cieplnym „ustalonym” w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

procesu, a prędkość ta maleje w miarę oddalania się od niej w kierunku szerokości matrycy. Taki charakter rozkładu wynika z geometrii i usytuowania kanału zasilającego oraz występowania w przdkomorze strefy „martwej” materiału znajdującej się w obszarze poza otworem wyjściowym matrycy. Natomiast analizując prędkości płynięcia materiału w kierunku szerokości płaskownika (rys. 8), można stwierdzić, że zasadniczym obszarem, w którym następuje przemieszczenie w tym kierunku materiału wpływającego z otworu zasilającego, jest strefa przedkomory o długości około 30 mm

od wyjścia otworu zasilającego. Ponadto równomiernemu wypełnianiu otworu matrycy wyjściowej sprzyja gromadzenie się miedzi powyżej i poniżej otworu wyjściowego w obszarze płaszczyzny symetrii procesu. Stan ten powoduje dodatkowe płynięcie materiału przed wejściem do otworu matrycy w kierunku szerokości płaskownika.

Kolejnym istotnym parametrem procesu wpływającym na poprawność prowadzenia procesu wyciskania jest rozkład temperatury odkształcanego materiału. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury na powierzchni miedzi w stanie „ustalonym” procesu. W startowej fazie procesu gorący początek materiału zaczyna opierać się o płytę matrycy wyjściowej, a temperatura jego powierzchni wynosi około 650°C. Ten materiał nie uległ ochłodzeniu na skutek przepychania przez matrycę koła i nie rozpoczął jeszcze oddawania ciepła do ścianek przedkomory. Natomiast po wypełnieniu przedkomory rozpoczyna się wymiana ciepła pomiędzy jej ściankami i miedzią, skutkiem czego jest obniżenie temperatury na powierzchni materiału do około 550÷600°C. Natomiast w stanie ustalonym procesu widoczne jest wychłodzenie powierzchni materiału, szczególnie w strefie „martwej” do wartości około 400÷450°C (rys. 9). W układzie tym następuje stabilizacja temperatury związana z ustaleniem warunków przepływu ciepła. Materiał docierający do przedkomory znajdujący się w stanie zwiększonego ciśnienia oraz procesy tarcia wewnętrznego powodują generowanie ciepła, które na skutek przewodzenia w miedzi i wymiany z narzędziem odprowadzane jest z odkształcanego materiału. Istotnym jest, aby wewnątrz materiału znajdującego się w przedkomorze utrzymać jednorodną temperaturę, na poziomie umożliwiającym prowadzenie procesu wyciskania.



Rys. 9. Rozkład temperatury na powierzchni materiału w stanie cieplnym „ustalonym” w procesie Conform wyciskania płaskownika o B/H około 5,7 z wsadu nagrzanego do temperatury 650 °C na początkowej długości 800 mm

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu wyciskania w technologii Conform płaskowników o stosunkach B/H około 5,7 stwierdzono, że ograniczenia związane z możliwościami wyciskania płaskowników lub profili o dużych przekrojach związane są głównie z problemami prawidłowego doboru warunków płynięcia miedzi w etapie wypełniania przedkomory matrycy wyjściowej.

## Podsumowanie

W zrealizowanej pracy badawczej opracowano numeryczny model procesu Conform przystosowany do analizy procesów wyciskania pełnych profili miedzianych o różnych polach przekroju. Model opracowano używając komercyjnego oprogramowania do symulacji procesów przeróbki plastycznej Forge NxT, w którym do analizy plastycznego płynięcia ośrodka ciągłego wykorzystywana jest metoda elementów skończonych. Podstawowym problemem podczas opracowywania geometrycznych i ciepłno-mechanicznych warunków symulacji był brak możliwości dokonania pomiarów temperatury materiału transportowanego w urządzeniu od chwili podania do koła z obwodowym rowkiem do chwili wyciśnięcia gotowego wyrobu. Zaznaczyć należy, że w procesie wewnątrz zamkniętych komór matryc następuje wywołane tarciem i odkształceniem plastycznym nagrzewanie materiału od temperatury otoczenia do wartości bliskich 900°C. Jedyną możliwością weryfikacji przyjętych współczynników modelu był pomiar temperatury wyciskanego profilu. Wstępna część badań, których wyników nie zamieszczono w niniejszym opracowaniu służyła do ustalenia warunków procesu, doboru wartości współczynników tarcia występujących w różnych etapach kształtowania produktu, jak również współczynników wymiany ciepła pomiędzy materiałem, a narzędziami oraz temperatur poszczególnych narzędzi wykorzystywanych w maszynie do kształtowania gotowego wyrobu. Wartości tych współczynników ustalono na podstawie analizy wyciskania okrągłego pręta o średnicy 20 mm, dla którego dokonano pomiarów temperatury w fazie uruchamiania procesu, w najmniejszej możliwej do uzyskania odległości wynoszącej około 300 mm od wyjścia z otworu matrycy kształtującej. Pomiar ten był zasadniczo jedynym elementem umożliwiającym weryfikację przyjętych założeń.

Uzyskane wyniki symulacji umożliwiły zobrazowanie stanu materiału znajdującego się w zamkniętym urządzeniu, w którym występuje kilka możliwych do wyodrębnienia etapów kształtowania produktu gotowego. Wsad podawany jest do rowka koła Conform i zaprasowywany w nim za pomocą górnej rolki dociskowej. Zaprasowany w rowku wsad transportowany jest do obszaru komory matrycy Conform, przy czym w początkowym etapie nie występuje tarcie pomiędzy butem domykającym matrycę, a miedzią, gdyż jest ona wprasowana w rowek koła. Znajdujący się przy otworze

wyjściowym matrycy „obcas”, zamykający rowek koła, powoduje zbieranie z niego materiału i przemieszczanie go do otworu matrycy o przekroju kwadratowym. W tych warunkach dostarczany przez koło materiał zaczyna wypełniać utworzoną przez rowek i „but” matrycę, powodując jednocześnie powstawanie sił tarcia pomiędzy „butem” i przemieszczaną miedzią. Wzrost ciśnienia w powstałej komorze powoduje, że materiał transportowany jest przez otwór matrycy do przedkomory matrycy wyjściowej. W początkowej fazie wypełniania przedkomory następuje swobodny wypływ miedzi z matrycy koła, aż do chwili zetknięcia się początku wypraski z płytą matrycy wyjściowej. W tych warunkach zostaje zablokowany swobodny wypływ z matrycy koła (kanału zasilającego przedkomorę) i zaczyna w niej wzrastać ciśnienie. Jednocześnie pojawiają się dwa zjawiska, przedkomora matrycy zaczyna być wypełniana gorącą miedzią, a na skutek wzrostu ciśnienia w kanale zasilającym zwiększeniu ulega również wypełnienie miedzią komory matrycy koła (tworzonej przez rowek koła i domykający „but”). Pojawienie się większej ilości materiału w tej komorze skutkuje zwiększeniem powierzchni tarcia pomiędzy transportowanym przez koło materiałem i wewnętrzną powierzchnią domykającego buta. Skutkiem tego zjawiska jest generowanie ciepła i wzrost temperatury miedzi znajdującej się w komorze koła. W wypełnianej materiałem przedkomorze matrycy wyjściowej stopniowo wzrasta ciśnienie, a gdy osiągnie poziom wystarczający do wyciskania miedzi przez otwór matrycy wyjściowej, rozpoczyna się proces wyciskania płaskownika. W początkowej fazie wyciskania płaskownika następuje całkowite wypełnienie przedkomory matrycy wyjściowej miedzią. Należy zwrócić również uwagę, na fakt, że w przedkomorze na skutek tarcia wewnętrznego w miedzi przepychanej z kanału zasilającego do otworu matrycy wyjściowej następuje wzrost temperatury, większy niż w komorze koła Conform. Generowanie ciepła na skutek pracy odkształcenia i tarcia w komorze koła oraz jego odprowadzanie do narzędzi, a następnie do otoczenia powodują wystąpienie stanu ustalonego, w którym stabilizuje się rozkład temperatury wewnątrz objętości materiału, znajdującego się w danej chwili czasowej wewnątrz komór matryc. niestety ze względu na brak zainstalowanych w urządzeniu czujników temperatury materiał nie można zweryfikować wyznaczonego numerycznie rozkładu temperatury w komorach. Jednak biorąc pod uwagę temperaturę materiału opuszczającego matrycę wyjściową, przyjęte założenia są poprawne.

Wewnątrz przedkomory matrycy wyjściowej występuje ciągły przepływ strugi miedzi, która, aby zapewnić wypełnienie otworu matrycy wyjściowej musi zostać rozproszona ze stosunkowo wąskiego kanału wejściowego do otworu wyjściowego o szerokości zależnej od wymiarów produkowanego płaskownika (znacznie większej od szerokości kanału zasilającego). Dlatego istotnym jest ustalony w objętości przedkomory rozkład prędkości płynięcia materiału, który analizowany był w opisie wyników symulacji numerycznych. Rozkład ten zależy od geometrii komory oraz rozkładu

temperatury miedzi. W przypadku stosunkowo wąskich płaskowników wyciskanych w procesie stosowane długości przedkomór i ich kształty są wystarczające do tego, aby płynięcie materiału w kierunku szerokości płaskownika zakończyło się przed jego wejściem do otworu matrycy wyjściowej. W takich warunkach w matrycy wyjściowej materiał płynie tylko w kierunku wyciskania, zapewniając utrzymanie wymiarów płaskownika i jego ciągliwość. Natomiast w przypadku płaskowników o większych szerokościach, przy podobnej wysokości płaskownika, przyjęty kształt i długość przedkomory wydają się niewystarczające do ustabilizowania prędkości płynięcia materiału w kierunku wyciskania. Wyniki symulacji pokazały, że w takich warunkach w części kalibrującej matrycy pojawiają się zróżnicowane prędkości wypływu materiału, większe w środku jej szerokości, a zmniejszające się w kierunku boków płaskownika. Stan taki powoduje niejednorodne wyciskanie produktu i prowadzi do utraty stabilności procesu. Płaskownik nie będzie zachowywał żądanych wymiarów lub pojawią się nieciągliwości na jego bocznych powierzchniach. Dalsze prace powinny kierować się na badania wpływu kształtu przedkomory matrycy wyciskającej produkt, który zapewni właściwy rozplływ miedzi wzdłuż jej szerokości i tym samym stabilny równomierny wypływ materiału z otworu matrycy na całej jego szerokości.

*Praca wykonana we współpracy Politechniki Częstochowskiej z przedsiębiorstwem Metall-Express sp. z o.o. (Zakład produkcyjny w Zaczerniu) w ramach realizacji projektu: „Szybka Szcieżka” POIR 01.01.01-00-0612/18 pt.: „Technologia topienia, odtleniania i odlewania ciągłego odpadów i złomów miedzi”.*

## Literatura

- Green D. (1972). *Continuous extrusion of wire sections*, Journal of the Institute of Metals, 100, 296-300.
- Maddock B. (1986). *Direct conversion from molten aluminum to extruded profile by conform*, Aluminum Technology '86, 794-801.
- Etherington C. (1977). *The UKEA conform method of continuous extrusion forming*, Wire Industry, 44, 2, 85-89, 3, 161-169.
- Peng D.S., Yao B.Q., Zuo T.Y. (1992). *The experimental simulation of deformation behavior of metals in the CONFORM process*, Journal of Materials Processing Technology, 31(1-2), 85-92.
- Reinikainen T., Korhonen A.S., Andersson K., Kivivuori S. (1993). *Computer-aided modelling of a new copper extrusion process*, CRIP Annals, 42(1), 265-268. [https://doi.org/10.1016//80007-8506\(07\)62440-8](https://doi.org/10.1016//80007-8506(07)62440-8).
- Velay X., Sheppard T. (2000). *Plane strain and three-dimensional coupled thermomechanical simulation of the conform process*, et 2000 proceedings, 1, 505-517.
- Cho J.R., Jeong H.S. (2001). *Parametric investigation on the curling phenomenon in CONFORM process by 3D finite element analysis*, Journal of Materials Processing Technology, 110(1), 53-60.

- Manninen T., Ramsay P., Korhonen A.S. (2002). *Three-dimensional numerical modeling of continuous extrusion*, Proceedings of the seventh ICTP, Yokohama, 439-444.
- Dyja H., Gałkin A., Knapiński M. (2010). *Reologia metali odkształcanych plastycznie*, Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.

**Maria Agnieszka Paszkowicz**

# **BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY W RAPORTACH CSR POLSKICH PRZEDSIĘBIORSTW**

## **Wstęp**

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele definicji społecznej odpowiedzialności biznesu (Corporate Social Responsibility, CSR). Za zespołem Maona można przyjąć, że jest to „koncepcja zorientowana na interesariuszy, która wykracza poza granice organizacji, wynikająca z etycznego zrozumienia odpowiedzialności organizacji za wpływ jej działalności biznesowej, poszukująca gotowość społeczeństwa do zaakceptowania legalności biznesu” [5, s. 6-7].

W odniesieniu do bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) specyficznym rodzajem korzyści z wdrażania CSR jest wyeliminowanie lub ograniczenie liczby i ciężkości wypadków przy pracy i chorób zawodowych. Według E. Tytyka [7, s. 42] koszty te można podzielić na: straty ekonomiczne, których wielkość jest możliwa do oszacowania (np. skutki wypadków przy pracy, choroby zawodowe, zwolnienia lekarskie); straty ekonomiczne, których wielkości nie można bezpośrednio oszacować (w tym utrata zdrowia, duża fluktuacja pracowników), straty moralne, niepoddające się ekonomicznej wycenie (przykładowo cierpienie, złe samopoczucie spowodowane przemęczeniem, zanik podmiotowości).

## **Metodyka badań i charakterystyka przedsiębiorstw**

Celem niniejszego opracowania jest zaprezentowanie działań podejmowanych przez przedstawicieli biznesu w zakresie BHP. Materiał do analiz pochodził z biblioteki raportów publikowanych na stronie internetowej <https://raportyzt.pl/biblioteka-raportow/>.

Zakres czasowy obejmował okres lat 2021-2023, przy czym dokumenty zostały pobrane w lutym 2024 r. Łącznie przeanalizowano 95 raportów. Podmioty reprezentowały różne branże; przeważały przedsiębiorstwa prowadzące działalność w sferze finansów oraz budownictwa i nieruchomości (tab. 1).

Tab. 1. Ogólna charakterystyka przedsiębiorstw (oprac. własne)

Branża	N	Branża	N
Finanse	14	Przemysł ciężki	4
Budownictwo i nieruchomości	13	Telekomunikacja	4
Transport i logistyka	8	Nowe technologie i IT	3
Usługi	8	Przemysł drzewny, papierniczy i meblowy	3
Energetyka	7	Przemysł chemiczny	2
Handel	7	Przemysł elektromaszynowy	2
FMCG	6	Przemysł spożywczy	2
Inne	5	Motoryzacja	1
Surowce i paliwa	5	Przemysł odzieżowy	1

Legenda: FMCG – dobra szybko zbywalne (ang. *Fast Moving Consumer Goods*); branża zaopatrująca sklepy w produkty spożywcze (takie jak pakowana żywność, napoje) oraz m.in. środki czystości i kosmetyki.

## Podejście przedsiębiorstw do BHP

Na początek przeanalizowano stosunek badanych przedsiębiorstw do BHP. W raportach wielu podmiotów deklarowano, iż BHP jest dla nich istotne. Można w nich przeczytać, że BHP jest: priorytetem: Aparator (2022), Bogdanka (2021), Cemex (2021), Gaz-System (2021), PKP Energetyka (2021); czymś najważniejszym: ArcelorMittal Poland (2021), Carlsberg (2021), Gdańsk Transport Company (2022), Żywiec (2022); wartością: Amica (2021), Budimex (2021), Columbus (2021), Truvant Europe (2022); prawem pracownika: Fakro (2022); podstawą funkcjonowania przedsiębiorstwa: Wedel (2022) bądź elementem systemu zarządzania lub strategii biznesowej: Amica (2021), Archicom (2022), Budimex (2021).

Przedsiębiorstwa akcentują przestrzeganie przepisów prawa: ArcelorMittal Poland (2021), Coca-Cola (2021), Columbus (2021), PKP Energetyka (2021) oraz bezpieczny powrót pracowników do domu (całych i zdrowych): BOŚ (2021), Cemex (2021), Żywiec (2022).

Zagadnienia zapewnienia właściwych warunków pracy można znaleźć w różnych dokumentach o różnej sile oddziaływania. Są to przede wszystkim strategie, np. CSR/ESG (Budimex (2021), Ciech (2022), Dom Development (2022), Unimot, (2022));

bezpieczeństwa (Columbus (2021); BHP: Energa (2021), Leroy Merlin (2021)); Nowa Strategia Zdrowia: Cemex (2021). Funkcjonują też różne polityki, w tym: praw człowieka: Żywiec (2021); bezpieczeństwa: Columbus (2021), Kom-Eko (2021), Provident Polska (2021); BHP (często w połączeniu z przeciwpożarową): Allegro (2022), Arctic Paper (2021), Budimex (2021), CCC (2021), Ciech (2022), Coca-Cola (2021), Energa (2021), Kęty (2021), Kompania Piwowarska (2021), mBank (2021), PZU (2022), Rohlig Suus Logistics (2022), T-Mobile (2021), Unimot (2022), Schumacher Packaging Wrocław (2021); zapobiegania wypadkom przy pracy: TIM (2021); Polityka Zintegrowanego Systemu Zarządzania Jakością, Środowiskiem, Bezpieczeństwem i Higieną Pracy oraz Bezpieczeństwem Produktu: Velvet Care (2022); zrównoważonego rozwoju operacyjnego: Coca-Cola (2021); Bezpiecznego Zarządzania Flotą Samochodową: Coca-Cola (2021).

W praktyce zarządzania przedsiębiorstwem pracodawcy wykorzystują różne narzędzia CSR, dopasowując je do własnej specyfiki, tradycji, kultury regionu czy interesariuszy. Wśród nich znajdują się m.in.: programy dla pracowników, kampanie społeczne, wolontariat pracowniczy, znakowanie, raporty społeczne i inicjatywy na rzecz lokalnej społeczności.

Do przedstawienia działań w zakresie BHP wykorzystano katalog opracowany przez Skorka [7], obejmujący 10 postulatów w tym zakresie. Znajdują się tam następujące wskazania:

- 1) wdróż system zarządzania BHP według ISO 45001:2018,
- 2) wdróż strategię „zero wypadków”,
- 3) zastosuj tablicę bezpieczeństwa (Safety Board),
- 4) opracuj filary bezpieczeństwa (Safety Pillars),
- 5) opracuj OPL (One Point Lesson) związane z BHP,
- 6) zastosuj naukowe metody analizy wypadków,
- 7) przeprowadź analizę ryzyka inwestycji,
- 8) zastosuj metody behawioralne (Behaviour-Based Safety),
- 9) opracuj złote zasady (Golden Rules),
- 10) wdróż HSEQ (Health, Safety, Environment, Quality).

Do opisu działań przedstawionych w raportach wybrano wskazania: 2, 4, 8 i 9.

### Strategia „zero wypadków”

Niektóre przedsiębiorstwa stawiają sobie ambitny plan „zero wypadków w pracy”. Według Komisji Europejskiej ([3], s. 10)

[...] koncepcja „zero wypadków” opiera się na założeniu, że wszystkich wypadków można uniknąć. Koncepcja „zero” to raczej filozofia niż cel, który można wyrazić w liczbach: w myśl tego

założenia żadna osoba nie powinna uciepnieć ani zginąć w wypadku. Ludzie popełniają błędy, ale w takich sytuacjach nie powinno dochodzić do urazów. To jeden z powodów, dla których nacisk na bezpieczeństwo należy kłaść podczas planowania każdego otoczenia, w którym przebywają ludzie – czy to środowiska pracy, czy też przestrzeni życiowej.

Strategia bezwypadkowości występuje w raportach 12 przedsiębiorstw: Aparator (2022), ArcelorMittal Poland (2021), Carlsberg (2021), CCC (2021), Cemex (2021), Coca-Cola (2021), Erbud (2022), Gdańsk Transport Company (2022), Global Cosmed (2022), KGHM Polska Miedź (2022), PKP Energetyka (2021) i Robyg (2021). Różna jest szczegółowość tych zapisów.

Aparator jest jednym z przedsiębiorstw, które szeroko opisywały swoje działania. Zadeklarowało ono „zero tolerancji dla zachowań potencjalnie wypadkowych (*near miss*)”. W ramach tego w podmiocie przeprowadzany jest przegląd i zaktualizowanie zasad zapoznawania pracowników z dokumentami bezpiecznej pracy i kartami charakterystyk materiałów niebezpiecznych. W minionym okresie zaktualizowano dokumentację systemową (w tym rejestr wymagań prawnych). Przeprowadzono szkolenia z pierwszej pomocy przedmedycznej dla 89 osób oraz podjęto kroki prowadzące do utworzenia Grupy Szybkiego Reagowania. Przeprowadzono spotkania uświadamiające problematykę BHP dla zróżnicowanych grup pracowniczych: stanowisk robotniczych, administracyjno-biurowych, kierowniczych, inżynieryjno-technicznych. W ramach projektu „Podniesienie bezpieczeństwa pracowników”, mającego na celu zwiększenie świadomości zatrudnionych na temat BHP i pierwszej pomocy oraz ochrony przeciwpożarowej przeprowadzono pogawędkę na wydziałach produkcyjnych, audycje tematyczne, plansze, audycje lub animacje w telewizji, a także przeszkolono pracowników na stanowiskach kierowniczych w formie zdalnej. Przeprowadzono centralizację procedur, instrukcji oraz wytycznych BHP, w tym przygotowano dokumenty wzorcowe.

Z kolei przedsiębiorstwo budowlane Robyg w 2021 roku zrealizowało cel strategiczny, to jest „0 wypadków w miejscu pracy”. Przedsiębiorstwo stara się zapewnić bezpieczne i komfortowe warunki pracy wszystkim pracownikom i współpracownikom ROBYG; dotyczy to przede wszystkim osób pracujących na budowach – także u podwykonawców. Robyg na bieżąco monitoruje przepisy i wytyczne związane z BHP oraz rozwija działania zapobiegające wypadkom przy pracy. Należą do nich m.in.: zapewnienie dostatecznej wiedzy w zakresie bezpieczeństwa poprzez szkolenia; ograniczenie ryzyka zdarzeń wypadkowych; wprowadzenie odpowiednich procedur i ich monitorowanie; zarządzanie wiedzą i wyciąganie wniosków. Organizowane są również cyklicznie szkolenia dla osób zajmujących się realizacją budowy (częściej niż wymaga tego prawo).

## Opracowanie filarów bezpieczeństwa

Filary bezpieczeństwa obejmują [1]:

- działania o charakterze technicznym: niezawodność instalacji, zapewnienie redundancji, czujniki nieprawidłowości, automatyka bezpieczeństwa,
- rozwój systemów zarządzania bezpieczeństwem: formalizacja całości procesów, procedur i zasad wprowadzonych w dziedzinie zapewnienia bezpieczeństwa,
- uwzględnienie czynników ludzkich i organizacyjnych, obejmujące identyfikację i włączenie do procesu czynników, od których uzależnione jest zapewnienie wydajnej i bezpiecznej działalności ludzkiej.

O filarach bezpieczeństwa można przeczytać jedynie w raporcie PKP Energetyka (2021). Przedsiębiorstwo przyjęło 5 filarów: Przywództwo, Zarządzanie ryzykiem, Systemy, Bezpieczne maszyny oraz Ludzie. W ramach filaru I zrealizowano projekt identyfikacji prekursorów wypadkowych (przyczyn źródłowych wypadków przy pracy) za pomocą metody RCA (Root Cause Analysis). Powołano zespoły analizujące sytuacje, w których błąd lub odchylenie rozpoczyna łańcuch zdarzeń prowadzących do wypadku. Ma to pomóc ustalić, co można zrobić w celu wyeliminowania podobnych zdarzeń w przyszłości. Filar II obejmuje opracowanie: narzędzi do monitorowania stanu BHP z wykorzystaniem tzw. hurtowni danych; aplikacji do zarządzania informacjami płynącymi z kontroli warunków bezpieczeństwa pracy oraz ochrony przeciwpożarowej. Wdrożono realizację analiz RCA dla obszarów bezpieczeństwa pracy oraz bezpieczeństwa ruchu kolejowego. W ramach filaru III opracowano standardy i instrukcje bezpiecznej pracy, w tym szczegółowe wymagania dla „Planu Bezpieczeństwa i Ochrony Zdrowia” oraz „Instrukcji Bezpiecznego Wykonania Robót”. Filar IV obejmował trzy projekty. W projekcie „Bezpieczne obiekty i teren Zakładu” przygotowano minimalne wymagania dotyczące zagospodarowania terenu (m.in. składowania materiałów i odpadów, magazynowania i przechowywania gazów technicznych, magazynowania mieszanin i substancji niebezpiecznych) oraz określono, jakie działania są konieczne, by w każdej lokalizacji osiągnąć stan zgodny z wymaganiami. W projekcie „Opracowanie Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem Pożarowym” wypracowano jednorodny standard wymagań w zakresie wyposażenia w sprzęt i środki gaśnicze oraz zawartość instrukcji bezpieczeństwa pożarowego. Z kolei projekt „Mobilne stanowiska pracy” dotyczył rozwiązywania problemów związanych z użytkowaniem i transportem drabin, zabudową samochodów technicznych i usytuowaniem w pociągach defibrylatorów i materiałów do pierwszej pomocy. W ostatnim projekcie pod nazwą „System Pierwszej Pomocy” zakupiono sprzęt do udzielania pomocy osobom w stanie zagrożenia życia; przeprowadzono szkolenia z podstawowych czynności ratunkowych oraz opracowano matrycę kompetencji i szkoleń.

## Zastosowanie metod behawioralnych

Metoda behawioralna (Behaviour-Based Safety, BBS) zakłada, że bezpieczeństwo w miejscu pracy opiera się na połączeniu trzech mierzalnych czynników: pracownika, otoczenia i zachowania pracownika. Nawiązuje ona do warunkowania instrumentalnego Skinnera [6]. Model ten jest również nazywany modelem ABC – od pierwszych liter angielskich słów bodziec – zachowanie – wzmocnienie (*antecedent – behaviour – consequence* = ABC). Według M. Warchała, BBS

[...] jest metodą polegającą na obserwacji pracowników i pozytywnym wzmocnieniu, która ma doprowadzić do zmiany indywidualnych zachowań ryzykownych w miejscu pracy i zmotywować do przejawiania zachowań i postaw bezpiecznych. Aby tak się stało, bezpieczeństwo w pracy należy rozumieć jako wypadkową tzw. triady bezpieczeństwa, czyli trzech mierzalnych i możliwych do sparametryzowania czynników:

- 1) pracownika,
- 2) otoczenia (środowiska pracy),
- 3) zachowania pracownika.

Wyodrębnienie wskazanych kryteriów i ich szczegółowy opis stanowią podstawę do wdrożenia audytu behawioralnego, który obejmuje całokształt kroków niezbędnych do poprawy bezpieczeństwa pracy [9].

W grupie badanych przedsiębiorstw tylko 10 podmiotów wykorzystywało BBS podejście behawioralne. Były to: Carlsberg (2022), Budimex (2021), Wedel (2021), Echo Investment (2021), Fiberhost (2021), Velux (2020-2021), Ciech (2022), Grenevia (2022), Velvet Care (2022) oraz Truvant Europe (2022).

Przykładowo w Fiberhost stosowane są *Safety Walks* (spacery bezpieczeństwa). Są one formą „zarządzania przez przechadzanie się”. Zgodnie z *Encyklopedią Zarządzania* [10],

[...] zarządzanie przez spacerowanie (*management by walking around*) [...] jest bardzo popularną formą komunikacji organizacyjnej i grupowej. Idea polega na tym, iż menadżer utrzymuje kontakt z tym co dzieje się w jego firmie poprzez „spacerowanie po niej” i spontaniczne rozmowy z napotkanymi osobami (pracownikami, dostawcami, klientami i innymi w jakiś sposób związanymi z firmą). Podejście to pozwala menadżerowi lepiej „poczuć” kierowaną przez niego firmę gdyż umożliwia uzyskanie informacji z pierwszej ręki i wyczucie nastrojów ludzi. Integracja kierownictwa z pracownikami pomaga także osiągnąć w firmie świadomość zespołową. Podejście to stanowi także doskonałe uzupełnienie do suchych danych i raportów, które często oderwane są od rzeczywistości i sprawiają, że menadżer w oparciu o nie podejmuje błędne decyzje.

W czasie spacerów wyznaczone osoby przechodzą przez wszystkie działy, aby monitorować poziom bezpieczeństwa na stanowiskach. Każde z przejść kończyło się krótką ankietą, która była omawiana na cotygodniowych spotkaniach podsumowujących. Ponadto podczas audytów kontrolowana jest jakość i wskaźniki z obszaru BHP w budowanych sieciach światłowodowych, w salonach sprzedaży, podczas wykonywania

zadań terenowych, w siedzibie przedsiębiorstwa. Audyty kończą się listą rekomendacji do wdrożenia.

Z kolei w Carlsberg (2022) przyjęto, że do całkowitego wyeliminowania wypadków przy pracy potrzebna jest codzienna czujność i zaangażowanie wszystkich pracowników oraz tworzenie odpowiednich wzorców postępowania. Pracownicy zachęceni są do prowadzenia obserwacji zachowań oraz aspektów technicznych i innych okoliczności mogących w pewnych warunkach doprowadzić do urazu czy choroby. Od 2021 roku za pośrednictwem specjalnej aplikacji zarówno pracownicy, jak i podwykonawcy mogą zgłaszać obserwacje behawioralne i techniczne oraz sytuacje potencjalnie wypadkowe. W kolejnym roku została ona uzupełniona m.in. o zapewnianie osobie zgłaszającej informacji zwrotnej o działaniach podjętych w reakcji na jej obserwację.

### Opracowanie złotych zasad (*Golden Rules*)

Aby ułatwić pracownikom zapamiętywanie treści dotyczących bezpiecznej i higienicznej pracy, w kilku przedsiębiorstwach opracowano krótsze lub dłuższe katalogi pożądanych zachowań. Złote zasady znajdują się w raportach takich przedsiębiorstw, jak: PKP Energetyka (2021), Ciech (2022), Cemex (2021) oraz Carlsberg (2022).

W PKP Energetyka (2021) opracowano zasady bezpieczeństwa oraz zasady ratujące życie. W ramach zasad bezpieczeństwa wyszczególniono:

- 1) dbamy o bezpieczeństwo swoje i innych. Identyfikujemy zagrożenia i przeciwdziałamy im,
- 2) aktywnie proponujemy rozwiązania mające na celu poprawę bezpieczeństwa,
- 3) nie tolerujemy przypadków nieprzestrzegania zasad bezpieczeństwa,
- 4) gdy widzimy sytuację, która zagraża bezpieczeństwu, przerywamy swoją pracę i reagujemy,
- 5) nie powtarzamy błędów – wyciągamy z nich wnioski,  
Natomiast „12 Zasad Ratujących Życie” obejmują następujący katalog:
  - 1) nigdy nie pracuję po spożyciu alkoholu lub środków odurzających,
  - 2) w sytuacji zagrożenia zdrowia lub życia nie podejmuję pracy i zatrzymuję innych,
  - 3) używam tylko sprawnych narzędzi zgodnie z ich przeznaczeniem,
  - 4) dbam o to, by zawsze być widocznym,
  - 5) nie chodzę na skróty, zawsze przestrzegam zasad i procedur,
  - 6) mam ograniczone zaufanie, zawsze sprawdzam, czy: wyłączono, odłączono, nie ma napięcia, uziemiono/uszyniono,
  - 7) zatrzymuję pociąg przed sygnałem „stój” oraz wtedy, gdy nie jestem pewien sygnału,
  - 8) nie wchodzę w strefę pracy maszyn ruchu i strefę transportu ładunków,
  - 9) dbam o sprawność sprzętu i środków ochrony indywidualnej oraz ich stosowanie,

- 10) zawsze stosuję środki ochrony indywidualnej przy pracy na wysokości,
- 11) przestrzegam zakazu palenia i używania otwartego ognia,
- 12) zachowuję bezpieczeństwo na drodze: zapinam pasy, ograniczam prędkość, jestem skoncentrowany.

W Ciechu (2022) obowiązuje „10 Zasad Bezpiecznej Pracy”:

- 1) dbamy o porządek w miejscu pracy,
- 2) poruszamy się wyznaczonymi ciągami komunikacyjnymi. Poruszając się po schodach, trzymamy się poręczy,
- 3) przestrzegam przepisów ruchu drogowego,
- 4) stosuję osłony i urządzenia zabezpieczające oraz nie prowadzę samowolnych napraw,
- 5) używam wyłącznie sprawnych technicznie narzędzi i urządzeń, tylko zgodnie z posiadanymi kwalifikacjami,
- 6) przestrzegam reguł bezpiecznego transportu ręcznego,
- 7) stosuję sprzęt zabezpieczający i środki ochrony indywidualnej adekwatnie do występujących zagrożeń,
- 8) przestrzegam zakazu palenia papierosów, spożywania alkoholu i środków odurzających,
- 9) zachowuję wszelkie zasady bezpieczeństwa przy pracy z substancjami niebezpiecznymi,
- 10) do pracy przychodzę w dobrym zdrowiu i humorze!

Z kolei Cemex (2021) posiada „Take 5, czyli 5 kroków do bezpieczeństwa”. System ten umożliwia identyfikację zagrożeń i oceny ryzyka i jest stosowany przed przystąpieniem do niestandardowych prac. Pracownik ma dokonać analizy realizowanego zadania zgodnie z ustalonym schematem działania:

- 1) zatrzymaj się, rozejrzyj, sprawdź otoczenie,
- 2) przemyśl wykonywaną pracę,
- 3) zidentyfikuj zagrożenia,
- 4) kontroluj ryzyko,
- 5) wykonaj zadanie bezpiecznie.

W Carlsberg (2022) funkcjonuje „5 Złotych Zasad Ratujących Życie”. Dotyczą one najbardziej ryzykownych obszarów działalności przedsiębiorstwa oraz potencjalnych zagrożeń wypadkami. Należą do nich:

- 1) przestrzegaj zasad bezpieczeństwa na drogach,
- 2) praca na wysokości – pracuj tylko zgodnie z procedurą,
- 3) zawsze używaj LOTO<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> LOTO (*Lock out Tag out*) – system zabezpieczeń podnoszący poziom bezpieczeństwa pracowników serwisujących maszyny i urządzenia; chroni przed błędami ludzkimi i uniemożliwia przypadkowe uruchomienie serwisowanej maszyny. *Lock out* oznacza zamknięcie; polega na umieszczeniu

- 4) praca w przestrzeniach zamkniętych – tylko zgodnie z procedurą,
- 5) nigdy nie pracuj na niedziałających systemach bezpieczeństwa (krańcównikach, barierach).

## Podsumowanie

Raporty CSR przedsiębiorstw stanowią ciekawe źródło informacji na temat ich społecznej odpowiedzialności. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że zdecydowana większość podmiotów odnosi się w raportach do kwestii BHP, a bezpieczeństwo jest dla nich ważną wartością. W przypadku wybranych do opisu działań w strategiach CSR najczęściej występowały strategie „zero wypadków”, najrzadziej – filary bezpieczeństwa.

Tak, jak same raporty mają różną objętość, również podejmowane w przedsiębiorstwach działania opisywane są na różnym poziomie szczegółowości. Jest zastanawiające, że znalazły się przedsiębiorstwa, które pominęły kwestię BHP w swoich raportach (np. Żabka).

Perspektywy dalszych badań mogą obejmować m.in. przeprowadzenie analizy sytuacji w różnych branżach bądź jej zmian na przestrzeni kilku lat. Wymagałoby to jednak skorzystania z innych źródeł raportów niż dotychczas wykorzystywane.

## Literatura

- [1] Akademia HSE (b.d.). 2. *Definicja kultury bezpieczeństwa oraz ochrony zdrowia*. <https://akademiahse.pl/lessons/2-definicje-kultury-bezpieczenstwa-oraz-ochrony-zdrowia/> [dostęp: 30.01.2025].
- [2] Grzybek M. (2023). *Raportowanie ESG – czym są ESRS i w jaki sposób rozpocząć ich wdrażanie?*, <https://kpmg.com/pl/pl/blogs/home/posts/2023/01/raportowanie-esg-czym-sa-esrs-i-w-jaki-sposob-rozpozacz-ich-wdrazanie.html> [dostęp: 30.01.2025].
- [3] Komisja Europejska (2016). *Bezpieczeństwo i higiena pracy dotyczą każdego. Praktyczny przewodnik dla pracodawców*, Unia Europejska. [https://www.google.com/url?sa=tisource=webirct=jiopi=89978449iurl=https://ec.europa.eu/social/BlobServlet%3FdocId%3D16893%26langId%3Dplived=2ahUKewi6tdj65\\_SGaxU5GRAIHaelAvM4FBAWegQIDxAABiusg=AOvVaw1kTD\\_4ARskJTPJeWYAchg1](https://www.google.com/url?sa=tisource=webirct=jiopi=89978449iurl=https://ec.europa.eu/social/BlobServlet%3FdocId%3D16893%26langId%3Dplived=2ahUKewi6tdj65_SGaxU5GRAIHaelAvM4FBAWegQIDxAABiusg=AOvVaw1kTD_4ARskJTPJeWYAchg1) [dostęp: 30.01.2025].
- [4] Kuźmicka A. (2022). *Czym jest i do czego służy system LOTO?*, <https://ehsconsulting.pl/czym-jest-i-do-czego-sluzy-system-loto/> [dostęp: 30.01.2025].

---

czeniu specjalnej blokady w miejscu umożliwiającym załączenie przepływu energii w urządzeniu. *Tag out* to umieszczenie w miejscu zastosowania blokady informacji m.in. o powodzie wyłączenia i osobie odpowiedzialnej. Najczęściej ma postać zawieszki (ang. *tag*) ostrzegającej i informującej pracowników, że dana maszyna jest wyłączona z eksploatacji [4].

- [5] Maon F., Lindgreen A., Swaen V. (2008). *Mainstreaming the Corporate Responsibility Agenda: A Change Model Grounded in Theory and Practice*. IAG – Louvain School of Management.
- [6] Skinner B.F. (1969). *Contingencies of Reinforcement: A Theoretical Analysis*. Appleton-Century-Crofts.
- [7] Skorek K. (2023). *10 pomysłów na BHP w korporacji*. *Promotor*, 10, 18-24.
- [8] Tytyk E. (2001). *Projektowanie ergonomiczne*. Warszawa: WN PWN.
- [9] Warchał M. (2017). BBS – podejście behawioralne w praktyce służby BHP. *Promotor*, 6, 26-28.
- [10] *Zarządzanie przez spacerowanie* (b.d.). *Encyklopedia Zarządzania*, [https://mfiles.pl/pl/index.php/Zarz%C4%85dzanie\\_przez\\_spacerowanie](https://mfiles.pl/pl/index.php/Zarz%C4%85dzanie_przez_spacerowanie) [dostęp: 30.01.2025].

**Karol Dąbrowski**

## **KOMPETENCJE INŻYNIERA PRODUKCJI A POTRZEBY PRZEDSIĘBIORSTW W PERSPEKTYWIE 2030 – PANEL DYSKUSYJNY 1**

### **Wprowadzenie**

W obliczu szybko zmieniających się realiów gospodarczych, technologicznych i społecznych, przedsiębiorstwa produkcyjne stoją przed szeregiem wyzwań związanych z wdrażaniem innowacji oraz dostosowaniem swoich strategii do wymagań nadchodzącej dekady. Zmiany te wymagają od firm nie tylko elastyczności, ale także poszukiwania nowych kompetencji w zakresie inżynierii produkcji. W kontekście rozwoju technologii, automatyzacji, digitalizacji, a także rosnącego nacisku na zrównoważony rozwój, konieczne staje się ściśle powiązanie potrzeb biznesu z rozwiązaniami opracowywanymi w ramach badań naukowych. W panelu dyskusyjnym udział wzięli przedstawiciele środowisk naukowych – prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec z Politechniki Krakowskiej, prof. dr hab. inż. Anna Burduk z Politechniki Wrocławskiej, dr hab. inż. Grzegorz Bocewicz z Politechniki Koszalińskiej oraz dyrektorzy innowacyjnych firm produkcyjnych – dr inż. Łukasz Piechowcz – Dyrektor R&D w SECO Warwick S.A., Dariusz Tront – Dyrektor R&D w Lumel S.A. oraz Joanna Foksa – Manager z firmy Smulders Projects Poland Sp. z o. o., którzy wspólnie próbowali odpowiedzieć na pytanie, jakie kompetencje inżynierów produkcji będą kluczowe w perspektywie 2030 oraz jak nauka i przemysł mogą współpracować, aby sprostać tym wyzwaniom. Panel zorganizowała i poprowadziła prof. dr hab. inż. Justyna Patalas-Maliszewska Prorektor ds. Nauki i Współpracy z Zagranicą z Uniwersytetu Zielonogórskiego.

## Wyzwania stojące przed przedsiębiorstwami

Panel rozpoczął się od przedstawienia wyzwań, przed którymi stoją współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne. Prowadząca panel prof. J. Patalas-Maliszewska zaznaczyła, że już teraz widoczna jest rosnąca potrzeba rozwoju kompetencji w zakresie cyfryzacji, sztucznej inteligencji, robotyzacji oraz zrównoważonego rozwoju. W 2030 roku technologia będzie odgrywać jeszcze bardziej dominującą rolę, a przedsiębiorstwa muszą być przygotowane na dynamiczne zmiany w sposobie organizowania procesów produkcyjnych.

Dyrektorzy firm wskazali na konieczność inwestycji w nowe technologie, które umożliwią produkcję w sposób bardziej efektywny, ekologiczny i zrównoważony. Jak podkreślał dr Ł. Piechowicz, jednym z kluczowych wyzwań będzie automatyzacja, która – choć już obecna w wielu firmach – będzie musiała być rozwinięta o zaawansowane systemy sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego i Internetu rzeczy (IoT). Przemiany te, mimo że przynoszą korzyści, wiążą się również z dużym ryzykiem związanym z brakiem odpowiednio wykwalifikowanych specjalistów, co podkreślił prof. S. Skoczypiec. Dlatego, jak wspólnie podkreślono, przedsiębiorstwa muszą stawiać na rozwój kompetencji inżynierów produkcji, którzy będą w stanie zarządzać nowoczesnymi technologiami oraz wdrażać innowacyjne rozwiązania w procesach produkcyjnych.



Fot. 1. Prowadząca panel dyskusyjny „Kompetencje inżynierii produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030” prof. dr hab. inż. Justyna Patalas-Maliszewska (fot. K. Adamczewski)

## Rola nauki w rozwoju kompetencji inżynierii produkcji

Przedstawiciele środowiska naukowego podkreślili rolę edukacji i badań w kształtowaniu kompetencji przyszłości. Inżynieria produkcji, zdaniem ekspertów, nie może rozwijać się w izolacji od nauki – współpraca z ośrodkami badawczymi jest niezbędna, aby odpowiedzieć na wyzwania stawiane przez przemysł przekonywała prof. A. Burduk. Ważnym tematem poruszonym przez prof. Patalas-Maliszewską w panelu była kwestia tworzenia programów naukowych, które odpowiadałyby na konkretne potrzeby sektora przemysłowego.

Naukowcy wskazali na konieczność ścisłej współpracy z przemysłem już na etapie kształcenia inżynierów. Jak stwierdził dr hab. inż. G. Bocewicz, studenci powinni nie tylko zdobywać wiedzę teoretyczną, ale także umiejętności praktyczne, które pozwolą im lepiej odnaleźć się w szybko zmieniającym się środowisku produkcyjnym. Ważnym aspektem jest także wymiana doświadczeń między naukowcami a przedsiębiorcami, dzięki której możliwe będzie skuteczniejsze opracowywanie innowacji dostosowanych do realnych potrzeb rynkowych, podsumował D. Tront.



Fot. 2. Eksperti zaproszeni do udziału w panelu dyskusyjnym „Kompetencje inżynierii produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030” (fot. K. Adamczewski)

## Współpraca nauki i biznesu – klucz do sukcesu

Podczas dyskusji paneliści zgodzili się, że współpraca między nauką a biznesem jest absolutnie niezbędna, aby sprostać wyzwaniom nadchodzących lat. Z jednej strony

przedsiębiorstwa potrzebują wsparcia naukowego, aby wdrażać nowoczesne technologie i rozwiązania produkcyjne, a z drugiej – naukowcy muszą mieć możliwość testowania swoich teorii i innowacji w praktycznych warunkach, aby sprawdzić ich skuteczność i przydatność w rzeczywistych procesach produkcyjnych – podsumowała prof. J. Patalas-Maliszewska.

Synergia tych dwóch środowisk pozwala na szybsze przekładanie badań naukowych na konkretne rozwiązania, które mogą zostać wdrożone w firmach produkcyjnych. Jak zauważyła J. Foksa, ważne jest, aby te relacje były zorganizowane na zasadzie partnerstwa, a nie jednostronnego transferu technologii. Ekspert zwrócił uwagę na konieczność tworzenia platform wymiany wiedzy oraz programów współpracy, które będą promować innowacje na poziomie regionalnym, krajowym i międzynarodowym.



Fot. 3. Uczestnicy panelu dyskusyjnego (fot. K. Adamczewski)

## Zakończenie

Dyskusja na temat kompetencji inżynierii produkcji w perspektywie 2030 oraz potrzeby współpracy między nauką a przemysłem, potwierdza, że przyszłość sektora produkcyjnego zależy od zdolności do szybkiej adaptacji do zmieniających się warunków rynkowych oraz technologicznych. Inżynierowie produkcji muszą zdobywać nowoczesne kompetencje związane z digitalizacją, automatyzacją, zrównoważonym rozwojem i innowacjami technologicznymi. Współpraca z nauką jest kluczowym elementem, który pozwala na wprowadzanie nowatorskich rozwiązań oraz wspólne rozwiązywanie problemów stojących przed przemysłem. Dla przedsiębiorstw, które

chcą utrzymać konkurencyjność w nadchodzącej dekadzie, niezbędne jest inwestowanie w rozwój kompetencji swoich pracowników oraz nawiązywanie ścisłych relacji z ośrodkami badawczymi. Tylko synergiczne połączenie nauki i biznesu pozwoli na skuteczne sprostanie wyzwaniom przyszłości.



Fot. 4. Uczestnicy V konferencji „Współpraca nauki i biznesu w inżynierii produkcji”  
(fot. K. Adamczewski)



**Karol Dąbrowski**

## **JAK SKUTECZNIE TRANSFEROWAĆ TECHNOLOGIĘ Z NAUKI DO BIZNESU – PANEL DYSKUSYJNY 2**

### **Wprowadzenie**

Dynamiczne zmiany technologiczne, rosnąca konkurencja oraz szybko rozwijające się nowe rynki, to wyzwania, z którymi mierzy się zarówno nauka, jak i przemysł. Technologie przyszłości, takie jak sztuczna inteligencja, automatyzacja, biotechnologia czy rozwiązania z zakresu zrównoważonego rozwoju, mają potencjał, by zrewolucjonizować różne branże. Jednak ich wdrożenie w przedsiębiorstwach wymaga skutecznego procesu transferu technologii z nauki do biznesu.

Podczas panelu dyskusyjnego, który odbył się podczas V Konferencji Współpraca Nauki i Biznesu w Inżynierii Produkcji, przedstawiciele świata nauki – dr hab. inż. Arkadiusz Gola z Politechniki Lubelskiej, dr hab. inż. Dorota Stadnicka z Politechniki Rzeszowskiej, dyrektor działu R&D z firmy produkcyjnej Lamel Technology Sp. z o.o. – Piotr Gramza oraz specjaliści ds. transferu technologii – dr Tomasz Marcinişzyn z Wrocławskiego Centrum Transferu Technologii Politechniki Wrocławskiej, Karol Dąbrowski z Centrum Przedsiębiorczości i Transferu Technologii Uniwersytetu Zielonogórskiego, podjęli próbę odpowiedzi na pytanie, jak można skutecznie przekładać badania naukowe na realne rozwiązania przemysłowe. Zwrócono uwagę na wyzwania związane z ochroną własności intelektualnej, tworzeniem innowacyjnych rozwiązań oraz zapewnieniem, że współpraca między nauką a biznesem będzie efektywna i opłacalna dla obu stron. Panel poprowadził dr hab. inż. Sławomir Kłos – Pełnomocnik Rektora Uniwersytetu Zielonogórskiego ds. Współpracy z Gospodarką i Jakości Badań.

## Nowoczesne technologie wyzwaniem dla nauki i biznesu

Jednym z głównych tematów dyskusji było pytanie, jakie wyzwania stoją przed nauką i przemysłem w zakresie tworzenia innowacji i technologii przyszłości. Prowadzący panel dr hab. inż. S. Kłós zapytał uczestników czy polskie uczelnie mają potencjał do tworzenia nowych technologii, którymi może być zainteresowany przemysł? Doktor hab. inż. Arkadiusz Gola stwierdził, że kluczowym elementem w procesie transferu technologii jest zrozumienie, że pomimo ogromnego potencjału nauki, wiele badań pozostaje w sferze teorii i nie trafia do przemysłu, a przedsiębiorstwa oczekują od naukowców gotowych, sprawdzonych rozwiązań, które można wdrożyć w produkcji, co często jest utrudnione przez różnice celach, jakie przyświecają obu środowiskom.

Kolejnym tematem poruszonym przez prowadzącego były kryteria oceny jakości badań naukowych w Polsce, które obejmują publikacje w prestiżowych czasopismach (z tzw. wysokim współczynnikiem wpływu). Kryteria te są kluczowe z punktu widzenia parametryzacji uczelni i ewaluacji danej dyscypliny naukowej. Jak podkreśliła dr hab. inż. Dorota Stadnicka w przypadku badań stosowanych, praktyczne wyniki, nowe metody i technologie oraz innowacyjne produkty, nie powinny być prezentowane, jeżeli mają być objęte ochroną w celu przyszłej komercjalizacji, co powoduje, że taki system oceny i prowadzenia badań nie sprzyja ich transferowi do przemysłu.



Fot. 1. Dr hab. inż. Dorota Stadnicka – ekspert zaproszony do udziału w panelu dyskusyjnym „Jak skutecznie transferować technologię z nauki do biznesu”

Wyzwaniem, które zostało wywołane podczas dyskusji o kryteriach oceny jakości badań naukowych jest ochrona własności intelektualnej. W tej tematyce wypowiedział

się dr T. Marcinişzyn – „w kontekście współpracy z nauką, przedsiębiorstwa muszą być pewne, że inwestycje w innowacje nie zostaną zagrożone przez wewnętrzne problemy uczelni związane z patentami czy licencjami. I takiej samej gwarancji oczekują od przedsiębiorców uczelnie”. Karol Dąbrowski podkreślił, że odpowiednia strategia ochrony własności intelektualnej jest kluczowa, aby zachować konkurencyjność firmy oraz zabezpieczyć inwestycje w badania i rozwój.

## Rola transferu technologii w systemie innowacji

Transfer technologii z nauki do biznesu wymaga gotowości i zaangażowania obu stron, czyli uczelni wyższych i przedsiębiorstw. Dlatego też dr hab. inż. S. Kłos zapytał ekspertów – „Co muszą zrobić uczelnie, a co przedsiębiorcy, żeby efektywnie ze sobą współpracować? W jaki sposób można stymulować współpracę pomiędzy nauką i biznesem?”

Z odpowiedzi udzielonych przez ekspertów wynika, że transfer technologii, który odbywa się między nauką a przemysłem, nie jest prostym procesem. Wymaga on nie tylko odpowiednich narzędzi i procedur, ale również zrozumienia specyfiki obu stron. Doktor Marcinişzyn zwrócił uwagę na konieczność budowania pomostu między światem akademickim a biznesem. Jego wypowiedź uzupełnił P. Gramza – „przede wszystkim trzeba tworzyć warunki do efektywnej komunikacji i współpracy, które umożliwią naukowcom lepsze zrozumienie potrzeb rynku, a firmom – dostęp do nowoczesnych rozwiązań technologicznych”.



Fot. 2. Eksperti zaproszeni do udziału w panelu dyskusyjnym „Kompetencje inżynierii produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030”

Podczas dyskusji omawiano także konkretne mechanizmy, które mogą usprawnić transfer technologii. Jednym z nich są tzw. inkubatory technologiczne, które pomagają w przejściu od pomysłu naukowego do prototypu gotowego do wdrożenia. Uczestnicy podkreślili również rolę tzw. brokerów technologicznych, czyli pośredników, którzy pomagają w procesie komercjalizacji wyników badań. Firmy coraz częściej korzystają z takich usług, aby szybciej wdrażać innowacje i zyskiwać przewagę konkurencyjną na rynku. Co więcej szukają takiego specjalistycznego wsparcia na uczelniach.

### **Wyjątkowa rola sektora prywatnego i publicznego**

Ważnym punktem panelu było podkreślenie roli sektora publicznego w wspieraniu transferu technologii. Uczestnicy zgodnie zwrócili uwagę na potrzebę wsparcia rządu w postaci dotacji, ulg podatkowych oraz ułatwień w dostępie do finansowania badań i innowacji. Współpraca publiczno-prywatna jest niezbędna, aby stworzyć odpowiednie warunki do wdrażania nowych technologii stwierdził dr hab. inż. A. Gola.

Z kolei przedstawiciel firmy Lamel wskazywał, że rola jego organizacji nie ogranicza się tylko do korzystania z gotowych rozwiązań, ale również do aktywnego uczestnictwa w badaniach oraz współtworzenia nowych technologii, które odpowiadają na konkretne wyzwania branży.



Fot. 3. Eksperti zaproszeni do udziału w panelu dyskusyjnym „Kompetencje inżynierii produkcji a potrzeby przedsiębiorstw w perspektywie 2030”

### **Zakończenie**

Podsumowując, panel dyskusyjny potwierdził, że skuteczny transfer technologii z nauki do biznesu jest fundamentem innowacyjności i rozwoju w nadchodzących latach.

Aby proces ten przebiegał sprawnie, niezbędna jest bliska współpraca obu środowisk – nauki i przemysłu, która opiera się na zaufaniu, wymianie wiedzy i doświadczeń oraz odpowiednim zarządzaniu własnością intelektualną. Synergia nauki i biznesu pozwoli nie tylko na tworzenie technologii przyszłości, ale także na ich efektywne wdrażanie w różnych sektorach gospodarki. W kontekście globalnej konkurencyjności współpraca ta staje się nie tylko strategiczną potrzebą, ale wręcz warunkiem sukcesu na rynku.



ISBN 978-83-7842-589-2