

Piotr KAMIŃSKI\*, Robert DROBINA\*\*

## WYZNACZENIE WĄSKIEGO GARDŁA W PRZEDSIĘBIORSTWIE BRANŻY METALURGICZNEJ Z WYKORZYSTANIEM PAKIETU SYMULACYJNEGO PROGRAMU ARENA

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2021.084.06

W artykule przedstawiono metodykę badań przy wyznaczeniu wąskiego gardła w przedsiębiorstwie branży metalurgicznej. Na początku omówiono znaczenie metod symulacyjnych w inżynierii produkcji. Następnie scharakteryzowano proces produkcyjny wytwarzania prętów mosiężnych w wybranym przedsiębiorstwie branży metalurgicznej z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych stanowisk roboczych w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Arbitralnie założono, że do opisu zachodzących zjawisk w analizowanym procesie produkcyjnym adekwatnym do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych na poszczególnych stanowiskach produkcyjnych odpowiednie są modele statystyczne oparte na rozkładzie trójkątnym, normalnym oraz jednostajnym. Dalej podjęto próbę przedstawienia wzajemnych relacji pomiędzy istniejącymi stanowiskami produkcyjnymi oraz połączenia ich w jeden system produkcyjny. Dokonano tego, stosując pakiet symulacyjny programu ARENA. Dla tak zaproponowanego podejścia symulacja komputerowa pozwoliła na wyodrębnienie wąskiego gardła w prezentowanym procesie technologicznym wytwarzania prętów mosiężnych. Rozwiązanie teoretyczne weryfikowano metodami statystycznymi w warunkach przemysłowych, czego efektem jest propozycja sposobu zwiększenia wydajności produkcji. Przeprowadzony plan eksperymentu pozwolił na zidentyfikowanie czynności oraz oszacowanie ich wpływu na występowanie wąskiego gardła w procesie produkcyjnym.

**Słowa kluczowe:** symulacja komputerowa, proces produkcyjny, ARENA, wąskie gardło

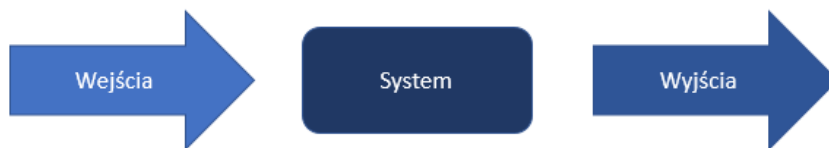
---

\* Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Inżynierii Produkcji. ORCID: 0000-0003-4758-9679.

\*\* Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Inżynierii Produkcji. ORCID: 0000-0001-7346-6694.

## 1. WPROWADZENIE

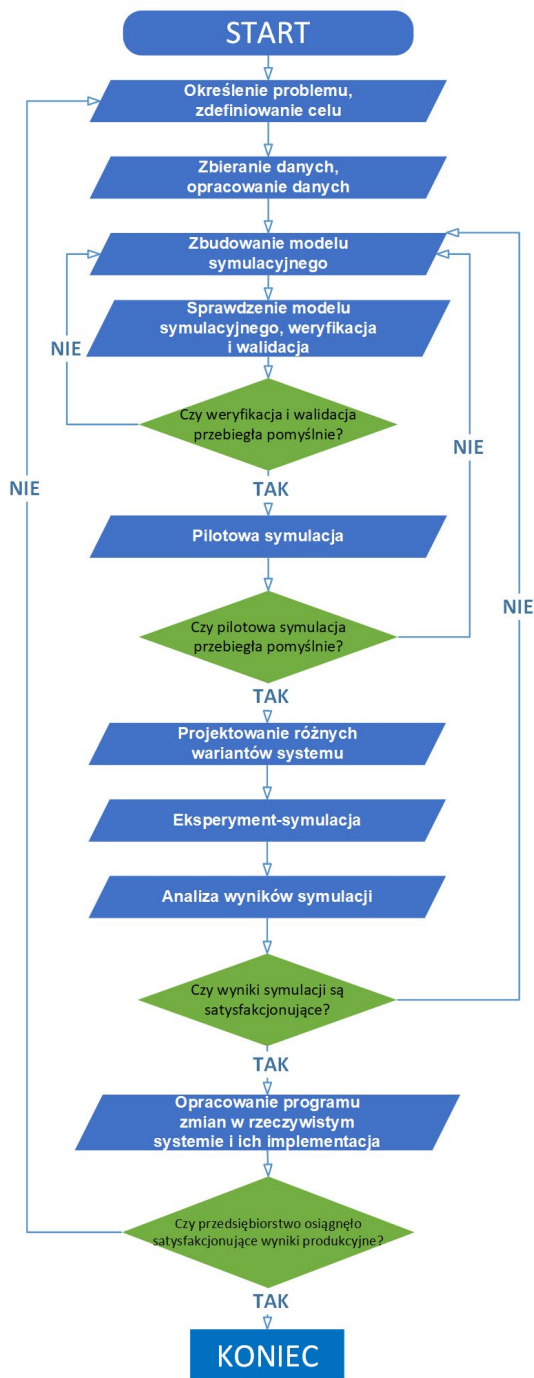
Przedsiębiorstwa ciągle się zmieniają i ewoluują, aby sprostać dużej konkurencyjności przy jednoczesnym podwyższeniu jakości oferowanych produktów z jednoczesnym ograniczeniem kosztów. W celu otwarcia się na potrzeby światowego rynku przedsiębiorstwa zmuszone są zaoferować wyroby dostosowane do wymagań odbiorcy przy niskich cenach i krótkich terminach dostaw. Warunkiem sprostanania tym wymaganiom jest stosowanie zaawansowanych technik wytwarzania oraz wdrażanie najnowszych systemów zarządzania przedsiębiorstwem (Krwa-wicz, 2018). Stosowanie technik zarządzania przedsiębiorstwem ma na celu m.in. umożliwienie obniżania kosztów własnych przez redukcję niewłaściwej jakości produktu (Holweg, Bicheno, 2009). Wspólną cechą większości ogólnie dostępnych w zarządzaniu metod i technik wspomagających produkcję jest dążenie do wzrostu elastyczności, poprawy bezpieczeństwa oraz poprawy wszelkich relacji z otoczeniem, a także podjęcie działań wzmacniających pozycję rynkową (Wolniak, 2015). Planowanie badań w warunkach przemysłowych wymaga określenia związku pomiędzy wielkościami wejściowymi a wielkościami opisującymi jakość produktu. Związek ten w sposób ilościowy może być opisany przez wyznaczenie odpowiedniego modelu, najczęściej w postaci równania. Pozyskiwanie danych o procesie technologicznym (identyfikacja technologiczna) wymaga przeprowadzenia pomiarów, możliwych kombinacji wartości zmiennych wejściowych. W praktyce jest to trudne do uzyskania ze względu na wysokie koszty prowadzenia badań, jak i możliwe do wystąpienia straty produkcyjne (Michalski, 2013). Symulacja komputerowa jest dobrym narzędziem do wizualizacji i analizowania przebiegu procesu technologicznego w firmie, jak również do wspomagania podejmowania decyzji związanych z modernizacją lub rozwojem systemów produkcyjnych. Aby wyznaczyć model, który będzie jak najlepiej odzwierciedlał rzeczywiste zachowanie systemu produkcyjnego, należy przede wszystkim sparametryzować sam proces, a w tym określić parametry dotyczące pracowników (czasy trwania poszczególnych operacji technologicznych), określić rodzaj środków transportu, opracować plan realizacji zleceń produkcyjnych itd. Zatem tworzenie modelu symulacyjnego wymaga dużego doświadczenia i znajomości metod modelowania systemów z jednej strony oraz umiejętności posługiwania się narzędziami do komputerowej symulacji procesów z drugiej (Spring, Dalrymple, 2000; Li, Chang, Ni, 2009). Dzięki symulacji komputerowej realizacji procesu produkcyjnego możliwe jest wytypowanie wąskiego gardła na linii technologicznej. Eliminacja wąskiego gardła może przyczynić się do uzyskania pełnej zdolności produkcyjnej systemu (Subramanian, Skoogh, Salomonsson, Bangalore, Bokrantz, 2018). Proces wytwarzania można przedstawić jako system składający się z wejść, wyjść i samego procesu. Wejścia stanowią materiały, a wyjścia – gotowy wyrób (rys. 1).



Rys. 1. Elementy symulacji komputerowej (Maciąg, Pietroń, Kukła, 2013)

Proces symulacji jest szeregiem następujących po sobie operacji (rys. 2). Na początku etapu procesu symulacji należy jasno sformułować cel przeprowadzanych badań. Następnie trzeba określić miary jakościowe rozwiązania, poziom szczegółowości oraz zakres procesu (Cao, Deng, Liu, Wang, 2012). Kolejny etap to opracowanie modelu, który uwzględni najważniejsze cechy systemu, ich relacje, które są najistotniejsze dla badanego zagadnienia (Law, Kelton, 2000). Zależnie od tego, czy istnieje możliwość dokładnego opisanie zmiennych wejściowych, czy też nie ma takiej możliwości, wówczas można mówić o symulacji probabilistycznej (zmiennne wejściowe opisane rozkładami statystycznymi) lub o przeprowadzeniu symulacji deterministycznej (zmiennne wejściowe są niekontrolowane). Dodatkowo zmiennne mogą mieć charakter dyskretny lub ciągły (Plinta, 2015). Kolejnym krokiem jest zebranie poszczególnych danych niezbędnych do określenia parametrów w modelu. Na ich podstawie dokonuje się programowania symulacji na komputerze w dobranym języku programowania symulacyjnego, np. ARENA. Po przeprowadzonej symulacji należy sprawdzić poprawność działania modelu, porównując jego wyniki z obserwacjami poczynionymi na rzeczywistym obiekcie badań. W celu wykonania i sprawdzenia procesu symulacji trzeba wprowadzić do modelu dane historyczne, przeprowadzić symulację oraz ocenić, na ile jej wyniki są spójne z rzeczywistością. Powinny być one zweryfikowane przez ekspertów (walidacja procesu symulacji). Jest to kluczowy etap procesu symulacji, ponieważ można w nim wychwycić i wyeliminować błędy w zakresie wprowadzonych danych, a w związku z tym wyeliminować błędy w zakresie błędnej symulacji programu. Etap ten często wymaga zrewidowania wcześniejszych założeń i powtórnej realizacji poprzednich etapów (Orłowski, Lipski, Loska, 2012; Knosala, 2017).

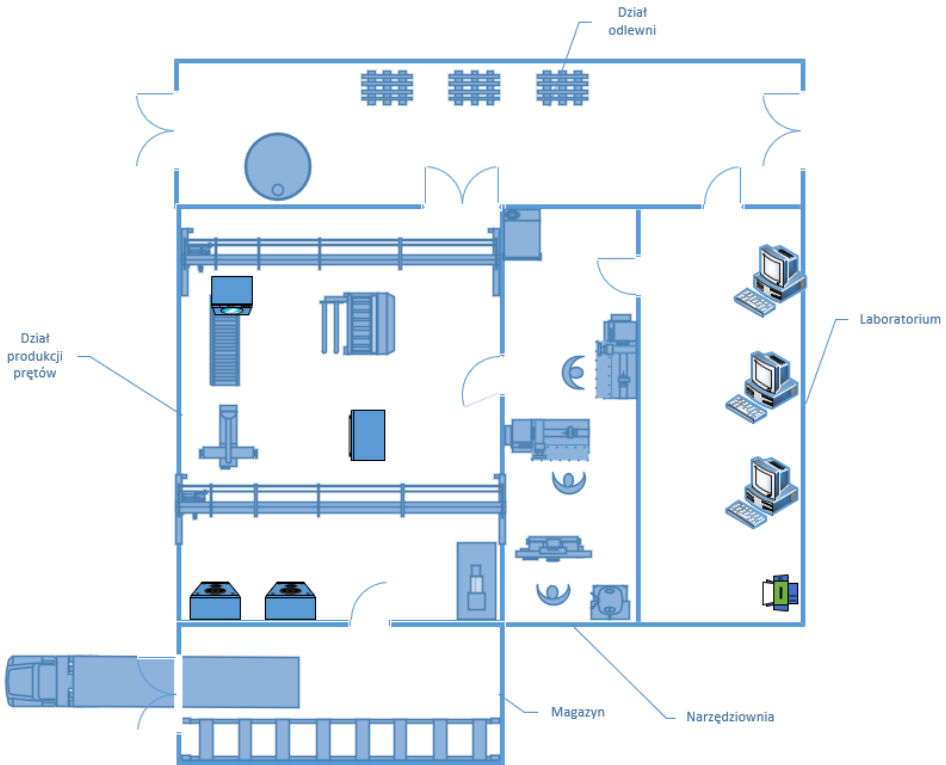
Funkcjonowanie rzeczywistego systemu produkcyjnego w modelu symulacyjnym przedstawione jest w sposób graficzny za pomocą animacji, natomiast wyniki symulacji mogą zostać pokazane w postaci wykresu obrazującego wykorzystanie poszczególnych stanowisk, zasobów produkcyjnych itp. (Martinkovic, 2018). Wybierając symulację komputerową jako narzędzie służące do rozwiązania zadanego problemu, należy mieć na uwadze, że wysiłek włożony w przygotowanie oraz opracowanie modelu nie zawsze może przynieść oczekiwane wyniki. Wiąże się to z uproszczeniem warunków rzeczywistych, w których realizowany był proces (Thürer, Stevenson, 2018).



Rys. 2. Etapy realizacji projektu symulacyjnego (Plinta, Więcek, 2012)

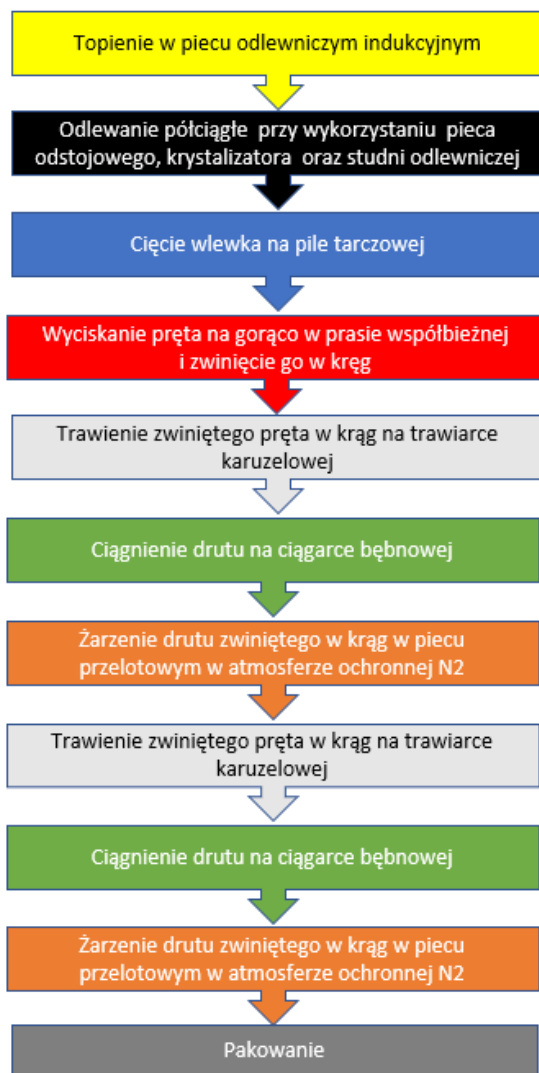
## 2. PLANY PRODUKCYJNE WYTWARZANIA PRĘTÓW MOSIĘŻNYCH – ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Celem badań jest przedstawienie metodyki postępowania przy wyznaczeniu wąskiego gardła w przedsiębiorstwie branży metalurgicznej. W ramach realizacji programu badań pozyskiwano dane o procesie technologicznym. Podczas pierwszego etapu typowano maszyny i urządzenia znajdujące się bezpośrednio na hali produkcyjnej (rys. 3), które są niezbędne w poszczególnych procesach produkcyjnych realizowanych w przedsiębiorstwie.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia wydziałów w modelu symulacyjnym (Kamiński, 2021)

Analiza procesów produkcyjnych prętów prowadzi do wniosku, że stosowane są te same maszyny w procesie produkcji, co może prowadzić do powstawania wąskich gardła. W ramach prowadzonego planu badań (Kamiński, 2021) wykorzystanie maszyn pracujących w tym samym gnieździe produkcyjnym oznaczono identycznymi kolorami i przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Identyfikacja technologiczna procesu wytwarzania prętów mosiężnych z zaznaczonymi wspólnymi operacjami technologicznymi w realizowanym modelu symulacyjnym (Kamiński, 2021) [parametry technologiczne przeprowadzanych operacji stanowią tajemnicę zakładu, dlatego z przedsiębiorstwem została podpisana klauzula poufności]

W ramach prowadzonego planu badań dokonano pomiaru czasu trwania danej operacji technologicznej. W celu pełniejszego zobrazowania zachodzących zjawisk w ramach prowadzonych badań postanowiono opracować modele probabilistyczne uwzględniające zachodzące fluktuacje na danych stanowiskach produkcyjnych (Kamiński, 2021).

W ramach opracowywania symulacyjnych modeli produkcyjnych niezbędne było wykorzystanie teorii ograniczeń (Woepfel, 2009; Kamiński, 2021), zgodnie z którą, aby zwiększyć wydajność produkcyjną, należy zlokalizować wąskie gardło w zidentyfikowanym procesie produkcyjnym. Współcześnie tego typu zadania mogą być realizowane w programie ARENA (Plinta, 2015; Kamiński, 2021). Niezbędne do budowy modelu jest określenie czasu trwania cyklu dla poszczególnych operacji technologicznych (Altiok, Melamed, 2010; Kamiński, 2021). W badaniu eksperymentalnym obiektami badań, które zostały poddane doświadczeniom, były konkretne stanowiska produkcyjne. Ogólnie dowolny obiekt badań opisują następujące wielkości modelujące (rys. 5):

- niezależne wielkości wejściowe:  $x_1, x_2, \dots, x_s$ ,
- zależne wielkości wyjściowe:  $y_1, y_2, \dots, y_N$ ,
- wielkości stałe ( $u$ ), które mają wpływ na działanie układu, ale ich wartości są ustalone i niezmiennie w czasie, przez co mogą zostać pominięte w analizie statystycznej,
- wielkości zakłócające ( $h$ ), których istnienie spowodowane jest oddziaływaniem losowych czynników w obiekcie badań na wielkości wyjściowe oraz niedoskonałościami metod i środków pomiarowych.



Rys. 5. Schemat modelu obiektu badań (Kramarz, 2012; Kamiński, 2021)

Przedstawiony na rysunku 5 schemat modelu obiektu badań obrazuje relację przyczynowo-skutkową zachodzącą pomiędzy wejściami do obiektu badań a wyjściem. Jako wielkość wejściową po przeprowadzonej identyfikacji technologicznej wybrano czas trwania konkretnej operacji w procesie technologicznym produkcji prętów mosiężnych. Badany obiekt poddany jest działaniu wielu czynników zwanych zmiennymi zakłócającymi (Kramarz, 2012). Niemierzalne zmienne zakłócające podlegają ciągłym nieprzewidywalnym zmianom i mogą wpłynąć na badane zjawisko (Jasiński, 2014). Do czynników tych można zaliczyć (Kramarz, 2012; Kamiński, 2021):

- pracownika wykonującego daną czynność roboczą, m.in. obciążenia psychicznego, zakłócenia produktywności z powodu presji pracownika – tzw. efekt Hawthorne’a (Nieporowski, 2015),
- zmienowość,
- rozkład czasu pracy w ciągu dnia,
- awaryjność procesu technologicznego.

Uwzględniając prezentowane czynniki zakłócające, które w istotny sposób wpływają na prawidłowość prowadzenia procesu produkcyjnego, postanowiono ograniczyć ich wpływ, posługując się tzw. replikacjami. Replikacje to kolejne obserwacje prowadzone na różnych jednostkach doświadczalnych w jednakowych warunkach doświadczalnych podlegających kontroli (Wójcik, 2013; Kamiński, 2021). Dzięki nim zmniejszono skutek działań tych czynników zakłócających, które w sposób niezamierzony mogłyby wpłynąć na charakter modelu produkcyjnego. Przeprowadzone badania miały doprowadzić do opracowania opisu statystycznego analizowanego obiektu.

Analiza statystyczna wykazała, że z uwagi na rodzaj i charakter prowadzonego procesu technologicznego najbardziej zbliżone do opisu rzeczywistych warunków eksploatacyjnych są modele statystyczne oparte na rozkładzie trójkątnym, normalnym oraz jednostajnym (tab. 1).

Tabela 1. Rodzaje modeli probabilistycznych, rozkładów najbardziej odzwierciedlających czasy trwania operacji technologicznych wytwarzania prętów mosiężnych

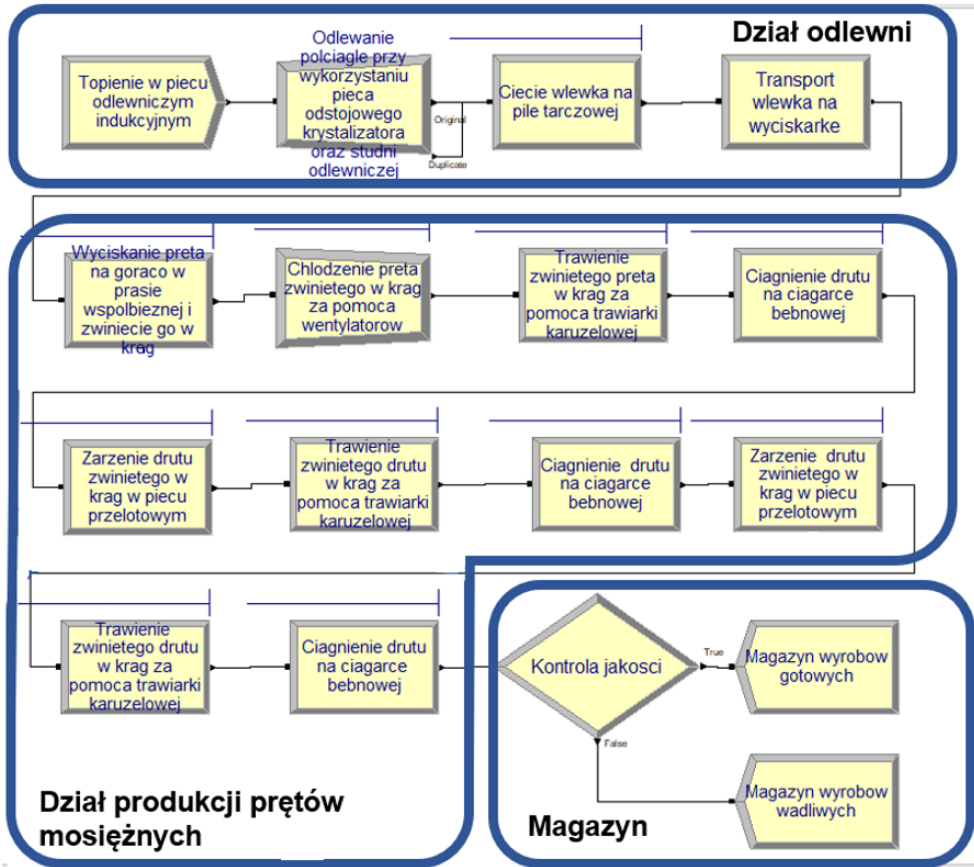
Operacja	Typ rozkładu							
	Trójkątny			Normalny			Jednostajny	
	wartość oczekiwana	wariancja	a, c, b,	wartość oczekiwana	wariancja	Odchylenie standardowe	wartość oczekiwana	wariancja
Pakowanie	280	1400	180;300;360	-	-	-	-	-
Zarzenie drutu	560	1400	480;540;660	-	-	-	-	-
Ciągnięcie drutu	-	-	-	1577	11371	106	-	-
Trawienie zwiniętego pręta	124	98	102;120;150	-	-	-	-	-
Wyciskanie pręta	1900	5600	1740;1860;2100	-	-	-	-	-
Cięcia wlewka	-	-	-	-	-	-	42	40
Odlewanie półciągięte	560	5600	360;600;720	-	-	-	-	-
Topienie w piecu odlewniczym	-	-	-	3395	143702	379	-	-

Źródło: Kamiński, 2021.

Na podstawie oszacowanych parametrów modeli statystycznych, takich jak: wartość oczekiwana, wariancja, wartość minimalna (a), wartość maksymalna (b), moda (c), zestawionych w tabeli 1, wyznaczono model symulacyjny w programie



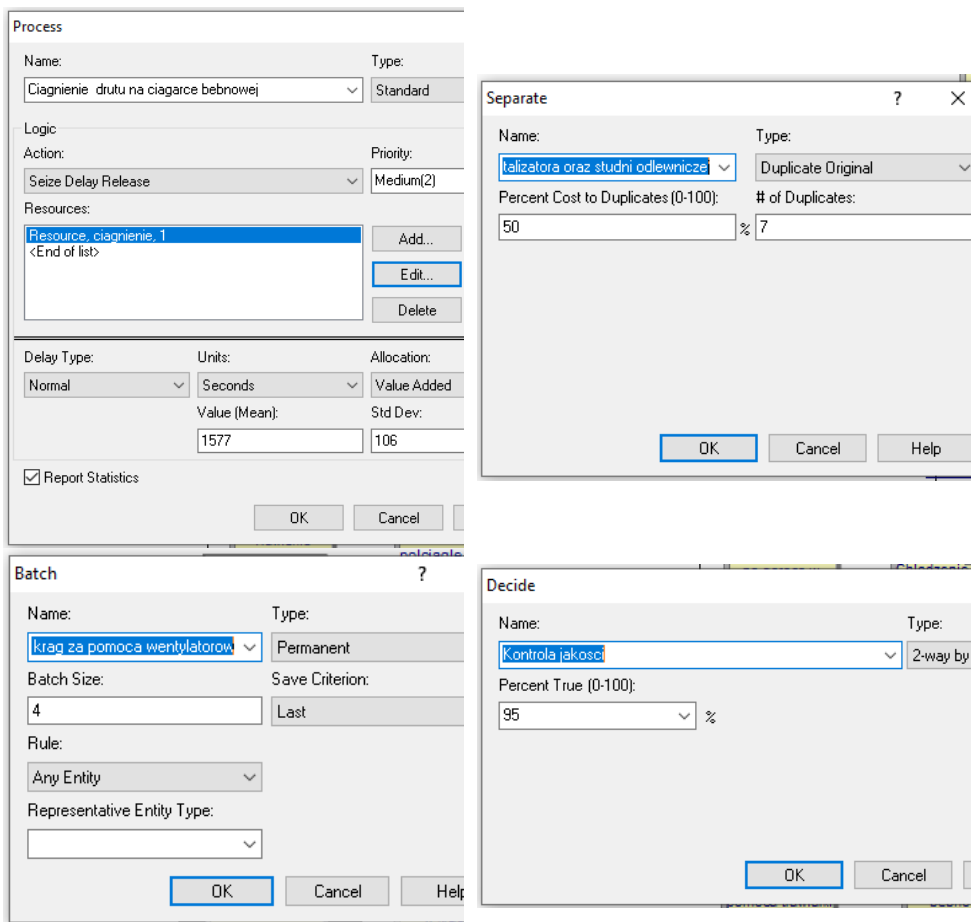
ARENA (rys. 6). Uwzględnia on podstawowe parametry statystyczne czasu trwania poszczególnych operacji technologicznych wytwarzania prętów, ich funkcję gęstości prawdopodobieństwa czasu trwania oraz dystrybuantę czasu pracy na stanowisku. Na podstawie uzyskanych statystyk dokonano symulacji w programie ARENA przebiegu procesu wytwarzania prętów mosiężnych.



Rys. 6. Model symulacyjny procesu technologicznego wytwarzania prętów mosiężnych opracowany w środowisku ARENA (Kamiński, 2021)

W poszczególnych blokach (określenie obiektów graficznych, z których budowane są modele w programie ARENA) wprowadzane są parametry statystyczne czasu trwania operacji technologicznych pochodzących z procesu identyfikacji technologicznej (rys. 7) (Altiok, Melamed, 2010). Poszczególne stanowiska produkcyjne zostały zamodelowane za pomocą bloku *Process*. Na rysunku 7 zaprezentowano wykorzystany blok *Process*, zdefiniowano w nim zajęcie zasobu ciągarca 1, opóźnienie przejścia materiału w tej operacji realizowane jest w czasie

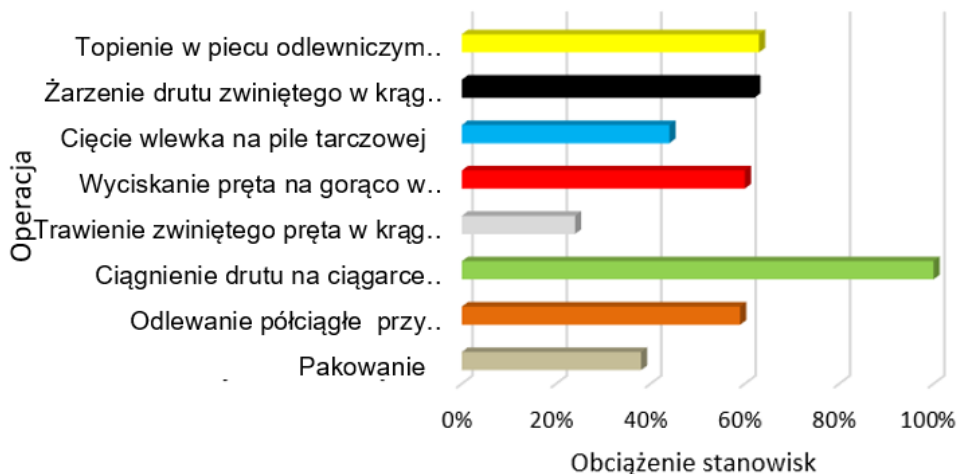
opisanym właściwym rozkładem statystycznym (tu: normalnym, dla którego wartość oczekiwana wynosi 1577 s oraz odchylenie standardowe 106 s). Blok *Batch* zamienia kilka procesów w jeden (tu cztery procesy zamienia w jeden). Natomiast blok *Separate* powoduje zamianę jednego procesu w kilka, sklonowanie procesu (tu: klonujemy proces siedem razy). Blok *Decide* pozwala podzielić strumień zgłoszeń na dowolną liczbę podstrumieni. Do wyboru wykorzystano podział procentowy (*by Chance*) albo według zadanego warunku (*by Condition*) (tu kontrola jakości wykazała 95% materiałów wykonanych prawidłowo oraz 5% wadliwych).



Rys. 7. Przykładowe parametry bloków funkcyjnych wykorzystanych w modelu symulacyjnym (Kamiński, 2021)

W wyniku przeprowadzonej symulacji w programie ARENA wyznaczono wydajność poszczególnych stanowisk produkcyjnych oraz liczbę wyprodukowanych

drutów mosiężnych zwiniętych w kręgi w funkcji okresu trwania symulacji wynoszącego trzy tygodnie (rys. 8). Wybór trzech tygodni wynika z analizy średnich czasów trwania realizacji zamówienia na pręty mosiężne w warunkach przemysłowych.



Rys. 8. Wydajność stanowisk stosowanych w procesie technologicznym wytwarzania prętów mosiężnych (Kamiński, 2021)

Analizując dane pozyskane z modelu symulacyjnego wygenerowanego w programie ARENA, można stwierdzić, że w trakcie procesu produkcyjnego w okresie założonych trzech tygodni powinno zostać wyprodukowanych 1530 sztuk drutów mosiężnych zwiniętych w kręgi. W ramach symulacji stwierdzono, że istotnym ograniczeniem w procesie produkcyjnym jest operacja ciągnięcia drutów, dla której obciążenie stanowiska wynosi 100% (rys. 8), co oznacza, że stanowisko to osiągnęło maksymalną wydajność i nie ma wolnych mocy produkcyjnych.

### 3. WERYFIKACJA I OCENA MODELU SYMULACYJNEGO, WYZNACZENIE WĄSKIEGO GARDŁA W PROCESIE TECHNOLOGICZNYM WYTWARZANIA PRĘTÓW

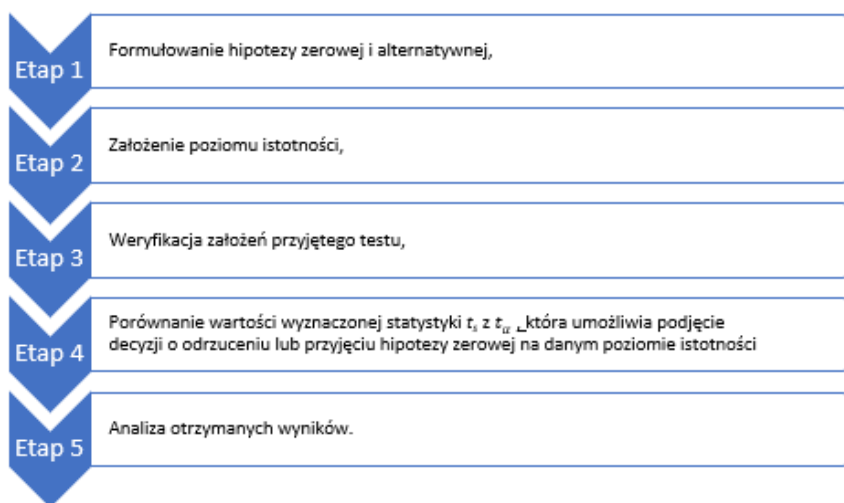
Weryfikację wygenerowanego modelu symulacyjnego przeprowadzono za pomocą statystyk testu t-Studenta dla jednej próby. Podstawę obliczeń stanowiły dane eksploatacyjne uzyskane z 32 okresów realizacji zamówienia na pręty przedstawionych w tabeli 2 oraz wyznaczona liczba wyprodukowanych drutów zwiniętych w kręgi w modelu symulacyjnym.

Tabela 2. Rzeczywista liczba wyprodukowanych prętów zwinionych w kręgi w okresie 32 tygodni produkcji

Lp.	Liczba wyprodukowanych sztuk drutów zwinionych w kręgi	Lp.	Liczba wyprodukowanych sztuk drutów zwinionych w kręgi
1	1609	17	1553
2	1587	18	1528
3	1615	19	1551
4	1580	20	1522
5	1604	21	1536
6	1620	22	1546
7	1589	23	1559
8	1583	24	1547
9	1614	25	1530
10	1519	26	2315
11	1526	27	1502
12	1533	28	1499
13	1551	29	1483
14	1555	30	1480
15	1525	31	1515
16	1540	32	1508
$\bar{X}=1572$ - średnia			
$\sigma=138$ - odchylenie standardowe			

Źródło: Kamiński, 2021.

Ocenę adekwatności opracowanego modelu symulacyjnego przeprowadzono, posługując się procedurą przedstawioną na rysunku 9.



Rys. 9. Etapy wnioskowania statystycznego (Salwin, Krystosiak, 2018)

**Etap 1. Formułowanie hipotezy zerowej i alternatywnej**

Na etapie pierwszym testu t-Studenta postawiono hipotezy:

Hipoteza zerowa  $H_0: \bar{X} = 1530$  sztuk. „Liczba wyprodukowanych prętów zwiniętych w kręgi w modelu symulacyjnym nie różni się istotnie od średniej liczby prętów zwiniętych w kręgi wyprodukowanych w rzeczywistości”.

Hipoteza alternatywna  $H_1: \bar{X} \neq 1530$  sztuk. „Liczba wyprodukowanych prętów zwiniętych w kręgi w modelu symulacyjnym różni się istotnie od średniej liczby prętów zwiniętych w kręgi wyprodukowanych w rzeczywistości”.

**Etap 2. Założenia poziomu istotności**

Poziom istotności  $\alpha$ , tj. prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju. Na podstawie analizy literatury przedmiotu i badań autorów (Plucińska, Pluciński, 2000; Nowak, 2002) założono arbitralnie, że poziom istotności  $\alpha = 0,05$ .

**Etap 3. Weryfikacja założeń przyjętego testu**

Wyznaczono wartość statystyki  $t_s$ . Dla testu t-Studenta dla próby większej niż  $n = 30$  przy założeniu prawdziwości hipotezy  $H_0$  statystyka  $t_s$  ma rozkład normalny, standardowy i wyznaczono ją ze wzoru:

$$t_s = \frac{\bar{X} - \bar{X}_0}{\sigma} \times \sqrt{n} = 1,74 \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{X} = 1572$  sztuki (tab. 2) – średnia z próby,

$\bar{X}_0 = 1530$  sztuk – wartość wyznaczona z przeprowadzonej symulacji w programie ARENA – testowana wartość,

$\sigma = 138$  sztuk (tab. 2) – odchylenie standardowe z próby,

$n = 32$  (tab. 2) – liczebność próby.

Następnie z tablic t-Studenta wyznaczono dwustronny obszar krytyczny o  $n = 32$  stopniach swobody dla poziomu istotności testu  $\alpha = 0,05$  (tab. 3).

Tabela 3. Zestawienie wyników przeprowadzonej analizy t-Studenta dla weryfikacji przeprowadzonego modelu symulacyjnego procesu produkcyjnego wytwarzania prętów mosiężnych

$\bar{X}$	$\bar{X}_0$	$\sigma$	$n$	Obszar krytyczny odczytany z tablic t-Studenta dla $n=32, \alpha=0,05$	$t_s$
1572	1530	138	32	$(-\infty; -2,038] \cup [2,038; \infty)$	1,74

**Etap 4. Porównanie wartości wyznaczonej statystyki  $t_s$  z  $t_{\alpha}$ , która umożliwia podjęcie decyzji o odrzuceniu lub przyjęciu hipotezy zerowej na danym poziomie istotności**

Podczas analizy dokonano sprawdzenia, czy wyznaczona statystyka  $t_s = 1,74$  nie wpada w obszar krytyczny  $t_{\alpha} \in (\infty; -2,038] \cup [2,038; \infty)$ , zatem nie ma podstaw do

odrzućenia hipotezy zerowej  $H_0: \bar{X}$ . „Liczba wyprodukowanych prętów zwiniętych w kręgi w modelu symulacyjnym nie różni się istotnie od średniej liczby prętów zwiniętych w kręgi wyprodukowanych w rzeczywistości”.

### **Etap 5. Analiza otrzymanych wyników**

Przeprowadzona weryfikacja modelu symulacyjnego za pomocą testu t-Studenta dowiodła, że uzyskane wyniki z modelu symulacyjnego są poprawne. Oznacza to, że wyznaczony model symulacyjny jest wiarygodny i można go uznać za adekwatny. Dla tak skonstruowanego modelu symulacyjnego poddano analizie wyniki symulacji (rys. 5). Jednoznacznie wynika z nich, że wąskim gardłem w procesie technologicznym wytwarzania prętów mosiężnych jest operacja ciągnięcia, jej wydajność jest największa w procesie produkcyjnym wytwarzania prętów mosiężnych i wynosi 100%. Porównując wyniki symulacji z danymi pochodzącymi z systemu rzeczywistego, stwierdzono, że na stanowisku ciągnięcia prętów mosiężnych tworzy się kolejka materiału do przetworzenia. Zjawisko to potwierdza adekwatność opracowanego modelu symulacyjnego. Zastosowanie modelu symulacyjnego w programie ARENA umożliwiło przedstawienie wzajemnych relacji pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi i połączenie ich w jeden system produkcyjny.

## **4. PODSUMOWANIE**

Model systemu produkcyjnego został opracowany na podstawie pomiarów czasów wykonywania operacji oraz danych dotyczących programu produkcji i opisu technologii stanowiących podstawę do przeprowadzenia identyfikacji technologicznej (Kamiński, 2021). Poprawność opracowanego modelu symulacyjnego została potwierdzona metodami statystycznymi na podstawie rzeczywistej liczby wyprodukowanych prętów mosiężnych zwiniętych w kręgi. Zaproponowana procedura prowadzenia badań symulacyjnych bardzo dobrze sprawdziła się w wytypowaniu wąskiego gardła na linii technologicznej wytwarzania prętów mosiężnych. Dla tak zaproponowanego podejścia przy wyznaczonych modelach statystycznych czasu trwania poszczególnych operacji symulacja komputerowa pozwoliła na wyodrębnienie wąskiego gardła w prezentowanym procesie technologicznym wytwarzania prętów mosiężnych, którym jest operacja ciągnięcia prętów. Eliminacja wąskiego gardła w bezpośredni sposób może przelożyć się na zwiększenie wydajności całej linii technologicznej wytwarzania prętów. Zgodnie z teorią ograniczeń (Woeppel, 2009) czas schodzenia gotowego produktu z linii technologicznej (czas cyklu) jest równy czasowi, jaki produkt spędza w wąskim gardle.

## LITERATURA

- Altiok, T., Melamed, B. (2010). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Academic Press is an imprint of Elsevier. Rutgers University Piscataway, New Jersey.
- Cao, Z., Deng, J., Liu, M., Wang, Y. (2012). Bottleneck prediction method based on improved adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) in semiconductor manufacturing system. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(6), 1081-1088.
- Holweg, M., Bicheno, J. (2009). *The Lean Toolbox, The essential guide to Lean transformation*. Buckingham: Buckingham Production and Inventory Control Systems and Industrial Engineering Books.
- Jasiński, W. (2014). Techniczne zabezpieczenie ciągłości procesu produkcyjnego w przykładowym przedsiębiorstwie przemysłu lekkiego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie*, 62, 31-46.
- Kamiński, P. (2021). *Identyfikacja technologiczna wytwarzania prętów mosiężnych przy wykorzystaniu modeli symulacyjnych i probabilistycznych*. Praca doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.
- Knosala, R. (2017). *Inżynieria produkcji – kompendium wiedzy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Kramarz, W. (2012). Model sterowana przepływami materiałowymi w sieci produkcyjnej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie*, 60, 153-163.
- Krwawicz, M. (2018). *Podstawy organizacji i zarządzania*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Law, A., Kelton, D. (2000). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Li, L., Chang, Q., Ni, J. (2009). Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 47(18), 5019-5036.
- Maciąg, A., Pietroń, R., Kukła, S. (2013). *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Martinkovic, K. (2018). *Computer simulation in the assessment of new production variants*. Diploma thesis, University of Žilina.
- Michalski, E. (2013). *Zarządzanie przedsiębiorstwem: podręcznik akademicki*. Warszawa: PWN.
- Nieporowski, P. (2015). Etyka niejawnej obserwacji uczestniczącej jako metody badawczej stosowanej w naukach społecznych. *Rocznik Lubuski*, 41, 1, 67-76.
- Nowak, R. (2002). *Statystyka dla fizyków*. Warszawa: PWN.
- Orłowski, C., Lipski, J., Loska, A. (2012). *Informatyka i komputerowe wspomaganie prac inżynierskich*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Plinta, D. (2015). *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- Plinta, D., Więcek, D. (2012). *Production system design*. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- Plucińska, A., Pluciński, E. (2000). *Probabilistyka*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Salwin, M., Krystosiak, K. (2018). Zastosowanie narzędzi inżynierii jakości w procesie wytwarzania tworzyw sztucznych. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, 19, 213-228.
- Spring, M., Dalrymple, J.F. (2000). Product customisation and manufacturing strategy. *International Journal of Operations and Production Management*, 441-467.

- Subramaniam, M., Skoogh, A., Salomonsson, H., Bangalore, P., Bokrantz, J. (2018). A data driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines. *Computers & Industrial Engineering*.
- Thürer, M., Stevenson, M. (2018). Bottleneck-oriented order release with shifting bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics*, 197, 275-282.
- Woepfel, M. (2009). *Jak wdrożyć teorię ograniczeń w firmie produkcyjnej*. Warszawa: Wydawnictwo MiNT Book.
- Wolniak, R. (2015). *Zarządzanie współczesną organizacją*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Wójcik, P. (2013). *Znaczenie studium przypadku jako metody badawczej w naukach o zarządzaniu*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH, Fundacja Promocji i Akredytacji Kierunków Ekonomicznych.

## **DETERMINING THE BOTTLENECK IN A METALLURGICAL COMPANY USING THE ARENA SIMULATION PACKAGE**

### **Summary**

The aim of the article is to present the research methodology for determining the bottleneck in a metallurgical company. At the beginning, the importance of simulation methods in production engineering is discussed. Then, the production process of brass rods in a selected company in the metallurgical industry is characterized, taking into account the specificity of individual workstations in real production conditions. It was arbitrarily assumed that statistical models based on a triangular, normal and uniform distribution are used to describe the phenomena occurring in the analyzed production process, adequate to the actual operating conditions at individual production stations. Next, an attempt is made to present the mutual relations between the existing production stations and to combine them into one production system. This was done using the ARENA simulation model. In the proposed approach, the computer simulation allowed us to isolate the bottleneck in the presented technological process of producing brass bars. The theoretical solution was verified using statistical methods in industrial conditions, and the results show the possibility of increasing production efficiency. The conducted research identified the activities and estimated their impact on the occurrence of the bottleneck in the production process.

**Keywords:** computer simulation, production process, ARENA, bottleneck