

Mgr inż. Ewelina MASIARZ
Dr hab. inż. Hanna KOWALSKA, prof. SGGW
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

SPOSOBY OPTYMALIZACJI PROCESÓW PRODUKCYJNYCH W MAŁYCH ZAKŁADACH PIEKARNICZYCH®

Optimization methods of the production processes in the small bakeries®

Słowa kluczowe: optymalizacja, program symulujący ARENA, piekarnia.

Mechanizacja zakładów produkcyjnych narzuciła konieczność opracowania systemów komputerowych, pozwalających na ich sprawną organizację, kontrolę oraz optymalizację. W niniejszym artykule dokonano przeglądu publikacji naukowych prezentujących efekty zastosowania technik symulacyjnych do analizy oraz optymalizacji procesów produkcyjnych w zakładach piekarskich, a także opisano korzyści wynikające ze stosowania modeli komputerowych w analizach procesów. W tym kontekście dokonano skróconego opisu programu ARENA - będącego jednym z najbardziej wszechstronnych narzędzi symulacyjnych - oraz zaprezentowano przykładowy wynik optymalizacji.

Key words: optimization, ARENA simulation tool, bakery.

The mechanization of production plants imposed the necessity to develop computer systems allowing them to be efficiently organized, controlled and optimized. The following article reviews scientific publications presenting the effects of the use of simulation techniques for analysis and optimization of production processes in bakeries, as well as the benefits resulting from the use of computer models in process analyzes. In this context, an abbreviated description of the ARENA program - which is one of the most comprehensive simulation tools - was made and the sample result of the optimization carried out with its use was presented.

WSTĘP

Chleb zaczęto wypiekać już około 12 tysięcy lat temu. Początkowo był on symbolem dobrobytu, ze względu na to, iż mogli sobie na niego pozwolić jedynie ludzie bogaci lub o wysokim statusie społecznym. Pierwsza jego forma nie przypominała współczesnego bochenka, lecz mazistą mieszanek składającą się z mąki i zbóż: prosa, pszenicy, żyta. Wypiek odbywał się za pomocą rozgrzanych kamieni lub gorącego popiołu albo węgla. Z biegiem lat szukano lepszych, bardziej praktycznych rozwiązań. Odkrycie żelaza było przełomem w piekarnictwie, ponieważ zaczęto wytwarzać pierwsze blachy do pieczenia. Ułatwiało to wypiek. W kolejnych latach nastąpił rozwój pieców oraz narzędzi pomocniczych, które są stale udoskonalane, aby ułatwić pracę w piekarni i oszczędzić zużycie energii. Większość prac ręcznych zostało zastąpione pracą maszyn. Obecnie, jeśli zakład nie ma ograniczeń finansowych, firmy zaopatrują się w nowoczesne, zmechanizowane linie produkcyjne [1,3].

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości optymalizacji i symulacji procesów produkcyjnych w małych zakładach piekarskich z wykorzystaniem nowoczesnych programów komputerowych na przykładzie dostępnych publikacji naukowych oraz badań własnych.

ROLA TECHNIK SYMULACYJNYCH W OPTYMALIZACJI PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

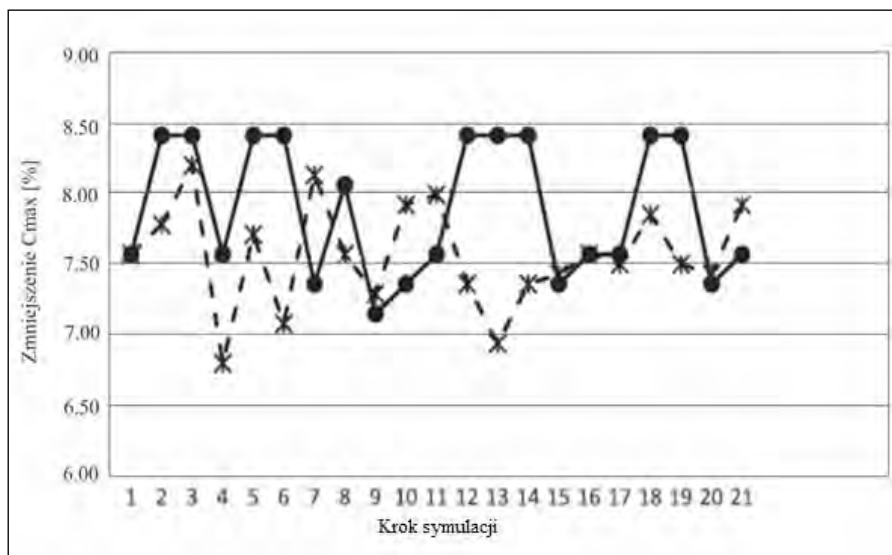
Mechanizacja zakładów piekarniczych wiązała się z koniecznością opracowania systemów komputerowych, pozwalających na ich sprawną organizację, kontrolę oraz optymalizację, narzuconą przez szybki rozwój gospodarki oraz wzrost konsumpcji. Obecnie na dużą skalę używa się technik symulacyjnych, które są rodzajem wirtualnego odtworzenia zachowania układu rzeczywistego. Zbudowany model reprezentuje każdy ważny krok w odtwarzanym fragmencie rzeczywistego procesu oraz każdą ważną interakcję między zasobami, po to, aby poznać w realnym procesie efekty podjętych decyzji [12]. Symulacja umożliwia badanie i analizowanie modelu projektu, ściśle opartego na czynniku czasowym. Ważne, aby pod uwagę brane były wszystkie dostępne zasoby i występujące ograniczenia oraz oddziaływania czynników w jednostce czasu. Dobrze zbudowany i przemyślany model powinien odpowiadać więc rzeczywistej sytuacji tak, by każda zmiana w modelu miała takie same skutki, jakie mogą wystąpić w warunkach rzeczywistych [14]. Dużą zaletą symulacji jest możliwość relatywnie szybkiego i mało ryzykownego finansowo przetestowania „nowych” rozwiązań przed

wprowadzeniem ich w życie w zakładzie rzeczywistym. Zmieniając dane wejściowe do modelu i/lub jego parametrów, można śledzić wyniki w postaci danych wyjściowych. Takie modele symulacyjne można budować zarówno dla istniejących, jak i dopiero projektowanych systemów na różnych poziomach szczegółowości. Efekty symulacji można poznać zazwyczaj w bardzo krótkim czasie, możliwe jest więc wykonanie wielu iteracji, prób i przetestowanie kilku wariantów, a także porównanie otrzymanych wyników w celu wybrania najwłaściwszej i najbardziej niezbędnej w danym momencie strategii produkcji. Pozwala to uniknąć często kosztownych i czasochłonnych eksperymentów oraz badań terenowych. W każdej symulacji istotne jest wybranie odpowiedniej metody modelowania, a także przygotowanie merytoryczne, które często pozwala ograniczyć koszty. Bardzo ważnym elementem każdej symulacji jest weryfikacja poprawności działania modelu poprzez porównanie otrzymanych wyników z rzeczywistymi danymi [9]. Na potrzeby optymalizacji procesów technologicznych stosowanych w przemyśle wykorzystuje się odpowiednie kody, pozwalające na symulację, a następnie optymalizację procesów. Niektóre programy bazują na bardzo szerokim wachlarzu funkcjonalności, np.: AUTOMOD, WITNESS, ARENA. Ostatni z nich, dzięki bardzo uogólnionej idei jednostki symulacyjnej, stosowany jest przez wiele koncernów na całym świecie, związanych z bardzo zróżnicowanymi sektorami gospodarki. Wśród firm stosujących Arenę do symulowania oraz optymalizacji procesów można wymienić m.in. General Motors, UPS, IBM, Nike, Xerox, Lufthansę czy Ford Motor Company [8, 13]. Oprogramowanie to oparte jest o zorientowany obiektowo język SIMAN, dający możliwość dopasowania budowy programu do dowolnie wybranego zagadnienia. Możliwe jest symulowanie procesów okresowych i zautomatyzowanych. Użytkownik, stosując moduły (*modules*) buduje ogólny wzorzec (*model*), reprezentując w ten sposób konkretny proces lub ruch logistyczny. Poszczególne moduły łączy się ze sobą, tworząc przepływ jednostek (*entities*). Istotą wszechstronności ARENY jest fakt, że konkretne odniesienie każdego modułu oraz jednostek do rzeczywistych obiektów jest wyborem użytkownika. Każdy moduł posiada natomiast ustalone akcje związane z jednostkami, przepływem oraz czasem. Dane statystyczne związane z cyklami produkcyjnymi można wygenerować w postaci ostatecznego raportu (*output*).

METODY OPTYMALIZACJI PRODUKCJI W ZAKŁADACH PIEKARNICZYCH

Baza publikacji naukowych prezentujących wyniki optymalizacji produkcji w zakładach piekarskich jest stosunkowo uboga. Barsan i Sima [2] zaprezentowali próbę optymalizacji zakresu produkcji w firmie produkującej i sprzedającej wyroby piekarnicze i młynarskie. Dodatkowo, w analizach autorzy uwzględnili strukturę pracowniczą, sieć dystrybucji oraz system szkoleń. Zastosowano model matematyczny oparty o algorytm MOLP (z ang. *Multiple Objective Linear Programming*), dostarczający zestaw optymalnych wartości parametrów produkcyjnych. Stanowią one dane wejściowe, np. wydajność produkcji, poziom kwalifikacji pracowników, zarobki oraz koszty produkcji jednostkowej. Warto podkreślić, że dzięki optymalizacji uzyskano maksymalizację zysków (252% wzrost) przy jednoczesnym zwiększeniu wynagrodzeń

dla pracowników (263% wzrost) i ograniczeniu kosztów produkcji. Uwzględniono wymagania rynkowe oraz konsumenci. Hecker i wsp. [5] zastosowali oprogramowanie ARENA do symulacji i optymalizacji produkcji pieczywa w małej piekarni na terenie Niemiec. Po zebraniu danych dotyczących asortymentu, stosowanych urządzeń oraz obowiązków pracowników zbudowano szczegółowy model, na bazie którego wykonano symulację, a otrzymane wyniki poddano walidacji, porównując je z danymi rzeczywistymi. W następnym kroku autorzy dokonali szczegółowej analizy, dzięki której wykonali optymalizację produkcji. Pozwoliło to na reorganizację procesów, w tym prac ręcznych wykonywanych przez pracowników oraz poprawienie logistyki planu produkcji, np. poprzez wyeliminowanie przestoju w pracy maszyn, które jednocześnie generowały pogorszenie jakości wyrobów. Hecker i wsp. [6] przeprowadzili analizę i optymalizację w zakładzie piekarskim, wykorzystując nowoczesne algorytmy ewolucyjne: algorytm roju cząstek PSO (z ang. *Particle Swarm Optimization*) oraz algorytm mrówkowy ACO (z ang. *Ant Colony Optimization*). Program MATLAB 7.1 użyto jako narzędzia obliczeniowego wykorzystując dane wejściowe opisujące produkcję (40 produktów, 26 procesów) w jednym z małych zakładów piekarskich w Niemczech. Pierwszy z algorytmów (PSO) to mechanizm iteracyjny, przedstawiający sposób zachowania się zwierząt w grupie lub roju podczas wspólnego poszukiwania jedzenia. Każdy jej członek podczas poszukiwań zachowuje odpowiednie odległości od sąsiednich zwierząt, nie zaburzając w ten sposób struktury całej grupy. W momencie odnalezienia źródła pożywienia przez daną jednostkę, pozostali przemieszczają się w jego kierunku zagęszczając rój, nadal nie zmieniając jednak ogólnej struktury. Mechanizm ten wykorzystano w symulacjach komputerowych. Elementy roju to konkretne zagadnienia optymalizacyjne, które podczas kolejnych iteracji przemieszczają się po przestrzeni możliwych rozwiązań, szukając tego najbardziej optymalnego, dającego najkorzystniejsze rezultaty pod względem ekonomicznym lub logistycznym. Drugi z nich (ACO) jest algorytmem iteracyjnym, który wykorzystuje wyspecjalizowany mechanizm komunikacji mrówek. Zwierzęta te stosują feromony w celu oznaczenia drogi do odnalezionego pożywienia, tym samym wytyczając innym mrówkom precyzyjny szlak wiodący do jego źródła. Kolejne zwierzęta wzmacniają szlak feromonowy, dzięki czemu do momentu wyczerpania pożywienia, ślad jest stale aktualizowany. W symulacjach komputerowych mechanizm ten wykorzystano następująco: wirtualna mrówka wybiera na danym etapie konkretne rozwiązanie problemu optymalizacyjnego. Ślad, który pozostawia za sobą jest ściśle powiązany z tym rozwiązaniem, a odpowiednikiem feromonów jest najczęściej funkcja kosztów. Najkorzystniejsze rozwiązania (np. niskie koszty) będą najsilniej przyciągały kolejne wirtualne mrówki w iteracjach, prowadząc je ostatecznie ku najbardziej optymalnemu zestawowi parametrów. Jak wykazano w badaniach Hecker i wsp. [6] (Rys. 1), korzystniejsze rezultaty optymalizacji osiągnięto z użyciem algorytmu roju cząstek, osiągając 8,5% redukcję czasu pracy w zakładzie. Do tego celu posłużyła funkcja kosztów C_{\max} , tj. całkowity czas potrzebny na wykonanie wszystkich prac.



Rys. 1. Przykładowy wynik optymalizacji – procentowa redukcja funkcji kosztów makespan C_{max} (całkowity czas potrzebny na wykonanie wszystkich prac); oznaczenia: • - algorytm roju cząstek (PSO), ✖ - algorytm mrówkowy (ACO).

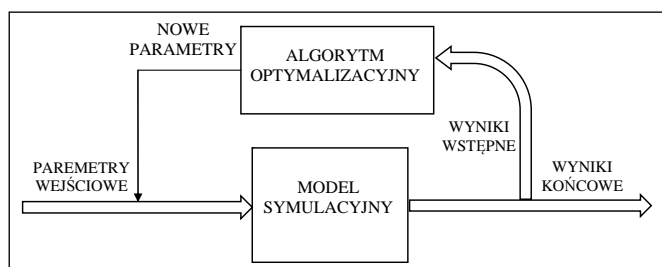
Fig. 1. Sample optimization result - percentage reduction of the makespan C_{max} function (total time needed to complete all work); symbols: • - PSO, ✖ - ACO.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Hecker i wsp. 2013 [6]

Source: Own elaboration based on Hecker *et al.* 2013 [6]

PROGRAM ARENA

Oprogramowanie ARENA jest jednym z najbardziej wszechstronnych narzędzi związanych z modelowaniem procesów produkcyjnych. Głównym czynnikiem warunkującym jego szeroką funkcjonalność jest uogólnienie pojęcia produktu umieszczanego w stworzonym schemacie produkcyjnym. Podstawą wykonywanych obliczeń jest przepływ jednostek (*entities*) przez następujące po sobie moduły (*modules*), gdzie są poddawane odpowiednim procesom (*processes*) przez określony czas. Umożliwia to stworzenie modelu rzeczywistego układu, przyjmując za jednostkę, np. chleb pszenno-żytni, kilogramową porcję ciasta na chleb żytni, a nawet klienta odwiedzającego sklep, zaś za konkretne moduły – czynności, urządzenia, decyzje, wprowadzenie bądź wyprowadzenie jednostki ze schematu i wiele innych. Proces produkcyjny modelowany jest poprzez przypisanie każdemu modułowi parametrów, które najlepiej opisują dany etap



Rys. 2. Zależność między modelem symulacyjnym a algorytmem optymalizacyjnym [4].

Fig. 2. Relation between simulation model and optimization algorithm [4].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Gebus i wsp. 2004 [4]

Source: Own elaboration based on Gebus and *et al.* [4]

i powodują jego urzeczywistnienie. Program daje również możliwość określenia kosztów związanych z produktem, procesem, przestojem itp. Po zakończeniu obliczeń wynik końcowy otrzymuje się w postaci szczegółowego raportu, na bazie którego użytkownik może przeprowadzić optymalizację. Dodatkowo, użyteczną opcją jest obserwacja danych na wykresach dla wybranych jednostek, procesów i wielu szczegółowych parametrów w trybie *on-line* (na bieżąco w trakcie symulacji) [7, 10].

Program ARENA oferuje użytkownikowi wiele modułów o podstawowych, a także nawet bardzo rozwiniętych funkcjach, dzięki którym możliwe jest zaprojektowanie bardzo zaawansowanej linii produkcyjnej, którą buduje się poprzez ciąg połączeń między następującymi po sobie blokami. Całkowity czas przebywania jednostki w układzie determinowany jest przez sumę czasów trwania procesów w kolejnych blokach procesowych i może być zmienny z uwagi na możliwość zastosowania czynnika losowości. Z uwagi na fakt, iż w rzeczywistych systemach czas wykonywania czynności podczas produkcji nie jest stały, wskazane jest zastosowanie

jednego z dostępnych w programie rozkładów statystycznych. Często stosuje się rozkład trójkątny, zadany przez trzy parametry łatwe do określenia w warunkach terenowych: minimum, maksimum oraz wartość najbardziej prawdopodobną (przewidywaną) [11].

Optymalizacja procesów przy użyciu modelu ARENA jest możliwa do przeprowadzenia przy użyciu specjalnego modułu, który w sposób automatyczny bada wpływ zmiany wybranych czynników (*controls*) na ostateczny rezultat. Możliwe jest także ręczne przeprowadzenie optymalizacji poprzez szereg kolejnych symulacji ze zmienionymi danymi wejściowymi i obserwacją wyników, zgodnie z zasadą przedstawioną na rysunku 2.

ZASTOSOWANIE PROGRAMU ARENA DO OPTIMALIZACJI RZECZYWISTEGO PROCESU PRODUKCYJNEGO

W celu przeprowadzenia symulacji procesu produkcyjnego w analizowanym zakładzie piekarskim zastosowano model ARENA. Schemat produkcyjny został skonstruowany tak, aby w jak największym stopniu odzwierciedlał rzeczywistą linię technologiczną wykorzystywaną w analizowanej piekarni. Symulacja opierała się na przepływie jednostek przez kolejne moduły schematu, analogicznie do rzeczywistych półproduktów kierowanych do konkretnego miejsca przerobu/maszyny oraz procesów, jakim je poddawano. Poniżej przedstawiono fragment linii produkcyjnej, odtworzonej w postaci schematu blokowego (Rys. 3). W pierwszym module decyzyjnym (romb) następuje rozgałęzienie przepływu produktów ze względu na sposób ich formowania w modułach procesowych

(prostokąty): na dzielarce, formowanie ręczne oraz wałkownicę. Część asortymentu kierowana jest także na rogalkarkę w kolejnym module decyzyjnym. W ostatnim etapie następuje wykończenie ręczne, umieszczenie w foremkach, następnie na blachach oraz wózkach (zabiegi końcowe).

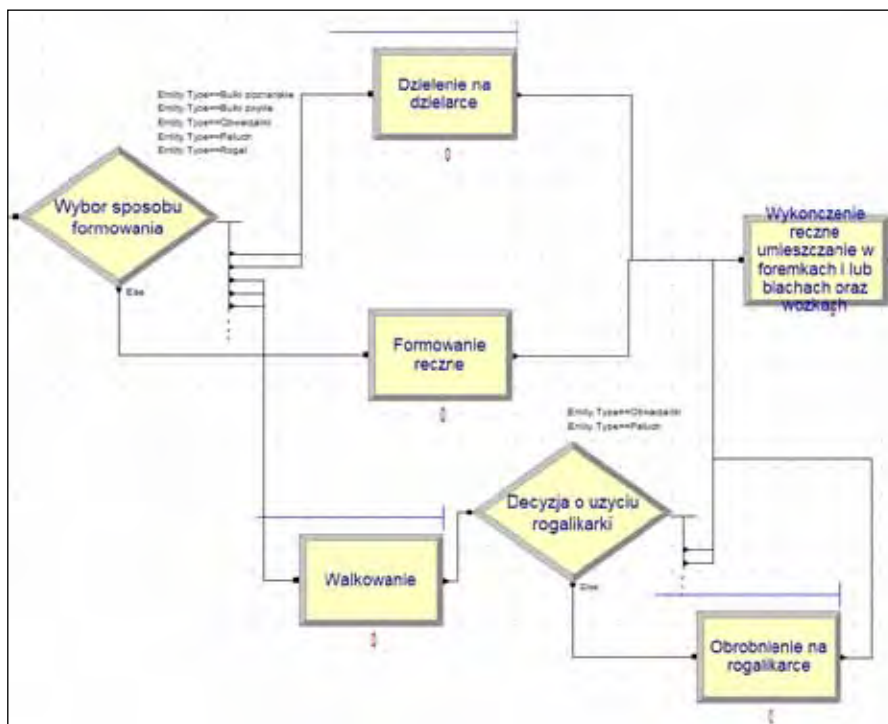
W celu obserwacji wybranych parametrów wynikowych symulacji, generowano wykresy przedstawiające ich zmianę w czasie. Otrzymane wyniki przeanalizowano i sprawdzono, czy są zgodne ze stanem faktycznym (walidacja). Po tej procedurze możliwe stało się przeprowadzenie optymalizacji poprzez wielokrotne symulacje ze zmienionymi parametrami wejściowymi (Rys. 2) oraz obserwację ich wpływu na otrzymywane wyniki, aż do uzyskania najbardziej korzystnych parametrów pracy piekarni z uwzględnieniem zmian w harmonogramie oraz logistyce procesów. Poniżej przedstawiono przykładowy wynik optymalizacji wykorzystania pieca komorowego oraz obrotowego (Rys. 4-5).

Symulacje stanu obecnego wskazały na 140 minutowy przestój pieca obrotowego, co generuje znaczne straty energii (niski wskaźnik ekonomiczny). Ponadto, w przedziale czasu 360 – 410 min od rozpoczęcia zmiany następuje jednoczesny wypiek niewielkiej ilości wyrobów specjalnych w piecu komorowym i obwarzanków w piecu obrotowym (Rys. 4). Wyniki przeprowadzonej symulacji wskazały, że bardziej ekonomiczne będzie wypiekanie obu typów produktów w piecu komorowym, zwiększając tym samym stopień wykorzystania jego powierzchni wypiekowej bez wpływu na jakość asortymentu (Rys. 5).

Dodatkowo, dzięki zmianom w harmonogramie produkcji polegającym na przesunięciu rozpoczęcia produkcji trzeciej partii bułek zwykłych, wykazano możliwość zapewnienia ciągłości wypieku w piecu obrotowym oraz zredukowanie przestojów. Możliwe stało się również całkowite wyłączenie pieca obrotowego pracującego wcześniej przez 160 minut.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie komputerowych technik symulacyjnych w zakładach produkujących żywność pozwala w znacznym stopniu ułatwić oraz przyspieszyć wykonanie analiz oraz optymalizacji procesów. Co więcej, usprawnia to podejmowanie decyzji, umożliwia regularny nadzór i kontrolę. Część z nich opiera się na nowoczesnych algorytmach ewolucyjnych, które odtwarzają mechanizmy podpatrzony w świecie zwierząt.

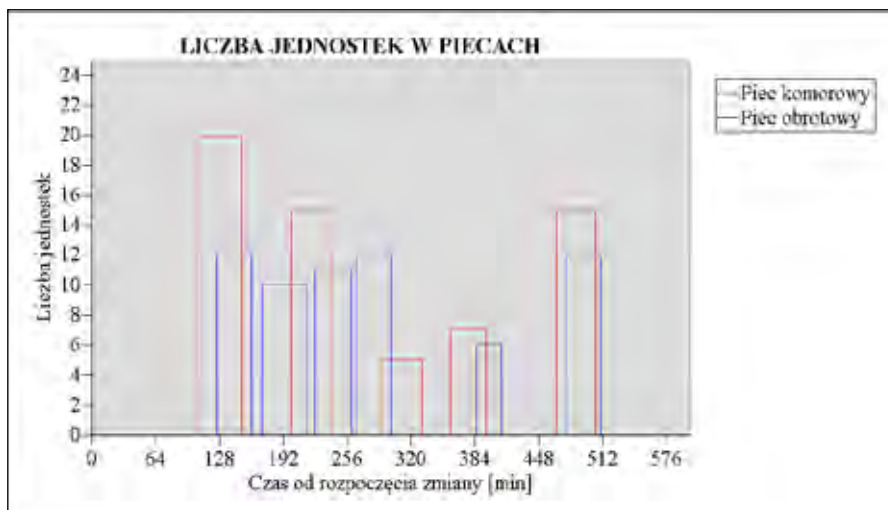


Rys. 3. Przykładowy fragment utworzonego w programie ARENA schematu linii produkcyjnej piekarni, w której następuje formowanie i zabiegi końcowe.

Fig. 3. An example fragment of a bakery production line created in the ARENA program, in which forming and final treatments take place.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 4. Stan wykorzystania pieców przed optymalizacją.

Fig. 4. Ovens utilization during shift before the optimization.

Źródło: Opracowanie własne

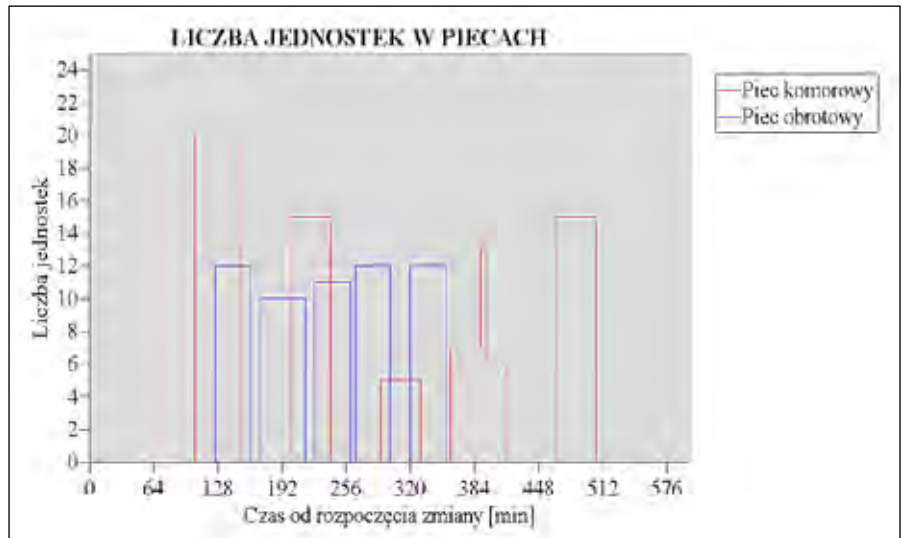
Source: Own study

Wdrożenie modeli symulacyjnych daje pozytywne efekty ekonomiczne oraz logistyczne. Pozwala na zwiększenie zysków przedsiębiorstwa, lepsze wykorzystanie maszyn oraz pracowników, skrócenie czasu trwania poszczególnych procesów produkcyjnych a nawet znaczne zredukowanie kosztów wynikających z błędów w harmonogramie produkcji oraz z przestojów maszyn. Na rynku dostępnych jest kilka programów symulacyjnych, w tym bardzo wszechstronny model

ARENA, który daje użytkownikowi możliwość odtworzenia nawet bardzo skomplikowanej linii produkcyjnej dla zakładu reprezentującego dowolną gałąź przemysłu, łącznie z funkcją optymalizacyjną. Wykorzystanie tego oprogramowania do optymalizacji małej piekarni pozwoliło na osiągnięcie korzyści ekonomicznych oraz logistycznych, wskazując na przestoje w pracy maszyn oraz błędy w harmonogramie produkcji.

LITERATURA

- [1] ANONIM. 2018. „Festiwal Chlebów Świata: Historia chleba”. (<http://chlebyswiata.pl/historia-chleba-2/>) [dostęp 10.10.2018].
- [2] BARSAN S. C., M. G. SIMA. 2010. “Product range optimization – case study, Studies and Scientific Researches”. Economics Edition, No 15.
- [3] FIEDORUK A., A. ZARZYCKI, M. KUNDA. 2009. „Księga chleba”. Wydawnictwo Zysk i S-ka.
- [4] GEBUS S., O. MARTIN, A. SOILAS, E. JUUSO. 2004. „Production optimization on PCB assembly lines using discrete-event simulation”. Control Engineering Laboratory, University of Oulu, Report A, No 24.
- [5] HECKER F., W. HUSSEIN, T. BECKER. 2010. “Analysis and optimization of a bakery production line using ARENA”. International Journal of Simulation Modelling 9 (4): 208-216.
- [6] HECKER F. T., W. B. HUSSEIN, O. PAQUET-DURAND I WSP. 2013. „A case study on using evolutionary algorithms to optimize bakery production planning”. Expert Systems with Applications: An International Journal 40 (17): 6837-6847.
- [7] JOHN B., J. E. JENSON. 2013. „Analysis and Simulation of Factory Layout using ARENA”. International Journal of Scientific and Research Publications 3(2).
- [8] KELTON W. D., R. P. SADOWSKI, N. B. ZUPICK. 2014. „Simulation with ARENA”, 6th edition. McGraw-Hill Education.
- [9] MAŁOPOLSKI W. 2013. „Zastosowanie symulacji komputerowej z elementami grafiki 3D do projektowania systemów transportowych”, XII Forum Inżynierskie ProCax cz II., Kraków.
- [10] NYEMBA W.R., C. MBOHWA. 2017. „Modelling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plant”. Procedia Manufacturing 8: 59-66.
- [11] PRACA ZBIOROWA. 2004. „ARENA User’s Guide”. Rockwell Automation, Doc ID ARENA-UM001A-EN-P.
- [12] PRACA ZBIOROWA. 2007. “Simulation modeling with SIMUL8”, Chapter 1: Introduction to simulation, Visual8 Corporation, ISBN 0-9734285-0-3.
- [13] TAYFUR A., B. MELAMED 2007. „Simulation Modeling and Analysis with ARENA”, 1st Edition. Academic Press.
- [14] WRONA M. 2004. Optymalizacja procesu wytwarzania na przykładzie odlewni. Praca magisterska. Kraków: Wyd. Zarządzania AGH.



Rys. 5. Stan wykorzystania pieców po optymalizacji w programie Arena.
Fig. 5. Ovens utilization during shift after optimization in Arena.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study