

Krystyna CZAPLICKA-KOLARZ, Mariusz KRUCZEK

Politechnika Śląska

Wydział Organizacji i Zarządzania

Instytut Zarządzania i Administracji

Jerzy KOROL

Główny Instytut Górnictwa

Zakład Inżynierii Materiałowej

ANALIZY PRZEPIYU MATERIAŁÓW W OCENIE SYSTEMU PRODUKCYJNEGO NA PRZYKŁADZIE BIOKOMPOZYTÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie nowych narzędzi w zarządzaniu środowiskowym, jakimi są analiza przepływu materiału (MFA – Material Flow Analysis) i rachunek kosztów przepływu materiałów (MFCA – Material Flow Cost Accounting). Celem artykułu jest wskazanie korzyści z zastosowania tych narzędzi w zarządzaniu produkcją i gospodarką materiałową w systemie produkcyjnym. MFA służy ocenie i doskonaleniu przepływu materiałów i energii pomiędzy jednostkowymi procesami produkcyjnymi, MFCA pozwala na przeprowadzenie analizy kosztów przepływów materiałowych w systemie produkcyjnym. Artykuł uzupełnia praktyczne wykorzystanie narzędzi MFA i MFCA systemu produkcyjnego biokompozytów.

THE MATERIAL FLOW ANALYSES IN PRODUCTION SYSTEM ASSESSMENT ON EXAMPLE OF BIOCOMPOSITES

Summary. This paper presents a new tools for environmental management, which are the MFA – Material Flow Analyses and MFCA – Material Flow Cost Accounting. MFA is used to analyze the physical flow of material, energy for each technological process consisting of many unit processes as well as for each unit process. MFCA – is a management tool that assists organizations in better understand the potential environmental and financial consequences of their material and energy practices and seeks to improve them via changes in those practices. The purpose of this article is an indication of the benefits of using these tools both in a production process, as well as within the organization and processes. An analysis of the MFA and the MFCA were shown in the example of the production systems of the biocomposites.

1. Wprowadzenie

W zarządzaniu produkcją szczególnie istotne jest zagadnienie projektowania przepływów w systemach produkcyjnych. Wpływa ono praktycznie na organizację procesów produkcyjnych zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Głównymi celami działania systemów produkcyjnych są jakość i nowoczesność produktów, wzrost produktywności oraz obniżanie kosztów wytwarzania¹. Analizowane dotychczas aspekty środowiskowe procesów produkcyjnych skupiały się na ograniczaniu emisji zanieczyszczeń, ilości powstających odpadów oraz wycinkowo związanych z tymi problemami kosztów. Do tej pory niewiele uwagi poświęcano w obszarze zarządzania produkcją holistycznemu ujęciu oddziaływania procesu produkcyjnego na środowisko i koszty, które są generowane w systemie produkcyjnym. Propozycją oceny systemów produkcyjnych z perspektywy oddziaływania środowiskowego i kosztowego jest ekoefektywność². Obecnie poszukuje się metod i narzędzi umożliwiających ocenę i doskonalenie zużycia materiałów i energii w systemach produkcyjnych, uwzględniając przy tym aspekty cyklu życia. Do takich narzędzi należą między innymi analiza przepływu materiału (MFA – Material Flow Analysis) i rachunek kosztów przepływu materiałów (MFCA – Material Flow Cost Accounting). Biokompozyty są materiałami powszechnie stosowanymi w produkcji, które w zależności od składu cechują się różną kosztocłonnością i mogą mieć różne oddziaływanie na środowisko. Podejmowane w literaturze³ analizy oddziaływania środowiskowego zastosowania biokompozytów w produkcji wskazują, że istotnymi aspektami w ocenie oddziaływania środowiskowego są recykling materiałowy i biodegradacja w kompostowniach lub składowiskach po zakończeniu fazy użytkowania.

¹ Por. m.in.: Durlik I.: Inżynieria zarządzania. Placet, Warszawa 2007; Bendkowski J., Matuszek M.: Logistyka produkcji praktyczne aspekty części i planowanie i sterowanie produkcją. Politechnika Śląska, Gliwice 2013; Burchart-Korol D., Furman J.: Zarządzanie produkcją i usługami. Podręcznik akademicki. Politechnika Śląska, Gliwice 2007.

² Burchart-Korol D.: Ekoefektywność – nowym kryterium oceny systemu produkcyjnego. „Logistyka”, nr 6, 2012, s. 40-43.

³ Por. m.in.: Kendall A.: A life cycle assessment of biopolymer production from material recovery facility residuals. “Resources, Conservation and Recycling”, No. 61, 2012, p. 69-74; Akiyama M., Tsuge T., Doi Y.: Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. “Polym Degrad Stab”, No. 80, 2003, p. 183-194; Patel M., Narayan R.: How sustainable are biopolymers and biobased products? The hope, the doubts, and the reality. [in:] Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. (eds.): Natural fibers, biopolymers and biocomposites. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL 2005; Korol J., Burchart-Korol D.: Ocena cyklu życia systemu produkcyjnego biopolimerów. „Logistyka”, nr 6, 2012, s. 148-150.

2. Narzędzie analizy przepływów materiałów w systemie produkcyjnym

2.1. Analiza przepływu materiałów (MFA – Material Flow Analysis)

Modelowanie przepływu materiałów pozwala wpłynąć pozytywnie na efektywność systemu produkcyjnego przez lepsze wykorzystanie zasobów, ograniczenie zużycia energii oraz powstawania odpadów. Pojawiające się obecnie oprogramowanie do modelowania przepływu materiałów umożliwia symulowanie nie tylko procesów przemysłowych, lecz także dowolnych procesów, w których występuje przepływ materiałów i energii. Podstawą prowadzonych analiz jest określenie w pierwszym kroku budowania modelu celu analizy oraz granic predefiniowanego systemu⁴. W analizach z wykorzystaniem MFA przyjmuje się, że sieci przepływu materiałów są specjalną formą sieci Petriego i na tej podstawie tworzone są modelowe przepływy materiałów i energii w złożonych systemach produkcyjnych. W takim systemie można wyodrębnić wiele procesów jednostkowych i prowadzić analizę ich wpływu na środowisko⁵. MFA można przeprowadzić, wykorzystując programy, które pozwalają na wykonanie analiz sieci przepływu oraz pełną wizualizację przepływów materiałowych i energetycznych. Do takich programów należy między innymi Umberto Universal, które oprócz analizy MFA umożliwia przeprowadzenie oceny cyklu życia LCA (Life Cycle Assessment) i ocenę kosztów cyklu życia LCC (Life Cycle Costing).

Wynikiem zaimplementowanych algorytmów analitycznych jest możliwość ustalenia efektywności między innymi w odniesieniu do analizowanego systemu produkcyjnego⁶. Wykorzystanie sieci przepływu w programie Umberto umożliwia dodatkowo wizualizację przepływu materiałów i energii w analizowanym systemie (lub w razie potrzeby procesie i/lub technologii). Wizualizacja ta może być przedstawiona w formie listy zinventaryzowanych danych wejściowych i wyjściowych lub w postaci diagramów Sankeya. Zastosowanie diagramów Sankeya umożliwia wizualną analizę systemu; wskazuje, gdzie występują przepływy i jaką mają wielkość. W złożonych procesach produkcyjnych, składających się z wielu procesów jednostkowych, analiza sieci przepływu materiałów lub energii w postaci diagramów Sankeya umożliwia zidentyfikowanie przepływów, które przyczyniają się do nadmiernego marnotrawstwa i wpływają na większe zanieczyszczenia. Wykonanie analizy MFA połączone z wizualizacją przepływów pozwala na przeprowadzenie modyfikacji danych

⁴ www.knowtheflow.com/2013/5-steps-towards-maximum-resource-efficiency-material-flow-modeling-made-easy/#more, 16.12.2014.

⁵ Wohlgemuth V. et al.: Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection. "Environmental Modelling & Software", Vol. 21(11), 2006, p. 1607-1617.

⁶ Ibidem.

procesów jednostkowych, tak by finalnie osiągnąć cele środowiskowe, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej efektywności procesów produkcyjnych⁷.

2.2. Rachunek kosztów przepływu materiałów (MFC – Material Flow Cost Accounting)

MFC jest narzędziem, które służy do analizy i oceny kosztów przepływu materiałów zarówno w odniesieniu do systemów produkcyjnych, jak i produktów oraz przedsiębiorstw. Wytyczne dotyczące zasad i struktury rachunku kosztów przepływu materiałów (MFC) zostały ujęte w normie ISO 14051:2011⁸. Zastosowanie MFC pozwala na zidentyfikowanie i ocenę kosztów materiałowych, energetycznych, systemowych oraz zarządzania odpadami. Do wykonania analiz MFC można wykorzystać programy, które umożliwią przeprowadzenie analiz sieci przepływu kosztów oraz pełną wizualizację przepływów materiałowych i energetycznych. Do takich programów należy Umberto Universal⁹. Wizualizacja wyników MFC w postaci diagramów Sankeya pozwala na łatwą identyfikację miejsc w systemie produkcyjnym, w których dochodzi do generowania nadmiernych kosztów. Zastosowanie MFC w wąskim zakresie pozwala na oszacowanie kosztów związanych z wykorzystanymi w produkcji materiałami i energią, natomiast kompleksowa analiza MFC umożliwia lepsze wykorzystanie zasobów oraz przeprowadzenie analizy i oceny systemu produkcyjnego pod kątem efektywności kosztowej^{10, 11}. MFC jest zatem narzędziem zarządzania środowiskowego, które może wspomagać podejmowanie decyzji dotyczących funkcjonowania systemu produkcyjnego. MFC w porównaniu z konwencjonalnymi metodami rachunku kosztów niesie ze sobą również wiele korzyści, z których za najistotniejszą uznać należy uwzględnienie podejścia przez pryzmat analizy cyklu życia, a więc uwzględnienie oddziaływania procesu na środowisko na każdym etapie cyklu życia produktu.

2.3. Metodyka oceny MFA i MFC

Połączenie MFA i MFC pozwala na przeprowadzenie kompleksowej oceny systemu produkcyjnego i zachodzących w nim procesów z perspektywy przepływów materiałowych

⁷ www.knowtheflow.com/2012/31-innovations-for-maximum-resource-efficiency-in-the-manufacturing-industry/#more, 15.12.2014.

⁸ PN-EN ISO 14051:2011 Zarządzanie środowiskowe – Rachunkowość kosztów przepływu materiałów – Zasady ogólne.

⁹ Wohlgemuth V. et al.: op.cit.

¹⁰ Strobel M., Redmann C.: Flow Cost Accounting, an accounting approach based on the actual flows of materials, [in:] Bennett M., Bouma J., Wolters T. (eds.): Environmental Management Accounting, informational and institutional developments. Kluwer, Dordrecht et al., 2002, p. 67-82.

¹¹ Kokubu K., Campos M., Furukawa Y., Tachikawa H.: Material flow cost accounting with ISO 14051. "ISO Management Systems", No. 1, 2009, p. 15-18.

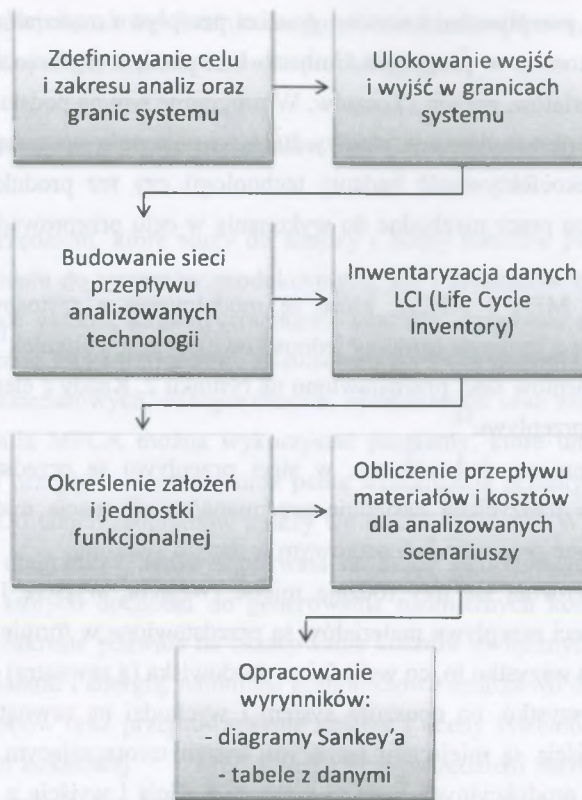
i związanych z tymi przepływami kosztów. Analiza przepływu materiałów MFA i kosztów MFCA zostanie wykonana w programie Umberto Universal, który umożliwia opracowanie sieci przepływu materiałów, energii i kosztów. W programie tym na podstawie opracowanych sieci MFA możliwe jest wykonanie analizy LCA, a następnie po uwzględnieniu MFCA można wyznaczyć efektywność badanej technologii czy też produktu. Na schemacie (rys. 1) przedstawiono prace niezbędne do wykonania w celu przeprowadzenia analiz MFA i MFCA.

Sieci przepływu MFA i MFCA, które są modelowane z zastosowaniem programu Umberto, składają się z tranzycji (procesy jednostkowe), miejsc i strzałek¹². Graficzną formę poszczególnych elementów sieci przedstawiono na rysunku 2. Każdy z elementów sieci pełni inną funkcję w sieci przepływu¹³:

- **tranzycje** – procesy jednostkowe, w sieci przepływu są przedstawione w formie kwadratów, w tranzycjach następuje przemiana/transformacja materiałów i energii, odpowiadają one procesom jednostkowym w danym systemie;
- **miejsca** – rozróżnia się trzy rodzaje miejsc: **wejścia, wyjścia i łączniki**. Wejścia i wyjścia w sieci przepływu materiałów są przedstawione w formie okręgów. Wejścia charakteryzują wszystko to, co wchodzi ze środowiska (z zewnątrz) do danego systemu. Wyjścia to wszystko, co opuszcza system i wychodzi na zewnątrz do środowiska. Wejścia i wyjścia są miejscami łączącymi system z otaczającym go środowiskiem. W systemach produkcyjnych będą to wektory wejścia i wyjścia z systemu. Łączniki w sieciach przepływu są przedstawione jako dwa koncentryczne okręgi. Łączniki znajdują się pomiędzy tranzycjami, pełnią funkcję buforów/zapasów, które są na bieżąco wykorzystywane i uzupełniane przez przepływ. Za ich pośrednictwem połączone są poszczególne procesy jednostkowe w analizowanym systemie, jeżeli pomiędzy określonym procesem jednostkowym a procesem poprzedzającym nie ma etapu magazynowania. Wyjście z jednego procesu jednostkowego jest jednocześnie wejściem do kolejnego procesu lub procesów jednostkowych za pośrednictwem łączników;
- **strzałki** – łączą ze sobą miejsca oraz tranzycje i tworzą w ten sposób strukturę sieci przepływu. Pokazują przepływy, przedstawiają jak materiały, energia i koszty przemieszczają się między miejscami i tranzycjami.

¹² Pojęcia tranzycji, miejsc i strzałek zaczerpnięto bezpośrednio z programu Umberto Universal, autorzy nie wprowadzali innego tłumaczenia na język polski.

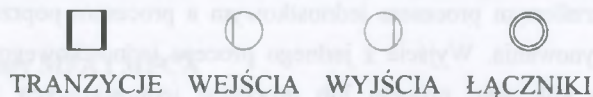
¹³ Wohlgemuth V. et al.: op.cit.



Rys. 1. Etapy opracowania analiz MFA i MFCA

Fig. 1. Stages in MFA and MFCA analysis

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie elementów sieci przepływu

Fig. 2. Graphical representation for elements of the flow network

Źródło: Oprogramowanie Umberto Universal.

3. Analizy MFA i MFCA w systemie produkcyjnym biokompozytów

Narzędzia analizy przepływu materiałów i rachunku kosztów przepływu materiałów wykorzystano w badaniach nad systemem produkcyjnym biokompozytów na bazie skrobi termoplastycznej. Stosowanie polimerów i kompozytów na bazie surowców odnawialnych

staje się coraz bardziej powszechne. Materiały te charakteryzują się mniejszą uciążliwością dla środowiska niż tradycyjne tworzywa polimerowe wytwarzane z paliw kopalnych. Jednym z kierunków wytwarzania biokompozytów są właśnie kompozycje polimerowo-skrobiowe. Skrobia natywna (niemodyfikowana) ma bardzo ograniczone zastosowanie praktyczne ze względu na silne właściwości hydrofilowe, słabą rozpuszczalność oraz niekorzystne właściwości mechaniczne, dlatego też poddaje się ją modyfikacji celem ograniczenia jej niekorzystnych cech. Dla poprawy właściwości przetwórczych oraz użytkowych biokompozytów często wprowadza się dodatki modyfikujące¹⁴, które wpływają nie tylko na właściwości biokompozytów, lecz także na koszty ich wytworzenia.

W pierwszym etapie wykonano analizę MFA, a następnie na podstawie zebranych danych wsadowych i analizy MFA przeprowadzono rachunek kosztów przepływów MFCA. Analizy MFA i MFCA wykonano dla dwóch wariantów procesu produkcyjnego detali wykonanych w technologii wtryskiwania. Pierwszy wariant zakłada, że odpady powstające podczas wtryskiwania nie są ponownie wykorzystywane w analizowanym systemie produkcyjnym. Drugi wariant przewiduje, że powstające podczas etapu wtryskiwania odpady są przetwarzane w dodatkowym procesie jednostkowym, w wyniku którego mają one postać pozwalającą na ich zawrócenie do procesu produkcyjnego i ponowne wykorzystanie. W analizach uwzględniono następujące materiały wchodzące w skład analizowanych biokompozytów:

- uzyskana we własnym zakresie skrobia termoplastyczna podczas modyfikacji skrobi natywnej w procesie wytłaczania w obecności gliceryny i modyfikatora (TPS),
- polietylen wysokiej gęstości (PE),
- kopatybilizator – polietylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym (PB),
- polikaprolakton (PCL).

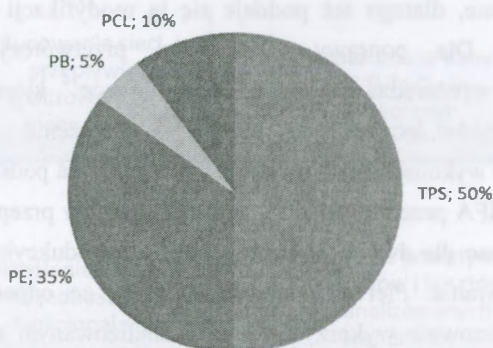
Polikaprolakton wprowadzono w celu poprawy właściwości użytkowych finalnego biokompozytu i zwiększenia jego podatności na biodegradację. PCL pomimo tego, że nie jest wytwarzany z surowców odnawialnych jak w przypadku skrobi termoplastycznej, jest ropopochodnym polimerem biodegradowalnym¹⁵.

Za jednostkę funkcjonalną przyjęto 100 kg wytworzonych detali na bazie uzyskanych biokompozytów. Detale wytwarzano w technologii wtryskiwania. Zawartość podstawowych komponentów analizowanych biokompozytów przedstawiono na rysunku 3. Jako granice systemu przyjęto część procesu produkcyjnego, obejmującego wytwarzanie biokompozytów, składającego się z następujących procesów jednostkowych:

¹⁴ Korol J.: Effect of static mixer on the properties of HDPE/modified starch biocomposites. "Przemysł Chemiczny", nr 93(4), 2014, s. 457-463.

¹⁵ Szczegółowo proces otrzymywania analizowanych biokompozytów oraz ich właściwości fizykochemiczne przedstawiono w pracach: Korol J.: Effect..., op.cit. oraz Korol J., Lenża J., Formela K.: Manufacture and research of TPS/PE biocomposites properties, Composites Part B. "Engineering", No. 68, 2015, p. 310-316.

- przygotowanie skrobi natywnej do modyfikacji (mieszalnik),
- modyfikacja skrobi natywnej w wyciarczce (wyciarczarka),
- wyciarczanie reaktywne biokompozytów (wyciarczarka),
- formowanie detali/wyprasek z wytworzonych uprzednio biokompozytów (wtryskarka).



Rys. 3. Zawartość komponentów dla analizowanego biokompozytu

Fig. 3. The components content for analyzed biocomposites

Źródło: Opracowanie własne.

Materiały wchodzące do i wychodzące z poszczególnych procesów jednostkowych oraz średnie ceny surowców i energii elektrycznej¹⁶ wykorzystanych w analizach zebrano w tab. 1.

Pierwszy etap analiz MFA i MFCA polegał na opracowaniu modeli analizowanych systemów produkcyjnych w postaci sieci przepływów. Analizy wykonano dla dwóch wariantów technologii wytwarzania detali/wyprasek z biokompozytu TPS/PE/PCL. Na rysunku 4 przedstawiono modele sieci procesu produkcyjnego wytwarzania analizowanych biokompozytów i produkcji detali na bazie tych biokompozytów w dwóch wariantach. W wariantcie 1. przyjęto, że powstający podczas procesu wtryskiwania odpad nie jest zwracany do procesu, natomiast wariant 2. procesu produkcyjnego wytwarzania analizowanych biokompozytów i produkcji detali na bazie tych biokompozytów zakłada, że powstający odpad jest zwracany do procesu po uprzednim rozdrobnieniu umożliwiającym ponowne wykorzystanie podczas produkcji wyprasek.

¹⁶ Ceny surowców i energii elektrycznej określono na podstawie danych z portali: www.plastech.pl, 15.12.2014, oraz www.tworzywa.com.pl, 15.12.2014.

Tabela 1

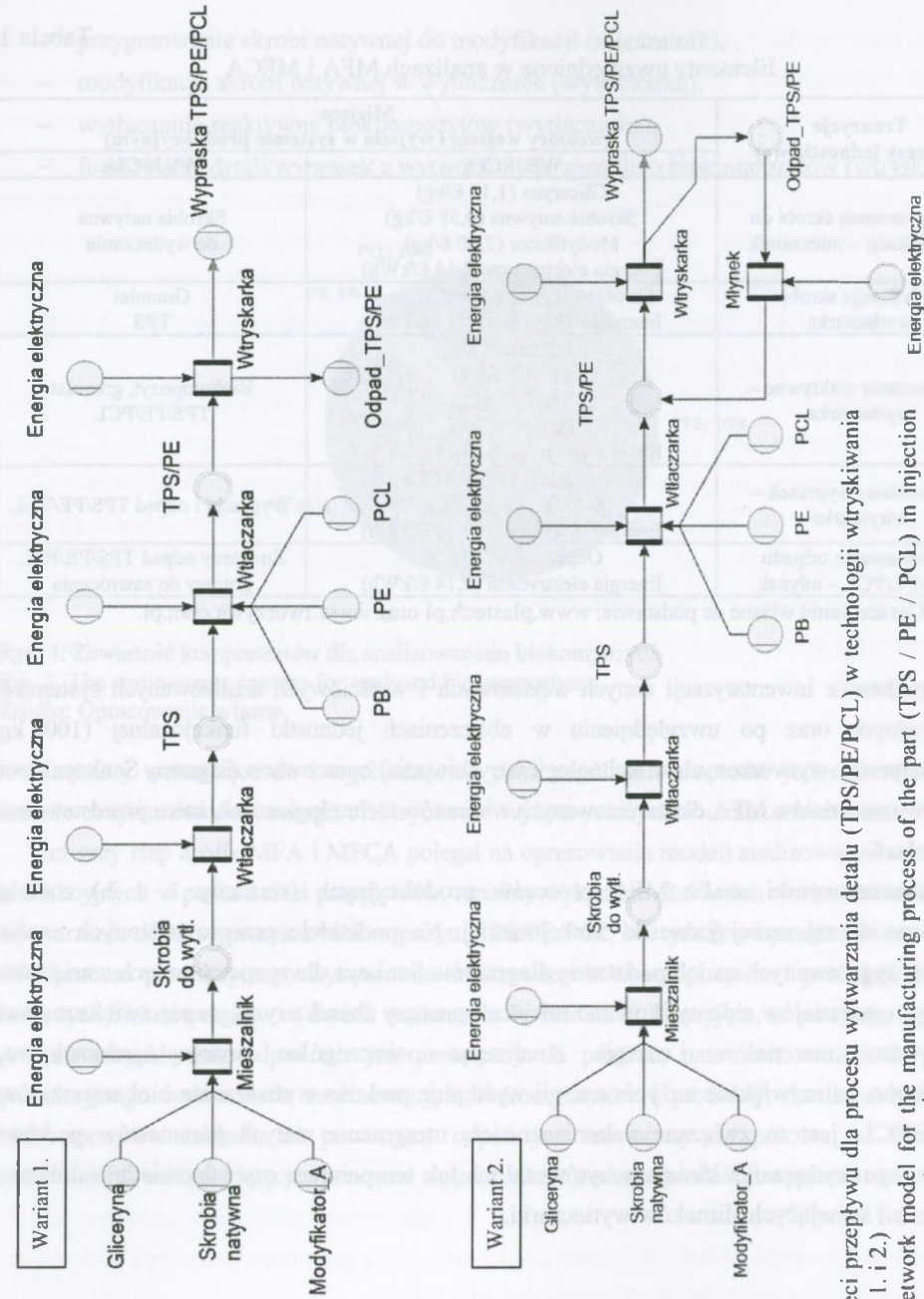
Elementy uwzględnione w analizach MFA i MFCA

Tranzycje (procesy jednostkowe)	Miejsca (wektory wejścia i wyjścia w systemie produkcyjnym)	
	WEJŚCIA	WYJŚCIA
Przygotowanie skrobi do modyfikacji – mieszalnik	Gliceryna (1,15 €/kg) Skrobia natywna (0,58 €/kg) Modyfikator (2,00 €/kg) Energia elektryczna (0,14 €/kWh)	Skrobia natywna do wytlaczania
Modyfikacja skrobi – wytlaczarka	Skrobia natywna do wytlaczania Energia elektryczna (0,14 €/kWh)	Granulat TPS
Wytlaczanie reaktywne – wytlaczarka	Granulat TPS PE (1,8 €/kg) PB (5,7 €/kg) PCL (12 €/kg) Energia elektryczna (0,14 €/kWh)	Biokompozyt, granulat TPS/PE/PCL
Formowanie wyprasek – wtryskarka	Granulat TPS/PE/PCL Odpad TPS/PE/PCL Energia elektryczna (0,14 €/kWh)	Wypraski i odpad TPS/PE/PCL
Przetwarzanie odpadu TPS/PE/PCL – młynek	Odpad TPS/PE/PCL Energia elektryczna (0,14 €/kWh)	Zmielony odpad TPS/PE/PCL gotowy do zawrócenia

Zródło: Opracowanie własne na podstawie: www.plastech.pl oraz www.tworzywa.com.pl.

Na podstawie inwentaryzacji danych wejściowych i wyjściowych analizowanych systemów produkcyjnych oraz po uwzględnieniu w obliczeniach jednostki funkcjonalnej (100 kg detalu/wyprasek wytworzonych w technologii wtryskiwania) opracowano diagramy Sankeya sieci przepływu materiałów MFA dla analizowanych wariantów technologicznych, które przedstawiono na rysunku 5.

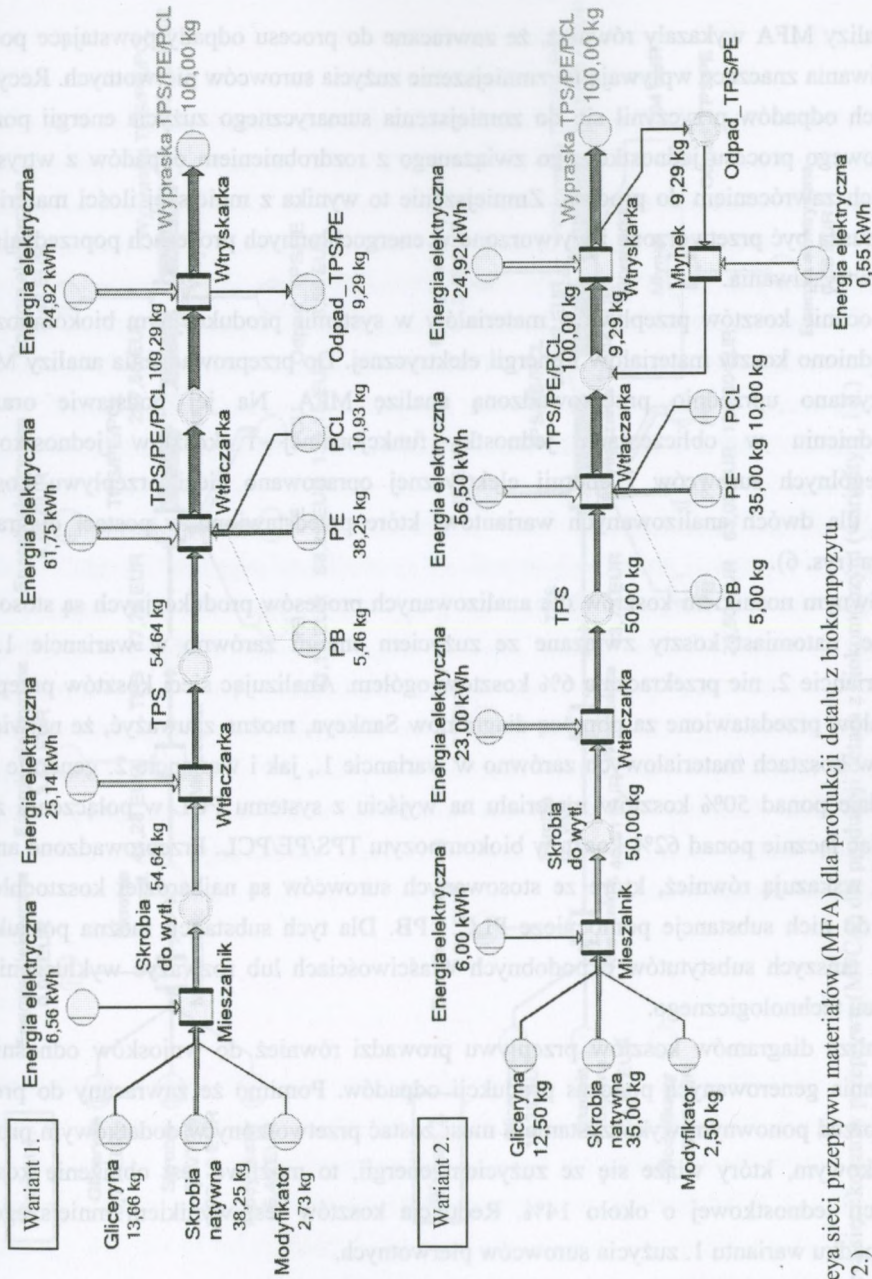
Uzyskane wyniki analiz MFA procesów produkcyjnych (warianty 1. i 2.) zostały odniesione do tej samej jednostki funkcjonalnej. Na podstawie przeprowadzonych analiz MFA i przygotowanych na ich podstawie diagramów Sankeya dla rozpatrywanych wariantów przepływu materiałów zidentyfikowano miejsca i procesy charakteryzujące się zwiększonymi przepływami materiałów i energii. Analizując poszczególne procesy jednostkowe, stwierdzono, że największe zużycie energii występuje podczas wytwarzania biokompozytów TPS/PE/PCL; jest to związane z koniecznością utrzymania stałych parametrów podczas reaktywnego wytłaczania biokompozytów, takich jak temperatura czy odpowiednio dobrane wartości sił ścinających ślimaków wytłaczarki.



Rys. 4. Model sieci przepływu dla procesu wytwarzania detalu (TPS/PE/PCL) w technologii wtryskiwania (warianty 1. i 2.)

Fig. 4. A flow network model for the manufacturing process of the part (TPS / PE / PCL) in injection technology (options 1st and 2nd)

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 5. Diagram Sankeya sieci przepływu materiałów (MFA) dla produkcji detalu z biokompozytu (warianty 1. i 2.)

Fig. 5. Sankey's diagram of material flow network (MFA) for the production of detail of biocomposite (options 1st and 2nd)

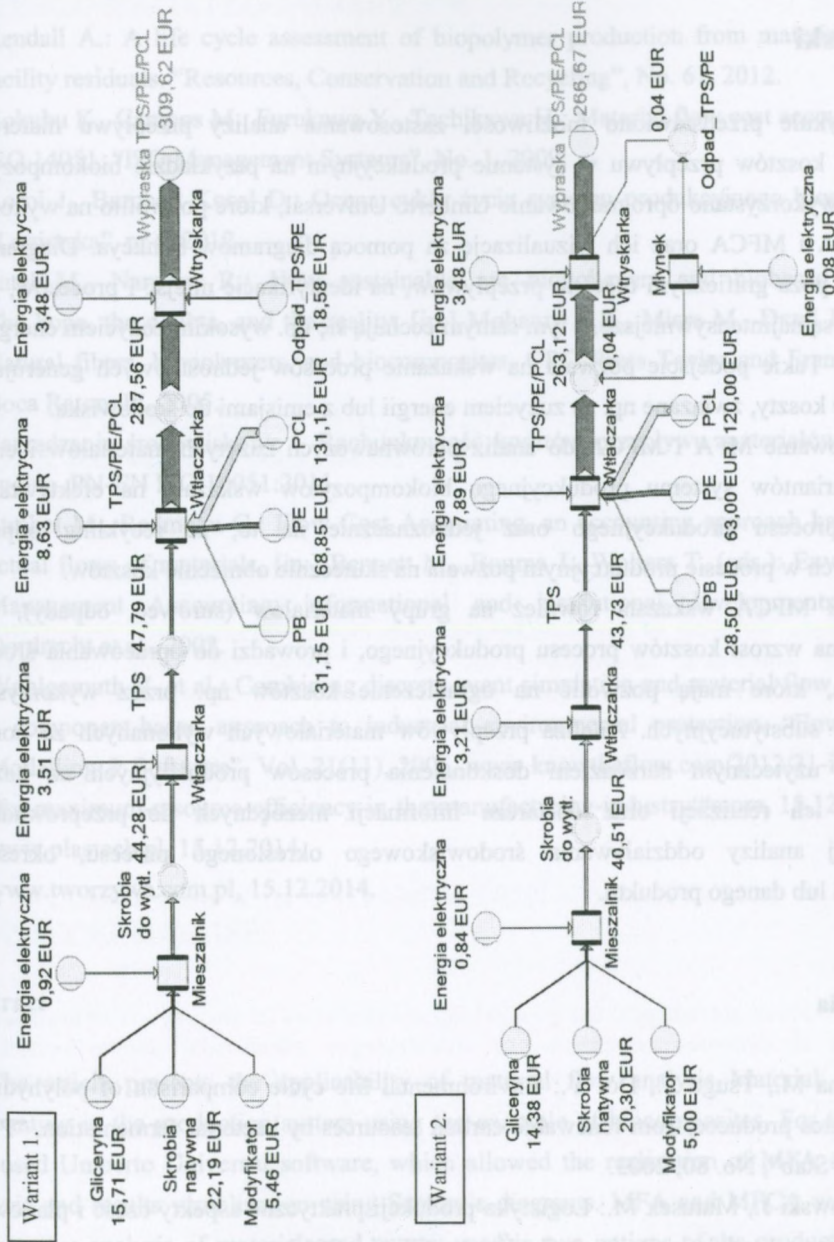
Źródło: Opracowanie własne.

Analizy MFA wykazały również, że zawracane do procesu odpady powstające podczas wtryskiwania znacząco wpływają na zmniejszenie zużycia surowców pierwotnych. Recykling własnych odpadów przyczynił się do zmniejszenia sumarycznego zużycia energii pomimo dodatkowego procesu jednostkowego związanego z rozdrobnieniem odpadów z wtryskarki przed ich zawróceniem do procesu. Zmniejszenie to wynika z mniejszej ilości materiałów, które muszą być przetworzone i wytworzone w energochłonnych procesach poprzedzających proces wtryskiwania.

W ocenie kosztów przepływów materiałów w systemie produkcyjnym biokompozytów uwzględniono koszty materiałów i energii elektrycznej. Do przeprowadzenia analizy MFCA wykorzystano uprzednio przeprowadzoną analizę MFA. Na jej podstawie oraz po uwzględnieniu w obliczeniach jednostki funkcjonalnej i kosztów jednostkowych poszczególnych surowców i energii elektrycznej opracowano sieci przepływu kosztów MFCA dla dwóch analizowanych wariantów, które przedstawiono w postaci diagramów Sankeya (rys. 6).

Głównym nośnikiem kosztów dla analizowanych procesów produkcyjnych są stosowane surowce, natomiast koszty związane ze zużyciem energii zarówno w wariantcie 1., jak i w wariantcie 2. nie przekraczają 6% kosztów ogółem. Analizując sieci kosztów przepływu materiałów przedstawione za pomocą diagramów Sankeya, można zauważyć, że największy udział w kosztach materiałowych zarówno w wariantcie 1., jak i w wariantcie 2. generuje PLC, który daje ponad 50% kosztów materiału na wyjściu z systemu PCL w połączeniu z PB, generując łącznie ponad 62% kosztów biokompozytu TPS/PE/PCL. Przeprowadzone analizy MFCA wskazują również, które ze stosowanych surowców są najbardziej kosztochłonne; należą do nich substancje pomocnicze PLC i PB. Dla tych substancji można poszukiwać innych, tańszych substytutów o podobnych właściwościach lub rozważyć wykluczenie ich z procesu technologicznego.

Analiza diagramów kosztów przepływu prowadzi również do wniosków odnośnie do zawracania generowanych podczas produkcji odpadów. Pomimo że zawracany do procesu odpad przed ponownym wykorzystaniem musi zostać przetworzony w dodatkowym procesie jednostkowym, który wiąże się ze zużyciem energii, to możliwe jest obniżenie kosztów produkcji jednostkowej o około 14%. Redukcja kosztów jest wynikiem mniejszego niż w przypadku wariantu 1. zużycia surowców pierwotnych.



Rys. 6. Diagram Sankeya sieci kosztów przepływu (MFCA) dla produkcji detalu z biokompozytu (warianty 1. i 2.)
 Fig. 6. Sankey's diagram of material flow cost network (MFCA) for the production of detail of biocomposite
 (options 1st and 2nd)
 Źródło: Opracowanie własne.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania analizy przepływu materiałów i rachunku kosztów przepływu w systemie produkcyjnym na przykładzie biokompozytów. Do analiz wykorzystano oprogramowanie Umberto Universal, które pozwoliło na wykonanie analiz MFA i MFCA oraz ich wizualizację za pomocą diagramów Sankeya. Diagramy te pozwoliły, poza graficznym ujęciem przepływów, na identyfikację miejsc i procesów, gdzie przepływy są najintensywniejsze, a tym samym cechują się np. wysokim zużyciem energii lub surowców. Takie podejście pozwala na wskazanie procesów jednostkowych generujących największe koszty, związane np. ze zużyciem energii lub z emisjami do środowiska.

Zastosowanie MFA i MFCA do analiz porównawczych zużytych materiałów i energii dwóch wariantów systemu produkcyjnego biokompozytów wskazało na efektywniejszy przebieg procesu produkcyjnego oraz jednoznacznie na to, że recykling odpadów powstających w procesie produkcyjnym pozwala na skutecznie obniżenie kosztów.

Analiza MFCA wskazała również na grupy materiałów (surowce, odpady), które wpływają na wzrost kosztów procesu produkcyjnego, i prowadzi do opracowania środków zaradczych, które mają pozwolić na ograniczenie kosztów np. przez wykorzystanie materiałów substytucyjnych. Analiza przepływów materiałowych wykonanych za pomocą MFA jest użytecznym narzędziem doskonalenia procesów produkcyjnych na każdym z etapów ich realizacji oraz dostarcza informacji niezbędnych do przeprowadzenia pogłębionej analizy oddziaływania środowiskowego określonego procesu, określonej technologii lub danego produktu.

Bibliografia

1. Akiyama M., Tsuge T., Doi Y.: Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. "Polym Degrad Stab", No. 80, 2003.
2. Bendkowski J., Matusek M.: Logistyka produkcji praktyczne aspekty część i planowanie i sterowanie produkcją. Politechnika Śląska, Gliwice 2013.
3. Burchart-Korol D.: Ekoefektywność – nowym kryterium oceny systemu produkcyjnego. „Logistyka”, nr 6, 2012.
4. Burchart-Korol D., Furman J.: Zarządzanie produkcją i usługami. Politechnika Śląska, Gliwice 2007.
5. Durlik I.: Inżynieria zarządzania. Placet, Warszawa 2007.

6. Kendall A.: A life cycle assessment of biopolymer production from material recovery facility residuals. "Resources, Conservation and Recycling", No. 61, 2012.
7. Kokubu K., Campos M., Furukawa Y., Tachikawa H.: Material flow cost accounting with ISO 14051. "ISO Management Systems", No. 1, 2009.
8. Korol J., Burchart-Korol D.: Ocena cyklu życia systemu produkcyjnego biopolimerów. „Logistyka”, nr 6, 2012.
9. Patel M., Narayan R.: How sustainable are biopolymers and biobased products? The hope, the doubts, and the reality, [in:] Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. (eds.): Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL 2005.
10. Zarządzanie środowiskowe – Rachunkowość kosztów przepływu materiałów – Zasady ogólne. PN-EN ISO 14051:2011.
11. Strobel M., Redmann C.: Flow Cost Accounting, an accounting approach based on the actual flows of materials, [in:] Bennett M., Bouma J., Wolters T. (eds.): Environmental Management Accounting, informational and institutional developments. Kluwer, Dordrecht et al., 2002.
12. Wohlgemuth V. et al.: Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection. "Environmental Modelling & Software", Vol. 21(11), 2006, www.knowtheflow.com/2012/31-innovations-for-maximum-resource-efficiency-in-the-manufacturing-industry/#more, 15.12.2014.
13. www.plastech.pl, 15.12.2014.
14. www.tworzywa.com.pl, 15.12.2014.

Abstract

The article presents the applicability of material flow analysis Material Flow Cost Accounting in the production system using the example of biocomposites. For the analysis was used Umberto Universal software, which allowed the realization of MFA and MFCA analysis and results visualization using Sankey's diagrams. MFA and MFCA were used to comparative analysis of materials and energy used in two options of the production system biocomposites. The study shown that the production process with recycling of waste generated in the production process option allows more effective cost reduction.