

Mariola Gądek*

ZASTOSOWANIE MODELI MARKAL W TECHNOLOGIACH ENERGETYCZNYCH

Streszczenie

Publikacja zawiera opis struktury modelu MARKAL. Omówiono w niej możliwości, jakie stwarza stosowanie tego narzędzia optymalizacyjnego, rodzaje danych wejściowych definiowanych przez użytkownika oraz przykłady zastosowania modeli energetycznych MARKAL w świecie.

Use of MARKAL models in power engineering technologies

Abstract

The publication contains a description of the capabilities and structure of the MARKAL model. It discusses the possibilities offered by the application of optimization tools, types of user-defined data input and examples of MARKAL energy model in the world.

WPROWADZENIE

Produkcja i użytkowanie energii mogą mieć znaczący wpływ na środowisko. Z uwagi na wzrastające zużycie energii na świecie, jej efektywniejsze wykorzystanie stało się istotnym tematem międzynarodowej debaty i regulacji prawnych.

Ustalenie polityki, strategii i programów dotyczących gospodarki energią na podstawie opracowywania i modelowania danych sektora energetycznego w celu wykorzystania dostępnych zasobów do zapewnienia dostaw energii w określonym regionie jest możliwe dzięki zastosowaniu modeli typu MARKAL (Loulou, Goldstein, Noble 2005). Fakt, że różne modele z rodziny MARKAL są stosowane w ponad 40 krajach, w więcej niż 75 instytucjach powoduje, że to narzędzie optymalizacyjne jest powszechnie akceptowalne. Wytwórcom w sektorach prywatnym i publicznym dostarcza ważnych informacji, dotyczących produkcji energii, następnie jej użytkowania.

1. PODSTAWOWE INFORMACJE NA TEMAT MODELI MARKAL

Model MARKAL został opracowany w ramach międzynarodowej współpracy, w okresie prawie dwóch dziesięcioleci, przez *Energy Technology Systems Analysis Programme* (ETSAP) Międzynarodowej Agencji Energii (IEA – International Energy Agency). Model oferuje między innymi:

- sprawdzony proces międzynarodowej współpracy,
- metodykę z zakresu analizy polityki energii i ochrony środowiska,

* Główny Instytut Górnictwa

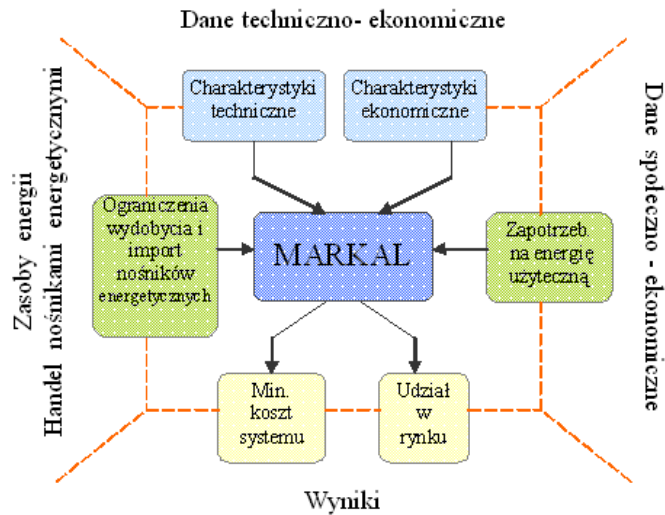
- podstawowy model standardowy znajdujący najmniej kosztowne rozwiązania wśród porównywalnych wyników krajowych,
- zestaw krajowych baz danych z dziedziny technologii energetycznych.

Model MARKAL jest wykorzystywany do opisu systemów energetycznych zarówno w aspekcie zapotrzebowania na energię, jak i wymagań dotyczących strumieni wylotowych (Nopiah, Yusof, Sopian 2009). Łączy on ze sobą przetwarzanie i zużycie energii na wszystkich etapach prowadzenia procesów technologicznych, począwszy od dostarczenia surowców (np. wydobywanie ropy naftowej, węgla kamiennego), przez ich konwersję (np. w elektrowniach, rafineriach), do użytkowania energii. Zapotrzebowanie na energię może być rozdzielone na sektory (np. mieszkaniowy, produkcyjny, transportowy) lub na poszczególne funkcje spełniane w danym sektorze (np. klimatyzowanie mieszkań, ich ogrzewanie, oświetlanie, dostarczanie wody z sieci).

Metody optymalizacji stosowane w czasie sporządzania konkretnego modelu polegają na wybieraniu spośród dostępnych danych tych, które pozwolą na wypracowanie najbardziej opłacalnych rozwiązań, przy różnorodności ograniczeń. Użytkownik określa koszty technologii, charakterystykę technologiczną (np. współczynniki konwersji) i popyt na usługi energetyczne. Na podstawie tak zintegrowanego podejścia jest określane dopasowanie podaży technologii do popytu na usługi energetyczne.

Modelowane procesy obejmują wszystkie działania, które są niezbędne do oferowania produktów i usług. W modelu MARKAL gospodarka wybranego regionu jest odwzorowywana za pomocą wspomnianych wyżej procesów oraz fizycznych i finansowych przepływów między nimi. Bazę modelu stanowi zazwyczaj kilkaset procesów, obejmujących cały cykl życia energii i materiałów. Jego przeznaczeniem jest obliczenie najmniej kosztownej konfiguracji systemu. Baza danych i ograniczenia dla poszczególnych procesów i całego regionu są definiowane przez użytkownika modelu. Ograniczenia zależą od popytu na produkty i usługi, czasu wdrożeń nowych procesów, dostępności zasobów naturalnych stanowiących źródła energii, celów środowiskowych polityki krajowej, wskaźników emisji itd.

Strukturę modelu MARKAL przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Otoczenie modelu MARKAL – opracowanie własne na podstawie (Nguyen 2005)

Fig. 1. MARKAL model's environment – based on (Nguyen 2005)

Modele MARKAL mogą być stosowane do:

- identyfikacji najmniej kosztownych systemów energetycznych i strategii inwestycyjnych,
- identyfikacji najkorzystniejszej finansowo odpowiedzi na ograniczenia związane z emisją substancji szkodliwych i z odpadami, z uwzględnieniem zasady zrównoważonego rozwoju,
- opiniowania nowych technologii i określania priorytetów w pracach badawczo-rozwojowych,
- sprawdzania efektów wdrażania nowych regulacji prawnych, zmian systemu podatkowego,
- przedstawiania długoterminowych analiz bilansów energetycznych technologii pracujących w różnych warunkach,
- oceny wpływu projektu na środowisko (oszczędności w emisji gazu cieplarnianego) w kontekście porozumień z Kyoto i Mechanizmu Czystego Rozwoju (CDM – *Clean Development Mechanism*) oraz szans na handel emisjami (ETS – *Emissions Trading Scheme*).

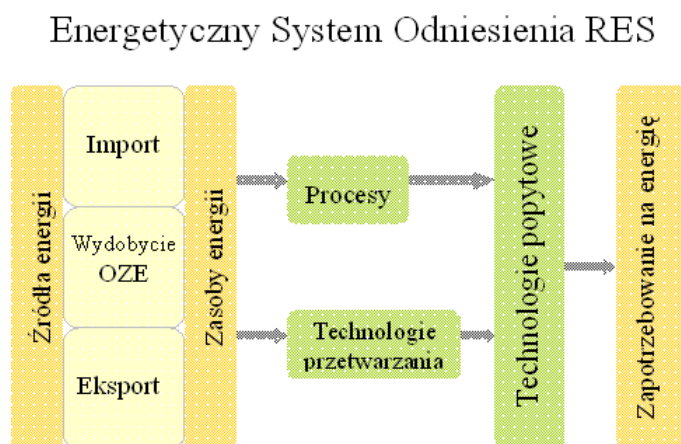
Rozwój modeli za pomocą modelu MARKAL jest realizowany za pośrednictwem *General Algebraic Modeling System* (GAMS). Chociaż podstawę modelu stanowi teoria i matematyka złożona, użytkownicy modeli MARKAL mogą efektywnie stosować go bez wykorzystywania skomplikowanych metod komputerowych i obliczeniowych. Modele MARKAL dostarczają, dobrze rozumianej, weryfikowalnej metodyki, pozwalającej na zrozumienie mechanizmów pomocnych w podejmowaniu decyzji. MARKAL jest modelem pobudzającym popyt w wyniku prognoz użytkownika dotyczących ostatecznego zapotrzebowania na energię i określone materiały dla planowanego czasu (Zonooz i in. 2009).

2. STRUKTURA MODELU ENERGETYCZNEGO MARKAL

MARKAL jest dynamicznym modelem programowania liniowego, służącym do optymalizacji technologii. Na elementy modelu energetycznego MARKAL składają się:

- topologia systemu energetycznego (organizacja) – drzewko relacji między zasobami energii, konwersją, technologiami procesowymi, wymaganiami energetycznymi odbiorców,
- dane numeryczne – podzielone na serie czasowe,
- struktura matematyczna – równania, ograniczenia, relacje zdefiniowane przez użytkownika – model GAMS,
- scenariusze i strategie – przypadki (*cases*).

Podstawą modelu MARKAL jest Energetyczny System Odniesienia (RES), który ilustruje wszystkie możliwe trasy z każdego źródła energii pierwotnej, przez różne etapy transformacji, do każdego z sektorów popytowych (Nopiah, Yusof, Sopian 2009).



Rys. 2. Struktura Energetycznego Systemu Odniesienia (opracowanie własne)

Fig. 2. Structure of Reference Energy System

Struktura bazy danych dla technologii pozyskiwania energii jest ograniczona do danych techniczno-ekonomicznych, odnoszących się do tej technologii (Loulou, Goldstein, Noble 2005). Zestawy danych, charakteryzujące proces energetyczny, wprowadzane do programu MARKAL zostały podzielone, jak poniżej:

1) Dane niezależne od czasu:

- a) Pierwszy rok dostępności technologii – rok, do którego dana technologia może zostać wprowadzona do systemu energetycznego z uwzględnieniem okresu budowy obiektu. Dla technologii istniejących już w systemie jest to pierwszy rok przedziału czasowego analizy.

- b) Okres użytkowania urządzeń – jest to okres technologicznego życia obiektów danej technologii, liczony od momentu wprowadzenia obiektów z danej technologii o pewnych zdolnościach przetwarzania, do systemu energetycznego.
- 2) Dane w postaci szeregów czasowych:
- a) Dyspozycyjność obiektu/procesu technologicznego – liczba godzin pracy obiektów danej technologii w roku, odniesiona do całkowitej liczby godzin w roku (8760).
 - b) Liczba godzin w roku, w których występują planowane przerwy w pracy – można rozróżnić przerwy w pracy zaplanowane oraz wymuszone.
 - c) Ilość wsadowego nośnika energii na jednostkę całkowitej energii wyjściowej (produktu) – w przypadku jednego nośnika wejściowego i jednego wyjściowego jest to odwrotność sprawności przetwarzania. W przypadku wielu nośników energii określa, jaką ilość należy wprowadzić, aby uzyskać jednostkę całkowitej energii na wyjściu.
 - d) Udział mocy w pokrywaniu szczytowego zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym.
 - e) Wskaźnik emisji na jednostkę produkcji.
 - f) Wskaźnik jednostkowych nakładów inwestycyjnych – obliczany jako całkowite nakłady inwestycyjne odniesione do jednostki mocy lub wydajności procesu, podawane, np. w zł/kW lub zł/(GJ/a); GJ/a – jednostka wydajności procesu.
 - g) Jednostkowe koszty eksploatacyjne stałe – odnoszone do jednostki mocy lub wydajności procesu na rok podawane, np. w zł/(kW/a).
 - h) Jednostkowe koszty zmienne – bez uwzględniania kosztów zakupu i dostawy paliwa, przeliczone na jednostkę wyprodukowanej energii.
- 3) Parametry podawane w przypadku modelowania istniejących obiektów infrastruktury energetycznej i przemysłowej:
- a) Wielkość mocy zainstalowanej przed pierwszym rokiem przedziału czasowego i dostępnej w danym okresie – parametr ten pozwala na modelowanie istniejących obiektów z uwzględnieniem ich starzenia się.
 - b) Górne i dolne ograniczenia zdolności przetwarzania – pozwalające na ograniczanie mocy wytwórczych danego procesu technologicznego w określonych okresach.
 - c) Górne i dolne ograniczenia wielkości produkcji – pozwalające na ograniczanie ilości energii produkowanej w danym procesie technologicznym, w określonych przedziałach czasowych.
- 4) Dane bezpośrednio związane z technologiami – dotyczące paliw energetycznych i materiałów:
- a) Jednostkowy koszt dostawy nośnika energii do procesu, od miejsca pozyskania do miejsca użytkowania.
 - b) Koszt zakupu wsadowego nośnika energii – podawany, gdy nośnik jest dostarczany do procesu w postaci pierwotnej (wydobywany lub importowany).
 - c) Koszt wyemitowania jednostki zanieczyszczenia do atmosfery (koszt obciążenia środowiska) – z reguły podawany w regulacjach prawnych.

Minimalizując sumę kosztów model MARKAL przestrzega wielu ograniczeń (tzw. równań modelu), wyrażających fizyczne i logiczne powiązania, które muszą być spełnione, aby odpowiednio opisać system energetyczny (Loulou, Goldstein, Noble 2005). Do grupy ograniczeń zalicza się:

- Zaspokojenie popytu na usługi energetyczne – zapotrzebowanie na usługi energetyczne musi być zapewnione przy wykorzystaniu istniejącej mocy produkcyjnych lub/i wdrażaniu nowych możliwości końcowego wykorzystania technologii.
- Zdolność produkcyjna układu – w każdym z przedziałów czasowych może być wykorzystana część lub cała moc zainstalowana według współczynnika dostępności technologii. Wybór konkretnej opcji musi przyczynić się do minimalizacji całkowitych kosztów działalności.
- Bilans – dla towarów (*balance for commodities*), z wyjątkiem elektryczności i ciepła niskotemperaturowego, musi spełniać warunek, zgodnie z którym w każdym z okresów suma produkcji i importu nośników energii (z innych regionów) powinna być co najmniej równa sumie ich zużycia i eksportu do innych regionów). Jeśli bilans dotyczy elektryczności ograniczenia muszą być spełnione w każdym z przedziałów czasowych. Oznacza to, że w każdym czasie, w każdym regionie, o każdej porze dnia i roku ilość elektryczności produkowanej i importowanej z innych regionów powinna zaspokajać potrzeby konsumentów, eksport elektryczności oraz straty sieciowe. W przypadku ciepła niskotemperaturowego ograniczenia te dotyczą każdej pory roku.
- Ograniczenia rezerw szczytowych (dotyczy elektryczności i ciepła niskotemperaturowego) – w każdym przedziale czasowym (w każdym z regionów) całkowita dostępna zdolność produkcyjna technologii generujących elektryczność powinna przekraczać średnie szczytowe obciążenie, w danym przedziale czasowym, o kilka procent.
- Obciążenie podstawowe (dotyczy elektryczności) – użytkownik określa, która z dostępnych technologii może być przez MARKAL rozpatrywana jako pracująca w podstawie przeciętnego obciążenia, np. te, których działanie nie musi zmieniać się z dnia na noc w danym sezonie. Użytkownik może również określić maksymalny udział nocnej produkcji, która może zostać dostarczona ze wszystkich dostępnych technologii pracujących w podstawie przeciętnego obciążenia.
- Współczynnik dostępności sezonowej (dotyczy elektryczności i sektorów ciepłych) – użytkownik może określić sezonowe i dobowe limity wykorzystania mocy zainstalowanej niektórych technologii wytwarzania energii elektrycznej lub ciepła. Jest to szczególnie ważne, gdy działanie urządzeń zależy od dostępności zasobów, które nie mogą być przechowywane, takich jak wiatr czy słońce, lub mogą być przechowywane tylko częściowo, takich jak np. woda w zbiorniku.
- Ograniczenia emisji – użytkownik może nałożyć limity emisji jednej lub kilku substancji zanieczyszczających środowisko w regionie. Limity te mogą być ustalone dla każdego z okresów osobno, tak aby symulować określony profil emisji lub w sposób skumulowany. Użytkownik ma możliwość ograniczania emisji z poszczególnych sektorów.

Funkcja celu jest sumą wszystkich strumieni kosztów poniesionych w każdym roku całego rozpatrywanego przedziału czasowego

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{NPER} (1+d)^{NYRS(1-t)} ANNCOST(r,t) (1+(1+d)^{-1} + (1+d)^{-2} + \dots + (1+d)^{1-NYRS})$$

gdzie:

- NPV – wartość bieżąca netto całkowitego kosztu technologii we wszystkich regionach; w modelu MARKAL równanie reprezentuje funkcję celu,
- $ANNCOST(r, t)$ – roczny koszt technologii w regionie r dla okresu t ,
- d – ogólna stopa dyskontowa,
- $NPER$ – liczba okresów czasowych w horyzoncie planowania,
- $NYRS$ – liczba lat w każdym z okresów t ,
- R – liczba regionów.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA MODELI MARKAL W ŚWIECIE

Liczba użytkowników modeli MARKAL w latach udoskonalania ich działania i możliwości oprogramowania stale wzrastała (Loulou, Goldstein, Noble 2005). Obecnie korzysta z niego ponad 75 instytucji w 40 krajach, chcących rozwijać swoją gospodarkę.

Badania dotyczące oceny przyszłych strategii energetycznych technologii, ze szczególnym uwzględnieniem kontroli emisji dwutlenku węgla, zostały wykonane w Chinach (Chen i in. 2007) w Tsinghua University we współpracy z Princeton University. Celem ich było określenie perspektyw społecznego i gospodarczego rozwoju Chin, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa dostaw energii oraz promowaniu zrównoważonego rozwoju środowiska w ciągu najbliższych 50 lat. MARKAL wykorzystano do budowy modelu systemu energetycznego Chin, reprezentującego wszystkie sektory gospodarki, w tym zarówno przetwarzania energii, jak i końcowego wykorzystania technologii. Analizowano różne scenariusze rozwoju systemu energetycznego, umożliwiające ocenę różnych planów rozwoju energetyki.

W Nigerii model MARKAL wykorzystano do zbadania przyszłości odnawialnych źródeł energii w kraju w latach 1990–2030. Wzięto pod uwagę trzy scenariusze: wysokiego, średniego i niskiego ryzyka. Przeprowadzone badania wykazały, że udział odnawialnych źródeł energii może wzrosnąć odpowiednio do 47%, 45% i 38% z 18% w 1990 roku. Zwrócono również uwagę na bariery rozwoju i politykę zalecaną do ich przewyciężenia.

W Estonii w ramach projektu „Możliwe trendy w sektorze energii w Estonii” przeanalizowano problemy dotyczące energii gazów cieplarnianych w perspektywie czasu i ograniczenia emisji w kontekście globalnych zmian klimatu. Do opracowania scenariuszy rozwoju systemu energetycznego oraz analizy różnych wariantów ograniczania emisji gazów cieplarnianych wykorzystano modele MARKAL i MARKAL-MACRO.

W ramach współpracy między Indonezją i Niemcami zrealizowano projekt „Oddziaływanie strategii energetycznej na środowisko w Indonezji”. Celem badań było

opracowanie propozycji w zakresie przyjaznej dla środowiska strategii zaopatrzenia w energię na następne 30 lat, na podstawie prognozy jakości powietrza oraz oceny ryzyka dla ekosystemów i zdrowia ludzkiego. Do optymalizacji przyszłych dostaw energii, pochodzącej z różnych technologii energii odnawialnej, zastosowano model MARKAL.

Na Łotwie przeprowadzono badania koncentrujące się na zwiększeniu wykorzystania OZE w pokrywaniu zapotrzebowania na energię w kraju. Przy użyciu modelu MARKAL przeanalizowano dostępne nowoczesne technologie pod kątem możliwości ich zastosowania w praktyce. Stwierdzono, że energia ze źródeł odnawialnych do 2020 roku będzie pokrywać 25–30% całkowitej podaży energii (Nguyen 2005).

Model MARKAL był początkowo wykorzystywany jako narzędzie służące do analizy systemów technologicznych jedynie z uwagi na przepływy strumieni energetycznych. Z upływem czasu proces modelowania został poszerzony o analizę przepływu materiałów w układzie technologicznym przez cały okres pracy systemu (Gielen 1998). Pod uwagę brano wszystkie masowe przepływy materiałów związane z ich końcowym wykorzystaniem oraz wykorzystaniem produktów w danym kraju lub regionie. Modele energetyczne i materiałowe systemów w modelu MARKAL są dostępne na przykład w Europie Zachodniej. Zostały one opracowane do analizy strategii redukcji emisji gazów cieplarnianych. W przypadku inżynierii systemów zarządzania odpadami, modele typu MARKAL były stosowane do analizy ilości i składu odpadów w przyszłości, analizy efektywności ponoszonych kosztów w procesach gospodarki odpadami oraz analizy wpływu polityki energetycznej i emisji gazów cieplarnianych w zakresie postępowania z odpadami. Analizowano efekty zmieniających się preferencji konsumentów, zmian cen energii oraz zmian polityki ochrony środowiska w zakresie gospodarowania odpadami.

Około jedna trzecia wszystkich emisji gazów cieplarnianych może być wynikiem przetwórstwa materiałów (Gielen 1998). Zmiany przepływów materiałowych mają również znaczący wpływ na koszty redukcji ich emisji. Model MARKAL dla Europy Zachodniej został opracowany w ramach projektu MATTER (*Materials Technologies for GHG Emission Reduction*) w celu szczegółowego przeanalizowania różnych strategii postępowania. Projekt MATTER był wspólnym projektem pięciu holenderskich instytutów w ramach Narodowego Programu Badań nad Globalnym Zanieczyszczeniem Powietrza i Zmian Klimatycznych. Obejmował ponad 25 nośników energii, 125 materiałów oraz ponad 50 produktów. Zamodelowano 30 kategorii odpadów, charakteryzując ich cechy fizyczne oraz jakość.

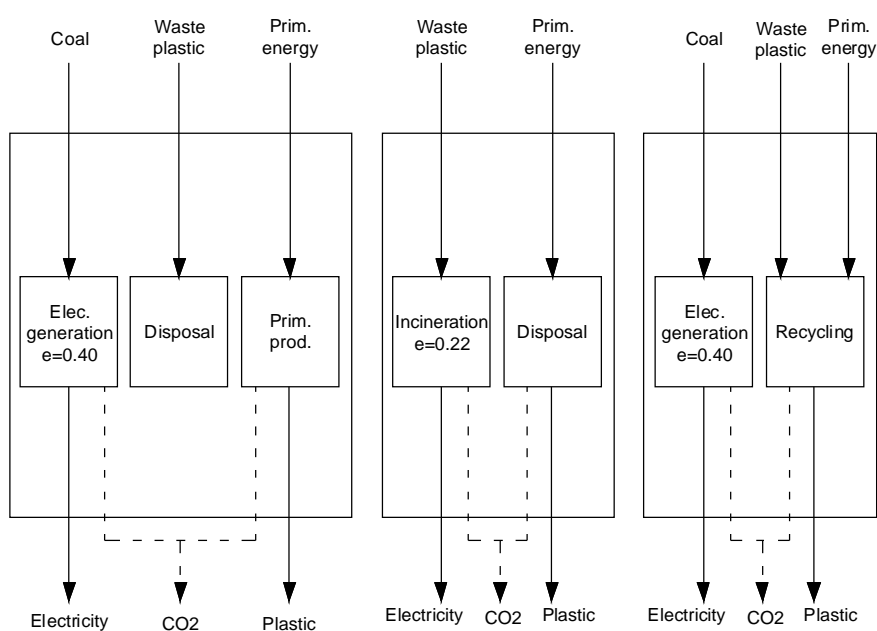
Redukcję emisji gazów cieplarnianych można osiągnąć przez zastosowanie wielu środków technicznych, począwszy od zmiany paliwa w procesie wytwarzania energii, przez stosowanie odnawialnych źródeł energii, do zmian w użytkowanych materiałach. Przykładowe strategie redukcji emisji gazów cieplarnianych, uwzględnione w systemach materiałowych, polegają na:

- usprawnianiu procesów przemysłowych,
- usuwaniu CO₂ z zakładów przemysłowych,
- zmniejszaniu zużycia materiałów przez zastąpienie produktów (np. opakowania wielokrotnego użytku),

- stosowaniu odnawialnych źródeł energii jako surowca,
- poprawie zbierania odpadów,
- recyklingu odpadów, odzyskiwaniu energii.

Różne strategie zmniejszenia emisji CO₂ wpływają pośrednio lub bezpośrednio na sprawność innych metod ograniczania. Jeśli na przykład produkcja energii elektrycznej staje się mniej emisyjna z powodu wprowadzenia odnawialnych źródeł energii, to w odniesieniu do niej wytwarzanie energii w spalarniach odpadów staje się mniej atrakcyjne dla redukcji emisji. W wyniku takich interakcji, ocena potencjału i efektywności strategii redukcji pod względem kosztów, wymaga zintegrowanego podejścia, biorącego cały system energetyczny pod uwagę. MARKAL szczególnie nadaje się do badania tego typu interakcji.

Model MARKAL opracowany dla Europy Zachodniej został stworzony w celu zbadania wpływu polityki redukcji emisji gazów cieplarnianych na długoterminową gospodarkę odpadami z tworzyw sztucznych. Cechy systemu, które powinny być brane pod uwagę w czasie sporządzania modelu, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Cechy systemu brane pod uwagę w trakcie tworzenia modelu (Gielen, Okken 2005)

Fig. 3. Features of the system under consideration in the process of creating a model (Gielen, Okken 2005)

Etylen, polietylen, polipropylen, polistyren, polichlorek winylu i inne tworzywa sztuczne zostały zamodelowane oddzielnie. Polietylen został wykorzystany jako materiał wejściowy do otrzymywania wielu innych kategorii produktów, modelowanych osobno. Wzięto pod uwagę trzy grupy odpadów tworzyw sztucznych, tj. odpady plastikowe czyste, mieszane i pochodzące ze stałych odpadów komunalnych. Sposób gospodarowania odpadami tworzyw sztucznych podzielono w modelu na osiem grup:

1. Ekstrukcja (dotyczy czystych odpadów z tworzywa sztucznego) – ma zastosowanie jedynie w przypadku wysokiej jakości rodzajów odpadów. Podczas tego procesu są one mielone i prasowane, a wyjściowa jakość materiału zależy w dużej mierze od jakości odpadów wejściowych.
2. Separacja w rozpuszczalniku (dotyczy mieszanych odpadów z tworzyw sztucznych) – podstawę tego procesu stanowi różnica rozpuszczalności tworzyw sztucznych w rozpuszczalnikach organicznych.
3. Piroliza (dotyczy mieszanych odpadów z tworzyw sztucznych), podczas której węglowodory są podgrzewane w atmosferze beztlenowej. W temperaturze kilkuset stopni Celsjusza następuje rozkład węglowodorów na produkty stałe, ciekłe i gazowe; skład produktu zależy od temperatury i ciśnienia procesu.
4. Uwodornienie (dotyczy mieszanych odpadów z tworzyw sztucznych) – technologia ta może być zakwalifikowana jako termiczny hydrokraking. Reakcje zachodzą w fazach płynnej i gazowej reaktora, w temperaturze 400–450°C i ciśnieniu do 25,0 MPa.
5. Wtrysk odpadów z tworzyw sztucznych w wielkich piecach (dotyczy mieszanych odpadów z tworzyw sztucznych).
6. Spalanie odpadów z tworzyw sztucznych w piecach cementowych (dotyczy mieszanych odpadów z tworzyw sztucznych) wymaga specjalistycznego sprzętu do wtrysku odpadów ze względu na niewielką wagę.
7. Spalanie na ruszcie (dotyczy stałych odpadów komunalnych) – wzrost efektywności procesu jest możliwy, gdy spalarnia jest sprzężona z blokiem gazowo-parowym. Para pochodząca ze spalarni jest dodatkowo ogrzewana w elektrowni, a następnie wykorzystywana w turbinie parowej. Tak połączone układy mogą osiągnąć sprawność w sekcji spalania, wynoszącą 28%.
8. Składowanie (dotyczy stałych odpadów komunalnych).

W projekcie analizowano trzy scenariusze: przypadek bazowy (BC – *Base Case*), w którym nie zakładano żadnych kar za zbyt wysoki poziom emisji oraz dwa scenariusze kar za emisje gazów cieplarnianych. Kary te wynoszą odpowiednio 100 i 200 EUR/tonę ekwiwalentu CO₂.

W projekcie MATTER model MARKAL został z powodzeniem rozszerzony z modelowania jedynie systemów energetycznych do zintegrowanego systemu modelowania energii i materiałów. Zawartość energetyczna odpadów stanowi około 5% całkowitego zużycia energii pierwotnej w Europie Zachodniej. Do pozyskania tej energii jest korzystne spalanie odpadów. Jednak proces ten jest źródłem emisji gazów cieplarnianych. W studium z zakresu gospodarki odpadami z tworzyw sztucznych w Europie Zachodniej wykazano, że jej przyszłość jest w znaczący sposób uwarunkowana scenariuszami redukcji emisji gazów cieplarnianych. Limity emisji mają ograniczony wpływ na skład odpadów, znacznie wpływają jednak na ich ceny. Wskazano również, że stosowanie pieców rusztowych do spalania odpadów z tworzyw sztucznych nie jest korzystne. Będzie więc wzrastał nacisk na ich składowanie. Jeśli możliwość składowania będzie zakazana lub nastąpi stały wzrost za nie opłat, spalanie na ruszcie zostanie zastąpione procesem uwodornienia.

PODSUMOWANIE

Udoskonalone na przestrzeni lat modele MARKAL są wykorzystywane w ponad 75 instytucjach, w 40 krajach świata. Stosując to narzędzie optymalizacyjne można dokonać wyboru najkorzystniejszego zestawu danych minimalizujących koszt systemu w całym okresie planowania, przy jednoczesnym uwzględnieniu ograniczeń obejmujących bilanse energetyczne, wielkość popytu na konkretne usługi i/lub produkty, czy też definiowane przez użytkownika ograniczenia polityczne, w tym między innymi limity emisji związków szkodliwych do atmosfery.

Literatura

1. Chen W., Wu Z., He J., Gao P., Xu S. (2007): Carbon emission control strategies for China: A comparative study with partial and general equilibrium versions of the China MARKAL model, *Science Direct. Energy* 32, s. 59–72.
2. Gielen D.J. (1998): The MARKAL systems engineering model for waste management; artykuł dostępny na stronie internetowej <http://www.entek.chalmers.se/~josu/art-dgiel.htm>, dostęp: luty 2010.
3. Gielen D.J., Okken P.A. (2005): Optimization of integrated energy and materials systems. Raport z badań sponsorowanych przez Ministerstwo Gospodarki i Program Badawczy dotyczący wpływu globalnego zanieczyszczenia powietrza na zmiany klimatyczne, ECN-C-94-010.
4. Loulou R., Goldstein G., Noble K. (2005): Documentation for the MARKAL Family of Models. ETSAP.
5. Nguyen Q.K. (2005): Long term optimization of energy supply and demand in Vietnam with special reference to the potential of renewable energy, Hanoi, Vietnam. Rozprawa naukowa doktorów ekonomii Uniwersytetu Carla von Ossietzky'ego, Uniwersytet Oldenburg, Niemcy (http://oops.uni-oldenburg.de/frontdoor.php?source_opus=170; dostęp: grudzień 2009).
6. Nopiah Z.M., Yusof A.M., Sopian K. (2009): A Review of MARKAL Energy Modeling. *European Journal of Scientific Research* Vol. 26, No. 3, s. 352–361.
7. Zonooz M.R.F., Nopiah Z.M., Yusof A.M., Sopian K. (2009): A Review of MARKAL Energy Modeling. *EuroJournals Publishing, Inc.* Vol. 26, No. 3, s. 352–361.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk