

dr inż. arch. Michał Ciula^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4345-0381

dr hab. inż. arch. Marcin Furtak, prof. PK¹⁾

ORCID: 0000-0001-9175-1747

Problemy śladu węglowego w budownictwie

Carbon footprint problems in construction

DOI: 10.15199/33.2023.12.16

Streszczenie. W artykule omówiono problemy dotyczące obliczania śladu węglowego w budownictwie. Przeanalizowano trudności związane z oszacowaniem ilości emitowanych gazów do atmosfery i rozpoznaniem ich wpływu na środowisko naturalne. Zwrócono uwagę na ryzyko przyjmowania nieprawidłowych założeń przy poszukiwaniu ekologicznych rozwiązań oraz na trudności porównania śladu węglowego różnych materiałów budowlanych. Pomimo wymienionych trudności, podkreślono znaczenie analizy śladu węglowego jako narzędzia wspierającego dążenia do zrównoważonego budownictwa. Wskazano na potrzebę kontynuowania prac nad doskonaleniem metody obliczania i precyzją pomiarów śladu węglowego, aby umożliwić dokładną ocenę wpływu sektora budownictwa na środowisko naturalne.

Słowa kluczowe: ślad węglowy; budownictwo; ekologia; ocieplenie klimatu.

Abstract. The article discusses the challenges associated with calculating the carbon footprint in the construction industry. It analyzes the difficulties in estimating the amount of emitted greenhouse gases and recognizing their impact on the natural environment. Attention is drawn to the risk of making incorrect assumptions when seeking ecological solutions and the comparative difficulties between different building materials in terms of carbon footprint. Despite these challenges, the importance of carbon footprint analysis as a tool to support sustainable construction efforts is emphasized. The need to continue improving methodologies and measurement precision to enable a more accurate assessment of the construction sector's impact on the natural environment is highlighted.

Keywords: carbon footprint; construction; ecology; global warming.

Porozumienie paryskie zobowiązuje kraje do redukcji emisji gazów cieplarnianych w celu utrzymania wzrostu temperatury na świecie poniżej 1,5°C, aby zminimalizować skutki postępujących zmian klimatycznych. Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) podaje, że w 2021 r. eksploatacja budynków odpowiadała za 30% światowego zużycia energii końcowej i 27% całkowitej emisji z sektora energetycznego [1]. Raport Programu Środowiskowego ONZ (UNEP) wskazuje na 37% w przypadku całego sektora budowlanego [2], który ma największy wpływ na zmiany klimatu. Źródło powstawania gazów cieplarnianych w architekturze można podzielić na operacyjne oraz wbudowane w obiekt. Pierwszym krokiem do obniżenia wartości CO₂ jest zdefiniowanie najważniejszych emiterów emisji. Kolejnym jest możliwość porównywania wpływu przyjętych rozwiązań projektowych na klimat. Proces ten bardzo często jest złożony, a najważniejszymi czynnikami utrudniającymi korelację są

zakres oceny i zmienna czasowa. Docelowo, najważniejszym działaniem jest zmiana technologii lub całkowita likwidacja szkodliwych czynników. Pomoc w tym zadaniu ma analiza wartości śladu węglowego.

Metoda liczenia śladu węglowego w ogólnym zakresie dzieli się na CCF (Corporate Carbon Footprint), czyli ślad węglowy przedsiębiorstwa oraz PCF (Product Carbon Footprint). Najczęściej stosowane normy i protokoły do obliczania PCF to: ISO 14067; EN 15804; PAS 2050; Protokół GHG; Product Environmental Footprint (PEF). Wymienione standardy różnią się zakresem i metodą oceny. ISO 14067 ma ogólny charakter i koncentruje się na śladzie węglowym produktów, oferując elastyczność w podejściu do oceny. PAS 2050 i Protokół GHG są bardziej szczegółowe i skoncentrowane na konkretnych metodach oraz wymaganiach dotyczących pomiaru śladu węglowego. PEF i EN 15804 idą o krok dalej, dostarczając bardzo szczegółowych wytycznych dotyczących oceny środowiskowej, włączając w to szeroki zakres kategorii wpływu środowiskowego i nie ograniczając się tylko do emisji CO₂. ISO 14067 i PAS 2050

mogą różnić się np. podejściem do alokacji emisji w łańcuchu dostaw. Protokół GHG obejmuje szeroki zakres emisji gazów cieplarnianych i jest częściej stosowany do zarządzania emisjami CCF niż PCF. PEF obejmuje bardziej kompleksową ocenę środowiskową, nie tylko węglową, i jest silnie skoncentrowany na porównywalności między produktami. Różnice dotyczą również zastosowania: ISO 14067 jest uznawany na poziomie międzynarodowym i stosowany w różnych branżach, a PAS 2050 cieszy się popularnością w Wielkiej Brytanii i jest często stosowany w kontekście międzynarodowym. PEF, to inicjatywa Unii Europejskiej i ma na celu stworzenie spójnego systemu oceny wpływu produktów na środowisko w całej Europie.

W budownictwie liczenie śladu węglowego ma pomóc w merytorycznym wyborze najbardziej ekologicznego rozwiązania. Znajomość wartości śladu węglowego docelowo ma być pomocna zarówno przy wyborze źródła ogrzewania i chłodzenia (emisje bezpośrednie/operacyjne), jak i materiałów konstrukcyjnych czy wykończeniowych (emisje pośrednie).

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Małopolskie Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego

^{*)} Adres do korespondencji: michal.ciula@pk.edu.pl

Znaczenie precyzyjnych obliczeń śladu węglowego

Zaniedbanie precyzji w obliczeniach śladu węglowego może sprowadzić nasze analizy do powierzchniowych wniosków. Jednym z nich jest powszechnie znana zasada, mówiąca, że lepiej jest ograniczać zużycie surowców nieodnawialnych, niż dopuszczać się ich nadmiernego wykorzystania. Taka oczywistość, choć prawdziwa, nie wnosi głębszego zrozumienia złożonych problemów środowiskowych ani nie pomaga w opracowywaniu skutecznych strategii redukcji emisji gazów cieplarnianych. Precyzyjne obliczenia pozwalają natomiast na głębokie wniknięcie w mechanizmy wpływające na ślad węglowy, co jest kluczowe w przypadku efektywnej ochrony naszego środowiska.

Obliczanie wartości śladu węglowego rozpoczyna się od rozpoznania źródeł, ilości i rodzaju emisji gazów cieplarnianych. Już na tym etapie występuje wiele problemów. Trudno bowiem o dokładną informację dotyczącą produktów emitowanych do atmosfery przez konkretną technologię, np. produkty spalania samego tylko węgla mogą być różne w obrębie jednego emitera. Powodem są np. różnice zarówno w gatunku spalanego paliwa (jego kaloryczności/czystości), jak również procesy technologiczne wymagające dostarczenia większej lub mniejszej ilości tlenu do komory spalania. **Spalanie 1 kg węgla kamiennego może wygenerować 2,2 – 2,7 kg CO₂.** W tej sytuacji możliwe są tylko dwa rozwiązania:

- 1) uśrednienie wartości;
- 2) szczegółowa analiza gazów opuszczających emiter.

Na obecnym poziomie zaawansowania technologicznego w przypadku znakomitej większości emiterów możliwy jest tylko wariant 1. Oznacza to, że możemy spodziewać się błędu na poziomie 20%, już w początkowej fazie analizy śladu węglowego. Jeśli uda się nam zdefiniować uśrednioną wielkość emisji gazów i ich wielkość, konieczne jest posłużenie się wartościami GWP do obliczenia śladu węglowego. Przykładowo: Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami podaje, że w przypadku węgla spalanego w piecokuchniach, piecach wolnostojących, innych (...)

o nominalnej mocy cieplnej $\leq 0,05$ MW, aby osiągnąć 1 GJ energii cieplnej, uzyskuje się emisje:

- pyłu całkowitego = 749 g;
- pyłu PM10 = 667 g;
- pyłu PM2,5 = 517 g;
- dwutlenku węgla = **94 180 g**, (GWP = 1);
- tlenku węgla = 3 182 g;
- tlenków azotu = 192 g; (GWP =?);
- tlenków siarki = 338 g;
- benzo(a)pirenu = 0,37 g.

Jedynym gazem cieplarnianym w tym przykładzie jest dwutlenek węgla. Łatwo oszacować można, że produkcja GJ energii wiąże się z emisją CO₂eq na poziomie ≈ 94 kg. Czy jednak rzeczywiście pozostałe gazy nie mają większego lub mniejszego udziału w efekcie cieplarnianym?

Tlenki azotu nie są gazami cieplarnianymi, ale mają istotny wpływ na produkcję ozonu troposferycznego. Jego rolę można porównać do katalizatora. Szacuje się, że potencjał globalnego ocieplenia (GWP) w przypadku NOx wynosi 30 – 33 w okresie dwudziestu lat i 7 – 10 w przypadku stu lat [3]. Emisję NOx należy oceniać w nieco dłuższej perspektywie, niż tylko ta związana z pobytem gazu w atmosferze, gdyż jest on dosyć szybko usuwany z atmosfery (kwaśne deszcze). Mikroorganizmy, takie jak bakterie denitryfikacyjne, przekształcają NOx w azotany (NO₃) i azotyny (NO₂). Kolejnym krokiem jest przekształcenie azotanów i azotynów w tlenek azotu (N₂O) w wyniku procesu zwanego denitryfikacją. Denitryfikacja jest reakcją chemiczną, w której tlen jest usunięty z azotanów lub azotynów, a rezultatem jest trwały gaz cieplarniany N₂O o GWP na poziomie 265. Obecnie fakt ten nie jest uwzględniony w raportach dotyczących śladu węglowego (tlenki azotu nie mają przypisanej wartości GWP, tak jak ma to miejsce w przypadku podtlenku azotu).

Liczba gazów cieplarnianych z opisanym Potencjałem Ocieplania Globalnego (GWP) jest coraz większa. W 2013 r. IPCC w swoim raporcie opublikowała GWP w przypadku 207 gazów cieplarnianych. Listę rozpoczynał CO₂, a kończył HCF₂O (CF₂CF₂O)₄CF₂H. W 2021 r. liczba gazów cieplarnianych z opisaną wartością GWP wynosiła 252, począw-

szy od CO₂, a na butanie n-C₄H₁₀ kończąc. Podstawowy problem to brak chociażby uproszczonej metody obliczania GWP. Nie możemy w sposób wiarygodny określić, czy przykładowe NOx faktycznie i w jakim stopniu będą poddane denitryfikacji, czy może łańcuch chemicznych zależności zatrzyma się na azotanach.

Kolejną kwestią trudną w interpretacji są wartości GWP. Obliczając ślad węglowy wg wzoru 1, stosuje się zwykle wartości oddziaływania GWP przez 100 lat. Wynika to z porozumienia paryskiego, w którym 197 krajów zgodziło się na taką metodę raportowania zagregowanych emisji i usuwania gazów cieplarnianych na poziomie krajowym. Jest to duże uproszczenie. Gazy cieplarniane w atmosferze zachowują się bardzo różnie. Heksafluorek siarki (SF₆) wraz z upływem czasu ma tendencję do zwiększania efektu cieplarnianego, metan swój potencjał cieplarniany zmniejsza, a podtlenek azotu (N₂O) osiąga szczyt oddziaływania na środowisko właśnie po ok. stu latach przebywania w atmosferze.

$$GWP = \int_0^t RF(t') dt' \quad [4] \quad (1)$$

gdzie:

GWP = Potencjał Ocieplania Globalnego (Global Warming Potential);

RF(t') = Oddziaływanie promieniowania (Radiative Forcing) w określonym czasie (t');

t = okres, którego dotyczy GWP.

Z racji bardzo specyficznego zachowania gazów w atmosferze, inaczej obliczana jest wartość RF(t') niemal każdego gazu (związki halogenowe oraz inne mniej ważne gazy cieplarniane mają np. ten sam wzór). Przykłady wzorów umieszczono w tabeli 1. Wydaje się, że GWP nigdy nie może być wartością stałą.

W praktyce przyjęto, że Radiative Forcing (RF) dwutlenku węgla (CO₂) nie zmienia się w wyniku zmiany stężenia CO₂ w atmosferze. RF w przypadku CO₂ obliczane jest na podstawie zmian stężenia CO₂ między określonymi okresami, a nie w zależności od obecnego stężenia CO₂. Jest to różnica w pochłanianiu promieniowania słonecznego i emisji promieniowania ciepłego między dwiema sytuacjami: jedna odnosi się do warunków bazowych (np. 1750 r.), a druga do aktualnych warunków. RF

Tabela 1. Wzory oddziaływania promieniowania [5]
Table 1. Simplified expressions to compute radiative forcing (RF) [5]

GAZ	Uproszczony Wzór Oddziaływania Promieniowania	Współczynnik
CO ₂	$C_{\text{amax}} = C_0 - \frac{b_1}{2a_1}$ $a' = \begin{cases} d_1 - \frac{b_1^2}{4a_1}; & C > C_{\text{amax}} \\ d_1 + a_1(C - C_0)^2 + b_1(C - C_0); & C_0 < C < C_{\text{amax}} \\ d_1; & C < C_0 \end{cases}$	$a_1 = -2,4785 \cdot 10^{-7} \text{ W m}^{-2} \text{ ppm}^{-2}$ $b_1 = 7,5906 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppm}^{-2}$ $c_1 = -2,1492 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1/2}$ $d_1 = 5,2488 \text{ W m}^{-2}$ $C_0 = 277,15 \text{ ppm}$
N ₂ O	$\text{SARF}_{\text{N}_2\text{O}} = (a_2\sqrt{C} + b_2\sqrt{N} + c_2\sqrt{M} + d_2)(\sqrt{N} - \sqrt{N_0})$	$a_2 = -3,4197 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppm}^{-1/2} \text{ ppb}^{-1/2}$ $b_2 = 2,5455 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ $c_2 = -2,4357 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ $d_2 = 0,12173 \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1/2}$ $N_0 = 273,87 \text{ ppb}$
CH ₄	$\text{SARF}_{\text{CH}_4} = (a_3\sqrt{M} + b_3\sqrt{N} + d_3)(\sqrt{M} - \sqrt{M_0})$	$a_3 = -8,9603 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ $b_3 = -1,2462 \cdot 10^{-10} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ $d_3 = 0,045194 \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1/2}$ $M_0 = 731,41 \text{ ppb}$

w przypadku CO₂ jest stałe w konkretnym okresie referencyjnym, np. 1750 r. Wzrost stężenia CO₂ w atmosferze wpływa na długoterminowy efekt ocieplenia klimatu, ale nie zmienia wartości RF dwutlenku węgla. W miarę wzrostu stężenia CO₂ zwiększa się jego wpływ na efekt cieplarniany i klimat, ale RF pozostaje niezmiennie. GWP (*Global Warming Potential*) uwzględnia długoterminowy wpływ CO₂ na ocieplenie klimatu, dlatego zawsze wynosi 1. Inaczej sytuacja ma się z innymi gazami cieplarnianymi. Wraz z rozwojem nauki ich GWP ulega zmianie.

Wiedza na temat GWP wciąż się rozwija, co jest istotne z punktu widzenia oceny wpływu gazów cieplarnianych na zmiany klimatu, np. w 1995 r. raportowano, że GWP w przypadku metanu (CH₄) jest na poziomie 21 w perspektywie stu lat, podczas gdy w 2021 r. wartość ta wynosiła 27,9, co wskazuje na istotną tendencję wzrostową (tabela 2). Kontrowersyjna wśród społeczności naukowej jest kwestia dotycząca wyboru perspektywy czasu, który należy uwzględnić przy obliczaniu GWP. Niektórzy badacze preferują okres 20 lat, aby bardziej podkreślić wpływ krótkotrwałych ga-

zów cieplarnianych na zmianę klimatu. Inni uważają, że wartości GWP na 100 lat są bardziej właściwe, ponieważ uwzględniają długotrwały wpływ emisji gazów cieplarnianych [11].

Czy zanieczyszczenia klimatu (SLCP – *Short-lived Climate Pollutants*) o krótkim okresie życia, takie jak metan, ozon troposferyczny i wodorofluorowęglowodory (HFC – *hydrofluorocarbon gases*) powinny być traktowane inaczej niż CO₂? Mają one silniejszy efekt ocieplający niż dwutlenek węgla, a więc ich redukcja ma korzystny wpływ na ograniczenie efektu cieplarnianego w najbliższym czasie i może być bardzo opłacalna z punktu widzenia troski o środowisko. Działania podjęte obecnie w celu rozwiązania tego problemu mogą spowodować ocieplenie planety o ok. 0,6°C do 2050 r. Dodatkowo niektóre SLCP są również zanieczyszczeniami powietrza i mogą być szkodliwe dla zdrowia ludzkiego. Ich redukcja może więc nie tylko zmniejszyć ocieplenie klimatu, ale również ratować życie i poprawić stan zdrowia publicznego.

Na spotkaniu stron Protokołu Montrealskiego w 2016 r. w Kigali w Rwandzie kraje z całego świata uzgodniły prawnie

wiążące zobowiązanie do redukcji emisji HFC. To przełomowe porozumienie, znane jako poprawka z Kigali, obejmuje cele i harmonogramy zastąpienia HFC bardziej czystymi zamiennikami. Krajom, które ratyfikowały protokół, postawiono ograniczenia, np. handlu od 2033 r. z krajami, które tego nie zrobiły. Zobowiązano również bogatsze kraje do finansowania przejścia krajów biedniejszych na nowe standardy [12].

Dotychczas opracowano wiele alternatywnych metryk dotyczących GWP. Jedną z bardziej interesujących jest GWP* (dodano gwiazdkę). Zwolennicy GWP* twierdzą, że w przypadku SLCP liczy się tempo zmian stężenia w atmosferze. Jeśli metan trafia do atmosfery w takim samym tempie, w jakim jest degradowany do wody i CO₂, to nie ma efektu globalnego ocieplenia. Samo wprowadzanie idei liczenia SLCP skomplikowało sprawę odszukiwania przez architektów właściwego rozwiązania środowiskowego.

Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji w normie ASHRAE 189.1 publikuje wskaźniki emisji w przypadku paliw kopalnych dostarczanych do budynków, energii elektrycznej wykorzystywanej w budynkach oraz energii cieplnej dostarczanej do budynków z zakładów produkujących parę, gorącą wodę lub wodę lodową. Komitet projektowy normy 189.1 zdecydował się na użycie GWP20 do oceny emisji GHG w budynkach. Decyzja o zastosowaniu GWP20 w normie 189.1 nie była jednomyślna, ale większość komitetu ją poparła. Decyzja ta jest również zgodna z wytycznymi IPCC. IPCC zaleca wykorzystanie GWP100 do spójnego raportowania zgregowanych emisji oraz pochłaniania na poziomie krajowym i uznaje, że GWP20 jest odpowiednie do innego zastosowania. W praktyce prowadzi to do wniosku, że poza podstawowym założeniem – im mniejsze zużycie energii przez budynek, tym mniejsza jego emisja – brakuje obecnie głębszej, bardziej szczegółowej wiedzy na temat wpływu wybranego rozwiązania na środowisko. Oznacza to, że poza oczywistymi wnioskami typu – im mniej energii zużywa budynek, tym mniejsza jest jego emisja, dziś nic dokładniej nie wiemy. Niejasne

Tabela 2. Wartości GWP podstawowych gazów cieplarnianych
Table 2. Historical changes in GWP values of basic greenhouse gases

Liczba lat	SAR 1995 [6]			TAR 2001 [7]			AR4 2007 [8]			AR5 2013 [9]			AR6 2021 [10]		
	20	100	500	20	100	500	20	100	500	20	100	500	20	100	500
CH ₄	56	21	6,5	62	23	7	72	25	7,6	84	28	b.d	81,2	27,9	7,95
N ₂ O	280	310	170	275	296	156	289	298	153	264	265	b.d	273	273	130

jest np., czy lepszym rozwiązaniem środowiskowym jest kocioł gazowy czy np. pompa ciepła. GWP20 kładzie znacznie większy nacisk na emisję metanu i powoduje, że urządzenia elektryczne wyglądają nieco lepiej niż gazowe, a więc zupełnie odwrotnie, niż miałyby to miejsce w przypadku GWP100 [13].

Jak widać, obliczanie śladu węglowego to złożony proces, który rozpoczyna się od identyfikacji źródeł i ilości emisji gazów cieplarnianych. Istnieją jednak trudności związane z uzyskaniem dokładnych danych na ten temat. Ponadto, kontrowersje dotyczące wyboru wartości GWP i okresu, którego dotyczą, wprowadzają wyzwania w ocenie wpływu na klimat. Kwestie krótko żyjących zanieczyszczeń klimatycznych (SLCP) dodatkowo komplikują tę ocenę. Wybór odpowiednich metryk, takich jak GWP*, jest kluczowy w ocenie wpływu na środowisko. Cały proces wymaga ciągłego rozwoju wiedzy i zaawansowanych narzędzi, aby bardziej precyzyjnie ocenić wpływ emisji na klimat.

Błędne założenia

Istnieje całe spektrum problemów wynikających z niezrozumienia idei liczenia śladu węglowego w budownictwie. Podstawą błędnych założeń zawsze jest rozpatrywanie danych w oderwaniu od kontekstu środowiskowego. Oto kilka przykładów błędnych założeń dotyczących emisji operacyjnych w budynkach.

1. Zbyt krótki łańcuch analizy nieuwzględniający kompletu danych. Niestety problem zbyt krótkiego łańcucha analiz śladu węglowego można dostrzec obecnie nawet w polskich przepisach budowlanych. Oczywiście termin *ślad węglowy* nie jest bezpośrednio przywołany, ale *energia pierwotna* ma kolosalne znaczenie. Energia pierwotna, to energia pozyskiwana z zasobów odnawialnych i nieodnawialnych. Do zasobów nieodnawialnych należą paliwa kopalne, takie jak węgiel/ropa/gaz, a zasoby odnawialne, to energia geotermalna/wiatr/słońce. W przepisach dąży się do uzyskania niskich współczynników nieodnawialnej energii pierwotnej, czyli do ograniczania emisji ga-

zów cieplarnianych ze spalania paliw kopalnych. Oznacza to jednocześnie niski ślad węglowy.

Panele PV są obecnie traktowane jako bezemisyjne źródła energii elektrycznej. Podkreśla ten fakt wartość współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii końcowej w_i . Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z 5 października 2017 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii określono wartość tego współczynnika w przypadku energii słonecznej na poziomie 0,0 (zero). Dla porównania biomasa ma wartość 0,2, a systemowa sieć elektryczna 2,5. Krótki łańcuch analiz emisyjności tego rozwiązania rozpoczyna się i kończy na miejscu instalacji systemu fotowoltaicznego, co jest zasadniczym błędem. W przypadku paneli PV emitery gazów cieplarnianych nie znajdują się na farmie fotowoltaicznej, ale z łatwością odszukać je można po stronie gestora sieci, do której instalacja jest podłączona.

Problemem generującym znaczne emisje jest konieczność magazynowania energii. Najlepiej byłoby, gdyby prosumenci produkowali i używali energię na miejscu. Niestety profil produkcji nie zgadza się z profilem zużycia. W okresie zimy w naszej szerokości geograficznej panele PV w znacznym stopniu tracą sprawność (fotografia), a zapotrzebowanie na energię ulega zwiększeniu. Nie mamy w kraju rozwiniętych alternatywnych metod magazynowania typu power-to-gas. Magazynowanie energii oznacza tyle co „przesyłanie energii” do innych odbiorców (w okresie lata), a w dalszej perspektywie „produkowanie energii” ze stabilnego źródła (w okresie zimy). W Polsce prosumenci w okresie zimy posiłkują się energią wyprodukowaną z węgla. Tylko formalnie jest to ich energia pomniejszona o koszty „magazynowania”. Na rysunku przedstawiono rozkład efektywności paneli PV w Polsce w miesiącach od stycznia do grudnia.

W polskich warunkach klimatycznych ślad węglowy obiektu wyposażonego w ogniwa fotowoltaiczne nie wy-



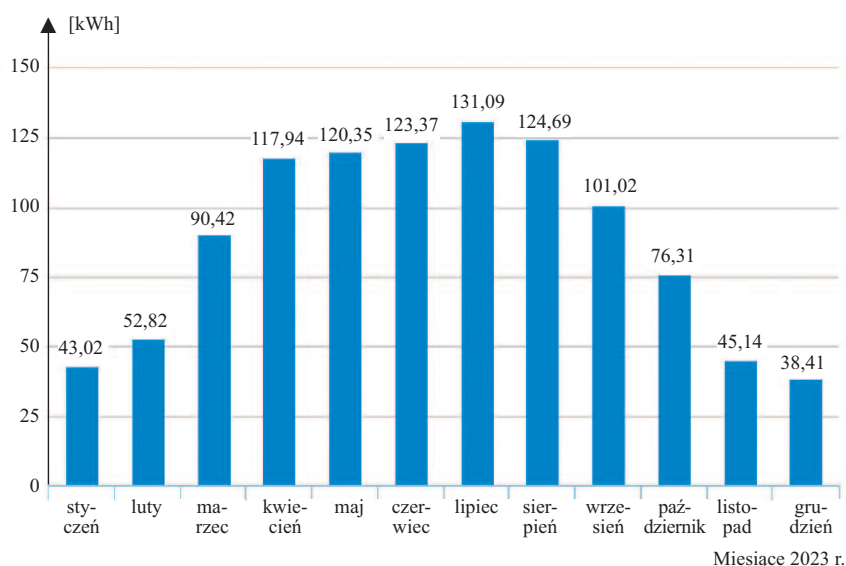
Panele PV w grudniu, lokalizacja: Kraków. 2023 r.

PV panels in December, location: Krakow. 2023

nosi zero. Jeśli parametr w_i w przypadku sieci systemowej wynosi 2,5 i przynajmniej 20% energii w budynkach posługujących się PV należy pokryć z tej właśnie sieci, to w_i dla PV powinien wynosić ok. 0,5. Oczywiście może być on „łagodzony”, ponieważ energia z dni słonecznych nie jest marnowana, lecz przesyłana do innych odbiorców (zmienia się ślad węglowy obiektów, które nie posiadają PV). Obliczeniowa wartość śladu węglowego w przypadku energii operacyjnej obiektu z panelami PV nie może jednak wynosić zero. W Polsce w okresie zimy zawsze będzie istnieć konieczność produkcji energii ze stabilnego źródła, nawet jeśli na każdym dachu w naszym kraju zamontowane będą panele PV. Istnieje więc konieczność weryfikacji parametrów w_i przyjmowanych dla energii słonecznej.

2. Łańcuch analiz nieuwzględniający procesów fizyczno-chemicznych. Przywołane wcześniej Rozporządzenie Ministra Energii wskazuje na parametr w_i biomasy na poziomie 0,2. Jej spalanie budzi pewne kontrowersje i wydawać by się mogło, że powoduje emisję niebezpiecznych gazów cieplarnianych.

W raporcie ośrodka Chatham House przedstawiono, że spalanie biomasy charakteryzuje się wyższym śladem węglowym niż spalanie węgla [15]



Szacunkowy poziom produkcji energii fotowoltaicznej w Polsce [14]
Estimated annual level of photovoltaic energy production in Poland [14]

(Brack, 2017 s. 15). Autorzy raportu nie zauważyli, że dwutlenek węgla jest gazem cieplarnianym, ale jednocześnie jest bardzo potrzebny w środowisku naturalnym. Z punktu widzenia ochrony środowiska, usunięcie stosunkowo nowych plantacji roślin przeznaczonych np. na biomasę nawet bez zapewnienia ciągłości plantacji (bez nowych nasadzeń), nie ma istotnych konsekwencji środowiskowych. Można w uproszczeniu powiedzieć, że takim działaniem cofamy bilans CO₂ w atmosferze do momentu sprzed powstania plantacji, czyli do czasu, zanim rośliny zaczęły wiązać CO₂. Proces wiązania i uwalniania CO₂ to zaledwie kilka, częściej kilkanaście lat. Zupełnie inaczej sytuacja wygląda, kiedy wycinane są np. lasy równikowe, więc niszczone ekosystemy, które powstawały nawet 180 mln lat temu [16]. Usuwanie takiego ekosystemu, wprowadzamy do atmosfery dwutlenek węgla, który nasza planeta związała jeszcze przed pojawieniem się człowieka. Jeszcze gorzej przedstawia się bilans gazowy całej planety, gdy spalamy paliwa kopalne. Emitujemy gazy cieplarniane, które ziemia związała nawet 500 milionów lat temu (złoża ropy występują w utworach od kambru do trzeciorzędu, głównie w utworach mezozoicznych). Tym samym gazowo „cofamy” naszą planetę do kambru. Nawet jeśli wartość śladu węglowego spalania biomasy jest większa niż spalania

węgla, to spalanie biomasy nie jest zagrożeniem dla ludzkości, ponieważ wprowadzamy do atmosfery dwutlenek węgla, który w przyjaznej dla nas atmosferze był zaledwie kilkanaście lat wcześniej. Nie należy takiego rozumowania przenosić na nasadzenia drzew, które mają równoważyć emisję CO₂ ze spalania surowców kopalnych. Tego rodzaju nasadzenia powinny być uznawane za trwałe ekosystemy, tylko ich trwałość zapewnia skuteczne związanie CO₂eq.

Spalanie biomasy z punktu widzenia emisji gazów cieplarnianych jest najbardziej ekologicznym rozwiązaniem. Uwalniane są produkty spalania, które biomasa wiązała w krótkim okresie, nie zmieniając przy tym w istotny sposób atmosfery planety. Współczynnik w_i tego rozwiązania powinien wynosić zero. Jednocześnie należy podkreślić, że bezpieczne spalanie biomasy w kotłach możliwe jest tylko na obszarach, które mają możliwości szybkiego przewietrzania przestrzeni.

Identyfikacja i ocena śladu węglowego w budownictwie napotyka wiele wyzwań i problemów. Błędne założenia często wynikają z braku uwzględnienia kontekstu środowiskowego oraz braku pełnego analizowania danych. Niezrozumienie lub błędne założenia mogą prowadzić do fałszywych wniosków dotyczących wpływu budynku na zmiany klimatu i środowisko naturalne.

Wyniki – trudności porównawcze

Obecnie deklarowane produktowe ślady węglowe na potrzeby budownictwa najłatwiej możemy odszukać na kartach EPD (*Environmental Product Declaration*), nazywanych w Polsce „Deklaracjami Środowiskowymi typu III”. Są to dokumenty, które powinny w przejrzysty sposób informować o efektywności środowiskowej lub wpływie na środowisko dowolnego produktu lub materiału przez cały okres jego użytkowania. Znając zapisy EPD, inżynierowie powinni móc wybrać najbardziej zrównoważoną opcję do swojego projektu.

Ślad węglowy wyrobów budowlanych przedstawiany w EPD był zazwyczaj liczony zgodnie z normą EN 15804 w modułach A1 – A3, tj. z uwzględnieniem wydobycia i przetwarzania surowców, przetwarzania wsadu materiałów wtórnych, transportu do producenta oraz produkcji. 21 czerwca 2019 r., po formalnym głosowaniu Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN), zaakceptowana została zasadnicza zmiana normy EN 15804.

Zgodnie ze zmienioną normą (EN 15804 +2a), deklaracja EPD powinna obejmować wszystkie etapy cyklu życia. Wszystkie wyroby i materiały budowlane muszą mieć teraz zadeklarowane moduły A1-A3, C1-C4 i D (A4-B7 są modułami dodatkowymi) [17]. Konieczne jest więc deklarowanie emisyjności z produktu budowlanego z etapów: rozbiórki; transportu do przetwarzania odpadów; przetwarzania odpadów w celu ponownego użycia; odzysku i/lub recyklingu, ewentualnie utylizacji. Potrzebne jest przedstawienie potencjału ponownego użycia, wyrażone jako wpływy i korzyści netto. Tylko w bardzo szczególnych warunkach nadal możliwe jest przeprowadzenie wyłączonej oceny EPD (A1-A3). We wszystkich innych przypadkach należy uwzględnić koniec cyklu życia (EOL – End of life). Wszystkie te zabiegi są konieczne w celu porównywalności wyników. Należy jednak podkreślić, że EPD nigdy nie były przeznaczone do porównywania produktów. Ślad węglowy deklarowany był w celu odzyskiwania najistotniejszych zagrożeń oraz

próby ich eliminacji. Próba porównywania wyników śladu węglowego wyrobu budowlanego i uwzględniania go jako elementu kluczowego w decyzji o wyborze tego czy innego rozwiązania jest dziś bardzo kłopotliwa, np. materiał budowlany „A” ma trwałość 15 lat, niski ślad węglowy, nadaje się do recyklingu w 100%, a materiał budowlany „B” ma trwałość 60 lat, wysoki ślad węglowy i nadaje się do recyklingu w 100%.

Teoretycznie rzetelne porównanie produktu „A” i „B” powinno uwzględniać w przypadku produktu „A” dodanie do bazowej wartości przynajmniej trzykrotnego śladu węglowego z zakresu C1 – C4 (produkt będzie 3 razy częściej pochodził z recyklingu). W praktyce trzy razy większe emisje będą również w niewymaganych (zgodnie z normą EN 15804 +2a) zakresach A4, A5, B4, czyli emisje związane z montażem i demontażem. Jeszcze trudniej porównywać ze sobą materiały, które tylko częściowo nadają się do przetworzenia. W przypadku wyrobów budowlanych praktycznie nie ma takich, które w 100% nadają się do recyklingu.

Uwzględnienie trwałości materiałów budowlanych jest absolutnie konieczne przy analizach wpływu produktu na środowisko naturalne. Jednocześnie parametr ten może być drogą do przekłamywania wyników wskazywanych w deklaracji i w istocie może posłużyć do manipulacji danymi. Podstawowy problem dotyczy rzetelności deklarowanej wartości opisującej trwałość. Obecnie mamy dwie strategie gwarancyjne producentów materiałów budowlanych i nie tylko materiałów budowlanych:

a) zawiązanie jakości wyrobu budowlanego – wyższa cena za produkt nie idzie w parze z jakością, ale bilansuje ewentualną konieczność napraw gwarancyjnych;

b) zaniżenie jakości wyrobu budowlanego – produkt budowlany dobrej jakości ma obniżoną deklarowaną trwałość po to, aby nie narażać się na konieczność napraw gwarancyjnych.

Każdy z tych przypadków jest niewłaściwy do rzetelnej analizy trwałości w kontekście śladu węglowego i analiz wpływu produktu na klimat. Obecnie

porównywanie materiałów budowlanych pod kątem parametrów opisanych w deklaracjach jest bardzo trudne. Dodatkowym prozaicznym problemem jest np. brak stosowania tej samej jednostki na deklaracjach wykonywanych przez różne podmioty, np. producent cementu może odnosić CO₂e_q do kg lub m³ materiału, a nawet m³ betonu.

Podsumowanie

Rozważając szeroki zakres zagadnień związanych z obliczaniem śladu węglowego w budownictwie, nie sposób uniknąć licznych trudności i wyzwań. Począwszy od analizy cyklu życia produktów budowlanych po uzyskiwanie dokładnych danych oraz ustalanie jednolitych standardów i metod oceny, proces ten jest skomplikowany i czasochłonny. Dodatkowo, próba porównywania różnych materiałów budowlanych, uwzględniając aspekty takie, jak trwałość i możliwość recyklingu, staje się zadaniem wyjątkowo złożonym.

Mimo tych wyzwań, obliczanie śladu węglowego w budownictwie ma sens. Stanowi bowiem narzędzie pozwalające na identyfikację kluczowych zagrożeń dla środowiska naturalnego i podejmowanie działań w celu ich ograniczenia. Pomaga projektantom i inżynierom podejmować bardziej świadome decyzje, kierując się zasadami zrównoważonego rozwoju i dążąc do rozwiązań przyjaznych dla klimatu. Kluczowym wyzwaniem pozostaje jednak konieczność ujednoczenia standardów i metod oceny śladu węglowego oraz rzetelnej prezentacji danych przez producentów. Pomimo trudności, obliczanie śladu węglowego stanowi krok w kierunku bardziej zrównoważonej przyszłości, w której budynki służą ludziom, a jednocześnie minimalizowany jest ich negatywny wpływ na naszą planetę.

Fot. M. Ciula

Literatura

- [1] Międzynarodowa Agencja Energetyczna www.iea.org/topics/buildings, dost. 19.01.2022
- [2] 2021 Global status report for buildings and construction; www.globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BO-OK.pdf dost. 10.12.2021
- [3] Lammel G; Graßl H. Greenhouse effect of NOX w Environmental Science and Pollution Research volume 2, 1995 r.

[4] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/IPCC%20Workshop%20on%20Emission%20Metrics%20-%20Overview.pdf> dost. 05.11.2023

[5] Chris Smith et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material, 2021 r. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf dost. 05.11.2023

[6] Schimel D, Alves D, Enting I, Heimann M et al. Chapter 2: Radiative Forcing of Climate Change. w Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC)

[7] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, Hauglustaine D et al. Chapter 6: Radiative Forcing of Climate Change. w Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC).

[8] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T. et al. Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC).

[9] Myhre G, Shindell D, Bréon FM, Collins W et al. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC).

[10] Op. cit. Chris Smith et al, 2021 r.

[11] U. S. Environmental Protection Agency, Understanding Global Warming Potentials | US EPA online: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials#Le-am%20why> dost. 31.08.2022.

[12] Short-lived Climate Pollutants – Center for Climate and Energy Solutions Center for Climate and Energy Solutions online: www.c2es.org dost. 01.09.2022 r.

[13] Eley Ch. https://www.eley.com/node/83#_ftnref7 dost. 04/10/2022.

[14] JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – European Commission, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP, dost. 13.09.2022.

[15] Brack D. Woody Biomass for Power and Heat: Impacts on the Global Climate. Environment, Energy and Resources Department | Februry 2017 s. 15.

[16] Russell, Rupert. Daintree, where the rainforest meets the reef (2 ed.). Sydney: Lansdowne Publishing Pty Ltd and Australian Conservation Foundation. 1994, ISBN 0646181580. s. 86

[17] Life Cycle Stages <https://oneclicklca.zen-desk.com/hc/en-us/articles/360015064999-Life-Cycle-Stages> dost. 07.09.2022 r.

Przyjęto do druku: 16.11.2023 r.