

Metodologija proračuna ugljeničnog otiska proizvoda na primeru mlekare

Mladen Josijević, Dušan Gordić, Vanja Šušteršič, Vladimir Vukašinović, Dubravka Živković, Jelena Nikolić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - U radu je predložena metodologija za proračun emisija CO₂ po proizvodu. Razvijena metodologija se bazira na detaljnom energetskom pregledu postrojenja radi utvrđivanja tokova energije i sirovina i primeni GHG protokola za proračun ugljeničnog otiska. Emisioni koeficijenti su usvojeni pregledom literature i relevantnih baza podataka. Metodologija je testirana na studiji slučaja, preduzeću iz sektora mleka i mlečnih proizvoda.

Ključne reči - Ugljenični otisak proizvoda, mlekara, CO₂ emisije

1 UVOD

Da bi se globalno zagrevanje ograničilo na znatno ispod 2 °C, kako je dogovoreno Pariskim sporazumom, neophodna su brza i u većini slučajeva trenutna smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG) u svim sektorima [1]. Apsolutno smanjenje emisija postaje prioritet, posebno u smislu postizanja nulte emisije GHG gasova do 2050. godine [2], s obzirom na ciljeve postavljene Evropskim zelenim dogovorom [3] kao i paketom Fit for 55 [4].

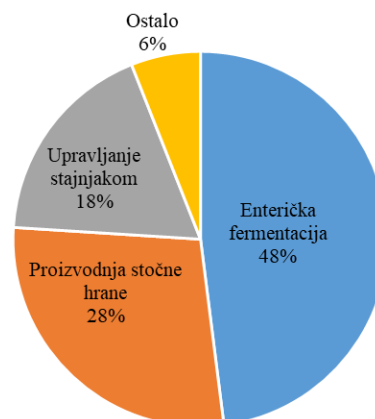
Stoga se korporativna klimatska akcija sve više smatra važnom u pokretanju tranzicije ka ekonomiji sa niskim sadržajem ugljen-dioksida [5]. Od 2025. godine stupila je na snagu Direktiva o izveštavanju o korporativnoj održivosti (eng. *Corporate Sustainability Directive* (CSRD)) [6] kojom se od preduzeća traži da izveštavaju o nefinansijskim informacijama uključujući ESG (eng. *European sustainability reporting*) [7] izveštavanje, uzimajući u obzir ugljenični otisak preduzeća.

U prelaznom periodu, od usvajanja direktive, kompanije su se fokusirale na izveštavanje o emisijama koje su pod njihovom direktnom vlasničkom i/ili operativnom kontrolom (emisije u okviru opsega 1 (eng. *Scope 1*) kao i emisije od kupljene energije (Scope 2), dok je izveštavanje o emisijama u okviru Scope 3 najčešće izuzeto. Nasuprot, u većini industrijskih grana, a posebno u sektoru prerade hrane ove emisije su dominantne pa je iz tog razloga neophodno izveštavanje i o ovim emisijama [8]. Na primer, u sektoru prerade mleka, emisije iz opsega 3 (Scope 3) čine oko 70-80% svih emisija [9].

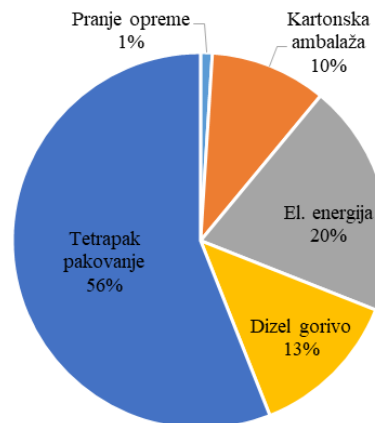
Emisije gasova sa efektom staklene bašte poreklom iz sektora prerade mleka se iz godine u godinu povećavaju zbog kontinualnog porasta konzumiranja mleka i mlečnih proizvoda i porasta populacije [10]. Očekivani porast proizvodnje mleka na globalnom nivou je za oko 1,4% godišnje [11]. Učešće ovog sektora u ukupnim emisijama u zemljama EU je oko 5% [12].

Stoga, smanjenje intenziteta emisija GHG u ovom sektoru predstavlja ključni izazov postizanja održivosti.

Proračun ugljeničnog otiska farmi kao dominantnih izvora emisija kada su u pitanju mleko i mlečni proizvodi je predmet analize u mnogim naučnoistraživačkim radovima [11, 13-16]. Prema [11] na farmama u Mongoliji se emituje od 1,6 kgCO_{2e} do 3,4 kgCO_{2e} po litri sirovog mleka. Varijacije u emisijama su posledica načina čuvanja, načina ishrane i upravljanja stajnjakom. Najveći udeo u emisijama (često preko 50% [15,16]) čine emisije metana (CH₄), kao posledica enteričke fermentacije pri procesu varenja goveda, ali i emisije iz stajnjaka. Na slici 1 prikazani su udeli pojedinačnih emisija u ukupnim emisijama na farmama u Kanadi.



Slika 1. Emisije CO_{2e} na farmama u Kanadi [15]

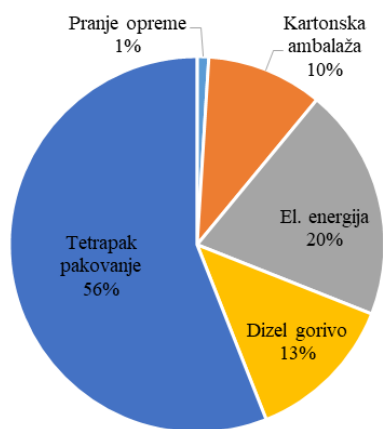


Slika 2. Pojedinačne emisije CO_{2e} pri procesu proizvodnje mlečnih proizvoda [16]

U Španiji su izračunate emisije poreklom sa farmi, koje se kreću u granicama od 1,23 kgCO₂/kg do 1,31 kgCO₂/kg [14], dok su prosečne vrednosti emisija u Italiji oko 1,26 kgCO_{2e}/kg, Austriji 1,1 kgCO_{2e}/kg, i Irskoj 1,26 kgCO₂/kg. U zemljama zapadne Evrope emisije sa farmi su u granicama od 1,1 do 1,52 kgCO_{2e}/kg sirovog mleka.

Emisije ekvivalentnog ugljen-dioksida koje nastaju u toku procesa proizvodnje mlečnih proizvoda čine obično oko 15% u ukupnim emisijama CO_{2e} [16]. Na slici 2., prikazani su izvori emisija koje nastaju u procesu proizvodnje mlečnih proizvoda.

Sa slike se može zaključiti da su dominantne emisije one koje nastaju pri procesu proizvodnje ambalaže za mlečne proizvode koje čine čak 56% (96 gCO_{2e}/kg). Ukupna potrošnja energije je odgovorna za 33% emisija koje nastaju pri procesu obrade mleka, a u ukupnim emisijama čini udeo od oko 5%.



Slika 2. Pojedinačne emisije CO_{2e} pri procesu proizvodnje mlečnih proizvoda [16]

Kada je u pitanju proračun ugljeničnog otiska proizvoda, uglavnom su u radovima predložene metodologije koje su vrlo kompleksne, zahtevaju relativno veliki broj ulaznih parametara koji često nisu raspoloživi i ne uzimaju u obzir emisije iz opsega 3, koje su ujedno dominantne.

Zbog svega prethodno navedenog u ovom radu biće prikazana relativno jednostavna metodologija za utvrđivanje ugljeničnog otiska proizvoda, koja se bazira na sprovođenju energetskog pregleda radi utvrđivanja tokova energije i primeni metodologije predložene GHG protokolom. Metodologija obuhvata i emisije iz opsega 3. Predložena metodologija se uz adekvatne modifikacije može primeniti na više grana prehrambene industrije.

II METODOLOGIJA PRORAČUNA UGLJENIČNOG OTISKA PROIZVODA

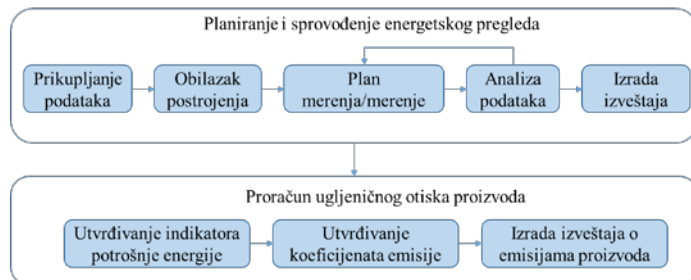
Metodologija proračuna emisija CO₂ po proizvodu prikazana je na slici 3. Predložena metodologija se sastoji iz dva osnovna koraka, a to su:

- planiranje i sprovođenje energetskog pregleda i
- proračun ugljeničnog otiska proizvoda.

II-1 Planiranje i sprovođenje energetskog pregleda

Kako bi se utvrdili procentualni udeli potrošnje različitih oblika energije i energenata po proizvodu neophodno je izvršiti detaljan energetski pregled preduzeća koji se zasniva na standardu ISO

50002:2014. Prema standardu, energetski pregled se sastoji od sledećih faza (slika 3) [17]: prikupljanje podataka, obilazak lokacije postrojenja, sprovođenje plana merenja i obavljanje merenja, analiza podataka i izrada izveštaja [18].



Slika 3. Blok šema predložene metodologije

Prikupljanje podataka

Prvi korak pri izradi energetske revizije je prikupljanje detaljnih podataka o postojanju koje je predmet energetske analize. Kako bi se lakše prikupili, a u narednoj fazi i analizirali prikupljeni podaci, neophodna je saradnja rukovodstva preduzeća (odgovornih lica) i upoznavanje energetskih savetnika sa procesima i tokovima energije unutar pojedinačnih procesa i postrojenja kao celine. Nakon prve posete preduzeću i intervju sa rukovodiocima, pristupa se izradi plana sprovođenja energetskog pregleda. Na kraju ove faze energetskog pregleda, energetski savetnik donosi odluku o dodatnim aktivnostima (merenjima) koje je neophodno izvršiti kako bi se dobila šira slika o tokovima energije unutar proizvodnog preduzeća.

Obilazak postrojenja

Obilazak postrojenja predstavlja važan korak u sprovođenju energetskog pregleda postrojenja. Cilj obilaska je upoznavanje sa proizvodnim procesima, utvrđivanje tokova sirovine i energije i prikupljanje informacija neophodnih za naredne korake u sprovođenju energetskog pregleda.

Plan merenja i merenje

Potrošnja energije svakog pojedinačnog procesnog aparata ili mašine se često značajno razlikuje od projektovane ili od one koju propisuje proizvođač. S tim u vezi, merenje predstavlja neizbežnu fazu pri izradi svakog energetskog pregleda. Merenjem potrošnje energije svakog pojedinačnog uređaja u proizvodnoj liniji povećava se baza podataka, koja u narednoj fazi izrade energetskog pregleda omogućava lakše razumevanje energetskih tokova i proračun specifičnih indikatora (pokazatelja) potrošnje energije.

Analiza stanja i predlog mera

U ovoj fazi izrade energetskog pregleda preduzeća na osnovu prikupljenih podataka i izmerenih vrednosti potrošnje energije pristupa se utvrđivanju specifičnih indikatora potrošnje (kWh/toni prerađenog mleka, kWh/toni gotovog proizvoda i dr.). Proračunava se udeo potrošnje pojedinih uređaja u ukupnoj potrošnji energije i mapiraju se lokacije (kritične tačke) sa mogućnošću smanjenja potrošnje energije implemtacijom mera energetske efikasnosti.

Obzirom na to da se u mlekarima najčešće proizvode više

različitih proizvoda, neophodno je za svaki od njih, odrediti potrošnju energije za svaku tehničku operaciju koja se sprovodi u procesu proizvodnje. Najčešće procesne operacije koje troše električnu energiju u mlekarnama su: procesno hlađenje i hlađenje proizvoda, homogenizacija, separacija, mešanje, transport materijala (pumpa) [19]. Procesne operacije koje zahtevaju toplotnu energiju su pasterizacija i kuvanje.

Potrošnju električne energije svakog pojedinačnog uređaja, zbog promenljivog opterećenja, najbolje je izmeriti u realnim eksploatacijskim uslovima korišćenjem adekvatne merne opreme (trofazni analizator snage, merna klešta...) ili proceniti na osnovu nominalne snage i godišnjeg časovnog angažovanja [20]:

$$E = P \cdot T \text{ [kWh/y]} \quad (1)$$

gde su:

E [kWh/y] - potrošnja električne energije na godišnjem nivou,

P [kW] - nominalna snaga,

T [h/y] - procenjeno godišnje časovno angažovanje

Za električne uređaje kod kojih potrošnja energije zavisi od više faktora (npr. kod rashladnih sistema, od količine i temperature sirovine koja se podvrgava hlađenju, spoljne temperature i dr.) vrši se merenje potrošnje u dužem vremenskom intervalu (najmanje mesec dana) ili izračunavanje potrošnje na osnovu količine energije potrebne za hlađenje proizvoda i vrednosti koeficijenta performansi rashladnog uređaja:

$$E = M \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot COP^{-1} \quad (2)$$

gde su:

M [kg] - masa proizvoda koji se hladi,

c_p [kWh/kgK] - specifična toplota,

ΔT [K] - razlika između početne i krajnje (željene) temperature proizvoda,

COP [-] - koeficijent performansi rashladnog uređaja.

Na isti način, potrošnja toplotne energije jednaka je količini energije potrebnoj da se proizvod koji se tretira zagreje sa početne na neku krajnju procesom zahtevanu temperaturu:

$$Q = M \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta^{-1} \quad (3)$$

gde je η [-] efikasnost sistema grejanja.

Pri proračunu količine rashladne i toplotne energije za potrebe procesa, neophodno je precizno usvojiti vrednosti specifičnih toplota. One se bitno razlikuju od faze do faze proizvodnje na istoj proizvodnoj liniji, jer se menjaju temperatura i svojstva materije. Vrednosti specifičnih toplota za karakteristične proizvode od mleka prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje specifične toplote za različite proizvode od mleka [21, 22]

	Specifična toplota [kJ/kgK]
Punomasno mleko	3,914
Obrano mleko	3,97
Jogurt	3,5
Sir	3,27
Pavlaka	3,51-3,56
Kiselo mleko	3,5
Drobljeni sir	3,5

Nakon utvrđivanja potrošnje električne i toplotne energije za svaki od pojedinačnih potrošača, pristupa se utvrđivanju indikatora specifične potrošnje energije (kWh/toni prerađenog mleka, kWh/toni gotovog proizvoda i dr.) [23, 24]). Takođe, proračunavaju se udeli pojedinih komponenata koje figurišu u sastavu proizvoda (voda, so, aditivi, palmino ulje i dr.), ali i transportni troškovi, ambalaža i dr. Nakon ove vaze, sledi proračun ugljeničnog otiska proizvoda baziran na GHG protokolu.

II-2 Proračun ugljeničnog otiska proizvoda

Proračun ugljeničnog otiska proizvoda zahteva sveobuhvatnu procenu emisija gasova sa efektom staklene bašte u svim fazama proizvodnog lanca, od ulaza sirovine i ambalaže do kraja životnog veka proizvoda uključujući pritom direktne i indirektne emisije.

Predložena metodologija za izračunavanje ugljeničnog otiska proizvoda je u skladu sa smernicama navedenim u međunarodno priznatim standardima, uključujući Izveštaj o klimatskim promenama iz 2023. godine (eng. 2023 IPCC Report on Climate Change [25]), protokol o gasovima sa efektom staklene bašte (eng. GHG Protocol [26]) i standarde ISO 14040 i ISO 14044. Uticaji svih gasova sa efektom staklene bašte izraženi su preko ekvivalentnog CO_{2e} što je definisano jednačinom 4 [27].

$$CO_{2e} = GHG \cdot GWP_{GHG} \quad (4)$$

gde su:

CO_{2e} [kgCO_{2e}] - ekvivalentne emisije ugljendioksida,

GHG [kg] - emisije datog gasa,

GWP_{GHG} [kgCO_{2e}/kgGHG] - potencijal globalnog zagrevanja (eng. global warming potential) datog GHG gasa.

Ugljenični otisak proizvoda jednak je zbiru ekvivalentnih emisija svih komponenata/sirovina koji ulaze u sastav tog proizvoda i emisija koje nastaju kao posledica potrošnje energenata za proces dobijanja gotovog proizvoda, tj. kao zbir svih direktnih i indirektnih emisija [27]. Ako se pretpostavi da proizvod sadrži n komponenata/sirovina, onda se može pisati:

$$CF = \sum_{i=1}^n (CO_{2ed})_i + \sum_{i=1}^n (CO_{2ei})_i \quad (5)$$

gde su:

CF [kgCO_{2e}/kg proizvoda] - ugljenični otisak proizvoda,

$(CO_{2ed})_i$ [kgCO_{2e}/kg pr.] - direktne emisije i -te komponente/sirovine,

$(CO_{2ei})_i$ [kgCO_{2e}/kg pr.] - indirektne emisije i -te komponente/sirovine.

Kada su u pitanju emisije u okviru opsega 1 (Scope 1), one obuhvataju sve direktne emisije koje nastaju kao posledica sagorevanja fosilnih goriva na lokaciji, procesne emisije, emisije usled curenja rashladnih sredstava i drugih gasova sa efektom staklene bašte i emisije usled sagorevanja goriva sa potrebe transporta vozila u vlasništvu kompanije. Utvrđivanjem potrošnje energenata i usvajanjem koeficijenata emisije za energente iz relevantnih baza podataka ili korišćenjem podatka o emisijama dobijenim direktno od dobavljača energenta, računaju se emisije u okviru Scope 1:

$$CO_{2e} = QE \cdot CE \quad (6)$$

gde su:

QE [kWh] - količina potrošenog energenta/energije

CE [kgCO_{2e}/kWh] - koeficijent emisije.

U tabeli 2 dati su koeficijenti emisije koji mogu biti korišćeni za proračun ugljeničnog otiska proizvoda za energente kupljene u Srbiji.

Tabela 2. Koeficijenti emisije za energente u Srbiji [28]

Energent	Koeficijent emisije	
	[kgCO _{2e} /jed.]	[kgCO _{2e} /kWh]
Lignit za industrijsku svrhu [t]	1.037,52	0,36
Lignit kostolac [t]	759,2	0,4
Lignit kolubara [t]	967,2	0,4
Benzin (motorni benzin) [l]	2,21	0,25
Biodizel [l]	2.264	0,25
Dizel gorivo - gasno ulje [l]	2,75	0,27
Ulje za loženje srednje S - Ulje za loženje srednje (mazut) [t]	0,28	3.174
Prirodni gas [m ³]	1,85	0,18
Komprimovani prirodni gas - CNG - metan [l]	1,85	0,18

Scope 2 obuhvata sve emisije nastale kao posledica potrošnje kupljene energije (električna energija, para, toplotna ili rashladna energija). Korišćenjem jednačine 6, računaju se sve emisije u okviru ovog opsega emisija. Treba naglasiti da je kod proračuna emisija u okviru Scope 2 neophodno uzeti u obzir i emisije koje nastaju kao posledica eksploatacije, transporta i distribucije energenata (*eng. upstream emission*) koje se obračunavaju u okviru Scope 3.3

U tabeli 3 dati su koeficijenti emisije koji mogu biti korišćeni za proračun u okviru Scope 2 i koji važe sa Srbiju.

Tabela 3. Koeficijenti emisije za kupljenu energiju [28]

Energent	Koeficijent emisije [kgCO _{2e} /kWh]
Para [kWh]	0,287
Topla voda [kWh]	0,287
Električna energija [kWh]	1,099

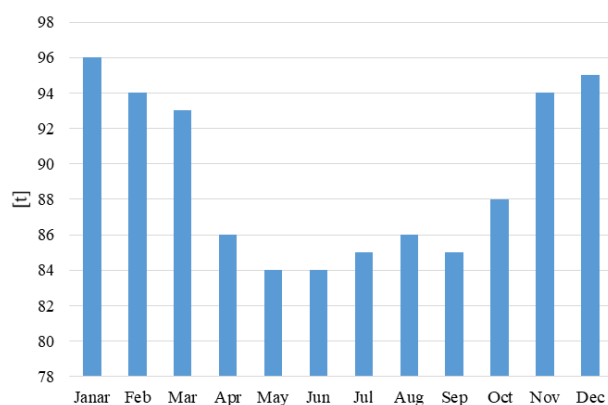
Kao što je već bilo reči, emisije u okviru Scope 3 često čine i najveći procenat emisija. U ovaj opseg spadaju sve emisije nastale kao posledica kupljenih dobara, usluga i kapitalnih investicija. Takođe sve emisije nastale kao posledica sagorevanja goriva za transport materijala i sirovina do lokacije, ali i od lokacije do veleprodaja, magacina, maloprodajnih objekata i sl. i emisije usled putovanja zaposlenih (na posao i službena putovanja), iznajmljena imovina, tretman otpada i dr. Koeficijenti emisije za proračun u okviru opsega 3 često nisu dostupni ili nisu primenljivi za konkretan slučaj, pa je neophodno usvojiti koeficijente koji po više parametara odgovaraju za primenu u analiziranom slučaju.

U nastavku će predložena metodologija biti testirana na studiji slučaja, mlekari iz centralne Srbije.

Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari iz centralne Srbije koja po klasifikaciji spada u grupu srednjih preduzeća. Proizvodni kapaciteti analizirane mlekare su oko 100 tona sirovog mleka dnevno. U analiziranoj mlekari sirovo mleko se podvrgava energetske veoma zahtevnim procesima poput: pasterizacije, kuvanja, hlađenja separacije, ultrafiltracije, homogenizacije i dr., a kao rezultat se dobijaju različiti mlečni proizvodi (sirevi, pavlaka, jogurt, kiselo mleko i pasterizovano mleko).

Celokupna količina mleka sa prijema pre lagerovanja podvrgava procesu hlađenja na temperaturu od 4-8 °C. Zatim se u zavisnosti od plana proizvodnje, celokupna količina mleka pasterizuje i standardizuje na željeni procenat masnoće. Zbog raznolikosti tehnologija proizvodnje, svaki od proizvoda se proizvodi u različitoj proizvodnoj liniji. Na kraju proizvodnog procesa svi gotovi proizvodi se odlažu u hladnjaču gde se hlade na temperaturu od 4 °C. Proces proizvodnje mlečnih proizvoda podrazumeva niz operacija među kojima dominiraju procesno zagrevanje i hlađenje. Pored toga značajan deo energije troši se za procese homogenizacije, separacije, pakovanja i za pogon pumpi i kompresora.

U analiziranoj mlekari, od energenata se koriste drveni briketi, električna energija i voda. Sagorevanjem briketa u dva kotla, nominalnih snaga od po 500 kW, podmiruju se gotovo sve potrebe za toplotnom energijom za proizvodni proces i za zagrevanje zgrade u zimskom periodu. Godišnja potrošnja briketa prikazana je na slici 4.



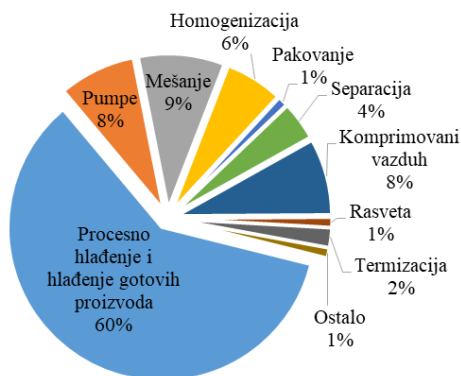
Slika 4. Potrošnja briketa analizirane mlekare

Prosečna dnevna potrošnja briketa je oko 3 t. Obzirom na to da je obim proizvodnje konstantan tokom cele godine, povećanje potrošnje briketa u zimskim mesecima je zbog zagrevanja objekata. Utvrđeno je da se za potrebe grejanja objekta godišnje potroši 38 t briketa, što je uzimajući u obzir usvojenu efikasnost kotla od 75% i donju toplotnu moć korišćenog briketa od 18 MJ/kg koje deklarišu proizvođači, oko 140 MWh toplotne energije godišnje ili 3% od ukupne potrošnje. Ostalih 97% se koristi za potrebe procesnog zagrevanja.

Za analiziranu mlekaru, za svaki od procesa koji zahtevaju toplotnu energiju izračunata je vrednost potrebne količine toplote korišćenjem jednačine 3. Vrednosti usvojenih specifičnih toplota prikazane su u tabeli 1. Merenjem temperatura i protoka, utvrđene su količine energije koje se rekuperacijom na pasterima vraćaju u proces i koje u proseku iznose 80%. Toplotna energija

potrebna za termizaciju, obezbeđuje se električnim konvektivnim grejalicama, a količina energije koja se troši za obavljanje ovog procesa je procenjena na osnovu nominalne snage grejača i dnevnog časovnog angažovanja (jednačina (1)).

Potrošnja električne energije u analiziranom preduzeću je u proseku oko 200.000 kWh mesečno. Od toga, najveći deo se troši na procesno hlađenje i hlađenje gotovih proizvoda. Kako bi se utvrdili udeli pojedinih potrošača u ukupnoj potrošnji električne energije bilo je neophodno izvršiti niz merenja. Za sve proizvodne linije i procesne aparate koji su potrošnjači el. energije trofaznim analizatorom snage (Extech 382091) u realnim eksploatacionim uslovima izmerene su vrednosti potrošnje električne energije. Raspodela potrošnje električne energije prikazana je na slici 5. Pored toga, za svaki od proizvoda izračunata je vrednost specifične potrošnje energije po jediničnoj meri gotovog proizvoda. Potrošnja električne energije za hlađenje izračunata je na osnovu dobijene potrebne rashladne energije (Tabela 4) i usvojene vrednosti koeficijenta hlađenja EER=2,5. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 4.



Slika 5. Raspodela potrošnje električne energije [29]

Tabela 4. Dnevna potrošnja energije u kWh različitim proizvodima

	Pumpe	Mešanje	Separacija	Homogenizacija	Pakovanje	Procesno hlađenje	Procesno zagrevanje	Specifična potrošnja [kWh/kg proizvoda]
Paster mleko	15	18	20	-	4,5	288	324	0,087
Jogurt	34	90	26,7	140	10,5	1391	1404	0,189
Pavlaka 40-45% mm	2,8	6,8	26,7	-	5,4	35	24,3	0,081
Pavlaka 12-30% mm	4	26	26,7	30	8	128	83	0,097
Drobljeni sir	38	35	81	-	11	340	1927	0,612
Feta sir	167	109	26,7	75	17,6	545	988	0,688
Biljni sir	183	142	26,7	72	19,8	731	1016	0,376
Kiselo mleko	9	34	26,7	56	4,2	297	265	0,119

U analiziranoj mlekari, potrošnja finalne energije po jedinici

mase obrađenog mleka prosečno iznosi 0,12 kWh/kg, dok se po toni dobijenog proizvoda u proseku potroši oko 0,3 kWh/t. U tabeli 5, prikazane su dnevne količine proizvoda i potrebna količina sirovog mleka za pripremu proizvoda.

Tabela 5. Dnevna količina proizvedenih proizvoda

Proizvod	Masa proizvoda [kg/dnevno]	Potrebna količina sirovog mleka [kg]
Paster mleko	20.000	20.000
Jogurt	20.000	20.000
Pavlaka 40-45% mm	1.500	1.500
Pavlaka 12-30% mm	3.800	3.800
Drobljeni sir	4.700	18.000
Feta sir	3.200	20.000
Biljni sir	6.800	20.000
Kiselo mleko	7.000	7.000

Mleko se nakon procesa separacije sa ciljem izdvajanja mlečnih masti za potrebe dobijanja pavlake koristi na drugim linijama (sir sa biljnim mastima, jogurt, paster mleko i dr.) za dobijanje gotovih proizvoda.

III 2 Proračun ugljeničnog otiska proizvoda

Scope 1

Obzirom na to da se kao primarni energent za potrebe generisanja procesne toplote i toplote neophodne za zagrevanja objekata koristi biomasa, koja se smatra CO₂ neutralnim gorivom emisije koje nastaju kao posledica sagorevanja na lokaciji će biti zanemarene.

Tabela 6. Proračun emisija poreklom iz dizel goriva

Proizvod	Potrošnja dizel goriva [l]	Emisioni faktor (Direktne) [kgCO ₂ e/l]	Emisioni faktor (Indirektne) [kgCO ₂ e/l]	Emisije [kgCO ₂ e/kg proizvoda]	
				Direktne	Indirektne
Paster mleko	120.071	2,75	0,62	0.0452	0.0102
Jogurt	120.071			0.0452	0.0102
Pavlaka 40-45% mm	13.341			0.067	0.0151
Pavlaka 12-30% mm	26.682			0.0529	0.0119
Drobljeni sir	106.730			0.1711	0.0386
Feta sir	120.071			0.2827	0.0637
Biljni sir	120.071			0.1330	0.0300
Kiselo mleko	40.024			0.0431	0.0097

Kada su u pitanju fugitivne emisije u analiziranom periodu od godinu dana ukupno je potrošeno 15 kg freona R410A. Ukupne izračunate emisije na nivou kompanije su 28,9 tCO_{2e}.

Scope 2

Na osnovu utvrđenih pojedinačnih udela u ukupnoj potrošnji električne energije (Tabela 5) i usvojene vrednosti koeficijenta emisije mreže izračunate su emisije poreklom iz potrošnje električne energije za svaki od proizvoda analizirane mlekarne. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 7. U obzir su uzete i indirektno emisije koje se prema GHG protokolu svrstavaju u opseg 3.3.

Tabela 7. Proračun emisija potrošene električne energije

Proizvod	Potrošnja električne energije [kWh]	Emisioni faktor (Direktne) [kgCO2e/kWh]	Emisioni faktor (Indirektne+gubici u mreži) [kgCO2e/kWh]	Emisije [kgCO2e/kg proizvoda]	
				Direktne	Indirektne
Paster mleko	492	1,099	0,62	0.027	0.007
Jogurt	1839			0.101	0.0260
Pavlaka 40-45% mm	223			0.163	0.042
Pavlaka 12-30% mm	371			0.107	0.027
Drobljeni sir	652			0.152	0.039
Feta sir	1089			0.374	0.096
Biljni sir	1321			0.213	0.055
Kiselo mleko	574			0.09	0.023

Scope 3

Na osnovu analize dostupnih podataka iz kompanije o količinama i vrstama sirovina, transportu sirovina do kompanije i tretmanu otpada, proračunate su emisije u okviru opsega 3.

Tabela 8. Proračun emisija Scope 3.1

Proizvod	Sirovo mleko		PVC ambalaža		Palmino ulje	
	[kg/kg pr]	Emisije [kgCO ₂ e/kg]	[kg/kg pr]	Emisije [kgCO ₂ e/kg]	[kg/kg pr]	Emisije [kgCO ₂ e/kg]
Paster mleko	1	3,1	0,02	0,043	-	-
Jogurt	1	3,1	0,03	0,0645	-	-
Pavlaka 40-45% mm	1	3,1	0,02	0,043	-	-
Pavlaka 12-30% mm	1	3,1	0,02	0,043	-	-
Drobljeni sir	3,83	11,88	0,01	0,0215	-	-
Feta sir	6,25	19,39	0,03	0,0645	-	-
Biljni sir	2,94	9,12	0,03	0,0645	0,13	0,585
Kiselom mleko	1	3,1	0,02	0,043	-	-

U tabeli 8 prikazan je proračun emisija nastalih kao posledica nabavke sirovina (Scope 3.1). Emisioni faktori su preuzeti iz relevantnih baza podataka Defra [30] i Climaq [31] i za svaku

od stavki prikazani su u tabeli 9.

Tabela 9. Koeficijenti emisije za sirovinu i ambalažu

Sirovina	Emisioni faktor [kg CO2e/t]
Sirovo mleko	3.102,45
PVC ambalaža	2.150
Palmino ulje	4.500

Proračun emisija u okviru Scope 3.5, odnosi se na generisanje otpada nastalog pri proizvodnim procesima. Na osnovu prikupljenih podataka iz preduzeća, proračunate su emisije (tabela 10). Obzirom na to da nije moguće utvrditi procentualne udele svakog pojedinačnog proizvoda u ukupnom generisanom otpadu, izračunate emisije su podeljene proporcionalno u odnosu na količinu sirovog mleka, koja je potrebna za dobijanje proizvoda. Ukupne emisije za svaki od proizvoda analizirane mlekarne prikazane su u tabeli 11.

Tabela 10. Proračun emisija poreklom iz otpada

Sirovina	Količina [t/god.]	Emisioni faktor [kgCO _{2e} /t] [30]	Emisije [tCO _{2e} /god.]
PVC	18	21.281	383
Papir	2	21.281	42,6
Organski otpad	30	8.912	267,4

Tabela 11. Ukupne emisije u kgCO_{2e}/kg proizvoda za svaki opseg emisija

Scope (3.1) Palmينو ulje	Scope (3.1) pVC ambalaža	Scope (3.1) Sirovo mleko	Scope 2	Scope 1	
-	0,043	3,1	0,027	0,0452	Paster mleko
-	0,0645	3,1	0,101	0,0452	Jogurt
-	0,043	3,1	0,163	0,067	Pav'laka 40-45% mm
-	0,043	3,1	0,107	0,0529	Pav'laka 12-30% mm
-	0,0215	11,88	0,152	0,1711	Drobljeni sir
-	0,0645	19,39	0,374	0,2827	Feta sir
0,585	0,0645	9,12	0,213	0,133	Biljni sir
-	0,043	3,1	0,09	0,0431	Kiselo mleko

Scope (3.3) Dizel	Scope (3.3) El. energija	Scope (3.5) PVC otpad	Scope (3.5) Papirni otpad	Scope (3.5) Organski otpad	Σ
0,0102	0,007	0,0095	0,0011	0,0066	3,25
0,0102	0,026	0,0095	0,0011	0,0066	3,36
0,0151	0,042	0,0095	0,0011	0,0066	3,45
0,0119	0,027	0,0095	0,0011	0,0066	3,36
0,0386	0,039	0,0364	0,0041	0,254	12,37
0,0637	0,096	0,0595	0,0066	0,0415	20,38
0,03	0,055	0,0282	0,0031	0,0195	10,25
0,023	0,023	0,0095	0,0011	0,0066	3,33

VIII ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metodologija za proračun ugljeničnog otiska proizvoda koja je testirana na primeru mlekare. Na osnovu dobijenih rezultat može se zaključiti da je u zavisnosti od vrste proizvoda udeo emisija koje se računaju u okviru opsega 3 najveći i da se kreće u granicama 93-98%. Za najveći deo emisija u okviru opsega 3 odgovorna je ulazna sirovina (mleko), sa udelom od preko 95%, pa se shodno tome ugljenični otisak proizvoda u zavisnosti od količine mleka koje se koristi za pripremu proizvoda značajno razlikuje. Npr. ukupne izračunate emisije pasterizovanog mleka su 3,25 kgCO_{2e}/kg jer je za dobijanje gotovog proizvoda neophodno samo termički obraditi sirovo mleko (zagreјati do 92 °C i ohladiti na 5°C - proces pasterizacije). Nasuprot, izračunate emisije za feta sir su više od 6 puta veće (20,38 kgCO_{2e}/kg) jer je za pripremu 1 kg feta sira neophodno oko 6,25 litara mleka.

Prilikom proračuna ugljeničnog otiska proizvoda posebnu pažnju treba obratiti na izbor adekvatnih koeficijenata emisija. U ovom radu, koeficijent emisije za sirovo mleko je usvojen iz baze podataka *Climatiq* [31] kao prosečna vrednost nekoliko zemalja u okruženju.

Obzirom na to da je za najveći procenat emisija odgovorna ulazna sirovina tj. sirovo mleko, gajenje goveda (ishrana i upravljanje stajnjakom) na način kojim se u nižoj meri utiče na životnu sredinu predstavlja jednu od prioritarnih mera za redukciju ugljeničnog otiska mlečnih proizvoda. Takođe, implementacija mera energetske efikasnosti, kako na farmama tako i u postrojenjima za preradu mleka i proizvodnju mlečnih

proizvoda je od ključnog značaja. Pravac daljih istraživanja trebalo bi da bude usmeren ka utvrđivanju koeficijenta emisije za sirovo mleko poreklom sa farmi u Srbiji.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u toku istraživanja finansiranog od strane ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija br. 451-03-137/2025-03/200107 od 04.02.2025. godine.

LITERATURA

- [1] Siegl, S., Hagenbucher, S., Niggli, U., Riedel, J., Addressing dairy industry's scope 3 greenhouse gas emissions by efficiently managing farm carbon footprints, *Environmental Challenges*, Vol. 11, pp. 100719, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100719>
- [2] Globalna alijansa za budućnost hrane, 2023, <https://futureoffood.org/insights/power-shift-why-we-need-to-wean-industrial-food-systems-off-fossil-fuels> [pristupljeno 12.01.2025]
- [3] Evropski zeleni dogovor (eng. The European Green Deal). Brussels, 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0021&from> [pristupljeno 17.01.2025]
- [4] Uredba (EU) 2021/1119 Evropskog parlamenta i Save1.500ta od 30. juna 2021. godine o uspostavljanju okvira za postizanje klimatske 3.800 neutralnosti i izmenama i dopunama Uredbi (EC) br. 401/2009 i (EU)2.500 2018/1999. *Uredba - 2021/1119 - EN - EUR-Lex* [pristupljeno 12.01.2025]
- [5] Krabbe, O., i drugi., Aligning corporate greenhouse-gas emissions targets with climate goals, *Nature climate change*, Vol. 5, pp. 1057-1060, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2770>
- [6] Direktiva Evropskog Parlamenta i Saveta od 14. decembra 2022. o izmenama i dopunama Uredbe (EU) br. 537/2014, Direktive 2004/109/EC, Direktiva 2006/43/EC i Direktiva 2013/34/EU u pogledu korporativnog izveštavanja. *OJL* 2022, 322, 15-80.
- [7] Wróbel-Jędrzejewska, M., Przybysz, L., Włodarczyk, E., Carbon footprint analysis of sugar production in Poland, *Food and Bioproducts Processing*, Vol. 148, pp. 88-94, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.08.014>
- [8] Science Based Targets, Value Change in the Value Chain: Best Practices in Scope 3 Greenhouse Gas Management, (2018). <https://sn.rs/a1015> [pristupljeno 17.01.2025]
- [9] Siegl, S., Hagenbucher, S., Niggli, U., Riedel, J., Addressing dairy industry's scope 3 greenhouse gas emissions by efficiently managing farm carbon footprints, *Environmental Challenges*, Vol. 11, pp. 100719, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100719>
- [10] Baek, C. Y., Lee, K. M., Park, K. H., Quantification and control of the greenhouse gas emissions from a dairy cow system, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 70, pp. 50-60, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.010>
- [11] Wei, S., Ledgard, S., Fan, J., i ostali. Carbon footprints, mitigation effects and economic performance of dairy farm systems in Inner Mongolia, *Agricultural Systems*, Vol. 214, pp. 103835, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103835>
- [12] Adler, A. A., Doole, G. J., Romera, A. J., Beukes, P. C., Managing greenhouse gas emissions in two major dairy regions of New Zealand: a system-level evaluation, *Agricultural Systems*, Vol. 135, pp. 1-9, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.11.007>
- [13] Globalni standard za karbonski otisak iz sektora mleka (eng. International Dairy Federation (Ed.), The IDF global Carbon Footprint standard for the dairy sector. Bulletin of the IDF No. 520/2022), 2022 <https://sn.rs/jkvq0> [pristupljeno 11.02.2025]
- [14] Diaz, G. S., Pereda, P. M., Salcedo-Rodriguez, D., Assessing the carbon footprint in dairy cattle farms in the northern temperate region of Spain, *Farming System*, Vol. 2, pp. 100058, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100058>
- [15] Lactanet, Canadian network for dairy excellence, <https://lactanet.ca/en/environmental-footprint-dairy-industry/> [pristupljeno 11.02.2025]
- [16] Herrero, M., Henderson, B., Havlik, P., i ostali, Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector, *Nature climate change*, Vol. 6, pp. 452-461, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>

- [17] SRPS ISO 50002:2017, Energetski pregledi – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:66069 [pristupljeno 11.02.2025]
- [18] Josijević, M., Šušteršič, V., Gordić, D., i ostali, Pregled mera energetske efikasnosti i sprovođenje energetskog pregleda u prehrambenoj industriji, in: *Zbornik radova XXXV Međunarodnog savetovanja ENERGETIKA 2020*, pp. 203-208, 24-27. Oktobar 2020.
- [19] De Lima, L. P., De Deus Ribeiro, G.B., Perez, R., The energy mix and energy efficiency analysis for Brazilian dairy industry, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 181, pp. 209-216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.221>
- [20] Josijević, M., Šušteršič, V., Gordić, D., Ranking energy performance opportunities obtained with energy audit in dairies, *Thermal Science*, Vol. 24, pp. 2865-2878, 2020. <https://doi.org/10.2298/TSC191125100J>
- [21] Hammer B. W., Johnson A. R., The specific heat of milk and milk derivatives, *Agricultural experiment station Iowa State College of Agriculture and the Mechanic Arts*, 1913. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112019567905&seq=7> [pristupljeno 15.02.2025]
- [22] "Online" softver za kalkulaciju specifične toplote za pojedine sirovine koje se koriste u prehrambenoj industriji, <http://www.sponline.swep.net/home.html#> [pristupljeno 10.02.2025]
- [23] Ramirez, C.A., Patel, M., Blok, K. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry, *Energy*, Vol. 31, No. 12, pp. 1984-2004, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.014>
- [24] Kallaa, A.M., Devaraju R. Energy efficient and cost saving practices in dairy industries: a review, *International Journal of Applied Engineering, Research and Development (IJAERD)*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-10, 2017.
- [25] IPCC. Report on Climate Change 2023: The Physical Science Basis, <https://sn.rs/nqm9z> [pristupljeno 17.01.2025]
- [26] Green House Gas Protocol. 2022, <https://ghgprotocol.org/guidance-0> [pristupljeno 13.02.2025]
- [27] Wróbel-Jedrzejska, M., Klepacka, A., Włodarczyk, E., Przybysz, L. Carbon Footprint of Milk Processing - Case Study of Polish Dairy, *Agriculture*, Vol. 15, No. 1, pp. 62, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010062>
- [28] Pravilnik o faktorima konverzije finalne energije u primarnu i faktorima emisije ugljen dioksida ("Sl. Glasnik RS", br. 111/2021 i 6/2023), http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2023_01/SG_006_2023_015.htm [pristupljeno 05.02.2025]
- [29] Josijević, M., Šušteršič, V., Vukašinović, V., Gordić, D., Živković, D., Nikolić, J. Korišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji primenom toplotne pumpe, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 4, pp. 19-24, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-4.19J>
- [30] Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023, [Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023 - GOV.UK](https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023) [pristupljeno 05.02.2025]
- [31] "Online" baza podataka sa faktorima konverzije, <https://www.climatiq.io/data> [pristupljeno 05.02.2025]

AUTORI

Mladen Josijević - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

Dušan Gordić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

Vanja Šušteršič - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)

Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

Dubravka Živković - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, dubravka@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0266-456X](https://orcid.org/0000-0002-0266-456X)

Jelena Nikolić - istraživač saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

A Methodology for Calculating Product Carbon Footprint in the Case of a Dairy

Abstract - This paper proposes a methodology for calculating CO₂ emissions per product. The methodology developed here is based on a detailed energy review of a dairy plant to determine energy raw material flows and apply a GHG protocol for calculating carbon footprint. The emission coefficients are adopted from the current literature and the relevant databases. The methodology was tested on a case study: a dairy plant.

Index terms - Product carbon footprint, Dairy, CO₂ emissions