

Emisijski faktori CO₂ ugljena

P. Orlović-Leko,^{a*} M. Trkmić,^b I. Galić^a i A. Bakija^b

^a Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
Pierrotijeva 6, 10 000 Zagreb

^b HEP-Proizvodnja d. o. o., Centralni kemijsko-tehnološki laboratorij
Zagorska 1, 10 000 Zagreb

|| Sažetak

Za izračunavanje emisije ugljikova dioksida zbog izgaranja ugljena, emisijski faktor CO₂ važan je ulazni parametar. Referentni emisijski faktori prema Uputama Međuvladinog tijela za klimatske promjene iz 2006. godine (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) specificirani su prema stupnju pougljenja (*coal rank*), ali se pri izradi nacionalnog izvješća o stakleničkim plinovima preporučuje primjena nacionalnih emisijskih faktora. Sadržaj ugljika najvažnije je svojstvo ugljena i pokazatelj je stupnja pougljenja (karbonizacije). Međutim mnoga svojstva ugljena vrlo su specifična (npr. sadržaj sumpora, pepela, vlage i macerala) te emisijski faktori CO₂ ugljena ne ovise samo o stupnju pougljenja već i o njegovu geografskom porijeklu.

U preliminarnom istraživanju, temeljem podataka dobivenih analizom goriva, izračunati su emisijski faktori CO₂ za ugljene i treset s područja Livna, BiH: 147,9 t TJ⁻¹ za treset, 109,5 t TJ⁻¹ za lignit i 98,7 t TJ⁻¹ za smeđi ugljen, što odgovara sljedećim donjim ogrjevnim vrijednostima (Hd): 3,6 MJ kg⁻¹, 11,5 MJ kg⁻¹ i 20,6 MJ kg⁻¹. Razlika u ogrjevnoj vrijednosti može se djelomično objasniti različitim udjelom ukupne vlage u ispitivanim uzorcima. Usporedba izračunatih emisijskih faktora s referentnim vrijednostima, pokazala je najveća odstupanja kod treseta (39,5 %), potom kod lignita (8,2 %) i smeđeg ugljena (4,3 %).

|| Ključne riječi

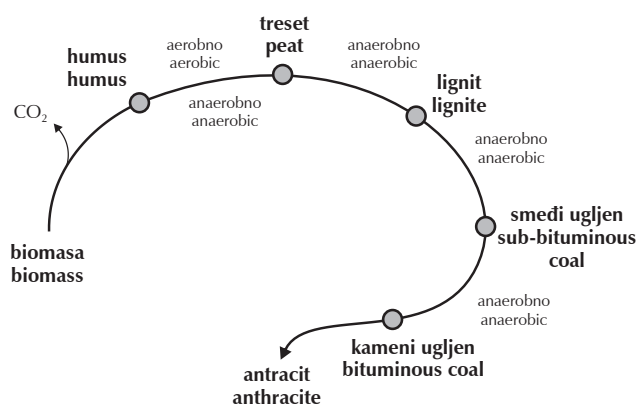
Emisijski faktor CO₂, IPCC-metodologija, ugljen, treset

Uvod

Klimatske promjene jedan su od najvećih ekoloških izazova za društvenu zajednicu u 21. stoljeću. S obzirom na rastuću svijest o mogućim katastrofalnim posljedicama klimatskih promjena i njihove bliske povezanosti s globalnom antropogenom emisijom stakleničkih plinova (od kojih je ugljikov dioksid najizraženiji, CO₂), znatni istraživački naponi usmjereni su na analizu emisije ugljikova dioksida i odnos prema održivom razvoju.¹ Pitanje klimatskih promjena na globalnom planu rješava se Okvirnom konvencijom Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*). Cilj Konvencije stabilizacija je koncentracija stakleničkih plinova u atmosferi na razinu koja će spriječiti opasno antropogeno djelovanje na klimatski sustav. Republika Hrvatska, kao član Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime obvezna je izradivati godišnje izvješće o emisijama stakleničkih plinova. Proračuni emisija stakleničkih plinova Republike Hrvatske izrađuju se prema smjernicama Tajništva Okvirne Konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime, kao i prema metodologiji Međuvladinog tijela o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*). Republika

Hrvatska uključila se početkom 2013. godine u Europski sustav trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova (engl. *European Union Emission Trading System, EU-ETS*), obavezan u svim članicama EU. EU-ETS jedan je od temeljnih mehanizama Europske unije u borbi protiv klimatskih promjena kojim se prate emisije stakleničkih plinova i potiče njihovo smanjenje iz industrije. Sustav trgovanja djeluje na principu ograničenja dozvoljene količine emitiranih stakleničkih plinova, tzv. kvote, koje smiju ispuštati tvornice, elektrane i ostala postrojenja – obveznici sustava.² Termoeenergetski objekti svrstavaju se među najznačajnije izvore emisije stakleničkih plinova. Najveća emisija nastaje pri izgaranju ugljena, zatim tekućeg goriva te prirodnog plina. Pri izgaranju fosilnog goriva, najveći dio ugljika prelazi u CO₂, a manji dio u ugljikov monoksid (CO), metan (CH₄) ili nemetanske hlapljive organske spojeve.³ Emisija ugljikova dioksida zbog izgaranja ugljena predstavlja vrlo značajan doprinos ukupnoj emisiji stakleničkih plinova iz antropogenih izvora. Pri izgaranju ugljena, 99 % ugljika emitira se kao CO₂. Udjel ugljika u ugljenu ovisi o stupnju pougljenja (karbonizacije). Karbonizacija obuhvaća procese koji se odvijaju pod utjecajem temperature i tlaka pri kojima se treset putem dijageneze i metamorfoze pretvara u lignit, smeđi ugljen (engl. *sub-bituminous coal*), kameni ugljen (engl. *bituminous coal*) i antracit. Progresivne promjene koje se javljaju u ugljenu rezultiraju povećanjem udjela ugljika i smanjenjem udjela vodika i kisika (slika 1).

* Autor za dopisivanje: Izv. prof. dr. sc. Palma Orlović-Leko
e-pošta: palma.orlovic-leko@rign.hr



Sastav suhog ugljena bez pepela Coal composition, dry and ash-free			
	w(C)/%	w(H)/%	w(O)/%
biomasa biomass	49	7	44
treset peat	60	6	34
lignit lignite	70	5	25
smeđi ugljen sub-bituminous coal	75	5	20
kameni ugljen bituminous coal	85	5	10
antracit anthracite	94	3	3

Slika 1 – Shematski prikaz pougljenja⁴Fig. 1 – Schematic representation of the coalification process⁴

Izračunavanje emisija

Emisije ugljikova dioksida mogu se pratiti na temelju izračuna ili na temelju mjerenja. Za mjerenje emisija primjenjuju se standardizirane ili prihvaćene metode, a nadopunjava ih dodatni proračun emisija.⁵ Emisije stakleničkih plinova mogu se odrediti kontinuiranim mjerenjem koncentracije odgovarajućeg stakleničkog plina u dimnom plinu i iz toka dimnog plina ili se mogu izračunati iz podataka o djelatnosti dobivenih putem mjernih sustava i dodatnih parametara laboratorijskih analiza ili standardnih faktora. Razlikuju se formule za proračun emisije zbog izgaranja (emisije stakleničkih plinova nastale tijekom egzotermne reakcije goriva s kisikom) i emisije iz proizvodnih procesa (emisije stakleničkih plinova nastale kao rezultat namjernih ili nenamjernih reakcija između tvari ili njihovih pretvorbi, uključujući kemijsku ili elektrolitičku redukciju metalnih ruda, toplinsku razgradnju tvari i oblikovanje tvari za upotrebu kao proizvoda ili sirovina). Emisija CO₂ zbog izgaranja (izražena u tonama) računa se prema formuli:

$$\frac{\text{emisija CO}_2}{t} = \frac{\text{protok goriva}}{t \text{ ili m}^3 \text{ (n.u.)}} \times \frac{H_d}{TJ t^{-1} \text{ ili } TJ m^{-3} \text{ (n.u.)}} \times \frac{EF(\text{CO}_2)}{t TJ^{-1}} \times \text{oksidacijski faktor.} \quad (1)$$

Za vrijeme procesa izgaranja, veći dio goriva oksidira se u CO₂, a manji dio može zaostati u pepelu ili može stvarati čađu. Neoksidirani ili djelomično oksidirani ugljik uzima se u obzir kod izračuna oksidacijskog faktora. Za izračunavanje emisije CO₂ iz proizvodnih procesa primjenjuje se sljedeća formula:

$$\frac{\text{emisija CO}_2}{t} = \frac{\text{podaci o djelatnosti}}{t \text{ ili m}^3 \text{ (n.u.)}} \times \frac{EF(\text{CO}_2)}{t t^{-1} \text{ ili } t m^{-3} \text{ (n.u.)}} \times \text{konverzijski faktor.} \quad (2)$$

Podaci o djelatnosti uključuju potrošnju materijala, protok ili obujam proizvodnje. Ugljik iz ulaznih materijala koji tijekom procesa ne prelazi u CO₂ izražava se konverzijskim faktorom. Posebni konverzijski faktor ne primjenjuje se ako je već uračunat u emisijski faktor. Emisijski faktori temelje se na sadržaju ugljika u gorivima i u ulaznim materijalima.⁶

Emisijski faktori

Emisijski faktor CO₂, EF(CO₂), često se primjenjuje kao brz i jeftin način procjene emisije ugljikova dioksida zbog izgaranja ugljena. Referentni emisijski faktori CO₂, prema Uputama Međuvladinog tijela za klimatske promjene iz 2006. godine zasnivaju se na udjelu ugljika u ugljenu, ali se preporučuje primjena nacionalnih emisijskih faktora pri izradi nacionalnog izvješća stakleničkih plinova.⁷ Udjel ugljika u gorivu izravno utječe na emisiju CO₂, međutim ugljen je heterogeni materijal, sastavljen od brojnih organskih i anorganskih konstituenata te EF(CO₂) ne ovisi samo o stupnju pougljenja već i o lokaciji rudnika (geografskom porijeklu ugljena). Npr., za lignit varira od 103 tTJ⁻¹ u središnjoj Njemačkoj do 117 tTJ⁻¹ u području Rajne.⁸ Nekoliko studija pokazalo je kako sadržaj sumpora u ugljenu te mineralni i petrološki sastav mogu utjecati na emisiju ugljikova dioksida.⁹⁻¹⁴

Sumpor smanjuje emisiju, dok karbonatni minerali kao što su kalcit (CaCO₃) i siderit (FeCO₃) endotermnim raspadom izravno doprinose emisiji CO₂. Dodatno, karbonatni minerali povećavaju sadržaj hlapljivih tvari i reduciraju sadržaj vezanog ugljika. Za mnoge ugljene ukupna količina mineralnih tvari važnija je od količine karbonatnih minerala.¹² Nadalje, kemijska svojstva ugljena neposredno su određena njegovim petrološkim sastavom. Petrologija ugljena više je uvjetovana prirodom osnovnog biljnog materijala iz kojeg je ugljen nastao i okruženjem u kojem je deponiran nego stupnjem karbonizacije. Petrološki elementi (macerali, mikrolitotipovi i litotipovi) međusobno se razlikuju u kemijskim i fizikalnim svojstvima. Varijacije sadržaja macerala utječu na procese izgaranja. Ugljen s većim sadržajem internita, čak i unutar istog ranga, oslobađa više CO₂.^{11,12,15}

Uz pretpostavku potpune oksidacije ugljika u gorivu tijekom izgaranja, EF(CO₂), izražen u tonama CO₂ po teradžulu, izračunava se iz omjera mase ispuštenog CO₂ tj. mase nog udjela ugljika u ugljenu i donje ogrjevne vrijednosti ugljena prema sljedećoj jednadžbi (izraženo na dostavno stanje ugljena):

$$\frac{EF(\text{CO}_2)}{\text{t TJ}^{-1}} = 10 \frac{w(\text{C}) / \%}{H_d / \text{MJ kg}^{-1}} \cdot 3,7, \quad (3)$$

gdje je 3,7 stehiometrijski faktor tj. omjer molekulske mase CO₂ (44) i atomske mase ugljika (12). Donja ogrjevna vrijednost ugljena odgovara toplini oslobođenoj potpunim izgaranjem goriva po masi goriva kada se sva voda u produktima gorenja nalazi u obliku vodene pare te tako omogućuje bolju usporedbu različitih goriva nego gornja ogrjevna vrijednost.¹² Ogrjevna vrijednost ugljena primarno je funkcija udjela ugljika; povećava se povećanjem udjela ugljika u ugljenu, a smanjuje povećanjem udjela vlage i pepela.¹³ Ugljik je najzastupljenija komponenta u ugljenu a generira toplinu od 33 913 kJ kg⁻¹. Utvrđena je linearna korelacija između sadržaja ugljika i donje ogrjevne vrijednosti.¹⁶⁻¹⁸ Drugi parametri važni za određivanje ogrjevne vrijednosti su vodik, koji ima pozitivan učinak, i kisik, koji ima negativan učinak. Iako vodik ima toplinsku vrijednost od 119 215 kJ kg⁻¹, njegov maseni udjel u ugljenu iznosi samo 5 % ili manje. Dodatno, dio vodika s kisikom daje vodenu paru. Kisik je u ugljenu vezan za ugljik koji je na taj način već parcijalno oksidiran, pa mu je smanjena sposobnost stvaranja topline. Toplina koja se oslobađa izgaranjem sumpora nije značajna jer je ogrjevna vrijednost sumpora niska (9 296 kJ kg⁻¹), a njegov maseni udjel u ugljenu je uglavnom nizak (1 – 2 %).¹⁹

Nacionalni emisijski faktori

U mnogim zemljama provedena su istraživanja u svrhu određivanja nacionalnih EF(CO₂) za određene vrste ugljena.^{11-13,18,20-22}

U tablici 1 prikazana je usporedba nacionalnih EF(CO₂) za različite vrste ugljena u EU s referentnim EF.⁷

Vidljiva je znatna razlika između prosječnih vrijednosti nacionalnih i referentnih EF(CO₂) u EU-u za lignite (oko 10 %). Prema istom izvoru, nacionalni emisijski faktori procijenjeni za lignit u zemljama EU-a nalaze se u širo-

kom rasponu, od 90,7 do 124,7 t TJ⁻¹. Za bituminozne ugljene, nacionalni EF(CO₂) variraju od 86,7 do 99,8 t TJ⁻¹, dok je njihova srednja vrijednost prilično blizu referentnih vrijednosti. Za treset je dano malo podataka, pa se time objašnjava izostanak očekivane značajnije razlike između nacionalnih i referentnih emisijskih faktora.

Međutim EF(CO₂) i za ugljene višeg ranga mogu se znatno razlikovati od referentnih vrijednosti. Npr., nacionalni EF(CO₂) za antracit, eksploatiran u Koreji, u razdoblju od 2007. do 2009. godine, procijenjen je na vrijednost od 111,4 t TJ⁻¹, što je oko 13,3 % više od referentnih vrijednosti.⁷ Jeon i sur.,³ procijenili su EF(CO₂) za različite tipove uvoznih ugljena koji se upotrebljavaju u termoelektranama u Koreji. Emisijski faktori izračunati temeljem analize goriva iznose: 108,9 t TJ⁻¹ za antracit, 88,4 t TJ⁻¹ za kameni ugljen i 97,9 t TJ⁻¹ za smeđi ugljen tj. 10,8 % veći su za antracit, 6,5 % manji za kameni ugljen i 1,9 % veći za smeđi ugljen od referentnih vrijednosti.

Nekoliko autora razvilo je nove formule za izračunavanje EF(CO₂) ugljena iz lako mjerljivih parametara kao što su ogrjevna vrijednost, hlapljive tvari i fiksni ugljik.^{11,13,21} Dobivene jednadžbe specifične su za ugljene određenog ranga s određenih područja i samo se djelomično mogu primjenjivati za ugljene iz drugih zemalja zbog mogućih velikih razlika u svojstvima ugljena tj. u rangu ugljena, kemijskom i petrološkom sastavu.

Pri istraživanju emisijskih faktora čeških ugljena uočena je značajna korelacija između EF(CO₂) i donje ogrjevne vrijednosti goriva (H_d). Rezultati mnogih analiza čeških ugljena^{17,18,23} mogu se sažeti u sljedeću formulu:

$$\frac{EF(\text{CO}_2)}{\text{t TJ}^{-1}} = 10 \cdot 3,7 \cdot \left(2,333 + \frac{5,511}{H_d / \text{MJ kg}^{-1}} \right). \quad (4)$$

Ova korelacija, s modificiranim parametrima, može se primijeniti i za europske ugljene (smeđe i lignite) koji se upotrebljavaju u energetske svrhe.²⁴

Tablica 1 – Usporedba nacionalnih EF(CO₂) ugljena u EU-u s referentnim EF⁷

Table 1 – Comparison of IPCC default CO₂ emission factors and country specific emission factors for coals in EU⁷

Tip goriva Fuel types	EF(CO ₂) / t TJ ⁻¹		
	Referentni EF IPCC default EF	Prosječni nacionalni EF u EU EU average specific EF	Razlika / % Difference / %
antracit anthracite	98,3	98,7	0,4
kameni ugljen bituminous coal	94,6	95,1	0,6
smeđi ugljen sub-bituminous coal	96,1	97,1	1,0
lignit lignite	101,2	111,0	9,7
treset peat	106,0	107,7	1,7

Iako primjena nacionalnih EF(CO₂) doprinosi boljoj procjeni vrijednosti emisije ugljikova dioksida, često podaci upotrijebljeni za izračunavanje njihove vrijednosti mogu varirati ovisno o primijenjenoj metodi uzorkovanja te analitičkim metodama. Način uzorkovanja ugljena primarno utječe na vrijednost sadržaja vlage što ima izravan utjecaj i na vrijednosti emisijskih faktora. Navedeni čimbenici mogu otežavati verifikaciju nacionalnog izvješća stakleničkih plinova.¹²

Eksperimentalni dio

U preliminarnom istraživanju, iz podataka dobivenih analizom ugljena i primjenom formule (3), izračunat je EF(CO₂) za ugljene i treset s područja Livna, BiH: smeđi ugljen iz ležišta Drage, lignit iz ležišta Table i treset iz sjeverozapadnog dijela Livanjskog polja, kod mjesta Kazanci.

Analiza goriva važna je u procjeni EF(CO₂) i emisije stakleničkih plinova. Analiza ugljena provedena je u akreditiranom laboratoriju za ispitivanje ugljena prema normi HRN EN ISO/IEC 17025 : 2007 (HEP Proizvodnja d. o. o. Centralni kemijsko-tehnološki laboratorij, Zagreb, Hrvatska) sukladno standardima za ispitivanje ugljena ASTM (*American Society for Testing and Materials*) i ISO (*International Organization for Standardization*). Određeni su parametri proksimativne analize (ASTM D3302; ASTM D3173; ISO 1171; ISO 562), elementne analize (ASTM D4239, ASTM

D5373) te gornja i donja ogrjevna vrijednost (ISO 1928).

Elementni analizator (Leco TruSpec, SAD) upotrijebljen je za određivanje udjela ugljika, vodika, dušika i sumpora. Uzorak goriva spaljuje se u oksidirajućoj atmosferi na 950 °C. Ugljik, vodik i dušik prevode se u CO₂, vodu i dušikove okside (NO_x) te detektiraju zasebnim detektorima. Sumpor se određuje u posebnom modulu instrumenta povezanim s računalom. Uzorak ugljena spaljuje se u struji kisika pri 1350 °C. Detektira se nastali SO₂.

Kalorimetar (IKA-C2000, Njemačka) upotrijebljen je za određivanje ogrjevne vrijednosti ugljena. Nakon mjerenja gornje ogrjevne vrijednosti, unosom poznatih vrijednosti za vodik, sumpor i dušik te unosom podataka za grubu vlagu, pepeo i vlagu analitičkog uzorka, dobivene su gornje i donje ogrjevne vrijednosti za sva tri stanja ugljena: dostavno stanje, uzorak suh na zraku i suhi uzorak.

Rezultati i rasprava

Rezultati proksimativne i elementne analize ispitivanih uzoraka ugljena i treseta prikazani su u tablici 2.

Udjel ugljika najvažniji je parametar gorive tvari i može varirati unutar određenog stupnja pougljenja. Smeđi ugljen sadrži 64,35 % ugljika (srednja vrijednost) a lignit, niskorangirani ugljen, sadrži 53,21 % ugljika (srednja vrijednost).

Tablica 2 – Rezultati proksimativne i elementne analize uzoraka ugljena i treseta s područja Livna (BiH). A, B – smeđi ugljen; C, D – lignit; E – treset.

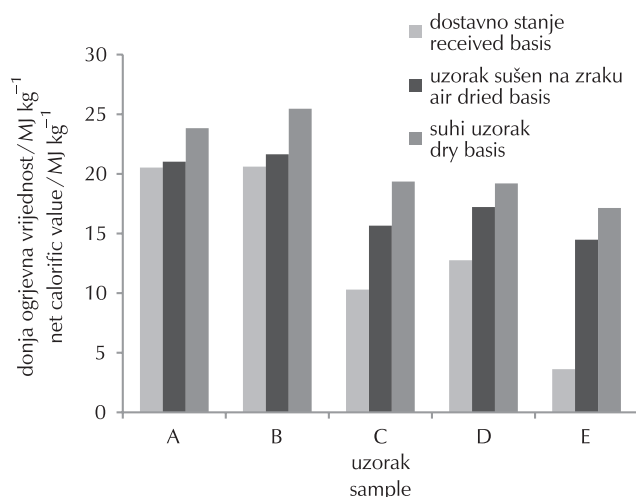
Table 2 – Results of proximate and ultimate analysis of coals and peat samples from the area of Livno (B&H). A, B – sub-bituminous coal; C, D – lignite; E – peat.

Uzorak Sample	A	B	C	D	E
<i>Proksimativna analiza</i> <i>Proximate analysis</i>	maseni udjel/% mass fraction/%				
ukupna vlaga* total moisture*	11,64	16,3	40,3	30,64	68,5
vlaga analitičkog uzorka** inherent moisture**	9,75	12,5	15,3	10,34	12,1
pepeo** ash**	8,56	8,0	20,2	10,0	19,9
hlapljive tvari** volatile matter**	39,03	38,0	42,6	59,75	48,9
vezani ugljik** fixed carbon	42,66	41,6	21,9	19,91	19,1
<i>Elementna analiza***</i> <i>Ultimate analysis***</i>	maseni udjel/% mass fraction/%				
Ukupni sumpor Total sulphur	4,08	3,92	7,24	7,30	1,15
C	63,00	65,7	51,4	55,01	46,3
H	4,48	4,70	4,04	5,53	4,23
N	1,84	1,35	0,92	0,90	2,75

* dostavno stanje; ** uzorak suh na zraku; *** suhi uzorak
* received basis; ** air-dried basis; *** dry basis

Treset ima najmanje ugljika, 46,3 % i najviše ukupne vlage (68,5 %). Lignit također ima visok sadržaj ukupne vlage, do 40,3 % što je i oko 3,5 puta više nego smeđi ugljen. Razlika je znatno manja između goriva u odnosu na vlagu analitičkog uzorka čije se vrijednosti nalaze u rasponu od 9,75 % za smeđi ugljen do 15,3 % za lignit. Smeđi ugljen ima najmanje pepela (oko dva puta manje od lignita i treseta) i najmanje hlapljivih tvar (srednja vrijednost: 38,5 %). Količina oslobođenih plinova općenito se smanjuje s porastom stupnja karbonizacije. Vezani ugljik (*fixed carbon*) kreće se u granicama od 19,1 % (treset) do 42,66 % (smeđi ugljen).

Donja ogrjevna vrijednost (H_d) za svaki tip ispitivanog goriva prikazana je na slici 2.



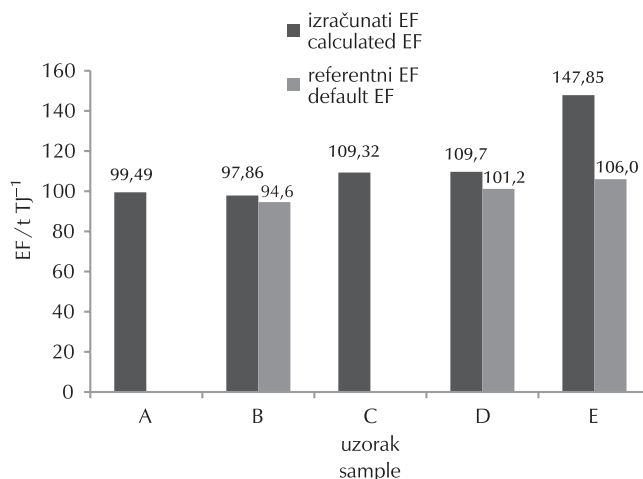
Slika 2 – Donja ogrjevna vrijednost za: smeđi ugljen (AB); lignit (CD); treset (E)

Fig. 2 – Net calorific value for: sub-bituminous coal (AB); lignite (CD); peat (E)

Donja ogrjevna vrijednost (*izražena na dostavno stanje*) za smeđi ugljen iznosi 20,55 MJ kg⁻¹ (srednja vrijednost) a za lignit 11,55 MJ kg⁻¹ (srednja vrijednost). Treset ima najmanju donju ogrjevnu vrijednost od 3,62 MJ kg⁻¹. Referentne donje ogrjevne vrijednosti prema Uputama IPCC iz 2006 iznose: 18,9 MJ kg⁻¹ za smeđi ugljen, 11,9 MJ kg⁻¹ za lignit i 9,8 MJ kg⁻¹ za treset.⁷ Prema tome, donja ogrjevna vrijednost za treset s područja Livna približno je tri puta niža od referentne vrijednosti, što je djelomično posljedica visokog sadržaja ukupne vlage.

EF (CO₂) izračunati za smeđe ugljene i treset prikazani su na slici 3 zajedno s referentnim vrijednostima.⁷

Emisijski faktor CO₂ veći je za treset (147,9 t/TJ) i lignit (srednja vrijednost 109,5 t/TJ) nego za smeđi ugljen (srednja vrijednost 98,7 t/TJ) koji je višeg stupnja pougljenja i s većim udjelom ugljika. Najveća razlika između izračunatih i referentnih emisijskih faktora uočena je kod treseta (39,5 %), zatim slijede lignit (srednja vrijednost 8,2 %) i smeđi



Slika 3 – Usporedba referentnih i izračunatih vrijednosti EF(CO₂) uzoraka smeđeg ugljena (A, B), lignita (C, D) i treseta (E)

Fig. 3 – Comparison of default with calculated CO₂ emission factors for sub-bituminous coal (A, B), lignite (C, D), and peat (E)

ugljen (srednja vrijednost 4,3 %). EF(CO₂) najviše ovise o donjoj ogrjevnoj vrijednosti; za treset je utvrđena velika količina ukupne vlage odnosno niska ogrjevna vrijednost, što ima kao posljedicu visoku vrijednost EF(CO₂).

Za razvoj nacionalnih emisijskih faktora za određeni tip ugljena potreban je velik broj uzoraka i statistička obrada podataka.

Zaključak

Za bolju procjenu emisije CO₂ nužno je istraživanje kvalitete goriva i odgovarajućih emisijskih faktora. EF(CO₂) za ugljen primarno ovisi o rangu ugljena ali i o lokaciji rudnika. U preliminarnom radu, temeljem podataka dobivenih analizom goriva, izračunat je EF(CO₂) smeđeg ugljena, lignita i treseta s područja Livna, BiH. Emisijski faktori ovise o udjelu ugljika u gorivu i donjoj ogrjevnoj vrijednosti na koju najviše utječe udjel vlage i pepela. Donja ogrjevna vrijednost za istraživane uzorke treseta, lignita i smeđeg ugljena iznosi: 3,6 MJ kg⁻¹, 11,5 MJ kg⁻¹ i 20,6 MJ kg⁻¹.

Najveći EF(CO₂) dobiven je za treset (147,9 t/TJ) u kojem je utvrđena velika količina vlage, gotovo 70 %. Najmanji EF(CO₂) ima smeđi ugljen (98,7 t/TJ) s najvećim udjelom ugljika i najmanjim udjelom ukupne vlage i pepela. Lignit, ugljen niskog ranga, sa znatnom količinom ukupne vlage, ima vrijednost emisijskog faktora od 109,5 t/TJ koji se razlikuje od referentnog za 8,2 %. Navedena razlika najveća je za treset (39,5 %) a najmanja za smeđi ugljen (4,3 %). Rezultati potvrđuju važnost određivanja nacionalnih CO₂ emisijskih faktora radi što točnije procjene emisije stakleničkih plinova.

Popis simbola i kratica

List of symbols and abbreviations

EF(CO ₂)	– emisijski faktor, tTJ ⁻¹ , tt ⁻¹ , t m ⁻³ (n. u.) – emission factor, tTJ ⁻¹ , tt ⁻¹ , t m ⁻³ (n. u.)
H _d	– donja ogrjevna vrijednost, MJ kg ⁻¹ – net calorific value, MJ kg ⁻¹
w(C)	– maseni udjel ugljika, % – mass fraction of carbon, %
ASTM	– Američko društvo za testiranje i materijale – American Society for Testing and Materials
ASTM	– Američko društvo za ispitivanje i materijale – American Society for Testing and Materials
EU-ETS	– Europski sustav trgovanja emisijskim jedinicama – European Union Emission Trading System
HR	– Hrvatske norme – Croatian Standards
IPCC	– Međuvladino tijelo za klimatske promjene – Intergovernmental Panel on Climate Change
n. u.	– normirani uvjeti – normal conditions
ISO	– Međunarodna organizacija za normizaciju – International Organization for Standardization
UNFCCC	– Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime – United Nations Framework Convention on Climate Change

Literatura

References

1. L. Hongguang, L. Weidong, F. Xiaomei, T. Zhipeng, Global Research Trends Related to CO₂ Emissions and Their Enlightenment to China, *Chinese J. Popul. Resour. Environ.* **10** (2012) 3–12, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10042857.2012.10685054>.
2. Agencija za zaštitu okoliša. URL: <http://www.azo.hr> (16. 12. 2013.).
3. E.-C. Jeon, S. Myeong, J.-W. Sa, J. Kim, J.-H. Jeong, Greenhouse gas emission factor development for coal-fired power plants in Korea, *Appl. Energ.* **87** (2010) 205–210, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.015>.
4. J. G. Speight, *The Chemistry and Technology of Coal*, 2nd ed. rev. and expanded. New York, Dekker, 1994., str. 43.
5. Direktiva 2003/87/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o uspostavi sustava trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova (2003). URL: <http://eurlex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=dd:15:09:32003l0087:hr:pdf> (8. 11. 2013.).
6. Priručnik MZOPUG za praćenje i izvješćivanje o emisijama stakleničkih plinova iz postrojenja nastalih obavljanjem djelatnosti iz Priloga I Uredbe o emisijskim kvotama stakleničkih plinova i načinu trgovanja emisijskim jedinicama NN 142/08, Zagreb (2009). URL: <http://www.azo.hr/lgs.axd?t=16&id=3883> (5. 9. 2012.).
7. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (5. 9. 2012.).
8. A. Herold, Comparison of CO₂ emission factors for fuels used in Greenhouse Gas Inventories and consequences for monitoring and reporting under the EC emissions trading scheme, ETC/ACC(2003). URL: http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechPaper_2003_10_CO2_EF_fuels.pdf (2. 9. 2012.).
9. R. A. Winschel, The relationship of carbon dioxide emissions with coal rank and sulfur content, *J. Air Waste Manage. Assoc.* **40** (1990) 861–865, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10473289.1990.10466730>.
10. M. Hiete, U. Berner, O. Richter, Calculation of global carbon dioxide emissions: Review of emission factors and a new approach taking fuel quality into consideration, *Global Biogeochemical Cy.* **15** (2001) 169–181, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2000GB001261>.
11. J. C. Quick, D. C. Glick, Carbon dioxide from coal combustion – variation with rank of U.S. coal, *Fuel* **79** (2000) 803–812, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00197-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00197-0).
12. J. C. Quick, T. C. Brill, Provincial variation of carbon emissions from bituminous coal – influence of inertinite and other factors, *Int. J. Coal Geol.* **49** (2002) 263–275, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162\(01\)00068-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162(01)00068-4).
13. S. Özdoğan, Estimation of CO₂ emission factors of coals, *Fuel* **77** (1998) 1605–1609, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00058-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00058-1).
14. C. R. Ward, Mineral matter in low rank coals and associated strata of the MeaMoh Basin, Northern Thailand, *Int. J. Coal Geol.* **17** (1991) 69–93, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0166-5162\(91\)90005-4](http://dx.doi.org/10.1016/0166-5162(91)90005-4).
15. T. Sakulpitakphon, J. C. Hower, D. N. Taulbee, Predicted CO₂ emissions from maceral concentrates of high volatile bituminous Kentucky and Illinois coal, *Int. J. Coal Geol.* **54** (2003) 185–192, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00035-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00035-1).
16. G. Marland, T. Boden, R. J. Andres, Carbon dioxide emissions from fossil fuel burning – Emission coefficients and the global contribution of Eastern European countries, *Időjárás* **99** (3-4) (1995) 157–170.
17. P. Fott, J. Svítlová, F. Kolář, Establishing of Carbon Emission Factors for Czech Coals, *Acta Montana IRSM* **6** (101) (1996) 79–94.
18. P. Fott, Carbon Emission Factors of Coal and Lignite: Analysis of Czech Coal Data and Comparison to European Values, *Environ. Sci. Policy* **2** (1999) 347–354, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1462-9011\(99\)00024-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1462-9011(99)00024-6).
19. B. D. Hong, E. R. Slatick, Carbon dioxide emission factors for coal. Energy Information Administration, Quarterly Coal Report (1994). URL: http://www.eia.gov/coal/production/quarterly/co2_article/co2.html (5. 9. 2012.).
20. J. Roy, P. Sarkar, S. Biswas, A. Choudhury, Predictive equations for CO₂ emission factors for coal combustion, their applicability in a thermal power plant and subsequent assessment of uncertainty in CO₂ estimation, *Fuel* **88** (5) (2009) 792–798, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.023>.
21. N. Vardeci, Z. Yumurtaci, Emissions estimation for lignite fired power plants in Turkey, *Energ. Policy* **38** (2010) 243–252, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.011>.
22. J. Lee, J. Kim, S. Kim, G. Im, S. Lee, E.-C. Jeon, Development of country-specific CO₂ emission factor for domestic antracite in Korea, 2007–2009. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **19** (2012) 2722–2727.
23. P. Fott, CO₂ Emission Monitoring – Combustion of Coal and Lignite, *Acta Montana IRSM* **12** (2002) 85–92.
24. P. Fott, F. Kolář, D. Vácha, Determination of emission and oxidation factors in monitoring CO₂ emissions for emission trading scheme, *Acta Geodyn. Geomater.* **3** (2006) 5–11.

EXTENDED ABSTRACT

CO₂ Emission Factors for Coals*Palma Orlović-Leko,^a Marija Trkmić,^b Ivo Galić,^a and Antonio Bakija^{a*}*

Emission factors are used in greenhouse gas inventories to estimate emissions from coal combustion. In the absence of direct measures, emissions factors are frequently used as a quick, low cost way to estimate emissions values. Coal combustion has been a major contributor to the CO₂ flux into the atmosphere. Nearly all of the fuel carbon (99 %) in coal is converted to CO₂ during the combustion process. The carbon content is the most important coal parameter which is the measure of the degree of coalification (coal rank). Coalification is the alteration of vegetation to form peat, succeeded by the transformation of peat through lignite, sub-bituminous, bituminous to anthracite coal. During the geochemical or metamorphic stage, the progressive changes that occur within the coal are an increase in the carbon content and a decrease in the hydrogen and oxygen content resulting in a loss of volatiles. Heterogeneous composition of coal causes variation in CO₂ emission from different coals.

The IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) has produced guidelines on how to produce emission inventories which includes emission factors. Although 2006 IPCC Guidelines provided the default values specified according to the rank of the coal, the application of country-specific emission factors was recommended when estimating the national greenhouse gas emissions. This paper discusses the differences between country-specific emission factors and default IPCC CO₂ emission factors, EF(CO₂), for coals. Also, this study estimated EF(CO₂) for two different types of coals and peat from B&H, on the basis fuel analyses.

Carbon emission factors for coal mainly depend on the carbon content of the fuel and vary with both rank and geographic origin, which supports the idea of provincial variation of carbon emission factors. Also, various other factors, such as content of sulphur, minerals and macerals play an important role and influence EF(CO₂) from coal. Carbonate minerals (calcite and siderite) directly contribute CO₂ when they decompose during coal combustion. Variations in the maceral content can also influence CO₂ emissions; high inertinite contents increase CO₂ emissions. Sulphur in coal reduces EF(CO₂).

Fuel analysis is very important when estimating greenhouse gas emissions and emission factors. In this preliminary study, based on the results of the fuel analysis, CO₂ emission factors for coals and peat from Livno, B&H have been calculated. EF(CO₂) is defined as the amount of carbon dioxide emission per unit net calorific values of the fuel. Net calorific value (the lower heating value) corresponds to the heat produced by combustion where total water in the combustion products exists as water vapour.

The EF(CO₂) obtained for sub-bituminous coal, lignite and peat were: 98.7, 109.5, and 147.9 tTJ⁻¹, respectively, which correspond to the following net calorific values: 20.6, 11.5 and 3.6 MJ kg⁻¹. The heating value is generally known to increase with the increase in carbon content (this parameter is connected with the degree of coalification, coal age). The other indispensable parameters are hydrogen, which has a positive effect on the net calorific value, and oxygen and water which impact the net calorific value negatively. The differences in net calorific values can be explained in part by the difference of total moisture content among the different fuel types.

The CO₂ emission factors calculated in this study were compared with those of IPCC. A significant difference was observed for peat (39.5 %), followed by lignite (8.2 %) and sub-bituminous coal (4.3 %).

Keywords*CO₂ emission factor, Greenhouse IPCC methodology, coal, peat*

^a *Mining, Geology and Petrology Engineering
Faculty, University of Zagreb
10 000 Zagreb, Croatia*

^b *HEP Proizvodnja d. o. o. Central Laboratory
for Chemical Technology
10 000 Zagreb, Croatia*

*Conference paper
Received February 4, 2014
Accepted April 9, 2014*