

Proizvodnja cementa i održivi razvoj

Krešimir Popović, Ružica Rosković, Dubravka Bjegović

Ključne riječi

alternativni materijali,
cement,
industrija cementa,
klinker,
održivi razvoj

Key words

alternative materials,
cement,
cement industry,
clinker, sustainable
development

Mots clés

matériaux alternatifs,
ciment,
industrie du ciment,
scories,
développement viable

Ключевые слова

альтернативные
материалы, цемент,
цементная
промышленность,
klinker,
поддерживаемое
развитие

Schlüsselworte:

Alternativmaterialie,
Zement,
Zementindustrie,
Klinker,
erhaltbare Entwicklung

K. Popović, R. Rosković, D. Bjegović

Pregledni rad

Proizvodnja cementa i održivi razvoj

Značajna uloga proizvodnje cementa u ukupnom održivom razvoju prikazana je mogućnostima uporabe alternativnih materijala u postizanju što veće eko balance uz optimalne kriterije prihvatljivosti za cementnu i građevinsku industriju. Analizom tehnoloških i tržišnih promjena u proizvodnji i uporabi cementa u većini europskih zemalja u usporedbi s Hrvatskom, pokazuju se neke od mogućnosti uštede prirodnih izvora energije, sirovina i smanjenje emisije nekih stakleničkih plinova.

K. Popović, R. Rosković, D. Bjegović

Subject review

Cement production and sustainable development

The significant role of cement production in overall sustainable development is manifested in the use of alternative materials in order to achieve the highest possible ecological balance while maintaining optimum acceptability criteria for the cement and construction industry. The analysis of technological and market changes in the production and use of cement in most European countries as compared with Croatia, points to possible savings with respect to natural sources of energy, raw materials and greenhouse gas emission.

K. Popović, R. Rosković, D. Bjegović

Ouvrage de synthèse

La fabrication du ciment et le développement viable

Le rôle important de la fabrication du ciment dans l'ensemble du développement viable est présenté sous l'aspect des possibilités d'utilisation des matériaux alternatifs afin d'obtenir un meilleur bilan écologique, tout en respectant les critères optimaux de plausibilité pour l'industrie du ciment et le génie civil. Une analyse des changements technologiques et de l'évolution du marché dans la fabrication et l'utilisation du ciment dans la plupart des pays européens en comparaison avec la Croatie a permis de déterminer certaines possibilités d'économie des sources naturelles d'énergie, des matières premières et de réduction de l'émission des gaz à effet de serre.

K. Попович, Р. Роскович, Д. Бегович

Обзорная работа

Производство цемента и поддерживаемое развитие

Значительная роль производства цемента в полном поддерживаемом развитии показана в работе возможностями употребления альтернативных материалов в достижении как можно большего эко-баланса, при оптимальных критериях приемлемости для цементной и строительной промышленности. Анализом технологических и рыночных изменений в производстве и употреблении цемента в большем числе европейских государств, по сравнению с Хорватией, показываются некоторые из возможностей экономии природных источников энергии, сырья и снижения эмиссии (испускания) некоторых тепличных газов.

K. Popović, R. Rosković, D. Bjegović

Übersichtsarbeit

Zementproduktion und erhaltbare Entwicklung

Die wichtige Rolle der Zementproduktion in der gesamten erhaltbaren Entwicklung ist dargestellt durch Möglichkeiten der Nutzung von Alternativmaterialien im Erreichen möglichst grosser Ekobilanz, neben optimalen Annahmekriterien für die Zement- und Bauindustrie. Durch eine Analyse der Technologie- und Marktänderungen in der Produktion und Benützung des Zements im Grossteil der europäischen Staaten, im Vergleich mit Kroatien, zeigen sich einige von den Möglichkeiten der Ersparung der natürlichen Energie- und Rohstoffquellen, sowie der Minderung der Emission einiger Treibhausgase.

Autori: Dr. sc. **Krešimir Popović**, dipl. ing. kem., IGH Zagreb; mr. sc. **Ružica Rosković**, dipl. ing. kem. teh., Našicecement d.d.; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1 Uvod

Posljednjih desetljeća gotovo sve industrijske grane bilježe velik napredak u pogledu razvoja tehnologije i proizvoda. Želja za napretkom je prirodna, ali takvim načinom rada došlo je i do brzog iscrpljivanja prirodnih resursa te ugrožavanja okoliša (tlo, voda i atmosfera). Stoga briga za okoliš postaje nužnost za budućnost, ali su načini adekvatnog iskorištavanja otpadnih materijala istodobno veliki potencijal što se tiče racionalizacije.

Različiti tipovi utjecaja na okoliš mogu se pripisati proizvodnji cementa i betona. Neki su od njih vrlo negativni, kao emisija NO_x (smjesa plinova NO i NO_2) [1] i CO_2 ili iscrpljivanje prirodnih resursa. S druge su strane veliki potencijal u zbrinjavanju otpadnih materijala iz drugih sektora industrije na vrlo prihvatljiv način za okoliš.

Cement kao osnovni i nezamjenjivi građevni materijal ima masovnu upotrebu, čija je proizvodnja u svijetu dosegla 1,5 milijarde tona, dok je beton danas najšire upotrebljavani konstrukcijski materijal [1].

Cement je ipak samo međufazni proizvod, a ne finalni proizvod za specifičnu primjenu. Većina cementa ipak se koristi kao sastojak smjese betona, a kvaliteta cementa uvelike utječe na kvalitetu betona i njegovo ekološko ponašanje.

2 Napredak tehnologije proizvodnje cementa

Cement je proizvod zrele tehnologije koja se neprekidno razvijala. Sam početak proizvodnje cementa obilježen je *šahnim* pećima i kasnijim mokrim postupkom, koji je bio napredak u pogledu dobivanja željenog sastava i kvalitete cementa, ali i visokim troškovima za toplinsku energiju, čiji je stupanj iskorištenja iznosio 0,25. Daljnji napredak procesne tehnike i potrebe za cementom poboljšavaju proces pečenja u rotacijskim pećima s ciklonskim predgrijačima za proizvodnju cementnog klinkera, čime se znatno smanjuje potreba za toplinskom energijom.

Uvođenje drugog ložišta na ulazu u rotacijsku peć posljednji je napredak što se tiče smanjenja utroška toplinske energije na rotacijskoj peći sa stupnjem iskorištavanja od 0,58.

Naime, proizvodnja cementa je tehnologija koju prati veliki utrošak sirovine i energije kao prirodnih resursa. Ujedno ona je i potencijalni zagađivač okoliša. Međutim, cementnu industriju zadnjih godina prati i trend razvoja u pogledu zaštite okoliša, i to ponajprije u smanjenju emisije prašine i nekih štetnih plinova, te sve većom ulogom u zbrinjavanju otpada. Zbrinjavanje raznih vrsta otpada, njihovu iskorištavanjem kao alternativnih goriva, omogućeno je u proizvodnji cementa zahvaljujući značajkama procesa pečenja u rotacijskim pećima koji karakterizira visoka temperatura materijala i plino-

va, a što omogućuje potpunu razgradnju organskih tvari. S druge strane upotreba sekundarnih sirovina, kao dodatka cementu, znatno se poboljšavaju trajnosna svojstva betona.[1, 2, 3].

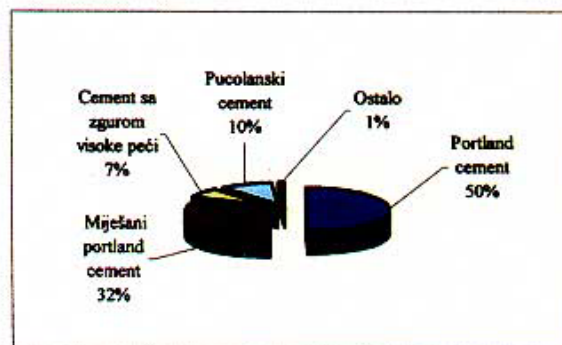
2.2 Trend proizvodnje i primjene cementa

Sve veća primjena cementa omogućila je brzi razvoj građevinarstva, posebno betonskih konstrukcija, ali i obrnuto, napredak građevinarstva postavljao je pred cementnu industriju sve zahtjevnije zadatke, a ona ih je postupno svladavala. Konstruktori traže ponajprije cemente veće čvrstoće, s posebnim naglaskom na dinamičnu očvršćivanja, ali i druge specifične karakteristike cementa: smanjenu toplinu hidratacije za gradnju masivnih betonskih konstrukcija (npr. brane), povećanu otpornost na kemijsku agresiju (prvenstveno sulfata i kiselih medija), manje skupljanje i dr. Pri svemu tome najveća se pažnja poklanja ujednačenosti sastava, a time i upotrebni svojstva cementa.

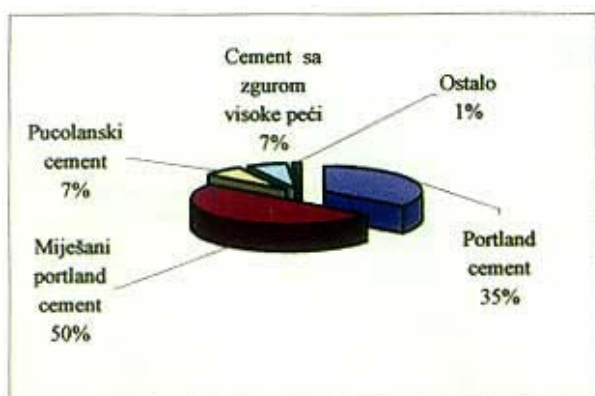
Do sada se beton kao građevni materijal razvijao u pravcu poboljšanja tlačnih čvrstoća, dok se u budućnosti očekuju poboljšanja i ostalih svojstava kao npr. modul elastičnosti, čvrstoća na savijanje, udarna čvrstoća i permeabilnost odnosno trajnost. Sada je dobro poznato da obični beton pokazuje nedostatke u nekima od ovih svojstava zbog nesavršenosti u mikrostrukтури, kao što je postojanje pora i mikropukotina u tranzitnoj zoni, prisustvo čvrstih komponenata niske čvrstoće u hidratiziranoj cementnoj pasti (tj. kristalni kalcij-hidroksid) i heterogenoj distribuciji faza u materijalu.

Određena poboljšanja postignuta su nekim mineralnim dodacima sadržanim u cementu, poput zgure, letećeg pepela, amorfnog SiO_2 prašine i dr. [3, 4, 5, 6, 7, 8].

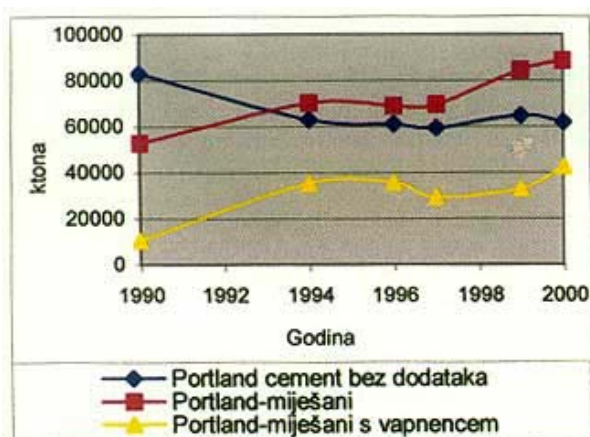
Iako je već dugo poznata i primjenjivana proizvodnja cementa s dodacima i danas bilježi trend daljnjeg razvoja. Na slikama 1., 2. i 3. prikazana je usporedba proizvodnje cementa po tipovima za zemlje EU između 1990. i 2000. godine, gdje se vidi značajan porast proizvodnje



Slika 1. Proizvodnja cementa po tipovima za zemlje EU 1990. [9]



Slika 2. Proizvodnja cementa po tipovima za zemlje EU 2000. [9]



Slika 3. Trend proizvodnje portlandskog cementa bez dodatka i miješanog s udjelom vapnenca za zemlje EU od 1990-2000. [9]

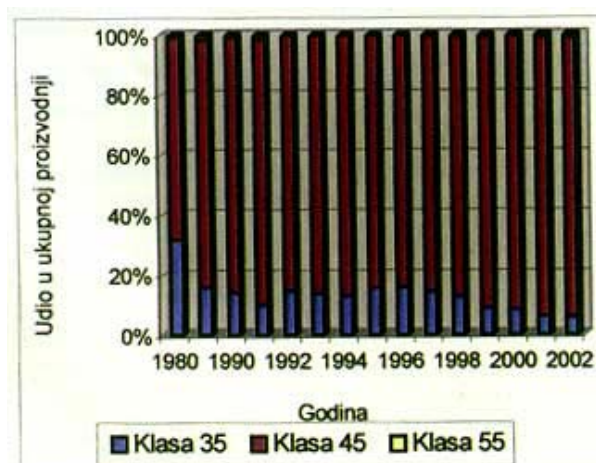
miješanog portlandskog cementa koji sadrži zgurom, leteći pepeo, vapnenac i pucolan s tendencijom porasta udjela vapnenca u proizvedenom cementu.

Približavanje tržištu omogućeno je širokim izborom vrsta cementata, s obzirom na vrstu dodataka i deklariranu klasu. Donedavnom koncepcijom proizvodnje, odnosno mljevenja cementa, tvornice su morale imati za svaku vrstu cementa i silos za njegovo odlaganje, što je zahtijevalo i njihovu izgradnju. Napretkom tehnologije u tom dijelu proizvodnog procesa, proizvodnjom cementa miješanjem pojedinačno samljevenih komponenata, osigurana je pokrivenost tržišta širokim rasponom tipova cementa uz niže troškove proizvodnje, što se odražava i u proizvodnji betona.

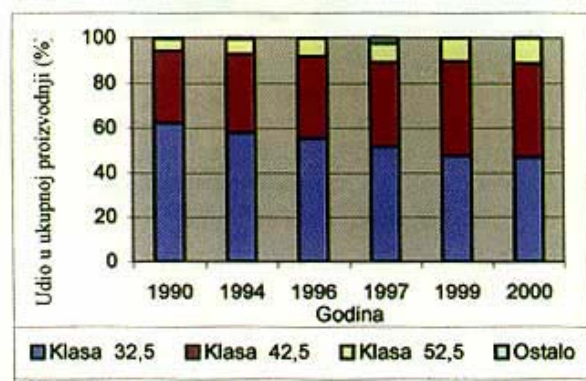
Hrvatska je kao i ostale zemlje bivše države, još početkom osamdesetih godina imala značajan napredak u proizvodnji cementa s dodacima, koji je bio uglavnom potaknut nestašicom cementa na tržištu. Daljnje aktivnosti u istraživanjima i razvoju proizvodnje cementa uz primjenu alternativnih materijala bio je usporen ratnim događanjima, koja su znatno smanjila ukupnu potrošnju cementa i nedostatak domaćih sekundarnih sirovina. U

hrvatskim tvornicama cementa od alternativnih se dodataka u proizvodnji cementa najviše rabi zgurom i onedavno manje količine letećeg pepela, dok su ostalo prirodne sirovine.

Na slici 4. prikazana je proizvodnja cementa po klasama u Hrvatskoj za razdoblje 1980. – 2002., a na slici 5. to je isto prikazano za zemlje Europske unije u razdoblju 1990. – 2000.



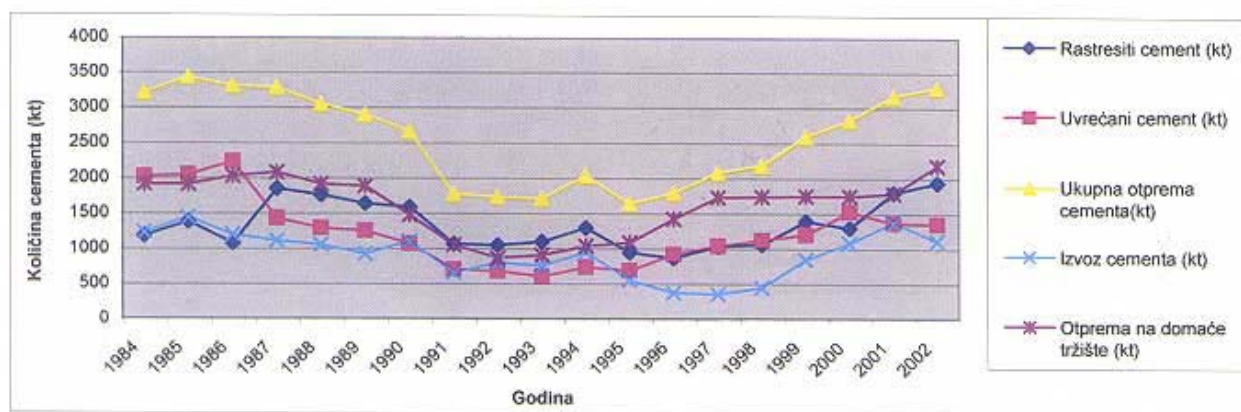
Slika 4. Proizvodnja cementa po klasama u Hrvatskoj za razdoblje od 1980. do 2002.



Slika 5. Proizvodnja cementa po klasama u zemljama EU za razdoblje od 1990. do 2000.

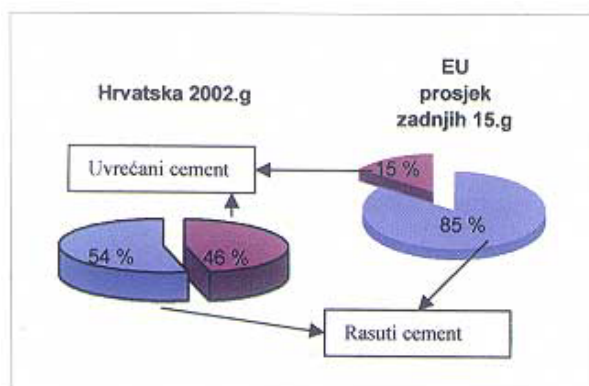
Slike 6. i 7. pokazuju bitnu razliku u načinu potrošnje cementa, omjerom cementa u rastresitom stanju i cementa u vrećama. Već više od dva desetljeća udio proizvodnje/potrošnje rastresitog cementa u Zapadnoj Europi veći je od 80%, što ujedno pokazuje razvijenost europskih zemalja u proizvodnji i uporabi betona.

Način potrošnje cementa u Hrvatskoj tipičan je za tranzicijske zemlje, gdje je još uvijek uglavnom prisutan individualni način gradnje, tj. pripreme betona, što znači upotrebu cementa u vrećama.



Slika 6. Otprema cementa iz hrvatskih tvornica u razdoblju 1984. do 2002. [10]

Upravo činjenica da se u Hrvatskoj još uvijek troši više od 40% cementa u vrećama, daje prostora za razvijanje proizvodnje transport betona, a također i razvijanje proizvodnje više vrsta cementa.



Slika 7. Odnos potrošnje cementa u vrećama i cementa u rastresitom stanju

3 Primjene alternativnih materijala u održivom razvoju proizvodnje cementa

3.1 Energetske značajke

Trend cementne industrije razvijenih zemalja pokazuje usmjeravanje asortimana prema cementima sa što više dodataka, što je ujedno doprinos proizvodnje cementa i betona održivom razvoju i štednji energije.

Već spomenuta visoka potrošnja toplinske energije u proizvodnji cementa, sadržana je upravo u proizvodnji klinkera. Sadašnji stupanj iskorištavanja toplinske energije od 0,58 odraz je tehničko-tehnološkog dostignuća i daljnji napredak tehnologije ne očekuje smanjenje specifičnog utroška toplinske energije.

Proizvodnja klinkera uvjetovana je kvalitetom sirovinskih komponenata u pogledu dobivanja željenog kemijskog sastava i visokotemperaturnim reakcijama u čvrstoj fazi i heterogenim reakcijama pri sinteriranju.

Teoretski je iz kemijskog sastava sirovinske smjese, prema Bogueu [4] moguće proračunati potencijalni fazni sastav klinkera, potrebnu temperaturu sinteriranja i potrebnu količinu topline za klinkerizaciju [4, 11].

Nastali minerali klinkera dobiveni kemijskim i termodinamičkim procesom određuju svojstva cementa.

Pristupi u proizvodnji klinkera radi smanjenja utroška energije, a time i emisije NO_x i CO_2 , različiti su i ovisni o regionalnom smještaju tvornice, odnosno raspoloživosti prirodnih i sekundarnih sirovina te zakonskih propisa pojedinih država što se tiče zaštite okoliša i dr.

Poznate su i u literaturi obrađene mogućnosti proizvodnje belitnog klinkera, za koji je potrebno do 16% manje topline za klinkerizaciju [7], kao i neki drugi postupci koji smanjuju potrebne energije u procesu pečenja.

Najznačajnije aktivnosti idu u smjeru što veće zamjene klinkera u cementu sekundarnim sirovinama, naravno uz zadržavanje kvalitete konačnog proizvoda. Takvim pristupom smanjuje se potrošnja prirodnih sirovina, potrošnja toplinske i električne energije uz smanjenje emisije NO_x i smanjenje emisije (oslobađanja) CO_2 koja proizlazi iz reakcije izgaranja goriva i reakcije dekarbonacije CaCO_3 .

Industrijskom proizvodnjom klinkera na jednoj rotacijskoj peći nije jednostavno proizvoditi klinkere različitih mineraloških sastava, uvjetovanih naravno kvalitetom sirovinskih komponenata. S obzirom na masovnu proizvodnju i velike skladišne prostore sirovina i klinkera, klinker treba biti sa što manje oscilacija u kvaliteti radi ujednačenosti vođenja procesa i kvalitete konačnog proizvoda.

U Našicecementu d. d. proveden je eksperiment u industrijskom mjerilu, radi proizvodnje klinkera različitog kemijskog a time i očekivanog faznog sastava, uz za to potrebnu količinu toplinske energije. Pri eksperimental-

noj industrijskoj proizvodnji klinkera u rotacijskoj peći, proizvedena su četiri ciljana sastava klinkera, održavanjem jednosličnosti sastava sirovinskog brašna i rada peći za svakih približno 150 t proizvodnje. Izdvojeni (vanjski depo) klinker s promjenama u kvaliteti, praćeno preko stupnja zasićenja ($SZ = \text{CaO}/(2,8 \text{SiO}_2 + 1,2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{Fe}_2\text{O}_3)$), za proces pečenja imao je različite specifične troške toplinske energije, te konačne čvrstoće laboratorijski pripremljenih cementa, što je prikazano u tablici 1.

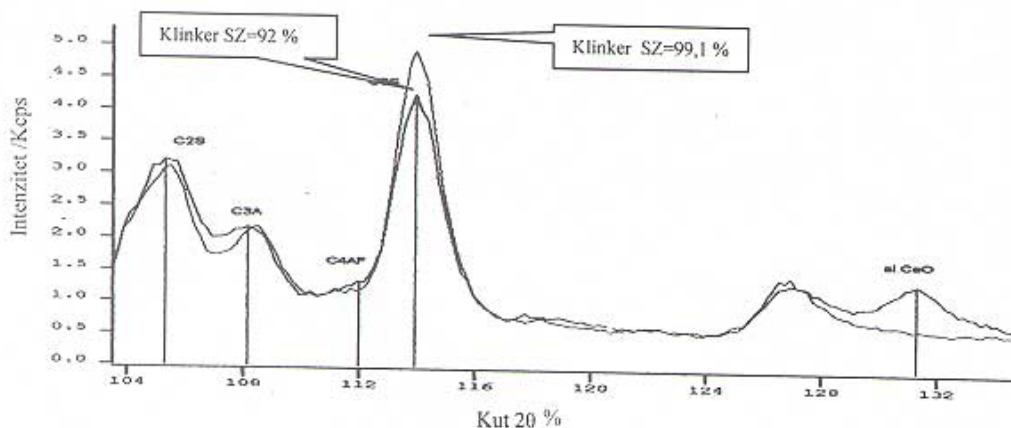
Tablica 1. Podaci o utrošenoj toplinskoj energiji na rotacijskoj peći proizvedenog klinkera

Stupanj zasićenja u klinkeru [%]	Specifični utrošak toplinske energije na rotacijskoj peći kJ/kg klinkera	Tlačne čvrstoće nakon 28 dana [MPa]
99,1	3406	59,7
96,5	3347	57,3
93,2	3264	51,5
92,0	3180	48,5

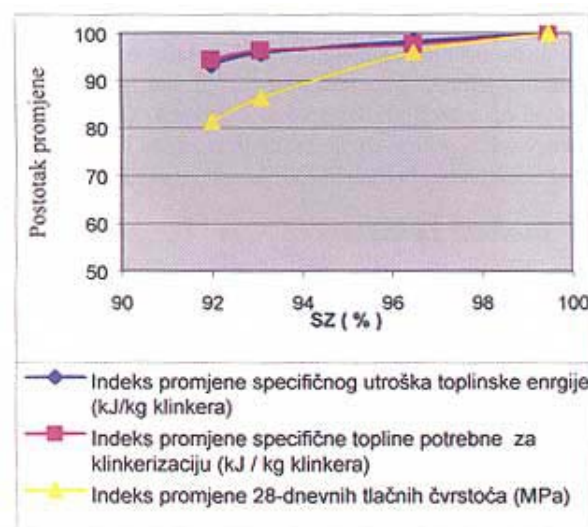
Naime promjena kemijskog sastava sirovinskog brašna uvjetuje i količinu nastajanja četiriju osnovnih minerala klinkera: C_3S , C_2S , C_3A i C_4AF , odgovornih za hidraulička svojstva cementa. Na slici 8. je rendgenogram dvaju tipova klinkera, gdje je prikazan odnos njihovih difrakcijskih maksimuma izmjenjenog intenziteta pri određenom kutu 2θ , koji određuju i pokazuju razlike u mineraloškom sastavu.

Na slici 9. prikazana je promjena specifičnog utroška toplinske energije i promjena njegovih 28-dnevnih tlačnih čvrstoća u odnosu na SZ.

Promjena specifičnog utroška toplinske energije pri proizvodnji klinkera manja je u odnosu na promjenu konačnih tlačnih čvrstoća cementa uvjetovanih njegovom početnom kvalitetom.



Slika 8. XRD dijagram klinkera SZ = 99,1% i SZ = 92%



Slika 9. Prikaz promjene specifičnog utroška toplinske energije i 28-dnevnih tlačnih čvrstoća proizvedenog klinkera

Efektu smanjenja utroška toplinske energije u proizvedenom cementu znatno pridonosi zamjena dijela klinkera nekim dodacima, što je prikazano dodatkom zguure.

Tablica 2. 28-dnevne tlačne čvrstoće cementa pripremljenog od klinkera sa SZ od 99,1% i zgurom

Udio zamijenjenog klinkera zgurom [mas. %]	Tlačne čvrstoće nakon 28 dana [MPa]
0	59,7
15	52,6
30	47,2

Činjenica da se oko 50% utrošene električne energije u proizvodnji cementa troši na mljevenje cementa, najvećim dijelom klinkera, također daje prednost zamjeni dijela klinkera s nekim dodacima.

Osim tehničkih prednosti zamjene dijela portlandskog cementa u betonu s letećim pepelom ili zgurom visokih peći, mineralni dodaci nude laganiji put uštede sirovin-

skih materijala za proizvodnju cementa i energetskih izvora. Na primjer, zamjenom 30% portlandskog cementa u betonu letećim pepelom smanjit će sadržaj energije cementnog materijala za gotovo isti iznos. Granulirana zgora visokih peći može se rabiti za zamjenu čak i većeg iznosa cementa u betonu [12, 13].

3.2 Ekološke značajke

Upotreba alternativnih materijala u cementnoj industriji, bilo da imaju uporabnu ogrjevnu vrijednost ili kao dodaci cementu, veliki je doprinos u zaštiti okoliša.

Odlaganje ovih nusproizvoda na tlu izaziva zagađenje zraka, dok odlaganje u jezera i vodotokove oslobađa toksične metale koji su normalno prisutni u malim količinama.

Posebno je pogodna okolnost da se teški metali sadržani u cementu praktički ne izlužuju iz konačnih cementnih proizvoda- betona i mortova [3].

Beton je također uz cement mjesto za zbrinjavanje milijuna tona cementu sličnih nusproizvoda (leteći pepeo, zgora iz visokih peći, amorfnog SiO₂ prašina...).

Cementna industrija mora aktivno sudjelovati u provedbi Kyoto protokola za smanjenje emisije CO₂. [12,14,15]

U proizvodnji cementa emisije CO₂ uzrokovane su reakcijom dekarbonatizacije iz sirovine i izgaranjem goriva. Smanjenje emisije CO₂ moguće je u proizvodnji cementa zamjenom dijela klinkera mineralnim dodacima. Naime svaki postotak smanjenja količine klinkera u cementu daje uštedu u sirovini, gorivu i smanjenje emisije CO₂ u atmosferu u istom postotku.

4 Zaključak

Uz očekivano pridruživanje EU usvajanjem europskih norma za cement pruža se mogućnost proizvodnje više vrsta cementa za različite namjene u proizvodnji betona uz uporabu sekundarnih sirovina u proizvodnji cementa a i pri samoj proizvodnji betona.

Prednosti takvog načina proizvodnje daju proizvodnji betona i cementa odlike održive tehnologije, kroz: stalno poboljšanje kvalitete proizvoda štednju prirodnih izvora sirovine i energije zbrinjavanje otpadnih materijala (sekundarnih sirovina) na prikladan način smanjenje emisije štetnih plinova u atmosferu. Proizvođačima cementa i betona to donosi: približavanje tržištu kvalitetom i asortimanom proizvoda-smanjenje troškova proizvodnje

LITERATURA

- [1] *Best available techniques for the cement industry*, CEMUREAU-The European Cement Association, Brussels, 1999.
- [2] Walter H. Duda: *Cement-Data-Book*, Bauverlag GMBH Wiesbaden, Berlin 1975.
- [3] Popović, K.; Kamenić, N.; Rosković, R.; Petrović, Ž.; Pletikosić, M.; Garilović, J.: *Proizvodnja cementa-održiva tehnologija prihvatljiva za okoliš*, Interdisciplinarno znanstveno-stručni simpozij – Graditeljstvo i okoliš, HDGK, Brijuni, 2002.(219.-227.)
- [4] Hewlett, C. P.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4d edn, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, London, 1998.
- [5] Ghosh, S.N.; Kumar, K.: *Modernisation and technology upgradation in cement plants*, Vol 5. Akademia Books International, New Delhi, 2000.
- [6] Chen, W.F.: *The civil engineering handbook*, CRC Press LLC, Boca Raton, 1995.
- [7] Grutzeck, W. M.; Sarkar, L. S.: *Advances in cement and concrete*, Akademia Books International, New Delhi, 1996.
- [8] Malhotra, V. M.: *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, 1987.
- [9] CEMUREAU- The European Cement Association Brussels: *European Union Synthesis 1990-2000*.
- [10] Croatiacement Zagreb – Hrvatsko udruženje proizvođača cementa: *Godišnja izvješća*
- [11] Alsop, P. A.; Chen, H.; Jackura, A. L.; McCabe, M. I.; Tseng, H. H.: *The The Cement Plant Operations Handbook*, Tradeship Publications Ltd, Portsmouth, 2001.
- [12] Ghosh, S. N., Yadav S. N.: *Energy conservation and environmental control in cement industry*, Vol 2 Part II, Akademia Books International, New Delhi, 1996.
- [13] Ghosh, S. N., Yadav S. N.: *Energy conservation and environmental control in cement industry*, Vol 2 Part I, Akademia Books International, New Delhi, 1996.
- [14] Hillebrand, B.: *Auswirkungen nationaler und internationaler Klimapolitik auf die Zementindustrie*, ZKG 52 (1999) 3, 113.-127.
- [15] Onuma, E.; Ichikawa, M.; Sano, S.: *Umweltbelastung von Zement und Beton-Bewertungsprobleme und Verbesserungsmöglichkeiten*, ZKG (2000)10, 594.-601.