

## OPTIMIZACIJA SESTAVE MEŠANIH PORTLANDSKIH CEMENTOV GLEDE NA PROIZVODNE STROŠKE

### OPTIMIZATION OF COMPOSITE PORTLAND CEMENTS COMPOSITION WITH A VIEW TO PRODUCTION COSTS REDUCTION

**Tomaž Vuk, Magda Gabrijelčič**

Salonit Anhovo, Razvojno raziskovalni inštitut, Vojkova 1, 5210 Anhovo

*Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1999-01-14*

V prispevku želimo opisati poskus optimizacije mešanih portlandskih cementov različnih trdnostnih razredov glede na proizvodne stroške. Na podlagi eksperimentalnega načrta smo v laboratorijskem mlinu pripravili 28 različnih cementov, pri katerih smo izmerili tlačne trdnosti po 28 dneh. Iz rezultatov smo dobili modelno funkcijo polinomskega tipa za napoved tlačne trdnosti cementa v odvisnosti od njegove sestave in finosti. Proizvodne stroške smo določili kot vsoto stroškov za surovine in ocenjenih stroškov mletja. Z uporabo programa SOLVER (EXCEL) smo izračunali najcenejšo sestavo mešanih portlandskih cementov v posameznih trdnostnih razredih. Ti rezultati laboratorijskega poskusa nam bodo rabili kot izhodišče pri razvoju novih tipov cementa v cementarni Salonit Anhovo.

Ključne besede: mešani portlandski cement, tlačna trdnost, proizvodni stroški, optimizacija

An optimization of composite Portland cements composition was performed in order to reduce costs of production. 28 different cements were prepared in a laboratory mill. Compressive strengths after 28 days for each sample were determined. A response surface function for compressive strength prediction was obtained. Production costs were determined as the sum of costs for raw materials and estimated costs for grinding. Computer program SOLVER (EXCEL) was used for the determination of cements with minimal production costs in different compressive strength classes. These results will be used as a starting point for the development of new types of composite Portland cements in Salonit Anhovo cement factory.

Key words: composite Portland cement, compressive strength, production costs, optimization

## 1 UVOD

Nadomeščanje cementnega klinkerja z drugimi glavnimi sestavinami (sestavine nad 5%) pri proizvodnji cementa je splošna praksa, ki izvira iz naslednjih osnovnih motivov:

- povečanje dobička proizvajalca cementa, če je kupec pripravljen plačati ceneno sestavino po isti ceni, kot jo ima čisti portlandski cement
- povečanje dobička proizvajalca betona, če je uporabnik pripravljen plačati tak beton po isti ceni, kot jo ima tisti, pripravljen iz čistega portlandskega cementa
- uporaba stranskih produktov industrije (plavžna žindra, elektrofiltrski pepel...)
- priprava cementov s posebnimi lastnostmi, ki bi jih pri čistem portlandskem cementu težko dosegli
- izboljšanje trdnosti s spremembo sistema hidratacije v cementu (npr. dodatek pucolanskega materiala zveča cementu kasnejšo trdnost<sup>1</sup>)
- zamenjava sadre, kot regulatorja vezanja, na področjih, kjer je težko dosegljiva<sup>2,3</sup>.

Sestavine za pripravo cementa lahko razdelimo na aktivne, ki sodelujejo pri hidrataciji (pucolanski materiali, plavžna žindra, elektrofiltrski pepel), neaktivne ali skoraj neaktivne (kremenov pesek, apnenec) in tiste, ki škodujejo kvaliteti cementa (gline, organske snovi). Uporaba pucolanskih materialov, plavžne žindre in

elektrofiltrskega pepela za pripravo cementa in betona je splošno sprejeta v številnih državah in tudi pri nas. Manj pa se za izdelavo cementov uporabljata apnenec ter kremenov pesek, čeprav ima predvsem prvi številne pozitivne vplive na lastnosti cementa in betona<sup>3,4</sup>. Po sedaj veljavnih standardih v Sloveniji za proizvodnjo cementa ni mogoče uporabljati apnenca, evropski standard za cimente ENV 197-1 (1992)<sup>5</sup>, ki bo v bližnji prihodnosti veljal tudi pri nas, pa to možnost dopušča. Ker ima Salonit Anhovo v svoji surovinski bazi primeren apnenec za proizvodnjo cementa (ustreza zahtevam standarda ENV 197-1 (1992)), smo se odločili za razvoj novih tipov mešanih portlandskih cementov z uporabo klinkerja, apnenca, žindre in trasa kot glavnih sestavin. Osnovni namen razvoja takega cementa je znižanje proizvodnih stroškov, pri čemer pa mora kakovost novega izdelka ustrezati standardom in seveda potrebam bodočih uporabnikov.

Mešani portlandski cementi morajo vsebovati od glavnih sestavin po standardu ENV 197-1 (1992) vsaj 65% cementnega klinkerja in torej največ do 35% drugih (apnenec, plavžna žindra, elektrofiltrski pepel...). Poleg tega lahko vsebujejo še do 5% sadre in do 5% dodatnih sestavin, ki so lahko tudi nedefinirane. Z našim poskusom smo želeli priti do sestave mešanih portlandskih cementov, ki bodo v svojem trdnostnem razredu najcenejši. Pri tem smo uporabili surovine, ki jih

že zdaj uporabljamo za proizvodnjo različnih tipov cementa v cementarni Salanit Anhovo.

## 2 EKSPERIMENTALNO DELO

Laboratorijski poskus smo izvedli po eksperimentalnem načrtu za pet faktorjev (half fraction central composite experimental design). Teorija eksperimentalnih načrtov je natančno opisana v literaturi in je tu ne bomo posebej obravnavali<sup>6</sup>. Izbrani faktorji so naslednji deleži: apnenca 0-18%, žlindre 0-18%, trasa 0-9%, čas mletja v laboratorijskem mlinu 15-25 min in koncentracija aditiva za pospeševanje mletja CBA 1110 proizvajalca Grace 0-0,06%. Aditiv CBA 1110 naj bi vplival tudi na hidratacijo cementa za povišanje trdnosti<sup>7</sup>. Vsi cementi vsebujejo še 5% sadre in cementni klinker. V krogelnem laboratorijskem mlinu smo pripravili 28 različnih vrst cementov in sicer vsako po 5 kg. Vsem 28-im vzorcem smo izmerili fizikalne in mehanske lastnosti, ki se standardno določajo cementom, med drugim tudi tlačno trdnost po 28 dneh. Na podlagi tako dobljenih rezultatov smo z metodo najmanjših kvadratov izračunali regresijsko enačbo polinomskega tipa za napoved tlačne trdnosti cementa po 28 dneh. Polinom vsebuje linearne, kvadratne in mešane člene, kot neodvisne spremenljivke pa nastopajo vrednosti za pet že omenjenih faktorjev. Na podoben način bi lahko pripravili modelne funkcije tudi za druge lastnosti mešanih portlandskih cementov. Iz rezultatov smo ugotovili vplive posameznih faktorjev na tlačno trdnost. Za vsako vrsto smo izračunali proizvodne stroške kot vsoto stroškov za posamezne sestavine ter ocenjenih stroškov mletja. Slednje smo ocenili na podlagi izkušenj, in sicer smo za vrsto, ki se je mlela v laboratorijskem mlinu dlje, računali višje stroške mletja. S programom SOLVER (EXCEL) smo nato na podlagi dobljene modelne funkcije za tlačno trdnost cementa po 28 dneh in izračuna za proizvodne stroške iskali najcenejšo sestavo za različne trdnostne razrede cementa.

**Tabela 1:** Vplivi posameznih faktorjev na tlačno trdnost cementa po 28 dneh

**Table 1:** Effects of different factors on compressive strength after 28 days

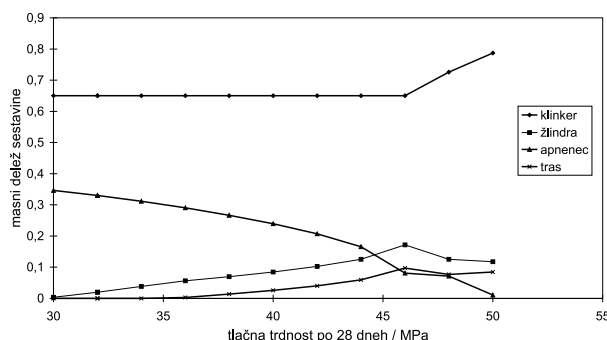
Faktor	- povprečje 9 podatkov (MPa)	0 povprečje 10 podatkov (MPa)	+ povprečje 9 podatkov (MPa)	Povprečen vpliv (MPa)
apnenec 0-18%	47,6 0 %	44,3 9 %	38,9 18 %	-8,7
žlindra 0-18%	44,4 0 %	44,5 9 %	41,8 18 %	-2,6
trasa 0-9%	43,3 0 %	44,3 4,5%	43,2 9 %	-0,1
čas mletja 15-25 min	42,1 15 min	43,9 20 min	44,9 25 min	+2,8
količina CBA1110 0-0,06%	42,3 0 %	43,9 0,03 %	44,6 0,06 %	+2,3

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

V **tabeli 1** so zbrani podatki o vplivih posameznih faktorjev na trdnost cementa v okviru preiskovanega področja.

V prvi koloni so zbrani podatki o povprečni vrednosti tlačnih trdnosti za cemente s spodnjo vrednostjo posameznega faktorja, v drugi s srednjo in v tretji z zgornjo. V prvem polju za apnenec je tako povprečna vrednost trdnosti za cemente brez apnenca, v drugem za cemente z 9% apnenca in v tretjem za tiste z 18%. Podobno velja za druge faktorje. Podatki za vrednosti faktorjev so podani v tabeli poleg podatka za povprečno trdnost. V zadnji koloni je navedena razlika vrednosti iz tretje in prve kolone, torej razlika trdnosti za dva skrajna nivoja posameznega faktorja. Iz podatkov je razvidno, da na tlačno trdnost še najbolj vpliva dodatek apnenca, in sicer negativno. Čas mletja, dodatek žlindre in aditiva imajo približno enako velik vpliv, najmanj pa na tlačno trdnost vpliva dodatek trasa. Seveda to velja za preiskovan prostor spremenljivk. Zanimivo je tudi, da imata tako tras kot žlindra neko optimalno območje. To pomeni, da v večjih količinah sicer negativno vplivata na trdnost, v manjših pa lahko trdnost cementa celo povečata.

Z metodo najmanjših kvadratov smo ugotovili regresijsko enačbo v obliki polinoma druge stopnje za napoved tlačnih trdnosti po 28 dneh. Na podlagi te enačbe in tiste za izračun proizvodnih stroškov, ki upošteva cene posameznih sestavin ter ocenjene stroške mletja, smo s programom SOLVER (EXCEL) dobili najcenejšo vrsto cementa v različnih trdnostnih razredih. Pri tem smo upoštevali omejitve, ki so podane s standardom ENV 197-1 1992, namreč, da mora cement vsebovati vsaj 65% klinkerja. Pri optimizaciji smo dovolili, da gredo posamezni faktorji tudi iz območja poskusnih sestav, kar velja zlasti za delež apnenca v cementih z nizko marko. Kasnejši poskusi s takimi sestavami pa so pokazali dokaj dobro ujemanje z



**Slika 1:** Optimalne sestave mešanih portlandskih cementov za različne trdnosti. Izračun velja za najdaljši čas mletja (25 min v laboratorijskem mlinu) in za sestave brez aditiva CBA 1110. Vsi cementi vsebujejo poleg teh komponent še 5% gipsa

**Figure 1:** Optimal compositions of composite Portland cements with different compressive strength. Calculations are for maximal time of grinding (25 min in a laboratory mill) and for compositions without the additive CBA 1110. All cements contain 5% of gypsum

napovedni modela. Optimalne sestave so podane na **sliki 1**. V odvisnosti od trdnosti cementa so podani deleži posameznih sestavin v najcenejših sestavah. Pri optimizaciji se je izkazalo, da je smiselno mleti cement do visoke finosti, zato veljajo podatki na sliki za najdaljši čas mletja v laboratorijskem mlinu. Prav tako se je izkazalo, da dodatek aditiva za povečanje trdnosti ni ekonomsko upravičen, ker je aditiv predrag. Pri tem se moramo zavedati, da je težko primerjati laboratorijski mlin z mlevnim sistemom za industrijsko mletje cementa. Industrijski mlevni sistem ima separatorje, ki vračajo velike delce iz zmlotka ponovno v mlin, dovolj majhni delci pa gredo v cement. Pri separaciji igra aditiv pomembno vlogo, ker preprečuje aglomeracijo drobnih delcev. Zaradi tega je pri mletju cementa ekonomsko upravičeno uporabljati nek aditiv za pospeševanje mletja. Pri našem poskusu pa tega nismo opazili.

Iz slike je razvidno, da je za doseganje nizkih mark ekonomsko upravičeno proizvajati cemente iz klinkerja in apnenca, za srednje marke cementa je za povečevanje trdnosti smiselno nadomeščati apnenec z žlindro in trasom, za še višje marke pa je seveda treba nujno povečati delež klinkerja v cementu.

#### 4 SKLEP

Z laboratorijskim poskusom smo ugotovili regresijsko enačbo za napoved tlačne trdnosti mešanih portlandskih cementov po 28 dneh. Na podlagi te enačbe in tiste za izračun proizvodnih stroškov smo s programom Solver poiskali najcenejšo sestavo cementov za različne trdnostne razrede. Pokazalo se je, da so za

razrede trdnosti pod 30 MPa najcenejše sestave pripravljene le iz klinkerja in apnenca, za srednje trdnosti je smiselno nadomeščati del apnenca z žlindro in trasom, za najvišje trdnostne razrede pa je treba povečati delež klinkerja v cementu in v skrajnem primeru proizvajati čisti portlandski cement. Seveda se je treba zavedati, da imajo rezultati, ki smo jih dobili z laboratorijsko pripravo cementa, omejeno uporabnost za proizvodnjo cementa, predvsem zaradi razlik pri mlevnih sistemih. Zavedati se moramo tudi, da tlačna trdnost po 28 dneh ni edina pomembna lastnost cementa, je pa navadno najdražja lastnost. Kljub temu pa bodo dobljeni rezultati rabili za izhodišče pri razvoju novih tipov cementa v cementarni Salanit Anhovo.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> S. Popovics: Concrete Materials – Properties, Specifications and Testing, 2<sup>nd</sup> Edition, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, **1992**, 187-190
- <sup>2</sup> H. F. W. Taylor: Cement Chemistry, 2<sup>nd</sup> Edition, Thomas Telford Publishing, London, **1997**, 289-290
- <sup>3</sup> G. Cochet, F. Sorrentino: Limestone Filled Cements – Properties and Uses v Progress in Cement and Concrete, Mineral Admixture in Progress in Cement and Concrete Volume 4, Editor S. N. Ghosh, ABI Books, New Delhi, India **1993**, 266-295
- <sup>4</sup> Carbonate additions to cement, ASTM STP 1064, Editors P. Kliger and R. D. Hooton, PA, USA, **1990**
- <sup>5</sup> European Prestandard ENV 197-1, Cement – composition, specifications and conformity criteria – Part 1: Common cements, CEN Brussels, **1992**
- <sup>6</sup> Ed Morgan: Chemometrics – Experimental Design, Analytical Chemistry by Open Learning, John Willey & Sons, Chichester **1991**
- <sup>7</sup> F. Slim, A. Abelleria, B. Planinsek: Building up Strength, *International Cement Review*, (**1997**) June, 46-50