

OKSICELULOZA

Dušik-tetroksidom celuloze se na vrlo specifičan način oksidira, tj. jedino primarna hidroksimetilna grupa na mjestu 6 (v. str. 564) oksidira se na karboksilnu, te od celuloze nastaju celuronske kiseline. Takve kiseline imaju još vlaknastu strukturu i posjeduju posebno svojstvo da zaustavljaju krvarenje, pa se u USA od njih pravi sterilni zavojni materijal (Oxycel, Hemo-Pak). Tako dobivena oksiceluloza ima i svojstvo izmjenjivača za alkalioide. Budući da ima sličnu strukturu kao pektin, možda će se moći primijeniti na područjima gdje se dosad upotrebljavao samo pektin (industrija prehrambenih proizvoda, farmacija).

LIT: E. C. Worden, Technology of cellulose ethers, Milbourn 1930. — O. Faust, Celluloseverbindungen, Berlin 1935. — G. Champetier, Dérivés cellulosiques, Paris 1947. — V. Stannet, Cellulose acetate plastics, London 1950. — K. Fabel, Nitrocellulose, Herstellung und Eigenschaften, Stuttgart 1955. — O. Wurz, Celluloseäther, Darmstadt 1960. — E. D. Klug, Cellulose derivatives, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, New York 1964. (V. i Celuloza.)
Lj. Grlić

CEMENTI, u vodi netopljiva hidraulička građevinska veziva, tj. veziva koja pomiješana s vodom očvršćavaju i stvrđnjavaju na zraku ili pod vodom i prelaze u čvrsto, kamenito stanje pa na taj način mogu povezati kameni agregat u jednu cjelinu: malter (mort) ili beton. Cementi se sastoje u suštini od spojeva kalcijum-oksida s oksidima silicijuma, aluminijuma i željeza, koji spojevi nastaju žarenjem homogene sirovinske smjese najmanje do temperature sinterovanja.

Hidraulička veziva bila su poznata već u starom vijeku, a naročito su ih usavršili Rimljani, koji su ih proizvodili miješanjem vulkanskih pepela, pucolana (nazvanih po mjestu Puteoli ispod Vezuva), trasa (trahitnog tufa s područja Rajne) ili usitnjene opeke s gašenim vapnom. Riječ *mentum* ili *caementum* (od *caementum*) potječe od lat. glagola *caedere* (*lapidem*) = lomiti (kamen) i označavala je prvobitno lomljeni ili klesani zidarski kamen, kasnije je dobila značenje maltera i zidne žbuke, a tek od najnovijeg vremena označava samo vezivo. Moderni cementi počeli su se proizvoditi početkom XIX st. u Engleskoj pečenjem vapnenca i gline i mljevenjem pečnog produkta, cementnog klinkera, u prah. Naziv portland-cement spominje se prvi put 1824 u jednom engleskom patentu; izumilac je dao svome izumu to u ono vrijeme privlačno ime po poznatom građevnom kamenu iz Portlanda u Engleskoj. Polovinom prošlog stoljeća počela se industrija cementa razvijati na evropskom kontinentu, a nešto ranije u USA. Naša industrija cementa nastala je sredinom prošlog stoljeća; prve tvornice cementa podignute su 1854 u Kašniku i Rovinju, a oko 1865 u Beočinu i Splitu. No već 1838 upotrijebljen je beočki lapor za pečenje cementa kojim se gradio Lančani most u Budimpešti.

Vrste cementa. Prema svom osnovnom kemijskom sastavu cementi se dijele na silikatne cemente, u kojima su glavni nosioci stvrđnjavanja i ostalih tehničkih svojstava silikati kalcijuma, i na aluminatne cemente, čija svojstva uslovljavaju uglavnom kalcijum-aluminati. Glavni predstavnik silikatne grupe je *portland-cement*, koji danas od svih cemenata ima najveću primjenu. Od portland-cementa izvode se cementi s hidrauličkim dodacima, tj. tvarima koje same nemaju sposobnost da otvrdnu s vodom, ali to svojstvo ispoljavaju kad se pomiješaju s portland-cementom. — Metalurški cementi se dobijaju mljevenjem mješavine portland-klinkera i granulirane (kaljene) zgure (troske) visokih peći željezara. U nas, kao i u nekim drugim zemljama, standardizirana su dva tipa metalurškog cementa: portland-cement sa dodatkom zgure (*željezo-portland-cement*), sa najmanje 70% portland-klinkera i najviše 30% zgure, i *metalurški cement* (u užem smislu, ili *cement visokih peći*) sa 15...69% portland-klinkera i 31...85% zgure. Portland-cement s dodatkom do 30% pucolana i *pucolanski cementi* s dodatkom preko 30% pucolana dobijaju se mljevenjem mješavine portland-klinkera s prirodnim ili vještačkim pucolanima, pucolanskom ili santorinskom zemljom, trasom i drugim tufovima, dijatomejskom zemljom, opalskom brečom, lebdećim pepelom iz elektro-otprašivača ložišta parnih kotlova i dr. Prema propisu našeg standarda za cement, vrsta i procent tih hidrauličkih dodataka treba da su naznačeni na svakoj vreći cementa. Metalurški i pucolanski cementi otporniji su prema agresiji sulfatnih soli koje se nalaze u vodi ili tlu i razvijaju manje topline u toku hidratacije-stvrđnjavanja nego portland-cement, ali mogu imati manje početne čvrstoće. U kasnijem toku očvršćavanja oni, međutim, mogu postići iste čvrstoće kao odgovarajući portland-cementi. Upotrebljavaju se naročito za podmorske gradnje i za masovni beton (brane). Hidraulična moć pojedinih pucolana vrlo je različita, pa njihovu prikladnost za dodavanje cementu treba unaprijed ispitati. — *Supersulfatni cement* proizvodi se mljevenjem smjese od najviše 5% portland-klinkera, 12...15% sadrovca (gipsa) ili anhidrita i 80...85% granulirane zgure visokih

peći. Zbog visokog sadržaja zgure ima ovaj cement veću otpornost prema otopinama soli nego drugi cementi, a otporan je čak i prema slabijim kiselinama. U našoj zemlji još nije standardiziran.

Zasebne varijante portland-cementa predstavljaju *Ferrarijev cement* i *Kühlov cement*, kojima je u sirovinskoj smjesi povećan sadržaj Fe_2O_3 na račun sadržaja Al_2O_3 (dodatkom željezne rude ili piritne ogorine); to su portland-cementi s malom toplinom hidratacije (engl. low-heat cement). Smanji li se sadržaj Fe_2O_3 u sirovini ispod 0,3%, dobija se *bijeli portland cement*. Kao sirovina za bijeli cement upotrebljavaju se obično čist vapnenac i kaolin.

Od portland-cemenata prepariranih dodatkom kemikalija treba spomenuti cement nepropustan za vodu, koji se dobija tako da se klinkeru pri mljevenju dodaje 1% kalcijumskog sapuna ili stearina. U novije vrijeme sve se više primjenjuje *aerirani cement* ili cement s uvučenicim (upijenim) zrakom, koji se proizvodi tako da se klinkeru prilikom mljevenja doda precizno odmjerena količina (~0,05%) pogodnih smola ili pak tako da se u betonsku miješalicu dodaje otopina smole. Zračne pore što ih dodani agensi za aeriranje stvaraju u malteru i betonu nisu kapilarnog karaktera i nemaju ništa zajedničko s mnogo većim porama plinobetonu. Treba ih smatrati elastičnom sastojinom betona koja dijelom nadomještava pijesak i vodu i tako daje betonu naročita svojstva, osobito otpornost prema učestalim ciklusima smrzavanja i otkravlivanja i prema djelovanju soli.

Nekadnji *roman-cement*, koji se je još do Prvoga svjetskog rata proizvodio u razmjerno znatnim količinama, doduše je hidrauličko vezivo, ali nije cement u današnjem smislu, jer nije pečen do sinterovanja. Danas se slična veziva pod nazivom *hidrauličko vapno* proizvode pečenjem pogodnih lapora u komadima u vertikalnom ili kružnim pećima i mljevenjem pečnog proizvoda.

Aluminatni (boksitni) cementi proizvode se taljenjem mješavine boksita i vapnenca ili vapna u pećima plamenicama ili elektropećima. Odlikuju se vrlo visokim početnim i kasnijim čvrstoćama, razvijaju velike količine topline pri stvrđnjavanju i otporni su prema sulfatnim i ugljičnokiselim vodama. Visoka hidratacijska toplina koju aluminatni cement razvija pri stvrđnjavanju čini ga pogodnim za betoniranje na niskim temperaturama. Poraste li temperatura okoline iznad 30 °C, opada postignuta čvrstoća betona izrađenog od aluminatnog cementa; zbog toga se ovaj cement pri betoniranju za toplijeg vremena i pri betoniranju masovnih objekata može upotrijebiti samo uz naročite mjere opreza. Aluminatni cementi upotrebljavaju se u posljednje vrijeme sve više kao vezivo za vatrostan beton. Pomiješani s portland-cementom, metalurškim cementima ili vapnom daju brzovezujuće cemente slabije mehaničke otpornosti.

Fabrikacija portland-cementa. Proizvodnja cementa standardnih osobina, naročito cemenata visokih mehaničkih otpornosti, osniva se na uspostavljanju i održavanju usko ograničenih količinskih odnosa između kiselih i baznih sastojaka sirovine, brižljivo finog mljevenja i miješanja sirovina, i pečenja tako pripravljene smjese do sinterovanja, tj. do početnog taljenja, na temperaturi 1400...1450 °C. Time se sve vapno u smjesi kemijski veže s oksidima silicijuma, aluminijuma i željeza, te nastaje tvrd, kamenit produkt, cementni klinker, koji već ima osnovna svojstva cementa.

Bazna je komponenta sirovinske mješavine za proizvodnju portland-cementa vapnenac, a kisela komponenta je glina ili kvarciti pijesak. Vrlo pogodnu sirovinu za cement predstavljaju lapori (laporci, tupine) koji su prirodne smjese vapnenca i gline s različitim sadržajem $CaCO_3$. I neki otpaci industrije kao što su zgure metalurških peći i ložišta parnih kotlova, kalcijum-karbonat koji otpada u fabricaciji sode i sl. upotrebljavaju se kao sirovine za pečenje portland-klinkera. Sadrovac (gips) i anhidrit prženi s dodatkom gline daju sumpor-dioksid koji se prerađuje na sumpornu kiselinu, a kao nusprodukt dobiva se portland-klinker.

Prirodne sirovine kopaju se na uobičajeni način, bušenjem mina i otpucavanjem, obično u otvorenim kamenolomima ili gliništu. Dobijeni materijal drobi se prije dalje prerade pogodnim drobilicama na veličinu najviše 25 mm, što omogućava mehaničku manipulaciju materijalom i grubo proporcioniranje sirovinske mješavine.

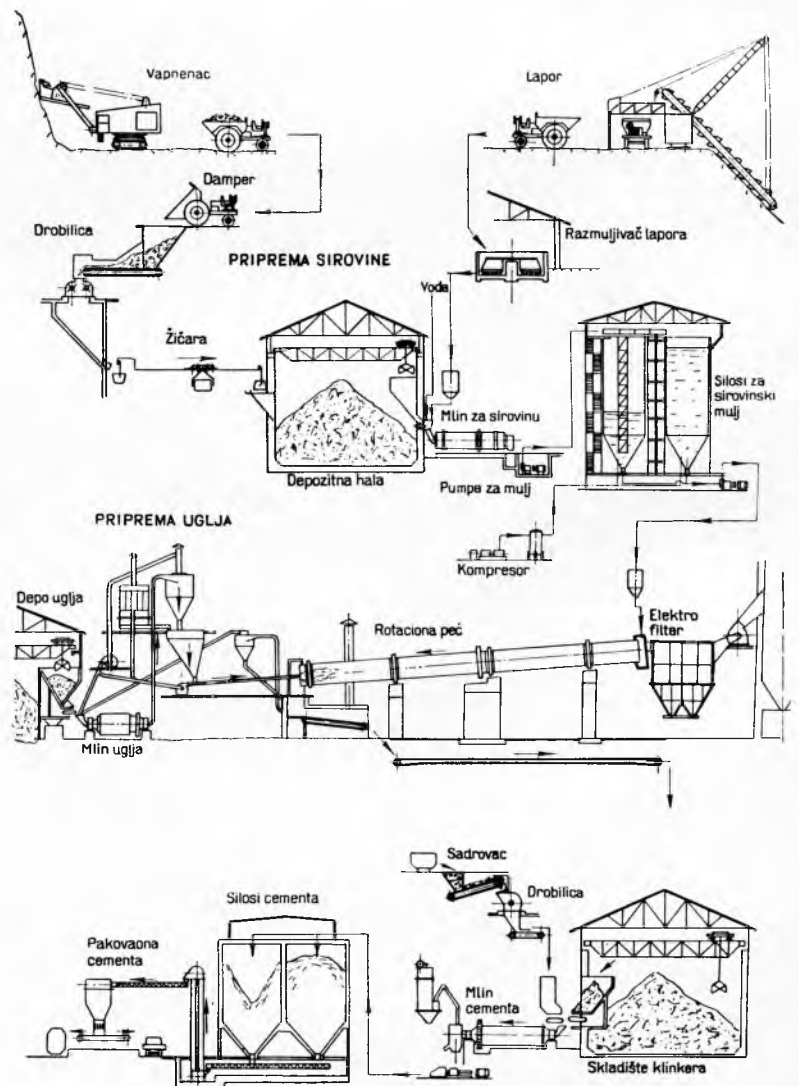
Prema načinu kako se sirovina za cement dalje prerađuje razlikuju se u tehnologiji cementa *suh* postupak i *mokri* postupak pripreme sirovina. Po suhom postupku drobljena se sirovina, da bi se mogla samljati, suši prethodno u naročitim bubnjastim sušarama pomoću vrućih plinova koji se dobijaju iz ložišta. Kad je sirovina manje vlažna, ona se suši i melje u jednom procesu time što se vrući zrak ili sagorjevni plinovi uvode u mlin. Sirovina se dodaje u mlin preciznim dozatorima tako da kemijski sastav sirovinske smjese odgovara po mogućnosti što više zahtjevanom sastavu portland-cementa. Mlinovi za sirovinu su cijevni, jednokomorni ili višekomorni; sastoje se od horizontalne rotirajuće cijevi, dugačke 6...14 m, promjera 1,5...2,5 m, obložene iznutra čeličnim oklopom. Čeličnim rešetkama cijev mlina može biti razdijeljena na 2...4 komore. Komore su do nešto ispod polovine svoje zapremnine ispunjene tijelima za mljevenje, čeličnim kuglama; one imaju u prvoj komori promjer 80...100 mm, a u narednim komorama sve manji, do 20 mm. Posljednje komore za fino mljevenje pune su najčešće čeličnim valjčićima mase 100...150 g umjesto kuglama. Obrtanjem mlina (~ 20 okr./min) tijela za mljevenje udarom i trenjem usitnjavaju materijal koji se melje; krupna sirovina koja ulazi u mlin s jednog kraja napušta ga s drugog kraja kao fino sirovinsko brašno. Osim opisanim mljevenjem u otvorenom krugu, sirovina se u novije vrijeme često usitnjava mljevenjem u zatvorenom krugu: djelomično samljeven materijal vodi se iz prve komore mlina u separator koji strujom zraka odvaja sitne čestice od krupnih. Dovoljno sitne čestice idu u silose za gotovo sirovinsko brašno, a odvojene krupnije čestice vraćaju se u mlin na dalje mljevenje (v. *Sitnjenje*). Kako su manja kolebanja u kemijskom sastavu sirovinskih komponenata neminovna, nemoguće je održati stalan sastav sirovinske smjese samo tačnim doziranjem komponenata. U modernim tvornicama sirovo se brašno zato poslije analize korigira na ispravan sastav i homogenizira. Homogenizacija sirovinskog brašna vrši se pneumatski u naročitim silosima sa dnom od šupljikavih keramičkih ploča kroz koje prolazi fino raspršen komprimirani zrak i fluidizira sirovo brašno, tj. dovodi ga u stanje u kome se ono ponaša kao tekućina (v. *Fluidizacija*).

U mokrom postupku sirovini se pri mljevenju dodaje toliko vode (35...45%) da se stvori mulj koji se može pumpati. Mlinovi za mljevenje sirovinskog mulja analogni su mlinovima za suho mljevenje. Pri mljevenju u zatvorenom krugu sitne se čestice od krupnih odvajaju klasifikatorima ili hidroseparatorima. Mulj s dovoljno usitnjenom sirovinskom smjesom sprema se u bazen ili u silose, a miješa se pomoću komprimiranog zraka ili okretne miješalice. Pri mokrom mljevenju troši se na jedinicu produkta manje energije nego pri suhom, a uređaji za transport i miješanje-homogenizaciju mulja zahtijevaju manje investicija nego uređaji za homogenizaciju brašna, ali se u mokrom postupku troši znatno više goriva za pečenje, zbog toga što treba ispariti veće količine vode iz sirovine. Oba postupka su danas s obzirom na kvalitet dobivenog cementnog klinkera jednakovrijedna; od sadržaja prirodne vlage sirovina zavisi koji će postupak biti ekonomičniji.

Sirovinsko brašno ili mulj, nakon homogeniziranja i korekture kemijskog sastava, odvodi se na pečenje. Pečenje je u tehnološkom i ekonomskom pogledu najosjetljivija faza proizvodnje. Svrha je pečenja da se pomoću visoke temperature sagorjelih plinova razmekša (sinteruje) sirovinska smjesa, kako bi u toj napola tekućoj materiji pojedine njezine čestice mogle međusobno reagirati, tj. stvarati nove kemijske spojeve koji će cementu dati svojstva veziva. Kemijske promjene zbivaju se postepeno u pojedinim dijelovima peći, prema temperaturama koje tu vladaju. Na temperaturi 100...200 °C smjesa gubi vlagu. Nešto iznad te temperature gubi se voda koja je kemijski vezana u glini. Ove se promjene

zbivaju u gornjem dijelu peći, gdje ulazi sirovina, u *zoni sušenja*. Kad se sirovina, spuštajući se u peći naniže, dalje zagrije na 500...1000 °C, raspada se (disocira) najprije $MgCO_3$ na MgO i CO_2 , a zatim $CaCO_3$ na CaO i CO_2 . To se zbiva u *zoni kalcinacije*. Pojavom slobodnog CaO stvoren je prvi uslov za stvaranje klinkera, jer se bazni CaO na visokoj temperaturi od ~ 1450 °C, u narednoj nižoj *zoni sinterovanja*, u razmekšanoj masi spaja s kiselim SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 i stvara spojeve, tzv. klinkerske minerale, koji karakteriziraju cement. Procesi sušenja sirovine i disocijacije su endotermni procesi, tj. oni troše ili vežu termičku energiju; procesi spajanja CaO s kiselim oksidima su egzotermni: oni oslobađaju termičku energiju i podižu temperaturu mase u peći.

Danas se za pečenje cementnog klinkera upotrebljavaju dvije vrste peći: automatska vertikalna peć i rotirna peć. Vertikalna peć je vatrostalnom oblogom ozidano okno dubine 8...10 m i promjera 2,5...3 m, u koje se na gornjem kraju mehanički ubacuje briketirana ili granulirana mješavina sirovine i doziranog goriva: sitnog antracita ili koksa. Na dnu peći nalazi se okretni roštilj, koji polagano se pomičući ispušta klinker iz peći. Ispust peći opremljen je pregradama sa zaklopcima koji se naizmjenično otvaraju, da se pri ispuštanju klinkera ne bi gubio zrak za izgaranje. Zrak se pod pritiskom utiskuje u peć ispod roštilja; hladeci klinker, zrak se zagrije i dolazi u najnižu zonu peći, *zonu gorenja*, visoko predgrijan. Peć radi kontinuirano: briketi sirovine s gorivom neprekidno se ubacuju u peć i klinker se isto tako neprekidno ispušta. Učinak takvih peći sa savremenom opremom iznosi 120...200 t klinkera za 24 sata uz potrošnju od 1000...1200 kcal



Sl. 1. Shema proizvodnje cementa mokrim postupkom

za kilogram klinkera. Ohlađeni klinker prenosi se iz peći pogodnim transporterima u spremište-halu.

Drugi, više primjenjivan tip peći je rotirna peć. To je 30...160 m duga cijev promjera 2...5 m napravljena od čeličnog lima, obložena iznutra vatrostalnom oblogom i postavljena pod blagim nagibom. Peć se polako obrće ($1 \dots 1\frac{1}{2}$ okr./min), pa se šarža u njoj pomiče jednoliko od gornjeg kraja peći prema donjem, gdje izlazi klinker. Nasuprot sirovini struje usijani plinovi, koji nastaju sagorijevanjem goriva u plameniku i zoni gorenja na donjem kraju peći. Temperatura u peći raste prema tome od gornjeg, ulaznog kraja peći nadolje, tako da se sirovina postepeno sve više zagrijava, pa na donjem kraju klinker koji napušta peć ima temperaturu iznad 1000 °C. Da bi se klinker brzo i dobro ohladio i da bi se iskoristila u njemu nagomilana toplota, priključen je uz rotirnu peć hladnjak kao dio ili neposredni nastavak peći. U hladnjaku zrak struji oko klinkera i hladi ga, a tako predgrijan zrak usisava se u peć, gdje podržava gorenje. Naglo hlađenje utiče pozitivno na kvalitet klinkera odn. cementa. Kao gorivo u rotirnim pećima služi najčešće fino samljeveni ugljeni prah, a upotrebljava se i loživo ulje, mazut ili zemni plin, gdje su ova goriva jeftinija. Kad se upotrebljava ugajl, njega treba pripremiti, tj. osušiti i samljeti analogno kao i sirovinu. Ventilator na donjem kraju peći udvava u nju kroz sapnicu-plamenik ugljeni prah izmiješan sa zrakom. Na gornjem kraju rotirne peći, gdje ulazi sirovina, ugrađeni su ili dograđeni često ekonomajzeri ili izmjenjivači topline raznih tipova, kojima je svrha da oduzmu znatne količine topline od otpadnih plinova iz peći i da tu toplinu iskoriste za sušenje i predgriavanje sirovine. Postoje i izvedbe u kojima se otpadna toplota peći iskoristava za grijanje parnog kotla termocentrale. Moderne rotirne peći troše 800...1250 kcal/kg klinkera sa sirovinom pripremljenom suhim postupkom a 1250...1600 kcal/kg sa sirovinom pripremljenom mokrim postupkom. Učinak rotirnih peći zavisi od njihove veličine i kreće se od 100 do 2500 t klinkera za 24 sata.

Klinker iz spremišta transportira se obično mosnom dizalicom u mlin. Usitnjavanje klinkera podijeljeno je, kao i sitnjenje sirovine, na drobljenje, mrvljenje i fino, završno mljevenje, a mlinovali koji se za to upotrebljavaju uglavnom su jednaki mlinovima za mljevenje sirovina.

Prilikom mljevenja dodaje se klinkeru 2...5% sadrovca (sirovog gipsa), da bi se usporilo vezivanje cementa. Bez tog dodatka cement bi vezao dodanu vodu za nekoliko minuta i ne bi bio sposoban za upotrebu. I ostali eventualni dodaci cementu, kao zgura, pucolani i dr., dodaju se klinkeru ispred mlina, da se zajedno s njima melju, a doziraju se pomoću dodavača koji njihov

ili kamionima; takav način otpreme traži odgovarajuću organizaciju gradilišta sa prihvatnim silosima za preuzimanje cementa u rasutom stanju, ili pak fabriku svježeg betona s njegovim razvojom za potrebe izvjesnog područja.

Osim toplotne energije proizvodnja cementa zahtijeva i znatne količine mehaničke energije za pokretanje različitih mahom teških strojeva i za unutarnji transport. Najveći dio mehaničke energije troši se na usitnjavanje. Potreba mehaničke energije za tvornicu s vertikalnim pećima iznosi 60...80 kWh po toni cementa. Tvornica s rotirnim pećima troši 80...130 kWh po toni cementa.

Moderne tvornice cementa u znatnoj su mjeri automatizirane. U USA postoji nekoliko tvornica u kojima je pomoću elektroničkog računala ostvarena potpuna automatizacija procesa miješanja sirovina i procesa pečenja u rotirnoj peći.

Sastav portland cementa. Sirovinska smjesa za portland-cement sastavlja se tako da se postigne molekularno zasićenje kiselih sastojaka (SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3) vapnom (CaO), a da pri tom u klinkeru ne preostane slobodni, kemijski nevezani CaO , koji bi štetno utjecao na gotov produkt. Maksimalni mogući sadržaj CaO u sirovini ili cementu računa se iz podataka kemijske analize po formuli za »stepen zasićenja vapnom«, koju propisuje naš standard za cement:

$$\frac{100 \text{ CaO}\%}{2,8 \text{ SiO}_2\% + 1,2 \text{ Al}_2\text{O}_3\% + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3\%} \leq 100.$$

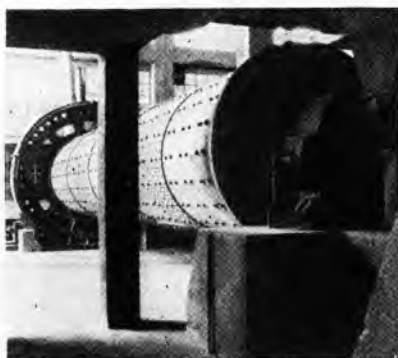
Stepen zasićenja 100 u portland-klinkeru odn. cementu označuje gornju granicu preko koje sadržaj CaO ne smije preći, jer višak CaO nema čime da se kemijski veže i ostao bi kao slobodno vapno. Stepenn zasićenja naših portland-cemenata obično iznosi 90...95. Dodaci zgure ili pucolana klinkeru snižavaju stepen zasićenja cementa.

U tehnološkoj praksi upotrebljavaju se još neki iskustveni kvocijenti, tzv. moduli. *Hidraulički modul* je omjer procenata $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$, *silikatni modul* je omjer $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$, a *aluminatni modul* je omjer $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$. Ovi moduli nemaju nikakve naučne osnove i služe za praktičnu ocjenu sirovine u pogledu sposobnosti za pečenje.

Mineraloško-petrografska struktura portland-klinkera, odnosno struktura klinkerskih minerala, kemijskih spojeva koja karakteriziraju portland-cement, danas je velikim dijelom istražena i poznata. U tabl. 1 navedeni su glavni spojevi koji se mogu u klinkeru portland-cementa dokazati polarizacionim mikroskopom i rendgenografskim postupcima.

Tablica 1
KLINKERSKI MINERALI

Spoj	Skraćena oznaka	Cementnotehnička svojstva
Trikalcijum-silikat $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	brzo stvrdnjavanje, velika toplotna hidratacije
Dikalcijum-silikat $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	polagano, postepeno stvrdnjavanje, niska toplotna hidratacije
Trikalcijum-aluminat $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	brzo početno stvrdnjavanje, velika toplotna hidratacije
$5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	$\left. \begin{matrix} \text{C}_4\text{A}_3 \\ \text{C}_{12}\text{A}_7 \end{matrix} \right\}$	osjetljivi na sulfatne vode, povisuju stezanje (kontrakciju); u većim količinama izazivaju brzo vezivanje
Brownmillerit $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	polagano stvrdnjavanje, otpornost prema sulfatima veća nego gore navedenih aluminata
Slobodan kalcijum-oksidi CaO		u manjoj količini neškodljiv, u većjoj količini uzrokuje bujanje (ekspanziju) i brzo vezivanje
Slobodan magnezijum-oksidi MgO		u većjoj količini uzrokuje bujanje



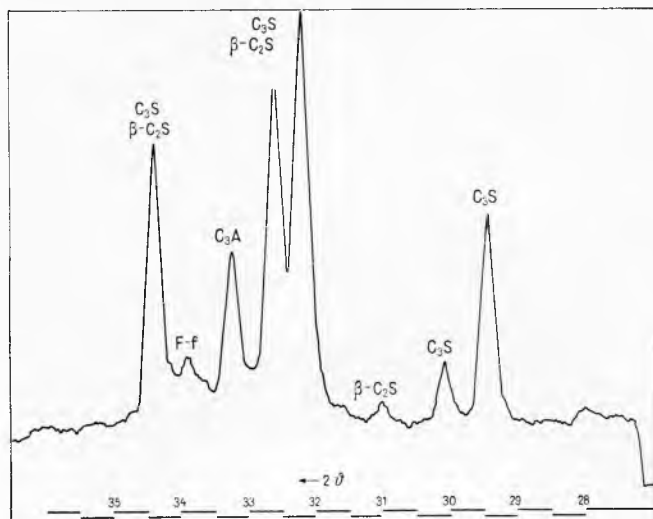
Sl. 2. Mlin cementa («Partizan», Kaštel Sućurac)

udio u cementu održavaju konstantnim. Finoća meljave kontrolira se standardnim sitima sa 900, 4900 i 10 000 otvora po kvadratnom centimetru. Obični ili normalni portland-cement melje se na 8...12% ostatka na situ sa 4900 otv./cm², a portland-cementi visoke početne čvrstoće (supercementi) na 1...5% ostatka na istom situ.

Poslije mljevenja cement se sprema u silose, odakle se uzima za pakovanje i otpremu. Cement se danas pakuje isključivo u papirne vreće. U industrijskim zemljama cement se sve više otprema u rasutom stanju, u naročitim kontejnerima, željeznicom

Mineraloški sastav cementnog klinkera danas se može odrediti na više načina. Jedna od najpouzdanijih metoda za to je rendgenska difrakcija. Sl. 3 prikazuje rendgenogram portland-klinkera u karakterističnom intervalu Braggovih kutova (2θ) 28...35°. Prema položaju i intenzitetu difrakcijskih maksimuma može se kvalitativno i kvantitativno odrediti mineraloški sastav klinkera.

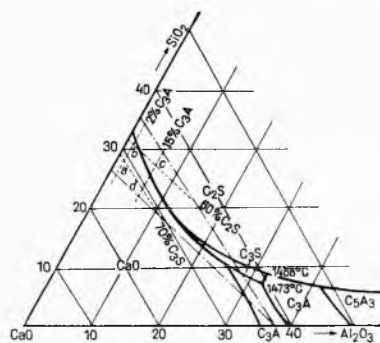
Evropski standardi za cement još ne propisuju količinske odnose klinkerskih minerala u cementu, no američki standard za cement (ASTM) već tačno ograničava sadržaj tih spojeva za pojedine tipove cementa. Tako cement otporan protiv korozije



Sl. 3. Rendgenogram portlandcementnog klinkera

sulfata smije imati najviše 50% C_3S , a za cement male hidratacione topline propisuje se da smije imati najviše 35% C_3S , najmanje 40% C_2S i samo 5% C_3A . Cement velike početne čvrstoće može sadržavati do 15% C_3A .

Sl. 4 prikazuje onaj dio dijagrama faznih ravnoteža u ternarnom sistemu $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ (Rankinova dijagrama) u kojemu se nalaze područja klinkerskih minerala. Ako se za mineraloški sastav portland-cementa utvrde ove (razmjerno široke) granice: maksimalno 60% C_2S , maksimalno 70% C_3S i od 2 do 15% C_3A , dobije se kao područje portland-cementa u Rankinovu dijagramu četverokut $abcd$. Kako taj četverokut leži sav unutar trokuta $C_2S-C_3S-C_3A$, dikalcijum-silikat, trikalcijum-silikat i trikalcijum-aluminat su jedini spojevi koji se u čvrstom stanju nalaze u smjesi dobivenoj potpunom ili djelomičnom kristalizacijom iz taline sastava prikazanog nekom tačkom unutar četverokuta $abcd$ — ako je postignuta ravnoteža. U praktičnoj proizvodnji sirovinška smjesa prolazi kroz peć tolikom brzinom da se ravnoteža ne može postići, a pored navedena tri oksida prisutni su u njoj i drugi (Fe_2O_3 , MgO itd.), pa je sastav klinkera različit od ravnotežnog, koji bi se mogao izračunati iz Rankinova dijagrama. Ipak se iz tog dijagrama razabira važnost tačne kontrole sastava sirovinške smjese. Npr., ako bi figurativna tačka sastava smjese pala izvan trokuta $C_2S-C_3S-C_3A$, nikakvim se



Sl. 4. Klinkerski minerali u Rankinovu dijagramu

postupkom pečenja i hlađenja klinkera ne bi moglo spriječiti da u produktu ostane slobodan CaO , odnosno, da se u njemu pojave nepoželjni spojevi C_5A_3 ili $C_{12}A_7$.

Standardne osobine cementa. *Veživanje i stvrdnjavanje.* U cementnoj pasti, smjesi cementa i vode, čestice cementa pri-

maju i vežu vodu — hidratiziraju se — i pasta se konačno skrutne. Sastav hidratiziranih spojeva portland-cementa, tj. spojeva koji su vezali jednu ili više molekula vode, samo je donekle poznat, a o fizičkim silama koje dovode do skrućivanja cementne paste ne postoji još jedinstveno shvaćanje. Još krajem prošlog stoljeća postavljene su dvije oprečne teorije o skrućivanju cementa. Kristalna teorija Le Chateliera tumači skrućivanje i stvrdnjavanje cementa kao posljedicu stvaranja i rasta isprepletenih igličastih kristala hidratiziranih spojeva koji su iskristalizirali iz prezasićene otopine cementa u vodi, analogno procesu skrućivanja gipsa. Koloidna ili gel-teorija Michaelisa smatra skrućivanje cementa posljedicom koloidno-kemijskih procesa, sličnih procesima stvrdnjavanja organskih i neorganskih koloida, kao npr. tutkala ili koloidnog kremenca, kalcedona ili ahata. Koloidnu prirodu novonastalih hidratiziranih spojeva potvrđuju promjene koje se pojavljuju na stvrdnutoj cementnoj pasti pri sušenju (kontrakcija), vlaženju (ekspanzija) i opterećivanju u vlažnom stanju (plastično pužanje). Danas se smatra da je uzrok stvrdnjavanja cementa čvrsto vezanje vode kako u spojevima koji kristaliziraju iz otopine tako i u spojevima koji kao gel nastaju na površini neotopljenih cementnih čestica. Fino raspodijeljena voda stvara dijelom pseudo-čvrsto stanje kao u isušenoj glini, a dijelom ulazi u kristalnu rešetku molekula spojeva i prelazi u čvrst oblik. Uslijed svog kemijskog vezanja voda se ne isparuje iz skrućene cementne paste ni na temperaturi do 100 °C.

Skrućivanje cementne paste u prvim satima poslije dodavanja vode naziva se *veživanje*, kasnije reagiranje cementa i vode zove se *stvrdnjavanje*. Kao početak vezivanja označuju svi svjetski

standardi vrijeme koje je proteklo od momenta kad je dodata sva voda cementu do momenta kad cementna pasta prvi put pokazuje otpor prodiranju Vicatove igle (sl. 5), tj. kad igla prvi put ne prođe kroz pastu do podloge. Kraj vezivanja je vrijeme proteklo od dodavanja vode do momenta kad Vicatova igla ne ostavlja traga na stvrdnutoj pasti. Svi standardni cementi vežu vodu sporo, što se naziva »normalnim« vezivanjem. Minimalno vrijeme početka vezivanja po jugoslavenskom standardu iznosi 1½ sata, a veživanje treba da se završi najkasnije za 10 sati. Cementi koji brzo vežu vodu nisu standardni i ne smiju se brkati s cementima koji brzo stvrdnjavaju (kao npr. PC 350 i PC 450), ali vežu vodu normalno. Kad se cement primjenjuje u praksi, pojavljuju se drukčiji počeci i krajevi vezivanja nego pri određivanju po standardu, jer je proces veživanja uvelike zavisao od vodocementnog faktora i temperature. Porast vodocementnog faktora usporava veživanje i stvrdnjavanje, a porast temperature znatno ubrzava veživanje i početno stvrdnjavanje. Konačno postignute mehaničke otpornosti nakon ubrzanog stvrdnjavanja manje su nego nakon sporijeg stvrdnjavanja.

Toplina hidratacije. Stvrdnjavanje cementa ili hidratacija je egzoterman proces u kojemu se oslobađaju znatne količine topline. Ukupna količina topline koja se oslobađa poslije potpune hidratacije cementa zavisi od vrste i procenta klinkerskih minerala koji sačinjavaju cement. Veliku toplinu hidratacije imaju cementi s većim sadržajem Al_2O_3 , a osobito malu imaju cementi u kojima Fe_2O_3 zamjenjuje veći dio Al_2O_3 , a silikatni i aluminatni moduli su im niski. Brzina oslobađanja topline hidratacije zavisi od sastava i finoće mljevenja cementa, od temperature, od dodatka vode i drugih uslova rada, tako da se količine topline koje se oslobađaju u određenim vremenskim intervalima mogu odrediti samo u laboratorijskim uslovima za pojedini cement, i to ili izravno, mjerenjem u potpuno izoliranom adijabatskom kalorimetru, ili posredno, iz razlike nađenih toplina otapanja nehidratiziranog i hidratiziranog cementa u kiselinama (HNO_3 , HF , HCl). Za određivanje brzine oslobađanja topline hidratacije ne postoje još standardni postupci. Općenito se računa da se hidratacijom portland-cementa oslobađa za 3 dana 41·90 cal/g, za 7 dana 46·97 cal/g, za 28 dana 61·109 cal/g, za 90 dana 72·114 cal/g, za 180



Sl. 5. Vicatova igla

dana 74...116 cal/g. Toplinu hidratacije oslobađaju brzo cementi s većim početnim mehaničkim otpornostima, a naročito aluminatni (boksitni) cementi. Oslobađanje topline dovodi do samozagrijavanja maltera ili betona i do visokih temperatura, koje ometaju proces stvrdnjavanja kad je sadržaj cementa u betonu velik i/ili vrijednost njegove topline hidratacije visoka, a toplina se sporo odvodi.

Stalnost zapremine. Različiti uzroci mogu utjecati na cemente tako da ovi pri stvrdnjavanju mijenjaju svoju zapreminu. Spomenuto je već da slobodno vapno, koje se u cementu može pojaviti uslijed neispravno sastavljene i pripremljene sirovinke smjese ili uslijed nedovoljno visoke temperature pečenja klinkera, može izazvati bujanje, tzv. *vapneno bujanje*. Rast kristala hidrata vapna izaziva naprezanja u betonu uslijed kojih mogu u konstrukciji nastati pukotine. Vapneno bujanje cementa određuje se prema našem standardu kuhanjem i posmatranjem stvrdnutog kolačića od cementne paste, a po Le Chatelieru kuhanjem malih cilindara od cementne paste u limenom kalupu i mjerenjem širenja kalupa. U nekim zemljama određuje se stalnost zapremine tako da se stvrdnuti uzorak cementne paste kuha u autoklavu i mjeri porast volumena. *Magnezijsko bujanje*, koje može nastati uslijed kristalizacije većih količina MgO u cementu, može se ustanoviti samo probom u autoklavu, no mogućnost pojave ove vrste bujanja isključena je time što standard ograničava sadržaj MgO u klinkeru na najviše 5%. Slično je i sa *sadrenim bujanjem*, koje se pojavljuje ako cement sadrži suviše velike količine sulfata, a ne pojavljuje se ako se održava propis standarda da sadržaj SO_3 u cementu ne smije preći određeni maksimum. Sirovi sadrovac $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ dodaje se cementu, kako je ranije navedeno, radi reguliranja vremena vezivanja. Sulfati mogu doći u cement i iz goriva (uglja) za vrijeme pečenja. Ako sadržaj sulfata u cementu pređe izvjesnu graničnu vrijednost (3,5% u portland-cementu i 4,5% u metalurškim cementima), postoji opasnost da će volumen stvrdnutog cementa jako porasti, što može izazvati raspadanje maltera ili betona. Pečeni gips ne smije se dodavati portland-cementu u toku njegove prerade, a isto tako ni supersulfatni cement. Supersulfatni cement, koji se po sastavu razlikuje od portland-cementa, i pored visokog sadržaja SO_3 ne pokazuje sadreno bujanje. I aluminatni cementi su imuni prema sadrenom bujanju. Agregati za malter ili beton ne smiju sadržavati više od 1% SO_3 , što odgovara sadržaju od 2,15% prirodnog sadrovca. Sadreno bujanje izazivaju u stvrdnutom cementu na građevinskim objektima i vode koje sadrže sulfatne soli. Promjenu zapremine izaziva u tom slučaju nastali kalcijum-sulfat-aluminat-hidrat ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), čiji su štipačasti kristali raspoređeni u obliku ježa; u starijoj se literaturi ta sol ponekad naziva »cementnim bacilom«. Tek je nedavno, čini se, uspjelo ostvariti u praksi ideju da se iskorištavanjem kontroliranog sadrenog bujanja proizvede »ekspanzivni cement«, kao neka vrsta »prednapregnutog cementa«; problem je da se postigne strogo ograničena ekspanzija, bez naknadne kontrakcije pri sušenju.

Alkalije koje se nalaze u cementima, a potječu iz sirovine ili iz goriva, mogu također pri određenim uslovima izazvati bujanje ako njihov sadržaj u cementu pređe neku granicu. *Alkalno bujanje* razlikuje se od ranije pomenutih vrsta bujanja time što u tom slučaju nije nosilac pojava bujanja sam cement, već ono nastaje uslijed reakcije alkalija iz cementa s agregatima. Kako iskustvo pokazuje, alkalije ne izazivaju bujanje u cementnoj pasti ili u betonu s neosjetljivim agregatom, čak ni kad se nalaze u cementu. Alkalno bujanje betona otkriveno je tek odskora, a pojavljuje se kad se upotrebljavaju izvjesni silikatni agregati, osobito oni koji imaju opalski karakter. No opaženo je da i neke bjelutke, pa i neke magnezijum-silikatne agregate mogu napadati cementi s visokim sadržajem alkalija. Uslijed reakcije alkalija iz cementa s reaktivnim silikatima agregata nastaju alkalni silikati, koji se izlučuju iz betona kao gela masa. Osmotske sile koje se pri tom procesu pojavljuju mogu razviti toliki pritisak da se razara struktura cementa, što može konačno izazvati raspadanje betona. Opsežnim istraživanjima cementa i agregata ustanovljeno je da cementi čiji ukupni sadržaj alkalija, izraženih kao Na_2O , ne premašuje 0,5% ne izazivaju alkalno bujanje ni s osjetljivim agregatima. Alkalno bujanje može se spriječiti, kad nije moguće izbjeći upotrebu agregata osjetljivih na alkalije, primjenom cementa s dodatkom pucolana, koji sadržava

amorfni SiO_2 , ili primjenom metalurških cementa, koji — prema ispitivanjima — ne izazivaju alkalno bujanje čak ni onda kada i klinker i zgura od kojih je cement načinjen imaju visok sadržaj alkalija.

Promjene dimenzija koje nastaju kvašenjem i sušenjem stvrdnutog betona nemaju ništa zajedničko s pojavama bujanja. Te promjene nastaju ulaženjem vode u kapilare betona, što izaziva porast volumena, ili izlaženjem vode iz kapilara, što izaziva skupljanje ili kontrakciju betona. Porast volumena i skupljanje cementne paste, maltera ili betona određuje se na standardiziranim gredicama sa čvrstim metalnim reperima, pomoću osjetljivog mikrometra. Mršavi ili posni malteri i betoni manje se skupljaju nego malteri i betoni s većim sadržajem cementa, a i manji dodatak vode smanjuje skupljanje. Naprsline koje nastaju na žbukama često su izazvane naglim sušenjem žbuke ili jačom kontrakcijom zida ispod njih.

Finoća meljave. Reagiranje cementa s vodom i njegovo stvrdnjavanje zavise od veličine unutarnje površine cementnih čestica. Što je ta površina veća, tj. što je cement finije mljeven, to će on biti aktivniji i reakcija s vodom intenzivnija. Naš standard za cement propisuje minimalnu finoću portland-cementa sa 15% ostatka na situ od 0,09 mm otvora okaca (4900 okaca/cm^2), ali cementi koji se proizvode mahom su finije mljeveni od toga. Različiti kvaliteti portland-cementa postižu se uglavnom različitim finoćama meljave, no finoća meljave ima svoje ekonomične i tehnološke granice. Finije mljeveni cementi su izdašniji, stvrdnjavaju brže, tj. brže postižu visoke mehaničke otpornosti, ali razvijaju brže i svoju toplinu hidratacije, pa stoga zahtijevaju veću obazrivost u primjeni. Suviše fino mljeveni cementi više su skloni izazivanju skupljanja ili stezanja betona, osjetljiviji su prema višku dodatka vode i prema djelovanju agresivnih voda.

Ispitivanje finoće meljave prosijavanjem kroz standardna sita jednostavno je i brzo, ali nedovoljno, jer se time određuje samo ostatak na situ, tj. količina najgrubljih i najmanje aktivnih čestica, veličine iznad $90 \mu\text{m}$, a uopće se ne vodi računa o finijim i najfinijim česticama, koje zapravo uslovljavaju aktivnost cementa. Naš novi standard, kao i standardi nekih drugih zemalja, određuje da se pored uobičajenog ispitivanja prosijavanjem provede određivanje utjecaja finijih čestica na kvalitet cementa, pa čak i procentne raspodjele veličina tih čestica u cementu. To se prilično dobro postiže određivanjem specifične površine cementa, tj. ukupne površine svih čestica koje sadrži jedan gram cementa. Zasad se najčešće upotrebljavaju dva načina određivanja specifične površine: po Blaineu i po Wagneru. Po Blaineu se specifična površina računa iz izmjerene brzine prolaza zraka kroz briketiran uzorak cementa u Blaineovu permeabilmetru. Broj i veličina pora koje propuštaju zrak kroz briket zavisi su od veličine čestica cementa. Po Wagneru određuje se specifična površina cementa turbidimetrom, mjerenjem promjene intenziteta svjetla koje prolazi kroz suspenziju cementa u petroleju za vrijeme dok cement sedimentira.

Naš standard propisuje metod po Blaineu i zahtijeva kao minimalnu specifičnu površinu za običan portland-cement srednjeg kvaliteta $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$, a za cimente visoke mehaničke otpornosti $3250 \text{ cm}^2/\text{g}$. Dobro pečeni cementi sa 2...10% ostatka na situ sa 4900 ok./cm^2 imaju obično specifičnu površinu $4300\text{--}2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ po Blaineu; a kad se ostatak na istom situ smanji na 1...2%, specifična površina se povećava na $5300\text{--}4300 \text{ cm}^2/\text{g}$. Specifična površina dobar je pokazatelj kvaliteta cementa samo kad je klinker ispravno pečen. Nedovoljno pečeni klinkeri lakše se melju i daju veliku specifičnu površinu, ali mehaničke otpornosti dobivenog cementa slabije su nego dobro pečeno cementa, makar ovaj imao i manju specifičnu površinu. Brojčana vrijednost specifične površine danog cementa manja je kad je određena po Wagneru nego kad je određena po Blaineu.

Mehaničke otpornosti, tj. čvrstoća ili jačina cementa, najvažnije su oznake kvaliteta cementa. Zbog toga kvalitetne klase cementa u našem standardu nose kao svoju brojčanu oznaku otpornost na pritisak standardnog maltera poslije 28-dnevnog ležanja u vodi. Mehanička otpornost ispituje se na prizmama od standardnog maltera, dužine bridova $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. Standardni malter je mješavina cementa i standardnog pijeska u omjeru 1:3 sa dodatkom $\sim 11\%$ vode. Naš standardni pijesak je prirodni kvarcni pijesak iz okoline Tuzle, opran, osušen i prosijan. Sa stoji se od jednakih dijelova triju frakcija: 0...0,5, 0,5...1,0 i

1,0–2,0 mm. Određena količina standardnog maltera nabija se u kalupe pomoću standardnog nabijača. Poslije stvrdnjavanja kroz 24 sata u vlažnom prostoru prizme se vade iz kalupa i stavljaju u pijaču vodu od 20 °C. One se ispituju obično poslije 3, 7 i 28 dana otkako su načinjene. Najprije se ispituje otpornost na savijanje prizme, a dva dijela prizme koji ostaju poslije preloma ispituju se na otpornost na pritisak. Mehaničke otpornosti izražavaju se u kp/cm^2 . Mehaničke otpornosti dobivene s plastičnim standardnim malterom, prema novom standardu za cement, bolje odgovaraju otpornostima koje se postižu običnim armiranim betonom na gradilištu nego otpornosti dobivene s ranijim zemno-suhim malterom po starim normama za cement iz godine 1931. Otpornost na pritisak plastičnog betona sa 300 kg/m^3 cementa nakon 28 dana odgovara približno otpornosti na pritisak standardnog maltera nakon 7 dana. Minimalne mehaničke otpornosti koje treba da postignu portland-cementi i njima odgovarajući cementi s dodatkom zgre ili pucolana, metalurški i pucolanski cementi, jesu ove (u kp/cm^2):

Naziv portland-cementa	Poslije 3 dana		Poslije 7 dana		Poslije 28 dana	
	čvrstoća na		čvrstoća na		čvrstoća na	
	savijanje	pritisak	savijanje	pritisak	savijanje	pritisak
PC-250	—	—	30	160	45	250
PC-350	—	—	40	250	55	350
PC-450	35	250	45	350	60	450

Minimalne otpornosti i drugi zahtjevi kvaliteta cementa jugoslovenskog standarda podudaraju se sa zahtjevima drugih novih svjetskih standarda za cement.

LIT.: A. Rehnicker, Tehnologija cementa, Beograd 1948. — R. F. Blanks, H. L. Kennedy, The technology of cement and concrete, New York 1955. — F. M. Lea, The chemistry of cement and concrete, London 1956. — I. Ahrends, W. Cieslinski, Tehnologija cementa, Warszawa 1956. — H. Kühl, Zement-Chemie, Bd. I, II, III, Berlin 1958. — A. Lebl, Beočinska kaja, Novi Sad 1959. — Jugoslavenski standardi. Klasifikacija i uslovi kvaliteta cementa proizvedenih od portland-cementnog klinkera, JUS B. C. 1.011, III-1963, Aluminatni cementi, JUS B. C. 1.015, III-1963. — H. Kühl, Der Baustoff Zement, Berlin 1963. — H. E. W. Taylor, The chemistry of cements, New York 1964. *Đ. Dreksler*

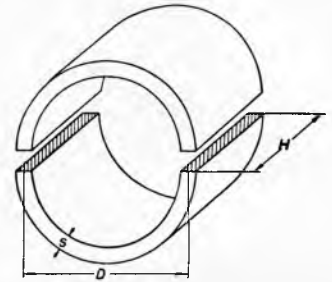
CENTRIFUGIRANJE, operacija procesne tehnike koja se koristi centrifugalnom silom za razdvajanje sastojina heterogenih mješavina čvrstih i tekućih tvari ili tekućih tvari različitih specifičnih težina, a uz upotrebu aparata zvanih *centrifuge*. (Operacije za razdvajanje sastojina smjesa centrifugalnom silom u drugim aparatima, kao što su npr. cikloni, nisu obuhvaćene pojmom centrifugiranja.) Centrifuge se upotrebljavaju, osim u procesnim industrijama (kemijskoj, prehrambenoj i sl.) u vrlo velikoj mjeri u mljekarstvu (za odvajanje vrhnja), pri rafiniranju mineralnih i vegetabilnih ulja, također u strojarstvu (za čišćenje mazivih i drugih ulja). Za odvodnjavanje (uklanjanje glavne količine vode iz čvrstog materijala) upotrebljava se centrifugiranje u tekstilnoj industriji i pri separaciji ugljena. Iznimno se centrifugama (tzv. ultracentrifugama) mogu odvajati i molekule različite težine u homogenim tekućim i plinovitim smjesama (npr. u nuklearnoj tehnici molekule ^{235}U od molekula ^{238}U).

U industrijskim centrifugama se jedna cilindrična posuda, zvana *bubanj* centrifuge, okreće velikom brzinom oko svoje geometrijske osi; smjesa koju treba razdvojiti unosi se u tu posudu i prisiljava da se s njome zajedno okreće; u nastalom polju centrifugalne sile svaka čestica dobiva ubrzanje (akceleraciju centrifugalne sile) koje je jednako

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = 4\pi^2 n^2 r, \quad (1)$$

gdje je a_c akceleracija centrifugalne sile, v obodna brzina čestice koja se okreće na udaljenosti r od osi vrtnje, ω kutna brzina a n broj okretaja bubnja i tekućine. Iz te se jednadžbe vidi da ubrzanje centrifugalne sile raste mnogo brže (s kvadratom) sa povećanjem kutne brzine (ω odn. n) nego povećanjem polumjera r . Povećanju jednog i drugog od tih faktora postavljene su granice naprezanja u bubnju, koja također s njima rastu. Ako je H aksijalna dužina cilindričnog bubnja, D njegov srednji promjer, s debljina njegova zida, m_b njegova masa a ρ_b gustoća materijala od kojeg je napravljen, bit će $m_b = D \rho_b H s$, a centrifugalna sila izazvana njegovom masom

bit će $F_{cb} = a_c \cdot D \rho_b H s = \frac{1}{2} \omega^2 \pi \rho_b H s D^2$. Ta sila nastoji rastrgnuti bubanj nadvoje po izvodnicama cilindra, tj. djelujući na površinu $A = 2sH$ (sl. 1). Napon kojemu je izvrnut bubanj uslijed vlastite mase iznosi prema tome: $\sigma = F_{cb}/A = \frac{1}{4} \pi \rho_b \omega^2 D^2$. (2) Za razliku od centrifugalne sile, taj napon raste dakle s kvadratom i kutne brzine i promjera (odn. polumjera). Kako veći D zahtijeva deblji bubanj koji je skuplji u nabavci i pogonu, bit će općenito za postizanje veće centrifugalne sile ekonomski povoljnije povećavati brzinu okretanja nego promjer. Kako, međutim, od promjera zavisi i kapacitet centrifuge, taj će zaključak biti potrebno u specijalnim slučajevima kvalificirati.



Sl. 1. Uzb proračun napona σ u bubnju centrifuge

Postignuto se maksimalno ubrzanje u centrifugalnom polju (na zidu bubnja) često izražava uzimajući kao jedinicu akceleracije standardno ubrzanje sile teže g (ta se jedinica naziva g ; $1g = 9,80665 \text{ m/sek}^2$):

$$\frac{a_c}{g} = \frac{4\pi^2 n^2 r}{g} \approx \frac{r n^2}{900} \quad (r \text{ u m, } n \text{ u min}^{-1}), \text{ jer je } \pi^2 \approx g \text{ u m/sek}^2, \text{ a } \text{min}^{-1} = \text{sek}^{-1}/60.$$

Prema tome, da bi se dobila centrifugalna akceleracija u geovima, tj. broj koji kazuje koliko je puta ta akceleracija veća od akceleracije sile teže, treba umnožak polumjera u metrima i kvadrata broja okretanja na minutu podijeliti sa 900.

Uslijed djelovanja centrifugalne sile površina tekućine u bubnju dobiva oblik rotacijskog paraboloida, kojemu je ploha u svakoj tački okomita na smjer rezultante centrifugalne sile i sile teže (sl. 2). Budući da je u centrifugama redovito $a_c \ll g$, praktički je površina tekućine u bubnju okomita na smjer centrifugalne sile, tj. koaksijalna s bubnjem.

I na čestice dispergirane u tekućini centrifugalna sila djeluje (istovremeno i) analogno kao sila teže (obje su masene sile i tvore potencijalno polje), ali dok sila teže

ima konstantnu vrijednost i smjer, centrifugalna sila može djelovati u svim smjerovima a vrijednost joj zavisi od brzine okretanja i udaljenosti od osi okretanja te može biti i mnogo hiljada puta veća od vrijednosti sile teže. U procesnoj se tehnici centrifugiranje i primjenjuje za operacije koje se obavljaju također uz iskorištavanje sile teže, a u slučajevima kad bi djelovanje sile teže, zbog njene manje vrijednosti, bilo presporo. Te su operacije uglavnom sedimentacija (uključivši i negativnu sedimentaciju — «flocitaciju» u širem smislu — i razdvajanje emulzija u odvojene slojeve tekućina, «stratifikaciju» i filtracija. One se uz pomoć centrifugalne sile izvode u aparatima koji imaju neke zajedničke konstruktivne i pogonske karakteristike, centrifugama, ali su te operacije u fizičkom pogledu sasvim raznorodne. Razlikuje se, prema tome, *sedimentacijsko centrifugiranje* i *filtracijsko centrifugiranje*.

Teorija sedimentacijskog centrifugiranja. Sedimentacijska centrifuga sastoji se u suštini od cilindrične posude koja se brzo okreće oko svoje osi i u koju se unosi tekuća mješavina koju treba razdvojiti. U centrifugalnom polju specifički teže čestice mješavine putuju prema zidu cilindra i talože se bilo na njemu bilo na koničnim tanjurima kojima je radi skraćanja puta čestica i povećanja površine taloženja unutrašnjost cilindra po visini razdijeljena. Odvojena specifički teža komponenta mješavine na pogodan se način odvodi sa periferije, a lakša tekućina izlazi bliže osi cilindra (sl. 3).

Čestica u polju centrifugalne sile kreće se u viskoznoj sredini (nakon vrlo kratkog vremena ubrzanja) jednoliko brzinom koju postiže kad se uspostavi ravnoteža između centrifugalne sile i sile trenja koja se suprotstavlja gibanju u viskoznom mediju. Centrifugalna sila koja djeluje na česticu mase m i tolikog volumena da istiskuje masu tekućine m_1 , na udaljenosti r od osi okretanja, iznosi:

$$F_c = (m - m_1) \omega^2 r.$$

Sila trenja određena je Stokesovim zakonom:

$$F_t = 3\pi \eta D v_s,$$

gdje je η dinamički viskozitet tekućine, d promjer čestice (za koju