

Vapno - tradicionalni i suvremeni građevinski materijal

Šuran, Roža

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:013523>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Roža Šuran

**Vapno – tradicionalni i suvremeni
građevinski materijal**

Završni rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij građevine
Građevinarstvo
Građevinski materijali**

**Roža Šuran
JMBAG: 0114030341**

**Vapno – tradicionalni i suvremeni
građevinski materijal**

Završni rad

Rijeka, rujan 2020

Naziv studija: **Preddiplomski stručni studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti

Znanstvena grana: Materijali

Tema završnog rada

**VAPNO – TRADICIONALNI I SUVREMENI GRAĐEVINSKI MATERIJAL
LIME – TRADITIONAL AND CONTEMPORARY BUILDING MATERIAL**

Kandidatkinja: **ROŽA ŠURAN**

Kolegij: **GRAĐEVINSKI MATERIJALI**

Završni rad broj: **20-ST-7**

Zadatak:

U završnom radu studentica treba:

- proučiti i objasniti povijesnu ulogu vapna u građevinarstvu
- usporediti vrste vapna te usporediti njihova svojstva
- prikazati proizvodnju vapna na tradicionalan i industrijski način
- izraditi uzorke vapnenog morta s vapnom dobivenim na tradicionalan i industrijski način, ispitati čvrstoće morta
- analizirati rezultate laboratorijskih ispitivanja

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

doc. dr. sc. Silvija Mrakovčić,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Roža Šuran

U Rijeci, 16. rujna 2020.

Završni/Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta
Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 10. rujna 2020. godine

Mentor:

Zahvala:

Branku Orbaniću, dipl.ing.arh. i građevinskoj firmi Kapitel d.o.o. iz Žminja, mentorici. dr. sc. Silviji Mrakovčić i laborantu Dinu Juriševiću.

Sažetak:

Vapno je najraširenije i najpoznatije građevno vezivo koristeći se od razvoja ljudske civilizacije sve do danas. Porožan je materijal prljavo-bijele boje bez mirisa kojega nalazimo u različitim oblicima: u grumenima, prahu ili pasti. Tehnike dobivanja vapna mijenjale su se kroz stotine godina no polazni i krajnji produkt su uvijek ostali isti. Zbog relativno jednostavne proizvodnje, u povijesti je bio materijal za široku primjenu, koristeći se od graditeljstva za proizvodnju građevinskih mortova za zidanje i žbukanje, u poljoprivredi za izradu otopina za špricanje voćaka i usjeva do upotrebe u svakodnevnom životu za dezinfekciju pitke vode u bunarima te za redovito održavanje izgleda i zdravlja kućanstva. U građevinarstvu se upotrebljava živo, gašeno, hidratizirano i hidraulično vapno. Proizvodnja može biti industrijska koristeći veće, ekonomičnije i brže peći te tradicionalna kao nekada u vapnicama koristeći drvo za loženje pri čemu proces traje i do 10 dana. Danas pojavom novih materijala i unaprjeđenjem tehnologije, proizvodnja i korištenje vapna kao građevinskog materijala gotovo je pala u zaborav u svega nekoliko desetljeća. No najčešće zbog potrebe za što vjernijom obnovom i restauracijom starih građevina potreba za proizvodnjom vapna na tradicionalan način i dalje postoji.

Ključne riječi: živo vapno, gašeno vapno, vapnenac, tradicionalna i suvremena proizvodnja vapna

Abstract:

Lime was very common and most famous building binder used since the development of human civilization until today. It is a porous, off-white, odorless material that is found in various forms: in lumps, powder, or paste. Lime-making techniques have changed over hundreds of years but the starting and ending products have always remained the same. Due to its relatively simple production, it has historically been a material for wide application, used from construction in production of building mortars for masonry and plastering, in agriculture for making solutions for spraying fruit trees and crops to use in everyday life for disinfecting drinking water in wells and for regular maintenance of the appearance and health of the household. In construction we use quicklime, slaked lime, hydrated and hydraulic lime. Production can be industrial using larger, more economical and faster kilns and traditional using firewood, where the

process takes up to 10 days. Today, with the advent of new materials and advances in technology, the production and use of lime as a building material has almost fallen into oblivion in just a few decades. However, due to the need for renovation and restoration of old buildings, the need to produce lime in the traditional way still exists.

Key words: quicklime, slaked lime, limestone, traditional and industrial production of lime

Sadržaj

1.	UVOD	6
2.	POVIJEST KORIŠTENJA VAPNA	7
2.1	Općenito o vapnencu	7
2.2.	Najranije uporabe vapna u povijesti	8
2.3	Uporaba vapna tijekom prošlosti	10
2.4	Povijest vapnarstva u Hrvatskoj	11
2.5	Pogoni za proizvodnju vapna u Hrvatskoj izvan upotrebe	14
2.6	Postojeća proizvodnja vapna na tradicionalan način u Hrvatskoj.....	15
2.7	Suvremeni industrijski pogoni za proizvodnju vapna u Hrvatskoj.....	18
3.	OPĆENITO O VAPNU KAO GRAĐEVINSKOM MATERIJALU	21
3.1	Vrste vapna.....	21
3.1.1	Živo vapno	21
3.1.2	Gašeno vapno	23
3.1.3	Hidraulično vapno	24
3.1.4	Slabo reaktivna vapna	24
4	PROIZVODNJA VAPNA	26
4.1	Tradicijska proizvodnja vapna	26
4.1.1	Gradnja japlenice.....	26
4.1.2	Postupak dobivanja vapna na tradicionalan način.....	26
4.1.3	Punjenje i paljenje japlenice.....	27
4.1.4	Vađenje i gašenje živog vapna.....	31
4.1.5	Dobivanje i primjena pigmenata – farbanje s vapnom	33
4.2	Industrijska proizvodnja vapna.....	36
4.2.1	Eksploatacija mineralne sirovine	37
4.2.2	Priprema mineralne sirovine	37
4.2.3	Kalcinacija u peći	37
4.2.4	Vrste peći.....	39
4.2.5	Sitnjenje ili hidratizacija.....	41
4.2.6	Dobivanje hidrauličkog vapna	42
5.	EKSPERIMENTALNI RAD – ISPITIVANJA U LABORATORIJU	44
5.1	Materijali	44
5.2	Sastav mješavina	45
5.3	Priprema, ugradnja i njegovanje uzoraka.....	46
5.4	Laboratorijska ispitivanja svojstava vapnenog morta	48

5.4.1	Ispitivanje konzistencije rasprostiranjem – HRV EN 1015-3	48
5.4.2	Ispitivanje čvrstoće – HRV 196 – 1 2005	49
6	ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	51
6.1	Određivanje konzistencije svježeg morta.....	51
6.2	Svojna i tlačna čvrstoća očvrsnulog morta	52
7.	ZAKLJUČAK.....	54

Popis oznaka i kratica:

Popis slika

Slika 1: Tipična struktura vapnenca u kršu (iz arhive HSGI)

Slika 2: Cigla Kineskog zida povezana je vapnenim mortom (iz arhive HSGI)

Slika 3: Nezapaljena vapnenica uz cestu Jelsa – Svirače na Hvaru (iz arhive HSGI)

Slika 4: Zajednički snimak nakon izgorene klačine na Korčuli (iz arhive HSGI)

Slika 5: Izgaranje jedne od posljednjih „japlenica“ pokraj sela Peruški (iz arhive HSGI)

Slika 6 : Ostaci šestero povezanih peći u Zaluki pokraj Ozlja (iz arhive HSGI)

Slika 7: Vapnenica (japnenica) za tradicijsku proizvodnju vapna Kapitel d.o.o., Istra

Slika 8: Vapnenica za tradicijsku proizvodnju vapna Eko Ema, Karlovac (Obradović B.)

Slika 9: Suvremena proizvodnja vapna, postrojenje tvrtke GIRK Kalun d.d., Drniš (iz arhive Šibenski.hr)

Slika 10: Postrojenje ITV-a, Murexin, Istra (iz arhive Labin.com)

Slika 11: Ciklus vapna

Slika 12: Ispupčena kupola japlenice sa dimnjacima prije početka paljenja (Kapitel d.o.o.)

Slika 13: Početak paljenja japlenice (Kapitel d.o.o.)

Slika 14: Danonoćno paljenje japlenice (Kapitel d.o.o.)

Slika 15: Izgaranje japlenice (Kapitel d.o.o.)

Slika 16: Vrh japlenice pri kraju paljenja (Kapitel d.o.o.)

Slika 17: Ispitivanje pečenosti vršnog kamena (Kapitel d.o.o.)

Slika 18: Vrh japlenice na kraju paljenja (Kapitel d.o.o.)

Slika 19: Vađenje živog vapna iz japlenice (Kapitel d.o.o.)

Slika 20: Postavljanje živog vapna u kade za gašenje (Kapitel d.o.o.)

Slika 21: Ulijevanje vode na živo vapno (Kapitel d.o.o.)

Slika 22: Gašenje živog vapna u vodi prije ispuštanja u jame (Kapitel d.o.o)

Slika 23: Gašeno vapno u jami

Slika 24: Tradicionalna vapnena fasada dobivena sa pigmentima iz vrta kuće, Kanfanar (Kapitel d.o.o)

Slika 25: Prikaz izrade boja iz tri vrste zemlje (Kapitel d.o.o)

Slika 26: Unutrašnjost crkve sv. Marije na Škriljinah kraj Berma (iz arhive Central Istria)

Slika 27: Tipični proces industrijske proizvodnje vapna (ilustracija cijelog poglavlja)

Slika 28: Tri stanja zrna vapna nakon pečenja

Slika 29: Osovinska peć (iz arhive European Lime Association)

Slika 30: Rotacijska peć (iz arhive European Lime Association)

Slika 31: Peć s dvostrukim osovinama (iz arhive European Lime Association)

Slika 32: Sustav vapnenca i hidrauličkog vapna nakon kalcinacije i nakon hidratizacije

Slika 33: Korišteni materijali

Slika 34: Korišteni materijali

Slika 35: Uređaj za prosijavanje sa sitima

Slika 36: Miješalica

Slika 37: Uzorci mješavine u kalupu pod opterećenjem

Slika 38: Osušeni uzorci, neposredno prije ispitivanja

Slika 39: Uređaj za potresanje

Slika 40: Uređaj za određivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Slika 41: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Slika 42: Uređaj za određivanje tlačne čvrstoće

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij građevine
građevinarstvo
Građevinski materijali**

**Roža Šuran
JMBAG: 0114030341**

**Vapno – tradicionalni i suvremeni
građevinski materijal**

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

1. UVOD

Vapno s izvedenicama japno, apno, japon klak ili kreč nekada najraširenije i najpoznatije građevno vezivo. Vapno je riječ staroslavenskog podrijetla te gotovo jednako zvuči u svim slavenskim jezicima zbog korijena riječi 'vapa' koje znači boja. Porožan je materijal prljavo-bijele boje bez mirisa kojega nalazimo u različitim oblicima: grumenima (tradicionalno živo vapno), prahu (hidratizirano vapno) ili pasti (tradicionalno gašeno vapno). Difuzni je materijal, koji dobro prihvaća i predaje vodu iz svoje strukture u okolni prostor i na okolne materijale, ima lužnata svojstva (pH 12), te djeluje dezinfekcijski, dezinsekcijski i deratizacijski.

Iako se vapno kao proizvod ponajviše vezuje za njegovo korištenje u graditeljstvu i poljoprivredi, njegova sveukupna primjena je široka. Vapno kao proizvod se nekada najviše koristilo u izgradnji pojedinih objekata te u završnim građevinskim radovima. Poznato nam je i u svojoj primjeni u poljoprivredi kao sredstvo za izradu otopine za prskanje i premazivanje voćaka u svrhu njihove zaštite. Osim njegove široke vanjske primjene, vapno se također nekad koristilo za pročišćavanje pitke vode u privatnim bunarima i cisternama, ali i za sterilizaciju gospodarskih i privatnih objekata u estetske i zdravstvene svrhe. Vodeći se starom izrekom da je "kuća od vapna zdrava za živjeti" gotovo je svako privatno domaćinstvo koje je stanovalo u obiteljskoj kući s okućnicom imalo jamu s gašenim vapnom koja se redovito održavala i punila kako bi se osigurale dostatne količine vapna za sve njegove namjene.

Po definiciji, građevinskim materijalima smatraju se svi oni materijali koji se upotrebljavaju u građevinarstvu. Analizirajući razvitak građevinarstva kao industrijske grane, na samim počecima građevinski su materijali bili samo prirodni materijali koje su ljudi nalazili u svojoj neposrednoj blizini. Razvojem ljudske civilizacije i industrije kroz povijest, mijenjale su se potrebe građevinarstva, samim time i materijali za izgradnju, što je dovelo do proizvodnje i primjene novih materijala. U današnje doba kada tehnološki i industrijski razvoj diktiraju kretanja svih ekonomskih i gospodarskih grana suvremenog društva, u građevinarstvu postoje razni građevinski materijali koji prate njihov razvoj i zahtjeve suvremenog tržišta. Shodno tome, neophodno je poznavanje i pravilna primjena gotovo svih materijala za uspješno i kvalitetno projektiranje i gradnju građevinskih objekata.

2. POVIJEST KORIŠTENJA VAPNA

2.1 Općenito o vapnencu

Vapnenac je taložna stijena koja se uglavnom sastoji od kalcijeva karbonata i malim udjelom primjesa drugih minerala. Poznat je još i pod nazivima vapnenjak i krečnjak. S nastankom prvih kolonija algi, nastale su i prve vapnene naslage, a taj proces započeo je pred otprilike milijardu godina. Vapnenac je bio od iznimne važnosti za tadašnji razvoj mnogih životinjskih vrsta i daljnji razvoj života, jer je njegovo postojanje uvjetovalo nastanak mnogih školjkaša, puževa, nižih kralježnjaka, a osobito sisavaca. Za život na Zemlji, od iznimne važnosti je bio vapnenac koji se nalazio u toplim morima s ravnim dnom. Proces nastajanja vapnenca počinjao je s rijekama koje su u mora donosile velike količine vapnenca, koji bi se pod pritiskom morskog tlaka nataložio (Slika 1). Djelovanjem tektonskih kretanja te nabiranjem Zemljine kore, dio vapnenca izbio bi na morske površine ponavljajući ciklus ispočetka. Cikličkim ponavljanjem prirodnog načina proizvodnje vapnenca u njegov sastav ulazile su i ljušture životinja koje su uslijed novih procesa taloženja izgubile svoj oblik, stoga su fosili u vapnencima rijetka pojava.



Slika 1 - Tipična struktura vapnenca u kršu (iz arhive HSGI)

Važnost vapnenca kao materijala polazi od njegova nastanka do njegova suvremena korištenja počevši s njegovim biološkim značajem kao sastavnog dijela strukture mnogobrojnih biljaka i životinja, do njegove špiljske uporabe u svrhu pružanja skloništa i mjesta stanovanja. Razvojem ljudske civilizacije, čovjek je počeo koristiti vapnenačke kamene blokove, a potom i pečeni vapnenac. Do danas nije poznato i sasvim utvrđeno kada je i kako čovjek otkrio svojstva vapnenca pri visokoj temperaturi, no postoje nagađanja da je uočio promijenjena svojstva kamena uslijed utjecaja visokih

temperatura ili požara. Iako postoje davni tragovi upotrebe vapna za građenje u vinogradarstvu diljem svijeta, nijedna teorija dosad nije utvrdila točan uzrok, razlog ili početak korištenja pečenog vapnenca u ljudskoj civilizaciji. Djelovanjem ugljikovog dioksida iz zraka pri proizvodnji pečenog vapnenca i izradi morta uz dodavanje vode, ljudski rad je reproducirao prirodne termičke i kemijske procese zbog kojih je krajnji produkt bio čvrst i stabilan vapnencac. U konačnici, upotreba vapnenca se održala i unaprijedila do suvremenog tehnološkog i graditeljskog doba kada se termičkom i kemijskom obradom pretvara u vezivo za izgradnju objekata, zaštitu zidova ili jačanje tla.

2.2. Najranije uporabe vapna u povijesti

Govoreći o najranijoj upotrebi vapnenca kroz povijest, valja istaknuti nekoliko bitnih arheoloških i povijesnih rezultata istraživanja koji dokazuju prisutnost vapnenca u građevinarstvu u starim civilizacijama počevši od jerihonske kulture, Egipćana, Babilonaca i Grka. Tijekom arheoloških istraživanja na lokalitetu Cajenü u istočnoj Turskoj pronađen je pod izrađen od vapnenog morta, a starost mu se procjenjuje na 14.000 do 7000 godina pr. Kr., što pomiče primjenu najstarijeg vapnenog morta s nešto gipsa i do 14 tisućljeća pr. Kr. Daljnja istraživanja glede povijesne uporabe vapnenca ukazuju na jerihonsku kulturu u Palestini, gdje su se služili vapnom za zidanje opekama u razdoblju od 6000. do 4000. pr. Kr. te na primjenu morta s dodacima pečenog vapna za gradnju odvodnje nadgrobnih spomenika i za gradnju kanala u Egiptu za vrijeme vladavine kralja Sahure (2487. – 2477. pr. Kr.). Vrlo važno je spomenuti prvu otkrivenu peć za žarenje vapnenca koja potječe iz razdoblja 2000. godina pr. Kr., a pronađena je u blizini grada Ura u nekadašnjoj Mezopotamiji. Povijesna i arheološka istraživanja dalje nalaze korištenje vapnenog morta u gradnji Babilona za vrijeme kralja Nabukodonosora (605. – 562. pr. Kr.) te upotrebu vapnenog morta kod starih Grka još 450 godina pr. Kr. Konačno, a u iskapanjima u Podunavlju pronađen je pod izrađen od morta s dodacima živog vapna, koji datira oko 600. godine pr. Kr.

Primjena živog vapna u građevinarstvu starih kultura svoj procvat doživljava za vrijeme vladavine Rimskog Carstva i Rimljana koji su, svladavši tehnike obrade materijala i izgradnje, gradili impresivne objekte čije su kupole imale raspone i do 40 m, a koje do današnjeg dana nitko nije uspio nadmašiti. Kupole su bile građene od kamena ili opeke, a vezivni materijal koji su koristili bio je mort. Rimljani su svladali tehnike i materijale od drugih naroda (Grci, Etrušćani) te ih unaprijedili gradeći lukove od cigle i kamena te

koristeći vezivo koje je nalik današnjem cementu. Iako su se u početku služili uobičajenim vezivom od mješavine pijeska, vapna i vode, u 2. st. pr. Kr., to vezivo su unaprijedili vulkanskim pepelom (pucolanom) iz nalazišta Puzzoli u blizini Vezuva. Djelovanje pucolana pretvaralo je mort u hidraulični materijal po čvrstoći sličan cementu. Dodatni razlog za razvoj i korištenje tog veziva je i njegova ekonomičnost, zbog kojeg se smanjila upotreba opeke i kamena, pogotovo kada se dodavanjem šljunka u vezivo proizvodio beton. Osim otkrivanja vezivnih svojstava vulkanskog pepela te njegove implementacije u vezivne materijale u graditeljstvu, Rimljani su kao adheziv za jačanje vezivnih svojstava morta koristili bjelanjak, no taj je izum svoj procvat doživio tek u srednjem vijeku pri gradnji obrambenih utvrda. Također su prvi počeli dodavati ulja, masti i ostale primjese koje su mijenjale boju vapna, a koristili su ga i za stabilizaciju tla pri gradnji cesta, kojih su do svojeg vrhunca izgradili do 85.000 km. No čini se da je takva uporaba vapna bila poznata i u staroj Kini, a rabilo se i pri gradnji Velikog zida. Osim unaprijeđenja vezivnih materijala, stari Rimljani su poboljšali i tehniku žarenja vapnenca za dobivanje suhog vapnenca, a dokaz tome je otkrivena peć za žarenje vapnenca u Iversheimu u Njemačkoj. Slične su peći, iako ne toliko sofisticirane, pronađene donekle očuvane u Trieru, Berlinu, Vinkovcima (Cibalija) i Zagrebu (Andautonija) i dr. Prema istom se principu vapnenac i danas žari. Konačno, iz svega navedenog evidentan je doprinos starih Rimljana u razvoju tehnika i vezivnih materijala u graditeljstvu, a neke građevine iz njihova doba još danas djelomično ili u potpunosti stoje (Slika 2) bez obzira na tisućlječne utjecaje klimatskih nepogoda, prirodnih katastrofa i ratnih posljedica kroz povijest.



Slika 2 - Cigla Kineskog zida povezana je vapnim mortom (iz arhive HSGI)

Nakon propasti Rimskoga Carstva, gradnja masivnih objekata i građevina prestaje na dugo vremena, a ostaje nejasno jesu li nomadski narodi na današnjem području Sjeverozapadne, Srednje i Jugoistočne Europe tehnike žarenja vapna preuzeli od Rimljana, ili pak razradili svoje.

(Karleuša, 2007: 58)

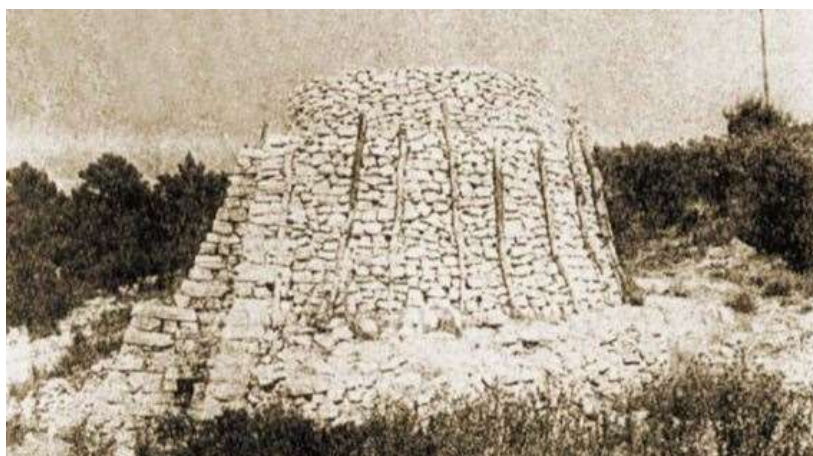
2.3 Uporaba vapna tijekom prošlosti

Nagli razvoj vapnarstva u Europi događaja se u srednjem vijeku uslijed povijesnih zbivanja i početka izgadnje obrambenih utvrda i zamkova, tzv. burgova. U to vrijeme, stambeni objekti su se, osim na moru, gradili većinom od drva ili zemlje, sve dok je pojava učestalih požara i prodora pljačkaša s azijskog kontinenta utjecala na razvoj nove vrste gradnje i upotrebe vezivnih materijala. Iako se u gradnji koristili materijali iz neposredne blizine (drvo, kamen), nastala je potreba za jačim vezivnim materijalima kako bi izgrađeni objekti za stanovanje i obranu pouzdano štitili od napada, pljačkača, ratova i požara. Takav slijed događaja uzrokovao je nagli razvoj vapnarstva u Europi, samim time i tehnike njegove izrade te mehanizaciju. Unaprjeđuje se proces biranja adekvatnog kamena, njegove obrade i pečenja te povećavaju tzv. poljske peći zbog povećane potražnje i razvoja graditeljskog sektora. Rastom potražnje za graditeljstvom, paralelno je rasla i potražnja za ljudskim resursima, odnosno graditeljima i vapnarima. U početku se kamen kao sirovina vadio iz neposredne okoline, ali zbog povećanih zahtjeva za graditeljstvom i razvojem vapnarstva, to više nije bilo moguće. Otvaranjem kamenoloma, razvio se čitav niz novih tehnika dobivanja vapna iz velikih količina sirovine: veliki kameni blokovi bi se odlamali, a zatim izlagali vatri i utjecaju vode kako bi se razlomili na manje dijelove za proizvodnju vapna. Daljnji industrijski razvoj donio je barut i miniranje, a dolazak strojeva olakšao je bušenje rupa u kamenim blokovima za postavljanje eksploziva. Cijela industrija proizvodnje vapna doživljava procvat koji se očitava u otvaranju kamenoloma za izvoz i prodaju kamena. Izvoz sirovine kamena zahtijevao je razvijeni transportni sustav što je dovelo do izgradnje i sanacije postojećih cestovnih i kopnenih prometnica, a razvijaju se i luke za vodeni transport, dok je razvoj željeznice i teretnih vlakova omogućio ispunjavanje zahtjeva tržišta i transport velikih količina sirovine na velike udaljenosti. Industrijska revolucija i izum parnog stroja također su utjecali na razvoj graditeljstva i izgradnju posebnih manufakturnih pogona.

2.4 Povijest vapnarstva u Hrvatskoj

Kao što se mnoga povijesna zbivanja i napredak drugih naroda mogu reflektirati na slijed događaja na našim prostorima, tako su i razvoj vapnarstva, upotreba i proizvodnja vapna slični onome u ostatku Europe i svijetu općenito. Iako o samoj proizvodnji vapna ima vrlo malo pisanih tragova, rezultati istraživanja ukazuju na ostatke gradnje na našim prostorima te na upotrebu kamena i opeke. Vapno se najčešće dobivalo nadomak gradilišta u improviziranim pećima koje su uglavnom služile za samo jednokratnu uporabu. Govoreći o najstarijim nalazištima, poznate su razne lokacije, a izdvajaju se ostaci rimskih peći u Vinkovcima u iskopima kraj Bosuta te Šćitarjevu (Andautonija), gdje su u blizini crkve uočljivi tragovi proizvodnje vapna.

Proizvodnja vapna u Hrvatskoj kroz povijest se nije značajno mijenjala, no oduvijek se najviše cijenilo vapno dobiveno iz najkvalitetnijeg kamena. Zbog njegove iznimne kvalitete, vapno dobiveno iz takve sirovine bilo je i najveće čistoće. Poznati po industriji kamena i općenito njegovoj kvaliteti, otoci kao što su Korčula, Hvar, Šolta i drugi bili su proizvođači vapna gdje se nerjetko nazivalo klak (Slike 3 i 4). Vapno je imalo veliku ulogu u nastanku mnogih današnjih građevina koje su zaštićene statusom kulturne baštine, a jedan primjer je stari grad u Dubrovniku.



Slika 3 - Nezapaljena vapnenica uz cestu Jelsa – Svirče na Hvaru (iz arhive HSGI)



Slika 3 – Zajednički snimak nakon izgorene klačine na Korčuli (iz arhive HSGI)

Različite geografske i geomorfološke značajke svake regije u Hrvatskoj obilježile su i drukčiji razvitak vapnarstva na pojedinim prostorima, pa tako podataka o proizvodnji vapna u Hrvatskom primorju i sjevernim dijelovima primorskog pojasa ima vrlo malo, dok podataka o proizvodnji vapna na kvarnerskim otocima gotovo da i nema. Zbog specifične vegetacije te manjka drva za kućni ogrjev, na obalnom dijelu gotovo da i nije bilo vapnenica. Za izgaranje kamena koristila se makija zbog koje je proces trajao duže.

U Istri se proizvodnja i trgovina vapnom centrirala na jugoistoku poluotoka oko dijela Peroja, gdje je zbog manjka obradivih poljoprivrednih površina i krševite vegetacije proizvodnja vapna bila izvor zarade za seoska domaćinstva. Izdvaja se obalno mjesto Peruški kraj Krnice kao centar proizvodnje vapna odnosno 'japna', stoga je bio omogućen i morski transport proizvedenog vapna u zapadnu Istru te na vanjsko tržište građevinskog materijala u susjednu Italiju. Primjer izgaranja japlenica pokraj sela Peruški u Istri prikazan je na slici 5.



Slika 4 - Izgaranje jedne od posljednjih „japlenica“ pokraj sela Peruški (iz arhive HSGI)

Počeci korištenja vapna u Gorskom Kotaru i Lici gdje se ponekad vapno nazivalo "uapnce" vezuje se uz gradnju cesta u Primorju, iako nije sačuvan podatak kada se točno počelo primjenjivati. No, proizvodnja je bila dosta raširena zbog dobrih uvjeta: obilje šuma i prisustvo bijelog kamena. Kod karlovačkog područja valja spomenuti sela Grdun i Jaškovo u kojima je očuvana tradicionalna proizvodnja vapna za osobne graditeljske i poljoprivredne potrebe domaćinstava, ne za trgovinu i izvoz. Ipak, prvi pisani trag o proizvodnji vapna i vapnari za višekratnu proizvodnju pronađen je na karti Samobora koja datira iz 1762., gdje je vapnara naznačena pod latinskim nazivom „Calcina dominalis“. Na istom su se području otkrile vapnenice u Samoborskom gorju, na lokalitetima Otruševac i Grdnjanci, no nažalost danas su zapuštena. U Hrvatskom zagorju bilo je ponešto vapnenica koje se međutim nisu sačuvale. Područje Podravine i Slavonije bilo je bogato vapnenicama, dok se vapno prodavalo sve do Bosne. Međutim, do današnjeg dana su opstale tri peći vapnenice zbog pojave industrijski proizvedenog vapna što je uzrokovalo pad potražnje za prirodnim vapnom.

Iako nema mnogo pisanih tragova o dugogodišnjoj tradiciji proizvodnje vapna na prostorima Hrvatske, događaj iz druge polovice 19. stoljeća dokaz je da se vapnarstvo razvijalo u smjeru industrijske proizvodnje. Godine 1864. u Zagrebu se održala prva Dalmatinsko-hrvatska-slavonska izložba na kojoj se izlagalo živo vapno iz raznih krajeva regije. S ekonomske strane, prema popisu poreznih obveznika dvije godine ranije, Rijeka je imala jednu vapnaru, Zagreb nijednu, dok ih je Osijek, s obzirom na svoju veliku

vapnarsku aktivnost, imao četiri. U istom razdoblju javljaju se i radničke družine, a vapnar je tada bio sezonski posao koji se obavljao od Uskrsa do Božića.

Bez obzira na različite geografske i geomorfološke razlike pojedinog dijela Hrvatske te na specifične tehnike izrade vapnenica, vapno je nekada bilo proizvod za svakodnevnu upotrebu.

(Karleuša, 2007: 249)

2.5 Pogoni za proizvodnju vapna u Hrvatskoj izvan upotrebe

Porastom potrebe za vapnom, takozvane „poljske peći“ nisu više ispunjavale tadašnje zahtjeve tržišta, pa su se počeli graditi poluindustrijski pogoni s velikim pećima na lokacijama gdje je količinski bilo dovoljno kvalitetne sirovine za proizvodnju vapna, a uskoro je gradnja takvih pogona počela i u blizini cestovnih i željezničkih prometnica kako bi proizvod bio spreman za direktan transport. U tu svrhu, često su se gradili i zasebni željeznički kolosijeci i posebna stajališta za teretne vlakove koji bi u pogone dovozili sirovinu, a zatim prevozili natrag na tržište gašeno vapno, a katkad i kamen vapnenac. Razvijen sistem povezane proizvodnje i transporta iznjedrio je postrojenja diljem Hrvatske koja su se sastojala od nekoliko kompleksa: silosa za živo vapno, korita za njegovo gašenje te pužne crpke za utovar gašenog vapna u vozila transportnog kapaciteta koji je varirao od 7 t do 25 t na dan. Tadašnji kompleksi su za loženje koristili neobnovljive izvore energije, odnosno ugljen, drvo i zemni plin. Daljni razvitak graditeljske industrije kraja 20. stoljeća kreirao je nove načine proizvodnje, mehanizaciju, tehnološke napretke i industrijske proizvode zbog kojih je takav tip proizvodnje vapna postao neisplativ. Padom potražnje i smanjenjem proizvodnje, pogoni su polako počeli propadati, jer su ih novi proizvodi i razvoj industrije istisnuli s tržišta, stoga se danas diljem Hrvatske mogu pronaći napuštena propala postrojenja i manje peći, jedan od primjera prikazan na slici 6.



Slika 5 – Ostaci šestero povezanih peći u Zaluki pokraj Ozlja (iz arhive HSGI)

2.6 Postojeća proizvodnja vapna na tradicionalan način u Hrvatskoj

Industrijska je proizvodnja, kao i drugdje, potpuno potisnula tradicijsku, no sve većom potrebom za obnovom starih Istarskih kuća to se počinje mijenjati. Zgrade se obnavljaju u izvornom obliku i s izvornim materijalima, a u obnovi se počinju izbjegavati beton i industrijski proizvedene žbuke. To je potaknulo potražnju za domaćim vapnom pa je tvrtka Kapitel iz Žminja otvorila poseban pogon za vapno i druge proizvode za obnovu stambenih kuća i sakralnih građevina. Vapno se proizvodi u modificiranim pećima, ali na tradicijski stari način. Proizvodnju su započeli tijekom obnove starog poda u Kaštelu u Pazinu za koji je bilo potrebno klasično vapno dobiveno prema staroj recepturi. Analizom ostataka između sljubnica kamena i u pokusima se došlo do spoznaje kakvo se vapno spravljalo prije više stoljeća. Trebalo ga je zatim proizvesti u dovoljnim količinama, ali i kontrolirati istovjetnost njegove kvalitete. Obnovljena je tako peć pokraj Žminja, ali je opremljena suvremenom tehnologijom kako bi se tijekom žarenja mogao strogo kontrolirati cijeli proces. Pažljivo se birao i slagalo svaki kamen, a proces žarenja se pratio posebnim termometrima povezanim s računalom. Tako je nastala grupa tehnologa specijaliziranih za proizvodnju starog vapna, žbuke i mortova, te mineralnih dodataka za boje, podloge za mozaike i ljepila za obnovu fresaka. Vezano s tim 2002. u crkvi Sv. Foške kraj Vodnjana održan je seminar o primjeni vapna i tradicijskih tehnika u građevinskim, restauratorskim i konzervatorskim radovima. Voditelj seminara bio je jedan od najpoznatijih europskih konzervatora s iskustvom primjene tradicionalnih tehnika, Hannes Weissenbach iz Beča. Sudionici seminara bili su graditelji, konzervatori i obrtnici koji su na zidovima crkve vježbali primjenu tradicionalnih materijala, a Branko Orbanić,

diplomirani inženjer arhitekture i voditelj tvrtke Kapitel i dalje je nastavlja s proizvodnjom vapna, paleći vapnenicu (Slika 7) svake godine u ljetnim mjesecima, koristeći dobiveno vapno za vlastite potrebe i komercijalnu prodaju.



Slika 6 – Vapnenica (japnenica) za tradicijsku proizvodnju vapna Kapitel d.o.o., Istra

Danas tradiciju proizvodnju na karlovačkom području održava Tomislav Brkić u Grdunu pod nazivom Eko Ema. Peć je s vanjske strane sagrađena od betona umjesto tradicijski od pruća zbog dugotrajnosti, a iznutra je od gline i cigle kako ne bi probijala temperatura tijekom paljenja. Proces paljenja vapna traje 40 sati pod stalnom temperaturom od 900 do 1 200 °C. Za gorivo se koristi drvom, bukovim i kestenovim granjem te ostatke starih drvenih zgrada i željezničkih pragova, a najvažniji je kvalitetan kamen iz kamenoloma Zvečaj. Dobiva se živo vapno, ekološki čist proizvod, koje daruju školama diljem Hrvatske za nastavne programe. Kad je peć izvan pogona, natkriva se kako bi se spriječilo vlaženje jer kasnije potrebno mnogo više ogrjeva da bi se prosušila. Proizvodnja vapna nedvojbeno je tradicijska vrijednost i kulturna baština stvarana stoljećima, a sada poprimeći i suvremeni oblik uvrštena je na popis za zaštitu kulturne baštine pod nazivom “Znanje i umijeće proizvodnje živog vapna na tradicijski način”.

Primjer vapnenice za tradicijsku proizvodnju vapna Eko Ema iz Karlovca prikazan je na slici 8.



Slika 7 - Vapnenica za tradicijsku proizvodnju vapna Eko Ema, Karlovac (Obradović B.)

U mjestu Otruševac pokraj Bregane već dugo radi vapnenica obitelji Grgos u kojoj se proizvodi vapno za potrebe okolnih stanovnika. Budući da još postoji potražnja za kvalitetnim domaćim vapnom, stara je peć preuređena i dograđena te ojačana željeznom armaturom. Tako je postala sigurnija, a dobila je i na slikovitosti. Nalazi se pokraj lokalne ceste i stražnjim je dijelom ukopana u teren. Izvana je građena od kamena, a u unutrašnjosti od opeke. Može prihvatiti vagon kamena koji se slaže od krupnijega pri dnu do sitnijega na vrhu. U sredini je kameni svod koji omogućuje loženje i pridržava kamenu masu od urušavanja tijekom žarenja. Pri slaganju kamena ostavlja se osam otvora za plamene i dimovodne kanale. Ako se naslagani vrh slegne na njega se dodaje novo kamenje, a obavlja se i kontrola kvalitete vapna. Nekada se za paljenje rabilo drvo iz okolnih šuma, a sada rabi ugljen. Kamen se vadi miniranjem iz nedalekoga vlastitoga kamenoloma. Nakon otpucavanja jedne "žbarade" vlasnik je uočio veliku šupljinu koju je proširio i očistio te pronašao veliku špilju s brojnim ukrasima. U špilju je uveo rasvjetu i ugradio vrata te od nje učinio turističku atrakciju. Sada posjetitelji mogu vidjeti pravu vapnenicu, posjetiti špilju i potom se u restoranu Grgosova špilja okrijepiti domaćim specijalitetima samoborskoga kraja.

Kao zanimljivost u Zagrebu u Zagorskoj ulici već se 50 godina rabi mali pogon za gašenje vapna, koristeći živo vapno iz Sirača i Drniša. Najprije se uklanjaju nečistoće na

način da se komadi vapna natapaju u manjem bazenu i propuštaju kroz sita, skladišti u velikim nepokrivenim bazenima gdje određeno vrijeme fermentira, a potom se prodaje. Uglavnom ga kupuju građani za krečenje zidova, dezinfekciju zgrada, građenje te bijeljenje voćaka. Potražnja je stalna jer mnogi vole prirodno vapno koje "diše" i bolje prianja za podlogu.

2.7 Suvremeni industrijski pogoni za proizvodnju vapna u Hrvatskoj

U Drnišu već je 1974. otvorena suvremena tvornica vapna u sklopu GIRK Kalun s dvije peći tipa Warmestelle. S vremenom te su peći rekonstruirane, modernizirane i opremljene računalnim upravljanjem i kontrolom proizvodnog procesa (1998.). Godišnji proizvodni kapacitet živog vapna je 120.000 tona, a linija hidratiziranog vapna kapaciteta 20 t/h s automatiziranim pakiranjem i paletiziranjem. U sastavu tvrtke su tri kamenoloma s vapnencem visoke čistoće pa se živo vapno iz ovog pogona kontrolira u vlastitom laboratoriju i izuzetno je pogodno za građevinarstvo, metalurgiju, kemijsku i prehrambenu industriju, industriju nemetala, poljoprivredu, te u ekologiji gdje je nezamjenjiv element u sanaciji svih ekoloških incidenata u prirodi. GIRK (Građevinska Industrija, Rudarstvo, Kamenarstvo) Kalun d.d. jedna od rijetkih tvrtki koja se bavi baznom industrijom na području Dalmacije. Nalazi se na dobroj lokaciji i prometno je vrlo dobro povezana (Slika 9). U posljednjih 5 godina tvrtka je imala teškoćama u poslovanju te se borila za opstanak, no s obzirom da zapošljava 5% stanovništva grada od iznimnog je značaja.



Slika 8 – Suvremena proizvodnja vapna u postrojenju tvrtke GIRK Kalun d.d., Drniš (iz arhive Šibenski.hr)

Proizvodnja vapna u Lici oduvijek je bila zastupljena zbog obilja kamena i drva te blizine ličke željezničke pruge. 1980. godine tvrtka Industrogradnja zbog povećane potražnje i zastarjele tehnologije izradila je novu veliku suvremenu peć s pogonom na mazut. Tvrtka Lička tvornica vapna i pogon u međuvremenu su se proširila te danas djeluju u sklopu Wietersdorfer Gruppe u sastavu Intercal d.o.o. Kao energent još uvijek koristi mazut, no radi se na unaprijeđenju i prelasku na ukapljeni plin. Proizvodi se gašeno i negašeno vapno te drugi proizvodi. Provodila su se istraživanja vezana uz primjenu vapna u cestogradnji i to i za povezivanje zrna agregata i veziva asfalta, a ne samo za prethodnu stabilizaciju posteljice. Ideja je, da se koristi za posebne zimske uvjete, pokrivajući asfalt s vapnenom skramom kako bi cestovni zastor bio kompaktniji, zasnivana po iskustvu s američkog tržišta. No to se pokušava ukloniti zbog stvaranja bijele prašine pri mljevenju, a prelazi se i na pročišćavanje tehnoloških voda jer se u neposrednoj blizini nalazi Gacka dolina s ribogojilištima. Potrebno je ponovno osuvremeniti pogone, kako bi se smanjili troškovi i podigla konkurentnost te se moraju razvijati novi proizvodi na bazi vapna kako bi se udovoljilo sve većim zahtjevima tržišta.

Pokraj Daruvara u mjestu Sirač nalazi se još jedna tvornica vapna u sastavu Intercala. Dvije tvornice vapna iz ove grupacije pokrivaju oko 60 posto hrvatske proizvodnje vapna. Kamen Sirač d.d. je veliki suvremeni pogon za proizvodnju kamena,

vapna, raznih veziva te drugih materijala za potrebe graditeljstva, najveći domaći proizvođač vapna. Na lokalitetu Čelina u visokoj dvocijevnoj peći tvrtke Maerz, proizvode 175 tona na dan raznih vrsta vapna. Peći imaju tri toplinske zone zagrijavanja (870°C, 910°C i 1000°C), a kao gorivo rabi se zemni plin. Vapnenac se naizmjenice težinski dozira se s gornje strane u svaki od vertikalnih okana (šahtova) ovisno o zahtjevima proizvodnje. Unutrašnjost peći obložena je opekom otpornom na toplinu i na habanje. Svakih 8 sati uzima se kontrolni se uzorak u težini od 50 kg, a pritom se prije ispitivanja usitni. Gotovo se vapno ispušta u donji dio peći, hladi, pakira u vreće i skladišti. Živo vapno se pakira u papirnate vreće od 6 kg, a hidratizirano (dolomit i kalcit) u vreće od 25 kg.

Industrijska proizvodnja vapna u Istri započela je izgradnjom tvornice hidratiziranog vapna 1960. godine u Raškom zaljevu. Raški ugljeni bazen bio je vrlo pogodna lokacija za pokretanje veće industrijske vapnare zbog neposredne blizine nalazišta ugljena i kamena. Time se spriječila sječica oskudnih šuma radi paljenja vapna. Zapošljavala je sedamdesetak radnika koji su se uz proizvodnju vapna bavili i dobivanjem kamena. Od 1990. radi kao ITV (Istarska tvornica vapna), a 1993. je privatizirana i danas je u vlasništvu austrijskog koncerna Schmid (Murexin). Godišnja proizvodnja je 40.000 tona vapna i s tim se pokriva 25% potreba Hrvatske. Osim standardnog proizvodi se i posebno vapno (spezi) te razne gotove mješavine, žbuke, ljepila za keramiku i drugi materijali. Dio se proizvodnje izvozi u Italiju, Sloveniju, Bosnu i Hercegovinu, Albaniju i Tunis, a otvaraju se i sestrinske tvrtke. Otvaranjem novoga pogona u susjednom naselju Most Raša (Slika 10) proširio se proizvodni program i kakvoća te primjena novih tehnologija. U posljednje vrijeme, politika tvornice pokušava voditi što veću brigu o okolišu što pruža zadovoljstvo okolnom stanovništvu, djelatnicima ITV-a, ali i krajnjim korisnicima.



Slika 9 - Postrojenje ITV-a, Murexin, Istra (iz arhive Labin.com)

3. OPĆENITO O VAPNU KAO GRAĐEVINSKOM MATERIJALU

Pod poznavanje građevinskih materijala spada razumijevanje tehnoloških postupaka za njihovo dobivanje, preradu i vrijeme ugradnje te promjene koje mogu nastati nakon ugradnje. Prema namjeni materijali se dijele na veziva, konstrukcijske materijale, izolacijske materijale i materijale za oblaganje.

Kao što sam naziv nalaže, veziva su materijali koja služe povezivanju različitog građevinskog materijala. Zbog svojih posebnih svojstava djeluju tako da u određenom vremenskom roku te pod utjecajem okoline i kemijskih procesa otvrdnu. Prema načinu otvrdnjivanja, veziva dijelimo na zračna i hidraulična.

Zračna veziva djeluju tako da miješanjem s vodom mogu očvrnuti samo na zraku i nemaju svojstvo otpornosti prema djelovanju vode. U zračna veziva ubrajamo primjerice gašeno vapno, glinu, gips. Suprotno od zračnih veziva, hidraulična veziva otvrdnjuju na zraku i u vodi, a nakon otvrdnjivanja su otporna prema djelovanju vode. U hidraulična veziva ubrajamo cimente, hidraulično vapno, prirodno hidraulično vapno itd.

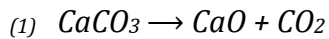
Prateći razvitak graditeljstva kroz povijest, čovjek je uvijek iznova pokušavao unaprijediti građevinski materijal dodavanjem različitih primjesa, no većina unaprijeđenja se nije uspjela značajno razviti. Tehnike dobivanja i proizvodnje vapna su se kroz godine značajno mijenjale, no krajnji produkt je ostao isti. U građevinarstvu se upotrebljavaju živo vapno, gašeno vapno, hidratizirano vapno te hidraulično vapno. Vapno ostaje najvažniji i najčešće upotrebljavani zračni vezivni materijal do današnjeg dana.

(Matusinović T.:2001)

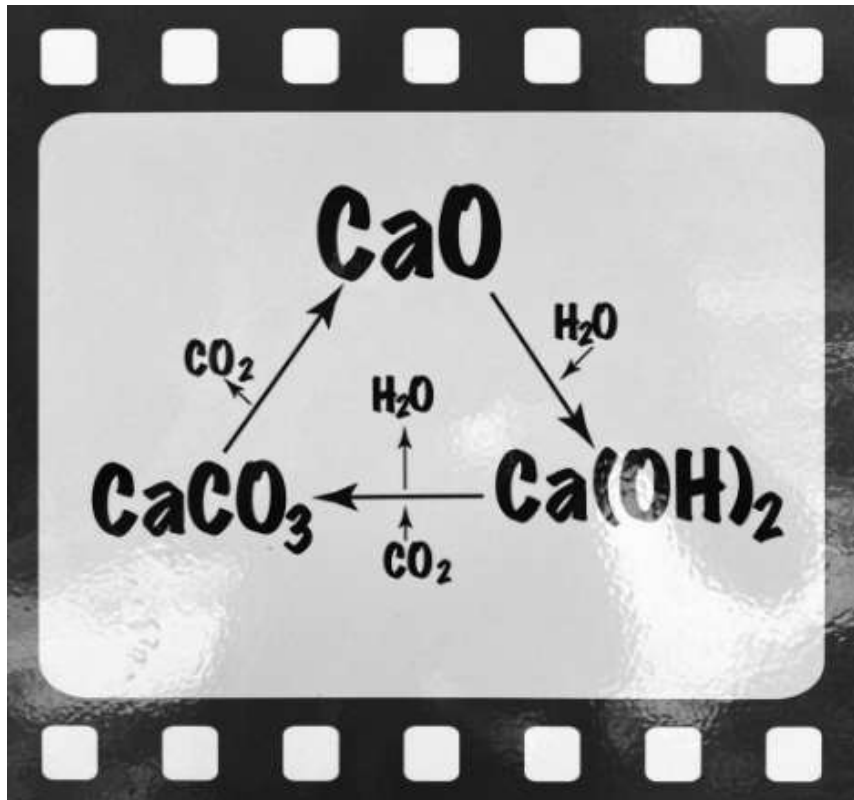
3.1 Vrste vapna

3.1.1 Živo vapno

Vapnenac je najraspostranjenija karbonatna stijena u prirodi koju nalazimo u raznim oblicima: kalcit, kreda, mramor itd. S obzirom na to da ga nalazimo u različitim oblicima, vapnenac može imati i različite nijanse zbog raznih primjesa oksida silicija, željeza i aluminijske. Stoga se u praksi upotrebljava 'najčišći' vapnenac bijele boje. Živo vapno (CaO , kalcijev oksid) dobiva se žarenjem vapnenca, $CaCO_3$ (kalcijev karbonat) uz oslobađanje CO_2 (ugljičkov dioksid) prikazano prema izrazu:



Za dobivanje vapna, vapnenac (CaCO_3) mora gorjeti određeno vrijeme na temperaturi od 900 – 1000 C. Izgaranjem vapnenca oslobađa se ugljikov dioksid CO_2 (Slika 11).



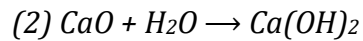
Slika 10 – Ciklus vapna

Tehnika proizvodnje vapna u samim je počecima bila vrlo jednostavna: iskopana rupa u zemlji (tzv. poljska peć) oblagala se kamenjem te kao takva palila. Ova tehnika proizvodnje živog vapna još uvijek je prisutna u Aziji i Africi. Tehnike paljenja vapna slične onima za proizvodnju ugljena, tzv. ugljene peći, tradicionalno su se nalazile na područjima bogatim vapnencom, ali tamo gdje su prometnice otežavale transport živog vapna. Na vrhuncu Rimskog carstva razvile su se šaht-peći čija se upotreba kasnije proširila na cijelom kontinentu. Takozvane šaht-peći postavljane u vapnenačkim kamenoloma zahtjevale su manje goriva, a zbog toga jer se temperatura pri termičkoj obradi ravnomjerno rasprostirala po njihovoj površini, cjelokupni krajnji dobiveni proizvod bio je jednolične kvalitete. Pri padu Rimskog carstva, šaht-peći nestaju iz graditeljske upotrebe, a proizvodnja vapna se ponovno vraća na prvotne poljske peći. Ponovno vraćanje šaht-peći zbiva se u srednjem vijeku kada se iz Italije šire u cijelu Europu, a u Škotskoj tada kreću začeci tehnike paljenja ugljenom. Konačno, kraj 19. stoljeća označava

dolazak prstenastih peći, a kasnije i tzv. cik-cak peći u kojima su se palili cigla i vapno. Razvojem svih tehnika paljenja vapenca, dolazimo do današnjih šaht, kružnih, rotacionih i Wopfinger peći. Ove peći kao gorivo koriste plin, zbog čega je krajnji produkt visokokvalitetno vapno čak i kada se ne pali najčišća vrsta vapnenca.

3.1.2 Gašeno vapno

Dobivanje gašenog vapna (Ca(OH)_2 , kalcijev hidroksid) vrši se djelovanjem vode na živo vapno uz oslobađanje velike količine termičke energije. Djelovanjem vode na živo vapno nastaje vapneno tijesto koje se ulijeva u jamu, a pritom se ono pročišćava tako da nezapaljeni komadići i nečistoće padaju na dno jame. Kako bi se dobilo gašeno vapno, omjer vode u odnosu na masu živog vapna mora biti 3:1, određeno prema izrazu:



gdje je CaO oznaka za živo vapno, H_2O voda, Ca(OH)_2 kalcijev hidroksid ili gašeno vapno. Za dobivanje gašenog vapna uzimaju se u obzir i drugi faktori kao što su sastav vapna te temperatura za termičku obradu. Kako bi gašeno vapno dobilo na svojoj kvaliteti, bitno je da 'odleži'. Naime, s odmicanjem vremena, kristali vapna dobijaju na obujmu, a time raste i njihova sposobnost vezivanja: kristali premošćuju veće udaljenosti, bilo da se one nalaze između zrna argegata ili neravnih podloga. Krajni produkt, takvo gašeno vapno može se mješati s pijeskom za dobivanje morta, pigmentirati bojom ili koristiti za ličenje.

S razvitkom graditeljstva i sve većih zahtjeva za gradnjom, paralelno je rasla i potražnja za većim količinama vapna, što je značilo da se ono često uzimalo iz različitih izvora. Takva razina potražnje dovela je do razvitka tehnike tzv. suhog gašenja: kako vapno ne bi pregorilo te postiglo prejakom termičku obradu, ono se miješa s pijeskom te prelijeva vodom. Gotovi produkt nazivamo mort, kojeg u svrhu lakše obrade razrjeđujemo vodom. Suvremena tehnologija definira tehniku suhog gašenja kao proizvodnju tzv. hidratiziranog vapna koje se na tržištu može naći u obliku praška. Proces proizvodnje provodi se gašenjem usitnjenih nepročišćenih komadića živog vapna u velikim bubnjevima. Vapno se neposredno nakon gašenja pakira, bez procesa odležavanja i pročišćavanja. Mana hidratiziranog vapna je njegova specifična površina koja je do deset puta manja od specifične površine gašenog vapna. Shodno tome, snaga vezivanja hidratiziranog vapna je manja.

3.1.3 Hidraulično vapno

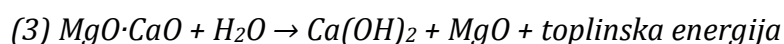
Hidraulično vapno dobiva se od sirovine koja sadrži kalcijev karbonat zajedno s udjelom gline. Takav vapnenac poznat je kao *argillaceous*. Većina vapnenaca za hidrauličku proizvodnju vapna sadrže između 15 – 35% silicij dioksida označenog izrazom SiO_2 , zajedno s aluminijevim oksidom označenog izrazom Al_2O_3 , dva važna sastojka gline, sive ili plave boje. Kao i kod svih vrsta vapnenca, i glineni vapnenci će reagirati kada se na njih stavi nekoliko kapi razrijeđene klorovodične ili sumporne kiseline. *Marlstone* - meki krečnjak, često je prikladna sirovina za proizvodnju hidrauličnog vapna. Vapno proizvedeno od njega ima svojstva između običnog vapna i portland cementa, ali nastaje na sličan način kao i obično vapno.

Hidraulično vapno proizvodi se pečenjem vapnenca s udjelom gline od 6 – 22%. Dobivamo ga sporim pečenjem lapora ili sličnih mješavina ispod temperature sinteriranja ili miješanjem hidratiziranog vapna s dodacima, primjerice prirodne ili talioničke šljake. Sporo se gasi, a kod gašenja ne povećava znatnije svoj volumen, ali daje kašu koja otvrdne bez prisutstva CO_2 , pod vodom. Koristi za izradu žbuka i mortova u vlažnim uvjetima te za radovima pod vodom. Žbuka hidrauličnog vapna ima sporiju sposobnost vezivanja te je slabije čvrstoće od cementne žbuke

Hidraulička vapna bila su važan vezivni materijal prije otkrića Portland cementa, danas se koriste jedino u konzervatorskim radovima. Proizvodnja dobrog hidrauličnog vapna jednako je zanat kao i tehnologija, čak i više od običnog vapna, ali s opadanjem upotrebe hidrauličnog vapna ostalo je malo kvalificiranih proizvođača te i novi proizvođači često trebaju naučiti potrebne vještine ispočetka. U zemljama u razvoju hidraulična vapna rijetko se proizvode.

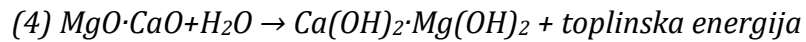
3.1.4 Slabo reaktivna vapna

Tehnički i ekonomski gledano, manje je isplativo proizvoditi slabo reaktivna vapna zbog duljine procesa njihove proizvodnje te kasnijih fizičkih svojstava kada se koriste kao vezivo. Navodi se primjer dolomitnog vapna koji se zbog svojih slabih svojstava reaktivnosti hidratizira u vremenskom roku između deset sati i jednog cijelog dana, a pritom se u postupku hidratizira samo 10 do 25% magnezijeva oksida, čime nastaje monohidrat prikazan u slijedećem izrazu:



gdje je MgO magnezijev oksid, CaO kalcijev oksid te $Ca(OH)_2$ kalcijev hidroksid.

S obzirom na nepotpunost procesa hidratizacije ovakvo vapno se teško primjenjuje kao vezivo jer se dodavanjem vode događa proces ekspanzije njegova volumena. Kako bi se ovo izbjeglo, za dolomitna vapna je razvijen postupak tlačne hidratizacije kojim vapno hidratizira u cijelosti a krajnji produkt je dihidrat koji se dobiva po slijedećoj kemijskoj reakciji prikazanoj u izrazu:



gdje je MgO magnezijev oksid, CaO kalcijev oksid, $Ca(OH)_2$ kalcijev hidroksid te $Mg(OH)_2$ magnezijev hidroksid. Za postupak tlačne hidratacije potrebni su posebni uređaji koji svojim djelovanjem u optimalnim temperaturnim i tlačnim uvjetima uzrokuju eksploziju čija energija oslobađa vodu i usitnjava čestice vapna do nekoliko milimetara.

4 PROIZVODNJA VAPNA

4.1 Tradicijska proizvodnja vapna

4.1.1 Gradnja japlenice

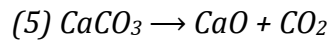
Ovisno o vrsti gradnje, vaplenica može biti peć za jednokratnu ili višekratnu upotrebu. Sastoji se od primarnog dijela, jezgre, i sekundarnog dijela. U sekundarnom se dijelu pali vapnenac, dok se primarno dio, jezgra, paljenjem pretvara u vapno. Pri gradnji vaplenice za jednokratnu upotrebu, najprije se gradi primarni dio, jezgra, a zatim sekundarni dio, nosivi kružni zid debljine 0,5 m koji se nakon svakog postupka paljenja ponovno gradi. Zid se povezuje drvenim vertikalama i sajlama koje ga stežu kao obruč. U međuprostoru između primarnog i sekundarnog dijela umeće se termoizolator (zemlja) u debljini oko 0,3 m. Ovisno o dostupnosti sirovina za proizvodnju vapna, takve japlenice mogu mijenjati mjesto gradnje. Suprotno vaplenicama za jednokratnu upotrebu, kada se grade za višekratnu upotrebu i za mnogo paljenja, sekundarni dio se izvodi trajno jer ima više različitih namjena u procesu proizvodnje: drži kamen na okupu te održava konstantnu temperaturu kako bi se osigurali stalni uvjeti za termičku obradu kamena. Nosivi kružni zid se gradi do debljine od 1,0 m što ga čini masivnim i stalnim, a jezgra se pri proizvodnji puni a nakon pečenja prazni. Pri završetku procesa, nosivi kružni zid se djelomično otvara, a jezgra prazni. Kada se pri gradnji unutarnjeg zida koristi šamotna cigla, a između je termoizolacijski sloj zemlje od 0,4 m, takve su vaplenice slične pećima. S obzirom da su statične i masivne, na njih se dovozi sirovina za proizvodnju vapna, a primjer je vaplenica u malom mjestu Orbanići kraj Žminja u Istri.

4.1.2 Postupak dobivanja vapna na tradicionalan način

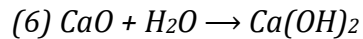
Postupak dobivanja vapna na tradicijski način uvijek se provodio prema sličnom principu no s obzirom na prisutstvo sirovine (vapnenca) i ogrijevnog materijala, postojale su određene razlike u procesu dobivanja vapna u različitim krajevima Hrvatske. U sljedećim poglavljima opisan je proces svojstven za Istru, točnije za selo Orbanići pokraj Žminja zbog čega je korišten tradicionalni izraz japno i japlenica, a ne vapno i vapnenica.

Tradicijski proces dobivanja vapna, odnosno u dijalektu japna, odvijao se u tzv. jamama japlenicama. Kako bi se oslobodio kalcijev dioksid, kamen (kalcijev karbonat) se trebao termički obraditi paljenjem na temperaturi do 1200°C. Hlapljenjem vode iz

kamena nastajalo je živo vapno – japno, kalcijev dioksid. Daljni proces obrade nalagao je da se živo vapno gasi vodom i spremna u japlenice na sedimentaciju kako bi se konačno dobilo gašeno vapno, odnosno kalcijev hidroksid, prvo je potrebno dobiti živo vapno koje se dobiva prema izrazu:



a zatim gašeno vapno prema izrazu:



Gdje je CaCO_3 kalcijev karbonat, CaO kalcijev oksid, CO_2 ugljikov dioksid, H_2O voda i Ca(OH)_2 kalcijev hidroksid.

Da bi se dobio dobar proizvod vrhunske kvalitete, bitno je osigurati optimalne uvjete za termičku obradu kamena, ali ponajprije i sirovinu koja je dobre kvalitete i nema različitih primjesa, ostataka i otpada. S obzirom na to da je drvo kao ogrjev najčišći energent, pri izgaranju se na živo vapno ne vezuju čestice drugih elemenata, ali je zbog toga i važno paliti samo čistu sirovinu drva, ne pomiješanu s drugim otpadom. Iz tih razloga drvo se sprema čak i do godinu dana unaprijed. Kako bi se postigli optimalni termički uvjeti za izgaranje, vatra se ponekad održava i po nekoliko dana: za 8 m³ primarnog dijela (kamena) potrebno je oko šest dana loženja u najtoplijim ljetnim mjesecima. Kako bi se plamen održavao na vatri, neprestano se kroz čitav dan u ložište ubacuje suho drvo malog presjeka, a vatra se loži u udubljenju ispod primarnog dijela japlenice. Kod održavanja vatre u najtoplijim ljetnim mjesecima zbog opasnosti od požara, preporučaju se povećane mjere zaštite na radu.

4.1.3 Punjenje i paljenje japlenice

Punjenje japlenice započinje odabirom kamena vapnenca nakon čega slijedi izrada konstruktivnog luka iznad ložišta. Konstruktivni luk se gradi iznad ložišta u obliku lažne kupole, nalik onoj na kažunima u Istri, a prostor iznad njega se puni kamenom na način da ostaju prazna mjesta za strujanje plamena i dima te dotok kisika u procesu izgaranja. Na sam vrh japlenice gradi se ispupčena kupola koja se zatim prekriva slojem ugašenog vapna debljine 0,1 m. Na kraju u kupolu se radijalno dodaje druga sirovina bitna za proces izgaranja, odnosno drvo, koje tvori rupe – dimnjake, prikazano na slici 12. Kroz te rupe –

dimnjake kasnije se regulira dotok kisika za izgaranje u japlenici tako da ih se otvara i zatvara kamenim pločama.



Slika 11 - Ispupčena kupola japlenice sa dimnjacima prije početka paljenja (Kapitel d.o.o.)

Slijedi proces paljenja, koji je u početku složen zbog otežanog dotoka kisika u samu japlenicu, što je prikazano na slici 13. Vatra se mora paliti oprezno, a loženje mora biti postepeno i stalno kako bi se temperatura u masi kamena postepeno dizala te na taj način postigli optimalni termički uvjeti za izgaranje sirovine i dobivanje proizvoda s ujednačenom kvalitetom.



Slika 12 - Početak paljenja japlenice (Kapitel d.o.o.)

Kako se proces paljenja odvija kroz nekoliko dana, tako se uočavaju promjene u termičkim uvjetima izgaranja te fizičkim svojstvima kamena. Govoreći o termičkim uvjetima, japlenica postiže višu temperaturu oko ložišta koje se spaljuje (Slika 14), a nižu na ispupčenoj kupoli. Kako odmiče proces spaljivanja (Slika 15), kamen koji se pali uslijed

izloženosti visokoj temperaturi koja se danima postepeno dizala mijenja svoja fizička svojstva te onaj dio koji se nalazi na vrhu poprima narančastu boju, dok drugi dio koji se nalazi u samom ložištu poprima bijeložutu boju.



Slika 13 - Danonoć paljenje japlenice (Kapitel d.o.o.)



Slika 14 - Izgaranje japlenice (Kapitel d.o.o.)

Istovremeno je promjena fizičkih svojstava kamena indikator da je u tom trenutku izgaranje drva na najvišoj te ujedno najracionalnijoj razini. Pri samom kraju procesa paljenja, prvotna sirovina kamena postaje kamena masa koja mijenja svoju boju u bijeložutu, postaje porozna te se skuplja za oko 15% volumena originalne sirovine.

Prije nego što se utvrdi da je proces paljenja kamena te proizvodnja živog vapna dovršen, vrši se test tako da se uzima uzorak sirovine s ispupčene kupole (Slike 16, 17 i 18). Ukoliko u doticaju s vodom ne ostavlja zrnate ostatke u otopini, smatra se da je taj kamen pečen te da je kemijska reakcija pretvorbe iz kalcijeva karbonata u kalcijev oksid

dorvršena. Po završetku testiranja i utvrđivanja uspješnosti pečenja kamena, japlenica se prestaje ložiti te se ostavlja da se hladi.



Slika 15 - Vrh japlenice pri kraju paljenja (Kapitel d.o.o.)



Slika 16 - Ispitivanje pečenosti vršnog kamena (Kapitel d.o.o.)



Slika 17 - Vrh japlenice na kraju paljenja (Kapitel d.o.o.)

4.1.4 Vađenje i gašenje živog vapna

Slijedi proces vađenja živog japna iz japlenice te gašenja u jami, prikazano na slici 19. Prije nego li se vadi iz jezgre japlenice, živo vapno se najprije nekoliko dana hladi, u trenutku kada se započinje s vađenjem živog japna iz japlenice, temperatura iznosi oko 130 stupnjeva. Živo vapno se potapa, gasi u kadama (Slike 20 i 21) s trostrukim volumenom vode pri čemu dolazi do kemijske reakcije živog vapna i vode uslijed čega se oslobađa velika količina toplinske energije koja uzrokuje niz malih eksplozija grumenja čije prskanje doseže i nekoliko metara. Od iznimne je važnosti provoditi povećane mjere zaštite zbog opasnosti prskanja pri čemu mogu nastradati izložena koža i sluznica očiju. Kako bi se otapanje i gašenje odvalo u cjelosti, najvažnije je da se cjelokupna masa živog vapna odjednom potopi, a zatim se dobivena kaša neprestano mješa kako bi se dobila jednolična masa. Takva jednolična masa se ispušta u jamu koja se nalazi ispod kade (Slika 22), u zemlji (kako bi imala osiguranu stalnu temperaturu i vlažnost). Filtrira se preko sita kako bi krenuo postupak sedimentacije pri čemu je važno zadržavati razinu vlage zbog sprječavanja procesa kalcifikacije, odnosno spajanja ugljikova dioksida iz zraka s gašenim vapnom. Proces sedimentacije i odležavanja po mogućnosti traje do 3 godine, jer mu se time povećava kvaliteta. Gašeno vapno u jamama uvijek mora biti pokriveno s vodom (Slika 23).



Slika 18 – vađenje živog vapna iz japljenice (Kapitel d.o.o.)



Slika 19 – Postavljanje živog vapna u kade za gašenje (Kapitel d.o.o.)



Slika 20 – Ulijevanje vode na živo vapno (Kapitel d.o.o.)



Slika 21 - Gašenje živog vapna u vodi prije ispuštanja u jame (Kapitel d.o.o.)



Slika 22 - Gašeno vapno u jami

4.1.5 Dobivanje i primjena pigmenata – farbanje s vapnom

Proizvodnja i primjena pigmenata iz prirode također je rijetkost u današnje vrijeme, no građevinska restauratorska tvrtka Kapitel d.o.o. iz Žminja koristi ih za bojanje autohtonih fasada kuća i pri obnovi crkava u Istri. Proces prirodnog dobivanja pigmenata

iz zemlje odvija se u nekoliko faza. Primjer jedne od tradicionalnih vapnenih fasada sa pigmentima iz vrta kuće prikazan je na slici 24.



Slika 23 - Tradicionalna vapnena fasada dobivena sa pigmentima iz vrta kuće, Kanfanar (Kapitel d.o.o.)

Prva je odabir kvalitetne zemlje s malo organskog života i sastojaka kako bi filtracija bila što uspješnija. Slijedi proces uklanjanja grube prljavštine preko sita, nakon čega se pročišćena zemlja otapama u vodi i pušta da se staloži (Slika 25), a zatim uklanjanje prljavštine s vrha te grubi talog s dna. Takav proces filtracije se ponavlja nekoliko puta, sve dok se ne dobije čisti talog. U procesu filtracije se neizbježno gubi prvotna masa zemlje te nam na kraju ostaje sve manja količina filtrirane zemlje. Nastupa faza dehidracije kada filtriranu se otopljena zemlja ostavlja da dehidrira na suncu koja se pretvara u suhi, fini prah u obliku kore, kojeg se zatim što finije melje. Konačan dobiveni produkt je prirodni pigment iz zemlje.



Slika 24 - Prikaz izrade boja iz tri vrste zemlje (Kapitel d.o.o.)

Slijedi priprema vapnene vode koja se dobiva tako da se živo vapno otapa u vodi do zasićenja te zatim ostavlja da se staloži. Bistri dio otopine sa skramom na vrhu je dobivena vapnena voda. Kvalitetna vapnena voda se dobiva samo prvim otapanjem živog vapna u vodi, stoga je postupak potrebno ponavljati ovisno o količini vapnene vode koja nam je potrebna.

Konačno, dobiveni prirodni pigment iz zemlje miješa se sa vapnenom vodom te primjenjuje kao boja na upojnim podlogama. Otopina djeluje tako da se pri procesu oksidacije gašeno vapno iz vapnene vode kalcificira te vezuje pigment boje sa sobom, a postupak se može ponavljati više puta kako bi se prijanjanje za podlogu povećalo. Kroz povijest je najpoznatija primjena prirodnih pigmenata svakako je kod fresaka. Najpoznatija današnja očuvana freska u Istri je tzv. Ples mrtvacu, freska iz 1474. oslikana na zidu crkvice Sv. Marije na Škriljinah u Bermu, autora Vincenta iz Kastva prikazana je na slici 26.



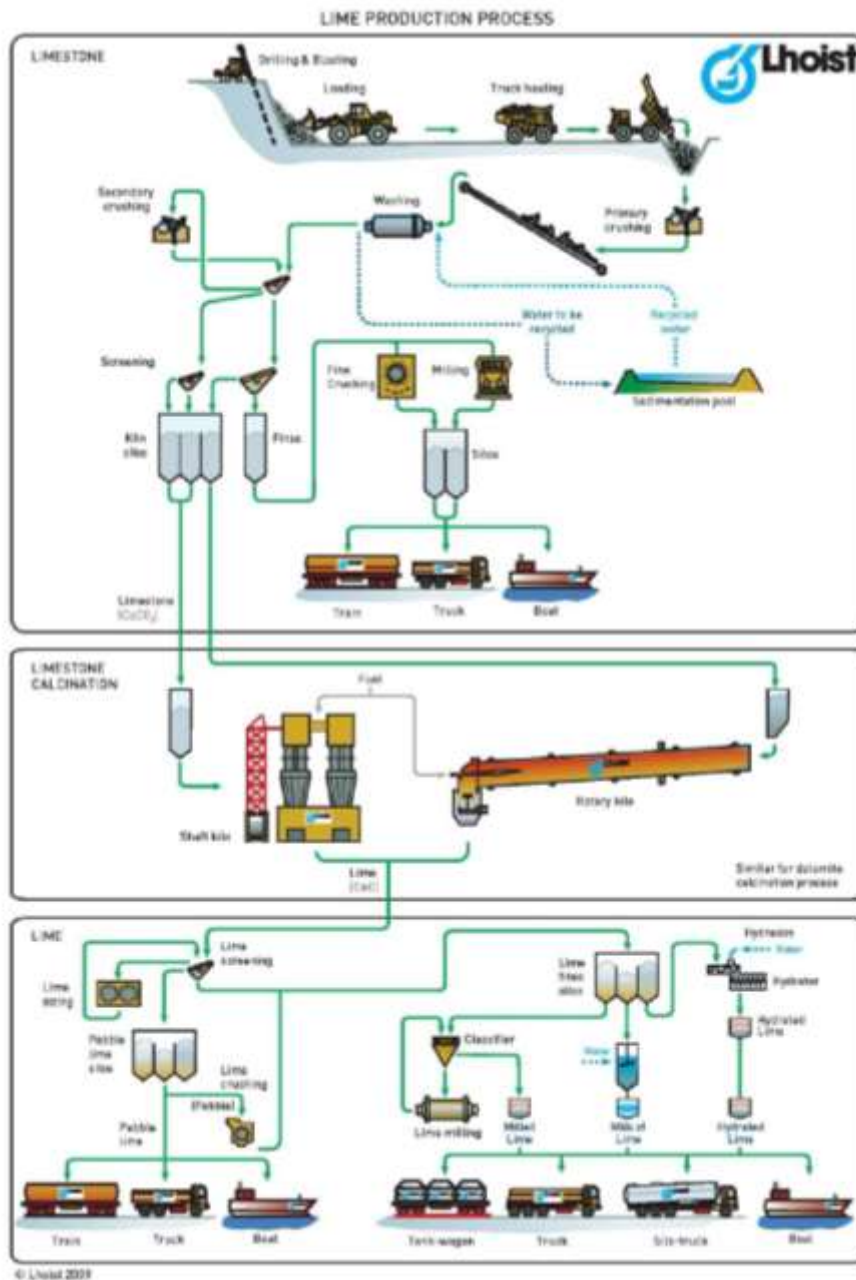
Slika 25 - Unutrašnjost crkve sv. Marije na Škriljinah kraj Berma (iz arhive Central Istria)

(Orbanić B.: 2013)

4.2 Industrijska proizvodnja vapna

Proces industrijske proizvodnje vapna odvija se u sljedećim fazama:

- eksploatacija mineralne sirovine
- priprema mineralne sirovine (drobljenje i sijanje)
- kalcinacija u peći
- sitnjenje ili hidratizacija
- skladištenje, pakiranje i otprema



Slika 26 - Tipični proces industrijske proizvodnje vapna (ilustracija cijelog poglavlja)

Osim što prikazuje proizvodnju vapna, slika 27 prikazuje i proizvodnju karbonata za industrijsku primjenu. Kako bi oba ova proizvoda bila kvalitetna, zahtjevaju ležišta dovoljno čistog vapnenca s visokim udjelom kalcijeva karbonata ($CaCO_3$), tipično iznad 95%, pa ih je moguće proizvoditi iz istog.

4.2.1 Eksploatacija mineralne sirovine

Kamenolomi iz kojih se sirovina vadi miniranjem i bušenjem karakterizira čistoća karbonata i debljina slojeva. Stoga se svako potencijalno rudarsko mjesto unaprijed temeljito istražuje. Pažljivo se procjenjuje održivost i potencijalni utjecaj na okoliš prije otvaranja novog kamenoloma, a njegova buduća sanacija planirana je prije početka rada. Geolozi najprije izrađuju geološku kartu rudnog nalazišta, u kojoj se nalaze raspoložive rezerve i njihove ocjene kvalitete. Suvremene tehnologije i stručnost omogućuju učinkovitu, ekonomičnu, ekološku i održivu ekstrakciju vapnenca ili dolomita.

4.2.2 Priprema mineralne sirovine

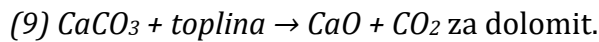
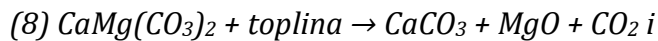
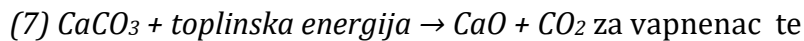
Minirani blokovi kamena, kamionom se odvoze u veliku primarnu drobilicu koja je obično udarna ili kompresijska. Ovisno o veličini potrebnog kamena i peći u koju će se uvesti, isti kamen može proći kroz sekundarnu, pa čak i tercijarnu drobilicu, kako bi još više smanjio svoju veličinu. Kamen se zatim prosijava u širokom rasponu različitih veličina. Dio kamena u ovom se trenutku isperu kako bi se uklonili ostaci gline koji bi mogli ostati. Nakon drobljenja vapnenac se prema konačnoj upotrebi razvrstava u različite frakcije.

4.2.3 Kalcinacija u peći

Nakon eksploatacije, mineralna sirovina se drobljenjem usitnjava na zrna veličine 0,5 - 15 cm, što ovisi o vrsti peći za kalcinaciju. Kalcinacija je zagrijavanje (ili žarenje) tvari na visoku temperaturu, ali nižu od njihova tališta, pri čemu se iz tvari oslobađa ili CO_2 ili voda, ili oboje; proces u kojem se iz vapnenca ($CaCO_3$) žarenjem oslobađa ugljični dioksid (CO_2), pri čemu nastaje živo vapno (CaO). Veličina zrna je važna za vrijeme kalcinacije, budući da se kemijska reakcija brže odvija što su zrna sitnija.

Osnovna podjela peći je na rotacijske i vertikalne, no postoji više vrsta podjela i po načinu gradnje. Pri samom procesu kalcinacije vapnenca u pećima, sirovina se žari na temperaturama između 1000 i 1400 °C te se pritom događaju brojne kemijske i fizičke

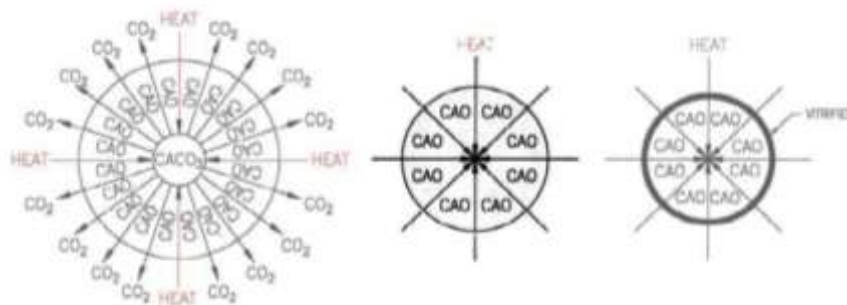
reakcije, no osnovna kemijska reakcija je rastvaranje karbonata na okside i ugljikov dioksid prema slijedećim izrazima:



gdje je $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ kalcijev magnezijev karbonat ili dolomit.

Kalcinacija, a kasnije i sinteriranje reakcije su koje započinju na površini zrna a kasnije se šire prema njegovoj unutrašnjosti, a njihovo napredovanje ovisi o temperaturi peći, duljini odvijanja kalcinacije te veličini zrna. U procesu kalcinacije temperatura se podiže u tri faze: u početnoj, sirovina se zagrijava od atmosferske do temperature kalcinacije. Pri atmosferskom tlaku, temperatura kalcinacije za kalcit iznosi 870°C a za dolomit oko 775 °C, a zbog temperaturnog rastezanja dolazi do povećanja volumena zrna. Sljedeća faza porasta temperature aktivira kalcinaciju zrna na njegovoj površini, a istovremeno se odvija kemijska reakcija otpuštanja ugljikovog dioksida kojom karbonati prelaze u okside. Što se tiče fizičkih promjena, u ovoj fazi volumen ostaje konstantan, gustoća se smanjuje, a povećava se poroznost, zbog čega je vapno vrlo reaktivno. Posljednja faza povišenja temperature uzrokuje sinteriranje kristala vapna popraćeno uz nekoliko promjena fizičkih svojstava kamena: kristali se spajaju dok se smanjuju poroznost, volumen i specifična površina dok se gustoća povećava. Smanjena specifična površina vapnu daje nisku reaktivnost te se zbog toga naziva prepečeno ili „mrtvo pečeno“ vapno.

Slika 28 ilustrira tri moguća stanja zrna nakon pečenja vapna te njihov izgled. Prvi slučaj prikazuje djelomično kalcinirano zrno koje u jezgri ima zaostali kalcijev karbonat. Drugi slučaj prikazuje potpuno kalcinirano zrno koje nije prošlo proces pretvaranja u mrtvo pečeno vapno. Treći slučaj prikazuje potpuno kalcinirano zrno koje je na površini započelo sinteriranje te mu je zbog toga smanjena reaktivnost. Zbog variranja veličine zrna sirovine, samo određeni postotak živog vapna je idealno kalcinirano, dok su manji dio karbonati koji nisu kalcinirali te prepečeno vapno.



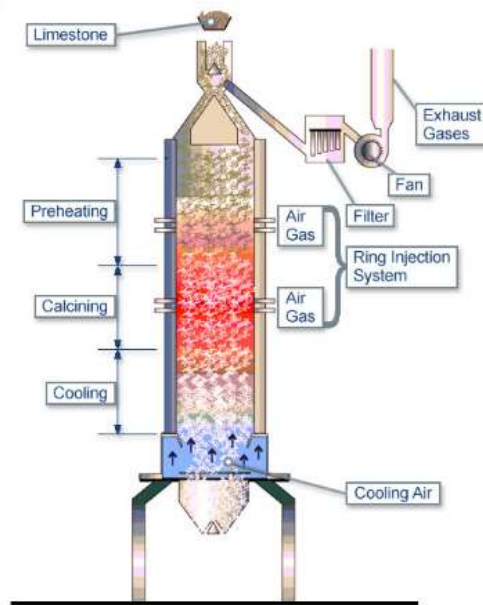
Slika 27 – Tri stanja zrna vapna nakon pečenja (nepoznat autor)

Najvažniji tehnološki parametri i fizička svojstva sirovine za postupak kalcinacije su veličina zrna sirovine, temperatura peći, odnosno idealni termički uvjeti, i vrijeme trajanja kalcinacije koje ovisi o njima. U samom procesu kalcinacije događa se niz kemijskih i fizičkih reakcija, pa tako paralelno s porastom temperature u peći i vremenskim rasponom raste gustoća vapna zbog pojave procesa sinteriranja. U idealnim uvjetima za proizvodnju kvalitetnog proizvoda, proces sinteriranja je nepoželjan, jer direktno utječe na gustoću i poroznost vapna, bitne parametre za njegovu kemijsku reaktivnost s vodom. Kemijska reaktivnost vapna definira se stupnjem temperature na kojem se ono hidratizira, a što je viši stupanj reaktivnosti, to se oslobađa više topline. Kod industrijske proizvodnje vapna, način određivanja reaktivnosti propisan je standardima kako bi gotov proizvod bio ujednačene kvalitete bez obzira na proizvedene količine.

4.2.4 Vrste peći

Osovinska peć

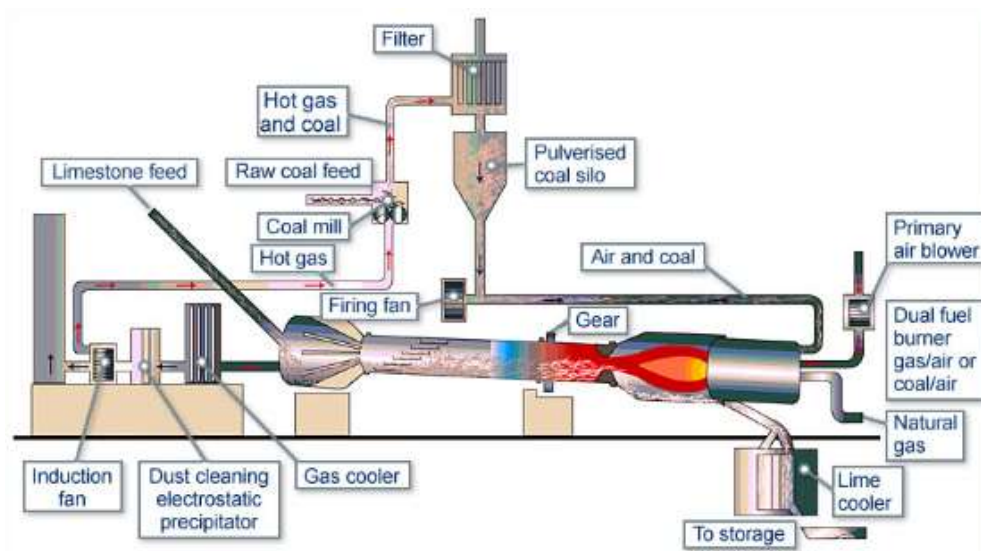
Osovinska peć, prikazana na slici 29, može sagorjeti kamen od promjera najmanje 20 mm do 175 mm. Mogu se pokretati na prirodni plin, tekuća i kruta goriva. Ova vrsta peći ima tendenciju stvaranja srednje brzine reaktivnosti, koja se zatim može upotrijebiti u brojnim industrijskim procesima.



Slika 28 - Osovinska peć (iz arhive European Lime Association)

Rotacijska peć

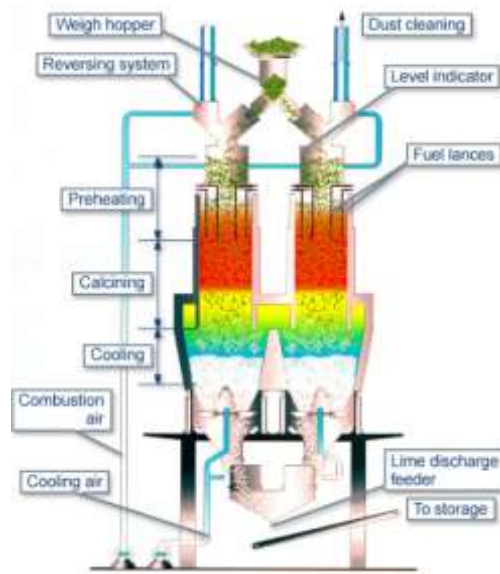
Rotacijska peć sastoji se od rotirajućeg cilindra nagnutog pod kutom od 3 do 4 stupnja od horizontale. Vapnenac, kreda ili dolomit se dovodi u gornji "stražnji kraj", a gorivo i zrak za izgaranje u donji "prednji kraj". Peći ove vrste obično se pune kamenom veličine od 15 mm do 40 mm, a koristi se nizom goriva, uključujući ugljen, naftni koks, prirodni plin i otpadna goriva. Koriste se za proizvodnju dolomitnog vapna i živog vapna visoke čistoće. Primjer rotacijske peći prikazan je na slici 30.



Slika 29 - Rotacijska peć (iz arhive European Lime Association)

Regenerativna peć s dvostrukim osovinama

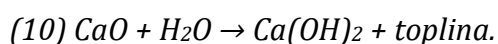
Peć s dvostrukim osovinama s paralelnim protokom ima dvije međusobno povezane vertikalne osovine koje se redom aktiviraju kako bi se postigla izvrsna energetska učinkovitost. Veličina kamena koja se koristi u tim pećima obično je između 90 mm i 125 mm. Koriste prirodni plin i stvaraju visoku reaktivnost i veliku čistoću. Primjer je ilustriran na slici 31.



Slika 30 - Peć s dvostrukim osovinama (iz arhive European Lime Association)

4.2.5 Sitnjenje ili hidratizacija

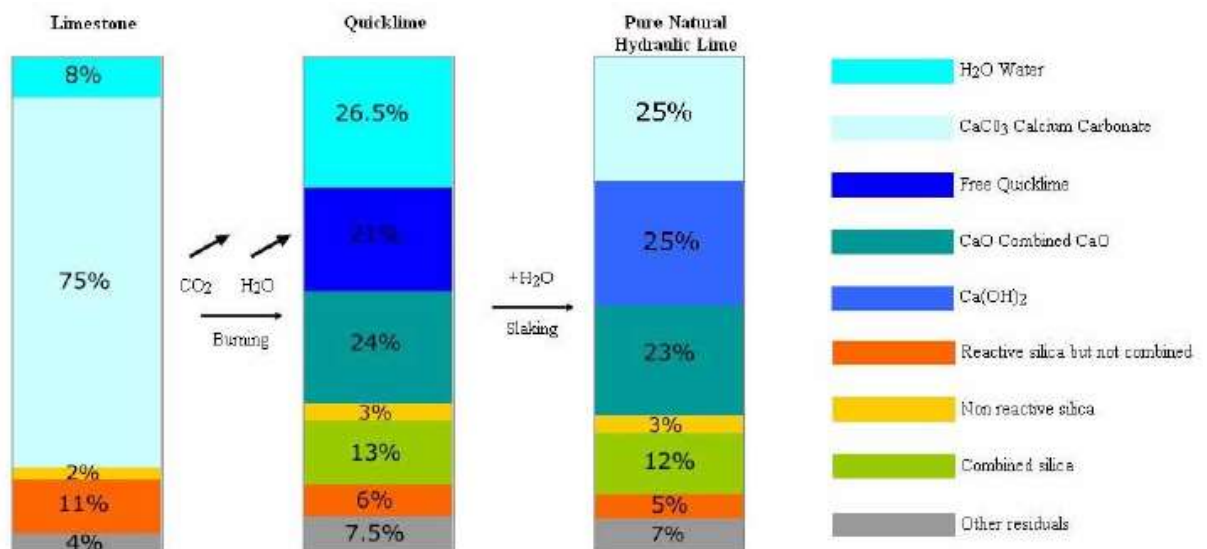
Ovisno o vrsti namjene i potrebi, sljedeća faza proizvodnje vapna može se odvijati na dva različita načina, jedan je klasiranje odnosno sitnjenje, a drugi je hidratizacija. Klasiranjem kalciniranog živog vapna prema granulometrijskom sustavu je sitnjenje vapna do potrebne veličine zrna ovisno o potrebama i zahtjevima, a tako usitnjeno vapno čini gotov proizvod. Drugi način proizvodnje vapna je hidratizacija živog vapna koja je pretvorba oksida u hidrokside, a zbog niza kemijskih i fizičkih reakcija u procesu dolazi do mehaničkog razaranja te pretvorbe granula živog vapna u čestice dimenzija praha zbog čega nije potreban proces usitnjavanja nakon hidratizacije. Hidratizacija kalcitnog vapna je proces u kojem se oslobađa velika količina toplinske energije koja ovisi o reaktivnosti vapna. Smatra se da količina toplinske energije koja se oslobađa u procesu iznosi 1100 kJ/kg (smatra se da je toplina oslobođena izgaranjem 35 t ugljena ekvivalentna toplini hidratizacije 1000 t vapna). Hidratizacija se odvija prema izrazu:



Hidratacijom se povećava volumen čestica, što dovodi do mehaničkog razaranja, a oksid prelazi u hidroksid. Proces hidratacije kalciniranog vapna može varirati, pa se voda dodaje u određenim omjerima ovisno o vrsti kalcitnog vapna, njegovim fizičkim svojstvima te reaktivnosti. Prema reaktivnosti možemo razlikovati vrlo reaktivne sirovine kao što su pečeno kalcitno vapno te dolomitna vapna ili prepečena vapna koja su nakon kalcinacije slabo reaktivna zbog toga jer su prošla proces sinteriranja.

4.2.6 Dobivanje hidrauličkog vapna

Zbog fizičkih i kemijskih svojstava hidrauličkog vapna, u procesu kalcinacije se događaju drukčije kemijske reakcije nego kod kalcitnog ili dolomitnog vapna. Sirovina hidrauličkog vapna u svom sastavu ima glinovite (silikatne) i karbonatne elemente, stoga u procesu kalcinacije zbog spajanja oksida nastaju minerali: alita i belita, velik udio slobodnog vapna (CaO) te zaostali nevezani silikati koji po svojim kemijskim svojstvima mogu biti reaktivni (amorfni) ili nereaktivni (kristalični). Primjer sastava vapnenca i hidrauličkog vapna nakon kalcinacije i nakon hidratizacije prikazan je na slici 32. Kod hidratizacije hidrauličkog vapna dodaje se količina vode dovoljna potrebna za pretvorbu kalcijevog oksida u hidroksid, a da alit i belit ne počnu proces hidratacije minerala.



Slika 31 - sastava vapnenca i hidrauličkog vapna nakon kalcinacije i nakon hidratizacije (nepoznat autor)

Hidraulično vapno se koristi kao vezivo te ovisno o udjelu alita i belita u svom sastavu, svojstvima može biti slično cementu. Za razliku od cementa koji se veže isključivo hidratcijom minerala klinkera, hidraulično vapno se veže hidratacijom alita i belita, ali i

karbonatizacijom hidroksida. Pri karbonatizaciji kalcijev hidroksid veže ugljični dioksid iz zraka tvoreći tako kalcijev karbonat prema slijedećoj kemijskoj reakciji prikazanoj u izrazu: (11) $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$.

Pri dobivanju hidrauličkog vapna reakcija započinje ako se loženje vrši na temperaturama između 50 i 100 ° C više nego pri pečenju običnog vapna. Većina dizajna peći za proizvodnju običnog vapna pogodna je i za proizvodnju hidrauličnog vapna. Međutim, vrijeme izgaranja je kraće za hidraulično vapno, jer je potrebno izbaciti manje ugljikovog dioksida zbog manjeg udjela vapnenca.

5. EKSPERIMENTALNI RAD – ISPITIVANJA U LABORATORIJU

Ispitivanja su provedena tijekom siječanja i veljače 2020. godine u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Provedena su ispitivanja konzistencije rasprostiranjem prema normi HRV EN 10153 te ispitivanje čvrstoće očvrstnulo mortu prema normi HRV 196 – 1: 2005 u svrhu testiranja razlike parametara kvalitete gašenog vapna proizvedenog na tradicionalni način i hidratiziranog industrijski proizvedenog vapna. Za potrebe ispitivanja pripremljeno je šest različitih mješavina vapnenog morta.

5.1 Materijali

Za potrebe pripreme uzoraka za laboratorijska ispitivanja korišteni su sljedeći materijali prikazani na slikama 32 i 33.

- Gašeno vapno dobiveno tradicijskom proizvodnjom, konzistencije paste, odležano u jami tri godine te skladišteno u specijalizirane spremnike. Vapno je dopremljeno od građevinske restauratorske tvrtke Kapitel d.o.o. iz Žminja u Istri koja ga proizvodi za vlastite potrebe (restauracija, konzervacija spomenika kulture, obnova autohtonih kuća i slično). Kako bi se izbjeglo taloženje vapna na dnu te odvajanje vode na površini, gašeno vapno se prije ispitivanja promiješalo
- Pijesak granulometrije 0-4 mm, mješavine koja je sadržavala 30% zrna od 4 mm, 30% zrna od 2 do 4 mm, 20% zrna od 1 do 2 mm te 20% ostatka na situ 0,063
- Specijalizirana srednje mljevena pečena opeka proizvedena za građevinske restauratorske radove također dopremljena od tvrtke Kapitel d.o.o. Korištena je mješavina opeke granulacije 40% zrnca od 4 mm, 20% zrna od 2 mm do 4 mm, 20% od 1 mm do 2 mm te 20% ostataka sa situ 0,063
- Hidratizirano vapno dobiveno industrijskom proizvodnjom, Stamal (proizvođač)
- Leteći pepeo
- Kvarcni pijesak
- Voda iz gradskog vodovoda

Tablica 1: Popis i oznake korištenih materijala u eksperimentu

GV	gašeno vapno dobiveno tradicionalnom proizvodnjom
HV	hidratizirano vapno dobiveno industrijskom proizvodnjom
LP	leteći pepeo
P	pijesak 0-4 mm
SPMO	srednje pečena mljevena opeka
KP	kvarcni pijesak
V	Voda



Slika 32 – Korišteni materijali



Slika 33 – Korišteni materijali

5.2 Sastav mješavina

Uzimajući u obzir da gašeno vapno i pijesak imaju drugačiju vodoupojnost, količina vode određena je u laboratoriju na licu mjesta. Nakon nekoliko napravljenih proba standardnih mješavina (trostruki volumen vode na volumen vapna), dobivena je tražena konzistencija rasprostiranja od 185 ± 3 mm zadana normom HRV EN 495-2. Dobiveni omjer vode korišten je u svim mješavinama. Popis svih materijala korištenih u

eksperimentu prikazani su u *Tablici 1* dok je točna količina utrošenog materijala za svaku mješavinu prikazana u *Tablici 2*.

Tablica 2: Količina utrošenog materijala za svaku mješavinu

	Vrste veziva (%)			Vrsta agregata (%)			Vezivo (g)	Agregat (g)	Voda (g)
	GV	HV	LP	P	SPMO	KP			
1.	100	0	0	100	0	0	442	1272	68
2.	0	100	0	100	0	0	442	1272	368
3.	100	0	0	20	80	0	442	1272	68
4.	100	0	0	20	60	20	442	1272	68
5.	100	0	0	0	100	0	442	1272	68
6.	85	0	15	20	60	20	442	1272	68

5.3 Priprema, ugradnja i njegovanje uzoraka

Priprema uzoraka sastojala se od pripreme posebnog omjera pijeska različitih frakcija. Pijesak je najprije sušen u sušioniku 24 sata, prosijan pomoću uređaja za prosijavanje (Slika 35) te miješan u potrebnom zadanom omjeru. Istim postupkom je dobiven poseban omjer srednje pečene opeke (40% zrnca od 4 mm, 20% zrna od 2 mm do 4 mm, 20% od 1 mm do 2 mm te 20% ostataka sa situ 0,063). Svaka mješavina lijevana je u kalupe dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm, od čega je dobiveno po 3 uzorka pojedine mješavine korištenih za ispitivanje. U slučaju ovog ispitivanja u letećem pepelu je došlo do nastanka grudica zbog čega ga je bilo potrebno prosijati i „zdrobiti“, a gašeno vapno promiješati zbog taloženja sitnih čestica vapna na dnu posude i vode na vrhu.

Procedura miješanja odvila se u nekoliko faza:

- Miješanje miješalicom (Slika 36) vapna i vode 30 s, pri brzini 1
- Dodavanje pijeska
- Ručno miješanje 30 s
- Miješanje miješalicom 30 s, pri brzini 2
- Struganje ostatka morta s posude i mješalice
- Miješanje 1 min, pri brzini 2



Slika 34 - uređaj za prosijavanje sa sitima



Slika 35 - Miješalica

Nakon miješanja svježeg vapnenog morta slijedila je ugradnja i zbijanje miješavine u kalupe oblika prizme (40 mm x 40 mm x 160 mm). Kalupi su ispunjeni u dva sloja (svaki sloj nabiti nabijačem po dvadeset i pet puta), nadopuniti te skinuti višak. Potom, prekriveno s dva sloja gaze i filter papirom, preko cjelokupne površine postavljena je staklena pločica te opterećenje težinom od 5,0 kg (Slika 37). Nakon puna tri sata slijedilo je uklanjanje opterećenja, gaze i filter papira, nakon čega je ponovno vraćena staklena pločica. Sve zajedno se s kalupom i pločicom stavilo u plastičnu vrećicu 5 dana. Konačno, sve se ostavilo da se suši u sobi relativne vlažnosti od 45% i temperaturi od 20 ° C do ispitivanja (još 23 dana), cijeli proces sušenja trajao je sve ukupno 28 dana, što je prikazano na slici 38.



Slika 36 – Uzorci mješavine u kalupu pod opterećenjem



Slika 37 – Osušeni uzorci, neposredno prije ispitivanja

5.4 Laboratorijska ispitivanja svojstava vapnenog morta

5.4.1 Ispitivanje konzistencije rasprostiranjem – HRV EN 1015-3

Ispitivanje se izvodi pomoću stolića za potresanje prikazanog na slici 39, kako je propisano normom HRN EN 1015-3. Osim stolića za protresanje, oprema za ispitivanje sastoji se i od kalupa krnjeg stošca visine 60 mm i štapa za nabijanje dužine 200 mm. Prije samog ispitivanja, potrebno je navlažiti vodom stolić za protresanje i kalup. Svaki nivo se zbija štapom po 10 puta. Kada se ispuni cijeli kalup, potrebno je izravnati gornju površinu morta i, unutar 15 sekundi, podignuti kalup vertikalno. Nakon toga, izaziva se rasprostiranje morta pokretanjem uređaja za protresanje koji nabija stolić 15 puta. Po završetku ispitivanja se mjeri promjer rasprostiranja morta u 2 međusobno okomita smjera od kojih je konzistencija rasprostiranja aritmetička sredina tih promjera.



Slika 38 – Uređaj za potresanje

5.4.2 Ispitivanje čvrstoće – HRV 196 – 1 2005

Ispitivanje čvrstoće očvrstnalog morta sastoji se od određivanja savojne i tlačne čvrstoće prizmica. Ispituju se na preši prikazanoj na slici 40 prema normi za određivanje čvrstoće cementa HRN EN 196-1 2005.



Slika 39 – Uređaj za određivanje savojne čvrstoće

Ispitivanja se provode na uzorcima oblika prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Najprije se na prizmama određuje savojna čvrstoća i pri čemu se dobiju po dvije polovice

od svake prizme na kojima se zatim ispituje tlačna čvrstoća. Kako bi se osigurala točnost rezultata, ispitivanje se provodi na po tri uzorka prizme od svake mješavine (Slika 41).



Slika 40 – Uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće s vidljivim lomom po sredini

Prije samog ispitivanja, potrebno je izmjeriti sve tri dimenzije svakog uzorka i to na način da se svaka dimenzija izmjeri na tri mjesta. Konačne dimenzije uzorka dobivaju se kao srednje vrijednosti od triju mjerenja. Ispitivanje savojne čvrstoće morta započinje pozicioniranjem uzorka prizme na dva oslonca oblika valjka čija međusobna udaljenost iznosi 100 mm. Kada se uzorak pozicionira, pomoću preše se podigne kako bi se ostvario kontakt s trećim valjkom kojim se opterećenje nanosi po sredini uzorka. Uzorak se postavlja na prešu tako da se opterećenje nanosi u okomitom smjeru na smjer ugrađivanja morta u kalupe. Ispitivanje se provodi tako što se tlačno opterećenje nanosi po sredini uzorka konstantnom brzinom od 0,5 kN/s do loma. Sila pri kojoj dođe do loma uzorka, zabilježi se kao sila loma.

Savojna čvrstoća morta izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$(12) R_f = (1,5 \times F_f \times l) / b^3$$

gdje je : R_f – savojna čvrstoća mort, u MPa

F_f – sila opterećenja po sredini uzorka u trenutku loma, u N

b – dimenzija kvadratnog presjeka prizme, u mm

l – udaljenost između oslonaca, u mm

Nakon ispitivanja savojne čvrstoće slijedi ispitivanje tlačne čvrstoće na polovicama prizmi. Polovice se postavljaju na prešu između dviju pločica dimenzija 40 x 40 mm, preko

kojih se uzorci opterećuju tlačnom silom. Sila se nanosi konstantnom brzinom od 1 kN/s do loma, kako je prikazano na slici 42.

Tlačna čvrstoća morta izražava se kao:

$$(13) R_c = F_c / 1600$$

gdje je : R_c - tlačna čvrstoća morta, u MPa

F_c - sila loma, u N

1600 - površina preko koje se nanosi opterećenje (40 mm x 40 mm), u mm.



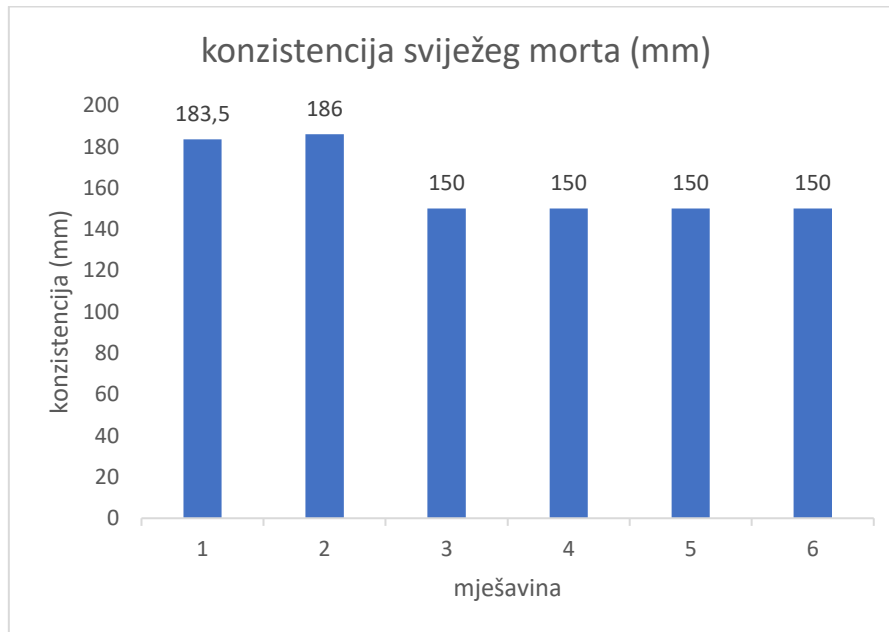
Slika 41 - Uređaj za određivanje tlačne čvrstoće

6 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

6.1 Određivanje konzistencije svježeg morta

Prilikom pripremanja svih 6 mješavina mortova cilj je bio postići vrijednost normirane konzistencije radi lakše interpretacije rezultata. Pripremljene su probne mješavine koje su poslužile za procjenu vodovezivnog omjera mortova potrebnih za ostvarivanje normirane konzistencije. Vrijednosti konzistencija dobivenih rasprostiranjem mortova ilustrirani su na grafu 1 pri čemu je minimalna normirana vrijednost konzistencije 183 mm, a maksimalna 187 mm. Vidljivo je da je vrijednost konzistencije morta sa dodatkom srednje pečene opeke manja od minimalne vrijednosti

normirane konzistencije, odnosno do pravilnog rasprostiranja nije niti došlo zbog sastava mješavine koja je bila pre „mrvičasta“. Opeka je upila puno više vode od predviđenog. Vrijednosti morta bez dodatka opeke su u granicama normirane konzistencije. Iz tog razloga, sve dobivene vrijednosti konzistencija su prihvaćene i sva daljnja ispitivanja su provedena.

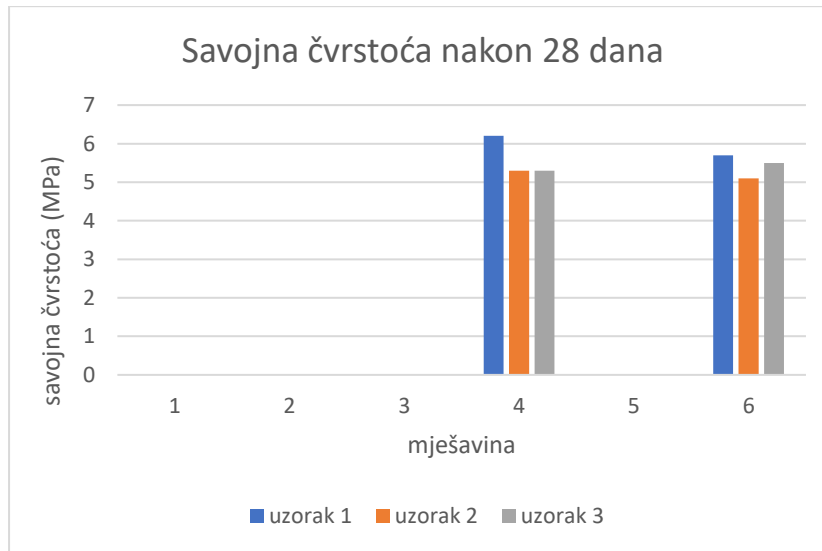


Graf 1 – Konzistencija svježeg morta

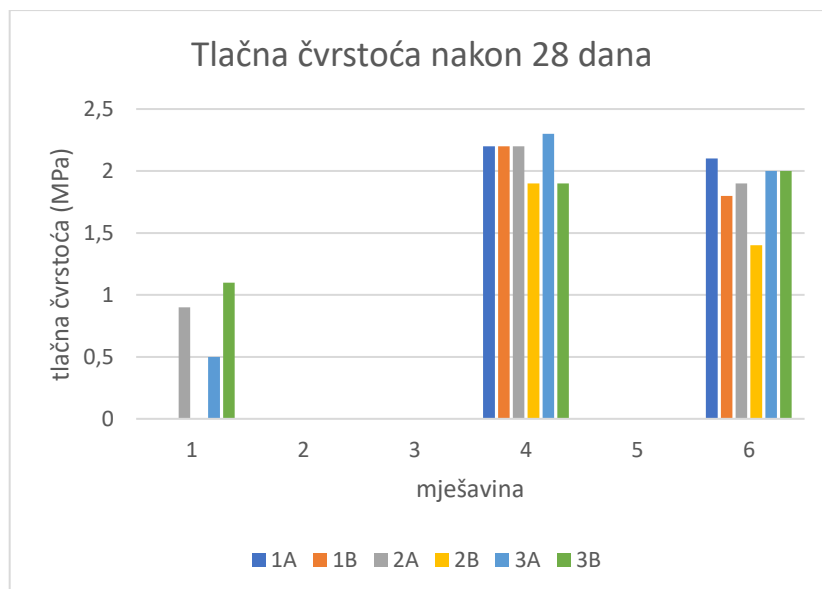
6.2 Savojna i tlačna čvrstoća očvrstnalog morta

Srednje vrijednosti savojnih i tlačnih čvrstoća očvrstnalog morta nakon 28 dana prikazane su grafovima 2 i 3. Gotovo svi rezultati ispitivanja na čvrstoću savijanja i tlaka su nevaljani zbog krivo procijenjene vlažnosti materijala (pijeska i opeke), što je rezultiralo dobivanjem mrvičaste konzistencije mješavina koje se kasnije nisu uspjele povezati i osušiti na pravilan način. Dobiveni rezultati ukazuju da su uzorci 4 i 6 imali najveću čvrstoću i ispitivanja su uspješno provedena. Savojna čvrstoća uzorka 4 varira između 5,3 MPa i 6,2 MPa, pri čemu srednja čvrstoća na savijanje iznosi 5,6 MPa, dok je za uzorak 6 nešto manja te iznosi 5,43 MPa, (rezultati između 5,1 MPa i 5,7 MPa). Savojna čvrstoća uzorka 4 za 3% je veća od uzorka 6. Tlačna čvrstoća uzorka 4 također je veća od

uzorka 6 i to za 12%. Rezultati za uzorak 4 variraju od 1,9 MPa do 2,3 MPa, sa srednjom tlačnom čvrstoćom od 2,12 MPa, a za uzorak 6 od 1,4 MPa do 2,0 sa srednjom čvrstoćom na tlak od 1,87 MPa. Rezultati tlačne čvrstoće uzoraka 1 manji su za 61% tlačne čvrstoće uzorka 6.



Graf 2 – Srednje vrijednosti savojne čvrstoće očvrsnulog morta



Graf 3 - Srednje vrijednosti tlačne čvrstoće očvrsnulog morta

7. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu ovog rada prikazana su saznanja o proizvodnji vapna od najstarijih vremena do danas te uočeni različiti načini proizvodnje tradicijskog i industrijskog vapna u Hrvatskoj. Opisane su opće i povijesne informacije o najstarijem građevnom vezivu, vapnu o kojem se danas sve manje piše i koje je gotovo palo u zaborav. Tijekom povijesti zbog svoje široke primjene i relativno jednostavne proizvodnje svrstavao se u nešto svima razumljivo i dostupno. Bio je neizostavni proizvod gotovo svakog ruralnog kućanstva te služio kao skroman dodatak poljoprivrednim prinosima. Danas takva je proizvodnja posvuda nestala ponajviše zbog nedostatka jeftinijih energenata potrebnih za grijanje kamena i napornog rada. Jedan od utjecaja uništenja priobalnog šumskog pokrova bilo je baš paljenje vapnenica, te je u nekim predjelima Hrvatske čak bilo i zabranjeno.

Potreba za proizvodnjom vapna na tradicionalan način i dalje postoje i to najčešće zbog potrebe za što vjernijom obnovom i restauracijom starih građevina. Pri čemu se koriste suvremeni instrumenti i aparati, čak i softiceraniji od industrijske proizvodnje. Međutim, raširena teza da je kvaliteta industrijske proizvodnje znatno slabija od tradicijski dobivenog vapna više nije točna. Danas suvremeni proizvođači puno više brinu o sortiranju i čistoći vapnenca te sazrijevanju vapna što su jedni od glavnih nosioca kvalitetne sirovine. Tradicijsko je dobivanje vapna sasvim sigurno dio naše tradicijske kulture i trebalo bi ga na neki način sačuvati i dokumentirati, baš kao i sve ostale oblike tradicijske kulture. Možda bi ga na nekim područjima valjalo očuvati kao zanimljivu i pomalo neobičnu turističku atrakciju. U svakom bi slučaju od daljeg propadanja valjalo sačuvati i prikladno obilježiti preostale tragove i tradicijskog i industrijskog dobivanja vapna.

U eksperimentalnom radu ispitana su svojstva mortova pripremljenih od gašenog (tradicijski dobivenog) vapna i hidratiziranog (industrijski dobivenog) vapna s različitim udjelima pijeska, srednje pečene opeke, kvarcnog pijeska, letećeg pepela i vode. S ciljem utvrđivanja čvrstoće očvrstnalog morta s obzirom na različite dodatke klasičnom vapnenom mortu. Za očekivati je bilo da će doći do povećanja vrijednosti tlačne čvrstoće proporcionalno povećanju udjela srednje pečene opeke te bržem stvrdnjavanju miješavine zbog čega se u praksi takvi hidraulični mortovi koriste za radove pod vodom ili sa povećanim postotkom vlage u okolini. Također bilo je za očekivati da mora postojati određena razlika pri korištenju industrijski hidratiziranog vapna i tradicijski dobivenog

vapna s obzirom da pri restauraciji i konzervaciji spomenika kulture upotreba industrijskog vapna nije uobičajena. Nažalost, na temelju provedenih ispitivanja zbog krivo određene vlažnosti materijala rezultati nisu bili dovoljni za donošenje većih zaključaka što potvrđuje da je za kvalitetan rad potrebna praksa i dobro poznavanje materijala.

LITERATURA I IZVORI

Laszowsky, E.: *Rudarstvo u Hrvatskoj*, Hrvatska prošlost 3., Zagreb 1943.

Bićanić, R.: *Doba manufakture u Hrvatskoj i Slavoniji 1750-1860*, JAZU, Zagreb, 1951.

Biljak, Š.; Fijamber, D.: *Tehnologija građevinskih materijala*, Školska knjiga, Zagreb, 1967.

Adam, J. P.: *Roman Boulding: Materials and techniques*, BT Batsford, London, 1994.

Marković, S.: *Hrvatske mineralne sirovine*, Zagreb, 2002.

Zaninović, M.: *Starije građevinske tehnike na Hvaru*, Zbornik radova znanstvenog kolokvija (6.-8. prosinca 1976. u Zadru): *Materijali, tehnike i strukture predantičkog i antičkog graditeljstva na istočnom jadranskom prostoru*, Odjel za arheologiju, Centar za povijesne znanosti, Zagreb, 1980.

Suić, M.: *Grad Pag – Tipološke osobitosti uz našu obalu*, Radovi Zavoda za povijesne znanosti HAZU, Zadar, 2001.

Petrić-Stjepanović, V.: *Prije nego što nestane posljednji vapnar*, Hrvatske šume (2003.)

Penezić, B.: *Kamen Sirač - 125 godina*, Kamen Sirač, Sirač, 2006.

Matusinović T.: *Inženjerstvo mineralnih veziva*, Zavod za anorgansku kemiju tehnologiju i nemetale, Zagreb, 2001.

Iz arhive Branka Orbanića i tvrtke Kapitel d.o.o.