

## UTJECAJ OPLATA KONTROLIRANE PROPUSNOSTI NA MEHANIČKA I TRAJNOSNA SVOJSTVA ZAŠTITNOG SLOJA BETONA

**Dubravka Bjegović**

*Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, prof.dr.sc.*

**Marijana Serdar**

*Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, dr.sc.*

**Ervin Kožoman**

*Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, student*

**Sažetak:** Oplate kontrolirane propusnosti (*engl. Controlled Permeability Formwork, CPF*) sastoje se od vlaknaste membrane koja upija višak vode i zraka iz površinskog sloja betona. Samim time, vodocementni omjer površinskog, zaštitnog sloja betona ostaje manji u odnosu na preostali presjek betonskog elementa. Cilj ispitivanja je odrediti utjecaj dvije različite vrste CPF oplate na mehanička i trajnosna svojstva zaštitnog sloja betona. Tijekom ispitivanja varirana je debljina zaštitnog sloja betona (3 i 5 cm) te se oplata ponovno koristila nakon što je pripremljena prva grupa uzoraka, kako bi se razmotrila mogućnost višestrukog korištenja CPF oplate. Tijekom rada ispitivana su sljedeća mehanička i trajnosna svojstva: brzina ultrazvuka, indeks sklerometra, čvrstoća prijanjanja, plinopropusnost i kapilarno upijanje. Svojstva zaštitnog sloja betonskih elemenata pripremljenih u CPF oplatama uspoređena su sa svojstvima zaštitnog sloja betonskog elementa pripremljenog u običnoj oplati.

**Ključne riječi:** oplate; apsorpcijski materijali; trajnost; plinopropusnost; prionjivost

## THE INFLUENCE OF CONTROLLED PERMEABILITY FORMWORKS ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE COVER

**Abstract:** Controlled permeability formworks (CPF) are made from fibrous membranes which absorb the excess water and air from the surface layer of fresh concrete. By this mechanism, the surface layer of concrete with lower water-to-cement ratio, compared to the inner concrete, is created. The aim of the experimental research was to evaluate and compare the influence of two commercially available CPF materials on mechanical and durability properties of concrete. During preparation of concrete elements thickness of concrete cover was varied (3 and 5 cm). Also, once the set of samples was prepared, the same formwork was used again, to evaluate the possibility of multiple usage of the same material. Following mechanical and durability tests were performed: ultrasonic test, rebound number test, pull-off, gas permeability and capillary absorption test. Properties of concrete prepared with CPF were compared to the properties of concrete prepared in traditional wooden formworks.

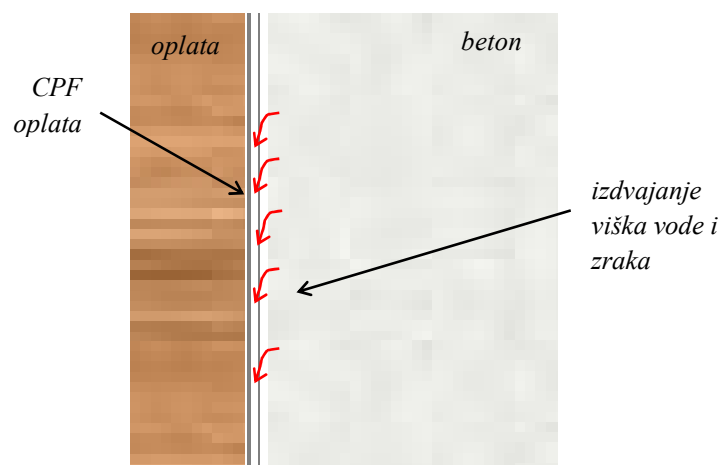
**Keywords:** formwork; absorption materials; durability; gas permeability; bond strength

## 1 Uvod

Trajnost betonskih konstrukcija postala je glavni predmet razmatranja inženjera i znanstvenika jer su mnoge građevine kojima je predviđeni uporabni vijek 50-100 godina (brane, tuneli, mostovi i druge inženjerske građevine) počele drastično propadati nakon 20-25 godina uporabnog vijeka. U današnje vrijeme veliki postotak svih sredstava koja se troše u graditeljstvu otpada na troškove rekonstrukcije, popravaka i održavanja. Još uvijek je česta zabluda da se povećavanjem razreda tlačne čvrstoće betona povećava i njegova trajnost. Primjeri u praksi su pokazali da postoji veliki broj građevina koje su ispravno projektirane i dimenzionirane, ali unatoč tomu propadaju jer se zanemarilo okolišno opterećenje koje će na te građevine djelovati tijekom uporabnog vijeka.

Trajnost armiranobetonske konstrukcije ostvaruje se pravilnim projektiranjem, odabirom materijala, izvođenjem i održavanjem tijekom uporabnog vijeka. Iskustva s postojećim armiranobetonskim konstrukcijama ukazuju da je u najvećem broju slučajeva preuranjeno dotrajavanje građevina prouzročeno nedovoljnom pozornošću o zahtjevima trajnosti tijekom gradnje, čak i kada su ti zahtjevi propisani u projektu. Problem trajnosti betona tijekom uporabnog vijeka uglavnom se svodi na mogućnost prodora štetnih tvari u beton, koji omogućuje porozna struktura betona. Najvažniji dio betona koji sprječava prodor štetnih tvari u beton je zaštitni sloj betona koji je izložen djelovanju agresivnog okoliša [1]. Njegova važnost je posebno izražena kod armiranobetonskih konstrukcija u agresivnom okolišu, gdje zaštitni sloj štiti armaturu od prodora klorida, karbonatizacije i drugih štetnih utjecaja. Ako zaštitni sloj nije odgovarajući, to u konačnici dovodi do korozije armature, bujanja korozijskih produkata oko armature te razaranja betona. Primjer takvih okoliša su morski okoliš (razred izloženosti XS), okoliši u kojima je prisutna značajna karbonatizacija betona (razred izloženosti XC), okoliši u kojima su prisutni kloridi koji nisu iz mora (razred okoliša XD) i ostali [2, 3]. Upravo zbog tog razloga u tim razredima okoliša zahtijevana je puno veća debljina zaštitnog sloja. Dakle, da bi čitav betonski element bio zaštićen od prodora štetnih tvari, glede karakteristika propusnosti ključno je izvođenje kvalitetnog zaštitnog sloja u dovoljnoj debljini za pojedino okolišno opterećenje. Tijekom izvođenja nužno je sustavno kontroliranje izvedenog zaštitnog sloja na što većem broju mjernih mjesta.

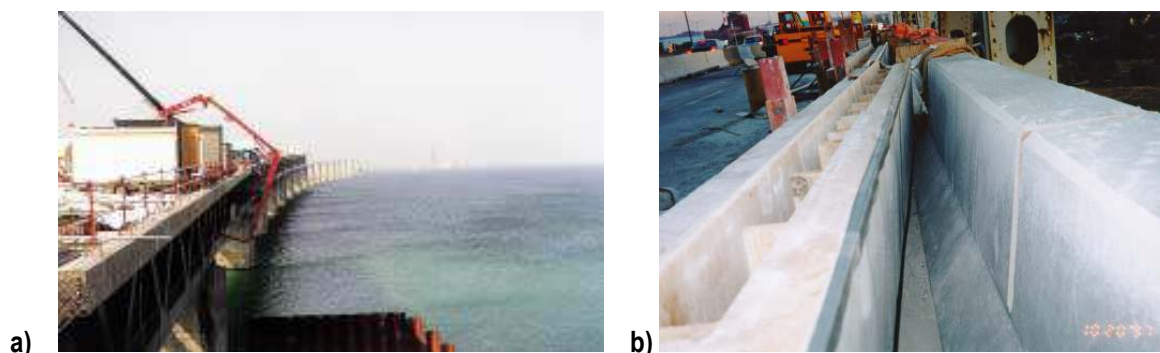
Osim projektiranja i osiguravanja dovoljne debljine zaštitnog sloja betona, moguća je i primjena nekih od metoda poboljšavanja svojstava zaštitnog sloja, poput poboljšavanja svojstava betona kemijskim i mineralnim dodatcima, korištenja hidrofobnih impregnacija ili premaza. Jedna od metoda je i korištenje tzv. oplata kontrolirane propusnosti (*engl. Controlled Permeability Formwork, CPF*), razvijenih početkom 90-tih godina 20. stoljeća [4]. CPF se danas proizvodi uglavnom od polipropilenskih folija koje se pričvršćuju uz drvenu, metalnu ili plastičnu oplatu te dreniranjem vode i zraka smanjuju vodocementni omjer u površinskom sloju betona (slika 1).



**Slika 1 - Princip djelovanja oplata kontrolirane propusnosti [5]**

Na taj način povećavaju se mehanička i trajnosna svojstva zaštitnog sloja betona te se uklanjaju šupljine i pore s površine betona, što takav beton čini prikladnim za uporabu kod povećanih zahtjeva trajnosti i estetske prirode [5, 6]. Kada se ugradi beton, na mjestu kontakta između oplata dolazi do dreniranja vode i zraka, ali ne i čestica cementa i pijeska. Sam proces dreniranja zasniva se na difuziji koja se odvija tečenjem iz okoline veće u okolinu manje gustoće. Difuzija je potpomognuta silama vibriranja, hidrostatskim pritiskom betona na foliju i

upijanjem materijala od kojeg je izrađena folija [6]. Kako se kod betonskih elemenata vrši zbijanje vibriranjem, voda ima tendenciju kretanja prema rubovima elemenata i sakupljanja uz samu oplatu te se na taj način stvara razlika između vodocementnog omjera i svojstva betona u zaštitnom sloju i betona unutar presjeka. Povećanjem vodocementnog omjera na dijelovima betona uz rub oplata, stvara se zaštitni sloj povećane propusnosti, čime se povećava mogućnost transporta agresivnih tvari u beton i degradacija betona zaštitnog sloja, te posljedično i betonskog elementa. Kod oplata kontrolirane propusnosti taj dio vode se uspješno odstranjuje i tako se dobiva površinski sloj betona smanjenog vodocementnog omjera koji je poboljšanih mehaničkih i trajnosnih svojstava u odnosu na preostali presjek betonskog elementa.



**Slika 2 - Primjeri primjene CPF oplata: a) most Øresund, Švedska – Danska; b) betonski odbojnici na mostu Champlain, Montreal, Kanada [4]**

U svijetu je primjena oplata kontrolirane propusnosti dominantna u agresivnim sredinama, gdje je povećana vjerojatnost prerane degradacije betona zbog raznih okolišnih opterećenja. To se prvenstveno odnosi na područja u blizini mora, ali i prometnice u područjima gdje dolazi do smrzavanja u pojedinim dijelovima godine te se one zbog tog razloga sole. Osim u navedenim područjima, uporaba oplata kontrolirane propusnosti česta je i u betonskim građevinama u industrijskim postrojenjima, termoelektranama i nuklearnim elektranama. Na slici 2 prikazana su dva primjera uporabe CPF oplata: a) prilikom betoniranja mosta Øresund, koji spaja Dansku i Švedsku te se nalazi u izuzetno agresivnom morskom okolišu; b) prilikom izrade novih predgotovljenih betonskih odbojnika na mostu Champlain, Montreal, Kanada, kao zamjena za stare odbojнике oštećene poradi smrzavanja i odmrzavanja [4].

## 2 Materijali i metode

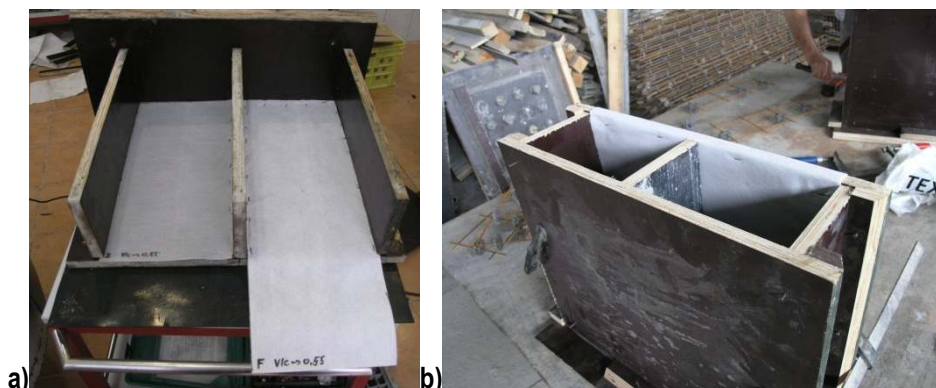
Eksperimentalni rad je proveden radi utvrđivanja utjecaja oplata kontrolirane propusnosti na mehanička i trajnosna svojstva zaštitnog sloja betona. U radu su ispitane dvije vrste oplata kontrolirane propusnosti od dva različita proizvođača, slika 3 (a), jedna vrsta nepletenih apsorbirajućih panela (oznaka Z) i jedna vrsta pletenih apsorbirajućih panela (oznaka F). Ispitivanja su obavljena na armiranim betonskim prizmama dimenzija 50x25x15 cm, slika 3 (b). Za potrebe ispitivanja korišten je beton razreda tlačne čvrstoće C25/30, razreda konzistencije S3, pripremljen s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm. Sastav betona dan je u tablici 1.

**Tablica 1 - Sastav betona**

Sastojak		Masa kg na m <sup>3</sup> betona
Cement	CEM I 42,5 R	350,0
Voda		175,0
Dodatak	MELCRET SPA	2,10
	0-4 mm prirodni	876,5
Agregat	4-8 mm drobljeni	189,5
	8-11 mm drobljeni	284,3
	11-16 mm drobljeni	473,8

Uzorci su nakon betoniranja postavljeni na vibracijski stol kako bi se izvukao višak zahvaćenog zraka tijekom miješanja svježeg betona.

Prilikom pripreme prizmi, varirana je vrsta oplata i debljina završnog sloja, 3 cm i 5 cm. Također su ispitana svojstva betona kod ponovne uporabe iste CPF oplata, kako bi se odredila mogućnost višestrukog korištenja iste oplata. Uzorci kod kojih je oplata korištena drugi puta pripremljeni su sa zaštitnim slojem od 5 cm. Ukupno je pripremljeno 8 armiranobetonskih uzoraka na kojima su provedena nerazorna ispitivanja, te su nakon provedenih nerazornih ispitivanja vađeni valjci promjera 10 cm na kojima su vršena preostala ispitivanja.



**Slika 3 - a) Dvije vrste CPF materijala korištenih u istraživanju: lijevo nepletenu CPF oplatu (oznaka Z), desno pletenu CPF oplatu (oznaka F); b) Kalupi za pripremu betonskih elemenata**

U tablici 2 dan je popis ispitivanja provedenih na 8 različitih pripremljenih uzoraka. Ispitivanja su podijeljena na terenske metode, odnosno ispitivanja koja se provode bez razaranja, i na laboratorijske metode, odnosno ispitivanja koja se provode na uzorcima betona izvađenim iz betonskih elemenata. U tablici je također dan pregled normi ili preporuka prema kojima je provedeno pojedino ispitivanje.

**Tablica 2 - Pregled provedenih ispitivanja i normi/preporukama prema kojima su provedena**

Način ispitivanja	Svojstvo	Norma ispitivanja/metoda
Terenska metoda - bez razaranja	Indeks sklerometra	HRN EN 12504-2
	Brzina prolaska ultrazvuka	HRN EN 12504-4
	Čvrstoća prianjanja	HRN EN 1542
	Plinopropusnost	Schönlin&Hilsdorf [8, 9]
Laboratorijska metoda - na izvađenim uzorcima	Plinopropusnost	RILEM TC 116-PCD [7]
	Kapilarno upijanje	

Većina korištenih metoda ispitivanja je normirana, te je uobičajeno korištena u građevinskoj praksi za ocjenu kvalitete betona u pogledu trajnosnih svojstava. Metode za laboratorijsko ispitivanje plinopropusnosti i kapilarnog upijanja još uvijek nisu normirane, ali su opisane i preporučene od strane tehničkog odbora 116-PCD unutar europske organizacije RILEM [7]. Terenska metoda za ispitivanje plinopropusnosti, koja je korištena u ovom radu, razvijena je 1987. godine [8]. Metoda se sastoji od prianjanja na površinu betona komore u kojoj se uz pomoć pumpe stvara podtlak, nakon čega se pušta da zrak iz betona ulazi u komoru i smanjuje razliku između pritiska u komori i atmosferskog pritiska. Nagib regresijskog pravca koji opisuje odnos prirodnog logaritma pritiska i vremena predstavlja indeks zrakopropusnosti u  $\ln(\text{bar})/\text{min}$ . U ovom radu korišten je jednostavniji oblik iste metode, razvijen na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [9], u kojem se umjesto ostvarivanja većeg podtlaka uz pomoć pumpe, u komori ostvaruje manji podtlak uz pomoć šprice. Na taj način u komori je moguće ostvariti podtlak od -700 mbar. Prednost ovakvog načina ispitivanja je izuzetno mala težina instrumenta. U tablici 3 dani su kriteriji za ocjenu kvalitete betona ovisno o indeksu sklerometra te o brzini prolaska ultrazvučnog vala kroz beton.

**Tablica 3 - Kriteriji za ocjenu kvalitete betona, ovisno o indeksu sklerometra i brzini ultrazvučnog vala [10]**

Indeks odskoka "R"	Brzina ultrazvučnog vala[km/s]	Kvaliteta betona
>40	3,5 - 4,5	Dobar
30 - 40	3,0 - 3,5	Prosječan
20 - 30	2,0 - 3,0	Loš
<20	<2,0	Površinske pukotine

U tablici 4 dani su kriteriji za ocjenu kvalitete betona ovisno o kapilarnom upijanju te o plinopropusnosti ispitanoj u laboratoriju (koeficijent plinopropusnosti) i na terenu (indeks plinopropusnosti).

**Tablica 4 - Kriteriji za ocjenu kvalitete betona ovisno o svojstvima penetrabilnosti [10]**

Kapilarno upijanje S [kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> ]	Plinopropusnost [cm <sup>2</sup> ]	Indeks plinopropusnosti [ln(bar)/min]	Kakvoća betona
<0,3	< 10 <sup>-14</sup>	>0,10≤0,50	Dobar
0,3-0,6	10 <sup>-14</sup> – 10 <sup>-12</sup>	>0,50≤0,90	Srednji
>0,6	> 10 <sup>-12</sup>	>0,90	Loš

Kriteriji iz tablice 3 i 4 korišteni su tijekom analize dobivenih rezultata te se uz pomoć njih kvaliteta ispitanih betona svrstava u određenu kategoriju.

### 3 Rezultati i rasprava

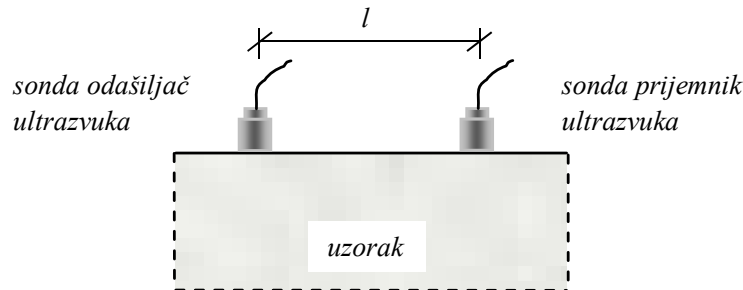
#### 3.1 Utjecaj oplata na homogenost betona

Smanjenje šupljina i površinskih nepravilnosti na betonskim elementima nije bitno samo iz estetskih razloga, već i iz trajnosnih, s obzirom na to da upravo površinske nepravilnosti omogućavaju prolaz vode u unutrašnjost betonskog elementa. Istraživanja provedena na betonskim elementima pripremljenim u oplatama obloženim CPF materijalima pokazala su da se količina šupljina kod obične oplata kreće oko 1,0% površine betonskog elementa, dok je kod oplata kontrolirane propusnosti količina šupljina manja od 0,1% površine betonskog elementa [11]. Folije mogu utjecati i na boju same površine betona. Površina s korištenim folijama će biti gotovo bez šupljina, ali ne može garantirati jedinstvenu boju. Osnovni problem koji nastaje nakon korištenja oplata kontrolirane propusnosti je površina koja je hrapava i tamno siva i iako je bez šupljina, boja nije jednolika po cijeloj površini (slika 4).



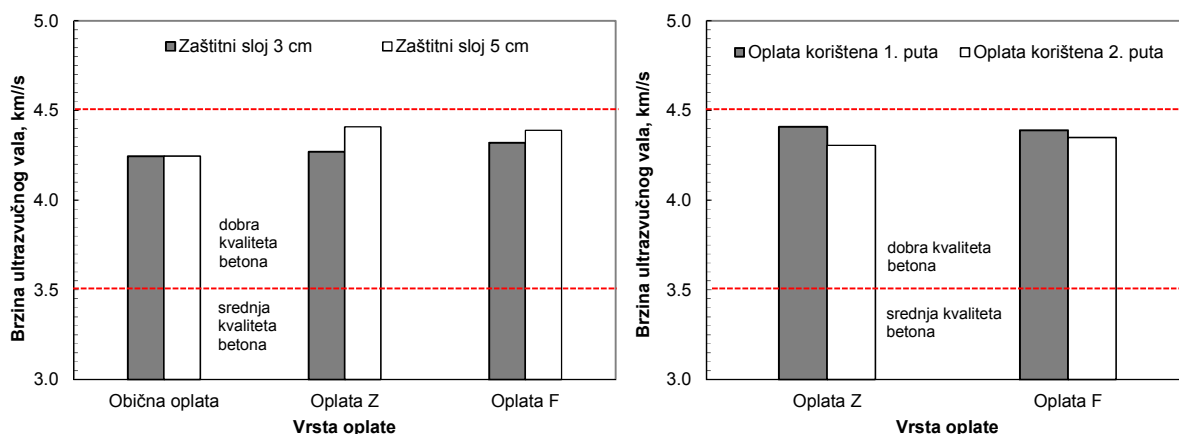
**Slika 4 - Površina betonskog elementa pripremljenog u CPF oplati (lijevi uzorak) i u klasičnoj drvenoj oplati (desni uzorak)**

Kako bi se odredio utjecaj CPF oplata na homogenost betona, provedeno je ispitivanje brzine prolaza ultrazvučnih valova kroz površinu betonskog elementa indirektnom metodom (obje sonde su prislonjene na istu površinu betona, slika 5).



**Slika 5 - Shematski prikaz indirektnog mjerenja brzine prolaza ultrazvučnog vala**

Na slici 6 (a) prikazani su rezultati ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog vala kroz betonske elemente betonirane u običnoj oplati, te u CPF oplati oznake Z i CPF oplati oznake F, sa zaštitnim slojem od 3 i od 5 cm. Na slici 6 (b) prikazani su rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog vala kroz betonski element pri ponovnom korištenju CPF oplata. Na dijagramima su crtkanim linijama označene kategorije kvalitete betona, prema kriterijima iz tablice 3.



**Slika 6 - a) Brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz ispitane uzorke sa zaštitnim slojem od 3 i 5 cm; b) Brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz ispitane uzorke sa zaštitnim slojem od 5 cm na kojima je oplata drugi puta korištena**

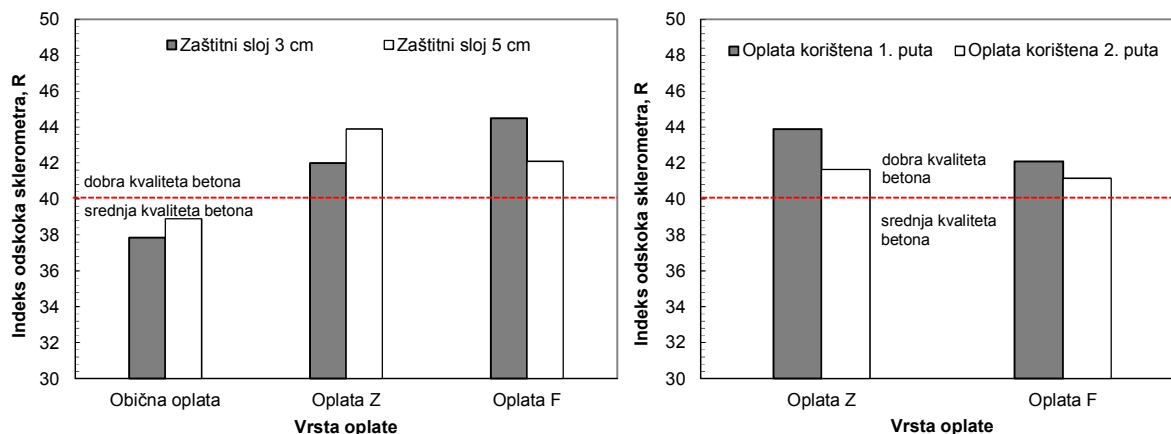
Brzina prolaza ultrazvučnog vala kod uzoraka izrađenih pomoću CPF oplata neznatno je veća u usporedbi s brzinom kod uzoraka izrađenih u običnoj oplati. Vidljivo je da je doprinos CPF oplata veći kada je zaštitni sloj betona veći. Kod ponovne uporabe oplata učinkovitost neznatno opada. Ovisno o brzini prolaza ultrazvučnog vala, svi uzorci se mogu okarakterizirati kao betoni dobre kvalitete, prema kriterijima danim u tablici 3.

### 3.2 Utjecaj oplata na mehanička svojstva

Nerazorne, indirektno metode ispitivanja površinske čvrstoće, kao što je ispitivanje indeksa sklerometra, obično se koriste u procjeni tlačne čvrstoće betona. Kod takvih metoda ispitivanja čvrstoće betona na rezultate ispitivanja utječe širok izbor mogućih promjena na ispitnim uzorcima, uključujući površinsku glatkoću, tip korištenog agregata te tip korištene oplata. Dosadašnja ispitivanja betona pripremljenih u oplatama kontrolirane propusnosti pokazala su da će CPF oplata povećati visinu odskoka za 10-18% ako se oplata koristi za pripremanje betona uobičajenih razreda čvrstoće C10/12 – C30/37 [12]. Ako se pripremanju betoni visokih čvrstoća, razreda C50/60

pa na više, utjecaj na povećanje čvrstoće ipak je manji. Povećanje površinske čvrstoće nastaje zbog povećanja tvrdoće površinskog sloja betona, zbog odsustva nepoželjnih šupljina koja se javljaju kod pripremanja betona u klasičnoj oplati.

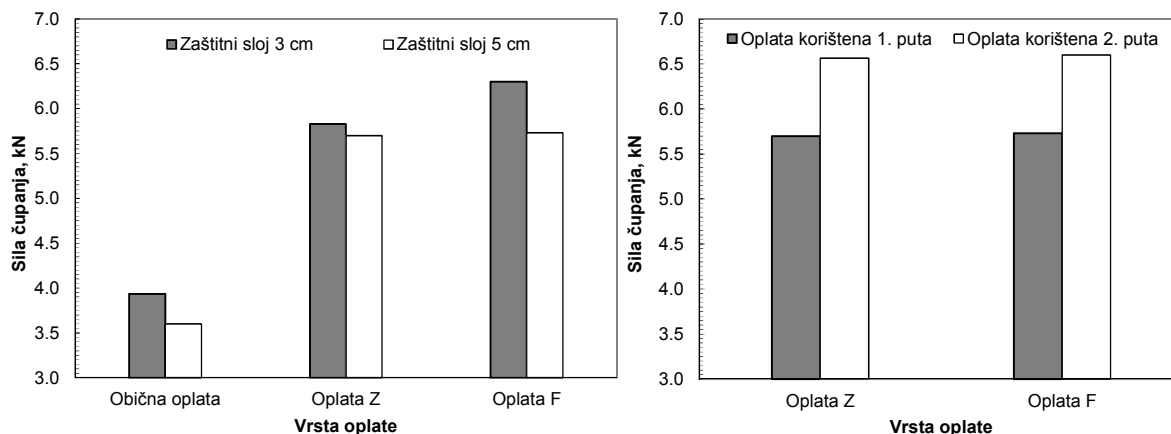
Kako bi se odredio utjecaj CPF oplata na mehanička svojstva, provedeno je ispitivanje mjerenja indeksa sklerometra te mjerenje sile prijanjanja tzv. metodom pull-off. Na slici 7 (a) prikazani su rezultati ispitivanja indeksa odskoka sklerometra na betonskim elementima betoniranim u običnoj oplati, te u CPF oplati oznake Z i F, sa zaštitnim slojem od 3 i od 5 cm. Na slici 7 (b) prikazani su rezultati ispitivanja indeksa odskoka sklerometra na betonskim elementima pri ponovnom korištenju CPF oplata. Na dijagramima su crtkanim linijama označene kategorije kvalitete betona, prema kriterijima iz tablice 3.



**Slika 7 - a) Indeks odskoka sklerometra ispitivan na uzorcima sa zaštitnim slojem od 3 i 5 cm; b) Indeks odskoka sklerometra ispitivan na uzorcima sa zaštitnim slojem od 5 cm na kojima je oplata drugi puta korištena**

Grafički prikaz rezultata površinskih tvrdoća na slici 6 pokazuje povećanje površinske tvrdoće kod uzoraka izrađenih pomoću oplata kontrolirane propusnosti za prosječno 15% kod prve uporabe apsorbirajuće folije u slučaju zaštitnog sloja od 3 i od 5 cm, dok je taj utjecaj kod ponovne uporabe nešto manji i iznosi oko 10%. Ovisno o indeksu odskoka sklerometra, beton izrađen u oplatama kontrolirane propusnosti u svim slučajevima spada u skupinu betona dobre kvalitete, dok beton izrađen u običnoj oplati spada u skupinu betona srednje kvalitete.

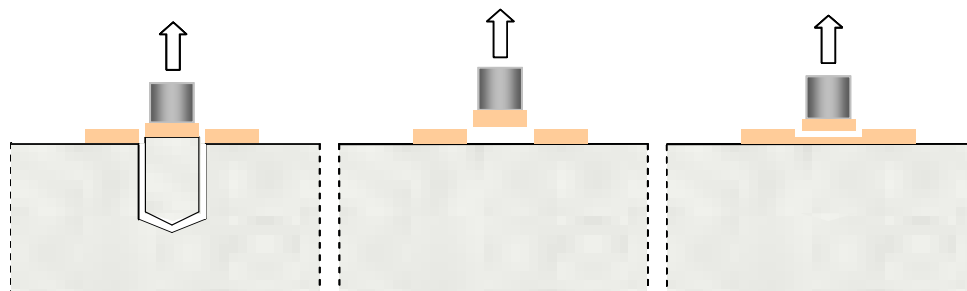
Na slici 8 (a) prikazani su rezultati ispitivanja sile prijanjanja na betonskim elementima betoniranim u običnoj oplati, te u CPF oplati oznake Z i F, sa zaštitnim slojem od 3 i od 5 cm. Na slici 8 (b) prikazani su rezultati sile prijanjanja na betonskim elementima pri ponovnom korištenju CPF oplata.



**Slika 8 - a) Sila prijanjanja ispitana na uzorcima sa zaštitnim slojem od 3 i 5 cm; b) Sila prijanjanja ispitana na uzorcima sa zaštitnim slojem od 5 cm na kojima je oplata drugi puta korištena**

Grafički prikaz rezultata sile priranja pokazuje povećanje vlačne čvrstoće kod uzoraka izrađenih pomoću oplata kontrolirane propusnosti za prosječno 60% kod prve uporabe apsorbirajuće folije u slučaju zaštitnog sloja od 3 i od 5 cm, dok taj utjecaj kod ponovne uporabe iznosi oko 80%.

Prilikom ispitivanja sile priranja dolazi do sloma najslabijeg sloja betona. U slučaju betona s više slojeva, slom se može dogoditi u podložnom betonu (a), između podložnog betona i površinskog sloja (b) te u samom površinskom sloju, slika 9.



**Slika 9 - Različiti modovi sloma betona s površinskim slojem: a) slom u podložnom betonu, b) slom između podložnog betona i površinskog sloja, c) slom u površinskom sloju**

U slučaju CPF oplata slom se tijekom ispitivanja događao na većim debljinama površinskog sloja betona. S obzirom da je CPF oplata djelovala na način da je stvorila sloj poboljšanih svojstava na površinskom dijelu betona, taj dio se zapravo ponaša kao posebni sloj betona. Slom se, dakle, kod takvih uzoraka ne događa u tom površinskom sloju, već dublje u betonskom elementu gdje je sloj jednakim svojstava kao i beton pripremljen u klasičnoj oplati. Potrebna je puno veća sila kako bi se naprezanje proširilo do podložnog sloja betona i uzrokovalo slom, što je i vidljivo kod izuzetnog povećanja sile priranja. Slomovi različitih uzoraka vidljivi su na slici 10: a) beton pripremljen u CPF oplati oznake F, b) beton pripremljen u CPF oplati oznake Z, c) beton pripremljen u klasičnoj oplati.

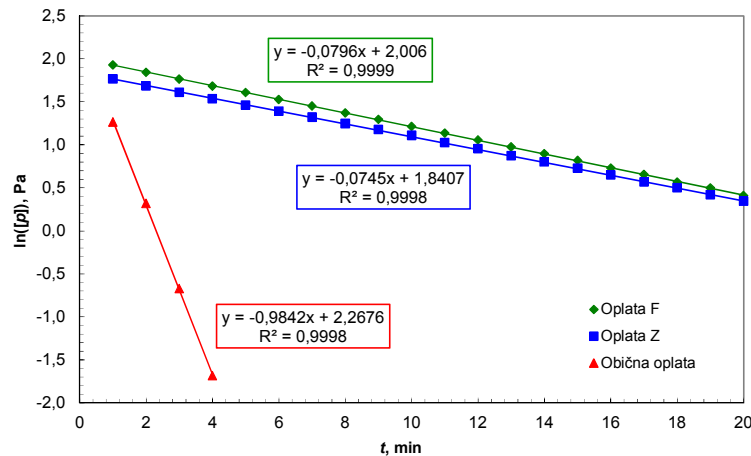


**Slika 10 - Slomovi betona pripremljenih u: a) CPF oplati oznake F, b) CPF oplati oznake Z, c) klasičnoj oplati**



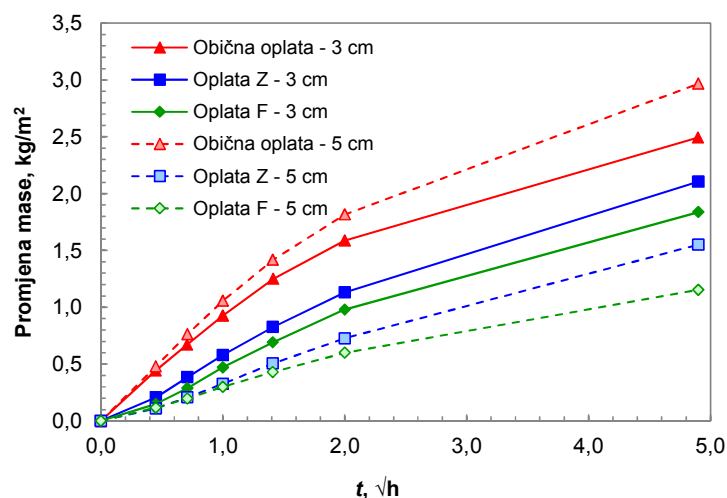
### 3.3 Utjecaj oplata na trajnosna svojstva

Rezultati dosadašnjih istraživanja pokazali su da CPF oplata smanjuju upijanje vode za gotovo 80% u odnosu na betone pripravljene su klasičnoj oplati [13]. Slično je primijećeno i kod ostalih trajnosnih svojstava [14]. Kako bi se ocijenio utjecaj CPF oplata na svojstva propusnosti, provedeno je nerazorno ispitivanje plinopropusnosti pomoću metode APIS [9] te su izvađeni valjci promjera 10 cm na kojima je provedeno ispitivanje kapilarnog upijanja i plinopropusnosti, prema RILEM preporukama [7].



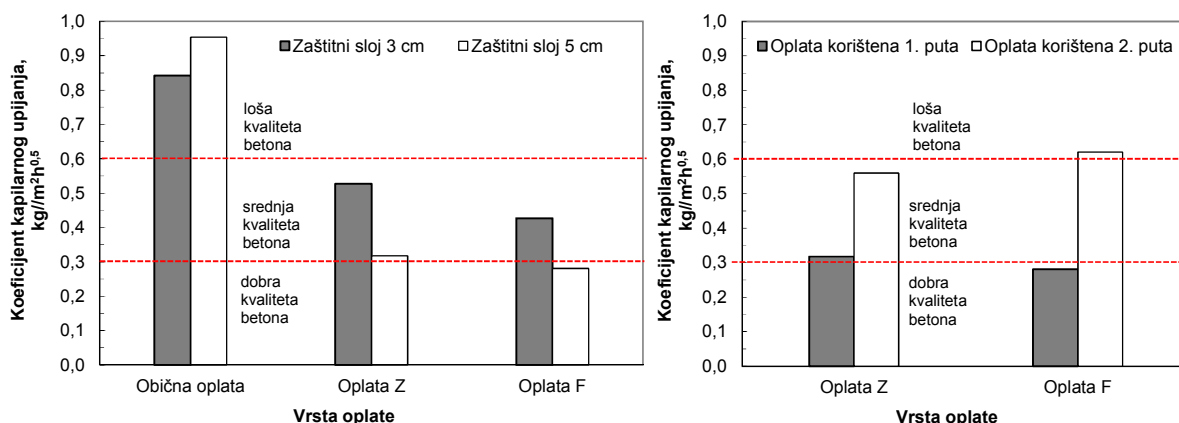
**Slika 11 - Promjena pritiska unutar ispitne komore u vremenu tijekom ispitivanja zrakopropusnosti betona pripravljenog u klasičnoj i u CPF oplatama**

Na slici 11 prikazan je pad pritiska unutar ispitne komore u vremenu, tijekom ispitivanja plinopropusnosti površinskog sloja betona. Uređaj očitava pad pritiska unutar komore u određenim vremenskim intervalima; kod betona smanjene plinopropusnosti ispitivanje traje duže i dostupno je više mjernih točaka, dok je kod betona veće plinopropusnosti ispitivanje kraće te je dostupno manje mjernih točaka. Iz dijagrama je vidljivo da zrak iz betona u komoru ulazi višestruko puta sporije u slučaju betona pripravljenih u CPF oplatama, u usporedbi s betonom pripravljenim u klasičnoj oplati. Nagib pravca koji opisuje odnos prirodnog logaritma pritiska i vremena predstavlja indeks zrakopropusnosti u  $\ln(\text{bar})/\text{min}$ . Ako se promatra nagib pravca, vidljivo je da je indeks zrakopropusnosti betona pripravljenih u CPF oplati preko 10 puta manji od indeksa betona pripravljenog u klasičnoj oplati. Uzimajući u obzir kriterije iz tablice 4, beton pripravljen u klasičnoj oplati spada u kategoriju lošeg betona, dok betoni pripravljeni u CPF oplatama spadaju u kategoriju jako dobrog betona.



**Slika 12 - Promjena mase uzoraka u vremenu tijekom ispitivanja kapilarnog upijanja**

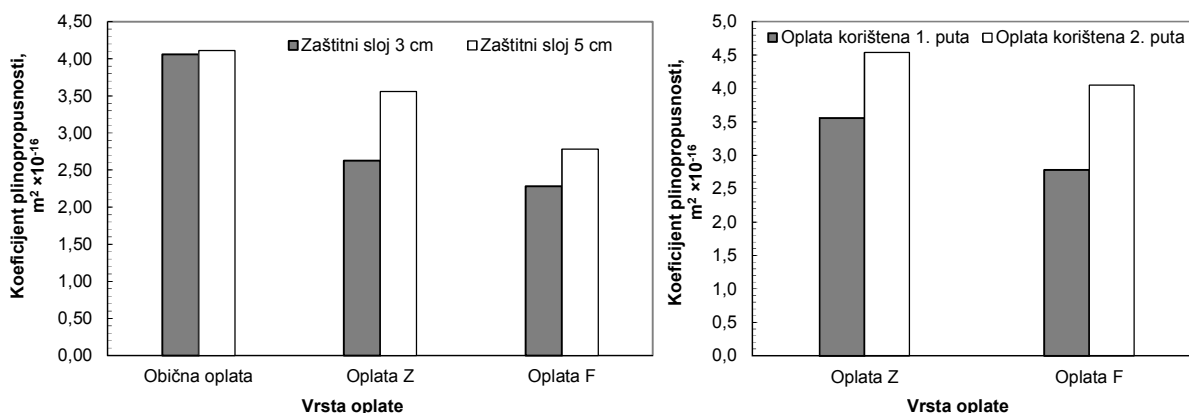
Na slici 12 prikazana je promjena mase uzorka tijekom ispitivanja kapilarnog upijanja. Iz promjene mase u vremenu vidljivo je značajnije upijanje u slučaju betona pripremljenih u običnoj oplati u usporedbi s betonima pripremljenim u oplatama kontrolirane propusnosti. Iz rezultata prikazanih na slici 12 proračunati su koeficijenti kapilarnog upijanja. Na slici 13 (a) prikazani su izračunati koeficijenti kapilarnog upijanja za beton pripremljen u običnoj oplati, te u CPF oplati oznake Z i F, sa zaštitnim slojem od 3 i od 5 cm. Na slici 13 (b) prikazani su izračunati koeficijenti kapilarnog upijanja pri ponovnom korištenju CPF oplata. Na dijagramima su crtkanim linijama označene kategorije kvalitete betona, prema kriterijima iz tablice 4.



**Slika 13 - a) Koeficijent kapilarnog upijanja izračunat za uzorke sa zaštitnim slojem od 3 i 5 cm; b) Koeficijent kapilarnog upijanja izračunat za uzorke sa zaštitnim slojem od 5 cm na kojima je oplata drugi puta korištena**

Grafički prikaz rezultata kapilarnog upijanja kod uzoraka pripremljenih u CPF oplatama ukazuje na smanjenje vodoupojnosti betona za 10% kod zaštitnog sloja od 3 cm, te 55% kod zaštitnog sloja od 5 cm, u odnosu na beton pripremljen u klasičnoj oplati. Kod ponovne uporabe apsorbirajućih folija smanjenje vodoupojnosti je smanjeno u odnosu na rezultate kada je oplata korištena prvi puta. Prema kriterijima iz tablice 4, beton izrađen u CPF oplati spada u kategoriju srednje i dobre kvalitete betona, dok beton u klasičnoj oplati spada u kategoriju loše kvalitete.

Na slici 14 (a) prikazani su rezultati ispitivanja plinopropusnosti na valjcima izvađenim iz betonskih elemenata pripremljenih u običnoj oplati, te u CPF oplati oznake Z i F, sa zaštitnim slojem od 3 i od 5 cm. Na slici 14 (b) prikazani su rezultati ispitivanja plinopropusnosti na valjcima izvađenim iz betonskih elemenata pri ponovnom korištenju CPF oplata.



**Slika 14 - a) Koeficijent plinopropusnosti uzoraka sa zaštitnim slojem od 3 i 5 cm; b) Koeficijent plinopropusnosti uzoraka sa zaštitnim slojem od 5 cm na kojima je oplata drugi puta korištena**

Grafički prikaz rezultata i omjera plinopropusnosti kod uzoraka izrađenih pomoću CPF oplata pokazuje smanjenje plinopropusnosti za 40% kod zaštitnog sloja od 3 cm te 30% kod zaštitnog sloja od 5 cm. Kod ponovne uporabe apsorbirajućih folija smanjenje plinopropusnosti je zanemarivo malo ili ga čak niti nema. Prema kriterijima iz tablice 4, betonski uzorci na kojima je provedeno ovo ispitivanje spadaju u kategoriju dobre kvalitete betona bez obzira na način izrade i debljinu zaštitnog sloja.

## 4 Zaključak

Svrha ovog rada bila je ispitati utjecaj oplata kontrolirane propusnosti na povećanje trajnosnih svojstava betona, prvenstveno zaštitnog sloja betona. Usporedba je obavljena na betonskim uzorcima izrađenima u običnoj drvenoj oplati te u dvije vrste komercijalno dostupnih oplata kontrolirane propusnosti. Ispitivanja su pokazala da se primjenom CPF oplata kod ispitanih betona povećavaju mehanička i trajnosna svojstva zaštitnog (površinskog sloja) betona. Najizraženiji utjecaj je na vlačnu čvrstoću površinskog sloja ispitane metodom pull-off, te na svojstva penetrabilnosti (kapilarno upijanje i plinopropusnost).

Pozitivan utjecaj CPF oplata značajan je bez obzira na debljinu zaštitnog sloja betona. Pozitivan utjecaj je također vidljiv i kada se beton priprema u već korištenoj oplati, što ukazuje na mogućnost ponovnog korištenja iste oplata nakon uklanjanja izbetoniranog i očvrstelog elementa. Ispitivanja su pokazala da je površinski sloj koji nastaje prilikom pripremanja betona u CPF oplata i do 80% puta otporniji na prodor zraka i na kapilarno upijanje vode. Ako se uzme u obzir da su upravo ta dva svojstva presudna za trajnost betona u agresivnom okolišu, moguće je zaključiti da bi se primjenom ovakvih apsorbirajućih oplata znatno moglo utjecati na produljenje uporabnog vijeka konstrukcija, bez potrebe mijenjanja sastava betona.

S obzirom da primjena CPF oplata povećava cijenu betonskih radova, za praktičnu primjenu u daljnjim istraživanjima treba ispitati učinkovitost višestrukog korištenja CPF oplata, npr. 5 – 10 puta, te učinkovitost kod drugih vrsta betona (različiti konzistencija i razreda tlačne čvrstoće). Također, posebnu pažnju potrebno je posvetiti u slučaju korištenja ovih oplata kod betona koji ostaju vidljivi u konstrukciji, s obzirom na specifičan izgled površine betona.

## LITERATURA

- [1] Bjegović, D.; Stipanović Oslaković, I.; Jelčić, M. 2008: Degradacijski procesi, Betonske konstrukcije – Sanacije, Čandrić, Vinko (ur.), Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski Fakultet, Secon HDGK, Andris, str. 325-392
- [2] HRN EN 206:2006 Beton - 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost
- [3] Tehnički propis za betonske konstrukcije (NN 139/09)
- [4] Malone P. 1999: Use of Permeable Formwork in Placing and Curing Concrete, Vicksburg, MS, U.S. Army Engineer Research and Development Center
- [5] McKenna, P.; Baxi, C. 2008: The role of Controlled Permeability Formwork in life cycle design, London, GB, Taylor and Francis Group
- [6] Adam, A.A.; Molyneaux, T.; Patnaikunil, C.K. 2006: Controlled Permeability Formwork: recent developments, KhonKaen, Thailand: International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer
- [7] RILEM TC 116-PCD 1999: Permeability of concrete as a criterion of its durability, Recommendations Tests for gas permeability of concrete, Materials and Structures 32, pp. 174-179
- [8] Schönlin, K.; Hilsdorf, H. 1987: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures, Scanlon JM, (editor), Concrete durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, SP-100, ACI, pp. 207-226
- [9] Gabrijel, I.; Mikulić, D.; Bjegović, D.; Stipanović-Oslaković, I. 2008: In situ testing of the permeability of the concrete, Milano, IT: SACoMaTiS
- [10] Bjegović, D.; Serdar, M.; Stipanović Oslaković, I. 2010: Assessment of concrete properties in structures, Handbook of concrete durability, Kim, S.-H.; Ann, K.Y. (editor), Korea: Middleton Publishing Inc., pp. 131-179



- 
- [11] Marosszeky, M.; Chew, M.; Arioka, M.; Peck, P. 1993: Textile method to improve concrete durability, *Concrete International*, November, pp 37–42
- [12] Schubel, P.J.; Warrior, N.A.; Elliott, K.T.; Jones, M. 2007: An Investigation in to the critical factors affecting the performance of composite controlled permeable formwork liners: Part I – Drainage medium, *Construction and Building Materials*, pp 1-9
- [13] Basheer, P.A.M.; Sha'at, A.A.; Long, A.E. 1995: Controlled Permeability Formwork: Influence on carbonation and chloride ingress in concrete, *Proceedings of Concrete under Severe Conditions, Environment and loading*, Vol. 2, (Ed K Sakai; N Banthiaand O E Gjorv), E & F N Spon, pp 1205–1215
- [14] Basheer, L.; Nanukuttan, S.V.; Basheer P.A.M. 2008: The influence of reusing 'Formtex' controlled permeability formwork on strength and durability of concrete, *Materials and Structures* 41, pp. 1363–1375