

IZVEŠTAJ:

„Uputstvo za korisnike nusproizvoda i upotrebu sekundarnih sirovina u izgradnji puteva“ preuzeto iz

<http://www.rmrc.unh.edu/tools/uguidelines/cfa51.asp>

**Projekat za Republiku Srbiju G2G09/SB/5/4 u okviru
kratkog G2G programa**

Upotreba sekundarnih građevinskih materijala poput šljake, elektrofilterskog pepela i rudne jalovine iz rudnika u infrastrukturnim projektima

Agentschap NL TerrAdvies
EVD Unit Internationale Publieke Samenwerking
Postbus 20105 15 oktober 2010
2500 EC Den Haag rapportnummer 20104201-definitive

Sadržaj

1 OPIS ELEKTROFILTERSKOG PEPELA	1
1.1 Poreklo	1
1.2 Sadašnje mogućnosti primene	2
1.2.1 Reciklaža	2
1.2.2 Deponovanje	2
1.2.3 Državne regulative i specifikacije	2
1.3 Tržište	3
1.4 Primena u putogradnji i tehnološki zahtevi	5
1.4.1 Beton od portland cementa – dopuna vezivu	5
1.4.2 Asfaltni beton – kameno brašno	5
1.4.3 Stabilizovani noseći sloj – dopuna vezivu	5
1.4.4 Žitka ispuna (flowable fill) – Agregat ili dopuna vezivu	6
1.4.5 Materijal za nasipe ispune	6
1.5 Svojstva materijala	6
1.5.1 Fizička svojstva	6
1.5.2 Hemijska svojstva	6
1.6 Zaštita životne sredine	7
1.6.1 Zatvorena nasuprot neizolovanoj primeni	7
1.6.2 Izluživanje	8
1.6.3 Modelovanje	9
1.6.4 Ostala razmatranja	10
1.7 Reference	10
2 ASFALT BETON	13
2.1 Uvod	13
2.2 Učinak	13
2.3 Tehnološki zahtevi	14
2.3.1 Sušenje	14
2.3.2 Skladištenje	14
2.4 Tehnička svojstva	14
2.5 Projektovanje	15
2.5.1 Projektovanje mešavine	15
2.5.2 Statički proračun	15
2.6 Procedure tokom izgradnje	15
2.6.1 Rukovanje materijalom i skladištenje	15
2.6.2 Razastiranje i zbijanje	15
2.7 Zaštita životne sredine	16

2.8 Reference	16
3 BETON OD PORTLAND CEMENTA	17
3.1 Uvod	17
3.2 Učinak	17
3.3 Tehnološki zahtevi	18
3.3.1 <i>Kontrola porekla</i>	18
3.3.2 <i>Sušenje i vlaženje</i>	18
3.3.3 <i>Kontrola kvaliteta</i>	18
3.4 Tehnička svojstva	18
3.5 Projektovanje	21
3.5.1 <i>Projektovanje mešavine</i>	21
3.5.2 <i>Statički proračun</i>	22
3.6 Procedure tokom izgradnje	22
3.6.1 <i>Rukovanje materijalom i skladištenje</i>	22
3.6.2 <i>Mešanje, ugradnja i zbijanje</i>	22
3.6.3 <i>Negovanje betona</i>	22
3.6.4 <i>Kontrola kvaliteta</i>	23
3.7 Reference	23
4 NASIP ILI ISPUNA	25
4.1 Uvod	25
4.2 Učinak	25
4.3 Tehnološki zahtevi	25
4.3.1 <i>Kontrola vlažnosti</i>	25
4.4 Tehnička svojstva	26
4.5 Projektovanje	26
4.5.1 <i>Drenaža lokacije</i>	27
4.5.2 <i>Stabilnost kosina</i>	27
4.5.3 <i>Analiza kontrole erozije</i>	27
4.5.4 <i>Nosivost tla</i>	27
4.5.5 <i>Klimatski uslovi</i>	27
4.5.6 <i>Zaštita podzemnih cevi i betonskih elemenata</i>	28
4.6 Procedure tokom izgradnje	28
4.6.1 <i>Rukovanje materijalom i skladištenje</i>	28
4.6.2 <i>Ugradnja i zbijanje</i>	28
4.6.3 <i>Kontrola kvaliteta</i>	29
4.6.4 <i>Kontrola prašine</i>	29
4.6.5 <i>Drenaža/Zaštita od erozije</i>	29
4.7 Zaštita životne sredine	30

4.8 Nerešena pitanja	30
4.9 Reference	30
5 STABILIZOVANI GORNJI I DONJI NOSEĆI SLOJ	32
5.1 Uvod	32
5.2 Učinak	32
5.3 Tehnološki zahtevi	33
5.3.1 <i>Kontrola vlažnosti</i>	33
5.4 Tehnička svojstva	34
5.5 Projektovanje	36
5.5.1 <i>Projektovanje sastava mešavine za pucolanske stabilizacije (PSB)</i>	36
5.5.2 <i>Statički proračun</i>	37
5.6 Procedure tokom izgradnje	37
5.6.1 <i>Rukovanje materijalom i skladištenje</i>	37
5.6.2 <i>Mešanje, ugradnja i zbijanje pucolanskih stabilizacija</i>	37
5.6.3 <i>Negovanje</i>	39
5.6.4 <i>Vansezonska gradnja</i>	39
5.6.5 <i>Samovezujući elektrofilterski pepeo (klasa C)</i>	39
5.6.6 <i>Kontrola pojave pukotina</i>	40
5.7 Zaštita životne sredine	40
5.8 Reference	41
6 ŽITKA ISPUNA (FLOWABLE FILL)	43
6.1 Uvod	43
6.2 Tehnološki zahtevi	44
6.2.1 <i>Kontrola porekla</i>	44
6.2.2 <i>Kontrola vlažnosti</i>	44
6.3 Tehnička svojstva	44
6.4 Projektovanje	46
6.4.1 <i>Projektovanje mešavine</i>	46
6.4.2 <i>Statički proračun</i>	46
6.5 Procedure tokom izgradnje	47
6.5.1 <i>Rukovanje materijalom i skladištenje</i>	47
6.5.2 <i>Mešanje i ugradnja</i>	47
6.5.3 <i>Kontrola kvaliteta</i>	47
6.5.4 <i>Posebni uslovi</i>	48
6.6 Zaštita životne sredine	48
6.7 Reference	48

1. OPIS ELEKTROFILTERSKOG PEPELA

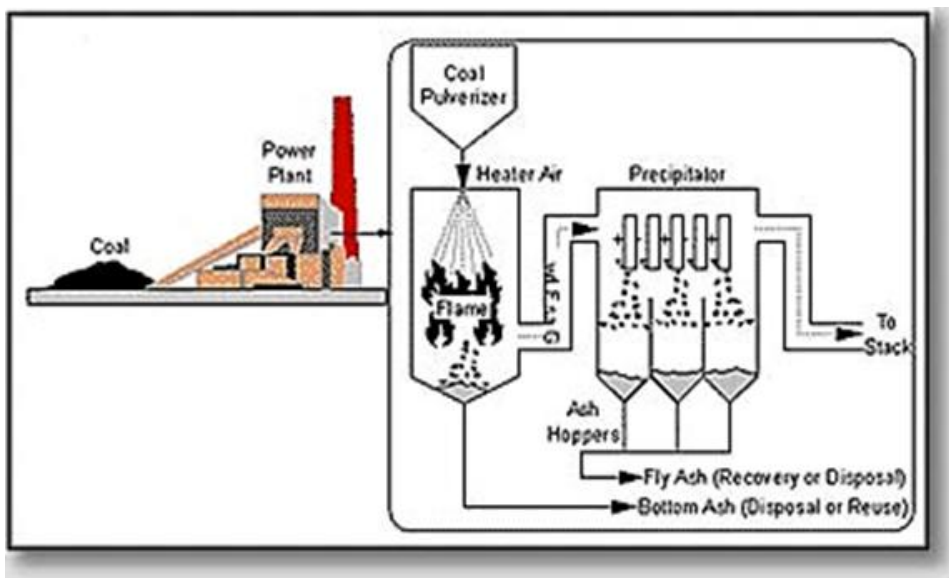
1.1 Poreklo

Elektrofilterski pepeo, koji se dobija sagorevanjem ugljene prašine u kotlovima za sagorevanje uglja, je fino mleveni, praškasti materijal koji se prenosi dimnim gasom. Pepeo se, obično, sakuplja pomoću elektrostatičkih taložnika, kontejnera za prikupljanje prašine ili uređaja za mehaničko prikupljanje, poput ciklona.

U proizvodnji energije primenjuju se tri načina uklanjanja pepela iz kotlovskog postrojenja: suvi, vlažni i ciklonski. U praksi se najčešće primenjuje suvi postupak.

Kada se ugljena prašina uklanja suvim postupkom, oko 80% sagorelog ostatka napušta peć kao elektrofilterski pepeo sadržan u dimnom gasu. Kod uklanjanja vlažnim postupkom (ili kod peći sa odvodom za šljaku), oko 50% pepela se zadržava u pećima, a drugih 50% se izdvaja sa dimnim gasom. Kod ciklonskog tipa, gde se kao gorivo koristi ugljena prašina, 70% do 80% pepela se zadržava kao šljaka u kotlu i samo se 20% do 30% izdvaja iz peći kao suv pepeo u dimnom gasu.⁽²⁾ Dijagram koji prikazuje uobičajeni tok proizvodnje elektrofilterskog pepela u kotlovski postrojenjima je predstavljen na slici br. 1.

Slika 1. Proizvodnja elektrofilterskog pepela u kotlovskim postrojenjima sa elektrostatičkim taložnikom



Američko udruženje za ugljeni pepeo (ACAA) je objavilo da je 2006. godine proizvedeno 65.7 miliona metričkih tona (72,4 miliona tona) elektrofilterskog pepela dobijenog iz uglja.⁽³⁾

Dodatne informacije o proizvodnji i upotrebi elektrofilterskog pepela u Sjedinjenim Američkim Državama se mogu dobiti na sledećim adresama:

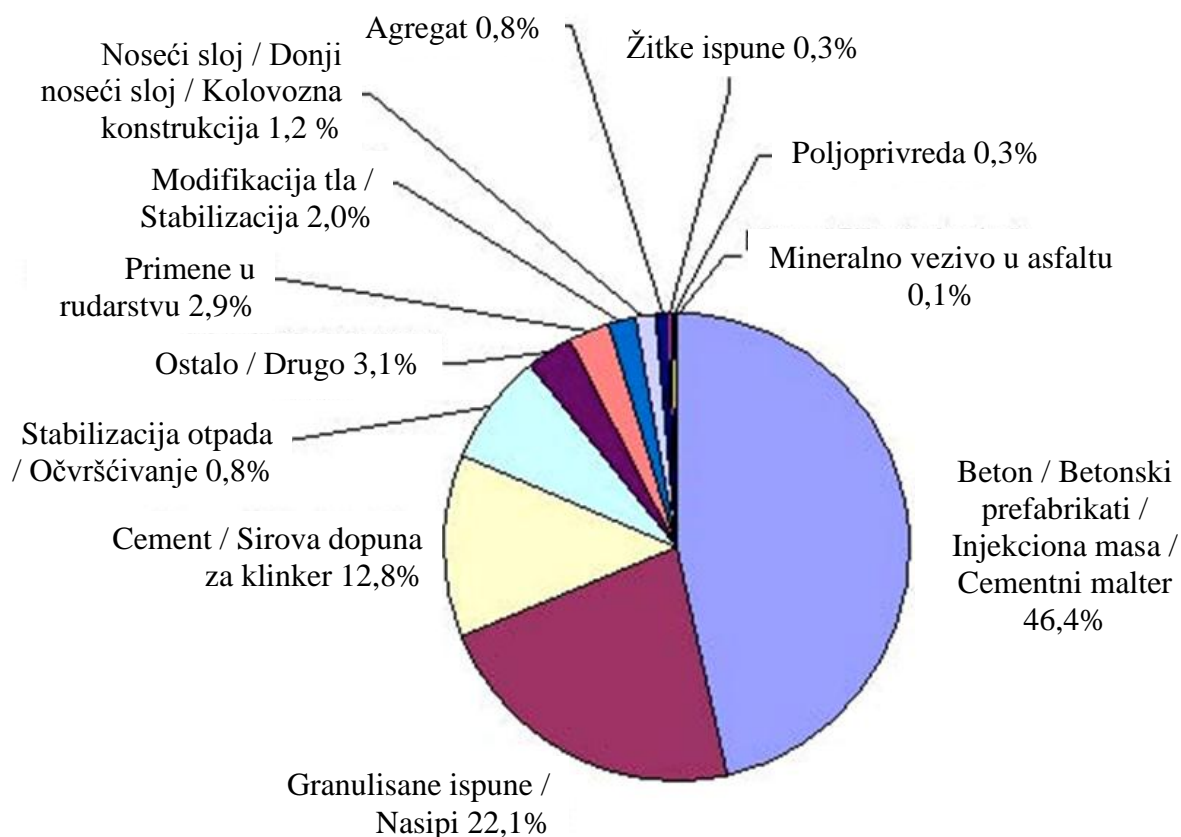
American Coal Ash Association (ACAA) 15200 E. Girard Ave., Ste. 3050 Aurora, CO 80014-3955 <http://www.acaa-usa.org/> Coal Combustion Products Partnership (C2P2) Office of Solid Waste (5305P) 1200 Pennsylvania Avenue, NW Washington, DC 20460 <http://www.epa.gov/epaoswer/osw/conserv/c2p2/index.asp> Electric Power Research Institute (EPRI) 3412 Hillview Road Palo Alto, California 94304 <http://my.epri.com/> Edison Electric Institute (EEI) 1701 Pennsylvania Avenue, N.W. Washington, D.C. 20004-2696 <http://www.eei.org/> Green Highways Partnership <http://www.greenhighways.org/index.cfm> AASHTO Center for Environmental Excellence 444 North Capitol Street, NW Suite 249 Washington, D.C., 20001 202-624-5800 <http://environment.transportation.org/>

1.2 Sadašnje mogućnosti primene

1.2.1 Reciklaža

U toku 2006. godine u SAD je kao sekundarna sirovina iskorišćeno približno 29,3 miliona metričkih tona (32,4 miliona tona) elektrofilterskog pepela, što predstavlja porast od 5% u odnosu na prethodnu godinu. Ovaj materijal je uglavnom upotrebljen u proizvodnji betona, betonskih prefabrikata i cementnog maltera. Na **slici 2.** je prikazano koliki procenat pepela je iskorišćen za proizvodnju pojedinih građevinskih materijala i konstrukcija – podaci iz 2006. godine.

Slika 2. Standardna primena elektrofilterskog pepela⁽³⁾



Elektrofilterski pepeo je koristan za raznovrsnu primenu, jer je u pitanju pucolan, odnosno silikatni ili alumino-silikatni materijal koji se u izolovanom obliku i u prisustvu vode kombinuje sa kalcijum-hidroksidom (iz kreča, portland cementa ili prašine iz peći za žarenje) i formira smese sa karakteristikama veziva.⁽⁴⁾

1.2.2. Deponovanje

U SAD je 2006. godine iskorišćeno oko 45% proizvedenog elektrofilterskog pepela, dok je oko 55% deponovano. Prema tome, postoji značajan prostor za dodatnu upotrebu. Poređenja radi, u Evropskoj Uniji (EU) se reciklira preko 90% čvrstog otpada nastalog sagorevanjem uglja, uključujući i elektrofilterski pepeo.

1.2.3 Državne regulative i specifikacije

Američka agencija za zaštitu životne sredine (EPA) je prenela odgovornost na savezne države kako bi osigurala ispravnu upotrebu nusproizvoda nastalih sagorevanjem uglja. Stoga, svaka država ima sopstvene regulative i specifikacije koje se tiču životne sredine. Mapa Nacionalne laboratorije za energetska tehnologija koja je povezana sa bazom podataka o državnim regulativama o eksploataciji i raspoloživosti nusproizvoda nastalih sagorevanjem uglja se može pronaći na:

Baza podataka državnih regulativa sadrži kratak sadržaj informacija o trenutnim regulativama u svakoj državi i kontakt nadležnih lica. Neke države dozvoljavaju slobodnu, dok se druge zalažu za ograničenu upotrebu elektrofilterskog pepela. Države su, uopšteno govoreći, najviše zabrinute zbog upotrebe pepela bez njegove izolacije od okolne sredine, npr. kod granuliranih (*structural*) ispuna, u rudarstvu i nasipanju. Pojedine države smatraju da su pre u pitanju aktivnosti odlaganja otpada nego ponovna upotreba ili reciklaža. ⁽⁷⁾

Propisi za upotrebu elektrofilterskog pepela, koje koriste sve savezne države obično donosi Američko udruženje za testiranje i materijale (ASTM) ili Američka asocijacija za državne autoputeve i transport. Lista je data u **Tabeli 1**.

Tabela 1. Propisi koji se primenjuju na ponovnu upotrebu elektrofilterskog pepela^(4;7)

Specifikacija	Naslov	Upotreba
ASTM D242-04	Mineralna ispunja (filer) za asfalt-betonske mešavine	Asfaltni beton
AASHTO M 172	Mineralna ispunja (filer) za asfalt-betonske mešavine	Asfaltni beton
ASTM C593-06	Elektrofilterski pepeo i drugi pucolani za upotrebu sa krečom	Stabilizacija tla
ASTM D 5239-04	Postupak za karakterizaciju elektrofilterskog pepela za upotrebu u stabilizaciji tla	Stabilizacija tla
ASTM E2277-03	Uputstvo za projektovanje i gradnju granuliranih ispuna od pepela dobijenog sagorevanjem uglja	Granulisana ispunja
ACI 232.2R	Upotreba elektrofilterskog pepela u betonu	Beton od portland cementa
ASTM C311-05	Uzorkovanje i ispitivanje elektrofilterskog pepela ili prirodnog pucolana za upotrebu u betonu od portland cementa	Beton od portland cementa
AASHTO M 295 ASTM C618	Ugljeni elektrofilterski pepeo i sirov ili kalcinisan prirodni pucolan za primenu kao mineralna primesa u betonu	Beton od portland cementa
ASTM C6103-04	Metoda ispitivanja konzistentnosti protoka materijala niske čvrstoće (CLSM)	Žitka ispunja
ACI 229R	Materijal niske čvrstoće (CLSM)	Žitka ispunja
ASTM D6024-02	Ispuštanje čeličnih kugli na material niske čvrstoće radi određivanja podobnosti pri opterećenju	Žitka ispunja

Internet stranica koju održava Savezna administracija za autoputeve (FHWA) poseduje biblioteku koja se može pretraživati i koja sadrži sve propise za autoputeve širom zemlje: <http://fhwapap04.fhwa.dot.gov/nhswp/index.jsp>

1.3 Tržište

Iako sve elektrane sa sagorevanjem uglja proizvode pepeo, većina preduzeća koristi usluge prodavaca komercijalnog pepela za prodaju elektrofilterskog pepela. Postoji oko 45 komercijalnih marketinških firmi za prodaju pepela koje posluju u svim američkim državama, osim Havaja. Pored komercijalnih marketinških organizacija koje prodaju pepeo, pojedine elektrane imaju formalne marketinške programe za pepeo. Većina ovih elektrana trenutno zapošljava specijalistu za upravljanje pepelom, čija je odgovornost da nadzire proizvodnju, kvalitet, upotrebu ili odlaganje pepela i da saraduje sa snabdevačima pepela. Kako bi se identifikovao izvor elektrofilterskog pepela, treba kontaktirati lokalnu uslužnu kompaniju ili posetiti internet stranice Američkog udruženja za ugljeni pepeo putem linka koji je gore naveden.

Zbog varijacija u sastavu uglja različitog porekla, kao i zbog razlika između modela kotlova za sagorevanje uglja, nisu svi elektrofilterski pepeli isti. Sastav i karakteristike pepela se razlikuju kod različitih energetskih postrojenja, ali dnevne varijacije kvaliteta jedne određene elektrane su obično

predvidive ukoliko su rad elektrane i izvor uglja konstantni. Ipak, značajne razlike u elektrofilterskom pepelu mogu nastati i kao posledica sagorevanja uglja sa drugim gorivima (poput prirodnog gasa ili drveta) ili sa drugim zapaljivim materijalima (poput komunalnog čvrstog otpada, starih automobilskih guma, itd.). Sve dok se osnovni parametri rada u termoelektranama ne promene, elektrofilterski pepeo iz poznatog izvora, koji se snabdeva iz renomiranih organizacija koje se bave pepelom, bi trebalo da bude postojan proizvod kontrolisanog kvaliteta. Ukoliko dođe do izmena tehnološkog procesa na samom postrojenju, npr. ugradnja uređaja za smanjenje emisija NO_x , sledeća tura pepela bi trebalo da se ponovo kategorizuje.

Postoje četiri tipa ili kategorije uglja, od kojih svaka varira u smislu toplotne vrednosti, hemijskog sastava, sadržaja pepela i geološkog porekla. U pitanju su lignit, bitumenizirani ugalj, delimično bitumenizirani ugalj i antracit.

Lignit, takođe poznat kao smeđi ugalj, jeste ugalj najniže klase i nema dobro definisan sastav. Lignit stvara velike količine pepela zbog nedovoljnog sagorevanja i visokog sadržaja vode. Delimično bitumenizirani ugalj ima svojstva i lignita i bitumeniziranog uglja. Pepeo bitumeniziranog uglja se sastoji od silicijum dioksida, aluminijum oksida, fero oksida i kalcijuma, sa promenljivim prisustvom ugljenika mereno gubitkom pri žarenju (loss on ignition - LOI). Za pepeo nastao sagorevanjem delimično bitumeniziranog uglja i lignita, u poređenju sa onim od bitumeniziranog uglja, karakteristične su više koncentracije kalcijuma i magnezijum oksida i niži procenat silicijum oksida i fero oksida, kao i niži sadržaj ugljenika. Antracit, koji sadrži male koncentracije nečistoća, nije značajno zastupljen u energetici. Samim tim su i količine pepela, nastale kao produkt sagorevanja ovog uglja, zanemarljive.

Elektrofilterski pepeo koji se koristi u betonu od portland cementa (PCC) mora biti u skladu sa zahtevima standarda C618 Američkog udruženja za ispitivanje materijala (ASTM).⁽⁹⁾ Ovim standardom su definisane dve vrste elektrofilterskog pepela: pepeo klase F i klase C.

Elektrofilterski pepeo koji se proizvodi sagorevanjem starijeg, tvrdog antracita ili bitumeniziranog uglja je obično pucolanski i označen je kao pepeo klase F, ukoliko mu je hemijski sastav u skladu sa zahtevima standarda C618 ASTM^(5;6) On obično sadrži manje od 10% negašenog kreča (CaO).^(5;10) Iako poseduje pucolanske osobine, staklasti silicijum dioksid i aluminijum oksid unutar pepela klase F zahtevaju neko sredstvo za poboljšanje vezivnih karakteristika, kao što je portland cement, živi ili gašeni kreč, uz prisustvo vode kako bi došlo do reakcije i dobijanja kalcijum - silikat hidrata (cementna jedinjenja).

Pepeo koji se dobija sagorevanjem mlađeg lignita ili delimično bitumeniziranog uglja, pored pucolanskih ima i svojstva samovezivanja (sposobnost stvrdnjavanja i očvršćavanja u prisustvu vode).⁽⁶⁾ Kada ovakav materijal ima hemijski sastav i zadovolji fizičke zahteve predviđene standardom C618 udruženja ASTM, označava se kao elektrofilterski pepeo klase C. Ovaj materijal uglavnom sadrži između 15% i 35% negašenog kreča (CaO).⁽¹⁰⁾ Većina pepela klase C ima svojstvo samovezivanja.

Kao posledica primene Ukaza o čistom vazduhu (*Clean Air Act*) Američke agencije za zaštitu životne sredine (EPA), mnoge termoelektrane su opremljene gorionikom za dodatnu redukciju količina NO_x .⁽¹¹⁾ Kratkotrajni efekat sagorevanja uglja u ovakvim postrojenjima je povećana vrednost gubitka pri žarenju. Promene u obliku i kvalitetu nesagorelog ugljenika u sastavu pepela nastalog u postrojenju sa redukovanim emisijama NO_x negativno se odražavaju na njegove karakteristike kod primene u betonu.⁽¹²⁾ Potrebno je istražiti sve aspekte procesa sagorevanja uglja sa dodatnom redukcijom NO_x u cilju istovremenog zadovoljenja odredaba Ukaza o čistom vazduhu i karakteristika elektrofilterskog pepela značajnih za primenu u putogradnji.

1.4 Primena u putogradnji i tehnološki zahtevi

1.4.1 Beton od portland cementa – dopuna vezivu

Poslednjih 70 godina elektrofilterski pepeo se koristi kao vezivni i mineralni dodatak betonu od portland cementa. Oko 50% recikliranog elektrofilterskog pepela se koristi u proizvodnji betona i betonskih prefabrikata, što čini najveću zasebnu upotrebu ove sirovine.⁽³⁾ On se, takođe, koristi i kao dopunski materijal u proizvodnji portland cementa i kao komponenta u portland - pucolanskom mešanom cementu.

Kvalitet elektrofilterskog pepela treba strogo pratiti kada se koristi za proizvodnju betona od portland cementa. Najbitnije karakteristike ovog materijala koje utiču na primenu u betonu su finoća, sadržaj vlage, gubitak pri žarenju i hemijski sastav. Pepeo koji se koristi u betonu mora, takođe, da poseduje dovoljno pucolanske reaktivnosti i mora da bude postojanog kvaliteta.

1.4.2 Asfalt beton – kameno brašno

Elektrofilterski pepeo se godinama koristi kao zamena za kameno brašno (filer) u mešavinama za izradu asfaltnog kolovoznog zastora. Filer se sastoji od čestica, koje su manje od 0,075 mm (sito br. 200) i funkcija mu je da ispunjava šupljine u gotovoj mešavini spremnoj za ugradnju. On poboljšava kohezivne karakteristike veznog sloja (odnosno bitumena) i stabilnost mešavine.⁽¹³⁾ Većina vrsta elektrofilterskog pepela zadovoljava granulometrijske karakteristike (frakcije zrna ispod 0,075 mm) i druge relevantne fizičke (neplastičnost) i hemijske (sadržaj organskih materija) zahteve specifikacija za kameno brašno.⁽⁴⁾

Kada se koristi kao veštački filer, elektrofilterski pepeo mora biti u suvom obliku. Pepeo koji se sakuplja u suvom obliku i skladišti u silosima ne zahteva dodatnu obradu. Neki izvori ovog materijala koji imaju visok sadržaj kreča (CaO), poput pepela klase C, mogu se iskoristiti kao dodatak za poboljšanje adhezije agregata i bitumenskog veziva u mešavinama za izradu asfaltnog kolovoznog zastora.⁽⁴⁾

1.4.3 Stabilizovan noseći sloj – dopuna vezivu

Stabilizovani gornji ili donji noseći slojevi su mešavine agregata i veziva, kao što je portland cement koji povećava čvrstoću, nosivost, i izdržljivost donjeg sloja kolovozne konstrukcije. Zbog sposobnosti da ispolji pucolanske osobine, ili svojstva samovezivanja, elektrofilterski pepeo se uspešno koristi kao vezivo ili dopuna vezivu u izradi stabilizovanog gornjeg nosećeg sloja kolovozne konstrukcije. Laboratorijska i terenska ispitivanja su pokazala da se elektrofilterski pepeo može koristiti u stabilizovanim gornjim ili donjim nosećim slojevima, odnosno uključiti u proračun fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.^(14;15;16;17)

Kad se koristi pucolanski tip pepela klase F, mora se dodati aktivator kako bi se podstakla pucolanska reakcija. Najčešće korišćeni aktivatori, ili hemijska veziva u pucolanom stabilizovanom materijalu (pozzolan-stabilized base - PSB), su kreč i portland cement, mada se koriste i cementna i krečnjačka prašina iz peći za žarenje.^(14;18) Kombinacija kreča, portland cementa i pucolanske prašine se takođe koristi u izradi pucolanskih stabilizacija.

Povoljne karakteristike pucolanskih stabilizacija (PSB) zavise od prirasta čvrstoće unutar mase koja nastaje pucolanskom reakcijom između pepela i aktivatora. Ova vezivna masa ima ulogu da drži zajedno zrna agregata, slično kao kod betona niske čvrstoće.

Samovezujući pepeo klase C ne zahteva aktivator i tako nudi ekonomičnije alternative za širok spektar primena u stabilizaciji. U Viskonsinu je upotreba ovog materijala u stabilizaciji značajno porasla zbog regulativa koje se tiču zaštite životne sredine i koje opisuju odgovarajuću upotrebu (NR 538, administrativni kod Viskonsina). Upotreba elektrofilterskog pepela u geotehničkim radovima zavisi od ekološke i mehaničke pogodnosti. Rezultati različitih ispitivanja su pokazali da stabilizacija pepelom klase C bez ikakvog aktivatora daje odlične rezultate.^(19;20;15;16;21)

1.4.4 Žitka ispunna (flowable fill) – agregat ili dopuna vezivu

Žitka ispunna je samostvrđavajuća muljevita smeša koja se sastoji od peska ili drugih sitnozrnih agregata i veziva i koja se koristi kao zamena za zbijenu zemljanu ispunu. Elektrofilterski pepeo se u žitkim ispunama koristi kao sitnozrni agregat i (zbog svojih pucolanskih svojstava) kao dodatak cementu ili njegova zamena. U žitkim ispunama se može koristiti i pucolanski i samovezujući elektrofilterski pepeo. Dodavanjem velike količine ovog pepela, on preuzima dvostruku ulogu - i sitnozrnog agregata i dopune vezivu. Samovezujući elektrofilterski pepeo se koristi u malim količinama kao vezivo umesto cementa.

Kvalitet elektrofilterskog pepela koji se koristi u žitkim ispunama ne mora da bude strogo kontrolisan kao u slučajevima njegove primene kao veziva. Mogu se koristiti i suvi i prečišćen pepeo iz taloga. Pre upotrebe nije potrebno specijano obrađivati elektrofilterski pepeo.

1.4.5 Materijal za nasipe i ispune

Elektrofilterski pepeo se, naročito u Evropi, već nekoliko decenija koristi, kao materijal za izradu nasipa ili granulisanih (strukturnih) ispuna, umesto prirodnih materijala. Pepeo koji se koristi za tu svrhu mora da se deponuje i čuva u uslovima optimalne vlažnosti. U slučaju suvljeg materijala dolazi do podizanja prašine, a vlažniji pepeo je nepodesan za ugradnju. Proverom nosivosti na terenu utvrđeno je da pepeo zbijen pod uslovima optimalne vlažnosti ima iste geomehaničke karakteristike kao dobro zbijeno tlo.^(22;23)

1.5 Svojstva materijala

1.5.1 Fizička svojstva

Elektrofilterski pepeo se sastoji od punih ili šupljikavih praškastih čestica uglavnom loptastog oblika i većinom je staklaste (amorfne) prirode. Ugljenična materija u elektrofilterskom pepelu je sastavljena od uglastih čestica. Čestice pepela koji je nastao od bitumeniziranog uglja su obično slične česticama mulja ili sitnog peska (manje od 0,075 mm). Čestice elektrofilterskog pepela od delimično bitumeniziranog uglja su takođe iste veličine kao čestice mulja, mada su krupnije od čestica elektrofilterskog pepela od bitumeniziranog uglja.⁽²⁴⁾

Specifična težina elektrofilterskog pepela obično varira od 2,1 do 3,0, dok specifična površina (merena Blejnovom metodom propustljivosti vazduha⁽²⁵⁾) može varirati od 170 do 1000 m²/kg.

Boja elektrofilterskog pepela je nepouzdan indikator njegovog hemijskog sastava. Pepeo koji se dobija od lignita ili delimično bitumeniziranog uglja obično ima svetlu ili bledu mrkožutu boju, što ukazuje na nisku količinu ugljenika kao i prisustvo kreča ili kalcijuma. Elektrofilterski pepeo od bitumeniziranog uglja je, uglavnom, sive boje. Svetlije nijanse sive boje ukazuju na bolji kvalitet pepela, a tamno siva i crna boja se pripisuju povećanom sadržaju nesagorelog ugljenika.⁽¹⁰⁾

1.5.2 Hemijska svojstva

Hemijske osobine elektrofilterskog pepela su, u velikoj meri, pod uticajem sadržaja uglja, strategije kontrole zagađenja vazduha u termoelektranama i tehnika koje se koriste za rukovanje i skladištenje.

U **Tabeli 2.** su prikazani standardni hemijski sastojci elektrofilterskog pepela od bitumeniziranog uglja, lignita i delimično bitumeniziranog uglja. Pepeo od lignita i delimično bitumeniziranog uglja ima veći sadržaj kalcijum oksida i niži gubitak žarenjem (LOI) u odnosu na onaj od bitumeniziranog uglja. Elektrofilterski pepeli od lignita i delimično bitumeniziranog uglja mogu imati veću količinu sulfatnih jedinjenja u odnosu na pepeo dobijen od bitumeniziranog uglja.

Glavna razlika između elektrofilterskog pepela klase F i klase C je u procentualnom sadržaju kalcijuma, silicijum dioksida, aluminijum oksida i gvožđa.⁽⁹⁾ U pepelu klase F ukupna količina kalcijuma obično varira od 1% do 12%, većinom u obliku kalcijum hidroksida, kalcijum sulfata i staklastih komponenti u kombinaciji sa silicijum dioksidom i aluminijum oksidom. Nasuprot tome,

pepeo klase C sadrži od 30% do 40% kalcijum oksida.⁽²⁶⁾ Količina alkalija (kombinovani natrijum i kalijum) i sulfata (SO₄) je veća u pepelu klase C nego u onom klase F.

Iako se oznake klasa F i C strogo primenjuju kada je u pitanju elektrofilterski pepeo koji ispunjava zahteve standarda C618 udruženja ASTM, ovi termini se često primenjuju uopšteno kako bi se klasa odredila na osnovu porekla ili sadržaja kalcijum oksida. Ne mogu se svi elektrofilterski pepeli uskladiti sa zahtevima ovog standarda za beton, mada mnogi „nespecificovani“ imaju vezivna svojstva i mogu se koristiti za stabilizaciju gornjeg i donjeg nosećeg sloja i posteljice.⁽²⁰⁾

Tabela 2. Standardni sadržaj hemijskih jedinjenja u elektrofilterskom pepelu koji nastaje sagorevanjem različitih tipova uglja (izraženo u procentima po jedinici mase)

Jedinjenje	Bitumenizirani ugalj (%)	Delimično bitumeniziran ugalj (%)	Lignit (%)
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Gubitak pri žarenju (LOI), koji predstavlja meru količine ostatka ugljenika koji se zadržao u elektrofilterskom pepelu, je jedno od najznačajnijih njegovih hemijskih svojstava. Kod klasifikovanog pepela gubitak žarenjem može biti od 5% do 6%, prema specifikacijama AASHTO ili ASTM.⁽⁴⁾ Gubitak žarenjem može ukazati na podobnost korišćenja pepela kao zamene za cement u betonu, jer varijacije u sadržaju ugljenika mogu uticati na aktivnost betonske mešavine i sadržaj vazduha.⁽¹⁰⁾

Pored hemijskog sastava i gubitka žarenjem, kvalitet elektrofilterskog pepela je pre svega određen finoćom i konzistencijom. Finoća utiče na reaktivnost pepela, kao i nivo sadržaja ugljenika. Elektrofilterski pepeo je veće finoće od portland cementa i kreča, i veličina zrna varira između 10 i 100 mikrona. Pepeo koji se koristi za proizvodnju betona treba da bude konzistentan, odnosno postojan na promene, kako bi se omogućilo preliminarno ispitivanje betonske mešavine.⁽⁴⁾

1.6 Zaštita životne sredine

1.6.1 Zatvorena nasuprot neizolovanoj primeni

Briga vezana za upotrebu elektrofilterskog pepela je zasnovana na mogućnosti zagađenja podzemnih voda mikroelementima koji potiču od nusproizvoda nastalih sagorevanjem uglja. Državna regulativa SAD koja se odnosi na zaštitu životne sredine je ograničila upotrebu elektrofilterskog pepela zbog mogućnosti rastvaranja mikroelemenata u atmosferskim vodama koje prolaze kroz elektrofilterski pepeo.

Kada se elektrofilterski pepeo koristi u betonu, mogućnost izluživanja mikroelemenata je veoma niska. Razlog tome je što su sastojci pepela zatvoreni u betonskoj masi.⁽²⁷⁾

Kod neizolovane (*unencapsulated*) upotrebe je moguće izluživanje mikroelemenata. Upotreba elektrofilterskog pepela u stabilizovanom gornjem sloju ili nasipima zahteva pažljivo rukovanje kako bi se otklonili mogući negativni uticaji na životnu sredinu. Mada su istraživanja pokazala da je pepeo, nastao sagorevanjem uglja, obično bezbedan za korišćenje u neizolovanom obliku, mere predostrožnosti se i dalje moraju preduzimati kako bi se zadovoljili uslovi zaštite životne sredine.^(28;29;30;31) Da bi se obezbedio siguran finalni proizvod⁽¹⁰⁾ neophodni su vrednovanje uslova podzemnih voda, primenjive procedure ispitivanja stanja, standardi kvaliteta vode i pravilna ugradnja.

1.6.2 Izluživanje

Jedno od ključnih ograničenja postojećih metoda za testiranje izluživanja jeste da one nisu predviđene za ispitivanje materijala sa elektrofilterskim pepelom kao dopunom. Na primer, u Viskonsinu je upotreba pepela kao zasebnog materijala regulisana propisom Ch. NR 538. Ovaj akt se odnosi na opit izluživanja (water leaching test - WLT) elektrofilterskog pepela u obliku praha, ali ne i na mešavine, kao što je podtlo stabilizovano ovim materijalom. Pored toga, opit WLT se ne odnosi ni na terenska ispitivanja izluževina. Opitom WLT se može utvrditi potencijal ispuštanja škodljivih supstanci iz elektrofilterskog pepela, čistog ili u mešavini sa drugim materijalima, ali nije moguće oceniti kako pepeo utiče na kvalitet podzemnih voda.⁽³²⁾ U **Tabeli 3.** je prikazano pet često korišćenih standardnih testova izluživanja.

Tabela 3. Uslovi ekstrakcije za različite standardne testove izluživanja⁽³²⁾

Procedura testiranja	Metoda	Svrha	Medijum curenja	Odnos tečnost-čvrsta materija	Veličina čestice	Vreme ekstrakcije
Test izluživanja	ASTM D3987-06	Obezbediti brze načine za dobijanje tečnog ekstrakta	Dejonizovana voda	20:1	Čestica ili monolit	18 sati
TCLP	EPA SW-846 Method 1311	Uporediti podatke o toksičnosti sa propisanim nivoom. RCRA zahtev	Acetatni pufer*	20:1	< 9,5 mm	18 sati
Procedura ekstrakcije toksičnosti (EP Tox)	EPA SW-846 Method 1310	Oceniti koncentraciju procedne vode. RCRA zahtev.	0.04 M acetatna kiselina (pH = 5,0)	16:1	< 9,5 mm	24 sata
Višestruka procedura ekstrakcije	EPA SW-846 Method 1320	Oceniti otpadnu procednu vodu pod dejstvom kiseline	Isto kao EP Toksičnost, onda pri pH = 3,0	20:1	< 9,5 mm	24 sata ekstrakcija po fazi
Sintetičko taloženje u proceduri izluživanja (SPSL)	EPA Method 1312	Oceniti pokretljivost metala pri realnim uslovima na terenu , tj. kiša ili sneg	Dejonizovana voda, pH prilagođena na 4,2 do 5	20:1	< 9,5 mm	18 sati

* Ili rešenje sa acetatnim puferom sa pH = 5 ili acetatna kiselina sa pH = 3,0

Visok sadržaj kreča u pepelu obično ima za posledicu povišenu pH vrednost (sa 10,1 na 12,8) i otpuštanje metala i metaloida usled procesa sorpcije. Testovi izluživanja na zemljištu stabilizovanom pepelom pokazuju da koncentracija ovih materija u procednim vodama nije linearno zavisna od količine pepela u strabilizovanoj sredini. Pretpostavlja se da je ova nelinearnost posledica efekta povećanja pH vrednosti usled adsorpcije i pokazuje da su kalkulacije linearnog opadanja koncentracije, primenom rezultata testa izluživanja (WLT), netačne.⁽³²⁾ Ovo, takođe, znači da povećanje pH vrednosti može rezultirati većom rastvorljivošću i smanjenjem sposobnosti adsorpcije metala.^(33;34)

Poređenjem rezultata terenskih i laboratorijskih merenja izluživanja tla stabilizovanog elektrofilterskim pepelom došlo se do zaključka da se opitom CLT (*column leach test*) dobijaju vrednosti bliskije onim na terenu od opita WLT (*water leach test*) kojim su se, po pravilu, dobijale vrednosti koncentracija teških metala u izluževini niže od realnih.^(32;33) Dobijene vrednosti

koncentracija u uzorcima uzetim terenskim lizimetrom ispod ispitivanog sloja pepelom stabilizovanog tla su bile jednake ili nešto niže od koncentracija merenih opitom CLT sa istim materijalom. Iz ovog proizilazi da CLT opit može da da dobre pokazatelje stanja neposredno ispod mešavine tla i pepela, uz uslov simulacije realnih uslova sa terena. Pored toga, početna koncentracija na terenu se može približno proceniti pomoću WLT opita, uz uslove približno neutralne reakcije procedne vode i primene korekcionog faktora.⁽³³⁾ Primeri rezultata ispitivanja opitima CLT i WLT se mogu naći u referencama 32, 33 i 35.

Dugoročni program praćenja stanja životne sredine na deonici puta za teški teretni saobraćaj dugoj 3,4 km, na kojoj je za izradu nestabilizovanog donjeg nosećeg sloja iskorišćeno 60000 m³ elektrofilterskog pepela klase F, je pokazao da su koncentracije skoro svih mikroelemenata u podzemnim vodama u granicama I i II klase prema standardima savezne američke države Illinois. Koncentracija je, takođe, pokazala opadajući trend tokom vremena. Nije primećena pojava negativnih efekata na podzemne vode i okolno zemljište.⁽³⁶⁾ Testirana deonica od 1,4 km državnog autoputa br. 60 u saveznoj američkoj državi Viskonsin sadrži 4 različita industrijska nusproizvoda u donjem nosećem sloju. Analize procednih voda prikupljenih iz podloge tesiranih deonica pokazuju da je ispuštanje kontaminiranih čestica na veoma niskom nivou.^(16;37;38)

Merena je toksičnost rastvora pepela u smislu letalne koncentracije i inhibicije rasta populacija slatkovodnih algi, kao predstavnika biljnog i dafnia (vodenih buva), kao predstavnika životinjskog sveta. Uzorak je pripremljen tako što je rastvor čistog elektrofilterskog pepela u dejonizovanoj vodi u razmeri 1 g pepela na 4 ml vode filtriran posle 24 časa negovanja i u eksperimentu je korišćena procedena voda. Testirani su uzorci elektrofilterskog pepela iz termoelektrana u Ohaju i Indijani i rezultati su ukazali na inhibiciju rasta populacije algi na uzorku iz Ohaja, a na uzorku iz Indijane nisu registrovane negativne posledice. Testovi su pokazali da elektrofilterski pepeo u svom čistom obliku može biti štetan po biocenozu u vodenoj sredini. Daljim istraživanjima je utvrđeno da su rizici po živi svet приметно opadali ili nestajali kada se pepeo mešao sa drugim materijalima.⁽³⁹⁾

1.6.3 Modelovanje

U modele koji simuliraju proceđivanje vode kroz kolovoznu konstrukciju i njene moguće uticaje na podzemne vode spadaju STUWMPP,⁽⁴⁰⁾ IMPACT,⁽⁴¹⁾ HYDRUS-2D,^(42;38;43) WiscLEACH,⁽⁴⁴⁾ i IWEM.⁽⁴⁵⁾ Od ovih modela STUWMPP, IMPACT, WiscLEACH i IWEM su u javnom vlasništvu. STUWMPP koristi faktore rastvaranje/slabljenje iz modela pregrada sezonskog tla (SESOIL) kako bi se doveli u vezu sadržaji oticanja sa tla i nusproizvoda sa sadržajima podzemnih voda. IMPACT je posebno razvijen kako bi se procenio uticaj izgradnje autoputa na životnu sredinu. Dvodimenzionalni tok i pronos rastvora se simuliraju numeričkim rešavanjem jednačine konvektivne disperzije sa reakcijom I reda, korišćenjem metode konačnih razlika.⁽⁴⁴⁾

WiscLEACH kombinuje tri analitička rešenja jednačine konvektivne disperzije sa reakcijom I reda kako bi se procenili uticaji na podzemne vode, koji su posledica oticanja mikroelemenata iz pepela korišćenog za izradu tamponskog, donjeg i gornjeg nosećeg sloja. WiscLEACH koristi interfejs prilagođen korisnicima i odmah dostupne ulazne podatke zajedno sa analitičkim rešenjem za vršenje pesimističke ocene uticaja na podzemne vode.⁽⁴⁴⁾

Model vrednovanja upravljanjem industrijskog otpada (IWEM) američke Agencije za zaštitu životne sredine (EPA), iako kreiran za vrednovanje uticaja od deponija i skladišta, može da posluži u proceni mogućnosti negativnog uticaja izlučevine elektrofilterskog pepela na podzemne vode. Ulazni podaci ovog modela uključuju geologiju/hidrogeologiju terena, početnu koncentraciju izlučevine, parametre metala i podatke o mikroklimi. Uzimajući u obzir dužinu vremena, program će izračunati koncentraciju izlučevine u kontrolnoj tački (poput bušotine ili bunara pitke vode) kada je poznata razdaljina od izvora. Pored toga, simulacija metodom Monte Karlo može prikazati najgori mogući scenario gde je parametar nepoznat ili nejasan. Poredeći IWEM sa informacijama lizimetra, IWEM precenjuje koncentracije izlučevine i može se smatrati pesimističkim u smislu ocene. IWEM ipak daje zadovoljavajuće rezultate u predviđanju toka podzemnih voda i rastvora u tačkama nizvodno od izvora.⁽⁴⁶⁾

1.6.4 Ostala razmatranja

Elektrofilterski pepeo može da izazove problem prašenja prilikom skladištenja i obrade ili zbog osipanja usled vetra. Radnici koji rukuju elektrofilterskim pepelom mogu preduzeti mere predostrožnosti zahtevajući Bezbednosni list (Material Safety Data Sheets – MSDS) od dobavljača elektrofilterskog pepela, noseći zaštitne naočari kako bi zaštitili oči od prašine, kao i odgovarajući specijalni respirator (koji je odobren od strane Nacionalnog instituta za bezbednost i zdravlje na radu). Problemi sa prašinom se mogu donekle ublažiti zbijanjem i prekrivanjem elektrofilterskog pepela, kvašenjem pepela u toku deponovanja i korišćenjem mehaničke ventilacije ili ekstrakcije u oblastima gde prašina može da dospe do radnih mesta.⁽¹⁰⁾ Postoje posebni kamioni koji redukuju probleme sa prašinom.

Izvor informacija o procenjivanju rizika i zaštiti podzemnih voda je U.S. EPA „Vodič za upravljanje industrijskim otpadom“⁽⁴⁷⁾ i može se naći na:

<http://www.epa.gov/industrialwaste/guide.asp>

Na kraju, zbog razlika u sastavu elektrofilterskog pepela pojedinih termoelektrana, uticaj elektrofilterskog pepela se ne može generalizovati. Takođe, zbog mnoštva metoda za testiranje izluževine, kao i standarda i regulativa sa kojima se rezultati testiranja porede, treba identifikovati i pratiti državne regulative pri određivanju ekološke podobnosti elektrofilterskog pepela iz određenog izvora.

1.7 Reference

Pretraživa verzija referenci iz ove glave je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je sotpuna [ovde](#).

1. Horiuchi S, Kawaguchi M, Yasuhara K. Effective use of fly ash slurry as fill material. *Journal of Hazardous Materials* 2000 9/15;76(2-3):301-37.
2. Steam, its generation and use. 39th ed. New York: Babcock & Wilcox; 1978.
3. American Coal Ash Association (ACAA). 2006 coal combustion product (CCP) production and use. Aurora, CO: American Coal Ash Association; August, 2007.
4. Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). Fly ash facts for highway engineers. Federal Highway Administration (FHWA); 2003 06-13-2003. FHWA-IF-03-019.
5. Kalinski ME, Hippley BT. The effect of water content and cement content on the strength of Portland cement-stabilized compacted fly ash. *Fuel* 2005 10;84(14-15):1812-9.
6. Kalinski ME, Yerra PK. Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash. *Fuel* 2006 11;85(16):2330-6.
7. Dockter BA, Jagiella DM. Engineering and environmental specifications of state agencies for utilization and disposal of coal combustion products. In: 2005 world of coal ash conference, Lexington, KY. ; 2005.
8. Meyers JF, Pichumani R, Kapples BS. Fly ash: A highway construction material. Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA); 1976. FHWA-IP-76-16.
9. ASTM C618-05 standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM; 2005.
10. Environmental Protection Agency (EPA), Federal Highway Administration (FHWA). Using coal ash in highway construction - A guide to benefits and impacts. ; April 2005. Report nr EPA-530-K-002:ID: 151.

11. Jobs Through Recycling [Internet]; c2007 [cited 2007 11/29]. Available from: <http://www.epa.gov/jtr/comm/cfa.asp>.
12. Fox JM, Constantiner D. The influence of fly ash after change to low-NOx burners on concrete strength, case study. In: 2007 world of coal ash (WOCA), may 7-10, Covington, Kentucky. ; 2007.
13. AASHTO. Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures. Washington, DC 20001: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2007. M 17-07.
14. Arora S, Aydilek AH. Class F fly-ash-amended soils as highway base materials. *J Mater Civ Eng* 2005;17:640-9.
15. Bin-Shafique MS, Edil TB, Benson CH, Senol A. Incorporating a fly-ash stabilized layer into pavement design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering* 2004;157:239-49.
16. Edil TB, Benson CH, Bin-Shafique MS, Tanyu B, Kim W, Senol A. Field evaluation of construction alternatives for roadway over soft subgrade. *Transp Res Rec* 2000;1786:36-48.
17. Wen H, Tharaniyil MP, Ramme BW, Krebs S. Field performance evaluation of class C fly ash in full-depth reclamation: Case history study. *Transp Res Rec* 2004(186):41-6.
18. White DJ, Bergeson K. Long-term strength and durability of hydrated fly-ash road bases. *Transportation Research Record* 2001;1755(1):151-9.
19. Senol A, Edil TB, Bin-Shafique MS, Acosta HA, Benson CH. Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling* 2006 4;46(4):365-76.
20. Edil TB, Acosta HA, Benson CH. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. *J Mater Civ Eng* 2006;18:283-94.
21. Edil TB, Benson CH. Sustainable construction case history: Fly ash stabilization of road-surface gravel. In: *Proceedings of the 2007 world of coal ash (WOCA)*, May 7-10, Covington, Kentucky. ; 2007.
22. Di Gioia AM, Nuzzo WL. Fly ash as structural fill. *Journal of the Power Division* 1972 June;98(1):77-92.
23. Kim B, Prezzi M, Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005;131(7):914-24.
24. AASHTO. Soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, part II tests. Washington, DC 20001: American Association of State Highway and Transportation Officials; 1999. Report nr T104-99.
25. ASTM C204-07 standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. In: West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM; 2007.
26. McKerall WC, Ledbetter WB, Teague DJ. Analysis of fly ashes produced in Texas. Texas A&M University, College Station, Texas: Texas Transportation Institute,; 1982. No. 240-1.
27. Environmental Protection Agency (EPA). Report to congress: Wastes from the combustion of fossil fuels – volume II. ; 1999. Report nr EPA 530-S-99-010.
28. Electric Power Research Institute (EPRI). High-volume fly ash utilization projects in the United States and Canada. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI); 1998. Report nr EPRI CS-4446.
29. Hassett DJ, Heebink LV. Release of mercury vapor from coal combustion ash. In: 2001 international ash utilization symposium, Lexington, KY. ; 2001.
30. Pflughoseft-Hassett DF, Hassett DJ, Dockter BA. High volume fly ash utilization and the effects on groundwater in North Dakota in high-volume Uses/Concrete applications. In: *Proceedings of the 10th international ash use symposium*, Orlando FL. 1993.

31. Environmental Protection Agency (EPA). Notice of regulatory determination on four large-volume wastes from the combustion of coal by electric utility power plants. EPA; 1993. Report nr Federal Register Notice 58 FR 42466.
32. Bin-Shafique MS, Benson CH, Edil TB. Geoenvironmental assessment of fly ash stabilized subbases. University of Wisconsin – Madison, Madison, Wisconsin: Geo Engineering Department of Civil and Environmental Engineering; 2002 March 11, 2002. Report nr Geo Engineering Report No. 02-03.
33. Bin-Shafique MS, Benson CH, Edil TB, Hwang K. Leachate concentrations from water leach and column leach tests on fly ash-stabilized soils. *Environ Eng Sci* 2006;23:53-67.
34. Kanungo SB, Mohapatra R. Leaching behavior of various trace metals in aqueous media from two fly ash samples. *J Environ Qual* 2000;29:188-96.
35. Ghosh A, Sobbarao C. Hydraulic conductivity and leachate characteristics of stabilized fly ash, *Journal of Environmental Engineering* 1998;24(9):812-20.
36. Mohanty S, Chugh Y. Post construction environmental monitoring of a fly ash-based road subbase. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 2006;11(4):238-46.
37. Sauer JJ, Benson CH, Edil TB. Metals leaching from highway test sections constructed with industrial byproducts. Madison, Wisconsin: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison; 2005 December 27, 2005. Geo Engineering Report No. 05-21.
38. Bin-Shafique MS, Benson CH, Edil TB. Leaching of heavy metals from fly ash stabilized soils used in highway pavements. Madison, WI: Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison; 2002. Report nr 02-14.
39. Harrington-Hughes K. Primer environmental impact of construction and repair materials on surface and ground waters. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. National Cooperative Highway Research Program; 2000. NCHRP Report 443.
40. Friend M, Bloom P, Halbach T, Grosenheider K, Johnson M. Screening tool for using waste materials in paving projects (STUWMPP). Office of Research Services, Minnesota Dept. of Transportation, Minnesota; 2004. Report nr MN/RC–2005-03.
41. Hesse TE, Quigley MM, Huber WC. User’s guide: IMPACT—A software program for assessing the environmental impact of road construction and repair materials on surface and ground water. NCHRP; 2000. NCHRP 25-09.
42. Simunek J, Sejna M, van Genuchten, M. T. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Golden, Colorado: International Ground Water Modeling Center; 1999. Report nr IGWMC - TPS - 53.
43. Apul D, Gardner K, Eighmy T, Linder E, Frizzell T, Roberson R. Probabilistic modeling of one-dimensional water movement and leaching from highway embankments containing secondary materials. *Environmental Engineering Science* 2005;22(2):156–169.
44. Li L, Benson CH, Edil TB, Hatipoglu B. Groundwater impacts from coal ash in highways. November 2006;159(WR4):151-63.
45. Environmental Protection Agency (EPA). Industrial waste management evaluation model (IWEM) User’s guide. Washington, DC: US EPA; 2002. Report nr EPA530-R-02-013.
46. Melton JS, Gardner KH, Hall G. Use of EPA’s industrial waste management evaluation model (IWEM) to support beneficial use determinations. U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER); 2006.
47. Guide for Industrial Waste Management [Internet]; c2006. Available from: <http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/industd/guide/index.asp>

2 ASFALT BETON

2.1 Uvod

Asfalt betonska mešavina je kompozitni materijal koji se sastoji od bitumenskog veziva i mineralnog agregata. Postavlja se u slojevima i zbija do određene gustine koja obezbeđuje stabilnost na dinamička opterećenja u saobraćaju. Za autoputeve i avionske piste se najčešće koristi asfalt beton izveden po vrućem postupku (hot mix asphalt - HMA) koji se proizvodi zagrevanjem agregata na oko 150°C i bitumena na 90°C pre mešanja. Fleksibilni kolovozi čine više od 93% svih puteva u SAD i povećana upotreba elektrofilterskog pepela u ovakve svrhe bi značajno smanjila količine pepela na deponijama, što bi, verovatno, dovelo do sniženja troškova.⁽¹⁾

Elektrofilterski pepeo se može koristiti kao mineralna ispuna (filer) za popunjavanje šupljina i povezivanje krupnijih zrna agregata u asfalt betonskim mešavinama.⁽²⁾ Mogućnost primene pepela u ovu svrhu regulisana je standardima ASTM D242 i AASHTO M-17, koji propisuju karakteristike koje filer treba da zadovolji. Upotrebljivost mineralnih ispuna se sastoji u porastu čvrstoće bitumenskog maltera, povećanju otpornosti na pojavu kolotruga i produženju trajnosti kolovozne konstrukcije.⁽³⁾ Asfaltne mešavine koje sadrže manju količinu elektrofilterskog pepela - oko 5% po suvoj materiji agregata - pokazuju svojstva koja se mogu uporediti sa svojstvima asfaltnih mešavina koje sadrže prirodna veziva, poput gašenog kreča ili kamenog brašna. Granulometrijski sastav, sadržaj organskih materija i plastičnosti, koja se obično navode u zahtevima specifikacija za mineralna veziva, se mogu postići bez poteškoća. Karakteristike mineralnih veziva koje najviše utiču na svojstva asfaltnih mešavina za izradu kolovoznih konstrukcija jesu D60 i D10 - otvori sita (u mikronima) kroz koja prolazi 60% i 10% materijala P200 (najveće zrno je manje od 0,075 mm – prolazi kroz sito No. 200) i testu metilenskog plavog.⁽⁴⁾

Elektrofilterski pepeo se može koristiti i kao dodatak bitumenu. Ispitivanje je pokazalo da zamena bitumena ovim materijalom u iznosu od 10% i 30% nema značajni negativni uticaj na svojstva mešavine poput čvrstoće i trajnosti.⁽⁵⁾ Zbog razlike u specifičnoj težini bitumena i elektrofilterskog pepela, delimična zamena bitumena pepelom povećava količinu vezivnog sloja, što čini protivtežu smanjivanju procenta bitumena.⁽²⁾ Ova zamena materijala u mešavinama za izradu zastora može biti ekonomična alternativa upotrebi skupog bitumena. Takođe, može obezbediti dugotrajnost kolovoznih površina zbog poboljšanih osobina kolovoza.⁽⁵⁾ Iako je ispitivanje pokazalo moguće prednosti ovakve primene, dalja ispitivanja, naročito na terenu, treba da dokažu opravdanost korišćenja elektrofilterskog pepela kao delimične zamene za bitumen.

2.2 Učinak

Istraživanja, sprovedena tokom niza godina, su pokazala da je elektrofilterski pepeo pogodna zamena za kameno brašno. Najranije studije primene su rađene još 1931. godine, kada su u kompaniji Detroit Edison vršena poredjenja fizičkih svojstva ovog materijala i krečnjačkog filera. Pokazalo se da imaju približno iste fizičke osobine, da je elektrofilterski pepeo pogodan za popunjavanje šupljina i da je otporan na vlagu (hidrofoban), tako da se smanjuje mogućnost spiranja bitumenskog veziva sa površine kamenog agregata.^(6;3)

Savezna administracija SAD za autoputeve (FHWA) je, primenom opita čvrstoće vodozasićenog uzorka (*immersion – compression test*), izvršila poređenje čvrstoće asfaltnih mešavina koje sadrže različite filere. Ovaj test je predstavljao indikator za procenu otpornosti na spiranje veziva.⁽⁷⁾ Ocenjivan je pepeo iz četiri izvora, zajedno sa brašnom od silicijum dioksida, krečnjačkom prašinom, liskunima i kamenom prašinom. Na sličan način je na Državnom Univerzitetu Severne Dakote vršeno poređenje pepela od lignita kao mineralne ispune, sa vodootpornim krečom i prašinom od drobljenog kamena. U oba ispitivanja su mešavine koje sadrže filer od pepela imale veću čvrstoću od drugih ispuna, čime je potvrđeno da se od ispuna od elektrofilterskog pepela može očekivati odlična otpornost na spiranje.⁽⁹⁾

Dalja potvrda dobrih strana elektrofilterskog pepela kao mineralne ispunje, kada je u pitanju otpornost na spiranje, je dobijena prilikom ispitivanja dva tipa (klase C i klase F) u kombinaciji sa portland cementom ili vodootpornim krečom, ili kao njihova zamena. Sve mešavine sa elektrofilterskim pepelom su pokazale jednaku ili povećanu čvrstoću na pritisak na testu čvrstoće vodozasiećenog uzorka uz upotrebu agregata iz dva različita izvora.⁽¹⁰⁾ Ispitivanje pepela dobijenog sagorevanjem lignita ukazuje na to da, primenjen kao mineralna ispunja, ovaj materijal doprinosi sporijem vezivanju bitumena. Pokazalo se i da je veći sadržaj kreča veoma koristan kao sredstvo za očuvanje hrapavosti agregata podložnih abraziji.⁽¹¹⁾

Prema saopštenju Američkog udruženja za ugljeni pepeo, tokom 2006. godine je oko 26,72 metričkih tona (29,45 t) pepela iskorišćeno kao filer u asfaltnim mešavinama.⁽¹²⁾ Prethodna ispitivanja državnih odseka za transport u SAD su ukazala na to da većina država koristi elektrofilterski pepeo kao mineralnu ispunju. U principu, države su zabeležile zadovoljavajući učinak u ispitivanju.⁽¹³⁾

2.3 Tehnološki zahtevi

2.3.1 Sušenje

Elektrofilterski pepeo mora biti u suvom stanju kada se koristi kao sitnozrna frakcija (filer). To znači da kvašeni, kao i pepeo preuzet direktno iz deponijskih laguna, ne mogu da se koriste za spravljanje asfaltnih mešavina.

2.3.2 Skladištenje

Elektrofilterski pepeo se prikuplja u termoelektranama i čuva u suvom obliku u specijalnim vodonepropusnim silosima. Na taj način je uvek pripremljen za pretovar u kamione silose i isporuku bazama za izradu asfalt betona po vrućem postupku.

2.4 Tehnička svojstva

Fizički zahtevi za filere u asfaltnim mešavinama za izradu kolovoznog zastora su definisani standardom AASHTO M-17 i prikazani u **Tabeli 4.**^(3;14) Zahtevi uključuju granulometrijski sastav, sadržaj organskih materija i plastičnost. Od ostalih svojstava od značaja su finoća i specifična težina.

Tabela 4. Odredbe AASHTO M-17 za upotrebu filera u izradi asfaltnog zastora

Veličina čestica		Organske primese	Indeks plastičnosti
Otvori sita	Procenat prolaska		
0,006 mm (No. 30)	100	Filer ne sme da sadrži nikakve organske primese	Filer ne sme da ima indeks plastičnosti veći od 4
0,003 mm (No. 50)	95 - 100		
0,075 mm (No. 200)	70 - 100		

Granulacija: Ograničenja odredbi AASHTO za mineralne ispunje variraju od 70% do 100% prolaznosti na situ sa otvorima 0,075 mm (sito br. 200). Većina vrsta elektrofilterskog pepela ima prolaznost između 60 i 90% na situ sa otvorima 0,075 mm (sito br. 200).⁽¹⁵⁾

Finoća: Iako većina izvora elektrofilterskog pepela može zadovoljiti AASHTO zahteve granulacije za filere, važna je ravnomernost u granulaciji, a posebno veličina i oblik čestica sitnijih od 0,075 mm (sito br. 200). Teoretski, veća finoća daje efektniju mineralnu ispunju, mada ona takođe znači veću površinu čestica koje moraju biti obložene, što rezultira povećanjem procenta bitumena u mešavini. Finoća elektrofilterskog pepela je obično određena procentom težine zrna većih od 0,045 mm (sito br. 325), naročito kada se koristi u betonu od portland cementa,⁽¹⁶⁾ ipak, ovo nije standard za pepeo koji se koristi kao mineralna ispunja.

Specifična težina: Specifična težina elektrofilterskog pepela varira u zavisnosti od izvora. Kreće se u rasponu od 1,7 do 3,0, mada su najzastupljenije vrednosti između 2,0 i 2,8. Specifična težina

kamenog brašna iznosi od 2,6 do 2,8. Pošto je zapreminska težina pepela uglavnom manja od zapremine težine kamenog brašna, propisani težinski udeo elektrofilterskog pepela će obično zauzimati veći procenat ukupne zapremine asfaltne mešavine od odgovarajućeg težinskog procenta konvencionalnog kamenog brašna.

Rigdenove šupljine: Vezni sloj kolovoznih konstrukcija ima tendenciju prekoračenja vrednosti modula krutosti kada je procenat šupljina u kamenom brašnu preko 50, mereno modifikovanim Rigdenovim testom šupljina. Kada se umesto prirodnog kamenog brašna koristi elektrofilterski pepeo ovaj problem se eliminiše, jer većina vrsta pepela ima procenat šupljina manji od 50, mereno navedenom metodom.⁽³⁾

Prisustvo organskih materija: Pojedine vrste pepela, poreklom iz kotlova na ugljovodonično gorivo, u početnoj fazi mogu sadržati ostatke nafte. Iako ne postoji standard za sadržaj ugljenika ili gubitak pri žarenju (LOI) za pepeo koji se koriste kao mineralno vezivo, praktičnije je koristiti elektrofilterski pepeo sa relativno niskim LOI (manje od 5% do 6%) kako bi se moguća apsorpcija bitumena od strane čestica ugljenika svela na minimum. Gubitak pri žarenju pepela ne mora biti značajan faktor koji utiče na učinak mineralne ispune, naročito kada je u pitanju pepeo sa niskim sadržajem kalcijuma. Laboratorijski testovi za ocenjivanje efektivnosti gubitka pri žarenju su pokazali da su se asfaltne mešavine sa pepelom čiji je LOI ispod 10% pokazale zadovoljavajućim.⁽³⁾

Plastičnost: Elektrofilterski pepeo je neplastični material. Zato se plastičnost ne dovodi u pitanje kada se on koristi kao mineralna ispuna.

2.5 Projektovanje

2.5.1 Projektovanje mešavine

Ista metoda koja se uobičajeno koristi za projektovanje mešavina za izradu zastora od vruće valjanog asfalta je primenljiva i za mešavine u kojima elektrofilterski pepeo ima ulogu filera. Procenat ispune od pepela, koji je sastavni deo projektovane mešavine, treba da bude najniži mogući koji zadovoljava sve projektne kriterijume.

Mala količina hidratisanog kreča (obično 0,5 do 2% po masi) poboljšava prionljivost veziva i agregata. Pošto elektrofilterski pepeo klase C sadrži 30 ili više procenata kalcijuma, njegovo prisustvo u asfaltnoj mešavini može prouzrokovati smanjenje prionljivosti. Pored toga, pepeo je po prirodi hidrofoban i očekuje se da poboljšava prionljivost veziva i agregata,⁽³⁾. Za potvrdu ove teze potrebna su dopunska ispitivanja.

2.5.2 Statički proračun

Konvencionalne AASHTO metode za statički proračun izrade kolovoznih konstrukcija su primenljive za asfaltne mešavine po vrućem postupku koje koriste elektrofilterski pepeo kao filer.

2.6 Procedure tokom izgradnje

2.6.1 Rukovanje materijalom i skladištenje

Elektrofilterski pepeo je praškast material i može doći do stvaranja veće prašine nego kod uobičajenih mineralnih ispuna. U postrojenju za izradu asfaltnih mešavina on se može istovariti direktno u silos za skladištenje, kao kod uobičajenog filera, pre presipanja u bubanj za mešanje.

2.6.2 Razastiranje i zbijanje

Za razastiranje i zbijanje asfaltnih mešavina koje sadrže elektrofilterski pepeo koristi se uobičajena mehanizacija.

2.7 Zaštita životne sredine

Terensko proučavanje kolovoza gde su se elektrofilterski pepeo i šljaka koristili kao delimična zamena za filer je pokazalo da nema povećanja koncentracije metala u okolnom zemljištu. Tri meseca nakon izrade opitne deonice koja je sadržala 6 težinskih procenata mešavine elektrofilterskog pepela i šljake izvršeno je uzorkovanje tla neposredno ispod kolovozne konstrukcije, kao i tla ispod kontrolne deonice. Razlika u koncentracijama arsena, barijuma, kadmijuma, hroma, žive, olova, selena i srebra kod ispitivanih uzoraka je bila minimalna.⁽¹⁾

2.8 Reference

Pretraživa verzija referenci koje se koriste u ovom poglavlju je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je dostupna [ovde](#).

1. Churchill EV, Amirkhanian SN. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. J Mater Civ Eng 1999;11:295-301.
2. Butul B. Performance characteristics of coal fly ash and wood ash-modified asphalt binder. United States -- Florida: Florida Atlantic University; 2000:ID: 192.
3. Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). Fly ash facts for highway engineers. Federal Highway Administration (FHWA); 2003 06-13-2003. Report nr FHWA-IF-03-019.
4. Kandhal PS, Lynn CY, Parker F. Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures. Transportation Research Record 1998;1638:101-10.
5. Simms SA. Use of coal fly ash in asphalt concrete mixes. Canada: DalTech - Dalhousie University (Canada); 1998:ID: 190.
6. Zimmer FV. Fly ash as a bituminous filler. In: Proceedings of the second ash utilization symposium. Pittsburgh, Pennsylvania: U.S. Bureau of Mines; 1970.
7. ASTM D1075-07 standard test method for effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM; 2007.
8. Brahma SP. Use of lignite fly ash as a mineral filler in bituminous concrete. Fargo, North Dakota: North Dakota State University, Engineering Experiment Station; 1968. Report nr Series No. 3.
9. Carpenter CA. Cooperative study of fillers in asphaltic concrete. Public Roads 1952;27:101-10.
10. Rosner JC, Chehovits JG, Morris GR. Fly Ash as a Mineral Filler and Anti-Strip Agent For Asphalt Concrete. Challenge of change - 6th international ash utilization symposium proceedings. Reno, NV, United States Department of Energy, Morgantown Energy Technology Center.
11. Galloway BM. A review of the use of mineral filler in asphalt-aggregate mixtures. Fly ash applications in 1980 conference; 1980.
12. American Coal Ash Association (ACAA). 2006 coal combustion product (CCP) production and use. Aurora, CO: American Coal Ash Association; August 24, 2007.
13. AASHTO. Use of waste materials in highway construction. subcommittee on construction. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; August, 1994.
14. AASHTO. Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures. Washington, DC 20001: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2007. Report nr M 17-07.
15. Di Gioia AM, Nuzzo WL. Fly ash as structural fill. Journal of the Power Division 1972 June;98(1):77-92.
16. ASTM C618-05 standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM; West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.

3 BETON OD PORTLAND CEMENTA

3.1 Uvod

Na osnovu istraživanja iz 2009. godine, procenjeno je da će se u 2010. godini u svetu proizvesti skoro 2 milijarde metričkih tona (2,2 milijardi tona) portland cementa, uz emisiju od dve milijarde metričkih tona ugljendioksida godišnje.⁽¹⁾ Zamena cementa elektrofilterskim pepelom je, stoga, jedan od načina da se redukuje emisija gasova staklene bašte i tako doprinese održivom razvoju.

Elektrofilterski pepeo se koristi u betonu od portland cementa (PCC) kao mineralni dodatak, a u poslednjih 60 godina i kao komponenta mešanog cementa. Kao primesa, pepeo funkcioniše kao delimična zamena za portland cement ili kao njegov dodatak i dodaje se direktno u gotovu betonsku smešu u fabrici betona. Takođe se može mešati sa cementnim klinkerom ili portland cementom kako bi se napravio mešani cement. Standardom ASTM C595 su definisana dva proizvoda od mešanog cementa koji sadrže elektrofilterski pepeo: 1) portland-pucolan cement (Tip IP), sadrži 15 do 40% pucolana i 2) pucolanski modifikovani portland cement (Tip I-PM), koji sadrži manje od 15% pucolana.⁽²⁾

Standardom ASTM C618 su definisane dve klase pepela koji se koriste u betonu: 1) klasa F sa niskim sadržajem kalcijuma, koji se obično dobija sagorevanjem antracita ili bitumeniziranog uglja i 2) klasa C sa visokim sadržajem kalcijuma, koji se obično dobija sagorevanjem lignita ili delimično bitumeniziranog uglja^(3;4) Ovim standardom su utvrđena fizička, hemijska i mehanička svojstva ove dve klase elektrofilterskog pepela. Klasa F je pucolan, koji samostalno ima veoma mala vezivna svojstva, ili ih nema uopšte. Klasa C ima karakteristiku samovezivanja, kao i pucolanske osobine.

Obe klase pepela stvaraju hemijsku reakciju sa krečom i formiraju vezivne materijale. S obzirom da portland cement sadrži oko 65% kreča, od čega deo postaje slobodan i dostupan tokom hidratacije, njegovim mešanjem sa pepelom formiraju se nova veziva uz poboljšanje mnogih svojstava dobijenog betona.⁽⁵⁾

3.2 Učinak

Praktično svi odseci za transport saveznih država u SAD (DOT) ukazuju da koriste elektrofilterski pepeo kao mineralni dodatak u betonu, kao delimičnu zamenu za portland cement ili u mešanom portland - pucolan cementu. Ovaj materijal se godinama koristi u izradi betonskih kolovoznih konstrukcija i stabilizovanih bankina i većina država ima zakonski regulisano korišćenje pepela kao delimične zamene za portland cement u betonu.^(6;7)

Najveće prednosti korišćenja elektrofilterskog pepela u betonu su povećana obradivost, smanjena pojava viška vode pri ugradnji i manja potreba za vodom, povećana čvrstoća, manja vodopropusnost i smanjeno prodiranje jona hlorida, smanjena toplota hidratacije, veća otpornost na uticaje sulfata, veća otpornost na reaktivnost alkalnih agregata i smanjeno skupljanje pri sušenju.⁽⁵⁾

Glavni nedostaci vezani za upotrebu elektrofilterskog pepela u betonu mogu biti sporiji rani razvoj čvrstoće, produženo početno vreme vezivanja, teškoće u kontroli sadržaja vazduha, sezonska ograničenja u toku zimskih meseci i kontrola kvaliteta izvora samog pepela.⁽⁵⁾ Upotreba pepela klase F obično rezultira sporijim ranim prirastom čvrstoće, ali klasa C se ne ponaša tako i, nasuprot tome, može pojačati rani prirast čvrstoće.

3.3 Tehnološki zahtevi

3.3.1 Kontrola porekla

Kako bi se obezbedio kvalitet elektrofilterskog pepela koji se koristi u betonu od portland cementa, treba izbegavati sledeće izvore pepela:

- Pepeo iz elektrana za vršno opterećenje umesto iz elektrana za kontinualnu proizvodnju električne energije;
- Pepeo iz elektrana koje sagorevaju različite vrste uglja ili mešavine uglja;
- Pepeo iz elektrana koje koriste ostala goriva (strugotinu, gume, škart) pomešana sa ugljem;
- Pepeo iz elektrana koje koriste naftu kao dopunsko gorivo;
- Pepeo iz elektrana koje koriste filter aditive kao što je amonijak;
- Pepeo iz početne ili završne faze rada;
- Pepeo iz elektrana koje ne rade u „stacionarnom stanju“;
- Pepeo kojim se rukuje ili je skladišten uz korišćenje mokrog sistema

3.3.2 Sušenje i vlaženje

Kada se elektrofilterski pepeo koristi u mešanom cementu ili kao delimična zamena za portland cement u pripremljenoj betonskoj mešavini, mora biti suv i ne zahteva nikakvu obradu. Kada se koristi kao sirovina za proizvodnju portland cementa, može biti kvašeni ili u suvom obliku.

3.3.3 Kontrola kvaliteta

Elektrofilterski pepeo u betonu treba da bude što je moguće čvršći i homogeniji. Njegov kvalitet treba da se prati programom za sigurnost/kontrolu kvaliteta (QA/QC) koji je u saglasnosti sa predloženim procedurama standarda ASTM C311.⁽⁸⁾ Ove procedure postavljaju standard za metode prikupljanja uzoraka i učestalost ispitivanja finoće, gubitka žarenjem, specifične težine i pucolanske aktivnosti tako da se može sertifikovati stalnost izvora ovog materijala*.

Mnoge agencije za transport saveznih država u SAD su bile u mogućnosti da, kroz sopstveni program uzorkovanja i testiranja, pretkvalifikuju izvore elektrofilterskog pepela sa sopstvenih državnih teritorija (ili teritorija susednih država) radi upotrebe u pripremljenoj betonskoj mešavini. Pretkvalifikacija pepela iz različitih izvora daje agenciji određeni nivo sigurnosti ukoliko dođe do toga da se pepeo različitog porekla koristi u istom projektu.

3.4 Tehnička svojstva

Neka od tehničkih svojstava elektrofilterskog pepela koja mogu biti od važnosti kada se on koristi kao primesa ili dodatak vezivu u cement betonskim mešavinama uključuju finoću mliva, gubitak žarenjem, hemijski sastav, vlažnost i pucolansku aktivnost. Većina agencija ukazuje na standard ASTM C618⁽³⁾ kada navode kriterijume za prihvatanja ovog pepela za primenu u betonu.

* U Republici Srbiji 2010. godine objavljeni su standardi za kontrolu kvaliteta letećeg pepela **SRPS EN 450-1:2010** Leteći pepeo za beton – Deo 1: Definicija specifikacija i kriterijumi usaglašenosti i **SRPS EN 450-2:2010** Leteći pepeo za beton – Deo dva vrednovanje usaglašenosti. Takođe, do sada objavljeni standardi vezani za leteći pepeo, pored navedenih su: **SRPS CEN/TR 15677:2009** Leteći pepeo dobijen sagorevanjem – Izveštaj o stanju u Evropi, **SRPS EN 14227-4:2012** Mešavine vezane hidrauličkim vezivom – Specifikacije – Deo 4: Leteći pepeo za mešavine vezane hidrauličkim vezivom, **SRPS EN 14227-14:2012** Mešavine vezane hidrauličkim vezivom – Specifikacije – Deo 14: Tlo tretirano letećim pepelom i **SRPS CEN/TR 15840:2010** Vrednovanje usaglašenosti letećeg pepela za beton – Smernice za primenu EN 450-2 (*prim. prev*).

Finoća: Finoća je prvenstveno fizička karakteristika elektrofilterskog pepela koja se odnosi na pucolansku aktivnost. Kada raste finoća, može se očekivati i rast pucolanske aktivnosti. Tekuće specifikacije uključuju zahtev koji se odnosi na maksimalni dozvoljeni procenat ostatka na situ otvora 0,045 mm (sito br. 325) pri mokrom prosejavanju. Standard ASTM C618 propisuje ovu vrednost na 34%. Finoća se može odrediti i metodama za procenu specifične površine, kao što je Blejnov test propusljivosti vazduha koji se koristi za ispitivanje finoće portland cementa.

Pucolanska aktivnost (hemijski sastav i mineralogija): Pucolanska aktivnost ukazuje na mogućnost silicijum dioksida i aluminijum oksida sadržanih u elektrofilterskom pepelu da reaguju sa dostupnim kalcijumom i/ili magnezijumom iz hidratiranih proizvoda portland cementa. Standard ASTM C618 zahteva da indeks pucolanske aktivnosti u portland cementu, kao što je odlučeno u skladu sa standardom ASTM C311⁽⁸⁾, iznosi najmanje 75% prosečne čvrstoće na pritisak posle 28 dana kod cement betonskih mešavina.

Gubitak pri žarenju (LOI): Mnogi državni odseci za transport u SAD propisuju maksimalni LOI koji ne prelazi 3% do 4%, mada kriterijumi ASTM standarda dozvoljavaju maksimalni LOI od 6%.⁽³⁾ Uzrok ovome je to što sadržaji ugljenika (koje LOI iskazuje), veći od 3% do 4%, imaju negativan uticaj na stanje životne sredine.

Elektrofilterski pepelo mora da ima dovoljno nizak LOI (obično manje od 3%) kako bi se zadovoljili proizvođači gotovih cementnih betonskih mešavina koji brinu o kvalitetu proizvoda i kontroli primesa koje mogu da dospeju u vazduh. Dalje, stabilne LOI vrednosti su skoro isto tako važne kao i niske LOI vrednosti za proizvođače kojima je bitan stabilan i predvidiv kvalitet.

Betonske mešavine koje sadrže elektrofilterski pepeo sa veoma visokim LOI mogu da naprave tamne površinske brazde, jer čestice ugljenika izbijaju na površinu tokom finiširanja betonom.⁽⁵⁾

Procenat vlage: Prema standardu ASTM C618 maksimalno dozvoljen nivo vlage je 3,0%.

Ugradljivost: Pri datom vodocementnom faktoru, okrugle čestice, koje su pretežno zastupljene u elektrofilterskom pepelu, omogućuju veću ugradljivost nego kada su u pitanju obične betonske mešavine. Čestice pepela se ponašaju kao minijaturni kuglični ležajevi unutar betonske mešavine, što im daje efekat maziva.⁽⁵⁾ Kod primene pepela, ukupna količina cementa i dodatog pepela obično premašuje količinu cementa u standardnim betonskim mešavinama. Povećanom zastupljenošću čvrste u odnosu na tečnu fazu dobija se mešavina koja ima bolju plastičnost i kompaktnost.⁽¹⁰⁾

Žitkost: Žitkost se povećava iz istih razloga kao i ugradljivost, naročito zbog efekta maziva koji poseduju okrugle čestice elektrofilterskog pepela i povećanog učešća čvrste u odnosu na tečnu fazu, što čini da beton bude manje sklon segragaciji.⁽¹⁰⁾

Vreme vezivanja: Pri zameni do 25% količine portland cementa u betonu, svi elektrofilterski pepeli iz klase F produžavaju vreme vezivanja betona. Odlaganje vremena vezivanja je naglašenije u odnosu na uobičajene betonske mešavine pri niskim temperaturama.⁽¹⁰⁾

Višak vode: Višak vode se obično redukuje kada se pepeo koristi u betonskoj mešavini zbog povećane zapremine finih čestica i nižeg sadržaja vode za zadati stepen ugradljivosti.⁽¹⁰⁾

Prirast čvrstoće: Prethodna proučavanja betonskih mešavina sa elektrofilterskim pepelom su potvrdila da većina onih koje sadrže pepeo klase F, koji zamenjuje portland cement u srazmeri 1:1 (jednaka težina), sporije razvijaju čvrstoću na pritisak, kao i zateznu čvrstoću, od konvencionalnih betonskih mešavina u prvih 60 do 90 dana od ugradnje. Posle ovog vremena, betonske mešavine sa pepelom klase F premašuju čvrstoću konvencionalnih mešavina sa portland cementom.⁽⁵⁾ Kod mešavina kod kojih se portland cement zamenjuje elektrofilterskim pepelom u masenoj srazmeri 1:1 do 1.5:1, čvrstoća posle 28 dana je otprilike jednaka onoj kod konvencionalnog betona.

Elektrofilterski pepeo klase C obično pokazuje viši stepen reakcije u ranoj fazi u odnosu na onaj klase F. Pojedine vrste pepela klase C se ponašaju kao portland cement u prirastu čvrstoće posle 28 dana.⁽¹¹⁾ Obe klase pepela su povoljne za proizvodnju betona visoke čvrstoće. Ipak, Američki institut za beton (ACI) preporučuje da se 15 do 25% količine portland cementa menja pepelom klase F, a 20 do 35% pepelom klase C.⁽¹²⁾

Temperatura hidratacije: Početni podsticaj za korišćenje elektrofilterskog pepela u betonu potiče od činjenice da elektrofilterski pepeo koji sporo reaguje generiše manje toplote po jedinici vremena u odnosu na hidrataciju portland cementa koji brže reaguje. Zato, porast temperature u velikim betonskim masama (poput brana) može značajno da se smanji ako se cement zameni elektrofilterskim pepelom, jer se u toku procesa troši veliki deo toplote. Smanjuje se rizik termalnog pucanja i dostiže se veća čvrstoća betona sa elektrofilterskim pepelom zbog pucolanske reakcije.⁽¹⁰⁾ Kod redukovanja temperature hidratacije, elektrofilterski pepeo klase F je efektivniji od klase C.

Hidraulična provodljivost: Elektrofilterski pepeo koji reaguje sa dostupnim krečom i alkalijama generiše dodatna cementna jedinjenja koja blokiraju kanale curenja, popunjavaju pore i redukuju hidrauličnu provodljivost očvrstlog betona⁽¹³⁾. Pucolanska reakcija troši kalcijum hidroksid (Ca(OH)_2), koji propušta procedne vode, zamenjujući ga sa nerastvorljivim hidratom kalcijum silikata (CSH)⁽¹⁰⁾. Povećana količina sitnih čestica i redukovan sadržaj vode takođe igraju ulogu u smanjivanju hidraulične provodljivosti.

Otpornost na dejstvo mraza: Kao i u slučaju svih betona, otpornost betona sa elektrofilterskim pepelom na oštećenja nastala usled naglog mržnjenja - kravljenja zavisi od adekvatnosti sistema vazдушnih šupljina, kao i drugih faktora poput prirasta čvrstoće, klime i upotrebe soli za odmrzavanje. Posebna pažnja se mora obratiti na količinu uvučenog vazduha i raspoređenost mehurića vazduha, jer elektrofilterski pepeo može redukovati efikasnost dodataka za aeraciju betona.⁽¹⁴⁾ Kada beton sa elektrofilterskim pepelom razvije adekvatnu snagu, nema značajnih razlika u otpornosti betona.⁽¹⁰⁾ Beton sa elektrofilterskim pepelom ne bi trebalo da ima veću tendenciju ljuštenja u odnosu na standardni beton, pod uslovom da je beton sa elektrofilterskim pepelom dostigao projektovanu čvrstoću i da ima odgovarajući sistem vazдушnih šupljina.

Otpornost na sulfatnu koroziju: Klasa F elektrofilterskog pepela u betonu povećava otpornost na sulfatnu koroziju. Međutim, zamena elektrofilterskog pepela koji sadrži nizak nivo kalcijuma je redukovala otpornost portland cementa na hemijsku agresiju kiselih kiša.^(15;16) Pojedina elektrofilterska pepela iz klase C mogu povećati otpornost na sulfatnu koroziju, dok druga mogu redukovati otpornost i ubrzati deformacije.^(17;18) Elektrofilterska pepela klase C treba zasebno ispitati pre upotrebe u sulfatnom okruženju. Pretpostavlja se da je relativna otpornost elektrofilterskog pepela na sulfatnu koroziju rezultat odnosa kalcijum oksida („živog“ kreča) i fero oksida.

Alkalnosilikatna reakcija: Klasa F elektrofilterskog pepela je efikasna u sprečavanju ili ograničavanju ekspanzivnih delovanja koja su rezultat alkalnosilikatnih reakcija. U teoriji, reakcija između veoma malih amorfnih staklastih čestica silicijum dioksida u elektrofilterskom pepelu i alkalija u portland cementu, vezuje alkalije u neekspanzivni kalcijum - alkalni silika gel. Ovo sprečava alkalije da reaguju sa silicijum dioksidom iz agregata, što bi rezultiralo ekspanzivnom reakcijom. Ipak, pojedine vrste elektrofilterskog pepela (uključujući i one klase C) imaju primetne količine rastvorljivih alkalija, pa se preporučuje ispitivanje mešavine kako bi se utvrdilo da je ekspanzija nastala usled alkalno-silikatne reaktivnosti na prihvatljivom nivou.⁽¹⁰⁾

Modifikovani ubrzani test definisan standardom ASTM C1260 sa prizmatičnim uzorcima se može iskoristiti za identifikovanje potencijalne alkalno - silikatne reaktivnosti, kao i za procenu uticaja dopunskih cementnih materijala na smanjivanje efekata alkalno - silikatne reaktivnosti. Standardni ASTM C1260 opit se sprovodi brzo (u roku od 14 dana) i pod težim uslovima (visoka temperatura i visoka alkalna rastvorljivost). Ovaj test može da izazove jaku alkalno - silikatnu reaktivnost u mešavinama sa elektrofilterskim pepelom, čak i kada je učinak na terenu adekvatan. Modifikovan test ASTM C1260 za elektrofilterski pepeo traje 28 dana i uzima u obzir različita rešenja, što rezultira reprezentativnijim nivoima alkalno-silikatne reaktivnosti. Treba da se sprovedu dalja ispitivanja drugih faktora, kao što su temperatura i sastojci uzoraka mešavina.⁽¹⁹⁾

Elektrofilterski pepeo, naročito klase C, je na tri načina efikasan kada je u pitanju značajno redukovanje alkalno - silikatne ekspanzije: 1) daje zbijeniji, slabije propustljiv beton, 2) kada se koristi kao zamena za cement, smanjuje ukupni sadržaj alkalija redukovanjem portland cementa, i 3) alkalije reaguju sa njim umesto sa silikatnim agregatima. Elektrofilterski pepeo klase F je

efektivniji od onog klase C zbog većeg sadržaja silicijum dioksida koji može da reaguje sa alkalijama. Korisnici elektrofilterskog pepela klase C su podstaknuti da ocenjuju dugoročnu stabilnost betonskih mešavina u laboratoriji pre upotrebe na terenu, sa ASTM C441⁽²⁰⁾ kao predloženom metodom testiranja.

3.5 Projektovanje

3.5.1 Projektovanje mešavine

Betonske mešavine se prave određivanjem proporcija sastojaka kojima će se obezbediti zahtevana čvrstoća, proizvesti postojan beton koji je jednostavan za rukovanje i ugradnju, dostići zadovoljavajuća izdržljivost za različite spoljašnje uticaje i ekonomičnost. Procedure za određivanje učešća sastojaka u betonskim mešavinama sa elektrofilterskim pepelom se donekle razlikuju od procedura za standardne betone. Američki institut za beton (ACI) daje osnovna uputstva za spravljanje mešavine za normalni i beton visoke čvrstoće.⁽¹²⁾

Jedan od načina pravljenja betonske mešavine sa elektrofilterskim pepelom se sastoji u izradi mase samo sa portland cementom, zatim se uklanja deo portland cementa, a umesto njega dodaje pepeo. Pepeo klase C se obično zamenjuje u razmeri 1:1, dok se onaj klase F može menjati u istoj, ali je ponekad razmera određena na 1,25:1 do 1,5:1. Neke države zahtevaju da se kod određenih mešavina doda pepeo bez smanjenja količine cementa.

Procentualno učešće pepela klase F u ukupnoj količini veziva za standardnu izradu zastora na autoputevima ili granulisanе betonske mešavine je obično od 15 do 25% po masi.⁽⁵⁾ Kada je klasa C u pitanju, ovaj udeo obično varira od 20 do 35%.⁽¹²⁾

Procedure za projektovanje sastava mešavine za standardni, kao i beton visoke čvrstoće, podrazumevaju određivanje ukupne težine veziva (cement plus elektrofilterski pepeo) za svaku probnu mešavinu. U uputstvu ACI za određivanje proporcija u mešavinama se preporučuju zasebne probne mešavine za svakih 5% povećanja kod zamene portland cementa pepelom. Ukoliko se zamena vrši u odnosu 1:1, ukupna težina veziva će ostati ista. Međutim, zbog razlika u vrednostima specifične težine između portland cementa i elektrofilterskog pepela, zapremina veziva će varirati u zavisnosti od probne mešavine.

Kada se u betonskoj mešavini koriste tip IP (portland - pucolan) ili tip I-PM mešani (pucolanski modifikovan portland) cement, elektrofilterski pepeo je već deo veziva. Zato se ne preporučuje da se dodaju dodatne količine ovog materijala. Mešani cement se može koristiti u procesu pravljenja mešavine na isti način kao portland cement tipa I.

Kako bi se izabrala odgovarajuća proporcija koja zadovoljava zahteve određenog projekta, moraju se napraviti probne mešavine. Kod projektovanja sastava betonskih mešavina vodocementni faktor (w/c) je ključni parametar i varira između 0,37 i 0,50. Kada se koristi mešani cement, uglavnom je smanjena potreba za vodom zbog prisustva elektrofilterskog pepela. Kada se on koristi kao zaseban mešani materijal, probne mešavine treba da se prave sa vodom i cementom uz dodatak pepela (w/c+f), koji se ponekad označava kao vodocementni faktor.

Projektovanje bilo koje betonske mešavine sa pepelom se zasniva na određivanju proporcije sa promenljivim odnosom učešća vode i cementa, kako bi se ispunili ili nadmašili zahtevi za čvrstoćom na pritisak (u različitim stadijumima), procentom šupljina i skupljanja ili obradivošću. Procedure projektovanja sastava mešavine naznačene u ACI 211.1 prikazuju postupan proces koji se tiče određivanje razmera vode, cementa (ili cementa i elektrofilterskog pepela) i agregata u probnim uzorcima. Ipak, elektrofilterski pepeo ima manju specifičnu težinu od portland cementa, što treba uzeti u obzir prilikom proračuna mešavine.

3.5.2 Statički proračun

Procedure statičkog proračuna betonskih kolovoznih konstrukcija koje sadže elektrofilterski pepeo se ne razlikuju od procedura za proračun standardnih smeša. Procedure se zasnivaju na proračunskoj čvrstoći betonske mešavine, koja se određuje ispitivanjem uzorka nakon 28 dana nege. Čvrstoća betona može biti zatezna, ili čvrstoća pri jednoosijalnom pritisku. Proračunska čvrstoća betona za konstrukcije je obično čvrstoća pri jednoosijalnom pritisku, kao što je određeno standardom ASTM C39.⁽²²⁾

3.6 Procedure tokom izgradnje

3.6.1 Rukovanje materijalom i skladištenje

Kada se elektrofilterski pepeo koristi kao dopuna agregatu, proizvođači gotovih mešavina ga obično tretiraju na isti način kao i portland cement, s tom razlikom što materijali moraju da se čuvaju u zasebnim silosima.

3.6.2 Mešanje, ugradnja i zbijanje

Pojedine vrste pepela će umanjiti efektivnost dodataka koji se koriste za izradu betona sa povećanim procentom šupljina (gas betona), zahtevajući veću količinu ovih dodataka radi usklađivanja sa specifikacijama. Stoga, proizvođači cementa treba da se pobrinu da se dodaje dovoljna količina dodataka za proizvodnju gas betona u toku mešanja, tako da procenat šupljina u gotovoj masi bude u skladu sa specifikacijama. Ovu karakteristiku treba pažljivo proveravati i prilagođavati u toku proizvodnje kako bi se zadržala u propisanim granicama. Kao i kod svakog drugog betona, treba da se izbegava prekomerno korišćenje vibro uređaja kako bi se postigao zahtevani procenat šupljina u betonu livenom na licu mesta.⁽⁵⁾

Postupak ugradnje i, uopšte, rukovanja betonom koji sadrži elektrofilterski pepeo se ne razlikuje značajno od onog bez prisustva pepela u mešavini. Beton sa pepelom klase F se sporije vezuje u odnosu na standardni beton. Zbog toga može doći do produženja kraja radova za 1 do 2 sata, u zavisnosti od temperature spoljašnje sredine. Takođe, površina betona sa prisustvom pepela može imati izraženije athezivne karakteristike tokom ugrađivanja i završne obrade, mada bi optimalan sadržaj pepela trebalo da poboljša ugradljivost i završnu obradu betonske mase.⁽⁵⁾ Uobičajene procedure ravnjanja, završne obrade, obrade ivica i ispunjavanja spojnica standardnim betonom od portland cementa su primenjive i na beton sa dodatkom pepela.

3.6.3 Negovanje betona

Sporiji prirast čvrstoće betona koji sadrži pepeo klase F može usloviti duže negovanje sa kontrolom vlažnosti u odnosu na standardni beton. Pravilnom primenom aditiva za negu betona bi trebalo da se uspori ispuštanje vlage kako bi se dostigla zahtevana čvrstoća. Pored korišćenja aditiva, uobičajene mere negovanja betona bi trebalo da su dovoljne i za onaj sa pepelom klase F. Negovanje uz kontrolisanu vlažnost treba da se izvodi najmanje 14 dana kako bi se dostigla čvrstoća i postojanost.⁽²³⁾

Izgradnju treba organizovati tako da se ostavi dovoljno vremena da beton dostigne čvrstoću da bi mogao da izdrži uticaje teretnog saobraćaja, ciklusa mržnjenja - kravljenja ili primene soli za odmrzavanje. Pojedine države propisuju krajnji rok u izgradnji posle koga je zabranjena upotreba elektrofilterskog pepela u betonu do početka naredne građevinske sezone. Po hladnom vremenu je bezbednije koristiti elektrofilterski pepeo klase C nego onaj klase F.

Alternativni pristupi krajnjem roku uključuju: redukovanje procenta elektrofilterskog pepela u toku hladnog vremena, povećanje količine portland cementa, upotreba cementa koji brzo razvija čvrstoću ili koji sadrži hemijski aditiv za ubrzavanje dostizanje čvrstoće. Kada je upitanju beton sa elektrofilterskim pepelom, mogu se primenjivati i standardni načini betoniranja po hladnom vremenu (poput zagrejanih agregata i mešane vode, redukcije visine sleganja betona, postavljanje

izolacionog materijala preko nasutog betona, pokrivanja nasutog betona i korišćenje grejalica za unutrašnje betonske radove).⁽²⁴⁾

3.6.4 Kontrola kvaliteta

Kada je u pitanju kontrola kvaliteta upotrebe elektrofilterskog pepela u betonskoj mešavini od portland cementa, treba voditi računa da količina vazduha u svežoj betonskoj masi bude u okviru propisanih granica. Ispitivanje sadržaja šupljina u betonskim mešavinama sa elektrofilterskim pepelom će možda morati da se vrši učestalije nego kod standardnih betonskih mešavina. Drugi vid kontrole sveže betonske mase je provera obradivosti koja se dobija iz testa sleganja i konzistencije Abramsovim konusom. Ovo ispitivanje betonskih mešavina koje sadrže elektrofilterski pepeo treba da se vrši sa istom učestanošću kao i standardnih betona.

3.7 Reference

Pretraživa verzija referenci koje se koriste u ovom poglavlju je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je dostupna [ovde](#).

1. Bilodeau A, Malhotra VM. High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development. *ACI Mater J* 2000;97:41-8.
2. ASTM C595-07 standard specification for blended hydraulic. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2005.
3. ASTM C618-05 standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2005.
4. Papadakis VG. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. low-calcium fly ash. *Cem Concr Res* 1999;29(1):1727-36.
5. Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). Fly ash facts for highway engineers. Federal Highway Administration (FHWA); 2003 Report nr FHWA-IF-03-019.
6. Collins RJ, Ciesielski SK. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board; Washington, DC: 1994.
7. Dockter BA, Jagiella DM. Engineering and environmental specifications of state agencies for utilization and disposal of coal combustion products. In: 2005 world of coal ash conference, Lexington, KY. ; 2005.
8. ASTM C311-05 standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2005.
9. ASTM C204-07 standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. In: Annual book of ASTM standards, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2007.
10. Halstead WJ. Use of fly ash in concrete. Transportation Research Board; Washington, D.C.: 1986.
11. Cook JE. A ready-mixed concrete company's experience with class C ash. National Ready-Mix Concrete Association; Silver Spring, Maryland: 1981. Report nr 163.
12. ACI 211.4R. ACI 211.4R guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash. ; 1993. Report nr ACI 211.4R.
13. Meyers JF, Pichumani R, Kapples BS. Fly ash: A highway construction material. Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA); 1976. Report nr FHWA-IP-76-16.

14. Freeman E, Gao Y, Hurt R, Suuberg E. Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete. *Fuel* 1997 6;76(8):761-5.
15. Hester JA. Fly ash in roadway construction. First ash utilization symposium, U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C.; 1967.
16. Jia X, Zhou S. Effect of low-calcium fly ash on the resistance of cement mortar to sulfate attack in the form of acid rain. *Key Engineering Materials* 2006;302-303:84-90.
17. Dunstan ER,Jr. A possible method for identifying fly ashes that will improve sulfate resistance of concrete. *Cement, Concrete and Aggregates* 1980;2(1).
18. Helmuth R. Fly ash in cement and concrete. Skokie, Illinois: Portland Cement Association; 1987. Report nr SP040.01T.
19. Chang-Seon S, Shondeep LS, Zollinger DG. Application of modified ASTM C1260 test for fly ash-cement mixtures, *Transportation Research Record* [Internet]. [revised 2003;1834.
20. ASTM C441-05 standard test method for effectiveness of pozzolans or ground blast-furnace slag in preventing excessive expansion of concrete due to the alkali-silica reaction. In: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
21. ACI 211.1. ACI 211.1 standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute; Detroit, Michigan: 2002.
22. ASTM C39/C39M-05e1 standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. In: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2005.
23. Hani N, Nakin S. Effect of curing methods on durability of high-performance concrete. *Transportation Research Record* 2002;1798.
24. Portland Cement Association (PCA). Cold-weather concreting. Portland Cement Association Skokie, Illinois: 1980. Report nr IS154.06T.

4 NASIP ILI ISPUNA

4.1 Uvod

Prema podacima Američkog udruženja za ugljeni pepeo, druga najrasprostranjenija upotreba elektrofilterskog pepela, posle proizvodnje betona, je u izradi nasipa i granuliranih ispuna.⁽¹⁾ Za izgradnju nasipa se najviše koristi pepeo dobijen sagorevanjem antracita ili bitumeniziranog uglja. Elektrofilterski pepeli iz lignita ili delimično bitumeniziranog uglja su obično samovezujući i dodavanjem vlage mogu prerano da očvrstnu, što stvara probleme u obradi i nemogućnost da se dostigne željeni stepen zbijanja. Upotreba ovog materijala u izradi nasipa i granuliranih ispuna je doživela proboj 50-ih godina u Velikoj Britaniji kao alternativni materijal iz pozajmišta za donji stroj željeznica.

Standardni vodič za projektovanje i izradu granuliranih ispuna sa elektrofilterskim pepelom, ASTM E2277-03, upućuje na primenu ovog materijala u nasipima i ispunama. Standard obuhvata uputstva za izvođenje terenskih ispitivanja poput: geoloških i hidroloških ispitivanja, procedure ispitivanja u laboratoriji, kao i razmatranje projektovanja, metoda i izgradnje.⁽²⁾

4.2 Učinak

Elektrofilterski pepeo se koristi za izgradnju ili popravku nasipa od 1970. godine.⁽³⁾ On ima nekoliko prednosti u odnosu na prirodno zemljište ili kamen kada se koristi za izradu granuliranih ispuna ili izradu nasipa. Relativno mala specifična težina elektrofilterskog pepela ga čini podobnim za postavljanje preko mekog ili slabo nosivog tla. Visoka čvrstoća na smicanje daje dobru nosivost uz minimalno sleganje. Lakoća pri ugradnji i zbijanju ovog pepela sa odgovarajućim sadržajem vlage može skratiti vreme izgradnje i troškove opreme. U oblastima gde je dostupan u velikim količinama, troškovi pepela mogu biti manji nego troškovi za materijal iz pozajmišta.

U periodu od preko tri godine praćeno je ponašanje dva projekta nasipa od pepela (u savezima Delaver i Pensilvanija), u fazi izgradnje i eksploatacije. Praćenje se sastojalo od uzorkovanja i analize fizičkih i tehničkih karakteristika pepela, vrednovanja ugradljivosti i ponašanja materijala pri zbijanju, prikupljanja i analize uzoraka podzemnih voda iz bunara, kao i praćenje sleganja konstrukcije na karakterističnim lokacijama. Za vreme trogodišnjeg nadgledanja nisu nađeni dokazi izražernih sleganja ili negativnih uticaja na životnu sredinu.^(4,5)

4.3 Tehnološki zahtevi

4.3.1 Kontrola vlažnosti

Optimalna vlažnost elektrofilterskog pepela kod izgradnje nasipa je 3 do 4% i u takvom stanju ga treba isporučivati na gradilište⁽⁴⁾ Pepeo sa sadržajem vlage od 1 do 2% iznad optimalnog nivoa može biti težak za zbijanje.⁽⁶⁾ Suvi pepeo iz silosa mora biti prskan vodom do zahtevane vlažnosti. Pripremljeni pepeo sa deponije treba zahvatiti i, ukoliko je potrebno, vlažiti pre isporuke. U slučaju vodozasicećenog pepela, treba ga izneti iz lagune, skladištiti dok se sadržaj vlage ne smanji na optimalnu vrednost za ugradnju i nakon toga isporučiti na gradilište.

Većina vrsta pepela dobijenih od lignita i bitumeniziranog uglja je samovezujuća, pa dodatak vlage u količinama koje su približne optimalnom sadržaju može izazvati ekstremno brzo vezivanje ili trenutnim očvršćavanje pepela. Da bi se ovaj tip pepela pripremio za upotrebu u nasipanju, potrebno je lagano kvašenje (10 do 15%), skladištenje u trajanju od nekoliko nedelja i propuštanje kroz drobilicu kako bi se uklonili ugrušci pre njegove upotrebe kao punila. Ukoliko je potrebno dodatno zalivanje, treba ga obaviti tek nakon ugradnje, a pre zbijanja.

4.4 Tehnička svojstva

Tehnička svojstva elektrofilterskog pepela koja su naročito bitna kada se on koristi kao materijal za nasipanje ili punjenje jesu: odnos vlažnosti i zapreminske težine (kriva sabijanja), granulometrijski sastav, čvrstoća na smicanje, konsolidacija, čvrstoća na pritisak i vodopropustljivost.

Odnos vlažnosti i zapreminske težine: pepeo ima relativno nisku gustinu usled čega se redukuje teret i sleganje potporne posteljice. Ovlaženi elektrofilterski pepeo razasut niz kosinu nasipa može imati suhu zapreminsku težinu u rastresitom stanju od 6,3 do 7,9 kN/m³. Ipak, kada je dobro zbijen i sa optimalnim sadržajem vlažnosti (obično između 20 i 35%), suva zapreminska težina može biti od 13,4 kN/m³, pa do 15,7 kN/m³.

Granulometrijski sastav: elektrofilterski pepeo je pretežno prašinski, neplastičan materijal. Između 60 i 90% njegovih čestica je sitnije od 0,075 mm (sito br. 200), zbog čega se smatra osetljivim na mraz, pa treba uzeti u obzir smanjenje čvrstoće koje može nastati u toku perioda mržnjenja - kravljenja.⁽⁷⁾ Rezultati laboratorijskih ispitivanja su pokazali da ciklusi mržnjenja - kravljenja ne utiču na čvrstoću zbijenog pepela pri jednoaksijalnom pritisku, jer stepen zasićenosti nije iznosio 100%, što je omogućilo pojavu bubrenja bez uticaja na čvrstoću materijala.⁽⁸⁾ Zato za nasipe od pepela treba uraditi kvalitetnu drenažu.

Čvrstoća na smicanje: Čvrstoća na smicanje kod upravo zbijenih uzoraka elektrofilterskog pepela posledica je, pre svega, unutrašnjeg trenja, mada se kod bitumeniziranih (pucolanskih) pepela registruje i pojava kohezije.⁽⁹⁾ Čvrstoća na smicanje zavisi od zapreminske težine i vlažnosti, pri čemu se najveća čvrstoća javlja pri optimalnom sadržaju vlage.⁽¹⁰⁾ Bitumenizirani pepeo obično ima ugao unutrašnjeg trenja od 26° do 42°. Program testiranja koji uključuje ispitivanje čvrstoće na smicanje kod 51 različitog uzorka pepela pokazuje srednju vrednost ugla unutrašnjeg trenja od 34° uz standardnu devijaciju od 3,3%.⁽¹⁰⁾ Stoga se pri projektovanju ugao unutrašnjeg trenja procenjen na 30° smatra prihvatljivom vrednošću.

Konsolidacija: Nasipi i granulisane ispune treba da imaju malu stišljivost kako bi se umanjilo sleganje puta ili neravnomerno sleganje između konstrukcija i pristupnih nasipa. Pokazalo se da se proces konsolidacije brže odvija kod zbijenog elektrofilterskog pepela nego kod sitnozrnih tla, jer pepeo ima veći procenat šupljina i veću vodopropustljivost od većine sitnozrnih tla. Kod pepela koji imaju svojstva spontanog očvršćavanja, uključujući većinu onih klase C, vrednost stišljivosti je znatno manja.

Čvrstoća na pritisak: kalifornijski indeks nosivosti (CBR) za elektrofilterski pepeo klase F, koji se dobija sagorevanjem antracita i bitumeniziranog uglja, je približan onom kod sitnozrnog tla i iznosi 5 do 15%. Kod samorodnog tla CBR se obično kreće u rasponu od 3 do 15% za sitnozrna (prašina i glina), od 5 do 40% za pesak i peskovita tla i od 20 do 100% za šljunak i šljunkovita tla.

Vodopropustljivost: kod dobro zbijenog letećeg pepela varira od 10⁻⁴ do 10⁻⁶ cm/s, što je približno vodopropustljivosti tla od prašinstog peska do prašinate gline. Vodopropustljivost pepela zavisi od zbijenosti, granulometrijskog sastava i procenta šupljina. Elektrofilterski pepeo se uglavnom sastoji od čestica okruglog oblika koje imaju mogućnost da se gusto zbiju tokom sabijanja, što doprinosi maloj vodopropustljivosti koja umanjuje prolazak vode kroz nasipe od ovog materijala.

4.5 Projektovanje

Pepeo iz većine kotlovskih postrojenja i tehnoloških postupaka uklanjanja se može koristiti za izradu nasipa ili granulisanih ispuna, uključujući taložni pepeo povučen iz laguna (deponija pepela). Postupci i proračuni za projektovanje nasipa ili granulisanih ispuna od elektrofilterskog pepela se suštinski ne razlikuju od onih kod projektovanja zemljanih nasipa ili ispuna. Posebno treba razmotriti projekte gde se pepeo koristi u nasipima ili ispunama. Ako je konstrukcija projektovana prema propisima, elektrofilterski pepeo ima istu čvrstoću i mogućnost zbijanja kao većina zemljanih materijala, a pri tom ima manju specifičnu težinu u suvom stanju.⁽¹¹⁾

4.5.1 Drenaža lokacije

Elektrofilterski pepeo, zbog velike zastupljenosti prašinih čestica, ima sklonost upijanja vode iz okolne sredine, zbog čega niži delovi nasipa mogu da budu hidrofilni. Osnove nasipa od elektrofilterskog pepela ne bi trebalo da budu izložene vlazi, vlažnom zemljištu ili zemljištima gde je visok nivo podzemnih voda. Efikasan način sprečavanja kapilarnog penjanja ili efekta curenja u nasipima ili ispunama od elektrofilterskog pepela jeste postavljanje drenažnog sloja od drobljenog krupnozrnog materijala u osnovu nasipa.⁽¹²⁾

4.5.2 Stabilnost kosina

Kako bi se projektovao siguran nagib kosine, treba sprovesti analizu proračuna poprečnog preseka nasipa sa elektrofilterskim pepelom kao ispunom. Osnovni princip analize stabilnosti nagiba jeste poređenje faktora koji doprinose nestabilnosti sa onim koji doprinose otpornosti na lom. Otpornost na lom predstavlja čvrstoću na smicanje materijala za nasipanje. Treba da se sprovede i dugoročna, seizmička analiza stabilnosti. U tom smislu se za nasipe od elektrofilterskih pepela preporučuje faktor sigurnosti od 1,5, dok kod seizmičkih opterećenja odgovarajući faktor sigurnosti iznosi 1,2.⁽¹²⁾ Kod ovih proračuna vrednost kohezije (c) treba da bude nula, osim u slučaju kada je elektrofilterski pepeo samoočvršćujući. U referencama je pod brojem (13) dato uputstvo za analizu stabilnosti nagiba.

4.5.3 Analiza kontrole erozije

Ugao nagiba kosine utiče na erozivnost zbijenog elektrofilterskog pepela. Nagibi treba da se zaštite odmah po završetku nasipanja kako bi se što više umanjilo spiranje koje nastaje oticanem vode niz kosinu ili pod uticajem jakih vetrova. Jedan od načina prevencije je izrada kasete od krupnozrnog tla na celoj površini kosine i njihovo ispunjavanje elektrofilterskim pepelom. Kasete kao brane smanjuju kinetičku energiju vode i onemogućavaju spiranje sitnozrnog materijala na kosinama. Drugi način je humusiranje kosina neposredno po izgradnji nasipa. Nadvišenje kosina i skidanje viška pepela na odgovarajuću kotu kada se dostigne konačna visina konstrukcije je još jedan od načina. Konačno, brza kontrola erozivnih procesa se može postići stabilizacijom površinskog sloja pepela niskim procentom portland cementa ili kreča,⁽¹⁴⁾ ili oblaganjem pokrivanjem od težih frakcija elektrofilterskog pepela (šljaka).

4.5.4 Nosivost tla

Nosivost posteljice od elektrofilterskog pepela se izražava Kalifornijskim indeksom nosivosti (CBR) za fleksibilne, ili modulom reakcije tla K za krute kolovozne konstrukcije. Dobijene vrednosti nosivosti se mogu primeniti kod proračuna debljine kolovoznih slojeva saglasno uputstvu AASHTO za projektovanje kolovoznih konstrukcija.⁽¹⁵⁾ Metode za određivanje CBR-a se mogu naći u standardu ASTM D1883-05⁽¹⁶⁾, a modula reakcije tla u D 1195 ili D 1196, a po potrebi se indeks nosivosti određuje test metodama prema standardima D 1883 ili D 4429.⁽¹²⁾

4.5.5 Klimatski uslovi

Tokom jakih ili višednevnih padavina, treba smanjiti vlažnost pepela koji se transportuje do mesta ugradnje zbog kompenzacionog efekta.

Za razliku od drugih materijala, elektrofilterski pepeo se može ugrađivati i zimi, mada se razastiranje i zbijanje na spoljašnjoj temperaturi ispod -4°C ne preporučuje.⁽¹⁴⁾ Nije preporučljiva ni ugradnja smrznutog pepela. Elektrofilterski pepeo koji se preuzima direktno iz silosa ili koševa otpušta toplotu polako, pa se može ugrađivati i pri hladnom vremenu. Ako mraz zahvati površinski sloj pepela, on se može ukloniti dozerom, ili ponovo zbijati po odmrzavanju i njegovom sušenju.⁽¹²⁾ Izgradnju treba prekinuti u teškim vremenskim uslovima, poput velikih pljuskova, snežnih oluja ili tokom perioda dugotrajnih i/ili veoma niskih temperatura.

U toku cikličnog mržnjenja i kravljenja može da dođe do opadanja čvrstoće konstrukcije od elektrofilterskog pepela.⁽⁸⁾ Osetljivost pepela na mraz se može odrediti primenom ASTM D5918.⁽¹⁷⁾ Metoda testiranja definisana ovim standardom sastoji se u izlaganju cilindričnog uzorka zbijenog

pepela prečnika 146 mm i visine 150 mm dva puta ciklusima mržnjenja i kravljenja. Koeficijent bubrenja i Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) posle odmrzavanja ukazuju na osetljivost na mraz. Materijali osetljivi na mraz imaju stopu bubrenja veću od 4 mm dnevno i CBR posle odmrzavanja manji od 10.⁽¹⁷⁾ Bubrenje površinskog sloja kosine usled mraza se može značajno smanjiti dodavanjem umerenih količina cementa ili kreča.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja su pokazali da ciklusi mržnjenja-kravljenja ne utiču na čvrstoću uzorka od pepela pri jednoaksijalnom pritisku, zato što stepen njegovog zasićenja vodom nije bio 100%, što omogućuje širenje leda bez negativnog uticaja na čvrstoću materijala.⁽⁸⁾ Iz tog razloga, ispune od elektrofilterskog pepela mogu slobodno da se dreniraju. Ako posmatramo isključivo osetljivost na mržnjenje, zamena tla otpornog na mržnjenje elektrofilterskim pepelom u zoni mržnjenja može da izazove moguće probleme.

4.5.6 Zaštita podzemnih cevi i betonskih elemenata

Hemijski testovi i/ili testovi električne otpornosti (npr. ASTM G187-05)⁽¹⁸⁾ pojedinih vrsta elektrofilterskog pepela ukazuju na to da neki od njih mogu da nagrizažu metalne cevi postavljene u nasipu. Treba ispitati korozivni potencijal svakog izvora elektrofilterskog pepela ponaosob. Ukoliko se proceni da je zaštita metalnih cevi neophodna, spoljašnost cevi se može obložiti katranom ili bitumenom, cevi se mogu umotati u polietilensku pokrivku, ili se mogu zasuti peskom ili nekim drugim inertnim materijalom.⁽¹⁴⁾

Pojava sulfata u elektrofilterskom pepelu, naročito samovezujućem, izaziva zabrinutost zbog mogućnosti sulfatne agresije na okolne betonske podloge ili zidove. Mere predostrožnosti koje se mogu preduzeti protiv potencijalne sulfatne agresije na beton uključuju premazivanje betonskih površina sa katranom ili asfaltnim cementom, koristeći vodootporne membrane (kao što je polietilenska pokrivka ili ter-papir), ili cement tipa V otporan na dejstvo sulfata.

4.6 Procedure tokom izgradnje

4.6.1 Rukovanje materijalom i skladištenje

Bitumenizirani (pucolanski) elektrofilterski pepeo se obično meša sa vodom u energetskom postrojenju i prevozi se u pokrivenim damperima sa čvrsto zatvorenim zadnjim delom. Pepeo (samovezujući) nastao sagorevanjem delimično bitumeniziranog uglja i lignita može biti delimično vlažen u termoelektrani, a zatim se prevozi u pokrivenim damperima na gradilište, ili se prevozi suv u pneumatskim cisternama od elektrane do gradilišta, gde se smešta u silose i vlaži neposredno pre ugrađivanja. Treba sprovesti privremeno deponovanje materijala kako bi se uklonio višak vode iz laguna pre transporta i tako sprečilo curenje tokom transporta.⁽¹⁹⁾

Ukoliko se privremena deponija pepela sagradi na gradilištu, površinski sloj deponije mora da se održava dovoljno vlažnim kako bi se sprečilo osipanje prašine. Deponija treba da se postavlja u oblasti koja se dobro drenira kako pepeo ne bi bio poplavljen vodom nakon pljuskova.⁽¹⁴⁾

4.6.2 Ugradnja i zbijanje

Pre ugradnje pepela treba pripremiti teren u skladu sa zahtevima za pripremu koji se tiču zemljanjih materijala za ispunu. Teren treba raščistiti i očistiti od vegetacije, a površinski sloj treba sačuvati za finalno pokrivanje. Pre i u toku izgradnje posebnu pažnju treba obratiti na drenažu terena i sprečavanje filtracione vode i vode iz bazena i izvora da dođu u kontakt sa pepelom u skladištima.⁽¹⁹⁾

Građevinska oprema potrebna za pravilnu ugradnju elektrofilterskog pepela u nasipe i granulisane ispune uključuje dozere za razastiranje materijala, vibro ploče, vibro ili gumene valjkove, kamione cisterne sa vodom za olakšavanje zbijanja (ukoliko je potrebno) i kontrolu rasipanja prašine i grejdere za postizanje projektovanog nagiba i nivelete posteljice.

Elektrofilterski pepeo se obično razastire i ravna dozerom, grejderom ili drugim mašinama u rastresitim slojevima ne debljim od 30 cm. Korišćenje drljače ili rotacione sitnilice može biti neophodno ukoliko pepeo sadrži grumenje.⁽¹⁴⁾ Slojevi pepela treba da se zbijaju čim se materijal razastre uz prisustvo optimalnog sadržaja vlage. Iskustvo je pokazalo da se optimalna zbijenost postiže primenom vibracionih valjaka sa čeličnim i/ili gumenim točkovima. Kod primene vibracionog valjka, prvi prelaz treba da se izvede sa valjkom u statičkom režimu (bez vibracija), a zatim dva prelaza u vibracionom režimu i relativno brzo. Naredni prelazi treba da budu u vibracionom režimu i sporiji.^(6;12)

Obično je potrebno šest prelaza valjkom kako bi se ispunio zahtev projektovane zbijenosti. U većini slučajeva, 90% do 95% standarde zapreminske mase prema Proктору predstavlja minimalnu zapreminsku masu koja treba da se postigne. To je, obično, moguće kad je sadržaj vlage između 2% i 3% od optimalnog sadržaja, a po mogućstvu što niži.⁽²⁰⁾

Za svaki projekat treba oceniti tip vibro ploča, sadržaj vlage elektrofilterskog pepela prilikom ugradnje, debljinu slojeva i broj prelaza mašina za zbijanje pomoću probnog pervibriranja betona. Kod vibro ploča je probno pervibriranje potrebno kako bi se procenila potrebna brzina vibro ploče, statička težina, dinamička sila i frekvencija vibracija, kao i broj prelaza neophodnih da bi se postigla propisana zapreminska masa.⁽¹⁴⁾

4.6.3 Kontrola kvaliteta

Programi kontrole kvaliteta za nasipe ili granulisanu ispunu od elektrofilterskog pepela su slični programima za standardne projekte zemljanih radova. Ovi programi obično uključuju vizuelne observacije debljine nanosa, broja prelaska kompaktora po nanosu i ponašanje elektrofilterskog pepela pod težinom opreme za zbijanje, dopunjeni laboratorijskim i terenskim ispitivanjima kako bi se potvrdilo da je zbijanje pepela izvedeno u skladu sa odredbama projekta.⁽¹²⁾ Više informacija o propisima za rad i procedurama, kao i metodama propisa i procedura se može naći u standardu ASTM E2277.⁽¹²⁾

4.6.4 Kontrola prašine

Mere za kontrolu emisija prašine, koje se sprovode rutinski u projektima zemljanih radova, su efikasne za redukovanje koncentracije čvrstih čestica u vazduhu kod projekata granulisanih ispuna od elektrofilterskog pepela. Tipična kontrola uključuje transport pepela u pokrivenim damperima ili kamionima silosima, vlaženje materijala u energetske postrojenjima, vlaženje ili pokrivanje izloženih površina pepela i pečačenje površina zbijenog pepela mekanim pokrivačima ili gumenim folijama na kraju svakog radnog dana.⁽¹²⁾

4.6.5 Drenažna/zaštita od erozije

Površine elektrofilterskog pepela treba da se stave pod nagibom na kraju svakog dana kako bi se obezbedila efikasna drenaža i sprečilo sakupljanje vode ili stvaranje otočnih kanala koji bi mogli da spiraju nagibe i da stvore naslage u susednim površinskim vodama. Nasipi od zbijenog elektrofilterskog pepela treba da se zaštite odmah po pravljenju nagiba kako bi se redukovala erozija. Kontrola erozije na stranama nagiba se obično sprovodi stavljanjem zemljišne pokrivke debljine od 150 mm do 600 mm. Alternativni pristup je izgradnja spoljnih zemljanih brana kako bi se zadržao pepeo dok se gradi nasip.⁽¹⁴⁾

4.7 Zaštita životne sredine

Kao što je predstavljeno u Opisu materijala od elektrofilterskog pepela, njegova upotreba kao materijala za nasipe i ispune jeste nehermetička upotreba i usled toga može izazvati zagađivanje ocednih voda. Upotreba pepela u nasipama ili kao ispuna zahteva dobro rukovanje i pažnju kako ne bi došlo do negativnog uticaja na okolinu. Naročito treba obratiti pažnju na peskovita zemljišta koja imaju visoko hidrauličnu provodljivost i oblasti blizu plitkih podzemnih voda i pijaćih podzemnih rezervoara. Da bi se obezbedio siguran proizvod, koji nema negativne uticaje na životnu sredinu, od velikog značaja su procena stanja podzemnih voda, primenljive državne procedure za ispitivanje, standardi kvaliteta voda i ispravna gradnja.⁽²⁾

4.8 Nerešena pitanja

Za izgradnju nasipa i granulisanih ispuna češće se koristi bitumenizirani (pucolanski) nego elektrofilterski pepeo od delimično bitumeniziranog uglja ili lignita (samovezujući e. p.). Razlog ovome su, delimično, poteškoće u ugradnji i zbijanju samovezujućeg pepela, koji se vezuje odmah po dodavanju vode. Trenutno se praktikuje umereno kvašenje ovog materijala, skladištenje na određeno vreme, zatim propuštanje delimično očvrstelog elektrofilterskog pepela kroz primarnu drobilicu pre nego što se odnese na gradilište. Kada se pepeo koristi kao filer, nema potrebe za detaljnijom razradom procedura njegovog čuvanja i ugradnje.

4.9 Reference

Pretraživa verzija referenci koje se koriste u ovom poglavlju je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je dostupna [ovde](#).

1. American Coal Ash Association (ACAA). 2006 coal combustion product (CCP) production and use. Aurora, CO: American Coal Ash Association; 2007 August 24, 2007.
2. Environmental Protection Agency (EPA), Federal Highway Administration (FHWA). Using coal ash in highway construction - A guide to benefits and impacts. ; April 2005. Report nr EPA-530-K-002:ID: 151.
3. Collins RJ, Ciesielski SK. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board; Washington, DC: 1994.
4. Collins RJ, Srivastava L. Use of ash in highway construction: Delaware demonstration project. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 1989. Report nr GS-6540.
5. Baykal G, Edinçliler A, and Saygili A. Ash utilization in highways: Pennsylvania demonstration project. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 1989. Report nr GS-6431.
6. Baykal G, Edinçliler A, Saygili A. Highway embankment construction using fly ash in cold regions. Resources, Conservation and Recycling 2004 10;42(3):209-22.
7. Gray DH; Lin Y. Engineering properties of compacted fly ash. American society of civil engineers national water resources engineering meeting, Phoenix, Arizona, American Society of Civil Engineers; 1971.
8. Cocka E. Frost susceptibility properties of Soma-B fly ash. Journal of Energy Engineering 1997;123(1):1-10.
9. Di Gioia AM, Nuzzo WL. Fly ash as structural fill. Journal of the Power Division 1972 June;98(1):77-92.
10. McLaren, RJ; DiGioia AM Jr. Typical engineering properties of fly ash. Geotechnical practice for waste disposal '87 University of Michigan, Ann Arbor, Michigan: 1987.

11. Kim B, Prezzi M, Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005;131(7):914-24.
12. ASTM E2277-03 standard guide for design and construction of coal ash structural fills. In: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2003.
13. Duncan JM, Wright SG. *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons, Inc.; 2005.
14. DiGioia AM, Jr., McLaren RJ, Taylor LR. *Fly ash structural fill handbook*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 1979. Report nr EA-1281.
15. AASHTO. *Guide for design of pavement structures*. Washington, DC.; American Association of State Highway and Transportation Officials; 1993.
16. ASTM D1883-05 standard test method for CBR (california bearing ratio) of laboratory-compacted soils. In: *Annual book of ASTM standards*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials; 2005.
17. ASTM D5918-06 standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils. In: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2006.
18. ASTM G187-05 standard test method for measurement of soil resistivity using the two-electrode soil box method. In: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
19. Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). *Fly ash facts for highway engineers*. Federal Highway Administration (FHWA); 2003. Report nr FHWA-IF-03-019.
20. Kinder, DL, Morrison RE. *An engineering approach for using power plant ash in a structural fill*. Fifth international ash utilization symposium, report no. METC/SP-79-10U.S. Department of Energy; 1979.

5 STABILIZOVAN NOSEĆI SLOJ I POSTELJICA

5.1 Uvod

Elektrofilterski pepeo se često koristi kao komponenta u mešavinama za izradu stabilizovanog nosećeg sloja i posteljice. Može se koristiti pepeo od bitumeniziranog (pucolanski), delimično bitumeniziranog uglja i lignita. Bitumenizirani pepeo (klasa F) se meša sa hemijskim reagensima ili reaktorima, agregatom i vodom. Da bi se dobio proizvod sa vezivnim svojstvima moraju se upotrebiti aktivatori poput portland cementa ili kreča. Kod većine krupno granuliranih agregata količina elektrofilterskog pepela će, obično, biti između 8% i 20%. Kod peskovitih agregata količina iznosi od 15% do 30%. Pepeo od delimično bitumeniziranog uglja ili lignita (klasa C), koji je obično samovezujući, ne zahteva hemijske reagense ili aktivatore. On se meša sa agregatima i vodom, ali zbog svojstva brzog sleganja, količina pepela je obično između 5% i 20%. Samovezujući pepeo se može koristiti samostalno kao vezivni sloj bez ikakvih agregata.

Upotreba elektrofilterskih pepela u gradnji stabilizovanog nosećeg sloja i posteljice datira još od 1950-ih, kada je prvi put razvijena i patentirana mešavina za izradu nosećeg sloja kolovoznih konstrukcija, poznata kao Poz-o-Pac (mešavina kreča, pepela i agregata). Pošto su početkom 70-ih istekla patentna prava na Poz-o-Pac, razvijene su brojne varijacije osnovnog oblika ove mešavine. Realizovana su rešenja za stabilizovanje gornjeg nosećeg sloja koje sadrže portland cement, a koja su se razvila iz mešavine zemlja - cement. Sve ove mešavine sadrže elektrofilterski pepeo i mogu se svesti pod opštu oznaku „pucolanske stabilizacije“ (*pozzolan-stabilized base* - PSB).

Glavna komponenta većine pucolanskih stabilizacija je agregat. Za prve primenjene mešavine Poz-o-Pac u kolovoznim konstrukcijama projektovanim za veliko saobraćajno opterećenje korišćen je lokalno dostupan drobljeni kameni agregat visokog kvaliteta (kao što je krečnjak, tucanik ili granit), pesak i šljunak, ili zgura visokih peći. PSB mešavine su primenjivane u izgradnji servisnih saobraćajnica na gradilištima, ulica u stambenim zonama i lokalnih puteva korišćenjem agregata iz termoelektrana (pepeo sa dna ili zgura iz kotlova), agregata graničnih karakteristika (uključujući neke nestandardizovane materijale), otpadaka od uglja i rekultiviranih materijala za izradu zastora. Ovakvi alternativni agregati su često dostupni i ekonomični za upotrebu u oblastima gde je slabo snabdevanje visoko kvalitetnim agregatima.

Slično primeni elektrofilterskog pepela kao vezivnog sloja je i stabilizovana reciklaža po hladnom postupku na licu mesta (*cold-in-place recycling* - CIR). Ovaj postupak se, po pravilu, sastoji od skidanja i mlevenja postojećeg zastora i mešanja reciklirane mase sa asfaltnom emulzijom kao stabilizatorom. CIR obezbeđuje visoko kvalitetnu osnovu za izradu novog asfaltnog kolovoznog zastora, mada može da posluži i sam kao završni sloj kolovozne konstrukcije u postupku reciklaže. Zamenom asfaltno emulzije elektrofilterskim pepelom u postupku CIR, ostvaruju se slični efekti.^(1;2;3;4;5;6)

5.2 Učinak

Uspešnost učinka pucolanskih stabilizacija (PSB) zavisi od prirasta čvrstoće vezivne mase do koga dolazi pucolanskom reakcijom između elektrofilterskog pepela i aktivatora. Ova masa se ponaša kao vezivo koje spaja zrna agregata i sa više aspekata je slična slabonosivom (mršavom) betonu. Međutim, za razliku od betona, pucolanske stabilizacije su kompaktne i imaju približno optimalnu vlažnost.

Prema istraživanju sprovedenom 2005. godine, dvanaest saveznih država u SAD ima neku vrstu specifikacija za upotrebu elektrofilterskog pepela u stabilizaciji tla.⁽⁷⁾ Najmanje dvadeset dve države su koristile elektrofilterski pepeo u materijalima za stabilizaciju nosećih slojeva kolovoznih konstrukcija.⁽⁸⁾ Veliki broj ovih mešavina je izgrađen u oblastima sa niskom frekvencijom saobraćaja, kao što su pristupne ulice ili parkirališta za automobile. Ovi radovi obično nisu dobro dokumentovani. Međutim, postoji određen broj projekata pucolanskih stabilizacija za koje su sačinjeni solidni izveštaji i koji su dali izvanredan učinak. Najmanje sedam saveznih država SAD

je uvrstilo rešenja nosećih slojeva od PSB mešavina u eksperimentalno - pokazni projekat br. 59 Savezne administracije za puteve SAD, pod imenom Upotreba elektrofilterskog pepela u izgradnji autoputeva.

Pešačke staze od PSB mešavina su, tokom višegodišnje primene na brojnim lokacijama, zadržale dobre do odlične karakteristike. Pri tom su se pokazale ekonomičnijim od alternativnih osnovnih materijala. Pored toga, poseban problem za inženjere kod primene stabilizacija, uključujući kombinaciju tlo - vezivo, predstavlja pojava pukotina po visini unutar nosećeg sloja koje se mogu preneti do površine kolovoza (tzv. reflektovanje pukotina). Studija sprovedena u Odseku za transport savezne države Kansas, kojom su poređene delimične intervencije (po visini kolovozne konstrukcije) po hladnom postupku na licu mesta (CIR) i stabilizovanjem reciklažnog agregata primenom pepela klase C ili krečne emulzije, pokazala je da su testirane deonice sa elektrofilterskim pepelom bile osetljivije na prostiranje pukotina i u vertikalnom i u podužnom pravcu.⁽¹⁾ Sličnom studijom sprovedenom u Viskonsinu, nisu opažene površinske pukotine ni nakon šest godina eksploatacije ni na kontrolnoj deonici, stabilizovanoj asfaltnom emulzijom, ni na onoj sa elektrofilterskim pepelom.^(3:2)

Elektrofilterski pepeo se, takođe, može koristiti za poboljšanje nosivosti materijala za izradu posteljice. Dodavanjem 10 do 20% pepela klase C u završni sloj nasipa ili podtlo povećala se čvrstoća pri jednoaksijalnom pritisku i vrednosti CBR podloge. Skraćivanje perioda između dva ciklusa zbijanja tla sa dodatkom pepela pozitivno je uticalo na nosivost posteljice.^(9:10)

Pepeo klase C je uspešno primenjen u testovima stabilizacije tla na dva gradilišta u Viskonsinu. Obe posteljice su sadržale više od 90% sitnozrnih agregata, sadržaj vode na licu mesta je iznosio 6% do 7% optimalne vlažnosti i vrednosti CBR su bile male (između 1 i 3). Na oba gradilišta je stabilizacija sa samovezujućim elektrofilterskim pepelom u značajnoj meri povećala čvrstoću i krutost tla. Povećana krutost je omogućila bolju nosivost uz manje deformacije pri kretanju građevinske mehanizacije.⁽¹¹⁾ Po dodavanju elektrofilterskog pepela, laboratorijska ispitivanja su pokazala povećanu čvrstoću pri jednoaksijalnom pritisku i vrednosti CBR i modula povratne deformacije (Mr) tla. Ispitivanje mešavina je pokazalo da je tlo pomešano sa više od 20% elektrofilterskog pepela rezultiralo slabim efektima u poboljšanju nosivosti, dok je učešće između 10% i 12% dalo optimalnu mešavinu sa aspekta troškova i nosivosti. Terenske vrednosti CBR optimalne mešavine su iznosile približno dve trećine vrednosti CBR izmerenih u laboratoriji, što je više nego dovoljno da izdrži opterećenje građevinske mehanizacije.⁽¹¹⁾

5.3 Tehnološki zahtevi

5.3.1 Kontrola vlažnosti

Korišćenje elektrofilterskog pepela u pucolanskim stabilizacijama ne zahteva gotovo nikakvu njihovu prethodnu obradu, sa izuzetkom kontrole vlažnosti. Kod pepela klase F vlažnost je uslovljena tipom opreme koja se koristi za proizvodnju osnovnog materijala. Ako se mešavina pravi u stacionarnoj betonskoj bazi, elektrofilterski pepeo se iz silosa u mešalicu dodaje uglavnom u suvom obliku. Ako se koristi mobilno kontinualno postrojenje (*pugmill*) ili se PSB mešavina izvodi na licu mesta, pepeo treba dozirati sa optimalnom vlažnošću. Kvašeni pepeo sadrži minimalnu količinu vode (obično od 10% do 15%) kako bi se sprečilo podizanje prašine.

Aktivatori (odnosno kreč, portland cement i prašina iz peći za žarenje) se obično dodaju mešavini u suvom stanju. To znači da aktivatori ne zahtevaju obradu i isporučuju se na gradilište i skladište se u silosima i tankerima.

Elektrofilterski pepeo klase C ima karakteristiku samovezivanja. Postoje dva načina da se ubrza očvršćavanje osnovnih materijala korišćenjem samovezujućeg pepela. Prvi podrazumeva prethodno kvašenje sa relativno malim količinama (10% do 15%) vode, skladištenje delimično očvrstlog materijala na nekoliko nedelja, a zatim mlevenje pepela kako bi se razbile grudve i materijal homogenizovao pre upotrebe. Drugi način predstavlja odlaganje procesa vezivanja primenom

komercijalnih usporivača (kao što su gips ili boraks), koji se u malom procentu mešaju sa elektrofilterskim pepelom.⁽¹²⁾

Agregati koji se koriste za izradu pucolanskih stabilizacija (PSB) treba da budu u zasićenom, površinski suvom stanju tokom skladištenja. Pred početak izrade mešavine treba proveriti vlažnost agregata, zbog mogućnosti pojave viška vode tokom skladištenja.

5.4 Tehnička svojstva

Neka od svojstava elektrofilterskog pepela, koja su od posebnog značaja kada se on primenjuje u stabilizovanom nosećem sloju kolovoznih konstrukcija, su rastvorljivost u vodi, vlažnost, pucolanska aktivnost, finoća i sadržaj organskih materija. Standardi ASTM D5239 i C593 sadrže specifikacije o karakterizaciji elektrofilterskog pepela za upotrebu u stabilizaciji tla.^(13;14) Ostale karakteristike od interesa si čvrstoća na pritisak i savijanje, modul povratne deformacije, nosivost, samoobnavljanje, zamor, otpornost na mraz i vodopropustljivost.

Rastvorljivost u vodi: Najčešći fizički zahtevi koji se tiču upotrebe elektrofilterskog pepela u pucolanskim stabilizacijama su predstavljeni standardom ASTM C593 koji određuje maksimalnu koncentraciju pepela u vodi na 10%.⁽¹⁴⁾

Vlažnost: Ako se koristi kvašeni pepeo, treba utvrditi njegovu vlažnost pre mešanja kako bi se potvrdilo da ne odstupa od projektom predviđene.

Pucolanska aktivnost: Jedno od najbitnijih svojstava elektrofilterskog pepela koji se koristi u PSB mešavinama jeste pucolanska aktivnost ili reaktivnost. Ovo svojstvo je indikator sposobnosti pepela da, pomešan sa kalcijumom, formira vezivnu smešu. Pucolanska aktivnost elektrofilterskog pepela zavisi od finoće, prisustva silicijum dioksida i aluminijum oksida, gubitka žarenjem i alkalnog sadržaja. Pored granulacije upotrebljenog agregata, pucolanska reaktivnost pepela najviše doprinosi čvrstoći mešavine za noseći sloj kolovozne konstrukcije. Pucolanska aktivnost elektrofilterskog pepela u kombinaciji sa krečom ili portland cementom se može utvrditi korišćenjem metoda ispitivanja predstavljenih u standardu ASTM C311.⁽¹⁵⁾

Finoća: Zahtevi koji se tiču finoće pri stabilizaciji tla sa elektrofilterskim pepelom klase F, pri čemu je potrebno mešanje sa krečom, su dati u standardu ASTM C593.⁽¹⁴⁾ ASTM C593 propisuje da 98% mase pepela treba da bude sitnije od 0,6 mm (sito br. 30), a 70% sitnije od 0,075 mm (sito br. 200). Većina vrsta elektrofilterskih pepela zadovoljava ove uslove.

Sadržaj organskih materija: Elektrofilterski pepeo koji se koristi u pucolanskim stabilizacijama (PSB) ne mora da ispuni zahteve predstavljene standardom ASTM C618⁽¹⁶⁾ vezane za pepeo koji se koristi u betonu od portland cementa. Mada gubitak žarenjem ne predstavlja kriterijum za upotrebu elektrofilterskog pepela u PSB mešavinama, organska zemljišta je, uopšte, teže stabilizovati hemijski zbog nižeg sadržaja čvrstih materija, većeg sadržaja vode, niže pH vrednosti i hemijskog uticaja na reakcije vezivanja.⁽¹⁷⁾

Čvrstoća na pritisak: Čvrstoća na pritisak je najčešće korišćen kriterijum za prihvatljivost PSB materijala. Ispitivanje ove karakteristike kod pucolanskih stabilizacija se obično vrši na uzorcima za Proktorov opit – masa u cilindru prečnika 10,2 cm i visine 11,7 cm, pripremljena sa optimalnom ili približno optimalnom vlažnošću mešavine. Uopšteno, veća čvrstoća na pritisak ukazuje na bolji kvalitet stabilizovanog materijala. Za mešavine nosećih slojeva kolovoznih konstrukcija stabilizovanih cementom, Američko Udruženje za portland cement preporučuje da minimalna čvrstoća na pritisak posle sedmodnevne nege uzorka na 23°C bude 3100 kPa.⁽¹⁸⁾ U slučaju da se kao aktivator koristi krečna prašina iz peći za žarenje, standard ASTM C593 propisuje da minimalna čvrstoća na pritisak uzorka posle 7 dana nege na 38°C iznosi 2760 kPa. Maksimalna čvrstoća pucolanskih stabilizacija koje sadrže pepeo klase F može biti dva do tri puta veća od čvrstoće posle 7 dana. Stopa rasta čvrstoće mešavina sa elektrofilterskim pepelom klase F naglo opada posle 56 dana.⁽¹⁹⁾

Stvarni porast čvrstoće na pritisak pucolanske stabilizacije na gradilištu zavisi od vremena i temperature. Sa porastom temperature raste i čvrstoća. Na temperaturi 4°C ili nižoj, pucolanska reakcija virtuelno prestaje i mešavina više ne očvršćuje. Međutim, kada temperatura pređe 4°C, nastavlja se pucolanska reakcija, kao i očvršćavanje. Zbog toga čvrstoća PSB mešavina može da nastavi da raste tokom dugog niza godina po ugradnji.⁽¹⁹⁾

Čvrstoća pri savijanju: Iz razloga što stvrdnuta pucolanska stabilizacija (PSB) ima karakteristike polukrute kolovozne konstrukcije, njena čvrstoća pri savijanju može biti bolji indikator efektivne čvrstoće materijala. Mada se ova veličina može odrediti direktno opitom, mnoge agencije za transport ocenjuju čvrstoću pri savijanju kao parametar izveden iz čvrstoće na pritisak. Procenjuje se da čvrstoća pri savijanju pucolanske stabilizacije iznosi 20% prosečne vrednosti čvrstoće pri jednoosijalnom pritisku istog materijala.⁽²⁰⁾

Nosivost: Test kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR)⁽²¹⁾ se često koristi kao metoda merenja nosivosti tla koje ima ulogu posteljice na putevima i aerodromima. Zbog relativno visoke čvrstoće zbijenih pucolanskih stabilizacija, nisu neuobičajene ni visoke vrednosti CBR (sa prekoračenjem od 100%). Opit CBR je pogodniji za merenje nosivosti posteljice od pepelom stabilizovanog tla, nego za ispitivanje mešavina PSB.

Pored smanjenja pojave bubrenja, karakteristične za slabonosiva tla,⁽²²⁾ sa dodavanjem pepela sitnozrnim zemljištima, sa indeksom plastičnosti između 15 i 40, registrovan je porast vrednosti CBR. Sa izmerenom vlažnošću od 7% ova tla su imala CBR između 1 i 5, što je nedovoljno za nosivost posteljice. Dodavanjem 10% elektrofilterskog pepela vrednost CBR je povećana 4 puta, a dodavanjem 18% CBR je bio 8 puta veći. Tip tla je takođe uticao na porast vrednosti CBR. Najveća promena je zabeležena kod mekih, visoko plastičnih glina, a najmanja kod dobro granuliranih, muljevitih glina.⁽¹⁷⁾ CBR meren na licu mesta može iznositi dve trećine vrednosti CBR-a izmerenog u laboratoriji. Uzrok tome je, verovatno, pojava grumenja od čestica gline na terenu, čime se smanjuje ravnornost vezivanja.⁽¹¹⁾

Modul povratne deformacije: Predstavlja meru elastičnosti prilikom brzog i učestanog nanošenja opterećenja. Ovaj pokazatelj je povezan sa ponašanjem materijala pod dugotrajnim opterećenjem. Kod slabo nosivih tla, dodavanjem elektrofilterskog pepela, može doći do relativno velikog porasta ovog parametra, mereno prema standardu AASHTO T292.⁽²³⁾ 10% do 12% pepela može povećati modul povratne deformacije slabonosive posteljice i do 100 MPa.⁽¹¹⁾ Odnos vrednosti modula povratne deformacije (M_r) i kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) je $M_r = 3 \times \text{CBR}$ (u MPa), što odgovara rezultatima laboratorijskih ispitivanja vezanim za stabilizovano zemljište sa elektrofilterskim pepelom.^(24;17)

Samoobnavljanje: Jedna od jedinstvenih karakteristika mešavina PSB je mogućnost „isceljenja“ pukotine unutar materijala uz pomoć procesa samovezivanja. Ovaj mehanizam se označava kao samoobnavljanje i rezultat je produžetka trajanja pucolanske reakcije između aktivatora i elektrofilterskog pepela u PSB mešavini. Granica do koje se ovaj proces javlja zavisi od starosti kolovoza u trenutku nastanka pukotine, stepena kontakta naprslih površina, uslova nege, čvrstoće pucolanske reakcije i vlažnosti sredine.⁽²⁰⁾

Zamor materijala: Svi građevinski materijali izloženi su propadanju koje je posledica postupnog lomljenja usled učestalog dejstva pokretnih opterećenja. Veoma je važno uzeti u obzir svojstva zamora PSB materijala usled savijanja prilikom analize projekta kolovozne konstrukcije. Čvrstoća pri savijanju pucolanskih stabilizacija, poput čvrstoće na pritisak, se povećava dodavanjem kreča, dok se nivo naprezanja (odnos primenjenog napona i modula loma pri savijanju) postepeno smanjuje. Zbog osobine samoobnavljanja, pucolanske stabilizacije su dodatno manje osetljive na propadanje usled zamora materijala, u odnosu na ostale standardne mešavine za izgradnju kolovoza.⁽²⁵⁾

Otpornost na mraz: Testiranje otpornosti pucolanske stabilizacije se vrši uz pomoć jedne od dve ustanovljene procedure testiranja. Za kreč i aktivatore na bazi kreča (uključujući prašinu iz peći za žarenje), koristi se procedura za testiranje otpornosti koja je određena standardom ASTM C593. Ovo je procedura vakumske zasićenosti koja je u korelaciji sa gubitkom težine posle 12 ciklusa

mržnjenja - kravljenja. Kriterijum za prihvatanje ispitivanja otpornosti prema ASTM C593 jeste da uzorak na kom se vrši testiranje mora da ima vrednost čvrstoće pri jednoaksijalnom pritisku, koji prati testiranje vakumske zasićenosti, od najmanje 2750 kPa. Kod aktivatora baziranih na cementu se koristi procedura za testiranje otpornosti koja određena u ASTM D560.⁽²⁶⁾ Kriterijum za prihvatanje je maksimalno 14% gubitka težine nakon 12 ciklusa mržnjenja - kravljenja.⁽²⁶⁾

Minimalna čvrstoća koja se zahteva pre prvog ciklusa mržnjenja, kako bi se obezbedila dovoljna otpornost na štete koje nastaju usled mržnjenja - kravljenja, zavisi od klimatskih faktora. Američko udruženje za ugljeni pepeo predlaže minimalnu čvrstoću na pritisak od 6900, 5500, i 4100 kPa, u zavisnosti od toga da li su uslovi mržnjenja - kravljenja oštri, umereni ili blagi.⁽¹²⁾

Vodopropustljivost: Može se očekivati da početna vodopropustljivost očvrsljih pucolanskih stabilizacija varira između 10^{-5} i 10^{-6} cm/sec. Pri produžetku pucolanske reakcije ovi materijali mogu imati vrednosti vodopropustljivosti između 10^{-6} i 10^{-7} cm/sec.⁽²⁵⁾

5.5 Projektovanje

5.5.1 Projektovanje sastava mešavine za pucolanske stabilizacije (PSB)

Za izradu mešavina za stabilizovani noseći sloj kolovoznih konstrukcija mogu se koristiti agregati različite granulacije. Nakon određivanja granulometrijskog sastava pucolanske stabilizacije, početni korak u određivanju proporcije za mešavinu je nalaženje optimalnog sadržaja najfinije frakcije. To se postiže postepnim povećanjem količine najfinije frakcije (agregat zrna manjeg od 0,063 mm - pepeo i aktivator) i određivanjem gustine dobijene mešavine. Za svaku od mešavina se bira i održava konstantnom procenjena optimalna vlažnost. Vršiti se zbijanje svake od mešavina agregata i najfinije frakcije u Proktorovom kalupu primenom standardne procedure. Zahteva se spravljanje najmanje tri takve mešavine, a preporučuje pet. Odnos suve zapremiske mase prema sadržaju najfinije frakcije se unosi u dijagram i ova procedura se koristi za određivanje učešća najfinije frakcije (izraženo u težinskim procentima ukupne mase u suvom stanju) u mešavini sa najvećom suvom zapreminskom masom u zbijenom stanju. Optimalni sadržaj agregata zrna manjeg od 0,063 mm određen ovom procedurom bi trebalo da je za 2% veći od onog pri maksimalnoj suvoj zapreminskoj masi. Zatim se mora odrediti optimalni sadržaj vlage za proporcije u projektovanju mešavine.

Kada se utvrdi sadržaj agregata zrna manjeg od 0,063 mm i optimalna vlažnost, mora se odrediti i odnos učešća aktivatora i elektrofilterskog pepela u masi. Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće i trajnosti niza probnih uzoraka, a u skladu sa procedurama standarda ASTM C593, određuje se receptura optimalne mešavine.⁽¹⁴⁾

Da bi se odredio udeo aktivatora i elektrofilterskog pepela u najfinijoj frakciji, treba ispitati pet različitih kombinacija mešavina sa optimalnim sadržajem vlage. Uobičajeni odnos mase aktivatora prema masi pepela je od 1:3 do 1:5, kada se koristi kreč ili portland cement, a od 1:1 do 1:2 kada je aktivator prašina iz peći za žarenje.

Odnos između količine agregata zrna manjeg od 0,063 mm (aktivator plus elektrofilterski pepeo) i frakcija većeg zrna uslovljava količinu mase potrebne za popunjavanje šupljina između zrna agregata. Obično sadržaj aktivatora sa elektrofilterskim pepelom varira od 12% do 30% od ukupne težine mešavine u suvom stanju, pri čemu sitnozrni agregati zahtevaju veći procenat međuzrnske mase u odnosu na ravnomerno granulirane agregate da bi bio zadovoljen kriterijum čvrstoće.

Uopšte, najekonomičnijom se smatra probna mešavina sa najmanjim učešćem aktivatora u najfinijoj frakciji koje zadovoljava i kriterijum čvrstoće i kriterijum trajnosti. Kako bi se obezbedio adekvatan faktor sigurnosti za ugradnju na terenu, pucolanske stabilizacije treba da imaju sadržaj aktivatora koji je bar za 0,5% viši (1,0% viši ako je u pitanju pucolanska prašina) u odnosu na sadržaj iz najekonomičnije mešavine određene laboratorijskim ispitivanjima.⁽¹²⁾

Laboratorijski testovi mešavina sa pepelom klase F pripremljenih sa cementom i krečom kao aktivatorima, pokazali su bolje karakteristike od mešavina samo sa krečom kao aktivatorom.

Kalifornijski indeks nosivosti, čvrstoća pri jednoaksijalnom pritisku i modul povratne deformacije su se povećavali sa povećanjem sadržaja cementa (do 5%). Obrnuto, tretiranje krečom je imalo štetan uticaj i povećanje sadržaja kreča je imalo za posledicu opadanje čvrstoće pri jednoaksijalnom pritisku na uzorcima posle 7 i 28 dana.⁽¹⁹⁾

Analiza slučaja ukazuje na to da se za izradu stabilizacije reciklažom po hladnom postupku na licu mesta (CIR), koristi 7% do 10% mase pepela klase C u suvom stanju.^(6;27;2:1:5)

5.5.2 Statički proračun

Metoda projektovanja kolovoznih konstrukcija, uključujući i PSB mešavine, temelji se na „Uputstvu za projektovanje kolovoznih konstrukcija“ izdatom od strane Američkog udruženja za javne puteve i transport - AASHTO.⁽²⁸⁾ Ona uzima u obzir saobraćaj (broj prelaza „standardnog vozila“ od 80 kN po osovini, za voznu traku u eksploatacionom periodu), zahtevanu pouzdanost (verovatnoća da će konstrukcija na kraju projektnog perioda imati indeks upotrebljivosti ne manji od projektovanog), period trajanja do prvog ojačanja, strukturu kolovozne konstrukcije (izražava se strukturnim brojem) i nosivost posteljice (odnosi se na modul povratne deformacije posteljice).⁽²⁸⁾

Strukturni broj projekta kolovozne konstrukcije se odnosi na relativnu čvrstoću komponentnih materijala. Ukupna strukturna nosivost kolovoznog zastora i nosećih slojeva jednaka je zahtevanom strukturnom broju. Debljine slojeva se proračunavaju korišćenjem koeficijenata koji definišu konstrukcijsku nosivost. Navedeni koeficijenti se mogu dobiti iz relacije koju propisuje AASHTO, a zasniva se na Kalifornijskom indeksu nosivosti (CBR) ili modulu povratne deformacije (Mr).⁽²⁸⁾ Opravdano je korišćenje koeficijenta za pepelom stabilizovana zemljišta baziranog na proračunima za granulisanu tamponske materijale, kada je to moguće.⁽¹¹⁾

Stabilizacijom posteljice, stabilizovani sloj se ponaša kao tampon koji se nalazi između nosećeg sloja i posteljice. Stabilizovani sloj zamenjuje konvencionalan tamponski sloj i treba da bude uključen u strukturni broj. Na ovaj način, kolovozna konstrukcija koja sadrži stabilizovani donji noseći sloj može biti projektovana sa strukturnim brojem, kao i standardni kolovoz izgrađen metodom useka i nasipa.⁽¹¹⁾

5.6 Procedure tokom izgradnje

5.6.1 Rukovanje materijalom i skladištenje

Ukoliko se elektrofilterski pepeo koji se koristi za izradu pucolanske stabilizacije unosi u suvom stanju, treba da bude skladišten u silosima ili pneumatskim cisternama. U slučaju korišćenja kvašenog elektrofilterskog pepela (obično onaj klase F), isti se može deponovati i u pripremljenom stanju. Kada se pepeo deponuje na duži vremenski period po suvom ili vetrovitom vremenu, deponiju treba periodično vlažiti da bi se izbeglo neželjeno podizanje prašine.

5.6.2 Mešanje, ugradnja i zbijanje pucolanskih stabilizacija

Pri izradi i ugradnji samovezujućeg elektrofilterskog pepela treba voditi računa o:

- ravnomernoj raspodeli pepela u mešavini
- propisnom usitnjavanju i detaljnom mešanju pepela sa materijalom u posteljici
- kontroli vlažnosti, u cilju postizanja maksimalne zapreminske težine i čvrstoće
- završnom zbijanju sa propisanim vremenskim okvirom.⁽²⁹⁾

Mešanje pucolanske stabilizacije se može vršiti bilo u postrojenju (betonska baza), ili na licu mesta. Spravljanje mešavine u betonskoj bazi omogućava veću kontrolu sastava mešavine i obezbeđuje bolju homogenost mase. Pucolanske stabilizacije u postrojenjima mogu da se mešaju u partijama ili kontinualno. U protočnim bazama se vrši mešanje precizno doziranih količina agregata, pepela, aktivatora i vode u „porcijama“ u komori za mešanje sa trajanjem ciklusa od 30 do 45 sekundi. Kontinuiran proces proizvodnje i dopremanja gotove mase može da se obezbedi postavljanjem

odgovarajuće kalibrisanih transportnih traka između odlagališta komponenata smeše (bunkera ili silosa) i protočnog postrojenja. Mešalice sa rotirajućim bubnjem se koriste za diskontinualnu proizvodnju pucolanskih stabilizacija.⁽³⁰⁾ Mešavine iz postrojenja treba, po završetku procesa, u najkraćem roku isporučiti na mesto ugradnje.

Kao drugo rešenje, mešanje na licu mesta se može koristiti za recikliranje postojećeg asfaltnog kolovoznog zastora. Mešanje na licu mesta ne zahteva postavljanje betonske baze i koristi prednosti brzog vezivanja samovezujućeg elektrofilterskog pepela.⁽³¹⁾ Iako se mešanjem na licu mesta obično ne dobija masa ujednačenog sastava, moguće je proizvesti materijal visokog kvaliteta. Pojedine komponente pucolanskih stabilizacija se dovoze, razastiru na mestu ugradnje i mešaju na licu mesta pomoću rotofreзера ili diskova (plugova) za ugradnju.

Materijal se obično isporučuje pokrivenim kiperima. Ista oprema koja se koristi za razastiranje pucolanskih stabilizacija (PSB) iz postrojenja, može se koristiti i za materijal mešan na licu mesta. Po istovaru se materijal razastire buldozerom ili samohodnim grejderom. Međutim, materijal iz postrojenja se može ugrađivati razastiračima i finišerima, čime se postiže homogenost i bolja kontrola zahtevane debljine sloja. Vlažnost PSB mešavine pri ugradnji treba da je što približnija optimalnoj.

U toku mešanja na licu mesta, prvo se na mesto ugradnje razastire elektrofilterski pepeo, bilo direktno na posteljicu ili iznad sloja agregata, ukoliko pucolanska stabilizacija sadrži i agregat. Pepeo se obično postavlja u vlažnom stanju kako bi se podizanje prašine svelo na najmanju meru. Zatim se preko pepela nanosi aktivator, obično u suvom stanju, ponekad kao krečno mleko. Materijali se, zatim, mešaju pomoću mešalica sa bubnjem.

Jedan od najvažnijih koraka u proceduri gradnje je kontrola vlažnosti materijala sa pepelom. Sadržaj vode sme da bude od optimalnog do 4% iznad ove vrednosti.⁽²⁹⁾ Ako se voda dodaje posle mešanja pepela sa stabilizacijom, može doći do pojave hidratacije pre zbijanja nosećeg sloja. Dodavanje vode praškastom materijalu može ga učiniti nepodesnim za rad sa građevinskom mehanizacijom. Dalje, dodavanje vode elektrofilterskom pepelu koji se direktno postavlja na površinu posteljice nije preporučljivo zbog prevremene hidratacije. Preporučuje se uvođenje vode u bubanj mešalice za beton, što se pokazalo kao najefikasniji način za homogenu distribuciju vode.⁽²⁹⁾

Zbijanje elektrofilterskog pepela treba da se završi u najkraćem mogućem roku po razastiranju, posebno kad su u pitanju mešavine koje sadrže pepeo klase C (samovezujući). Stabilizacija može da izgubi čvrstoću ako se pepeo hidratiše u nezbijenom stanju. Pucolanska reakcija između pepela klase F i kreča je relativno spor proces, pa zbijanje može da se radi i do 4 sata po razastiranju mešavine. Za pepeo klase C ovo vreme ne sme da bude duže od 2 sata.^(31;23)

Za zbijanje se koristi ista mehanizacija, bez obzira da li je PSB materijal spravljan u postrojenju ili na licu mesta. Za granulisanu ili krupnozrnu PSB materijale, zbijanje zahteva upotrebu vibro, pneumatskih, ili valjaka sa metalnim točkovima. Za sitnije PSB materijale početno zbijanje uglavnom zahteva upotrebu ježa, iza koga ide pneumatski valjak.⁽¹²⁾

Slojevi pucolanske stabilizacije koji se zbijaju ne bi trebalo da budu tanji od 100 mm ili deblji od 200 – 225 mm u zbijenom stanju. Materijal treba da se razastre u rastresitim slojevima koji su oko 50 mm deblji pre zbijanja u odnosu na zahtevanu debljinu po zbijanju. Površina podloge treba da bude izbrazdana pre postavljanja sledećeg sloja.

5.6.3 Negovanje

Posle ugradnje i zbijanja pucolanskih stabilizacija, materijal treba zaštititi na odgovarajući način protiv sušenja kako bi se omogućio prirast čvrstoće na licu mesta. Masa se može periodično zalivati vodom između ugradnje dva sloja ili pre izvođenja završnog sloja. Ukoliko se kolovozna konstrukcija od asfalt betona postavlja kao zastor, gornju površinu nosećeg sloja treba zaliti slojem asfaltne emulzije i zatim, u roku od 24 sata ugraditi kolovozni zastor. Tačan tip emulzije, količina koja se nanosi i temperatura asfalta moraju biti usaglašeni sa propisanim specifikacijama.

Karakteristike kolovozne konstrukcije u čijem je sastavu pucolanska stabilizacija zavise od prirasta čvrstoće na licu mesta, zbijanja i negovanja konstrukcije. Na osnovu predviđenog saobraćajnog opterećenja treba odrediti optimalno vreme od završetka izgradnje do momenta puštanja deonice u saobraćaj, kako bi se izbegao potencijalni zamor materijala zbog prevremenog opterećivanja.

Ukoliko je predviđeno puštanje deonice u saobraćaj pre izrade zastora, odnosno veznog sloja, vozilima se ne sme dozvoliti prolaz preko nosećeg sloja od PSB materijala dok on ne dostigne čvrstioću na pritisak od 2410 kPa. Na osnovu laboratorijskog testiranja prirasta čvrstoće, može se odrediti vreme dostizanja ove čvrstoće. Obično se savetuje postavljanje asfaltnog kolovoznog zastora preko nosećeg sloja od PSB materijala 7 dana od njegove izgradnje.⁽¹²⁾ Isto važi i za cement – betonski kolovoz.

5.6.4 Vansezonska gradnja

Ukoliko stabilizovani pucolanski materijali nisu u mogućnosti da razviju određeni nivo čvrstoće pre prvog ciklusa mržnjenja - kravljenja, može se dogoditi da ovi materijali ne mogu da izdrže naizmenično mržnjenje i kravljenje. S obzirom da je prirast čvrstoće zavisao od vremena i temperature, pucolanske stabilizacije koje se ugrađuju kada je temperatura vazduha previše niska možda neće biti u mogućnosti da dostignu čvrstioću i izdržljivost neophodne za zahtevanu otpornost na temperaturne promene. Minimalna temperatura vazduha potrebna za izradu cementne i krečne stabilizacije je obično u rasponu od 4,5°C do 10°C.⁽²⁹⁾

Druga zabrinjavajuća okolnost koja se tiče vansezonske gradnje se odnosi na prisustvo gline sa visokim plasticitetom u mešavini. Iskustvo je pokazalo da ove gline mogu zahtevati više od jednog ciklusa zbijanja kod nižih temperatura sredine.⁽²⁹⁾

Sneg predstavlja dodatne količine vode u toku zbijanja elektrofilterskog pepela, ali ne izaziva probleme sa njegovom obradljivošću, karakteristične za vlažnost sredine veće od optimalne. Sneg može da izazove povećano prisustvo šupljina za 30%, smanjenje zapreminske težine do 14% i 70% povećanja trajne čvrstoće na smicanje. Smatra se da je rast trećeg pokazatelja posledica prisustva veće količine vode kod reakcije vezivanja.⁽³²⁾

5.6.5 Samovezujući elektrofilterski pepeo (klasa C)

Mešavina samovezujućeg elektrofilterskog pepela i vode ima za posledicu vrlo brz početak vezivanja. Odlaganje između ugrađivanja i zbijanja pucolanske stabilizacije koja sadrži pepeo klase C izaziva značajno smanjenje čvrstoće zbijenog nosećeg sloja, osim ukoliko se ne koristi usporivač. Prema tome, pucolanske stabilizacije (PSB mešavine) koje sadrže pepeo C klase treba da se ugrade što je pre moguće nakon izrade mešavine. Ako je moguće, vreme između mešanja i završetka zbijanja ne treba da je veće od 2 sata.⁽³³⁾

Za sprečavanje pojave prašine tokom spravljanja mase, dovoljno je u mešalicu dodati 10% do 25% vode od ukupne mase pepela. Dodatne količine vode, potrebne za postizanje zahtevane zbijenosti pucolanskih stabilizacija, doziraju se na mestu ugrađivanja, pred operaciju zbijanja.

Komercijalni usporivači, kao što su gips, boraks ili mešavine usporivača za betonsku masu, mogu se, u veoma malom procentu, dodati PSB materijalima u postrojenju za mešanje. Ispitivanja su pokazala da dodatak 1% gipsa ne dovodi do negativnih posledica na proces očvršćavanja pucolanske stabilizacije, ali efikasno usporava brzinu vezivanja mase.^(22;33)

5.6.6 Kontrola pojave pukotina

Noseći sloj stabilizovan elektrofilterskim pepelom retko dovodi do pojave reflektivnih pukotina u sloju iznad, što se dešava u slučaju primene portland cementa kao stabilizacionog sredstva. Ova karakteristika je, najverovatnije, posledica slabije međumolekularne veze u strukturi materijala stabilizovanog pepelom od onog sa cementom. Američko udruženje za elektrofilterski pepeo (ACAA) je izradilo preporuke o pristupu kontroli ili umanjenju potencijalnih posledica pojave reflektivnih pukotina u pucolanom stabilizovanim slojevima.⁽¹²⁾ Terenska i laboratorijska ispitivanja su pokazala da su tla stabilizovana krečom ili elektrofilterskim pepelom manje sklona skupljanju ili pojavi pukotina od cementom stabilizovanih posteljica.⁽³⁴⁾

U nosećem sloju ispod bankine na autoputu, izrađenom sa dodatkom mešavine cementa i pepela F klase, registrovana je sporadična pojava pukotina, što je posledica manje gustine i čvrstoće primenjene stabilizacije. Na mestima žljebova i spojeva u kolovoznom zastoru između bankine i vozne trake dolazi do pojave pojedinačnih i mrežastih pukotina. Spojevi dovode do prekida oticanja vode sa kolovoza i njenog kretanja naniže, u noseći sloj koji sadrži pepeo, a koji u kontaktu sa vodom dovodi do pojave pukotina.⁽³⁵⁾

Studija sprovedena u Odseku za transport savezne države Kansas u kojoj su poređene delimične stabilizacije (po visini kolovozne konstrukcije) po hladnom postupku na licu mesta (CIR) i stabilizacije sa primenom pepela klase C ili emulzije sa krečnim muljem je pokazala da su opitne deonice sa pepelom bile osetljivije i na pojavu poprečnih i podužnih pukotina.⁽¹⁾ U sličnoj komparativnoj studiji u Viskonsinu na kontrolnoj deonici sa asfaltnom emulzijom kao stabilizacijom i deonici sa elektrofilterskim pepelom kao stabilizacijom, nisu opažene površinske pukotine ni posle šest godina eksploatacije.^(3:2)

5.7 Zaštita životne sredine

Kao što je prikazano u poglavlju Opis elektrofilterskog pepela, upotreba ovog materijala za stabilizaciju nosećeg sloja podrazumeva činjenicu da on nije fizički izolovan od okolne sredine i zbog toga postoji mogućnost zagađenja procednih voda. Upotreba ovog materijala kao veziva zahteva pouzdano rukovanje i brigu kako ne bi izazvala negativne uticaje na životnu sredinu. Naročito treba obratiti pažnju na oblasti sa peskovitim tlom koje ima veliku vodopropustljivost, ili na područja pod određenim režimom zaštite podzemnih voda (plitki vodonosni sloj, blizina akumulacija za vodosnabdevanje i sl.). U tom slučaju neophodni su ocena stanja podzemnih voda, odgovarajuće procedure ispitivanja stanja, standardi kvaliteta vode, kao i odgovarajući način izgradnje kako bi se obezbedio siguran finalni proizvod.⁽³⁶⁾

WiscLeach je program specijalno razvijen za modelovanje ponašanja nusproizvoda sagorevanja uglja kod njihove upotrebe u putogradnji. Program je dostupan za javnu upotrebu i koristi analitičke metode za simulaciju toka i transporta u dve dimenzije.⁽³⁷⁾ Faktori koji najviše utiču na koncentracije zagađivača u podzemnim vodama su dubina nivoa podzemne vode, debljina sloja elektrofilterskog pepela, vodopropustljivost najmanje propustljivog sloja u vadoznoj (nezasićenoj) zoni, vodopropustljivost vodonosnog sloja i početna koncentracija mikroelemenata u pepelu.⁽³⁷⁾

Aktuelna ispitivanja procednih voda su ograničena neuzimanjem u obzir hidrogeoloških karakteristika tla na kome će se mešavine sa elektrofilterskim pepelom primenjivati. Ova ispitivanja razmatraju upotrebu pepela kao posebnog materijala, ali ne i u mešavinama.⁽³⁸⁾

Lizimetrima postavljenim na terenu ispod pepelom stabilizovanog nosećeg sloja kolovozne konstrukcije utvrđeno je da od ukupnih prosečnih godišnjih količina padavina u posteljicu/podtlo dospeva godišnje 4% do 6%, što je približno vrednostima na kontrolnoj deonici, bez elektrofilterskog pepela. Koncentracija mikroelemenata u procednim vodama opitne deonice (sa pepelom) je bila veća nego u onim na kontrolnoj deonici. Pored toga rezultati terenskih ispitivanja su se dobro uklopili sa onima na opitima procedivanja sprovedenim u laboratoriji. Potrebna su, ipak, dalja istraživanja zbog izrade i usvajanja novih standarda i ispitivanja koja se odnose na tla ojačana elektrofilterskim pepelom.⁽³⁸⁾

5.8 Reference

Pretraživa verzija referenci koje se koriste u ovom poglavlju je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je dostupna [ovde](#).

1. Thomas T, Kadrmas A, Huffman J. Cold in-place recycling on US-283 in Kansas. Transportation Research Record 2000;1723(1):53-6.
2. Crovetto JA. Construction and performance of fly ash-stabilized cold in-place recycled asphalt pavement in Wisconsin. Transportation Research Record 2000;1730:161-6.
3. Ramme BW, Tharaniyil M. Coal combustion products utilization handbook. We Energies, Milwaukee, WI; 2004.
4. Wen H, Tharaniyil M, Ramme BW. Investigation of performance of asphalt pavement with fly-ash stabilized cold in-place recycled base course. Transportation Research Record 2003;1819(1):27-31.
5. Wen H, Tharaniyil MP, Ramme BW, Krebs S. Field performance evaluation of Class C fly ash in full-depth reclamation: Case history study. Transp Res Rec 2004(186):41-6.
6. Li L, Benson CH, Edil TB, Hatipoglu B. Sustainable construction case history: Fly ash stabilization of recycled asphalt pavement material. Geotechnical and Geological Engineering, An International Journal, 2007.
7. Dockter BA, Jagiella DM. Engineering and environmental specifications of state agencies for utilization and disposal of coal combustion products. In: 2005 World of coal ash conference, Lexington, KY. ; 2005.
8. Collins RJ, Ciesielski SK. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board; Washington, DC: 1994.
9. Trzebiatowski BD, Edil TB, Benson CH. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State highway 32, Port Washington, Wisconsin. In: Beneficial reuse of waste materials in geotechnical and transportation applications. A. Aydileck, J. Wartman, editors, ASCE Reston, VA: ; 2004.
10. Senol A, Edil TB, Bin-Shafique MS, Acosta HA, Benson CH. Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes, Resources, Conservation and Recycling 2006;46:365-76.
11. Bin-Shafique MS, Edil TB, Benson CH, Senol A. Incorporating a fly-ash stabilized layer into pavement design. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering 2004;157:239-49.
12. American Coal Ash Association (ACAA). Flexible pavement manual: Recommended practice - coal fly ash in pozzolanic stabilized mixtures for flexible pavement systems. 1991:128 p.
13. ASTM D5239-04 standard practice for characterizing fly ash for use in soil stabilization. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2004.
14. ASTM C593-06 standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime for soil stabilization. In: Annual book of ASTM standards, ASTM; West Conshohocken, Pennsylvania: 2006.
15. ASTM C311-05 standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
16. ASTM C618-05 standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
17. Edil TB, Acosta HA, Benson CH. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. J Mater Civ Eng 2006;18:283-94.
18. Portland Cement Association (PCA). Soil-cement laboratory handbook. PCA, Skokie, Illinois: 1992.

19. Arora S, Aydilek AH. Class F fly-ash-amended soils as highway base materials. *J Mater Civ Eng* 2005;17:640-9.
20. Meyers JF, Pichumani R, Kapples BS. Fly ash: A highway construction material. Federal Highway Administration (FHWA); Washington, DC: 1976. Report nr FHWA-IP-76-16.
21. ASTM D1883-05 standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
22. Ferguson G. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent. In: Fly ash for soil improvement. American Society for Civil Engineers; 1993.
23. Little DN, Males EH, Prusinski JR, Stewart B. Cementitious stabilization. In: Transportation in the new millennium: State of the art and future directions, perspectives from TRB standing committees. Transportation Research Board, National Research Council; Washington, DC: 2000.
24. Sawangsuriva A, Edil TB. Evaluating stiffness and strength of pavement materials. In: Proceedings of the institution of civil engineers. Vol.158, GE4, 2005. 217-230.
25. Ahlberg HL, Barenberg EJ. Pozzolanic pavements. Urbana, Illinois: University of Illinois, Engineering Experiment Station; 1965 February. Report nr 473.
26. ASTM D560-03 standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2003.
27. Cross S, Young D. Evaluation of type C fly ash in cold in-place recycling. *Transportation Research Record* 1997;1583(1):82-90.
28. AASHTO. Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials; Washington, DC, 1993.
29. American Coal Ash Association (ACAA). Soil stabilization and pavement recycling with self-cementing coal fly ash. American Coal Ash Association; Aurora, CO: 2006.
30. Barenberg EJ, Thompson MR. Lime-fly ash stabilized bases and subbases. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 37, Transportation Research Board; Washington, DC: 1976.
31. White DJ, Harrington D, Thomas Z. Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, Volume I: Engineering properties and construction guidelines. Iowa State University, Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University; 2005.
32. Baykal G, Edinçliler A, Saygili A. Highway embankment construction using fly ash in cold regions. *Resources, Conservation and Recycling* 2004 10;42(3):209-22.
33. Thornton SI, Parker DG. Construction procedures using self-hardening fly ash. Federal Highway Administration, Washington, DC: 1980. Report nr FHWA/AR/80, 004.
34. Shirazi H. Field and laboratory evaluation of the use of lime fly ash to replace soil cement as a base course. *Transportation Research Record* 1999;1652(1):270-5.
35. Gray DH, Tons E, Thiruvengadam TR. Performance evaluation of a cement-stabilized fly ash base. *Transportation Research Record* 1994;1440.
36. Environmental Protection Agency (EPA), Federal Highway Administration (FHWA). Using coal ash in highway construction - A guide to benefits and impacts.; April 2005. Report nr EPA-530-K-002:ID: 151.
37. Li L, Benson CH, Edil TB, Hatipoglu B. Groundwater impacts from coal ash in highways. *Waste and Management Resources*, November 2006;159(WR4):151-63.
38. Bin-Shafique MS, Benson CH, Edil TB. Leaching of heavy metals from fly ash stabilized soils used in highway pavements. Madison, WI: Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison; 2002. Report nr 02-14.

6 ŽITKA ISPUNA (*FLOWABLE FILL*)

6.1 Uvod

Elektrofilterski pepeo dobijen sagorevanjem uglja može da se upotrebi kao komponenta u proizvodnji žitkih ispuna (preciznije, materijala kontrolisane niske čvrstoće, controlled low strength material - CLSM), koje se koriste kao samoravnajuća, samougradiva masa umesto zbijenog tla ili granulisanog filera. Žitke ispune predstavljaju mešavinu filera i veziva, a mogu sadržati i mineralne primese. Fileri se, obično, sastoje od sitnozrnih agregata poput peska, mada pojedine mešavine mogu sadržati jednake količine krupnije i sitnije frakcije.⁽¹⁾ Elektrofilterski pepeo se koristi kao potpuna ili delimična zamena za bilo koji od ova tri sastojka žitkih ispuna.

Upotreba žitkih ispuna kao materijala u putogradnji je sve zastupljenija u Sjedinjenim Američkim Državama. Većina državnih agencija za transport koristi ovaj materijal uglavnom za zaptivanje poprečnih spojnica kod kišne kanalizacije i drugih komunalnih instalacija ispod ulica i puteva. Pored toga, može da se koristi i kao ispuna iza potpornih zidova, temelja, podzemnih rezervoara, napuštenih kanala i rovova za instalacije i kod sanacionih injektiranja.

Žitke ispune se, prema standardu 116R Američkog instituta za beton (ACI), smatraju materijalom kontrolisane niske čvrstoće (CLSM), sve dok je njihova čvrstoća na pritisak manja od 8270 kPa.^(2;3;4) Kada je za primenu od važnosti čvrstoća na pritisak žitke ispune, računa se sa vrednostima od 1380 do 8270 kPa, u zavisnosti od konstruktivnih zahteva. Čvrstoća zavisi i od toga da li će očvrsla masa ostati trajno ugrađena, ili je privremenog karaktera. U drugom slučaju njena čvrstoća ne sme da pređe 1035 kPa ili će za rušenje biti potrebno angažovanje pneumatskog čekića.⁽¹⁾ Za žitke ispune gde se zahteva veća nosivost, kao što su granulisane ispune ili privremena ojačanja na kolovozu, može se projektovati veća čvrstoća na pritisak.

S obzirom da su žitke ispune materijal manje nosivosti, nisu ustanovljeni strogi zahtevi za kvalitet elektrofilterskog pepela koji se koristi kao njegov dodatak. Pepeo je pogodan materijal kao dodatak žitkim ispunama. Finoća čestica (neplastični mulj) i njihov loptast oblik povećavaju žitkost mešavine. Pucolanska, odnosno vezivna svojstva elektrofilterskog pepela omogućavaju uštedu u količini veziva, a da to ne utiče na čvrstoću materijala.

Standardne žitke ispune i dobro zbijeno tlo imaju sličnu specifičnu težinu koja se kreće u rasponu od 1850 do 2300 kg/m³. Dodavanjem smeši lakih agregata, poput mlevene gume, ova vrednost se može sniziti do vrednosti od 1170 do 1570 kg/m³ i tako se svrsta u lakotežeće ispune.⁽⁵⁾ Žitke ispune pri ugradnji imaju karakteristike fluida, pa u fazi projektovanja treba uzeti u obzir hidrostatički pritisak ovog materijala na konstrukcije sa kojima dolazi u dodir. Ovo se posebno odnosi na rezervoare, cevi i kablove čije dimenzije treba prilagoditi navedenim uticajima.⁽⁴⁾

Postoje dva osnovna tipa žitkih ispuna koji sadrže elektrofilterski pepeo: mešavine sa visokim i one sa niskim sadržajem ovog materijala. Mešavine sa velikim učešćem pepela uglavnom su sastavljene od samog pepela, uz dodatak malih količina portland cementa i potrebne količine vode neophodne za postizanje odgovarajuće žitkosti mase. Mešavine sa niskim sadržajem pepela obično sadrže i veliki procenat filera ili sitnozrnog agregata (najčešće pesak), malu količinu portland cementa i dovoljno vode.^(6;7) Pepeo klase F je prilagođen upotrebi u mešavinama sa velikim sadržajem pepela, mada se može koristiti i u mešavinama sa malom koncentracijom. Pepeo klase C se skoro uvek koristi samo u žitkim ispunama sa niskim sadržajem pepela zbog svojih samovezujućih svojstava.⁽⁸⁾ Postoje žitke ispune u kojima se, u različitim proporcijama, koristi pepeo obe klase.⁽⁸⁾

6.2 Tehnološki zahtevi

6.2.1 Kontrola porekla

Elektrofilterski pepeo koji se koristi za spravljanje žitkih mešavina ne mora da ispuni stroge zahteve, poput standarda ASTM C618 za dodavanje pepela betonu.^(7;9) Nije neophodno da je visokog kvaliteta, a pogodan za upotrebu je i onaj sa velikim gubitkom pri žarenju, odnosno visokim sadržajem ugljenika.⁽⁷⁾ Postojanje ugljenika u pepelu može biti problematično kod gas betona, koji ubačene primese čine osetljivijim na apsorpciju. S obzirom da kod žitkih ispuna uglavnom nema zahteve za kontrolisanim sadržajem šupljina, prisustvo ugljenika ne utiče na svojstva mešavine.⁽⁴⁾ Suvi ili vlaženi pepeo, kao i rekultivisani pepeo iz deponijskih laguna, mogu, takođe se koriste za izradu žitkih ispuna, pri čemu se ne zahteva posebna obrada pre primene.

6.2.2 Kontrola vlažnosti

Pucolanski tip elektrofilterskog pepela se može koristiti u žitkim ispunama bilo u suvom ili vlažnom obliku. Samovezujući pepeo treba koristiti u suvom obliku kako bi se izbeglo prevremeno vezivanje.

6.3 Tehnička svojstva

Pod tehničkim svojstvima žitkih ispuna podrazumevaju se čvrstoća na pritisak, žitkost, stabilnost, nosivost, modul otpornosti tla, bočni pritisak, vreme vezivanja, curenje i skupljanje, zapreminska težina i vodopropustljivost. Svojstvo elektrofilterskog pepela koje ima najveći uticaj na karakteristike žitkih ispuna jeste loptasti oblik zrna i pucolanska aktivnost sa portland cementom.

Čvrstoća na pritisak: Očvršćavanje žitkih ispuna je direktno povezano sa vodocementnim faktorom, naročito kada se koristi pepeo klase F. Mnoge mešavine sa visokim sadržajem pepela zahtevaju da samo 3 do 5 posto veziva bude portland cement, kako bi se razvila čvrstoća na pritisak posle 28 dana od 345 do 1000 kPa.⁽⁷⁾ Kod mešavina sa niskim sadržajem pepela klase C, pepeo doprinosi prirastu čvrstoće i može biti potpuna zamena portland cementu. Čvrstoća može postepeno da raste i posle 28 dana, u pojedinim slučajevima i posle 90 dana, naročito u mešavinama sa visokim sadržajem pepela. Povećavanjem učešća vode, u cilju dobijanja ređe mešavine, čvrstoća na pritisak opada.^(6;7)

Žitkost: Žitkost ili fluidnost je mera dobrog proticaja mešavine u fazi ugrađivanja. Mešavine sa većim sadržajem vode su žitkije.⁽⁷⁾ Žitkost može da varira od guste do tečne u zavisnosti od građevinskih zahteva. Meri se primenom standardnog Abramsovog konusa za ispitivanje sleganja betona, konusa za ispitivanje žitkosti, ili modifikovanog testa rasprostiranja korišćenjem cilindra visokog 150 mm i 75 mm u prečniku sa otvorom na jednoj osnovi.^(10;11;12) Visina sleganja, kao pokazatelj žitkosti, merena konusom za ispitivanje sleganja betona (ASTM C143) obično varira od 150 mm do 200 mm.⁽¹⁰⁾

Primeše (poput aditiva za smanjenje količine vode pri ugradnji) se obično ne koriste u žitkim ispunama. Kod mešavina sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela se može očekivati da visina sleganja bude najmanje za 25 - 50 mm veća nego kod mešavina sa niskim sadržajem, a pri nepromenjenoj vlažnosti.

Žitkost žitkih ispuna za zalivanje spojnica se određuje standardnim opitom konusom za ispitivanje žitkosti (ASTM C939). Poželjno vreme isticanja mase je u rasponu od 30 do 45 sekundi.⁽¹²⁾

Modifikovani opit tečenja, definisan standardom ASTM D6103, podrazumeva punjenje i sipanje žitke ispune iz cilindričnog kalupa visine 150 mm i 75 mm u prečniku na ravnu površinu i merenje prečnika izručene mase. Ovaj test je najpogodniji za mešavine koje prvenstveno sadrže sitne agregate (niska zastupljenost elektrofilterskog pepela). Za dobru žitkost prečnik materijala po rasprostiranju treba da bude 200 mm.^(12;13)

Stabilnost: Za žitke ispune sa malom količinom pepela, koje se u državnom odseku za transport (DOT) savezne države Ohajo označavaju kao Tip 1 CLSM, triaksijalnim testom se dobija ugao unutrašnjeg trenja u suvom stanju od 28° i kohezija od 33 kPa za čvrstoću posle 7 dana. Za žitke ispune sa velikom količinom elektrofilterskog pepela, označene kao Tip 3 CLSM (Ohajo DOT), triaksijalnim testom se dobija ugao unutrašnjeg trenja od 33° i kohezija od 34 kPa za čvrstoću posle 7 dana.⁽¹⁴⁾

Nosivost: Čvrstoća pri jednoaksijalnom pritisku žitkih ispuna se povećava sa vremenom, pa se isto dešava i sa nosivošću mešavine. Na odseku za transport savezne države Ohajo je opitom male penetracije merena konačna nosivost žitkih ispuna sa dodatkom pepela i utvrđen je porast vrednosti ovog parametra kod mešavine 2 sata posle ugradnje i dva dana kasnije od 900 kPa do 5250 kPa, odnosno skoro 6 puta.⁽¹⁴⁾ Sa čvrstoćom pri jednoaksijalnom pritisku od 685 kPa žitka ispuna ima dva do tri puta veću nosivost od maksimalno zbijenih granuliranih nasipa.⁽⁴⁾

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) se koristi za ispitivanje nosivosti posteljice. Žitke ispune imaju CBR od 40 do 90%.^(15;16) Merenjem indeksa nosivosti žitke ispune stare 24 časa, uz uobičajeno opterećenje od 690 kPa, došlo se do vrednosti CBR od 50%. Sa porastom čvrstoće na pritisak žitke ispune mogu se očekivati i veće vrednosti CBR.

Modul otpornosti tla: Modul otpornosti tla (k), koji se koristi kod projektovanja krutih kolovoznih konstrukcija je, obično, u granicama od 8,2 do 49,2 MPa/m za većinu podloga i 82 MPa/m za dobro granulirani tamponski sloj. Za žitke ispune, uobičajena vrednost ovog parametra je 820 MPa/m ili više, što znači da žitke ispune imaju bolju nosivost od bilo kog nasipa izvedenog materijalom sa lica mesta.⁽¹⁷⁾

Bočni pritisak: Kada se žitka masa koristi za popunjavanje šupljina vertikalne dužine preko 1,8 m, dolazi do pojave bočnog (hidrostatičkog) pritiska u fazi ugradnje. Da bi se sprečila pojava deformacija na oplati i konstruktivnim elementima sa kojima je ispuna u dodiru, potrebno je ugradnju realizovati u etapama, vertikalne dužine od 1,2 do 1,5 m.⁽¹⁸⁾ Kada žitka ispuna očvrstne, bočni pritisak postaje zanemarljiv.

Vreme vezivanja: Kod većine tipova žitkih ispuna, naročito onih sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela, povećanje sadržaja veziva ili smanjenje sadržaja vode, ili i jedno i drugo, treba da rezultiraju smanjenjem vremena vezivanja. Obično mešavine sa visokim sadržajem pepela (uz 5% veziva) posle 3 do 4 sata dostižu nosivost dovoljnu da mogu da izdrže prosečnu težinu čoveka, što zavisi od temperature i vlažnosti. Građevinska oprema može da se montira na ugrađenu masu, 24 sata od ugradnje, bez rizika od oštećenja. Pojedine vrste žitkih ispuna, čak i sa malim učešćem pepela, posebno onog sa svojstvom samovezivanja, očvršćavaju dovoljno brzo da je već 1 do 2 sata po ugradnji moguće pristupiti izradi kolovoznog zastora preko njih.⁽⁷⁾

Metodom ispitivanja D6024 Američkog udruženja za testiranje materijala (ASTM), kojom se ispituju karakteristike žitkih ispuna u terenskim uslovima, utvrđeno je da vreme vezivanja mešavine elektrofilterskog pepela i drobljenog peska, bez dodatka portland cementa, iznosi 15 sati. Kako je cement glavna komponenta koja određuje vreme vezivanja žitke ispune, sa povećanjem njegovog udela u smesi može se očekivati skraćanje vremena vezivanja. Međutim, u ispunama koje sadrže velike količine elektrofilterskog pepela (500 kg/m^3), koji takođe doprinosi skraćanju ovog pokazatelja, promene u koncentraciji cementa nisu od uticaja.^(19;20)

Oslobađanje vode i skupljanje: Žitka ispuna sa velikim učešćem elektrofilterskog pepela i relativno visokim sadržajem vode (visina sleganja 250 mm) ima tendenciju ispuštanja vode pre početka procesa vezivanja. Evaporacija ispuštene vode često rezultira skupljanjem žitke ispune po visini za približno 1%. Ugrađena masa može da se skuplja i u horizontalnim pravcima. Kada započne proces vezivanja žitke ispune, ne postoji više mogućnost pojave skupljanja ili naknadnih sleganja ugrađene mase.⁽⁷⁾ Mešavine sa manjom količinom pepela, zbog prisustva najfinije frakcije agregata i sposobnosti da veoma brzo otpuštaju višak vode, imaju karakteristiku manjeg oslobađanja vode i skupljanja u donosu na one sa velikom zastupljenošću elektrofilterskog pepela.

Zapreminska masa: Zapreminska masa (gustina) žitke ispune je približno jednaka onoj kod dobro zbijenog tla i kreće se u rasponu od 1850 do 2300 kg/m³, gde se najteži materijali prvo ugrađuju. Žitke ispune sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela su obično lakše od onih sa niskim i mogu imati nisku zapreminsku masu, čak i do 1450 kg/m³. Dodaivanje lakih agregata, poput drobljene gume, može sniziti zapreminsku masu žitke ispune i do vrednosti od 1170 – 1570 kg/m³, čime se ova mešavina svrstava u lake ispune.⁽⁵⁾ Upotrebom penastih aditiva postiže se gustina žitkih ispuna od 400 kg/m³.⁽²¹⁾

Vodopropustnost: Vodopropustnost žitkih ispuna sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela opada sa rastom zastupljenosti cementa i nalazi se u rasponu od 10⁻⁶ do 10⁻⁷ cm/sec.^(22;23) Vodopropustnost mešavina sa malim učešćem pepela je veća od onih sa velikim i ima vrednosti od 10⁻⁴ do 10⁻⁶ cm/sec.⁽¹²⁾ Uopšteno govoreći, vodopropustnost raste sa porastom visine sleganja.⁽²⁴⁾ Dodavanjem bentonita mešavini vodopropustnost može da se smanji.⁽²³⁾

6.4 Projektovanje

6.4.1 Projektovanje mešavine

Zastupljenost pojedinih sastojaka u žitkoj ispuni po pravilu se određuje probanjem. Većina odredbi, koje se odnose na spravljanje žitkih ispuna, navodi količine sastojaka od kojih se dobija prihvatljiv proizvod, mada su pojedine odredbe zasnovane na učinku (obično na maksimalnoj čvrstoći na pritisak), a određivanje proporcija ostavljaju dobavljačima materijala. Američki institut za beton (ACI) daje konsultantske usluge vezane za određivanje recepture žitkih ispuna.⁽³⁾

Doziranje sastojaka u **žitkoj ispuni sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela** vrši se na osnovu procentualnog učešća portland cementa (obično tipa I), u suvoj masi pepela. Uobičajena je primena mešavine sa 5% cementa i 95% pepela, mada nije redak ni slučaj upotrebe čistog samovezujućeg pepela kao vezivnog materijala.⁽⁷⁾ Količina vode koja se dodaje mešavini je promenljiva veličina, određena željenim stepenom žitkosti (fluidnosti) i zavisi od karakteristika površine čestica u čvrstoj fazi mešavine. Za najveći broj mešavina dovoljno je 250 – 400 litara vode po kubnom metru žitke ispune.⁽⁷⁾ Kada se koristi kvašeni elektrofilterski pepeo, količina vode upotrebljena za njegovo vlaženje mora se oduzeti od ukupne količine predviđene za mešavinu, kako bi se očuvala zahtevana koncentracija.⁽⁶⁾

Žitke ispune sa malom zastupljenošću elektrofilterskog pepela su, po recepturi, raznovrsnije od prethodno opisanih.⁽⁷⁾ Kako pepeo nije dominantna komponenta u ovim mešavinama, količina cementa se ne određuje u odnosu na masu samog pepela, nego pepela i materijala za ispunu (*filler*). Zbog karakteristike brzog vezivanja, zastupljenost pepela klase C u ovim mešavinama je znatno manja. Sastav mešavine se određuje tako da zadovolji zahtevanu čvrstoću ugrađene mase na pritisak. Maksimalna projektovana čvrstoća žitkih ispuna kojima se popunjavaju šupljine između cevi i rovova može da bude od 690 kPa do 1035 kPa.⁽⁶⁾ Preporučeno je da se za ispitivanje čvrstoće pri jednoaksijalnom pritisku primenjuje standard ASTM D 4832-02.⁽²⁵⁾

6.4.2 Statički proračun

Postupak za statički proračun žitkih ispuna se ne razlikuje od geotehničkog projekta uobičajenih zemljanih ispuna. Nosivost i bočni pritisak materijala, prema uslovima na terenu, računaju se na osnovu zapreminske težine i čvrstoće na smicanje žitke ispune, kao ulaznih parametara.

6.5 Procedure tokom izgradnje

6.5.1 Rukovanje materijalom i skladištenje

Ukoliko se elektrofilterski pepeo u mešavinu dodaje u suvom obliku (što je, obično, slučaj sa žitkim ispunama sa malom količinom pepela), treba ga skladištiti u stacionarnim i auto silosima. Kvašeni pepeo (obično klase F) za mešavine sa velikom zastupljenošću elektrofilterskog pepela može da se deponuje. Ukoliko se to čini na duže vreme, a pri suvom i vetrovitom vremenu, deponovani materijal treba povremeno kvasiti kako ne bi došlo do podizanja i razvejavanja prašine.

6.5.2 Mešanje i ugradnja

Žitke ispune mogu da se izrađuju u mešalicama, prenosnim ili stacionarnim postrojenjima. Mešavine sa velikim učešćem elektrofilterskog pepela se prave u auto mešalicama za beton, ili pokretnim betonjerkama. Mešanje u pokretnim malim mešalicama se obično vrši kada su potrebne male količine žitke ispune na određenim lokacijama. U tom slučaju može biti otežano ravomerno doziranje cementa.

Fabrike za beton sa centralnim mikserom su posebno efikasne za izradu mešavina sa malom količinom elektrofilterskog pepela velikim učešćem peska. Žitke ispune se pripremaju na isti način kao standardne betonske mešavine bez krupne frakcije. Betonske baze su odgovarajuće za mešavine spravljene od taložnog ili vlaženog pepela. Može se dodati drugi dozer betonskoj bazi ako se koristi pesak (ili neka druga ispuna).

Prenosive mešalice, poput onih koje se koriste za injektiranje, često se koriste za mešanje žitkih ispuna na licu mesta. Ovaj proces, uz dodavanje samovezujućeg pepela, se uspešno realizuje uz pomoć mlaznih miksera. Suvi pepeo se skladišti u velikim rezervoarima na terenu koji se pneumatski prazne kroz brizgaljku u obliku slova Y sa meračem količine vode.⁽¹⁸⁾

Žitke ispune se najčešće transportuju na mesto ugradnje betonskim auto mešalicama. Osim tog načina, masa se može ugrađivati i uz pomoć pumpi, transportera, riža, kutija, kibli za beton, levaka, ili na bilo koji drugi način uobičajen za ugradnju betona. Izručena žitka ispuna ne zahteva zbijanje ili vibraciju po ugradnji.

Kod relativno dubokih ispuna iza obložnih i potpornih zidova, preporučuje se da se ugradnja vrši u više etapa. Na taj način se kontroliše veličina bočnog pritiska, kao i preterana emisija toplote u toku hidratacije, naročito kod upotrebe samovezujućeg elektrofilterskog pepela.⁽¹⁸⁾ Kada se žitka ispuna koristi za popunu šupljina u rovovima za cevi, pojedine lakše cevi, poput onih od talasastog metala, moraju da se fiksiraju, kako bi se izbeglo plutanje pri ugradnji žitke ispune. Ovaj materijal je upotrebljiv i u vodozasićenoj sredini, u barama ili protočnim vodama, jer žitka masa koja se ugrađuje istiskuje vodu sa mesta ugradnje i tako otklanja potrebu za dreniranjem.

Za negovanje žitkih ispuna, uglavnom ne postoje specifični zahtevi, mada se pri visokim spoljnim temperaturama savetuje prekrivanje mesta ugradnje, kako bi se smanjilo ubrzano sušenje i pojava pukotina pri skupljanju. Smatra se da mase koja se ugrađuje ne treba da pređe temperaturu od 32°C do 38°C.

6.5.3 Kontrola kvaliteta

Kako bi se pratila postojanost, svojstva i učinak žitkih ispuna, preporučuje se izrada programa za kontrolu kvaliteta. Taj program bi se u najmanju ruku morao sastojati od ispitivanja početne isprojektovane mešavine, određivanjem njenih ključnih svojstava (kao što su prirast čvrstoće, žitkost, vreme vezivanja i zapreminska masa) i terensko ispitivanje ovih svojstava, gde se žitkost smatra najbitnijim parametrom kontrole kvaliteta koji treba pratiti na terenu pre ugradnje materijala.

6.5.4 Posebni uslovi

Prilikom ugradnje žitkih ispuna razvija se toplota. Ovo je posebno izraženo kod mešavina koje sadrže samovezujući elektrofilterski pepeo. Iz ovoga sledi da je ugradnja žitkih ispuna moguća i na temperaturama ispod tačke mržnjenja. Ipak, se preporučuje korišćenje zagrejane vode za mešavinu i obavezno uklanjanje vode sa površine ugrađene mase. Po završetku ugradnje u zimskim uslovima na površini mase treba naneti zaštitni sloj da bi se umanjila ili sprečila oštećenja usled naizmenične pojave mržnjenja i kravljenja. Ako se na prethodno ugrađenu masu nanosi novi sloj, ispune, ili kolovoznog zastora, pre početka operacije treba ukloniti led, odnosno površinski smrznuti sloj.⁽²⁶⁾

6.6 Zaštita životne sredine

Curenje supstanci iz mešavine žitke ispune i pepela se može pojaviti usled prodiranja tečnosti kroz mulj.⁽²⁷⁾ Mala vodopropusnost žitkih ispuna smanjuje količinu vode koja prodire i curenje mikroelemenata iz mešavine. Žitka ispuna sa elektrofilterskim pepelom je obično projektovana da uveća do krajnosti sadržaj pepela, dok istovremeno zadovoljava zahteve za čvrstoćom. Veće količine pepela podrazumevaju veću mogućnost curenja mikroelemenata.⁽²⁸⁾ Rezultati testa ekstrakcije toksina iz uzoraka procednih voda iz žitkih ispuna ukazuju na to da procedne vode nisu toksične.⁽²⁹⁾ U zasebnoj studiji mešavina sa visokim sadržajem elektrofilterskog pepela, procedna voda iz žitkih ispuna sa elektrofilterskim pepelom je bila ispod standarda propisanih od strane Odeljenja za prirodne izvore u Viskonsinu kojima se reguliše kvalitet podzemnih voda i i posebno je ispunila sve standarde koji se tiču vode za piće.⁽²⁷⁾

6.7 Reference

Pretraživa verzija referenci koje se koriste u ovom poglavlju je dostupna [ovde](#).

Pretraživa bibliografija literature o elektrofilterskom pepelu dobijenom iz uglja je dostupna [ovde](#).

1. Smith A. Controlled low-strength material. *Concrete Construction* 1991:389-98.
2. ACI Committee 116. Cement and concrete terminology. Detroit, Michigan: American Concrete Institute (ACI); 2000. Report nr 116R-00.
3. ACI Committee 229. Controlled low strength materials (CLSM). Detroit, Michigan: American Concrete Institute (ACI); 1999. Report nr 229R-99.
4. Ramme BW, Tharaniyil M. Coal combustion products utilization handbook. Milwaukee, WI: We Energies; 2004.
5. Pierce CE, Blackwell MC. Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill. *Waste Management* 2003;23(3):197-208.
6. Collins RJ; Tyson SS. Utilization of coal ash in flowable fill applications. Symposium on recovery and effective reuse of discarded materials and by-products for construction of highway facilities, Federal Highway Administration; 1993.
7. Federal Highway Administration (FHWA), American Coal Ash Association (ACAA). Fly ash facts for highway engineers. Federal Highway Administration (FHWA); 2003. Report nr FHWA-IF-03-019.
8. Hennis KW; Frishette CW. A new era in control density fill. Tenth international ash utilization symposium, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 1993.
9. ASTM C618-05 standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM; West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.
10. ASTM C143/C143M-05a standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2005.

11. ASTM C939-02 standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method). In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2002.
12. Balsamo NJ. Slurry backfills – useful and versatile. *Public Works* 1987 April;118:58-60.
13. ASTM D6103-04 standard test method for flow consistency of controlled low strength material (CLSM). In: ASTM; Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2007.
14. Masada T, Sargand SM. Construction of flexible pipe system using controlled low strength material - controlled density fill (CLSM-CDF). Columbus, OH: Ohio Department of Transportation; 2001 September. Report nr FHWA/OH-2001/08.
15. American Stone-Mix I. Physical properties of FLO-ASH. 2000.
16. Brewer & Associates. Load transfer comparisons between conventionally backfilled roadway trenches and those backfilled with controlled low strength material -- controlled density fill (CLSM-CDF). Cincinnati, Ohio: Cincinnati Gas & Electric Company; 1991.
17. Krell, WC. Flowable fly ash. 68th annual meeting of the transportation research board; Washington, DC: Transportation Research Board; 1989.
18. Newman FB, Rojas-Gonzales LF, Knott DL. Current practice in design and use of flowable backfills for highway and bridge construction. Harrisburg, Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation; 1992. Report nr 90-12.
19. Katz A, Kovler K. Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM). *Waste Management* 2004;24(5):501-12.
20. ASTM D6024-02 standard test method for ball drop on controlled low strength material (CLSM) to determine suitability for load application. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania; 2002.
21. Chugh YP, Chaudhuri SK, Wilcox H, Sengupta S, Jennings J. Coal combustion residues management projects. Carterville, IL: Illinois Clean Coal Institute; 1998. Report nr 97-1/3.4A-2.
22. Glogowski PE, Kelly JM, Brendel GF. Laboratory testing of fly ash slurry. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 1988. Report nr CS-5100.
23. Gabr MA, Bowders JJ. Controlled low-strength material using fly ash and AMD sludge. *Journal of Hazardous Materials* 2000 9/15;76(2-3):251-63.
24. Doven AG, Pekrioglu A. Material properties of high volume fly ash cement paste structural fill. *J Mater Civ Eng* 2005;17:686-93.
25. ASTM D4832-02 standard test method for preparation and testing of controlled low strength material (CLSM) test cylinders. In: Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania: 2002.
26. Collins RJ, Ciesielski SK. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199. Transportation Research Board; Washington, DC: 1994.
27. Naik TR, Singh SS, Ramme BW. Performance and leaching assessment of flowable slurry. *J Environ Eng* 2001;127(4):359-68.
28. Gaddam R, Inyang HI, Young DT, Umoh E. An economic feasibility model for ash use in flowable fill with integration of logistics and contaminant leaching factors. *International Journal of Environment and Waste Management* 2006;1(1):20-38.
29. Türkel S. Long-term compressive strength and some other properties of controlled low strength materials made with pozzolanic cement and class C fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 2006 9/1;137(1):261-6.