

GRANULACIJA ODPADNEGA MULJA

Andrej Bombač, Uroš Orehek

Izvleček:

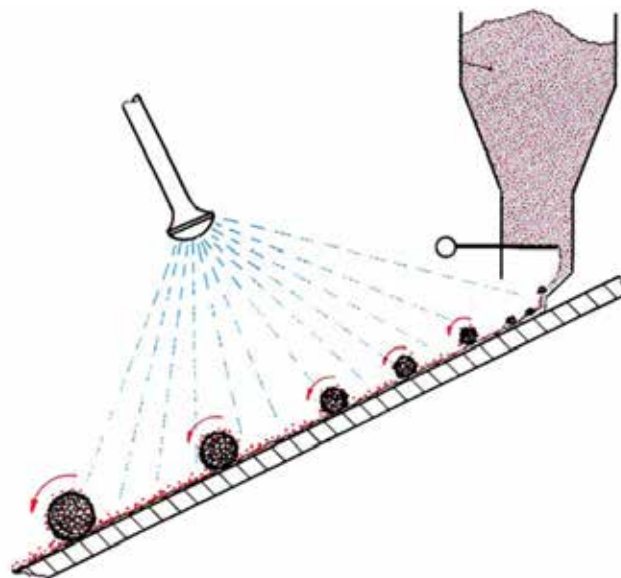
Delo obravnava procesne parametre delovanja modelne diskovne granulirne naprave za uporabo specifičnega materiala, to je odpadnega mulja pri proizvodnji kalcita. To terja optimalne nastavitve naklona in vrtilne frekvence diska, količino dovedenega mulja, dinamični naklon nasutja, količino dodane vode ter lokacije strgala, dovoda materiala in šobe za omočitev. Z modelno napravo so bili izvedeni nizi meritev pri uporabi različnih kombinacij treh izbranih materialov (mulj, apno in gips). Iz izvedenih preizkusov smo ugotavljali ustreznost izbrane kombinacije procesnih parametrov in materialov za doseganje granul ustrezne velikosti in njene porazdelitve ter obstojnosti. Rezultati meritev so pokazali, da imata bistven vpliv na obliko (okrogla, podolgovata, jajčasta) granul vstopna vlažnost in geometrija materiala (mulj). Ugotovljeno je, da nastavitev naklona diska bistveno vpliva na kapaciteto naprave, medtem ko vrtilna frekvenca diska vpliva na velikosti granul.

Ključne besede:

aglomeracija, odpadni mulj, diskovni granulator, procesni parametri, apno, gips

1 Uvod

Granulacija je tehnološki postopek, ki omogoča pretvorbo zelo drobnih delcev – prahu – v večje, bolj uporabne granule. Pri mokri granulaciji se običajno dodaja kapljevito vezivo, ki na osnovi kapljevinskega mostička medsebojno povezuje manjše delce, da se aglomerirajo in oblikujejo granule, ki se nato posušijo [1– 4]. Lahko pa se dodajajo tudi druge pomožne snovi in veziva za specifične namene glede sestave takšnega granulata. Granulacija prašnih materialov je ključen postopek v mnogih panogah industrije, tako je npr. v farmacevtski industriji granulacija bistvena pri proizvodnji tablet, kapsul in drugih dozirnih oblik, saj se tako izboljša dozirna natančnost in topnost zdravilnih učinkovin, kar pospešuje njihovo absorpcijo v telesu [2]. V prehranski industriji se z granulacijo praškov izboljša enakomernost teksture, saj granulirani praški zagotavljajo enakomernjšo teksturo končnega izdelka (izboljšanje okusa in videza) ter izboljšajo obstojnost izdelka, kar je pomembno za skladiščenje in distribucijo. V kemični industriji se granulacija uporablja za oblikovanje granul za nadaljnjo uporabo v različnih procesih. S tem se izboljša reaktivnost kemičnih spojin, kar olajša nadaljnje procese ter zmanjšuje prašnost, kar veča eksplozijsko varnost pri delu in zmanjšuje vpliv na okolje. V kmetijstvu se granulacija uporablja pri proizvodnji gnojil in pesticidov v granulirani obliki [6]. Granule se enakomerno razporedijo po polju, kar zagotavlja enakomerno hranjenje rastlin ter zmanjšanje izgub zaradi izpiranja in izhlapevanja, kar povečuje



Slika 1 : Princip granulacije na strmini [5]

učinkovitost gnojenja in zaščite rastlin. Granulacija prašnih snovi izboljša kakovost in učinkovitost končnih izdelkov ter prispeva k trajnosti in varnosti v industrijskih procesih. Princip granulacije na strmini, t. i. princip snežne kepe, pri katerem poteka združevanje manjših delcev prahu v grobo zunanjo obliko s kotaljenjem večjih jedrnih delcev po prašni podlagi, kar je prikazano na *sliki 1*. Osnovna medsebojna vez delcev po tem principu je kapljevinski mostiček [1, 3], ki se vzpostavi ob pršenju veziva (v našem primeru vode). S tem so dosežene ciljne lastnosti v naštetih industrijskih panogah.

Doc. dr. Andrej Bombač, univ. dipl. inž.,
Uroš Orehek, mag., oba Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za strojništvo

V nadaljevanju se osredotočamo na granulacijo mulja, ki nastaja pri izpiranju drobljenca kot odpadni produkt pri proizvodnji kalcita in se trenutno od-

važna na lokalno deponijo. Zaradi bazičnosti bi lahko bil uporaben za nevtralizacijo kisle zemlje v kmetijstvu. Mulj v trenutni obliki ni primeren za transport kot tudi ne za raztros po kmetijskih površinah. Z ustreznim tehnološkim postopkom granulacije mulja bi lahko pridobili granule ustrezne velikosti in obstojnosti za nadaljnjo uporabo v kmetijstvu.

2 Modelna naprava – diskovni granulator

Za granuliranje različnih kombinacij delovnih materialov (mulj, apno in gips) je bil uporabljen diskovni granulator (*slika 2*), ki ga sestavljajo: nagibni disk z obročem, ohišje s pogonskim elektromotorjem, šoba za pršenje vode in strgalo. Pri rotaciji diska se ob nasipanju materiala na disk in posledičnem kotaljenju po brežini ustvarja granulata. Ko ta doseže ustrezno velikost, se izloči iz postopka granuliranja preko roba diska. Diskovni granulator je pogosto uporabljen za granulacijo praškastih materialov, kot so kemična gnojila (vključno z organskimi, anorganskimi in biološkimi gnojili), apnenčev prah, mavec, klinker, prah iz cementne/apnene peči, premogov pepel, minerali in rude, komunalno blato iz čistilnih naprav, prah iz elektroobločne peči in drugi materiali [7].

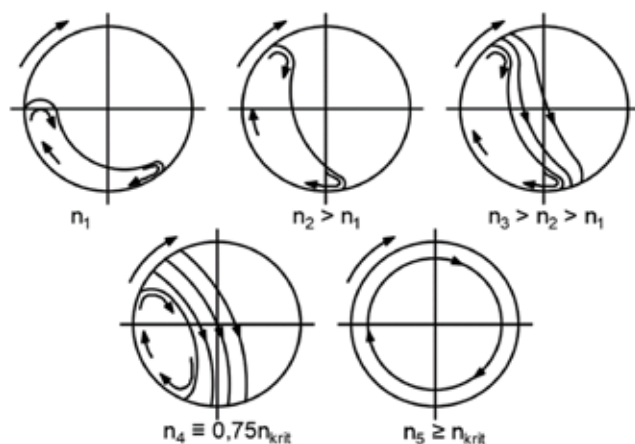
Z modelno napravo je zagotovljena ponovljivost meritev, omogočeno je spreminjanje vrtilne frekvenca in naklona diska. Držalo s strgalom preprečuje pretirano kepljenje snovi ob začetni fazi pršenja z vodo, ki se izvaja s šobo.

2.1 Nastavitve ključnih parametrov granulatorja

Na nastanek granulata v diskovnem granulatorju delujejo številni vplivi. Poleg vrtilne frekvenca diska in njegovega naklona vplivata tudi lokacija in pretok materiala. Ločimo šaržno ali kontinuirano granuliranje. Z dodajanjem vode vplivamo tudi na nastanek in nadaljnjo rast granulata. Dodajanje vode ima lah-



Slika 2 : Diskovna naprava za granuliranje



Slika 3 : Trajektorija gibanja granulata pri različnih vrtilnih frekvencah [2]

ko zelo različen vpliv, saj lahko spreminjamo lokacijo (šobe) škropljenja, vzorec škropljenja in količino dovedene vode. Lokacija šobe je nastavljiva v vseh treh koordinatnih smereh, pri čemer na večjih industrijskih napravah spreminjamo tudi število šob [1, 7].

Za pravilno granuliranje je na disku potrebno zagotoviti ustrezno vrtilno frekenco (n) in ustrezen pomik materiala. Slednje zagotovimo z ustreznimi strgali in pozicijo strgal na napravi, ki strgajo dno diska. Če je vrtilna frekvenca diska prevelika, nalet granule s strgalom povzroči njen razpad v manjše nepravilne (nesferične) oblike. Ti delci se sprijemajo z drugimi in tvorijo nadaljnje nepravilne

oblike granulata, ki niso obstojne. Mejna vrtilna frekvenca za uspešno granulacijo je $n = 0,75 \cdot n_{krit}$, pri čemer je kritična vrtilna frekvenca pogojena z geometrijo naprave [2]. Na *sliki 3* so prikazane trajektorije granulata pri različnih vrtilnih frekvencah diska. Po priporočilih je vrtilna frekvenca diska (n_4) običajno 75 % kritične vrtilne frekvenca [2]. S preveliko vrtilno frekenco (n_5) se granulata zaradi centrifugalne sile pripne na rob diska in granulacija ni več mogoča.

3 Material za granuliranje

Pred začetkom izvajanja granuliranja je bilo potrebno pripraviti material. Apno in gips sta bila dobavljena v prašni obliki in nista potrebovala dodatne priprave. Vlažen mulj v surovi obliki je podoben glini, zato ga je bilo potrebno predelati s strgalnikom v ustrezno obliko, kot je prikazano desno na *sliki 4*. Rokovanje z vlažnim muljem, ki je precej lepljiv, je zelo podobno vlažni ilovici, medtem ko suhi mulj ustvarja grudice, je drobljiv in zelo podoben moki. Posušen mulj je prikazan levo na *sliki 4*. Tako vlažni (VM) kot suhi mulj (SM) ne oddajata neprijetnih vonjav. Poleg mulja sta bila za izboljšanje trdnosti suhih granul za granuliranje uporabljena tudi hidrirano posušeno apno (A) in hitro se sušeci gips (G). Granuliranje je potekalo v naslednjih kombinacijah:



Slika 4 : Levo – posušeni mulj, desno – vlažen drobljen mulj

3.1 Granuliranje hidriranega apna brez dodajanja in z dodajanjem vode

Granuliranje je potekalo brez dodajanja in z dodajanjem vode. Granulacija apna brez dodajanja vode ni smiselna, saj se to ne združuje, z dodajanjem vode pa se tvorijo manjše grudice, katerih velikosti so bile precej neenakomerne. Granulat sam po sebi ni obstojen in razpada. Granuliranje apna je pokazalo, da pri večji dodani količini vode granulacija preneha in nastane večja gmota, ki zastane na strgalu.

3.2 Granuliranje vlažnega mulja brez dodajanja in z dodajanjem vode

Vlažen mulj je bil granuliran samostojno brez dodajanja vode in z dodajanjem vode. Preliminarno granuliranje vlažnega mulja je pokazalo, da se zaradi visoke vlažnosti združuje v večje granule, vendar se ob naletu na strgalo te sprijemajo, ne nastajajo granule, temveč gmota, ki zastane na strgalu. Pri granuliranju z dodajanjem vode je kljub priporočilom [2] sledilo takojšnje prenehanje granuliranja, ker je nastala lepljiva gmota.

3.3 Granuliranje vlažnega mulja in gipsa brez dodajanja in z dodajanjem vode

Pri granuliranju vlažnega mulja in gipsa brez dodajanja vode so nastajale granule enakomerne velikosti, medtem ko z dodajanjem vode ni bilo videti bistvene razlike. Iz preliminarne meritve je sledilo, da dodajanje vode ni primerno za šaržne meritve kombinacije gipsa in mulja, saj je prišlo do kepljenja večjih gmot.

3.4 Granuliranje vlažnega mulja in apna brez dodajanja in z dodajanjem vode

Granulacija mulja z apnom je dala zadovoljive preliminarne rezultate, pri katerih so bile granule različnih velikosti ustvarjene praktično takoj ob začetku granulacije. Granule so ohranjale velikost in niso razpadale, ob dodajanju vode pa ni bilo bist-

vene izboljšave z vidika velikosti in enakomernosti granul. V obeh primerih (z dodajanjem vode ali brez) pa produkt ni obstojen, kar pomeni, da ob padcu z višine 1 m v trenutku razpade (tudi ko je produkt posušen).

4 Merilna linija

Meritve procesnih parametrov in poteka granuliranja so potekale po etapah, ki so opredeljene s tremi sklopi.

Prvi sklop je zajemal meritve tlaka, temperature in relativne vlažnosti zraka okolice ter pripravo granulacijskega materiala. Za meritve okoliške temperature in vlage sta bila uporabljena digitalni termometer (Greisigner GTH 1200A) in merilnik vlage (Greisiger GFTH 100). Priprava granulacijskega materiala je zajemala tehtanje (laboratorijska tehtnica Sartorius GMBH Göttingen 3862 MP8-1) in kontrolirano drobljenje z ročnim strgalnikom.

Drugi sklop je zajemal merilno opremo samega diskovnega granulatorja. Uporabljena sta bila laserski merilnik vrtljajev za meritev vrtilne frekvence diska ter rotameter za meritev pretoka vode.

Tretji sklop merilne linije zajema opremo za vizualizacijo granulata: fotoaparat (Nikon D200), kamera (Sony HDR-SR11), svetilka z možnostjo nastavitve svetilnosti in prenosnik s programsko opremo za zajem in obdelavo slik (DigiCamControl). S kamero je bil posnet dinamičen razvoj granulacije, s fotoaparatom pa slikan vzorec granulata, ki je bil po končani granulaciji odvzet iz vsake šarže.

5 Rezultati in analiza granuliranja na diskovnem granulatorju

5.1 Granuliranje brez pršenja vode

Skupno je bilo opravljenih 18 meritev šaržnega granuliranja kombinacij vlažnega mulja z apnom in gipsom pri različnih procesnih nastavitvah, kot je prikazano v *tabeli 1*.

Devet meritev poteka granulacije je bilo opravljenih za kombinacijo (VM + A) pri treh različnih naklonih diska ter za vsak naklon pri treh vrtilnih frekvencah ter devet za kombinacijo (VM + G) pri enakih parametrih. Po vsaki končani meritvi je bil odvzet vzorec granulata in slikan za vizualizacijo, ki je zajemala analizo ustreznosti oblike granulata in enakomernost velikosti granul. Ustrezna oblika granule je kroglja, delno ustrezna je oval in neustrezna tista, ki nima točno definirane oblike. Porazdelitev velikosti granulata je definirana kot slaba pri veliki razliki velikosti granul in kot dobra, če so te približno enake velikosti. Obstojnost granulata je definirana s padcem granul z višine 1 m na trdo podlago in se preverja po 96 urah

Tabela 1 : Procesne nastavitve granulatorja pri granulaciji brez pršenja vode

Kombinacija komponent za granulacijo	Naklon diska [°]	Vrtilna frekvenca diska brez pršenja vode [vrt/min]
VM + A VM + G	37	13,8
		19,7
		25,6
	42	13,8
		19,7
		25,6
	47	13,8
		19,7
		25,6

po granuliranju. Če granula pri padcu ne razpade, je obstojna, v nasprotnem primeru ni. V tabeli 2 so podane procesne nastavitve granulatorja, pri katerem je granulat s srednjo enakomernostjo porazdelitve in ustrezno obliko obstojen. Izbira ustreznosti granulata za komercialno rabo ni predmet tega dela.

Na osnovi vizualizacije sta bila za vsako kombinacijo materiala izbrana tista vrtilna frekvenca in naklon diska, pri kateri sta bili doseženi enakomerna velikost

granul in ustrezna oblika granul. Rezultati analize granuliranja so pokazali vidne razlike med kombinacijama (VM + A) in (VM + G). (VM + A) tvori ustrezno obliko granul in ima dokaj enakomerno velikosti granul, vendar so granule manjše od premera 6 mm.

Podobno kot pri apnu iz analize granuliranja v kombinaciji (VM + G) izhaja, da so granule ustrezne velikosti. Gips je v primerjavi z apnom zagotavljal boljše obstojnost granulata, medtem ko so velikosti granul podobne. Rokovanje z gipsom je bilo v primerjavi z apnom bolj enostavno. Pri analizi granulacije različnih kombinacij materialov je ugotovljeno, da sta bistvenega pomena naklon in vrtilna frekvenca diska. Vrtilna frekvenca vpliva na velikosti granulato – pri višjih vrtilnih frekvencah so granule manjše. Naklon diska pa vpliva predvsem na trajanje granuliranja, da je dosežen pričakovan rezultat. Na sliki 5 je prikazano trenutno stanje granuliranja kombinacije VM + G v presledkih 15 s pri naklonu diska 42° in 19,7 vrt/min. Ti dve vrednosti sta se izkazali za optimalni za izvajanje granuliranja vseh kombinacij materialov. V času 30 s je velikost granulata najbolj enakomerna, gips je bil v celoti vključen v granulat. Identično je potekala granulacija v kombinaciji VM + A. V času 30 s je dosežena enakomerna velikost granulata, apno je v celoti vključeno v granulat. Stanje granulacij v dveh časovnih korakih je prikazano na sliki 6.

Tabela 2 : Primeri granulata VM + G po kriterijih

Vrtilna frekvenca diska [vrt/min]	13,8	19,7	25,6
Naklon diska	42°	42°	42°
Fotografija vzorca			
Ustreznost oblike granulata	Delno ustreza	Ustreza	Ustreza
Enakomernost velikosti granulata	Srednja	Srednja	Srednja
Obstojnost granulata	Da	Da	Da



Slika 5 : Stanje granuliranja kombinacije VM + G pri časih 15 s (a) in 30 s (b)



Slika 6 : Stanje granuliranja kombinacije VM + A pri časih 15 s (a) in 30 s (b)

5.2 Rezultati meritev granuliranja na diskovnem granulatorju z dodajanjem vode

Pred izvedbo meritev z dodajanjem vode je bilo potrebno določiti ustrezno lokacijo šobe. Ta je bila določena glede na pogoje ustreznosti poteka granuliranja s preliminarne izvajanj z različnimi materiali, razvidno na *sliki 7*. Za dodajanje vode je bila uporabljena šoba, ki prši vodno meglico v obliki stožca, označeno na *sliki 7*. Procesne nastavitve granulatorja pri granulaciji s pršenjem vode so prikazane v *tabeli 3*.

Pršenje vode je bilo izvedeno na dva načina. Pri prvem se je izvajalo takoj po nasutju materiala in je potekalo skozi celotni čas granuliranja, to je 30 s. Pri drugem načinu se je pršenje izvajalo 15 s po začetku granuliranja z enako količino vode in je trajalo do konca granuliranja, skupno 45 s.

Pri prvem načinu dodajanja vode so nastale granule, ki niso dosegale predvidenih zahtev. Ker ima mulj visoko vlažnost, so pri prvem načinu zaradi dodatnega pršenja vode v nekaterih odsekih nastajali večji kosi, ki so kasneje ob testu obstojnosti pri naletu razpadli.

Tudi pri drugem načinu granule niso dosegale predvidenih zahtev. Granule so nastale že v začetnih 15 sekundah, nato pa so se ob pršenju vode oblikovale vse večje granule nepravilnih oblik, ki so kasneje pri testu obstojnosti razpadle. Pri ostalih kombinacijah z daljšim časom pršenja je bil proces granuliranja neustrezen, saj je nastajala vse večja gmeta tako v kombinacijo VM + A kot VM + G. Zaradi vode, ki jo vsebuje vlažen mulj, za potek granulacije omenjenih kombinacij materialov ni potrebe po še dodatnem pršenju.

6 Zaključki

V prispevku je predstavljeno granuliranje odpadnega mulja pri proizvodnji kalcita z modelnim diskovnim granulatorjem in z vsemi potrebnimi nastavitvami procesnih parametrov za uspešno pridobljen granulat.

Proces granuliranja je potekal z vlažnim muljem, hidriranim apnom, gipsom in s kombinacijami vlažnega mulja in apna ter vlažnega mulja in gipsa. Preliminarne meritve poteka granuliranja so se izvajale predvsem zaradi ugotovitve primernosti uporabe diskovnega granulatorja pri uporabi teh materialov.

Z izvedenimi meritvami poteka granulacije vlažnega mulja in apna ter vlažnega mulja in gipsa brez dodajanja vode so bili pridobljeni potrebni manjkajoči podatki za nadaljnje izvajanje granuliranja. Za vsako nadzirano granuliranje so bili izvedeni predhodno drobljenje vlažnega mulja, določanje vlažnosti in tehtanje ustrezne količine mulja ter aditivov (apno in gips) v medsebojnih kombinacijah.

Tabela 3 : Procesne nastavitve granulatorja pri granulaciji s pršenjem vode

Kombinacija komponent za granulacijo	Naklon diska [°]	Vrtilna frekvenca diska brez pršenja vode [vrt/min]
VM + A	42	19,7
VM + G	47	25,6



Slika 7 : Granuliranje pri kombinaciji VM + A s pršenjem vode

Tabela 4 : Primer granulata VM + G po kriterijih

Vrtilna frekvenca diska [vrt/min]	13,8	19,7	25,6
Naklon diska	42°	42°	42°
Fotografija vzorca			
Ustreznost oblike granulata	Ne ustreza	Ne ustreza	Ne ustreza
Enakomernost velikosti granulata	Slaba	Slaba	Slaba
Obstojnost granulata	Ne	Ne	Ne

Na osnovi številnih izvajanj granuliranja kombinacije apna in vlažnega mulja ter gipsa in vlažnega mulja, oboje brez dodajanja vode, so bile izbrane najustreznejše nastavitve naprave za izbrano kombinacijo materialov.

Pri granuliranju z dodajanjem natančno določene količine vode je bilo ugotovljeno, da so ključnega pomena lokacija šobe, tip pršenja vode ter časovni potek pršenja (z zamikom, intervalno ali skozi celoten čas).

Iz analize vzorcev granulata glede na ustreznost oblike, velikosti in obstojnosti granulata izhajajo najustreznejše procesne nastavitve obratovalnih parametrov granuliranja, ki so različne za izbrane kombinacije materialov. Glede na veliko število izvajanj granuliranja – kombinacije materiala in procesnih parametrov – se je izkazalo, da so granule ustrezale vsem kriterijem hkrati le v nekaterih kombinacijah. Tako so vse granule mulja in apna razpadle pri testu obstojnosti, medtem ko so granule iz mulja in gipsa pri vrtilni frekvenci 19,7 in 25,5 vrt/min in naklonu diska 42° prestale test obstojnosti.

Literatura

- [1] M. Levin, How to Scale-Up a Wet Granulation End Point Scientifically, Academic Press, 2015.
- [2] W. Pietsch, Size enlargement by agglomeration, Chicester: J. W & S, 1991.
- [3] A. Bombač, Zbirka nalog iz mehanske procesne tehnike, Univerza v Ljubljani Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2019.
- [4] J. Litster, B. Ennis, The Science and Engineering of Granulation Processes (Particle Technology Series Book 15), Springer, 2013.
- [5] E. Ignatowitz, Kemijska tehnika. Jutro, Ljubljana, 1996.
- [6] L. Lambert, Technology of Obtaining Organic Granular Fertilizers, Academic Publishing, 2018.
- [7] Disk granulator, FTM machinery [Elektronski]. Dostopno: <https://www.ftmmachinery.com/products/28-disc-granulator.html>, ogled 25. 9. 2023.

Granulation of waste silt

Abstract:

This work focuses on the process parameters of a model disk granulator for using waste silt in calcite production. This entails optimizing the disk's inclination and rotation frequency, the quantity of supplied silt, the dynamic angle of the bulk material, the amount of added water, and the positions of the scraper, material feed, and wetting nozzle. Laboratory experiments were conducted using different combinations of three selected materials (silt, lime, and gypsum) to produce aggregates. Through these experiments, we aimed to assess the suitability of the chosen combination of process parameters and materials for achieving aggregates of the appropriate size and durability. Measurement results demonstrated that the initial moisture content and the material's geometry (slurry) significantly influence the shape (round, elongated, oval) of the granules. It was also observed that adjusting the disc's inclination significantly impacts the device's performance, while the disc's rotation frequency substantially affects the size of the aggregates.

Keywords:

agglomeration, waste silt, disk granulator, process parameters, lime, gypsum