

Napredno vodenje pilotne naprave za sušenje nestabiliziranega komunalnega mulja čistilnih naprav

Božidar Bratina¹, Riko Šafarič¹, Janez Kramberger¹, Peter Göncz¹, Andrej Šorgo¹, Suzana Fišer-Žilič¹, Milan Rotovnik¹, Vilijana Brumec², Janez Ekart², Tadej Krošlin²

¹Univerza v Mariboru (FERI, FS, FNM), Slomškov trg 15, 2000 Maribor

²Gorenje Surovina d.o.o., Ul. Vita Kraigherja 5, 2000 Maribor

bozidar.bratina@um.si, riko.safaric@um.si

Advanced control of a pilot plant for drying of non-stabilized municipal sludge

The paper presents development of advanced algorithms for non-stabilized municipal sludge drying of wastewater treatment plants in low vacuum. Municipal sludge regarded as a waste, can be used as potential energy source due relatively high amount of organic matter, and also contains a lot of important chemical elements such as phosphorus, which can be in the form of a fertilizer returned into agriculture. Drying of non-stabilized sludge is necessary to stabilize the output product (reduce odors), which due to on-going fermentation process presents a technological challenge. The presented device is intended for drying of stabilized and non-stabilized municipal sludge (including industrial sludge) with different levels of humidity, to the desired product with level of humidity at 40% which is suitable for fertilizer or at 10%, which is suitable as an alternative fuel. Drying process is realized with advanced control scheme where parameters for optimal drying dynamics are adapted, according to sludge composition specifics, level of humidity, drying phase etc. The presented control system enables automated drying process with the aim of minimization of time necessary for drying, and demanded sludge granulation. In the drying phase, odors from sludge into surroundings are reduced to a minimum due to a low vacuum technology.

Kratek pregled prispevka

V članku je predstavljen razvoj algoritma vodenja pilotne naprave za sušenje komunalnega mulja čistilnih naprav v podtladni atmosferi. Komunalni mulj ima kot odpadni material čistilnih naprav še vedno energetski potencial zaradi vsebnosti organskih spojin, prav tako pa vsebuje ogromno drugih elementov kot je fosfor, ki se lahko v obliki gnojila vrača na kmetijske površine. Sušenje mulja je potrebno zaradi stabilizacije izhodnega produkta (ne smrdi) kar predstavlja tehnološki izziv. S predstavljen pilotno napravo je mogoče posušiti stabilizirane in nestabilizirane komunalne (tudi industrijske) mulje z različnimi stopnjami vlage, do zelenega produkta z 40% vlage, ki je primeren za gnojilo oziroma z 10% vlage, ki je primeren kot alternativno gorivo. Tehnologija sušenja je prilagojena specifikam različnih muljev in vstopne vlažnosti, upošteva nelinearnosti v fazi sušenja, sproti pa se prilagajajo parametri in dinamika sušenja. Razvit sistem vodenja omogoča avtomatsko izvajanje sušenja s ciljem minimizacije časa sušenja in granulacije mulja. Med postopkom sušenja zaradi uporabljene tehnologije podtlachnega sušenja ni emisij smradu v okolico.

1 Uvod

Komunalni mulj nastaja kot odpadni produkt komunalnih čistilnih naprav (KČN) v procesu čiščenja odpadnih voda. V postopku čiščenja se najprej mehansko ločijo tekoče in trdne snovi, nato pa se izvaja biološko in kemično čiščenje odpadne vode. Trdne snovi, ki se v različnih fazah procesa čiščenja mehansko izločijo so pesek, plavajoči trdi delci na površini (plastike, les, maščobe), ter posedli mulj z dna bazenov biološke obdelave. Delež izločenega mulja bistveno presega deleže ostalih snovi, podatek za KČN Ljubljana: 280000 populacijskih enot (PE), pridelava letno 8.000.000 kg suhega mulja [1].

V Sloveniji je bilo ravnanje z odpadnimi mulji KČN še pred nekaj leti zelo različno in večinoma neustrezno. Nekaj regijskih čistilnih naprav je problem odlaganja dehidriranega mulja reševalo individualno, običajno z odvozom na komunalna odlagališča, kar pa s sprejetjem ostrejših zakonodaj po letu 2009 ni več dovoljeno. Največji omejitveni faktor je previsoka vsebnost biorazgradljivih organskih snovi, ki so vir toplogrednih plinov in smradu. Problematika povečanja količin komunalnega mulja je direktno povezana zaradi ostrejših zakonodaj, ki zajema vedno večji delež odpadnih kanalizijskih voda pri predelavi v KČN, kjer je po statistiki iz leta 2008 vsak prebivalec EU ustvaril za cca 90g suhega mulja na dan [2]. Implementacija direktive o čiščenju komunalnih odpadnih voda, je povečala trend izgradnje lokalnih komunalnih čistilnih naprav, s čimer se količina mulja z leti še povečuje. Tako je v EU količina odpadnega komunalnega mulja s 5,5 milijard kg suhe snovi v letu 1992, zrasla na 9 milijard kg v letu 2005. Napoved do leta 2020 pa znaša že okrog 13 milijard kg suhe snovi.

Izraba komunalnega mulja se v nekaterih državah EU izvaja že vrsto let, največ za raztros po kmetijskih površinah ali s so-sežigom za pridobivanje toplotne energije. Novejši trendi se kažejo v izkoriščanju bioplina, kompostiranju, izločevanju pomembnih elementov, kot je fosfor, karbonizaciji mulja ipd. Slovenija ima na

tem področju zelo ostro zakonodajo, zato se danes večina mulja na izhodu komunalnih čistilnih naprav stabilizira (kemično, mehansko), s čimer se začasno prepreči biološko aktivnost (gnitje, smrad). Okoljsko neoporečen mulj se transportira čez mejo na deponije ali v sežigalnice, kjer ga izkoristijo v obliki so-sežiga pri proizvodnji toplotne energije, manjše količine oporečnega mulja (npr. težke kovine) pa se nevtralizirajo v sežigalnicah pri visokih temperaturah. Po slovenski zakonodaji morajo stroške odvoza, oddaje ali uničenja nastalega odpadka kriti proizvajalci le-tega, v primeru komunalnega mulja so to KČN oz lokalne skupnosti. Že z vidika transporta mulja (90% vode) se z dehidracijo (10% vode) bistveno reducira masa in s tem stroške prevoza. Posledično se išče rešitve in tehnologije kako komunalni mulj ustrezno obdelati, ter prekvalificirati v tržno zanimive pol-produkte. V tem primeru ima nestabiliziran mulj prednosti; je bogat z organskimi spojinami, ki se jih lahko izrabi za pridobivanje gnojila, bioplina ali alternativnega trdega goriva, vsebuje fosfor, dušik, kalij, kalcij, itd. Mulj iz KČN je organsko zelo bogat, v njem pa so prisotni mikroorganizmi, zato lahko brez ustrezne stabilizacije fermentira, ob čemer se sproščajo velike količine toplogrednih in smrdečih plinov. Postopek dehidracije kot oblike stabilizacije mulja za potrebe gnojila ali goriva predstavlja tehnološki izziv, ki smo ga reševali s kombinacijo kontaktnega sušenja, podtlačne tehnologije in naprednega sistema vodenja.

V okviru sodelovanja in povezovanja raziskovalne sfere z gospodarstvom je v nadaljevanju predstavljen razvoj naprave za vakuumsko kontaktno sušenje komunalnih muljev in tehnološki postopek (sta v postopku patentiranja), za namene različne izrabe komunalnega mulja. Cilj projekta je razvoj ekonomskega in okoljsko učinkovitega sušenja muljev, ki lahko poteka z izrabo odpadne toplotne/hladilne energije. Izhodni produkt predstavlja mulj osušen na poljubno vsebnost vode definirane glede na njegovo uporabo. Poudarek je na razvoju naprednega sistema vodenja za potrebe avtomatizacije sušenja

biološko aktivnega (ne-stabiliziranega) komunalnega mulja. Pri tem je upoštevana tudi mikrobiološka varnost in stabilizacija mulja. Multi-disciplinarno zastavljen projekt povezuje področje strojništva, elektrotehnike, biologije, okoljevarstva in komunikologije.

2 Problematika komunalnih muljev

Gospodarjenje z odpadnim muljem KČN ni nujno enostavno. Običajno ima nedefinirano sestavo, lahko vsebuje težke kovine in človeku nevarne patogene organizme (virusi, patogeni mikroorganizmi, plesni), predstavlja potencialni izvor smradu, itd. Omenjeno področje urejajo slovenski predpisi, kot so Uredba o ravnanju z odpadki (Uradni list RS, št. 34/08), Uredba o odpadkih (Uradni list RS, 103/11), Uredba o mejnih vrednostih vnosa nevarnih snovi in gnojil v tla (Uradni list RS, št. 84/05, 62/08, 113/09), Uredba o uporabi blata iz komunalnih čistilnih naprav v kmetijstvu (Uradni list RS, št. 62/08), ter Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Uradni list RS, št. 45/07).

Glede na zahteve Direktive o čiščenju komunalne odpadne vode (91/271/EGS) mora Slovenija do 31. 12. 2015 zagotoviti ustrezne sisteme odvajanja in čiščenja za komunalno odpadno vodo z vseh območij poselitve s skupno obremenitvijo enako ali večjo od 2.000 PE (populacijskih enot). To je omenjeno tudi v finančni perspektivi 2014–2020, kjer se bodo naložbe prednostno osredotočile tudi na gradnjo teh sistemov. Realizacija zastavljenih ciljev bo doprinesla h količini odpadnega mulja, zato bo potrebno iskati rešitve v ustrezni izrabi le-tega. Žal se na področju izrabe mulja iz KČN spremembe v Sloveniji odvijajo prepočasi, in trenutna slovenska zakonodaja obravnava ta mulj kot odpadek (klasifikacijska številka 19 08 05). Po dodelitvi takšne klasifikacijske številke pa ga je s kasnejšo predelavo skoraj nemogoče prekvalificirati v nenevaren produkt.

2.1 Komunalni mulj

Mulj iz KČN lahko ovrednotimo kot snovni in energetski potencial, ki se ga lahko z ustrezno predelavo koristno uporabi: vrača v naravo v

obliki gnojila/ komposta, izrabi v obliki alternativnega goriva (v okviru okoljske zakonodaje), izkorišča kot zemljino za gradnjo nasipov, izdelava gradbeni material (pepel), izloči pomembne kemijske elemente, npr. fosfor (količine fosforja v naravi zadostujejo le še za okoli 20-30 let) [4],[5]. Prav zato se je pričelo favorizirati izrabo mulja v kmetijske namene pred sežigom, ki zvišuje ogljični odtis [6]. Mulj vsebuje za kmetijstvo potencialno uporabne anorganske (nitrati, fosfati, mikroelementi) in organske snovi (dušikove organske spojine, ogljikovi hidrati in maščobe). Seveda je pri tem smiselno upoštevati študije o pregnojenosti evropskih kmetijskih površin, paziti na vsebnost težkih kovin, predoziranju posameznih elementov (dušik), ter patogenih organizmov. Z energijskega vidika je komunalni mulj zanimiv saj ima kalorično vrednost 10 - 14 MJ/kg, kar znaša 35-60% energijske vrednosti rjavega premoga. Omejitve v izrabi so vedno ostrejša zakonodaja z vidika sežiga (izpusti ogljikovega dioksida, dušikovih oksidov, dioksinov, furanov), vložka energije v obliki toplote za sušenje, nastanek pepela, skladiščenja, itd.

2.2 Postopki dehidracije mulja

S stabilizacijo mulja se želi prekiniti biološko aktivnost mikroorganizmov, kar se doseže s spremembo pH, dehidracijo ipd. Pogosta oblika stabilizacije je kemična, kjer se z dodatkom (živega) apna, pepela ali železovega trioksida dvigne vrednost pH mulja nad 12. Ta oblika stabilizacije zadostuje za okrog 2 leti, nato pa se mulj biološko reaktivira. Drug način stabilizacije mulja je z mehansko dehidracijo, ki se izvaja na izhodu KČN. Izvedba je s stiskalnico ali centrifugo, kjer se z zmanjšanjem deleža vode v mulju otežijo življenjski pogoji mikroorganizmov. Oba postopka imata prednosti in slabosti, glede na kasnejše postopke predelave in izrabo mulja. Razni dodatki prinašajo dodatne stroške materiala, povečujejo vsebnost anorganskih snovi in posledično zmanjšujejo energetsko vrednost mulja, mehanska stabilizacija pa je investicijsko draga ter odstrani le delež kapilarne vode (zmanjša vsebnost vode za okoli 20%). Najcenejša oblika dehidracije je s pomočjo sončne energije, ki pa

zahteva ogromne površine za raztros, onesnažuje okolico, ter je časovno najdaljši postopek (nekaj mesecev) [3]. Omejitve v obstoječih postopkih dehidracije mulja so bili motivacija za razvoj sistema relativno hitrega sušenja (24-48 ur) na mali površini, z minimalnimi emisijami smradu v času sušenja, ter z izrabo nizkoenergijskih virov oz. odpadne toplote.

3 Projektiranje naprave

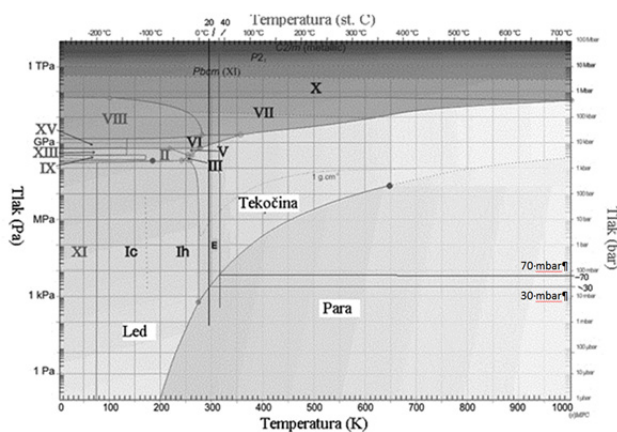
Tehnologija rotacijskih vakuumskih sušilnikov se izpopolnjuje že vrsto let, sušenje v njih pa običajno poteka šaržno. Ogrevalni medij je običajno tehnološka para ali tekočina (olje, voda), ki kroži po dvojnem plašču in ogreva material. Na podlagi projektnih zahtev za delovanje vakuumskega kontaktnega sušenja mulja (volumen sušilnika, absolutna vrednost tlaka, temperatura ogrevalnega/hladilnega medija, itd.) je bila projektirana in izdelana naprava, ki obsega naslednje sestavne dele: stacionarni in vodoravno nameščen uparjalni del z rotacijskim mešalom (nastavljive lopatice), filter trdih delcev, vertikalno nameščen kondenzator in ločen zbiralnik kondenzata (slika 1). Uparjalni in kondenzatorski del sta zasnovana z dvojnimi plaščem zaradi kontaktnega gretja oziroma hlajenja. V uparjalniku se moker mulj meša in kontaktno segreva, nasičena para pa se v kondenzatorju ohlaja na stenah in steka v odcedno posodo. Dvojni plašč uparjalnika je ogrevan z nizko temperaturno vodo v območju 30°C - 40°C, kondenzatorja pa s hladno vodo nižjo od 20°C. Delovna temperatura mulja se giblje v območju 25°C - 30°C. Pri tem je glede na temperaturna območja gretja in hlajenja potrebno vzdrževati ustrezen podtlak (fazni diagram vode, slika 2), da postopek izparevanja in kondenzacije v podtlaku sploh deluje. Za sušenje v teh razmerah je potrebna vakuumška črpalka, ki ima funkcijo tudi odvajanja plinov iz naprave skozi zračni filter v atmosfero. V našem primeru je normiran absolutni delovni tlak v območju 30 - 70 mbar (podtlak). Tehnologija vakuumskega sušenja je pogosta v industrijskih sušilnikih sadja, lesa, eksploziva (nizka temperatura), industrijskega anorganskega mulja ipd. Skupna

lastnost vsem izvedbam pa je uporaba grelnega medija z visoko temperaturo vode (nad 80°C) ali pare (nad 120°C).



Slika 1: Naprava za vakuumsko sušenje komunalnega mulja.

Predstavljen koncept in naprava za sušenje komunalnega mulja pa temelji na izrabi nizko temperaturne toplote.



Slika 2: Fazni diagram vode z označenim delovnim območjem v milibarjih.

Za potrebe kontroliranega vodenja je na napravi nameščena merilna oprema za merjenje pretokov, temperatur (gretje, hlajenje, mulj), absolutnega tlaka, in teže kondenzirane vode v odcedni posodi. Vodenje procesa poteka s sistemom, ki zajema regulacijo temperature ogrevalnega/hladilnega medija, odzračevanje atmosfere, regulacijo podtlaka in mešanje mulja. Poleg strojnega in elektro dela, so upoštevani še

biološko-okoljski preventivni ukrepi z vgradnjo filtrov, analizami mulja, vode v odcedni posodi in izčrpanega zraka.

4 Razvoj sistema vodenja

Na podlagi eksperimentalnega dela razvoja postopkov dehidracije so bile identificirane vplivne procesne veličine, potrebne za kontrolirano sušenje različnih vrst mulja (komunalni, industrijski). Kemično stabiliziran mulj ne povzroča večjih problemov medtem, ko lahko ne-stabiliziran mulj z neustreznim postopkom sušenja postane biološko zelo aktiven in posledično izloča večje količine fermentnih plinov, zato je težko obvladljiv v zastavljenem delovnem območju naprave. Ključni parametri za regulacijo so zato odvisni od sestave vhodnega mulja, predhodne obdelave (stabilizacije, dehidracije), stopnje fermentacije, zelene suhosti, itd.

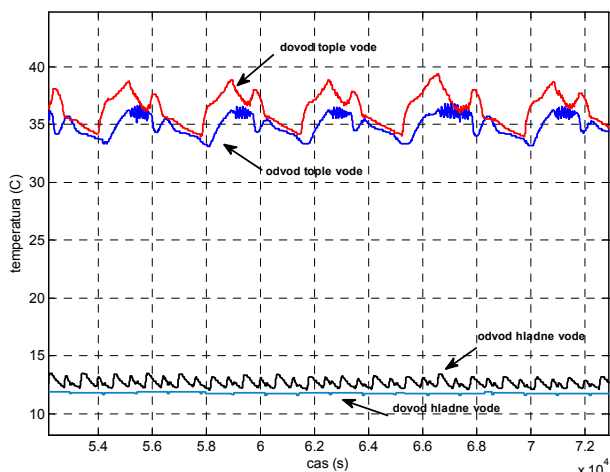
4.1 Razvoj postopka sušenja

Sušenje se prične s polnjenjem mokrega mulja, ki se prične kontaktno sušiti in mešati v uparjalnem delu. Mešanje ima pri tem pomembno vlogo; drobljenje površine mulja je potrebno zaradi strjevanja in povečanja kontaktne površine (stik s steno), ter zagotavljanje enakomerne porazdelitve temperature po celotni količini mulja. Med sušenjem se odvija fazni prehod mulja iz pastoznega stanja v praškasto obliko, kjer se s kontroliranim mešanjem vpliva na končni granulacijo suhega mulja. Dinamika mešanja je prilagojena vrsti mulja s ciljem vzdrževanja optimalne dinamike uparjanja in kondenzacije v celotnem trajanju postopka sušenja. Hitrost kondenzacije je določena s hladilno temperaturo in kondenzacijsko površino, najtežje pa je kondenzacijo vzdrževati pri ne-stabiliziranem mulju saj nanjo vpliva sprememba podtlaka, mešanica plinov v napravi, temperatura ogrevalne in hladilne vode in pogostost mešanja. Biološko aktivni mulji zaradi presnove mikrobov zahtevajo aktivno vzdrževanje podtlaka v delovnem območju saj se v uparjalniku poleg nasičene pare izločajo tudi različni plini (metan, amonijak, merkaptani). Le-ti onemogočajo kondenzacijo pri pogojih,

kot jih določa fazni diagram za nasičeno vodno paro, in je potrebno periodično izčrpavanje plinov iz naprave. Aktivnost mikrobiote v mulju je pri delovni temperaturi mulja okrog 30°C, veliki vlažnosti in mešanju, lahko zelo velika zaradi idealnih življenjskih razmer. Glede na stopnjo fermentacije je potrebno tudi sprotno prilagajanje pogostosti mešanja. Postopek sušenja je končan, ko je dosežena zelena stopnja suhosti, kjer se posušen mulj v obliki granul (dimenzije 0.3-0.7 mm) izprazni iz posode. Stopnjo suhosti se posredno določi na podlagi sprotne meritve količine odcedne vode, ki nateka iz kondenzatorja v zbiralno posodo. Postopek sušenja s predstavljenim konceptom traja glede na zahtevano suhost produkta; 24ur za gnojilo (40% vlage) ali 48 ur za gorivo (10% vlage).

4.2 Regulacija ogrevalne/hladilne vode

Energijska oziroma kalorična vrednost suhega mulja je malce višja kot je vložek energije za sušenje, zato je sušenje za potrebe goriva ekonomsko vprašljivo. Prilagoditev naprave na nizkotemperaturni režim pa omogoča sušenje z višji energije oziroma odpadno toploto/hladom. Kot nizkotemperaturni vir je bil uporabljen grelnik vode, ki je zagotavljal ogrevalno vodo s temperaturo okrog 40°C, meritve temperatur dovodne in povratne vode pa so bile izvedene na cevi tik pred vstopom in izstopom iz uparjalnega dela. Regulacija temperature je bila izvedena z mešalnim ventilom na dovodu in meritvijo temperature na povratnem vodu. V zaprt sistem ogrevanja so nameščeni še tlačni varnostni ventil, obtočna črpalka, odzračevalni ventil in raztezna posoda. Regulacijo ogrevanja izvaja dvopoložajni regulator z nastavljenimi minimalno histerezo in želeno temperaturo povratne vode 36°C. Hladilni krog prav tako potrebuje vir oz. regulacijo temperature nižjo od 20°C, ki zagotavlja konstantno kondenzacijo. Nihanje temperature v ogrevalnem krogu prikazano na sliki 3, je rezultat velike količine vode v sistemu pri relativno šibkem grelniku, in izgub na neizoliranih stenah uparjalnega dela. Izboljšava regulacije z zveznim regulatorjem bistveno ne vpliva na hitrost sušenja.



Slika 3: Regulacija povratne vode ogrevalnega kroga med postopkom sušenjem mulja.

4.3 Vzdrževanje kondenzacije

V primeru stabiliziranega mulja je sušenje v vakuumskem kontaktnem sušilniku relativno enostavno saj je dovolj, da se v ustrezni atmosferi mulj le občasno premeša. Pri tem je pomembno v kateri fazi se nahaja sušenje (stopnja suhosti mulja) saj se postopek mešanja za različne faze (pastozna, praškasta) razlikuje. Sušenje ne-stabiliziranega mulja pa redko poteka enako saj na dinamiko vpliva veliko različnih dejavnikov. Z eksperimenti so bili identificirane vplivne procesne veličine za kontroliran postopek sušenja ne-stabiliziranih muljev:

- ustrezna temperatura ogrevalnega in hladilnega medija,
- ustrezna temperatura mulja,
- ustrezno območje podtlaka,
- pravilen postopek mešanja mulja, glede na vrsto mulja in fazo sušenja,
- pravilen postopek odzračevanja, glede na vrsto mulja in fazo sušenja in
- varovanje vakuumske črpalke pred pregrevanjem.

Pridobljeno znanje sušenja ne-stabiliziranega mulja se je implementiralo v napredni sistem vodenja z možnostjo ročnega ali avtomatskega obratovanja. Sušenje se prične v ročnem režimu, dokler se ne vzpostavi delovna temperatura uparjalnika in kondenzatorja. Nadaljuje se z odzračevanjem in nižanjem tlaka, ter postopnim

dvigovanjem temperature mulja s segrevanjem v uparjalniku. Kondenzacija steče, ko se pojavi očitna razlika temperatur dovoda in odvoda hladilnega medija, ki je običajno velikosti nekaj stopinj. Sledi preklop v avtomatski način, kjer sistem vodenja na podlagi procesnih meritev vplivnih veličin in določenih pravil, vzdržuje maksimalno kondenzacijo. Uporabljene vhodne procesne zvezne veličine za algoritem vodenja:

- pogrešek podtlaka – eP_vac ,
- trend podtlaka – dP_vac ,
- stopnja kondenzacije – K_kond ,
- temperatura mulja – T_sludge ,
- količina odcedne vode – M_water in
- temperatura vakuumske črpalke – T_pump .

Izhodni veličini sta diskretni, in sicer trajanje vklopa/ izklopa vakuumske črpalke in mešala. Cikel mešanja in črpanja je izveden v obliki pulzno-širinske modulacije z variabilno frekvenco (VF PWM). Glede na postopek in fazo sušenja se spreminja perioda pulzno-širinske modulacije s spreminjanjem časa izklopa - t_{off} medtem, ko se čas vklopa - t_{on} ne spreminja (1).

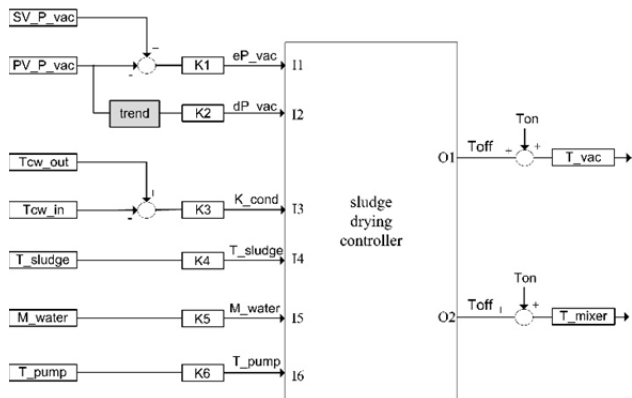
- perioda vakuumske črpalke – T_vac
- perioda mešala – T_mixer

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = t_{on} \cdot f_s \quad (1)$$

S spreminjanjem časa izklopa, torej nedelujočega stanja aktuatorjev, se regulira atmosfero med sušenjem. Omejitev predstavlja morebitna okvara črpalke ali mešala, kar onemogoči mešanje ali črpanje (vzdrževanje pogojev za kondenzacijo), zato se v tem primeru sušenje časovno podaljša.

Pri razvoju algoritma vodenja so razdelani medsebojni vplivi procesnih veličin, kot je zamrzovanje površine mulja zaradi efekta ohlajevanja med izhlapevanjem vlage, sprememba tlaka zaradi spremembe temperature mulja v zaprti posodi (plinska enačba), zagotavljanje homogenosti temperature mulja z mešanjem povzroča dodatno fermentacijo, prevelika količina toplogrednih plinov

onemogoča kondenzacijo, neustrezno mešanje povzroča tvorbo grud in onemogoča sušenje, itd. Predstavljen regulator za sušenje mulja ima več vhodov in izhodov (slika 4), nastavljene vrednosti pa so odvisne od vrste in stanja mulja (stopnja fermentacije, faza sušenja, itd).

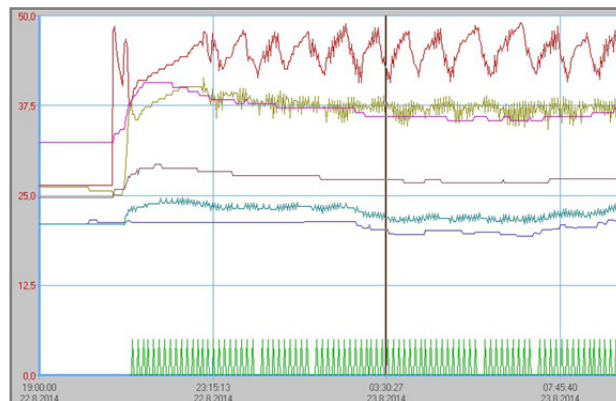


Slika 4: Shema regulatorja za sušenje mulja.

Regulator je sprogramiran v okolju za izvedbo z industrijskim krmilnikom, kjer je možno sušenje izvajati ročno ali avtomatsko. Regulator s spremljanjem več procesnih veličin hkrati in nastavljenimi pravili vzdržuje maksimalno kondenzacijo, če postopek in faza sušenja to omogoča. Slike 5, 6 in 7 kažejo primere procesa sušenja: stabiliziranega mulja, nekontroliranega ne-stabiliziranega mulja in kontroliranega ne-stabiliziranega mulja.

Sušenje stabiliziranega mulja se je izkazalo kot neproblematično in poteka brez posegov v atmosfero naprave. Kondenzacija na sliki 5 je vidna na podlagi razlike temperatur odvodne in dovodne hladne vode, in se prične pri ustrezni temperaturi mulja, podtlaku in temperaturi ogrevalne/ hladilne vode. Zunanja regulacija temperature vode v ogrevalnem krogu v tej fazi še ni zadovoljiva in se je kasneje z modifikacijo sistema izboljšala.

Na sliki 6 je vidno očitno kaotično delovanje, kar povzročajo fermentacijski plini, ki tlak nekontrolirano dvigujejo. Vakuumska črpalka ne zmore izčrpavati plinov in vzdrževati ustreznega podtlaka, kar je vidno iz razlike temperatur dovodne in odvodne hladne vode, kjer se opazijo minimalni časovni intervali kondenzacije.



Slika 5: Sušenje stabiliziranega mulja.

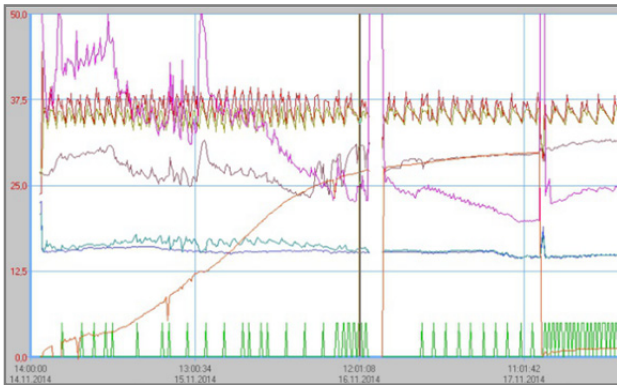
Legenda:

- rdeča: temp. vroče vode - dovod
- rumena: temp. vroče vode - odvod
- vijolična: tlak
- rjava: temperatura mulja
- svetlo modra: temp. hladne vode – odvod
- temno modra: temp. hladne vode – dovod
- zelena: mešanje
- oranžna (slika 7): teža odcedne vode



Slika 6: Nekontrolirano sušenje ne-stabiliziranega mulja.

Sistem vodenja z vgrajenim znanjem ter ustreznimi nastavitvami parametrov je omogočil kontrolirano sušenje ne-stabiliziranega mulja, navkljub sprotni fermentaciji. Z ustreznimi akcijami časovnih vklopov črpalke in mešala se je vzdrževala kondenzacija, kolikor je sistem (mulj) dopuščal. Na podlagi analize vstopnega mulja in meritve teže vode, ki se v procesu sušenja zbira v odcedni posodi, se je izvajalo določanje stopnje suhosti mulja, kar je pomembno za prekinitev postopka sušenja ob doseženi zahtevani suhosti.



Slika 7: Kontrolirano sušenje ne-stabiliziranega mulja.

5 Zaključek

Razvita tehnologija vakuumskega sušenja komunalnega mulja čistilnih naprav, skupaj z napravo in sistemom vodenja omogoča ekonomsko sušenje v lokalnih ali regijskih okoljih z viški ali viri odpadne energije v obliki toplote/ hladu. Nizkotemperaturni režim sušenja mulja temelji na podtlaku, v katerem se zaradi vlaga iz toplega mulja izloča v obliki pare pri nižji temperaturi, ter se s kondenzacijo zbira v ocedni posodi. Za potrebe sušenja biološko aktivnih muljev, ki so pri vakuumski kontaktni tehnologiji sušenja lahko problematični, se je razvilo ustrezen postopek vodenja. Sušenje traja med 24 in 48 ur, odvisno od zahtevane stopnje suhosti produkta, končni produkt v obliki granul pa se lahko glede na stopnjo vlage različno izrabi (agronomija, (so)proizvodnja toplote).

Smernice EU glede izrabe snovnih virov nakazujejo dolgoročno vzpostavitev sistema krožnega toka, kar pomeni, da se z vračanjem mulja v obliki gnojila na kmetijske površine vračajo pomembni biološki elementi (npr. fosfor). Obenem je možno nadzirati koncentracije različnih snovi, organskih, dušika, kalcija, itd. Razvit postopek vakuumskega

sušenja komunalnega mulja z avtomatskim delovanjem ponuja še eno dobro lastnost, ne povzroča smradu. Namreč vsi plini se med procesom sušenja kontrolirano odvajajo preko zračnega filtra v okolico.

Zahvala

Projekt je izveden v okviru sodelovanja s podjetjem Gorenje Surovina d.o.o., ki ga sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija (EU) iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Sredstva so pridobljena na javnem razpisu za spodbujanje raziskovalno razvojnih projektov na problemskih območjih z visoko brezposelnostjo v letih od 2013 do 2015 – RRPO 2013.

6 Literatura

- [1] Centralna čistilna naprava Ljubljana, spletna stran december 2014.
<http://www.vo-ka.si/o-druzbi/centralna-cistilna-naprava-ljubljana>
- [2] European Environment Agency and ISWA, Sludge Treatment and Disposal: Management Approaches and Experiences, Environmental Issues Series no. 7, 1997.
- [3] D. Fytili in A. Zabaniotou, Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods— A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp 116–140, 2008.
- [4] S.R. Carpenter in E.M. Bennett, Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. Environmental Research Letters, vol. 6, pp. 1–12, 2011.
- [5] D. Cordell *et al.*, The story of phosphorus: global food security and food for thought. Glob. Environ. Change, vol. 19, pp. 292–305, 2009.
- [6] Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, Final report, Part I-III, (<http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>).