

Presoja izvedbe mešanja v nevtralizacijskem reaktorju z vodilno cevjo

Andrej BOMBAČ, Jože LENARČIČ

Izvleček: V delu sta obravnavana snovanje in ekonomska presoja naprave za nevtralizacijo odpadne vode pri dveh izvedbah mešanja kapljevine v reaktorju z vodilno cevjo. Pri prvem načinu je za mešanje uporabljeno aksialno mešalo, medtem ko je pri drugem načinu mešanje izvedeno z vpihovanjem zraka v vodilno cev. Predstavljena sta postopek načrtovanja procesa in primerjava celotnih stroškov za predvideno življenjsko dobo naprave za obe izvedbi mešanja kapljevine. Nevtralizacijski reaktor z vpihovanjem zraka je že izveden in uspešno obratuje zadnjih nekaj let v sklopu nevtralizacije odpadne vode v živilskem proizvodnem obratu.

Ključne besede: mešanje, nevtralizacija, vodilna cev, stroški življenjskega cikla

■ 1 Uvod

Kvaliteta vode, ki jo človek uporablja in vrača v naravo, je izrednega pomena za življenje na Zemlji. Človeštvo si prizadeva razviti ekološko prijaznejše proizvodne tehnološke postopke, kljub temu pa se še vedno srečujemo s problematiko odpadnih voda. Priprava (tako pitne kot tehnološke) vode, njena uporaba in po uporabi ponovno čiščenje (odpadne) vode je proces nenehnega spreminjanja kvalitete vode, ki jo s svojo navzočnostjo povzroča človek. Če voda ni vrnjena v naravo takšne kvalitete, da jo narava sprejme brez škode, predstavlja zgornji proces motnjo v naravnem okolju. Tipični primeri takšnih kratkotrajnih motenj so pomori vodnega življenja v vodotokih, dolgotrajne motnje pa puščajo za seboj mrtve reke, jezera in onesnažena morja.

Doc. dr. Andrej Bombač, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Jože Lenarčič, dipl. inž., Hidrooprema, d. o. o., Vrhnika

V naravi potekajo procesi čiščenja odpadne vode, pri tem pa imajo vodotoki, jezera in morja, kakor zgoraj plast Zemljine površine, omejeno samočistilno sposobnost. Zaradi te omejenosti samoočiščenja narave je nujno vse presežne količine odpadnih voda kot tudi tiste, ki jih narava ne zmore razstrupiti, očistiti s pomočjo različnih čistilnih naprav. Glede na izvor onesnaženja ločimo komunalne in industrijske odpadne vode. Medtem ko za čiščenje komunalnih odpadnih voda običajno zadošča kombinacija biološkega in mehanskega postopka čiščenja, je postopek čiščenja industrijskih odpadnih voda prirejen glede na vrsto in stopnjo onesnaženosti.

Postopki čiščenja v čistilnih napravah odpadnih voda potekajo na osnovi različnih lastnosti neželenih primesi v vodi, kot so npr. biološke, fizikalne, kemične, snovne in druge [1]. Biološke čistilne naprave temeljijo na biološki razgradljivosti primesi, doseženi s pomočjo posebej vzgojenih mikrokultur. Pri mehanskih postopkih čiščenja, kot so filtracija, mikrofiltra-

cija in ultrafiltracija, poteka ločevanje delcev na osnovi velikosti delcev. Čiščenje z dializo in reverzno osmozo poteka na osnovi difuzijskih lastnosti snovi, ionsko čiščenje pa na vezavi ionov nečistoč. Pri destilacijskem in sublimacijskem čiščenju se izkorišča fazni prehod, pri ekstrakcijskem čiščenju pa topnost nečistoč. Flotacija poteka na osnovi različnih površinskih lastnosti snovi, ki omogočajo, da se na delce nečistoč prilepijo drobni mehurčki zraka, ki se dvigajo proti površju. Sedimentacijsko čiščenje in čiščenje s centrifugiranjem temelji na različni gostoti, nevtralizacija pa na različni elektrolitski disociaciji nečistoč.

Nevtralizacijska naprava je ena najpogostejše uporabljenih naprav za razstrupljanje industrijske odpadne vode [2], *pH*-vrednost odpadne vode pa je poleg količine in temperature najpogostejše merjeni in zapisovani podatek o onesnaževalcu. Kemijska nevtralizacija odpadne vode poteka na daljše časovno obdobje tudi v naravi, medtem ko se v nevtralizacijski napravi izvaja nadzorovano ob dozi-

ranju reagentov in intenzivneje zaradi prisilnega mešanja kapljevine [12]. To je v nevtralizacijski napravi lahko povzročeno z mehanskim mešalom ali z vpihavanjem zraka [3, 4, 5]. Glede na količino in dinamiko nastajanja odpadne vode so nevtralizacijske naprave lahko šaržnega ali pretočnega tipa.

V tem delu je obravnavano delovanje nevtralizacijskega pretočnega vitkega reaktorja, ki je zaradi specifičnih zahtev (ozek in visok prostor) opremljen z vodilno cevjo. Glede na izvedbo mešanja kapljevine sta na voljo dve varianti: pri prvi je mešanje izvedeno z aksialnim mešalom v vodilni cevi, pri drugi pa je mešanje povzročeno z vpihovanjem zraka v vodilno cev. V nadaljevanju sta prikazana princip nevtralizacije odpadne vode in snovanje reaktorja za obe omenjeni izvedbi pomešanja kapljevine. Podan je tudi kriterij za določitev celotnih stroškov delovanja reaktorja za pričakovano življenjsko dobo, s katerim so bili ocenjeni stroški in končna presoja izbire reaktorja.

Obravnava nevtralizacijskega reaktorja kot tudi celotne nevtralizacijske linije za razstrupljanje industrijske odpadne vode se nanaša na specifičen konkretni primer. Nevtralizacijska linija, pri kateri je mešanje kapljevine izvedeno z vpihovanjem zraka v vodilno cev, namreč obratuje v živilski proizvodnji v sklopu dvostopenjske nevtralizacije odpadne vode. Kljub učinkovitosti, preprosti izvedbi in manjših stroških kot pri sistemu z mešalom ter daljšem obdobju nastajanja tega dela ni zaslediti podobne izvedbe nevtralizacijskega reaktorja ne v praksi ne v literaturi.

■ 2 Nevtralizacija

Vrednost pH je poleg osnovnih fizioloških lastnosti odpadne vode eden od osnovnih pokazateljev stanja onesnaženosti. Nevtralizacija je proces uravnoteženja H^+ in OH^- ionov v vodi oziroma pH -vrednosti. Pred reakcijo je razmerje H^+/OH^- različno od 1, po nevtralizaciji pa je 1 in ima vrednost $pH = 7$.

Mera za stopnjo kislosti vodnih raztopin je vrednost pH (potentia hydro-

genii) in je določena z negativnim logaritmom koncentracije vodikovih ionov H^+ [mol/l]

$$pH = -\log(H^+) \quad (1)$$

Glede na vrednost pH ločimo:

- kisle raztopine ($H^+ > 10^{-7}$ $pH < 7$),
- nevtralne raztopine ($H^+ = 10^{-7}$ $pH = 7$) in
- bazične raztopine ($H^+ < 10^{-7}$ $pH > 7$).

Z antilogaritmiranjem en. (2.1) lahko izrazimo število ionov H^+ :

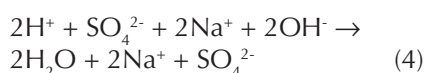
$$H^+ = 10^{-pH} \quad (2)$$

Podobno lahko stopnjo bazičnosti vodnih raztopin določimo z negativnim logaritmom koncentracije ionov OH^- , število ionov OH^- izrazimo iz:

$$OH^- = 10^{-(14+pH)} \quad (3)$$

Vsak presežek ionov H^+ , ki je večji od 10^{-7} eliminiramo z dodajanjem OH^- ionov, reakcija, ki poteka med H^+ ioni in OH^- , pa se imenuje nevtralizacija. Z nevtralizacijo se želimo približati točki, kjer je vrednost $pH = 7$ in je aktivnost ionov H^+ in OH^- enaka.

Najpogostejše se za nevtralizacijo kislosti odpadnih voda uporablja natrijev lug, za nevtralizacijo bazičnosti pa žveplovega kislina. Reakcijo zapišemo v obliki



pri tem pa dobimo sol reagentov in vodo.

Nevtralizacija se običajno izvaja v omejenem prostoru (bazen, posoda), opremljenem z mešalom, ki preprečuje nastajanje zastojnih con. S tem zagotovimo nevtralizacijo po celotnem volumnu kapljevine (odpadne vode), pri tem pa je velikost volumna nevtralizacijskega reaktorja odvisna od: (i) volumskega pretoka odpadne vode in (ii) časa poteka kemijske reakcije, na katero vpliva količina dodanih reagentov. Volumen kapljevine v nevtralizacijskem reaktorju izhaja iz masne bilance reagentov [2]:

$$\frac{\Delta r}{(r_1 - r_0)} = 1 - e^{-\frac{Q \cdot \Delta t}{V}} \quad (5)$$

Brezdimenzijska vrednost $\frac{\Delta r}{(r_1 - r_0)}$ popisuje razmerje največjega predpisane dovoljenega odklona (Δr) in magnitudo spremembe dotekajoče odpadne vode v reaktor ($r_1 - r_0$), kjer pomenita r_1 in r_0 trenutno in začetno vrednost. Pri tem je upoštevati, da je pretečeni čas Δt znotraj zahtevanega časa za potek spremembe razmerja $\Delta r / (r_1 - r_0)$, pri katerem doseže maksimum in se prične manjšati. Po viru [2] naj bo ta čas ocenjen kot vsota časov, ki ga tvorijo: (a) notranji čas zakasnitve reaktorja, (b) čas zakasnitve zaradi vztrajnosti merilne opreme, (c) čas zakasnitve zaradi vztrajnosti regulatorja, (d) čas transportiranja vzorca, (e) čas obdelave vzorca in (f) odzivni čas dozirnega ventila.

■ 3 Mešanje

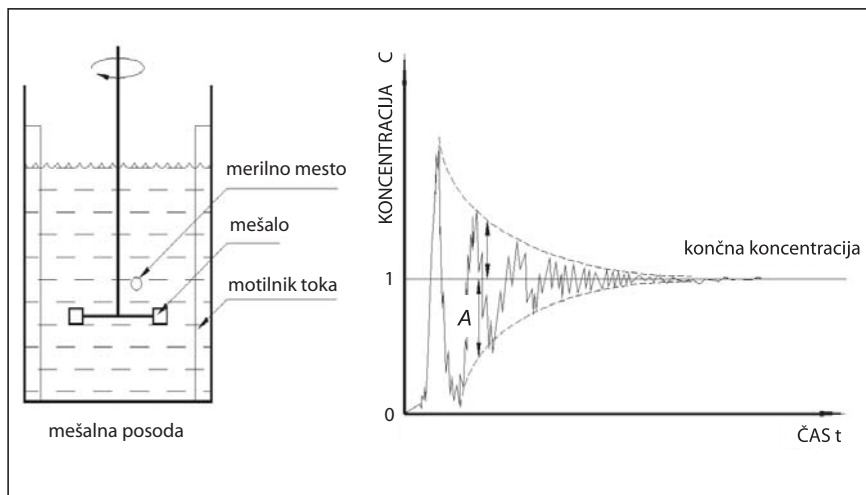
Mešalne naprave se najpogosteje uporabljajo pri različnih tehnoloških postopkih za pospeševanje prenosa snovi in toplote, ki bi sicer potekal počasneje ali pa bi brez mešanja celo zastal. Takšne tehnološke operacije so npr. dispergiranje plinov [11, 12, 13, 17], homogeniziranje emulzij in disperzij kakor tudi izvajanje kemičnih reakcij, kot so polimerizacija, nevtralizacija [2], itn.

3.1 Prisiljeno mešanje z mešalom

Pri nevtralizaciji moramo z mešanjem zagotoviti čim bolj homogeno porazdelitev dodanih kemikalij po volumnu odpadne vode. Kvaliteto mešanja, to je predpisano stopnjo pomešanja, pogojujeta intenzivnost oziroma moč pogona mešal (P) in čas pomešanja [7,8,9,12]. Pri tem je čas pomešanja (t) dosežen takrat, ko je vrednost amplitude koncentracije (A) manjša ali enaka predpisanemu odstopanju ($\pm 5\%$) končne vrednosti, kot je prikazano na sliki 1 in je izraženo z:

$$A = 2 \cdot e^{-K \cdot t} \quad (6)$$

Glede na različne izvedbe mešal in reološke lastnosti snovi so časi po-



Slika 1. Čas pomešanja

mešanja odvisni predvsem od moči mešanja (P). Dovedena energija za izvajanje mešanja se v glavnem porablja za premagovanje mehanskih izgub v mešalu, za premagovanje tekočinskega trenja ter premagovanja vztrajnostnih sil v kapljevini [10, 13].

3.1.1 Moč mešala

Moč mešala in čas pomešanja za določen mešalni proces odločilno vplivata na učinkovitost mešalnega sklopa ter s tem na stroške tega procesa. Moč mešala je pri napravah s standardno geometrijsko konfiguracijo lahko izražena z odvisnostjo brezdimenzijskih števil [12]:

$$f(Re, Fr) = 0 \quad (7)$$

Z Newtonovim številom je izražena moč mešanja:

$$Ne = \frac{P}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho} \quad (8)$$

Frouddovo število upošteva vpliv gravitacije na tokovno stanje:

$$Fr = \frac{n^2 \cdot d}{g} \quad (9)$$

Reynoldsovo število izraža vpliv viskoznih sil:

$$Re = \frac{n \cdot d^2}{\nu} \quad (10)$$

Pri $Re \geq 2 \times 10^4$ velja, da mešalo deluje v turbulentnem območju. Za mešalno posodo, ki je opremljena

z motilniki toka oziroma z vodilno cevjo, velja sledeč kriterij [5]:

$$\frac{n \left(\frac{d}{T} \right)^2}{K} = 1,5 \cdot Ne \quad (11)$$

3.2 Mešanje z vpihovanjem zraka

Črpanje kapljevine z vpihovanjem zraka v vodilno cev temelji na vzgonu plinaste faze – mehurčkov, ki potujejo proti gladini kapljevine in s svojim vlekom ustvarijo gibanje kapljevine v cevi [3, 5, 13, 18]. Pri ravnotežnem pogoju lahko za črpalno višino zapišemo sledečo enačbo [14]:

$$H = H_{sub} \left(\frac{\rho}{\rho_{mix}} - 1 \right) \quad (12)$$

Črpalna višina predstavlja tlačni potencial za premagovanje tlačnih izgub pri gibanju v vodilni cevi [15, 16], kar zapišemo kot:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \xi \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (13)$$

kjer je faktor izgub enak:

$$\xi = \frac{\lambda \cdot l}{D_c} \quad (14)$$

Koeficient trenja za gladke cevi je po Colebrookenu enak [16]:

$$\lambda = \frac{0,31}{(\lg(0,143 \cdot Re))^2} \quad (15)$$

Reynoldsovo število za okrogle cevi je enako:

$$Re = \frac{v \cdot D_c}{\nu} \quad (16)$$

Hitrost kapljevine v vodilni cevi je pogojena z minimalnim pretokom kapljevine za izvedbo nevtralizacije:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_c^2} \quad (17)$$

Zahtevana količina vpihanega zraka je določena glede na željeni pretok dvofazne mešanice skozi vodilno cev. Za optimalno obratovanje je priporočena količina vpihanega zraka med 8 in 9 vol% pretoka kapljevine. S povečevanjem deleža vpihanega zraka preko 10 % se pretok in izkoristek naglo zmanjšujeta [14], izkoristek (glede na porabljeno električno energijo za pogon kompresorja na eni strani ter opravljeno črpalno delo na drugi strani) pa je med 20 in 35 % [14].

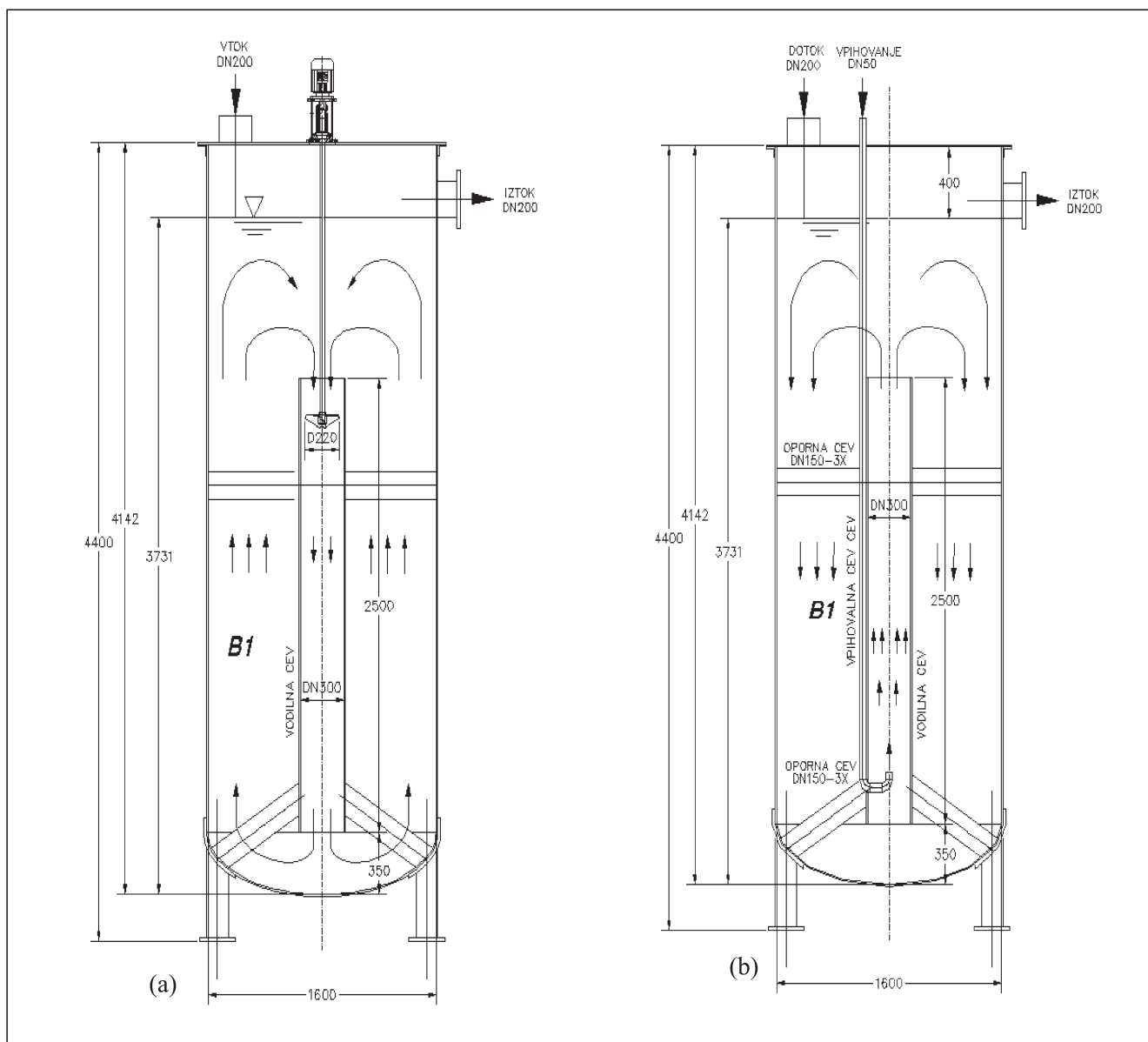
4 Snovanje nevtralizacijskega reaktorja

4.1 Posoda z vodilno cevjo

Za določitev velikosti volumna nevtralizacijskega reaktorja je izhodiščna vrednost pretok odpadne vode (25 m³/h), ki jo je treba očistiti. Ustrezna velikost volumna kapljevine po kriteriju [2] znaša 7,19 m³. Dimenzije reaktorja so prirejene glede na majhno razpoložljivo tlorisno površino prostora, kar narekuje vitko in visoko posodo premera 1,6 m, celotni volumen posode pa je 8,2 m³. Zaradi preprečitve nastanka zastojskih con je v posodo vgrajena vodilna cev premera 300 mm ter dolžine 2,5 m. Za to specialno izvedbo reaktorja z vodilno cevjo je lahko mešanje kapljevine izvedeno z mešalom, vgrajenim v vodilno cev, ali pa posredno z vnosom zraka v vodilno cev.

4.1.1 Mešanje z mešalom

Nevtralizacijski reaktor z vodilno cevjo je zasnovan tako, da aksialno mešalo potiska kapljevino po cevi navzdol proti dnu, kot je prikazano na sliki 2a.



Slika 2. Reaktor z vodilno cevjo in izvedba mešanja: (a) z aksialnim mešalom in (b) z vpihovanjem zraka

Pri mešanju v reaktorju z vodilno cevjo z aksialnim mešalom je uporabljeno mešalo proizvajalca ABS, Scaba – tip 3SHP1, s premerom 220 mm, ki je prikazano na *sliki 3*.

Izbrano aksialno mešalo s posebno obliko lopatic zagotavlja pri nazivnem režimu obratovanja dokaj homogeno hitrostno polje izstopajočega

toka iz mešala. Tako sta dosežena višji izkoristek dovedene energije mešalu in miren tek brez oscilacij, kar zagotavlja ustrezen namestitev v vodilni cevi (*slika 2a*).

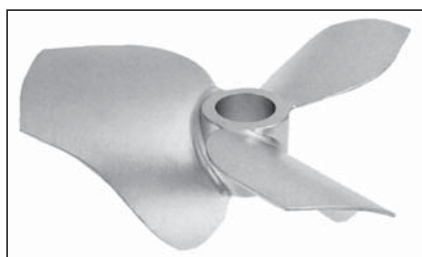
4.1.2 Mešanje z vpihovanjem zraka v vodilno cev

V vodilni cevi je pri nazivnem režimu obratovanja nevtralizacije vzpostavljen pretok, ki ima zanemarljivo majhne tlačne izgube v vodilni cevi. Tako se vložena energija vpihanega zraka v vodilno cev porablja za opravljanje mešanja v cevi in za cirkulacijo celotne kapljevine v reaktorju. Reaktorska posoda je enake oblike kot pri mešanju z aksialnim mešalom, le vodilna cev je oprem-

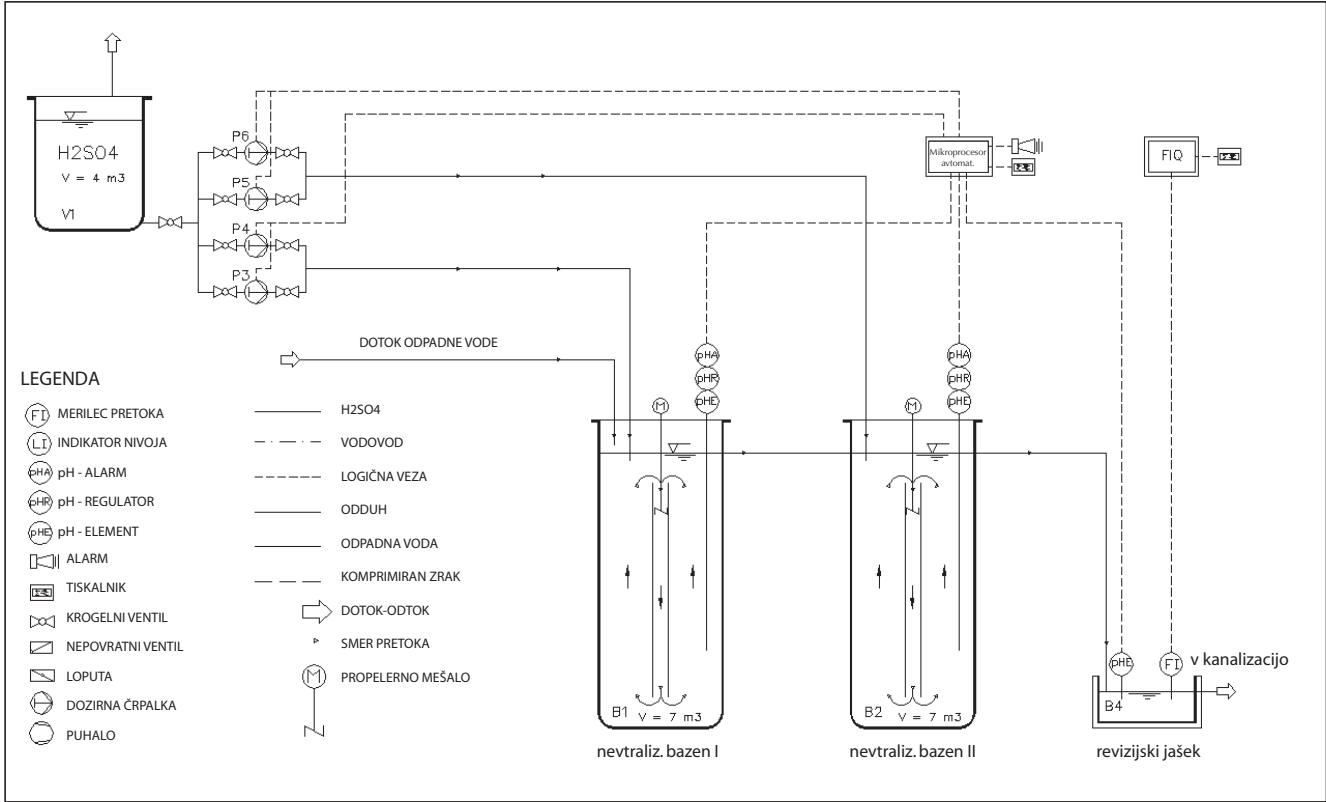
ljena z dovodom komprimiranega zraka. Smer cirkulacije kapljevine v posodi je sedaj obratna kot v prejšnjem primeru, kot je prikazano na *sliki 2b*.

4.2 Nevtralizacijska linija alkalnih odpadnih voda

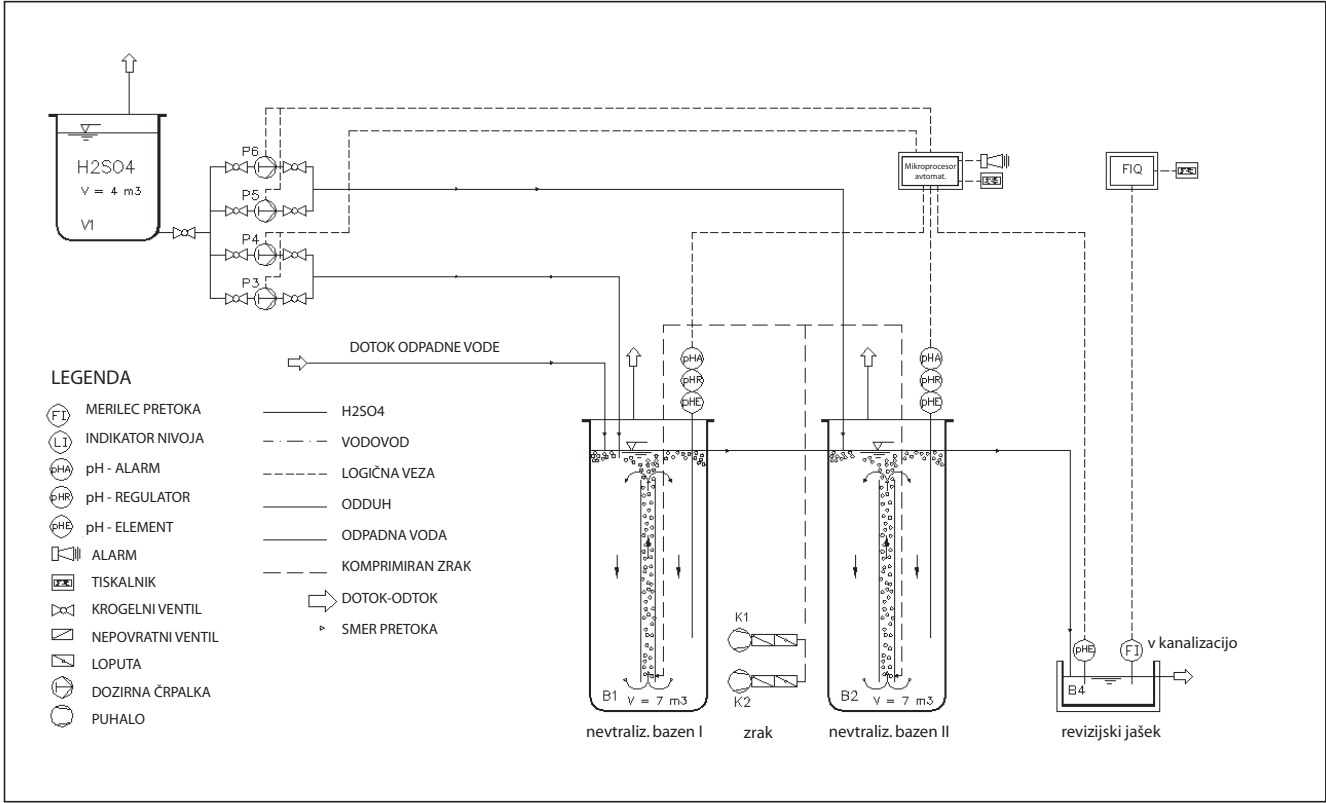
Nevtralizacijska linija za čiščenje alkalnih odpadnih voda je v osnovi sestavljena iz dveh zaporedno vezanih reaktorjev, povezovalnih cevodov, merilno-regulacijskih sklopov za doziranje kemikalij ter končnih merilno-kontrolnih elementov za doseganje zahtevane čistosti odpadne vode na izstopu. Medtem ko v prvem reaktorju poteka nevtralizacija, se v drugem izvaja proces umirjanja in



Slika 3. Aksialno mešalo 3SHP1



Slika 4. Shema nevtralizacijske linije v izvedbi Me z aksialnim mešalom



Slika 5. Shema nevtralizacijske linije v izvedbi Zr z vpihovanjem zraka

izenačevanja lastnosti odpadne vode, običajno brez dodajanja reagentov. Le v primeru, ko ni bila dosežena zahtevana čistost izstopajoče odpadne vode iz različnih razlogov

(alarmanтно stanje), pa služi drugi reaktor kot varnostni element z možnostjo izvajanja nevtralizacije. V nadaljevanju sta opisani dve izvedbi nevtralizacijske linije odpadnih voda.

Izvedba Me: Pri tej izvedbi je mešanje v obeh reaktorjih izvedeno z aksialnim mešalom. Nevtralizacijsko linijo tvorijo še dotočni, povezovalni in odtočni cevovod, dozirni sistem za H_2SO_4 –

sestavljen iz posode in črpalke z instalacijo, merilnik vrednosti pH, merilno-regulacijski sklop za nadzor doziranja reagenta ter merilnik pretoka, kot je shematsko prikazano na *sliki 4*.

Izvedba Zr: V obeh reaktorjih je umešanje dodanih reagentov v odpadno vodo izvedeno z vpihovanjem zraka v vodilno cev. Za dovod zraka poskrbi turbinsko puhalo z ustrezno instalacijo. Nevtralizacijsko linijo tvorijo še dotočni, povezovalni in odtočni cevovod, dozirni sistem za H_2SO_4 , sestavljen iz posode in črpalk z instalacijo, merilnik vrednosti pH, merilno-regulacijski sklop za nadzor doziranja reagenta ter merilnik pretoka na izstopu, kot je shematsko prikazano na *sliki 5*.

■ 5 Ekonomska upravičenost

Ne glede na tehnološko ali izvedbeno prednost ene ali druge variante nevtralizacije je nujno oceniti še stroške, ki pri tem nastanejo. Poleg začetnih stroškov investicije nastajajo pri delovanju nevtralizacijskega reaktorja še drugi stroški, kot npr. stroški za porabljen energijo, stroški vzdrževanja ter druge ekonomske kategorije. Za primerjavo celotnih stroškov nevtralizacije v pričakovani življenjski dobi je v tem delu uporabljen kriterij stroškov življenjskega cikla (ang.: Life Cycle Cost oz. LCC), ki je sicer bolj poznan kot kriterij za ocenjevanje izdelkov [6]. S kriterijem LCC so ocenjeni vsi stroški, ki so predvideni v življenjski dobi nevtralizacijske naprave. Celotni strošek življenjskega cikla je:

$$LCC = C_i + C_e \cdot n + C_v \cdot n + C_k + C_d \quad (18)$$

kjer pomenijo: C_i – investicijski stroški [€], C_e – strošek električne energije na leto [€/leto], C_v – strošek vzdrževanja na leto [€/leto], n – trajanje življenjskega cikla [leto], C_k – stroški servisiranja kapitala [€] in C_d – stroški demontaže in razgradnje [€].

■ 6 Analiza in primerjava obeh izvedb mešanja kapljevine

6.1 Nevtralizacijska linija

Razlika med izvedbami Me in Zr je razen v osnovi različnega načina me-

šanja kapljevine tudi v smeri cirkulacije kapljevine v reaktorju. Pri izvedbi Me poteka gibanje kapljevine v vodilni cevi navzdol, izstopajoči tok iz vodilne cevi zagotavlja čiščenje dna reaktorja in sprotno odnašanje usedlin proti iztoku.

Pri izvedbi Zr je kapljevina zaradi vzgona mehurčkov v vodilni cevi gnana navzgor; po izstopu iz vodilne cevi mehurčki zraka izstopajo na gladini, kapljevina pa se giblje koaksialno ob steni posode navzdol. Čiščenje dna je zagotovljeno z zaokroženim robom dna posode in ustreznim cirkulacijskim tokom, ki preprečuje usedanje primesi na dnu.

6.2 Primerjava stroškov

Primerjavo obeh nevtralizacijskih linij izvedemo tudi z vidika ekonomske upravičenosti.

6.2.1 Investicijski stroški

Izvedbo Me tvorijo sledeče komponente: nevtralizacijski reaktor z vodilno cevjo (5.000 €), jeklena konstrukcija (2.500 €), mešala s pogonom (7.500 €), povezovalni cevovodi za doziranje kemikalij (1.100 €), dozirna posoda za H_2SO_4 (1.250 €), dozirne črpalke z instalacijo (4.550 €), merilnik pH z mikroprocesorsko avtomatiko za doziranje reagenta (5.540 €) ter merilnik pretoka in končna kontrola pH (2.100 €). Cena investicije za izvedbo Me znaša 29.540 € in zajema dobavo, montažo in zagon opreme.

Izvedbo Zr tvorijo sledeče komponente: nevtralizacijski reaktor z vodilno cevjo (5.000 €), jeklena konstrukcija (2.500 €), puhalo za dovod zraka (4.500 €), dovodni kanal zraka (1.300 €), povezovalni cevovodi za doziranje kemikalij (1.100 €), dozirna posoda za H_2SO_4 (1.250 €), dozirne črpalke z instalacijo (4.550 €), merilnik pH z mikroprocesorsko avtomatiko za doziranje reagenta (5.540 €) ter merilnik pretoka in končna kontrola pH (2.100 €). Cena investicije za izvedbo Zr znaša 27.840 € in zajema dobavo, montažo in zagon opreme.

6.2.2 Stroški energije in vzdrževanja

Pri *izvedbi Me* so stroški za porabljen energijo in vzdrževanje v obdobju enega leta sledeči:

- stroški za porabljen električno energijo, ki zajemajo efektivno moč pogonskih elektromotorjev 1.322 €, in
- stroški vzdrževanja, ki zajemajo nabavo in menjavo potrošenega materiala na pH-merilnem sistemu (1.250 €), zamenjavo tesnil in ležajev v mešalih in njihovih pogonih (900 €), zamenjavo dozirnih črpalk (450 €) ter dodatna nepredvidena vzdrževalna dela (650 €).

Pri *izvedbi Zr* so stroški porabljene energije in vzdrževanja v obdobju enega leta sledeči:

- stroški za porabljen električno energijo, ki zajemajo efektivno moč pogonskih elektromotorjev 2.113 €, in
- stroški vzdrževanja, ki zajemajo nabavo in menjavo potrošenega materiala na pH-merilnem sistemu (1.250 €), zamenjavo tesnil in ležajev v turbinskem puhalu in njihovih pogonih (160 €), zamenjavo turbopuhala (450 €) in zamenjavo dozirnih črpalk (450 €) ter dodatna nepredvidena vzdrževalna dela (577 €).

6.2.3 Stroški kapitala

Pri izračunu stroškov kapitala je upoštevana razlika med investicijsko vrednostjo posamezne izvedbe nevtralizacijske linije in obrestovano vrednostjo za obdobje 20 let po obrestno-obrestnem računu in obrestni meri (8 %) in znaša za *izvedbo Me* 108.145 € in za *izvedbo Zr* 101.921 €.

6.2.4 Stroški demontaže in razgradnje

Po končani življenjski dobi se procesna linija demontira, posamezni sklopi pa ustrezno nevtralizirajo in deponirajo, kar predstavlja določen strošek (2.700 €).

6.2.5 Celotni stroški življenjskega cikla (LCC)

S kriterijem LCC so bili ocenjeni vsi stroški (enačba 18), ki nastanejo oz.

Tabela 1. Kategorizirani stroški za obe izvedbi nevtralizacijske linije v [€]

Ekonomska kategorija	Izvedba Me	Izvedba Zr	Primernejše
Investicijska vrednost	29.540	27.840	Zr
Stroški kapitala – 20 let	108.144	101.921	Zr
Stroški energije – letno	1.321	2.112 EUR	Me
Stroški energije – 20 let	26.437	42.252	Me
Stroški vzdrževanja – letno	3.250	2.437	Zr
Stroški vzdrževanja – 20 let	65.000	48.750	Zr
Stroški demontaže in razgradnje	2.700	2.700	Me,Zr
Stroški življenjskega cikla	231.822	223.463	Zr

so predvideni v 20-letni življenjski dobi nevtralizacijske naprave in znašajo za izvedbo Me 231.822 € in izvedbo Zr 223.463 €.

V tabeli 1 so podani stroški omenjenih kategorij za obe izvedbi nevtralizacijske linije.

Strošek investicije naprave je samo eden od znanih stroškov in običajno predstavlja vrednosti od 5 do 15 % celotnega stroška LCC. Iz prikazane ekonomske analize je prav tako razvidno, da sta izvedbi po posameznih kriterijih primerljivi po vseh navedenih kategorijah. Pri izvedbi Zr so stroški nižji pri investicijski vrednosti, razlog je predvsem v cenejši strojni opremljenosti, stroških kapitala in stroških vzdrževanja. Stroški energije pa gredo v korist izvedbe Me. Iz analize oz. primerjave obeh izvedb z vidika življenjskega cikla LCC, ki združuje vse našete primerjalne kriterije v enotno primerjalno vrednost, se покаžejo razlike v korist izvedbe Zr. Kljub vsemu pa te razlike niso tako velike in lahko obe izvedbi štejemo za enakovredni.

Izbira izvedbe z vpihovanjem zraka je v našem primeru upravičena predvsem zaradi pozitivnega vpliva vpihanega zraka na odpadno vodo. Prezračevanje odpadne vode je v naravi predpogoj za biološko samoočiščenje odpadne vode. Prezračevanje odpadne vode s pribitkom O_2 na izstopu iz nevtralizacije oziroma na vstopu v tovarniško kanalizacijo preprečuje razkrajanje odpadne vode v anaerobnem območju, predvsem tvorjenje nezaželenih produktov anaerobnih procesov v

kanalizaciji, kot so: kanalske obloge in bioplina. Ti so zaradi neprijetnega vonja v živilski industriji še posebno nezaželeni, poleg tega so tudi zdravstveno in eksplozijsko nevarni.

Vitke posode na splošno ne nudijo optimalnih pogojev za mešanje in s tem tudi ne za proces nevtralizacije. V konkretnem primeru je bila posoda opremljena z vodilno cevjo, kar močno poveča cirkulacijo kapljevine v posodi ter s tem homogenost porazdelitve dodanih kemikalij za potek nevtralizacije.

Naj poudarimo, da sta bila glavna razloga za izbiro vitkih reaktorjev oblika in velikost razpoložljivega prostora; to je bil edino kletni prostor z veliko medetažno višino in relativno majhno tlorisno površino. Če razpoložljivega prostora ne bi uspeli izrabiti, bi bili prisiljeni investirati v ustreznejši prostor, kar bi povečalo stroške iz naslova vloženega kapitala. Na osnovi tega je mnenje avtorjev, da bi se morali pri novogradnji nevtralizacijske linije praviloma izogibati vitkim posodam, zagotoviti ustrezen prostor optimalnih oblik in s tem tudi ustrezno obliko reaktorja za proces nevtralizacije, v katerem se lahko uporabi aksialno mešalo.

■ 7 Zaključki

V tem delu je obravnavano delovanje nevtralizacijskega pretočnega vitkega reaktorja, ki je zaradi specifičnih zahtev vgradnje v ozek in visok prostor opremljen z vodilno cevjo.

Za izvajanje nevtralizacije industrijske odpadne vode sta analizirana

dva načina pomešanja kapljevine dodanih reagentov: pri prvem načinu je mešanje povzročeno direktno z aksialnim mešalom v vodilni cevi, pri drugem pa posredno z vpihovanjem zraka v vodilno cev. S tehnološkega in izvedbenega vidika sta oba načina primerna.

Podan je tudi kriterij za določitev stroškov delovanja nevtralizacijskega reaktorja za pričakovano življenjsko dobo. S tega vidika sta obe izvedbi, tako z mešalom kot z vpihovanjem zraka, primerljivi in precej enakovredni.

Pri končni presoji je izbrana izvedba z vpihovanjem zraka predvsem zaradi pozitivnega vpliva vpihanega zraka na izstopajočo odpadno vodo. Prezračena voda s presežkom raztopljenega kisika v odpadni vodi namreč preprečuje nadaljnje razkrajanje in tvorbo neželenih produktov anaerobnih procesov (kanalske obloge, razni bioplina, itn.). Obravnava nevtralizacijskega reaktorja se nanaša na specifičen, a konkreten primer, izvedba mešanja z vpihovanjem zraka v vodilno cev namreč že nekaj let obratuje v živilski proizvodnji v sklopu dvostopenjske nevtralizacije odpadne vode. Kljub učinkovitosti, preprosti izvedbi in manjših stroških (kot pri izvedbi z mešalom) ter daljšem obdobju nastajanja tega dela ni zaslediti podobne izvedbe nevtralizacijskega reaktorja ne v praksi ne v literaturi.

Literatura

- [1] Appleyard, C. J.: Industrial wastewater management I&II. IHE, Delft, 1995.
- [2] More, L. R.: Neutralization of Waste Water by pH Control. Pittsburg, 1978.
- [3] Yusuf, C., Ulies, J. J. H.: Oxygen transfer and mixing in mechanically agitated airlift bioreactors. Biochemical Eng. Journal 10/1995, 143–153.
- [4] Lightnin Mixers Ltd brochure: E520/8, Poynton.
- [5] Chun-Chong Fu, Wen-Teng Wu, Shih-Yuan Lu: Performens of airlift bioreactors with net draft tube. Biochemical Eng. Journal 10/2003, 143–153.

- [6] A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems Hydraulic Institute, and the US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT), DOE/GO-102001-1190, December 2000.
- [7] Bombač, A., Žun, I.: Tlačne izgube in pomešanje v statičnem mešalu. Ventil 12/2006-6, 370–375.
- [8] Haucine, I., Plasardi, E., David, R.: Effects of the Stirred Tank's Design on Power Consumption and Mixing time in Liquid Phase. Chem. Eng. Technol. 23/2001/7, 605–613.
- [9] Khang, S. J., Levenspiel, O.: The mixing-rate number for agitator-stirred tanks. Chemical engineering. JVS, NY, 1976.
- [10] Nienow, A. W.: On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime. Chem. Eng. Science 52/1997, 2557–2565.
- [11] Lenarčič, J., Bombač, A.: Analiza stroškov delovanja nevtralizacijskega reaktorja z različnimi izvedbama mešanja. Zbornik povzetkov s posvetovanja. Maribor, FKKT, 2004, 144.
- [12] Bombač, A.: Vpliv geometrijskih parametrov na Newtonovo število pri aeraciji v posodi z mešali, Ljubljana, Stroj. v. 44/1998, 105–116.
- [13] Harnby, N., Edwards, M. F., Nienow, A. L.: Mixing in the process industries. London, Butterworths, 1985.
- [14] Cherkassky, V. M.: Pumps, Fans Compressors. Moscow, Mir Publishers, 1980.
- [15] Bombač, A.: Izbrana poglavja mehanike tekočin. Ljubljana, NTF, 2003.
- [16] Kraut, B.: Strojniški priročnik, Ljubljana, SV, 1981.
- [17] Bombač, A., Žun, I.: Individual impeller flooding in aerated vessel stirred by multiple-Rush-ton turbines. Chem. eng. j. 116/2006/2, 85–95.
- [18] Shaw, J. A.: The design of draft tube circulators. Proc. Austral. Inst. Min. Metall. 283/1982/9, 47–58.

Assessment of the Mixing Principle in a Draft-Tube Neutralisation Reactor

Abstract: We present the design and economic evaluation of a draft-tube reactor in waste-water neutralization using two different mixing principles. The first one is based on propeller mixing, while the second one is based on air-lift pumping in a draft tube. Both, the process design procedure and the life-cycle cost evaluation of an individual mixing principle are presented in this work. The air-lift neutralization reactor was manufactured and has been successfully operating for the past few years in the waste-water treatment of a food production plant.

Keywords: Mixing, Neutralisation, Draft-Tube Reactor, Life-Cycle Cost

Oznake:

D_c	premer cevi [m]
d	premer mešala [m]
g	zemeljski pospešek [m/s ²]
H_{sub}	višina kapljevine v posodi [m]
K	konstanta mešala [1/s]
l	dolžina [m]
n	vrtilna frekvenca mešala [1/s]
P	moč mešala [W]
Q	volumski pretok [m ³ /s]

r	volumsko razmerje pretokov reagenta in vstopne odpadne vode [1]
t	čas (pomešanja) [s]
T	premer mešalne posode [m]
V	volumen kapljevine v reaktorju [m ³]
v	hitrost [m/s]
ρ	gostota [kg/m ³]
ρ_{mix}	gostota mešanice zraka in vode [kg/m ³]
ν	kinematična viskoznost [m ² /s]
λ	koeficient trenja [1]
ζ	koeficient izgub [1]

nadaljevanje s strani 410

■ The 12th Scandinavian International Conference on Fluid Power SICFP '11 – Dvanajsta skandinavska konferenca o fluidni tehniki

18.–20. 05. 2011
Tampere, Finska

Organizatorja:

- IHA-Department of Intelligent Hydraulics and Automation, Tampere University of Technology

- Network of Fluid Power Centres in Europe

Tematika:

- mobilna hidravlika
- industrijska hidravlika
- vodna hidravlika
- robotika in daljinsko upravljanje
- pnevmatika itn.

Informacije:

- www.iha.tut.fi/sicfp11