

# Sklopljena numerična simulacija temperaturnega profila linearne pretočne komore med dovajanjem električnih pulzov

Peter Lombergar<sup>1</sup>, Samo Mahnič-Kalamiza<sup>1</sup>, Karel Flisar<sup>1</sup>, Damijan Miklavčič<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana  
E-pošta: peter.lombergar@fe.uni-lj.si

## Coupled simulations of the temperature profile in a parallel plate treatment chamber during Pulsed Electric Fields treatment

*The main goal of coupled simulations in Pulsed Electric Field (PEF) application is to study spatial and temporal temperature profile in treatment chamber during the PEF process, which is critical, since local increases in temperature can affect quality of end product, e.g. food.*

*In the study we present the use of a coupled time-dependent simulation to investigate the temperature profile in a parallel plate treatment chamber. Each pulse was simulated separately, which provided insight into temperature changes in fluid during the electrical pulse, and accurate analysis of the temperature profile.*

*Experiments were performed with 0.18 % NaCl solution, syringe pump, parallel plate treatment chamber, optical thermometer, and pulse generator, which was used to generate a train of electric pulses.*

*The model was validated by comparing the increase in temperature at the outlet of the treatment chamber in the model to data obtained in experiment. Effect of different maximum pulse voltages and different flow velocities on the increase in temperature at the outlet was simulated. The temperature profile inside the treatment chamber during application of the last electrical pulse in a pulse train was studied, where high local increases of temperature were observed.*

## 1 Uvod

Izpostavitev celic ali tkiva kratkim električnim pulzom z dovolj visoko amplitudo, da dosežemo povišanje prepustnosti celične membrane, imenujemo elektroporacija, oziroma na področju prehranske industrije, obdelava s pulzirajočim električnim poljem (angl. PEF – Pulsed Electric Field treatment) [1].

Pomembna lastnost elektroporacije je, da je univerzalna za vse vrste celic (evkarionti, bakterije, arheje) v vseh različnih konfiguracijah (celice pritrjene na površini, suspenziji, tkivu) [2]. Prav zaradi te univerzalnosti se danes elektroporacija uporablja na različnih področjih; v medicini [3], biotehnologiji [4], okoljevarstvu [5], [6] in prehranski industriji [7].

V prehranski industriji obdelava s PEF zajema ekstrakcijo sokov in ostalih pomembnih komponent iz rastlinskih tkiv in mikroorganizmov, dehidracijo tkiv in ne-toplotno konzervacijo tekoče hrane z inaktivacijo mikrobov [8]. Čeprav pri obdelavi hrane s PEF pride do

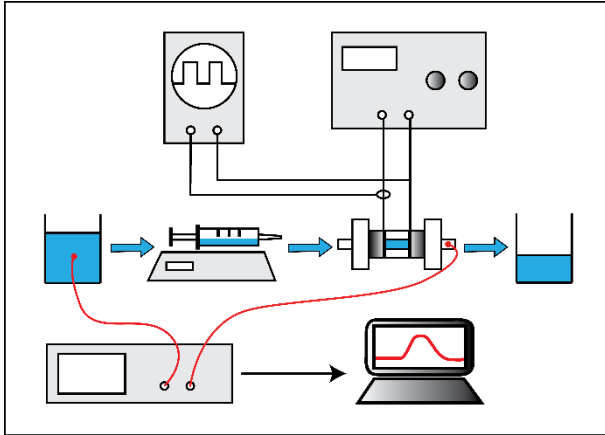
segrevanja zaradi ohmskega gretja, je temperatura procesa večinoma dovolj nizka, da lahko PEF štejemo med ne-toplotne metode obdelave hrane. Tako je veliko bolj privlačna za obdelavo hrane kot konvencionalne metode, saj so pri obdelavi hrane s PEF izgube teksture, vonja in okusa hrane zanemarljive [9].

PEF sistem za obdelavo hrane sestavljajo pulzni generator, pretočna komora, pretočni sistem in sistem za nadzorovanje temperature in električnih pulzov [10]. Pretočna komora predstavlja eno glavnih komponent PEF sistema, saj je v njej hrana izpostavljena električnim pulzom. Sestavljena je iz vsaj dveh elektrod in izolacijskega materiala v različnih geometrijskih konfiguracijah, ki privedejo do različnih razporeditev električnega polja v komori. Najbolj uporabljene oblike pretočnih komor so linearna, ko-linearna in koaksialna, pri čemer se linearna pretočna komora ponaša z najbolj homogenim električnim poljem v kanalu med obema elektrodama [7].

Numerične simulacije na področju obdelave hrane s PEF lahko v grobem ločimo v dve skupini, pri čemer se prva ukvarja s simulacijami električnega polja v različnih pretočnih komorah. Namen simulacij električnega polja je optimizacija parametrov geometrije pretočnih komor za izboljšanje homogenosti električnega polja znotraj pretočne komore. Druga skupina simulacij na področju PEF, ki je za naš prispevek bolj relevantna, pa se ukvarja s sklopljenimi simulacijami električnega polja, pretoka tekočine in segrevanja. Namen teh simulacij je boljše poznavanje temperaturnega profila pretočnih komor med PEF procesom, kar je kritično, saj lahko lokalni dvigi temperature znotraj pretočne komore (kot posledica nehomogenosti električnega polja ali pretoka tekočine) poslabšajo kvaliteto hrane [11]. Pregled literature kaže, da so bile do sedaj na področju sklopljenih simulacij uporabljene večinoma simulacije stacionarnega stanja, pri čemer pri simulaciji segrevanja tekočine zaradi dovajanja električnih pulzov niso bili simulirani posamezni električni pulzi, ampak je bila uporabljena konstantna maksimalna napetost pulzov pomnožena s ponavljalno frekvenco ( $f$ ) in dolžino pulzov ( $\tau$ ) [12]–[14].

Namen tega prispevka je predstaviti uporabo sklopljene časovno odvisne simulacije v COMSOLu za analizo temperaturnega profila pretočne komore. Vsak pulz je simuliran posebej, kar omogoča vpogled v dogajanje v pretočni komori med samim električnim pulzom in tako bolj točno analizo temperaturnega profila. Rezultate simulacij smo primerjali z izmerjeno temperaturo s toplotnim senzorjem na izhodu (v iztoku) linearne pretočne komore.

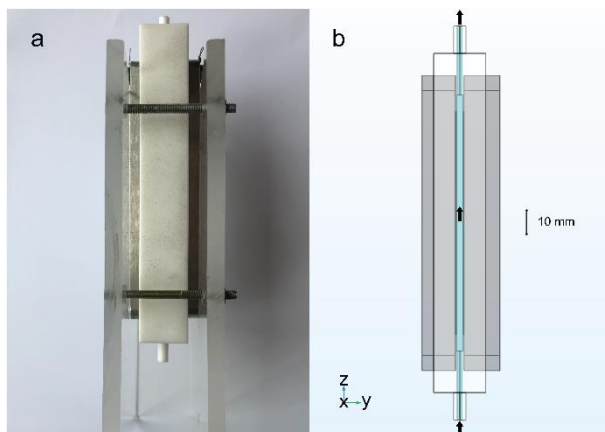
## 2 Materiali in metode



Slika 1. Shema eksperimentalne postavitve. Zgoraj levo osciloskop, desno pulzni generator. Na sredini od leve proti desni: 0,18 % raztopina NaCl, injekcijska črpalka, pretočna komora, zbiralnik tekočine. Spodaj levo optični termometer s temperaturnimi senzorji in desno računalnik za zajem signalov.

Za poskuse je bila izbrana 0,18 % raztopina NaCl, saj je njena električna prevodnost približno enaka električni prevodnosti sadnih sokov, zlasti svežega pomarančnega soka. Koncentracijo 0,18 % raztopine NaCl smo pridobili z mešanjem fiziološke raztopine (0,9 %) in destilirane vode v razmerju 1:4. Raztopina NaCl je bila z injekcijsko črpalko preko silikonskih cevk črana v pretočno komoro. Pravokotni unipolarni električni pulzi so bili dovedeni s pulznim generatorjem razvitem v Laboratoriju za Biokibernetiko [15]. Električni tok in napetost sta bila posneta v sekvenčnem načinu z osciloskopom z diferencialno visokonapetostno in tokovno sondo. Temperatura na izhodu pretočne komore je bila zajeta s pomočjo optičnega termometra, meritve pa nadalje obdelane z računalnikom. Temperatura 0,18 % raztopine NaCl in sobna temperatura, sta bili prav tako vseskozi beleženi.

Shemo eksperimentalne postavitve lahko vidimo na sliki 1.

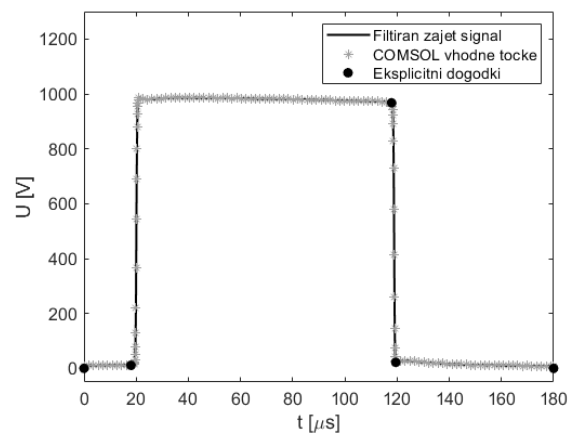


Slika 2. Fotografija linearne pretočne komore (a). Model linearne pretočne komore v COMSOLu (b).

Za poskuse smo uporabili linearno pretočno komoro (slika 2) [16], sestavljeno iz teflonskega nosilca in dveh elektrod iz nerjavnega jekla. Razdalja med elektrodami je bila 3,4 mm, površina ene elektrode 288 mm<sup>2</sup>, prostornina komore  $v = 0,826$  ml.

Za primerjavo meritev in simulacije smo uporabili vlak desetih pulzov z maksimalno amplitudo pulza  $U = 1000$  V, širino pulza  $\tau = 100$   $\mu$ s in ponavljalno frekvenco  $f = 1$  Hz pri volumskem pretoku skozi komoro  $F = 10$  ml min<sup>-1</sup>. Filtrirano obliko dovedenih električnih pulzov lahko vidimo na sliki 3.

### 2.1 Numerično modeliranje



Slika 3. Unipolarni pravokotni električni pulz uporabljen v eksperimentu in za simulacije. Na filtriranem signalu pulza so označene točke uporabljene za model pulza v COMSOLU s posebej označenimi točkami, uporabljenimi kot eksplicitni dogodki v COMSOLU (angl. »Explicit events«).

Za numerično modeliranje segrevanja tekočine znotraj pretočne komore med dovajanjem električnih pulzov smo uporabili COMSOL Multiphysics (COMSOL AB, Sweden).

Pretočno komoro smo dobro premerili in v COMSOLu postavili natančen model komore v treh dimenzijah (3D), slika 2 a. Materiale za model smo izbrali iz obsežne COMSOL baze materialov tako, da so bile njihove fizikalne lastnosti čim bolj podobne lastnostim dejanskih materialov uporabljenih v poskusih.

V primeru 0,18 % raztopine NaCl je bila temperaturna odvisnost električne prevodnosti izračunana po modelu opisanem v [17], za opis ostalih fizikalnih lastnosti pa je bil uporabljen model vode v COMSOLu.

Za modeliranje pretoka tekočine skozi linearno pretočno komoro smo zaradi nizkih povprečnih hitrosti tekočine uporabili model za laminaren tok (»Laminar Flow Interface«).

Za modeliranje električnih pulzov smo vlak pulzov uporabljen v poskusu najprej filtrirali, in nato decimirali v MATLABu (Mathworks, USA), ter točke pulza vnesli v COMSOL kot interpolacijsko funkcijo (slika 3), ki smo jo uporabili v analitični funkciji s periodičnim

ponavljanjem s periodo pulzov uporabljenih v poskusu  $t_p = \frac{1}{f}$ .

Za začetno temperaturo modela in začetno temperaturo tekočine na vходу v pretočno komoro smo izbrali izmerjeno temperaturo v iztoku komore tik pred začetkom dovedenega vlaka električnih pulzov. Zaradi majhnih razlik med temperaturo segrete pretočne komore med dovajanjem električnih pulzov in temperaturo zraka v sobi ( $\sim 1-2$  °C) in kratkim trajanjem poskusa in simulacije ( $\sim 10$  s), je bilo v modelu odvajanje toplote iz površine pretočne komore kot posledica naravne konvekcije zanemarljivo.

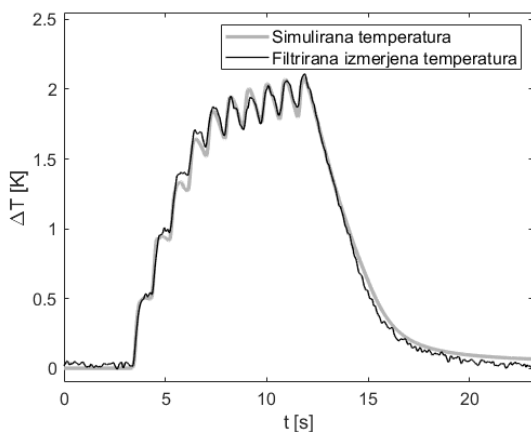
Da smo lahko s COMSOLom natančno simulirali vsak pulz, smo uporabili »Events interface«, v katerega smo vnesli eksplicitne dogodke. Eksplicitni dogodki prisilijo COMSOL, da zmanjša časovne korake okoli podane točke v času, ter tako ne spregleda hitrih sprememb napetosti. Za natančno sledenje napetosti uporabljenih električnih pulzov smo vnesli pet eksplicitnih dogodkov (slika 3) s periodo dogodka  $t_p = \frac{1}{f}$ .

### 3. Rezultati in razprava

Da bi preverili ustreznost opisanega modela linearne pretočne komore smo simulirali spremembo temperature na izhodu komore med dovajanjem unipolarnih pravokotnih električnih pulzov in jo primerjali s spremembo temperature izmerjeno med poskusom (slika 4).

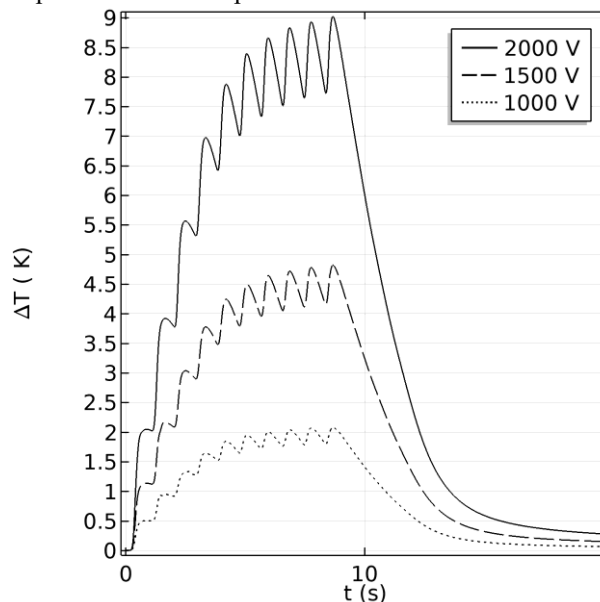
Spremembo temperature smo izračunali tako, da smo od meritve in simulacije temperature tekočine odšteli temperaturo tekočine, izmerjeno tik pred dovajanjem električnih pulzov. Temperatura v modelu je bila izrisana v točki, izbrani na podlagi ocene pozicije temperaturnega senzorja v odtočnem kanalu med samim poskusom.

Na sliki 4 lahko vidimo, da se časovna dinamika temperature določene v modelu, zelo dobro ujema s spremembo temperature izmerjene v poskusu. Prav tako lahko v poteku obeh temperatur opazimo nihanje, ki sovпада s številom in frekvenco dovedenih električnih pulzov.

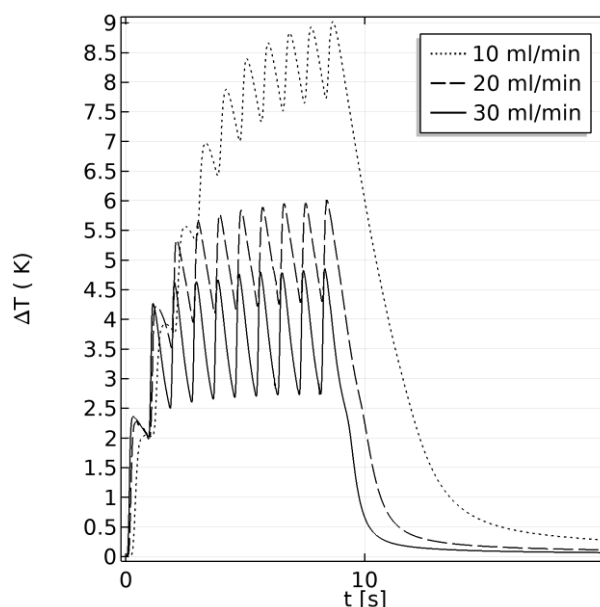


Slika 4. Primerjava spremembe simulirane temperature v iztoku linearne pretočne komore s spremembo filtrirane izmerjene temperature med dovajanjem električnih pulzov.

Z numeričnim modelom linearne pretočne komore lahko simuliramo temperaturne profile pri različnih parametrih, kot sta napetost in pretok, ki so bili zaradi omejitev eksperimentalne opreme težko izvedljivi. Na sliki 5 je prikazana sprememba temperature v iztoku komore pri različnih maksimalnih napetostih električnih pulzov in fiksnem pretoku, slika 6 pa podaja rezultate simulacij za različne pretoke pri fiksni maksimalni napetosti električnih pulzov.



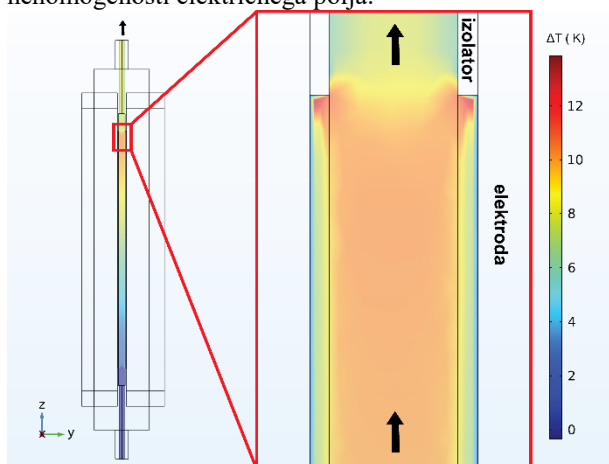
Slika 5. Simulirana temperatura v iztoku linearne pretočne komore pri različnih maksimalnih napetostih električnih pulzov pri pretoku  $F = 10 \text{ ml min}^{-1}$ .



Slika 6. Simulirana temperatura v iztoku linearne pretočne komore pri različnih pretokih tekočine, pri maksimalni napetosti električnih pulzov  $U = 2000 \text{ V}$ .

Napetosti na sliki 5 so bile dobljene z množenjem analitične funkcije, uporabljene za opis realnih pulzov dovedenih med poskusom s faktorjem 1,5 ( $U = 1500 \text{ V}$ ), oziroma 2 ( $U = 2000 \text{ V}$ ).

Glavna prednosti numerične simulacije je, da nam omogoča določiti temperaturni profil katerega koli dela pretočne komore v vsakem trenutku simulacije. Na sliki 7 lahko vidimo simulirani temperaturni profil tekočine v linearni pretočni komori takoj po koncu zadnjega izmed desetih dovedenih električnih pulzov. Na sliki lahko opazimo močno segrevanje tekočine v bližini stika med elektrodo, tekočino in izolatorjem, ki je posledica nehomogenosti električnega polja.



Slika 7. Temperaturni profil tekočine v linearni pretočni komori. Maksimalna napetost električnega pulza je  $2000\text{ V}$  in pretok  $F = 10\text{ ml min}^{-1}$ .

Če primerjamo spremembo temperature v iztoku linearne pretočne komore (slika 5;  $U = 2000\text{ V}$ ) s temperaturnim profilom v celotni pretočni komori (slika 7), lahko opazimo, da je sprememba temperature tekočine na posameznih območjih v komori veliko večja od spremembe temperature v iztoku, kjer jo lahko merimo eksperimentalno.

#### 4. Zaključek

V prispevku smo opisali sklopljene numerične simulacije v COMSOLU za namen analize temperaturnega profila linearne pretočne komore med dovajanjem električnih pulzov. Točnost modela smo ovrednotili s poskusom in dosegli dobro ujemanje med spremembo temperature v iztoku pretočne komore v simulaciji in v poskusu.

V prihodnosti bi bilo smiselno preizkusiti in ovrednotiti simulacije še za različne protokole električnih pulzov. Nadvse pomembna bi bila simulacija večjega števila pulzov, ki bi omogočala vpogled v temperaturni profil pretočne komore med kontinuiranim delovanjem, kar je za obdelavo hrane s PEF ključno. Numerični model bi bilo mogoče razširiti tudi na različne pretočne komore in uporabiti kot komplement k poskusom, ali kot orodje za optimizacijo procesa obdelave hrane.

#### Literatura

[1] T. Kotnik, L. Rems, M. Tarek, and D. Miklavčič, "Membrane Electroporation and

Electropermeabilization: Mechanisms and Models," *Annu. Rev. Biophys.*, 48, 1, 63–91, 2019

[2] L. Rems and D. Miklavčič, "Tutorial: Electroporation of cells in complex materials and tissue," *J. Appl. Phys.*, 119, 20, 201101, 2016

[3] M. L. Yarmush, A. Golberg, G. Serša, T. Kotnik, and D. Miklavčič, "Electroporation-Based Technologies for Medicine: Principles, Applications, and Challenges," *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 16, 1, 295–320, 2014

[4] T. Kotnik, W. Frey, M. Sack, S. Haberl Meglič, M. Peterka, and D. Miklavčič, "Electroporation-based applications in biotechnology," *Trends Biotechnol.*, 33, 8, 480–488, 2015

[5] G. A. Ballash *et al.*, "Pulsed electric field application reduces carbapenem- and colistin-resistant microbiota and blaKPC spread in urban wastewater," *J. Environ. Manage.*, 265, 110529, 2020

[6] A. Golberg *et al.*, "Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development," *Biotechnol. Biofuels*, 9, 1, 94, 2016

[7] S. Toepfl, C. Siemer, G. Saldaña-Navarro, and V. Heinz, "Overview of Pulsed Electric Fields Processing for Food," in *Emerging Technologies for Food Processing*, Elsevier, 2014, 93–114.

[8] S. Mahnič-Kalamiza, E. Vorobiev, and D. Miklavčič, "Electroporation in Food Processing and Biorefinery," *J. Membr. Biol.*, 247, 12, 1279–1304, 2014

[9] P. Mañas and R. Pagán, "Microbial inactivation by new technologies of food preservation," *J. Appl. Microbiol.*, 98, 6, 1387–1399, 2005

[10] S. Min, G. A. Evrendilek, and H. Q. Zhang, "Pulsed Electric Fields: Processing System, Microbial and Enzyme Inhibition, and Shelf Life Extension of Foods," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 35, 1, 59–73, 2007

[11] D. Gerlach, N. Alleborn, A. Baars, A. Delgado, J. Moritz, and D. Knorr, "Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: A review," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 9, 4, 408–417, 2008

[12] A. Fiala, P. C. Wouters, E. van den Bosch, and Y. L. M. Creyghton, "Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2, 4, 229–238, 2001

[13] M. Lindgren, K. Aronsson, S. Galt, and T. Ohlsson, "Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 3, 3, 233–245, 2002

[14] K. Huang, L. Yu, L. Gai, and J. Wang, "Coupled Simulations in Colinear and Coaxial Continuous Pulsed Electric Field Treatment Chambers," *Trans. ASABE*, 1473–1484, 2013

[15] K. FLISAR, „VISOKOENERGIJSKA NAPRAVA ZA REVERZIBILNO IN IREVERZIBILNO ELEKTROPORACIJO CELIČNE MEMBRANE“. 2017.

[16] G. Pataro, G. Ferrentino, C. Ricciardi, and G. Ferrari, "Pulsed electric fields assisted microbial inactivation of *S. cerevisiae* cells by high pressure carbon dioxide," *J. Supercrit. Fluids*, 54, 1, 120–128, 2010

[17] R. B. McCleskey, "Electrical Conductivity of Electrolytes Found In Natural Waters from (5 to 90) °C," *J. Chem. Eng. Data*, 56, 2, 317–327, 2011