



**Univerza v Mariboru**

*Fakulteta za kemijo in  
kemijsko tehnologijo*

Gregor Kravanja

# **Toplotne izgube zaradi odlaganja vodnega kamna na grelnih gospodinjskih aparatov**

Diplomsko delo

Maribor, september 2012



**Univerza v Mariboru**

*Fakulteta za kemijo in  
kemijsko tehnologijo*

# **Toplotne izgube zaradi odlaganja vodnega kamna na grelcih gospodinjskih aparatov**

Diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa

Študent: Gregor Kravanja  
Študijski program: univerzitetni študijski program I. stopnje Kemijska tehnologija  
Predvideni strokovni naslov: diplomirani inženir kemijske tehnologije (UN)  
Mentor: izr. prof. dr. Darko Goričanec  
Komentor: dr. Danijela Doberšek

Maribor, september 2012



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo in  
kemijsko tehnologijo

Številka: K1000737

Datum: 28.02.2012

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 6/2012)

izdajam

### SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

**Gregor Kravanja**, študent-ka univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje Kemijska tehnologija, lahko izdela diplomsko delo pri predmetu Prenos toplote.

Mentor-ica:izr. prof. dr. Darko Goričanec

Somentor-ica: dr. Danijela Doberšek

#### Naslov diplomskega dela:

TOPLOTNE IZGUBE ZARADI ODLAGANJA VODNEGA KAMNA NA GRELCIH GOSPODINJSKIH NAPRAV

#### Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

HEAT LOSSES DUE TO WATER SCALE DEPOSITS ON HEATERS OF HOUSEHOLD APPLIANCES

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 30.09.2012 v referatu za študentske zadeve Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

#### Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



DEKAN:

red. prof. dr. Željko Knez

po pooblastilu dekana  
prodekan  
izr. prof. dr. Peter Krajnc

## IZJAVA

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal sam, prispevki drugih so posebej označeni. Pregledal sem literaturo s področja diplomskega dela po naslednjih geslih:

<b>Vir:</b> Web of Knowledge ( <a href="http://apps.isiknowledge.com">apps.isiknowledge.com</a> )	
<b>Gesla:</b> vodni kamen, Mg-elektroda, magnetna obdelava vode	<b>27</b>

<b>Vir:</b> COBIB-COBISS ( <a href="http://www.cobiss.si/scripts/cobiss?ukaz=getid">http://www.cobiss.si/scripts/cobiss?ukaz=getid</a> )	
<b>Gesla:</b> vodni kamen, Mg-elektroda, magnetna obdelava vode	<b>4</b>

**Skupno število pregledanih člankov: 19**

**Skupno število pregledanih knjig: 3**

Maribor, september 2012

Gregor Kravanja

## Zahvala

Zahvaljujem se mentorju izr. prof dr. Darku Goričancu, komentorici dr. Danijeli Doberšek za strokovno pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela.

Hvala tudi vsem ostalim, ki ste mi vsa ta leta stali ob strani in me podpirali.

# Toplotne izgube zaradi odlaganja vodnega kamna na grelcih gospodinjskih aparatov

## Povzetek

V diplomskem delu je predstavljena učinkovitost magnetne obdelave vode (MOV) na zmanjšanje izločanja vodnega kamna. Preučevali smo vpliv različnih hitrosti pretoka vode skozi magnetno napravo za preprečitev nastajanja vodnega kamna na grelcih bojlerjev. Prav tako smo izvedli eksperimente z in brez Mg-elektrode pri različnih pretokih. Rezultati nakazujejo, da pri eksperimentih z Mg - elektrodo in napravo z MOV ni bistvenega učinka magnetne obdelave na zmanjšanje količine izločenega vodnega kamna. Pri eksperimentih brez Mg-elektrode in vključeno napravo za MOV pa se učinek magnetne naprave povečuje s povečanim pretokom vode. Predvidevamo, da se z dodatkom Mg - elektrode vpliv MOV izrazito zmanjša.

**Ključne besede:** vodni kamen, kalcijev karbonat, magnetna obdelava vode (MOV), Mg-elektroda, dinamičen fluidni sistem

**UDK:** 536.2:683.97(043.2)

# Heat Losses due to Water Scale Deposits on Heaters of Household Appliances

## Abstract

The diploma work presents the efficiency of magnetic water treatment (MWT) for scale control. The influence of different flow rate through magnetic device in order to prevent water scale precipitation on heaters was analysed. Also experiments with and without a Mg-electrode and included MWT in different flow rate were carried out. The results show that a Mg-electrode has no significant effect on scale elimination. Experiments without a Mg-electrode show increased efficiency of magnetic water treatment with increased flow rate. We assume that the presence of the Mg- electrode reduces efficiency of the magnetic device.

**Key words:** scale, calcium carbonate, magnetic water treatment (MWT), Mg-electrode, dynamic flow

**UDK:** 536.2:683.97(043.2)

## Kazalo

1	Uvod.....	1
2	Teoretične osnove.....	2
2.1	Kemijske značilnosti naravnih voda v Sloveniji.....	2
2.1.1	Trdota vode.....	4
2.2	Nastanek vodnega kamna.....	6
2.2.1	Karbonatno ravnotežje.....	6
2.3	Morfologija vodnega kamna.....	11
2.3.1	Kalcijev karbonat.....	11
3	Metode za preprečevanje izločanja vodnega kamna.....	14
3.1	Uporabne kemijske metode.....	14
3.2	Fizikalne metode.....	16
3.2.1	Nameščanje filtrov.....	16
3.2.2	Reverzna osmoza.....	17
3.2.3	Ultrazvočna metoda.....	17
3.2.4	Magnetna obdelava vode (MOV).....	18
4	Izvedba eksperimentalne proge in meritev.....	26
4.1	Analiza vode uporabljene v eksperimentih.....	26
4.2	Eksperimentalna proga.....	27
4.2.1	Elementi in naprave testne proge.....	29
4.3	Izračun in meritve značilnih parametrov.....	32
4.3.1	Prvi eksperiment - brez obtoka pri hitrosti 0,11 m/s.....	33
4.3.2	Drugi. eksperiment - pri hitrosti $v = 1,25$ m/s.....	34
4.3.3	Tretji. eksperiment: pri hitrosti $v = 2,5$ m/s.....	34
4.3.4	Četrti eksperiment.....	35
4.3.5	Peti eksperiment.....	35
5	Rezultati in diskusija.....	36
5.1	Prvi eksperiment - $v = 0,11$ m/s.....	36
5.2	Drugi eksperiment - $v = 1,25$ m/s.....	38
5.3	Tretji eksperiment - $v = 2,5$ m/s.....	40
5.4	Četrti eksperiment $v = 0,11$ m/s, brez Mg – elektrode.....	42
5.5	Peti eksperiment - $v = 1,25$ m/s, brez Mg-elektrode.....	44
6	Zaključek.....	47
7	Literatura.....	48
8	Življenjepis.....	50



## Seznam preglednic

Preglednica 2.1: Topnostni produkti nekaterih soli pri 25 °C <sup>5</sup> .....	3
Preglednica 2.2: Kalcijeve in magnezijeve soli v vodi <sup>2</sup> .....	4
Preglednica 2.3: Pretvorniki trdote vode <sup>1</sup> .....	5
Preglednica 2.4: Nemška lestvica trdote vode: .....	5
Preglednica 4.1: Analiza vode .....	26
Preglednica 5.1: Odvisnost temperature in pretoka med prvim eksperimentom .....	36
Preglednica 5.2: Odvisnost temperature in pretoka med drugim eksperimentom .....	38
Preglednica 5.3: Odvisnost temperature in pretoka med tretjim eksperimentom: .....	40
Preglednica 5.4: Odvisnost temperature in pretoka med četrtim eksperimentom: .....	42
Preglednica 5.5: Odvisnost temperature in pretoka med petim eksperimentom: .....	44

## Seznam slik

Slika 2.1: Kemijsko stanje vodnih teles podzemne vode <sup>22</sup> .....	2
Slika 2.2: Shema reakcij karbonatnega ravnotežja <sup>5</sup> .....	6
Slika 2.3: Topnost CaCO <sub>3</sub> v idealni raztopini kot funkcija pH pri določeni temperaturi. <sup>10</sup> .....	10
Slika 2.4: Topnost različnih kristalnih oblik kalcijevega karbonata <sup>5</sup> .....	11
Slika 2.5: Kalcit in njegova osnovna celica <sup>7</sup> .....	12
Slika 2.6: Aragonit in njegova osnovna celica <sup>8</sup> .....	13
Slika 2.7: Vaterit in njegova osnovna celica <sup>21</sup> .....	13
Slika 3.1: Kombinirani magnetni mehčalec z mehanskim filtrom .....	16
Slika 3.2: Delovanje reverzne osmoze <sup>31</sup> .....	17
Slika 3.3: Osnovne orientacije magnetnega polja <sup>23</sup> .....	18
Slika 3.4: Absorbanca primerjalnega (a) in namagnetnega vzorca (b) <sup>13</sup> .....	20
Slika 3.5: Sprememba števila delcev v odvisnosti od magnetnega polja(a) in od časa (b) .....	21
Slika 3.6: Magnetni spomin .....	21
Slika 3.7: Magnetna obdelava v statičnem in dinamičnem fluidnem sistemu <sup>24</sup> <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Slika 3.8: Vpliv pH na obarjanje kalcijevega karbonata pri magnetni in nemagnetni obdelavi <sup>24</sup> .....	22
Slika 3.9: Različne vrednosti pH pri (M) magnetni obdelavi in (NM) nemagnetni obdelavi vode <sup>24</sup> .....	23
Slika 3.10: Spreminjanje hitrosti pretoka pri (M) magnetni in (NM) nemagnetni obdelavi vode <sup>24</sup> ..	24
Slika 4.1: Merilna proga .....	27
Slika 4.2: Shema merilne proge z napravami .....	28
Slika 4.3: Reducirni ventil .....	29
Slika 4.4: Filter Atlas .....	29
Slika 4.5: Magnetna naprava .....	30
Slika 4.6: Porazdelitev magnetnega polja v reži magnetne naprave .....	30
Slika 4.7: Grelec in Mg- elektroda .....	31
Slika 5.1: Spreminjanje temperature med 1. eksperimentom .....	37
Slika 5.2: Spreminjanje pretoka med 1. eksperimentom .....	37
Slika 5.3: Izločen vodni kamen v primerjalni in magnetni progi .....	38
Slika 5.4: Spreminjanje temperature med 2. eksperimentom .....	39
Slika 5.5: Spreminjanje pretoka med 2. eksperimentom .....	39
Slika 5.6: Spreminjanje temperature med 3. eksperimentom .....	40
Slika 5.7: Spreminjanje pretoka med 3. eksperimentom .....	41
Slika 5.8: Vzorci vodnega kamna v primerjalni (levo) in magnetni (desno) progi .....	41
Slika 5.9: Spreminjanje temperature med 4. eksperimentom .....	42
Slika 5.10: Spreminjanje pretoka med 4. eksperimentom .....	43
Slika 5.11: Število lusk izločenih v primerjalni progi (levo) in v magnetni progi (desno) .....	43
Slika 5.12: Spreminjanje temperature med 5. eksperimentom .....	44
Slika 5.13: Spreminjanje pretoka med 4. eksperimentom .....	45
Slika 5.14: Grelec v primerjalni progi .....	45
Slika 5.15: Grelec pri MOV .....	46

## Uporabljeni simboli in kratice

$B$	magnetno polje (T)
$CaT$	kalcijeva trdota mol/l
$CT$	skupna ali celokupna trdota (mol/l)
$c(Ca^{2+})$	koncentracija za kalcijeve ione (mol/l)
$c(HCO_3)$	koncentracija za hidrogenkarbonatne ione (mol/l)
$cT$	skupna koncentracija CO (mol/l)
$F$	Lorentzova sila (N)
$K_{a2}$	konstanta karbonatnega ravnotežja /
$K_{sp}$	topnostni produkt /
$KT$	karbonatna trdota (mol/l)
$K_1, K_2$	konstante ravnotežja /
$MgT$	magnezijeva trdota (mol/l)
$NKT$	nekarbonatna trdota (mol/l)
$pH_s$	vrednost pri nasičenju /
$\tau$	čas (s)
$t$	temperatura ( $^{\circ}C$ )

## Kratice

CaT	kalcijeva trdota
CT	skupna ali celokupna trdota
KT	karbonatna trdota
MgT	magnezijeva trdota
MOV	magnetna obdelava vode
NKT	nekarbonatna trdota

## 1 Uvod

Povsem kemijsko čiste vode v naravi ni. Voda, ki jo uporabljamo v gospodinjstvih ali v industriji vselej vsebuje določen delež raztopljenih mineralov, soli in ogljikovega dioksida. Zato se s povečanjem pH in temperature vode začnejo v vodi izločati soli, kar privede do nastanka vodnega kamna.

Vodni kamen je pretežno sestavljen iz kalcijevega karbonata, ki je v naravi zelo pogost kristal in tvori tri polimorfne oblike: kalcit, aragonit in vaterit. Najbolj pogosto se izloči kalcit, saj je njegova topnost manjša v primerjavi z aragonitom in vateritom.

Vodni kamen z značilno majhno toplotno prevodnostjo se počasi nalaga na stenah cevi, na grelcih in sanitarnih armaturah kar povečuje porabo energije in stroške obratovanja. Razvite so številne fizikalne in kemijske metode za njegovo odstranitev. Kemijske metode zajemajo obarjalne postopke, ionske izmenjevalce, kompleksiranje kovin z organskimi spojinami, cepljenje hidrogenkarbonatov s kislinami in dodajanje polifosfatov. Pod fizikalne metode pa prištevamo uporabo mehčalnih filtrov, ultrazvoka, reverzne osmoze in magnetnih naprav.

Čiščenje in odstranjevanje vodnega kamna je dolgotrajno opravilo in zahteva uporabo številnih dragih in agresivnih kemičnih sredstev, zato so v vedno večjem razvoju in uporabi številne fizikalne metode za preprečevanje izločanja vodnega kamna.

Pogosta fizikalna metoda za preprečevanje izločanja vodnega kamna je magnetna obdelava vode (MOV). Naprave za magnetno obdelavo vode vsebujejo močne magnete, ki ustvarjajo magnetno polje v vodi. Poznamo elektromagnete, ki delujejo na pretok vode preko navitja na vodovodni cevi, kjer se tvori impulzirajoče elektromagnetno polje. Drugi tip magnetov so permanentni magneti, ki ustvarjajo trajno magnetno polje. Kakor predvidevajo številne raziskove<sup>15</sup> naj bi magneti vplivali na vrsto izločenega kalcijevega karbonata v vodi. Namesto kalcita, ki povzroča trdne obloge, naj bi dominiral aragonit. Ta tvori bolj prašnate delce, ki se lažje odplaknejo z vodo.

Učinkovitost in delovanje magnetne obdelave vode še danes ni povsem razjasnjeno. Raziskave na tem področju se včasih ne ujemajo med seboj, oziroma so neponovljive. Vzrok je iskati v tem, da že zelo majhne spremembe v postopku obdelave in sestavi vode vplivajo na končno kristalizacijo vodnega kamna.

V diplomski nalogi je obravnavan vpliv magnetne obdelave na izločanje vodnega kamna. Za izvajanje eksperimentalnega dela je uporabljena permanentna magnetna naprava Eko MIDI, ki se uporablja v gospodinjstvu.

Na osnovi rezultatov je ugotovljen vpliv alternirajočega magnetnega polja na izločanje vodnega kamna pri različnih hitrostih pretoka vode. Prav tako je raziskana oblika, količina in debelina izločenega vodnega kamna z in brez magnetne naprave.

## 2 Teoretične osnove

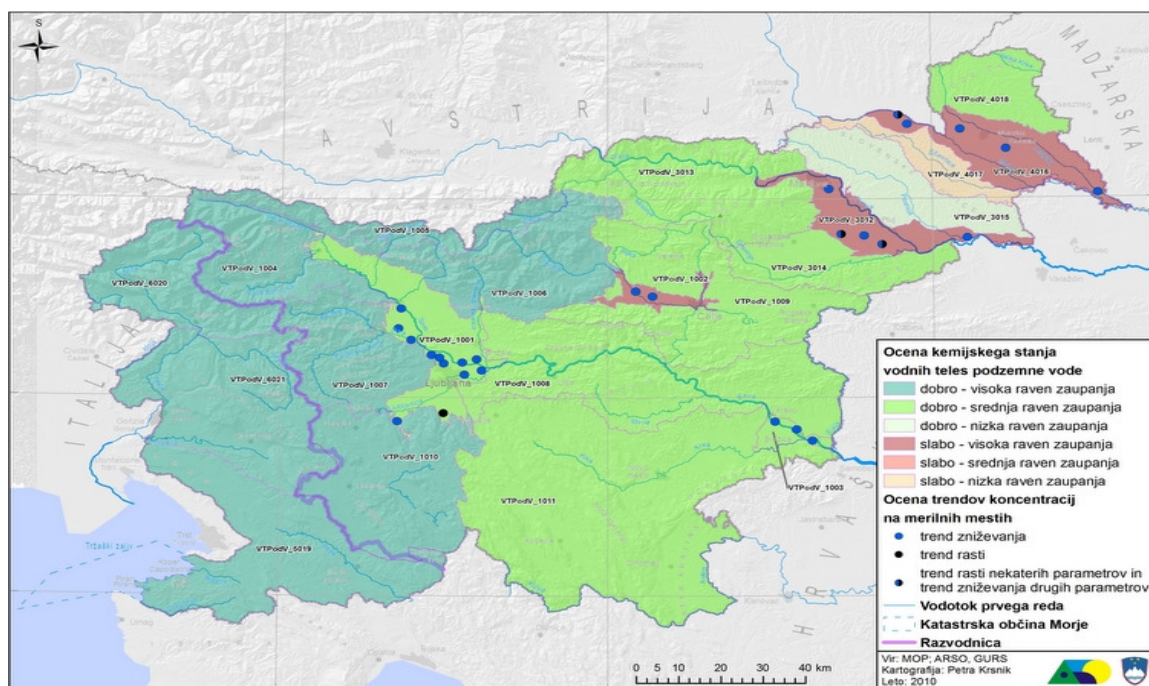
Na zemlji je voda najpomembnejša spojina, ki pokriva okoli 70 % zemeljskega površja in je ključna spojina za življenje na našem planetu. Okoli 95,7 % celotne površine vodnih zalog je slana voda v morjih in oceanih. Sladke vode je predvidene na svetu le okoli 2,5 % v ledenikih, rekah in jezerih, s tem da ni vsa uporabna za življenje.

### 2.1 Kemijske značilnosti naravnih voda v Sloveniji

Slovenija je država z veliko količino padavin in vode. K temu pripomorejo tudi obsežne gozdne površine, saj je gozd, ki prekriva več kot polovico (52 %) naše dežele, naravni zadrževalnik voda. Na veliko vodnatost kaže tudi gostota vodovodnega omrežja, ki znaša v povprečju 1,33 km vodotoka na km<sup>2</sup> ozemlja in spada med največje v Evropi. Vodne površine pokrivajo okoli 272 km<sup>2</sup>, za oskrbo s pitno vodo uporabljamo podzemne, izvirsne, tekoče in zajezene površinske vode.<sup>5</sup>

Slovenija spada med države, ki imajo sorazmerno dobro ohranjene podzemne zaloge vod v plitvejših vodonosnih slojih. Ti vodonosniki predstavljajo glavni vir pitne vode, saj preskrbujejo 97 % celotnega prebivalstva. Kemijska sestava podzemnih voda (slika 2.1) se na različnih področjih Slovenije razlikuje in je odvisna od vrste kamenin, velikosti por, hitrosti pretoka, fizikalno-kemijskih razmer in od dejavnosti prebivalstva.<sup>23</sup>

Podzemne vode na severovzhodu Slovenije spadajo zaradi specifične dejavnosti prebivalstva med najbolj onesnažene. V zahodnem delu Slovenije, ki je manj poseljena in ima manj kmetijskih površin je obremenjenost s pesticidi in nitrati dosti manjša.



Slika 2.1: Kemijsko stanje vodnih teles podzemne vode<sup>22</sup>

Voda v naravi stalno kroži, sistem pa je znan kot vodni ali hidrološki cikel, ki ga poganja sončna energija. Sonce povzroča izhlapevanje vode iz površine oceanov, jezer, rek, lahko tudi iz snežnih površin ledenikov. Manjše količine izhlapevanja potekajo tudi pri izgorevanju organskih snovi. Izhlapevanje tvori oblake, iz katerih nastajajo padavine. Če te padavine padejo direktno v oceane ali zaprta jezera, je potek sklenjen. V primeru, da padejo na zemljo, pa odtekajo kot površinske vode v oceane. Voda, ki pronica v podtalnico, se tam zadrži, poteka pa tudi izhlapevanje. Cikel je neprestan, zato je voda obnovljiv vir.

Kemijsko čiste vode v naravi ne najdemo<sup>1</sup>. Najbolj se ji približa deževnica, ki pa vsebuje določeno količino raztopljenih plinov in ostalih nečistoč iz zraka. Največ je ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>) in kisika (O<sub>2</sub>), v sledovih najdemo tudi dušik (N<sub>2</sub>), amonijak (NH<sub>3</sub>) ter vodikov sulfid (H<sub>2</sub>S). Vsebuje tudi manjše količine nitratov in nitritov kot posledica sevanja in razelektrenja v atmosferi.

V naravi delimo vode na površinske in podzemne vode. Površinske vode so produkt padavin. Lahko so neposredno na površini ali pa pronicajo pod površino. Površinske vode za razliko od podzemnih vsebujejo več mikroorganizmov, bakterij in suspendiranih snovi. Vode iz podtalnice so bolj bistre in mineralizirane, imajo torej več raztopljenih anorganskih snovi kot so Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> in NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Prisotnost anorganskih snovi je predvsem posledica raztapljanja kamnin, ki so v stiku z vodo. Kolikšna je vsebnost raztopljenih snovi pa je odvisno od topnosti in podlage po kateri se voda pretaka. S povečanjem koncentracije CO<sub>2</sub> v vodi se topnost rudninskih snovi povečuje. Za anorganske snovi (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>) je značilna konstantna koncentracija snovi. Za komponente Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ki nastopajo v številnih reakcijah pa se koncentracija spreminja. Ti ioni tvorijo težko topne soli. Ker je topnost CaCO<sub>3</sub> manjša od MgCO<sub>3</sub> ga je več v vodnem kamnu. Vrednosti topnostnega produkta nekaterih soli pri 25°C podaja preglednica 2.1.

Preglednica 2.1: Topnostni produkti nekaterih soli pri 25 °C<sup>5</sup>

Sol	K <sub>sp</sub>	
karbonati	CaCO <sub>3</sub> kalcit	3,3×10 <sup>-9</sup>
	CaCO <sub>3</sub> aragonit	4,6×10 <sup>-9</sup>
	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> dolomit	1,5×10 <sup>-17</sup>
	MgCO <sub>3</sub>	6,8×10 <sup>-6</sup>
	MgCO <sub>3</sub> × 3 H <sub>2</sub> O	2,4×10 <sup>-6</sup>
sulfati	CaSO <sub>4</sub>	6,4×10 <sup>-5</sup>
	CaSO <sub>4</sub> ×2 H <sub>2</sub> O	2,6×10 <sup>-5</sup>
hidroksidi	Ca(OH) <sub>2</sub>	5×10 <sup>-6</sup>
	Mg(OH) <sub>2</sub>	5,6×10 <sup>-12</sup>

### 2.1.1 Trdota vode

Pri kemijski obdelavi vode je med drugim pomembna trdota vode. Na trdoto vode najbolj pogosto vplivajo kalcijevi  $\text{Ca}^{2+}$ , in magnezijevi  $\text{Mg}^{2+}$  ioni. Več je raztopljenih ionov v vodi bolj trda je. Zelo trda voda je značilna za področja bogata z apnencem. Voda v območjih sestavljenih iz drugih kamnin bogatih s silikati je dosti bolj mehka. Največkrat trdoto vode povzroča kalcijev hidrogen karbonat, ki nastaja med pronicanjem padavinske vode nasičene s  $\text{CO}_2$  skozi apnenčaste sloje, katerih glavna sestavina je  $\text{CaCO}_3$ .

V Sloveniji je trdota vode zelo različna glede na podlago po kateri se pretaka. Trda voda je značilna za Kras in ob morju zaradi apnenčaste podlage. V okolici Pohorja so večinoma stare kamnine, zato je voda mehka. Srednje trdno vodo pa imata mesti Maribor in Ljubljana.

Mineralne snovi, ki povzročajo trdoto vode so iz zdravstvenega vidika zaželene, za pitno vodo se priporoča trdota okoli 5 °dH. Po drugi strani pa je prisotnost raztopljenih mineralov v vodi za posamezne tehnološke procese nezaželena in škodljiva. Povzroča obloge, prekomerno porabo kemikalij, manjši prenos toplote zaradi slabe toplotne prevodnosti vodnega kamna in mašenje cevi. Obloge trdnega vodnega kamna (kotlovca) zvišujejo obratovalne in vzdrževalne stroške v toplovodnih in kurilnih napravah, zato se priporoča uporaba mehčane vode. V preglednici 2.2 so navedene snovi, ki v največji meri povzročajo izločanje vodnega kamna.

Preglednica 2.2: Kalcijeve in magnezijeve soli v vodi<sup>2</sup>

Sol	Kemijska formula	Trdota	
Kalcijev hidrogenkarbonat	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Karbonatna trdota	Celokupna trdota
Magnezijev hidrogenkarbonat	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$		
Kalcijev karbonat	$\text{CaCO}_3$		
Magnezijev karbonat	$\text{MgCO}_3$		
Kalcijev klorid	$\text{CaCl}_2$	Nekarbonatna trdota	
Magnezijev klorid	$\text{MgCl}_2$		
Kalcijev sulfat	$\text{CaSO}_4$		
Magnezijev sulfat	$\text{MgSO}_4$		
Kalcijev nitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$		
Magnezijev nitrat	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$		
Kalcijev silikat	$\text{CaSiO}_3$		
Magnezijev silikat	$\text{MgSiO}_3$		

Kadar govorimo o trdoti vode je potrebno ločiti<sup>2</sup>:

- Celokupno trdoto (CT) – izraža koncentracijo  $\text{Ca}^{2+}$  in  $\text{Mg}^{2+}$  ionov.

$$CT = KT + NKT \quad (2.1)$$

- Karbonatno trdoto (KT) – izraža koncentracijo  $Ca^{2+}$  in  $Mg^{2+}$  ionov vezanih na  $HCO_3^-$  in  $CO_3^{2-}$
- Nekarbonatno trdoto (NKT) – vsebnost preostalih topnih kalcijevih in magnezijevih soli. Določimo jo iz razliko med celokupno trdoto in karbonatno trdoto

$$NKT = CT - KT \quad (2.2)$$

- Magnezijevo trdoto (MgT) – vsebnost vseh topnih magnezijevih soli. Določimo jo iz razlike med celokupno in kalcijevo trdoto.

$$MgT = CT - CaT \quad (2.3)$$

- Kalcijevo trdoto (CaT) – vsebnost vseh topnih kalcijevih soli v vodi.

Za izražanje trdote vode poznamo različne osnovne enote (Preglednica 2.3), medtem ko so najbolj v uporabi nemške trdotne stopinje ( $^{\circ}dH$ ).  $1^{\circ}dH$  predstavlja vsebnost 10 mg CaO na liter vode. ( Preglednica 2.4 )

Voda v omrežju, ki ga upravlja Mariborski vodovod d.d., je srednje trda do trda in znaša v povprečju  $15^{\circ}dH$ . Čim višjo trdoto ima voda, tem več vodnega kamna se iz nje izloči.

Preglednica 2.3: Pretvorniki trdote vode<sup>1</sup>

Trdotna stopnja	Pretvornik
Nemška ( $^{\circ}d$ )	
Francoska ( $^{\circ}f$ )	0,56 $^{\circ}d$
Ameriška ( $^{\circ}USA$ )	0,056 $^{\circ}d$
Angleška ( $^{\circ}e$ )	0,8 $^{\circ}d$

Preglednica 2.4: Nemška lestvica trdote vode:

Vrednost	Vrsta vode	Nemška trdotna stopnja( $^{\circ}dH$ )
1	zelo mehka voda	0 – 4
2	mehka voda	4 – 8
3	srednje trda voda	8 – 12
4	dokaj trda voda	12 – 18
5	trda voda	18 – 30
6	zelo trda voda	Več kot 30



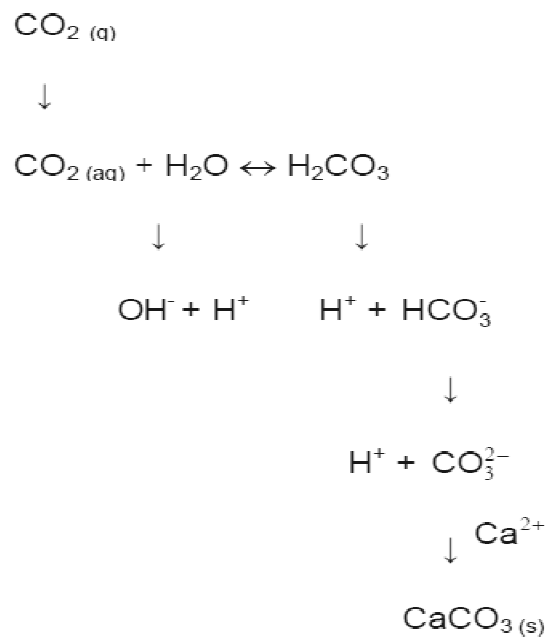
## 2.2 Nastanek vodnega kamna

Naravne vode so zaradi raznolikega porekla in različnih procesov po svoji sestavi zelo kompleksne. Vsebujejo anorganske in organske snovi, ki vodo s svojo prisotnostjo plemenitijo, hkrati pa nekatere izmed njih pod določenimi pogoji tvorijo vodni kamen in povzročajo korozijo.

Za nastanek vodnega kamna je potrebna prenasičenost vode in z njo povezano karbonatno ravnotežje. Nastanek vodnega kamna oz. kristalizacija pa poteka v dveh stopnjah. Prva je tvorba kristalnih jeder, druga pa rast kristalov.

### 2.2.1 Karbonatno ravnotežje

Nekatere prisotne anorganske snovi v vodi, kot so  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  in  $\text{NO}_3^-$ , tvorijo kompleksen labilen sistem karbonatnega ravnotežja, ki je močno odvisen od temperature (Slika 2.2).

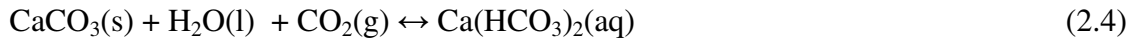


V naravni vodi je kalcij vedno prisoten v obliki  $\text{Ca}^{2+}$  ionov zraven ostalih anorganskih spojin<sup>10</sup>. Kalcij je v vodi zaradi raztapljanja kalcijevih mineralov. Pomembno vlogo pri razkrajanju ima  $\text{CO}_2$ , ki nastane pri razkrajanju organskih snovi.

V tehnologiji vode poznamo dve vrsti  $\text{CO}_2$  in sicer vezano in prosto ogljikovo kislino. Vezana je tista, ki se nahaja v obliki  $\text{HCO}_3^-$  ionov, prosta pa se raztaplja v vodi. Vezana in prosta ogljikova kislina sta v stalnem medsebojnem ravnotežju. S spremembo ene, se spremeni koncentracija druge<sup>5</sup>.

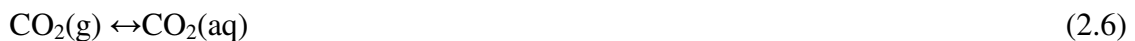
Če je v vodi večja koncentracija CO<sub>2</sub> kot je pripadajoča, privede do prebitne agresivne ogljikove kisline. Tako prenasočena voda raztaplja dodatne minerale dokler se ne vzpostavi ravnovesno stanje<sup>5</sup>.

Kalcijev karbonat je v vodi zelo slabo topen, ob prisotnosti ogljikovega dioksida pa potече reakcija do kalcijevega hidrogenkarbonata.

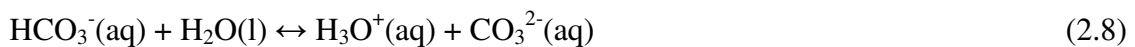
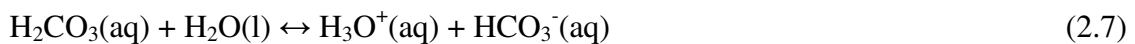


### 2.2.1.1 Disociacija CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> reagira v vodi, zaradi tega nastane šibka ogljikova kislina (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)<sup>10</sup>:



Ogljikova kislina disociira v dveh stopnjah:



$$K_1 = \frac{c_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot c_{\text{CO}_3^{2-}}}{c_{\text{HCO}_3^-}} \quad (2.9)$$

- K<sub>1</sub> in K<sub>2</sub> sta ravnotežni konstanti, pri določeni temperaturi.

- c je molska koncentracija posameznih ionov (mol/l)

Topnostni produkt vode:



$$K_w = a_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot a_{\text{OH}^-} \quad (2.11)$$

Topnostni produkt CaCO<sub>3</sub>:



$$K_s = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{HCO}_3^-} \quad (2.13)$$

Če ravnotežju (2.4) povečamo koncentracijo  $\text{CO}_2$  se ravnotežje premakne v desno, kar pomeni da se več  $\text{CaCO}_3$  raztopi, pH pa se zniža.

Prav tako se z dodajanjem  $\text{CO}_2$  v vodo ravnotežje (2.7) premakne v smer tvorbe ogljikove kisline. Posledično gre ravnotežje (2.8) v desno. Pri tem se zniža pH raztopine. Povišanje koncentracij oksonijevih ionov  $\text{H}_3\text{O}^+$  pa pomakne ravnotežje (2.7) in (2.8) v levo in zniža koncentracijo  $\text{CO}_3^{2-}$  in  $\text{HCO}_3^-$ . Zaradi tega se raztopi nekaj trdega kalcijevega karbonata (2.12).

Enačbe veljajo le pri eni temperaturi in so povzete iz Schmittovih<sup>6</sup> raziskav.

### 2.2.1.2 Koncentracija $\text{Ca}^{2+}$ ionov, kot pH funkcije

Do izločanja  $\text{CaCO}_3$  pride ko je koncentracija  $\text{Ca}^{2+}$  ionov večja od danega ravnotežja pri določeni temperaturi in pH.

V karbonatnem ravnotežju imamo prisotne  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  in  $\text{OH}^-$  ioni. Iz pogoja elektroneutralnosti raztopine velja, da je električni naboj vseh prisotnih kationov nasprotno enak naboju vseh anionov:

$$2 \cdot c_{\text{Ca}^{2+}} + c_{\text{H}_3\text{O}^+} = 2 \cdot c_{\text{CO}_3^{2-}} + c_{\text{HCO}_3^-} + c_{\text{OH}^-} \quad (2.14)$$

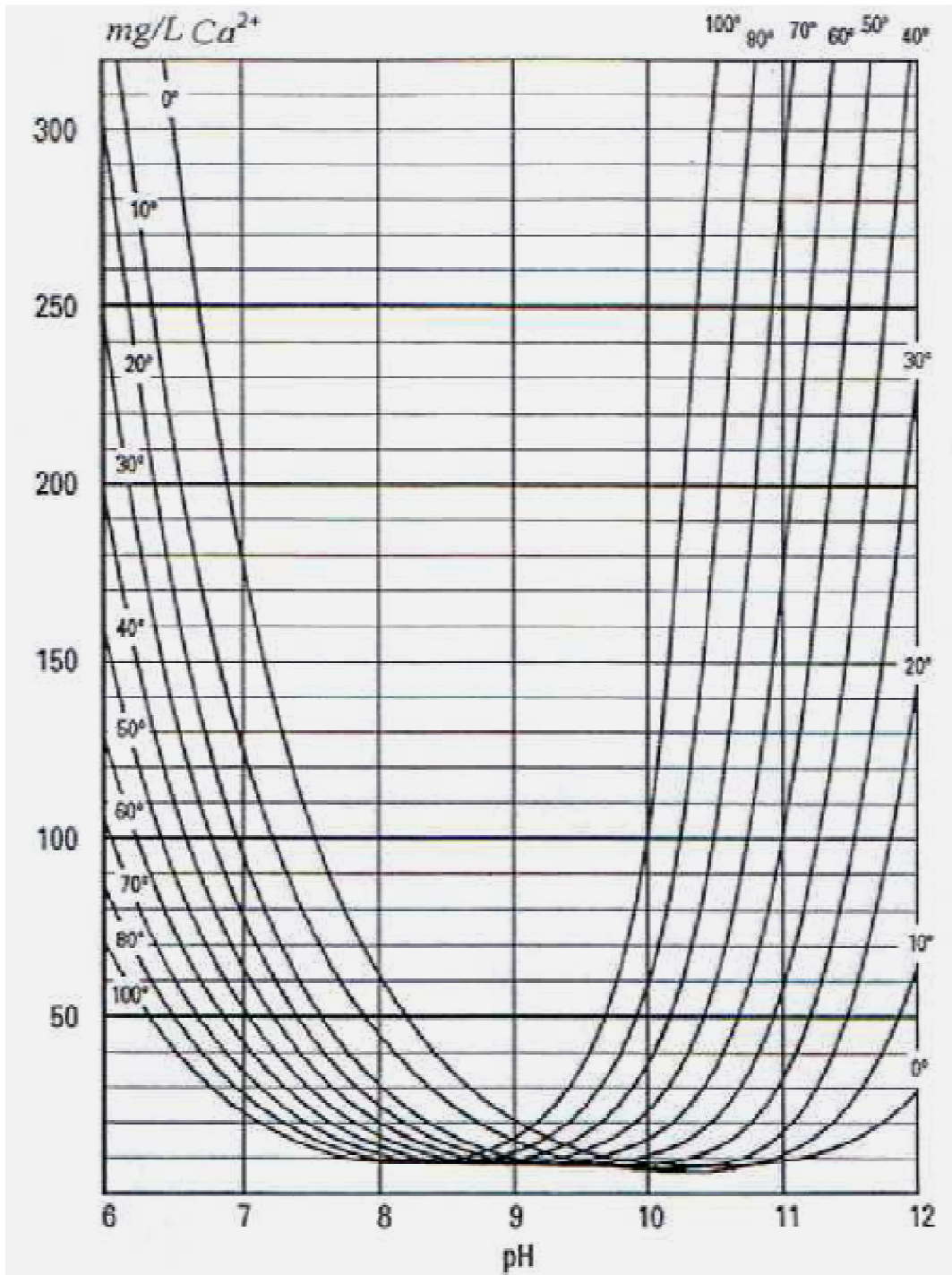
Z vstavljanjem koncentracij ionov v enačbo (2.15), lahko izrazimo izračun  $\text{Ca}^{2+}$  v odvisnosti od pH:

$$c_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{K_w - c_{\text{H}_3\text{O}^+} + \sqrt{(c_{\text{H}_3\text{O}^+}^2 - K_w)^2 + 8K_s \cdot c_{\text{H}_3\text{O}^+} \cdot \left(2 + \frac{c_{\text{H}_3\text{O}^+}}{K_2}\right)}}{4c_{\text{H}_3\text{O}^+}} \quad (2.15)$$

Preglednica 2.1: Konstante karbonatnega ravnotežja pri različnih temperaturah<sup>10</sup>

$t$ (°C)	$K_1$ (mol/l)	$K_2$ (mol/l)	$K_{sp}$ (mol/l)	$K_w$ (mol/l) <sup>2</sup>
0	$2,61 \cdot 10^{-7}$	$2,31 \cdot 10^{-11}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$	$1,15 \cdot 10^{-15}$
10	$3,34 \cdot 10^{-7}$	$3,24 \cdot 10^{-11}$	$7,10 \cdot 10^{-9}$	$2,98 \cdot 10^{-15}$
20	$4,05 \cdot 10^{-7}$	$4,20 \cdot 10^{-11}$	$5,25 \cdot 10^{-9}$	$6,82 \cdot 10^{-15}$
25	$4,26 \cdot 10^{-7}$	$4,76 \cdot 10^{-11}$	$4,57 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-14}$
30	$4,52 \cdot 10^{-7}$	$5,14 \cdot 10^{-11}$	$4,03 \cdot 10^{-9}$	$1,46 \cdot 10^{-14}$
50	$4,85 \cdot 10^{-7}$	$6,04 \cdot 10^{-11}$	$3,06 \cdot 10^{-9}$	$2,90 \cdot 10^{-14}$
60	$5,05 \cdot 10^{-7}$	$6,74 \cdot 10^{-11}$	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$5,46 \cdot 10^{-14}$
70	$5,07 \cdot 10^{-7}$	$7,20 \cdot 10^{-11}$	$1,83 \cdot 10^{-9}$	$9,63 \cdot 10^{-14}$
80	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$7,50 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-13}$
90	$4,85 \cdot 10^{-7}$	$7,55 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-9}$	$3,16 \cdot 10^{-13}$
100	$4,58 \cdot 10^{-7}$	$8,40 \cdot 10^{-11}$	$6,32 \cdot 10^{-10}$	$5,02 \cdot 10^{-13}$

Na sliki 2.3 je prikazan topnostni diagram  $\text{CaCO}_3$  v idealni raztopini v odvisnosti od pH in T. Razvidno je, da se topnost s temperaturo spreminja različno. V območju pH večjem od 9 topnost  $\text{CaCO}_3$  pada z naraščajočo pH vrednostjo. Obratno, v območju pH manjšem od 9, topnost pada z naraščajočo temperaturo. V tem območju se nahaja večina naravne vode.



temperaturi<sup>10</sup>

## 2.3 Morfologija vodnega kamna

V vodnem kamnu so prisotni:

- kalcijev karbonat,
- magnezijev karbonat,
- magnezijev kalcit,
- dolomit,
- kalcijev sulfat,
- barijev sulfat,
- silicijev hidroksid,
- magnezijev hidroksid.

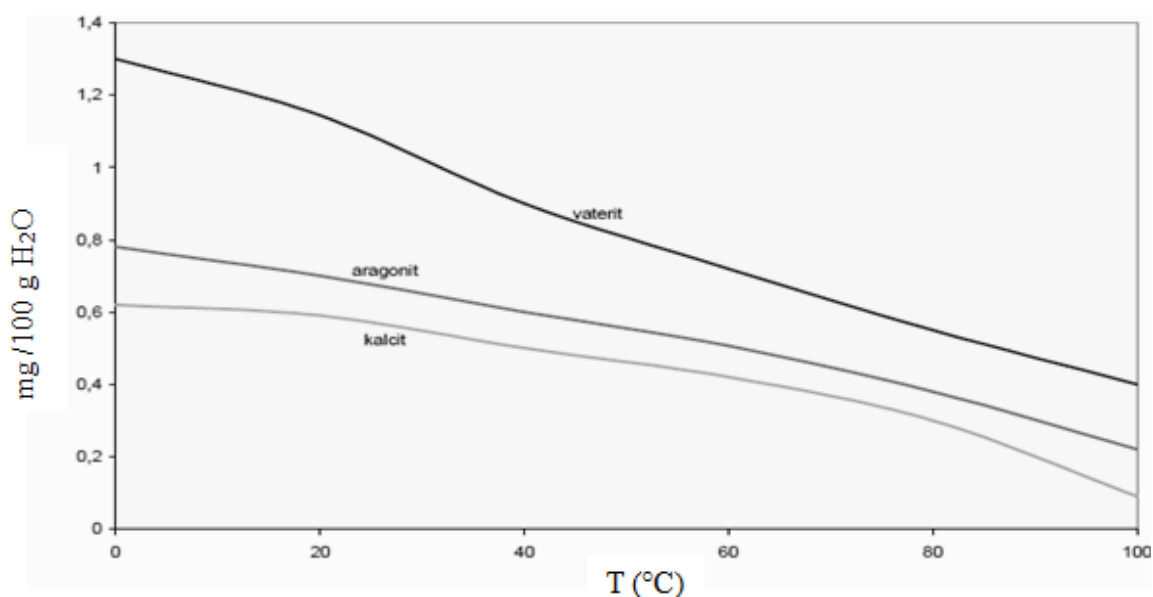
Največ je v vodnem kamnu kalcijevega karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), kateremu topnost pada z večanjem pH in temperature. Ima manjšo topnost od magnezijevega karbonata ( $\text{MgCO}_3$ ), ki se redkeje pojavlja.

Magnezijev hidroksid,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , doseže prenasičenost samo pri določenem pH, ki je večji od 11, zato ga redko opazimo. Barijev sulfat, železo in razni silikati pa le v izjemnih primerih postanejo vodilne komponente obarjanja.<sup>5</sup>

### 2.3.1 Kalcijev karbonat

Kalcijev karbonat je zelo pogost kristal v naravi in tvori tri kristalne oblike ( slika 2.4 ):

- kalcit (trigonalna struktura)
- aragonit (ortorombska struktura)
- vaterit



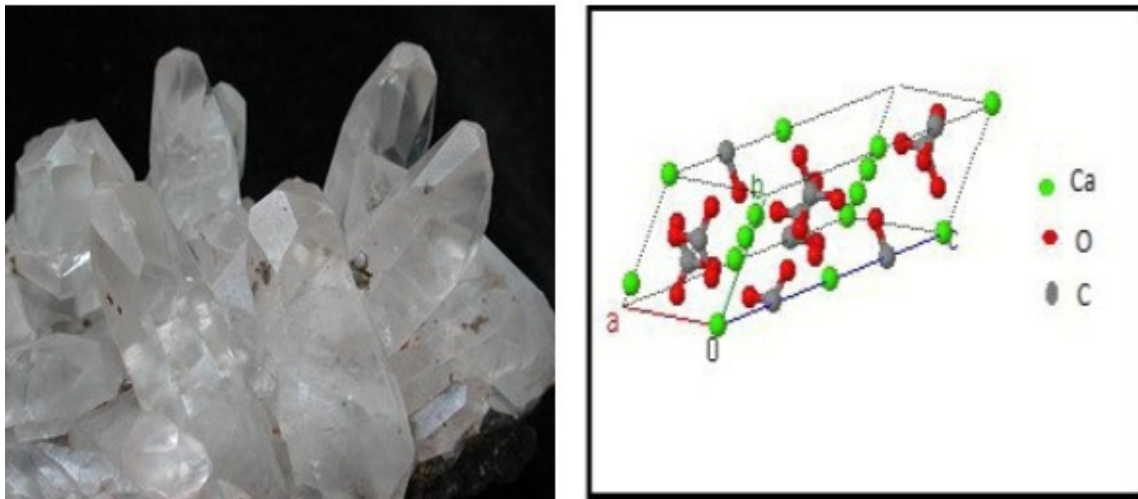
Slika 2.4: Topnost različnih kristalnih oblik kalcijevega karbonata<sup>5</sup>

Iz slike 2.4 je razvidno da ima najnižjo topnost v odvisnosti od temperature kalcit, sledi aragonit in vaterit. Po istem vrstnem redu pada tudi stabilnost kristalov. Zelo pogosto se obori aragonit, ki se v daljšem času prekrystalizira v kalcit. Vaterit se redko obori.

### 2.3.1.1 Kalcit

Kristal kalcita je različnih oblik in barv. Ima gostoto  $2.7 \text{ g/cm}^3$  in toplotno prevodnost  $2.72 \text{ W/mK}$  pri  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (slika 2.5). Ima relativno nizko trdnost po Mohsovi trdotni lestvici in je visoko reaktiven celo s šibkimi kislinami.

Kristalizira v trigonalni strukturi, ki je edini kristalni sistem, katerega točkovne skupine imajo več kot en sistem prostorskih mrež: v njem se pojavljajo heksagonalne in romboedrične prostorske mreže. Imajo veliko stično površino in tvori obloge.

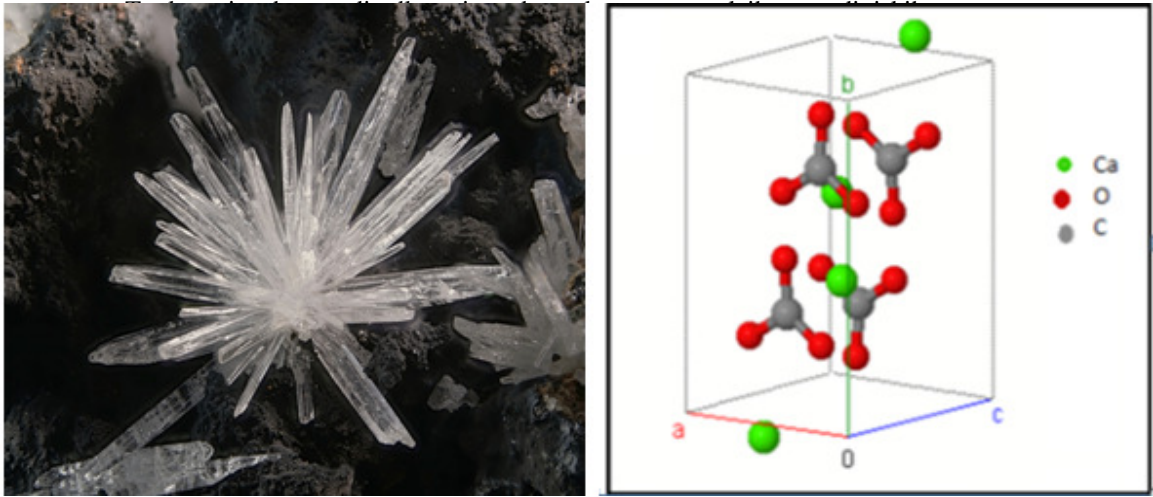


Slika 2.5: Kalcit in njegova osnovna celica<sup>7</sup>

### 2.3.1.2 Aragonit

Ta polimorfna kristalna struktura kalcijevega karbonata je druga najbolj zastopana v naravi. Aragonit je gostejši od kalcita. Ima gostoto  $2,93 \text{ g/cm}^3$ . Kristali so ime dobili po španski vasi Molina de Aragón.

Ima ortorombsko strukturo. Koordinacijsko število v tej strukturi je 9, kar pomeni da je kalcijev ion obdan z devetimi kisiki. Ima manjše stične površine kot kalcit in zato ne more tvoriti kompaktnih oblog. Zanj je značilna igličasta oblika (slika 2.6).

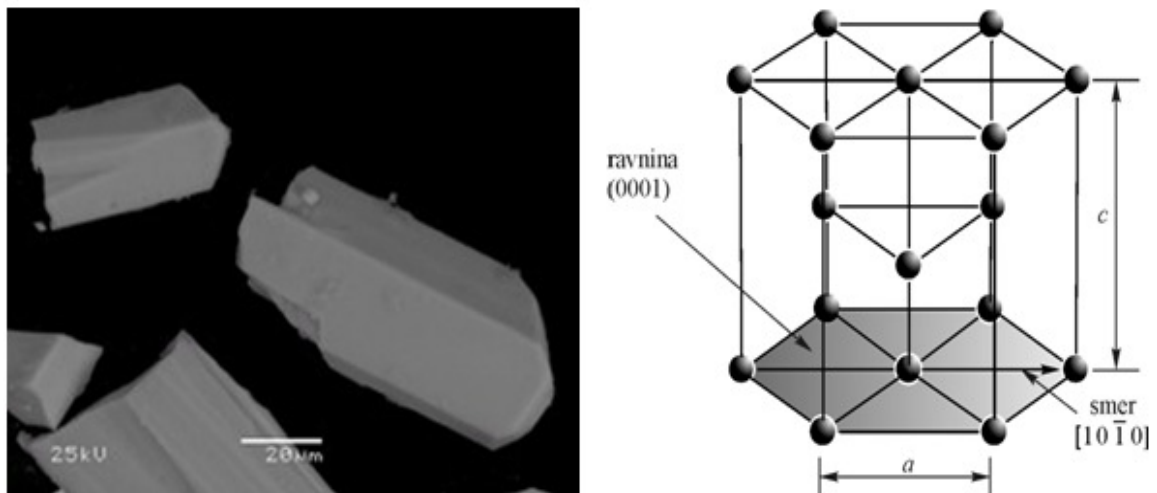


Slika 2.6: Aragonit in njegova osnovna celica<sup>8</sup>

### 2.3.1.3 Vaterit

Vaterit je brezbarvna polimorfna oblika kalcijevega karbonata, ki se redko obori. Ima nižjo stabilnost kalcita in aragonita in večjo topnost od njiju. Kristalizira v heksagonalnem kristalnem skladu (slika 2.7). Vaterit najdemo v naravi v mineralnih vrelih, organskih tkivih, žolčnih in ledvičnih kamnih.

V nekaterih okoliščinah pa ga določene nečistoče (kovinski ioni) stabilizirajo in preprečijo pretvorbo v kalcit pri nizkih temperaturah in aragonit pri visokih temperaturah. Imenuje se po kemiku Heinrichu Vaterju (1859-1930).



Slika 2.7: Vaterit in njegova osnovna celica<sup>21</sup>



### 3 Metode za preprečevanje izločanja vodnega kamna

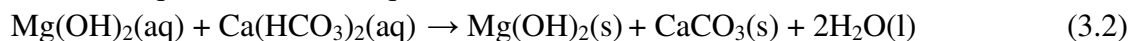
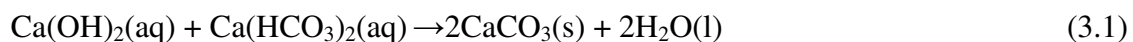
Vodni kamen je nezaželen na grelcih gospodinjskih in industrijskih naprav, saj povečuje porabo energije in vzdrževalne stroške naprav. Prav tako zmanjšuje toplotni prenos v toplotnih prenosnikih, zato poznamo številne metode za njegovo preprečevanje.

#### 3.1 Uporabne kemijske metode

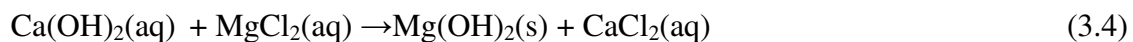
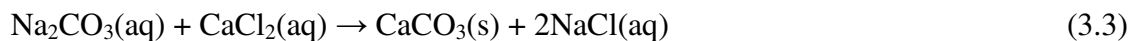
Na izbiro imamo veliko kemijskih metod za preprečevanje vodnega kamna. Slabost običajnih kemijskih metod je, da spreminjajo kemijsko sestavo raztopine in jih ne moremo uporabljati za področja, kjer so predpisana striktna merila glede kakovosti voda. Med kemijske metode štejemo:

##### Postopki obarjanja

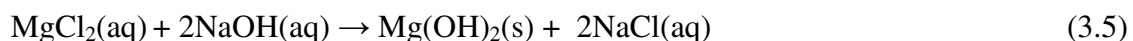
- Za zniževanje karbonatne trdote:



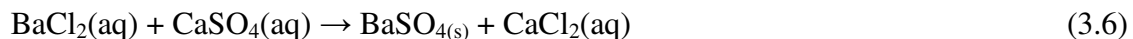
- Za zniževanje nekarbonatne trdote:



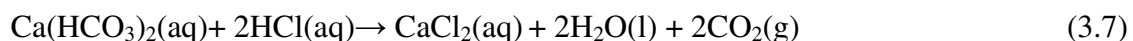
- Z NaOH za odstranjevanje magnezijeve trdote:



- Z BaCl<sub>2</sub> za obarjanje sulfidov:



##### Cepljenje hidrogenkarbonatov s kislinami:



##### Doziranje CO<sub>2</sub> v vodo, kar neposredno vpliva na karbonatno ravnotežje

## Ionske izmenjave

V primeru mehčanja vode z ionskimi izmenjevalci govorimo o dejanskem mehčanju vode, saj gre za zmanjšanje prisotnih karbonatov. Tako obdelana voda ima nižjo trdoto kot vhodna voda. Večina ostalih tehnologij za preprečitev izločanja vodnega kamna ne spremeni trdote vode.

Ionski izmenjevalci so netopne organske ali anorganske spojine, ki imajo reaktivne, ionizirane, kisle ali bazične skupine. Te skupine morajo z raztopinami elektrolitov izmenjati ione in ustvariti novo spojino, ki je prav tako netopna, kot je bila prvotna. Poznamo kationske in anionske izmenjevalce, ki so lahko organski ali anorganski.<sup>1</sup>

Ionska izmenjava spada med pogoste tehnološke metode za odstranjevanje ionov, ki povzročajo trdoto vode. S kombiniranjem kisle kationske in anionske izmenjave lahko odstranimo iz vode prav vse minerale. Temu pravimo popolna demineralizacija.

Ionska masa v ionskem izmenjevalcu vsebuje na funkcionalnih skupinah natrij. Pri prehodu trde vode skozi ionsko maso se natrij iz funkcionalnih skupin zamenja s kalcijem in magnezijem iz vode. Natrij se ne izloča v ceveh in ne zmanjšuje penjenja vode pri uporabi mil in drugih pralnih sredstev.<sup>11</sup>

Prednost te metode je v regeneraciji. Izrabljene izmenjevalce lahko regeneriramo s koncentrirano raztopino NaCl in jo nato ponovno uporabimo za ionsko izmenjavo. Pri tem se kalcijevi in magnezijevi ioni iz funkcionalnih skupin ionske mase zamenjajo z natrijem po reakciji:



Z je anionski del izmenjevalca<sup>1</sup>

## Kompleksiranje kovin z organskimi spojinami (npr. EDTA)

### Doziranje polifosfatov in ostalih zaviralcev rasti

Zelo pogosta metoda proti zaviranju rasti kristalov je dodatek zaviralcev rasti. Zaviralci so lahko  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  ioni, ki se vgradijo v kalcitno kristalno strukturo namesto  $\text{Ca}^{2+}$  in upočasnijo kristalno rast. Dobri zaviralci rasti kalcitnih kristalov so tudi polifosfati, ki so učinkoviti že v zelo majhnih koncentracijah. Njihova slabost je, da so dragi in okolju škodljivi.

## 3.2 Fizikalne metode

Fizikalne metode za preprečevanje izločanja vodnega kamna se pogosto uporabljajo, vendar njihova učinkovitost še ni povsem dokazana. Kemijsko ne spreminjajo vode in so okolju prijazne.

### 3.2.1 Nameščanje filtrov

Filtracija je fizikalna operacija ločevanja v tekočinah ali plinih suspendiranih delcev materije od medija, v katerem so suspendirani. Pogoji za uspešno filtriranje je, da filtrni sloj prepušča tekočino ali plin, zadrži pa suspendirane delce.

Ločevanje trdnih snovi od tekočine s pomočjo filtriranja lahko delimo na tri vrste (tipe) filtriranja:

- površinsko filtriranje močno razredčene suspenzije, pri čemer običajno izkoriščamo samo filtrat (npr. membranska filtracija, filtriranje preko poroznih svečk ipd),
- globinsko filtriranje, pri čemer se zadržujejo majhne količine nečistoč na površini in tudi v notranjosti filtrnega medija (peščeni, ogljeni, nasipni filter itd.) in
- filtriranje skozi filtrno pogačo, pri čemer se na površini filtra hitro nabere oborina (filtrni kolač), ki predstavlja dodaten filtrni medij s hitro naraščajočim uporom proti pretoku suspenzij.

Na tržišču je veliko različnih proizvajalcev filtrov, ki poleg mehanskega filtriranja tudi mehčajo vodo. Eden takih je kombinirani magnetni mehčalec z mehanskim filtrom EKOMAG, kjer poteka mehčanje in filtriranje obenem (slika 3.1). Z mehanskim filtrom izločimo delce, ki so lahko jedra za kristaljenje, z magnetnim mehčalcem pa spremenimo obliko rasti kristalov tako, da se lažje odstranijo.

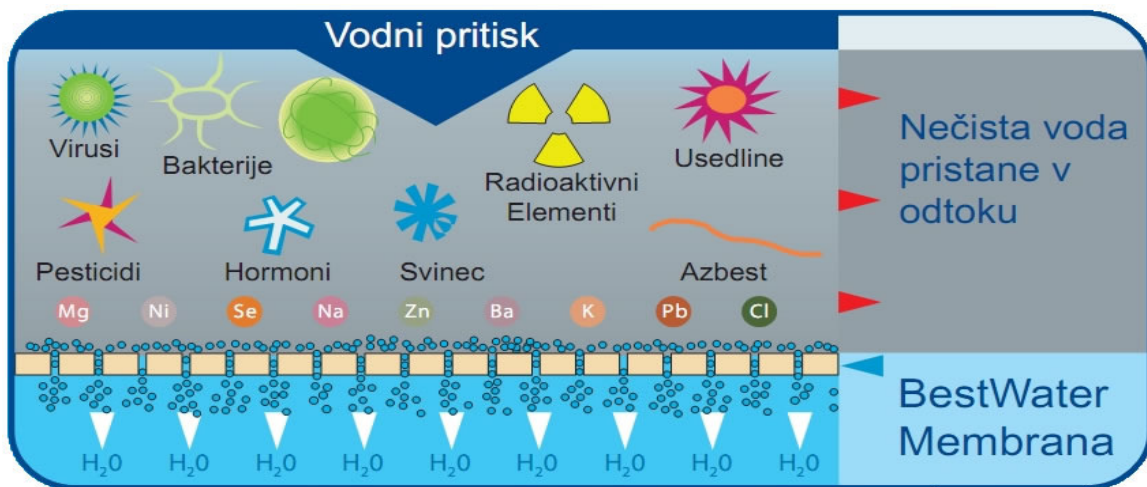


Slika 3.1: Kombinirani magnetni mehčalec z mehanskim filtrom

### 3.2.2 Reverzna osmoza

Reverzna osmoza je najučinkovitejši fizikalni postopek za demineralizacijo. Reverzna osmoza je postopek pridobivanja ravnovesja med koncentracijami dveh tekočin z uporabo polprepustne membrane (slika 3.2).

Vodni tok je kontroliran s pritiskom, kar pomeni da je raztopina pritisnjena ob membrano, ki prepušča samo vodne molekule, nezaželene delci pa ostanejo na drugi strani membrane. Membrane imajo velikost por 0,1 nanometra, zato obdelana voda ne vsebuje vodnega kamna.



Slika 3.2: Delovanje reverzne osmoze<sup>31</sup>

### 3.2.3 Ultrazvočna metoda

Ultrazvočna metoda spada med fizikalne metode, ki naj bi z ultrazvočnim valovanjem preprečevala izločanje vodnega kamna. E. Dalas<sup>18</sup> je ugotovil, da radiacija z ultrazvokom nima večjega vpliva na rast kristalov. Velikost in vrsta kristalizacije ostane ista.

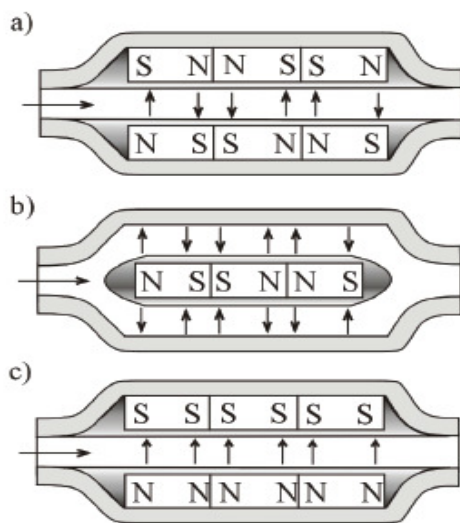
### 3.2.4 Magnetna obdelava vode (MOV)

Magnetna obdelava vode (MOV) je fizikalna metoda za zmanjšanje nezaželenih učinkov trdote vode. Naprave za MOV vsebujejo močne magnete ali tuljave, ki povzročajo magnetno polje v vodi. Te naprave ne odstranijo  $Mg^{2+}$  in  $Ca^{2+}$  ionov v vodi, ampak s pomočjo magnetnega polja vplivajo na potek kristalizacije in kasnejše nalaganje vodnega kamna.

Najbolj pogostne naprave za fizikalno obdelavo vode vsebujejo elektromagnete ali permanentne magnete. Na trgu je več elektromagnetnih naprav za mehčanje vode, katerih učinkovitosti niso dokazane.

Naprava z elektromagneti deluje na pretok vode preko navitja na vodovodni cevi, kjer tvori impulzirajoče elektromagnetno polje, ki spremeni obliko mineralov in posledično vpliva na njihovo kristalizacijo. Z uporabo elektromagneta obdelana voda počasi raztopi že izločen vodni kamen v sistemu, kar pomeni, da se naložen vodni kamen omehča in se delno s pretokom odstrani iz sistema.<sup>17</sup> V nekdanji Sovjetski zvezi so v 60 letih uporabljali močne elektromagnete v vročevodnih sistemih in toplotnih uparjalnikih. Poročali so o izrednem uspehu. Naprave z elektromagneti so namenjene za industrijska postrojenja z velikimi pretoki vode.

Naprave s permanentnimi magneti povzročajo bolj šibko magnetno polje jakosti 0,005 do 1 Vs/m<sup>2</sup> in so primerne v manjših sistemih in gospodinjstvih. Na trgu so že več kot 60 let. Njihova popularnost in uporaba se je povečala z dr. Klausom Kronenbergom, ki je pionir na področju magnetne obdelave vode. Prvi je leta 1980 slikal pod mikroskopom aragonit. Mnenja je bil, da voda pod močnimi magneti spremeni obliko kristalizacije kalcijevega karbonata iz kalcita v aragonit in se lažje odstrani iz naprav. Najbolj pogoste naprave, ki vsebujejo permanentne magnete so take, ki imajo pravokotno, radialno in homogeno orientacijo magnetnega polja (slika 3.3).



Slika 3.3: Osnovne orientacije magnetnega polja<sup>23</sup>

a) pravokotna, b) radialna, c) homogena

### 3.2.4.1 Ali magnetna naprava resnično deluje?

Učinkovitost in delovanje magnetne obdelave vode še danes nista povsem razjasnjena. Raziskave na tem področju se včasih ne ujemajo med seboj, oziroma so neponovljive. Vzrok je verjetno v tem, da že zelo majhno odstopanje v postopku obdelave oziroma sestavi vode, vpliva na končno kristalizacijo vodnega kamna.

V literaturi je veliko poročanj o uspešnosti magnetne obdelave vode. Če je naprava pravilno dimenzionirana je možno pričakovati naslednje pozitivne učinke:

- spremenjena je oblika in velikost izločenega vodnega kamna<sup>12</sup> (vodni kamen se izloča v suspendirani obliki, obloge so prašnate in lahko odstranljive),
- pri izločanju kalcijevega karbonata dominira aragonitna oblika pred kalcitno<sup>12</sup>,
- predhodno izločene obloge vodnega kamna se po vgradnji magnetne naprave odstranijo,
- naložba v sistem je enkratna in ekonomična, sistem tudi ne potrebuje vzdrževanja,
- organoleptične (prvotne) lastnosti vode ostanejo nespremenjene. Voda ohrani svoj okus, barvo, vonj in vsebnost sestavin.

Splošno znane obratovalne omejitve za pretok vode skozi napravo s permanentni magneti, ki ustvarjajo magnetno polje so;

- hitrost pretakanja v območju 0,5 do 2 m/s,
- gostota magnetnega polja  $B = 0,005$  do 1 T ,
- čim večji zadrževalni čas.

Na osnovi raziskav Higashitani, Oshitanija Tambaczka in Lipus<sup>13-15</sup> se predvideva, da na spreminjanje kristaljenja z magnetno obdelavo vode bistveno vplivata dve vrsti interakcij:

- hidratacija (spremembe v razporeditvi vode),
- delovanje Lorentzove sile (premiki nabitih delcev).

Pri statični magnetni obdelavi vode zasledimo spreminjanje hidratacije ionov, pri dinamični obdelavi vode pa delovanje Lorentzove sile.

Lorentzova sila ( $F_L$ ) je magnetna sila, ki deluje na električno nabite delce ( $e$ ), ki potujejo skozi magnetno polje ( $B$ ). Največja je ko so silnice magnetnega polja pravokotne na smeri pretoka ionov vodi.

$$F_L = e v \times B \quad (3.10)$$

Kozic<sup>23</sup> trdi, da ima Lorentzova sila pomemben vpliv na premik ionov ali delcev v električni dvojni plasti in jih spodbuja do reakcijskih trčenj. Sila naj bi bila sorazmerna s hitrostjo toka in gostoto magnetnega polja. Ta sila povzroči visoko strižno silo v bližini cevne stene cevi in sproži povečanje obarjanja.

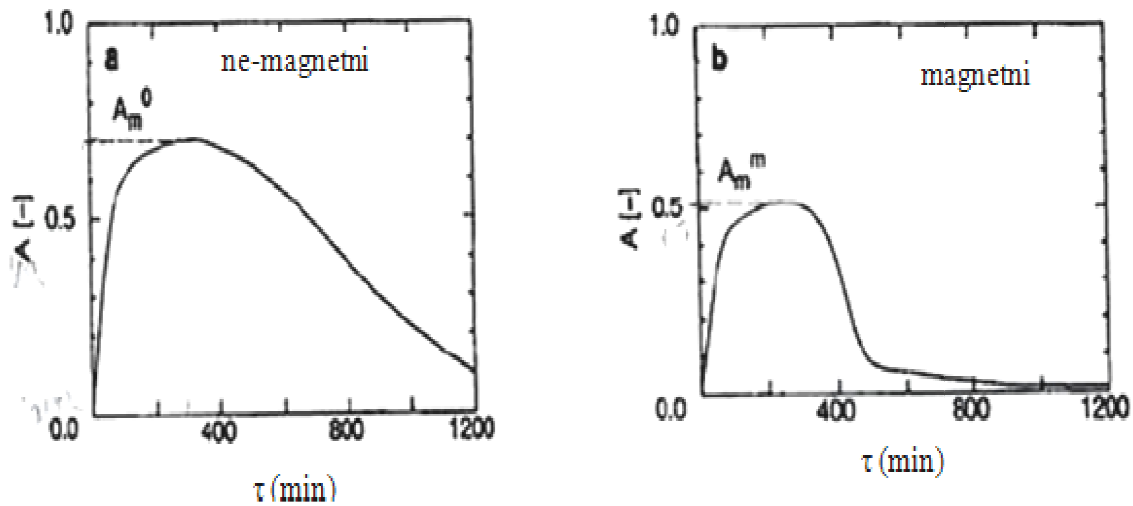
### 3.2.4.2 Raziskave MOV s statičnim magnetnim poljem

Raziskave na področju MOV z uporabo permanentnih magnetov grede v smeri statične in dinamične obdelave. Nekateri raziskovalci izvajajo eksperimente na kemijsko pripravljenih raztopinah, drugi pa na vodovodni vodi.

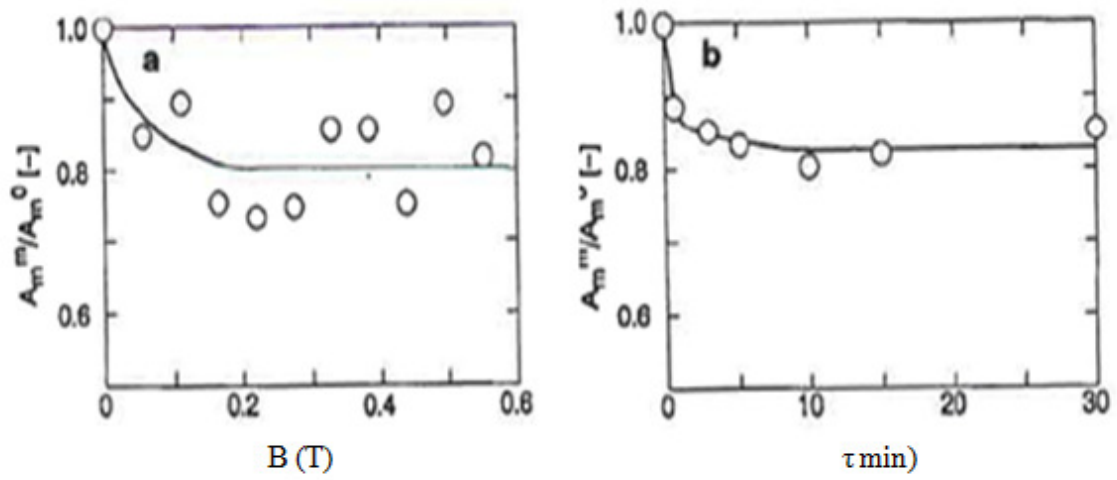
Higashitani in njegova ekipa<sup>13</sup> poroča da statična magnetna obdelava zavira jedrenje in pospeši kristalno rast  $\text{CaCO}_3$  iz prenasočene raztopine. Pri tem nastane manj velikih kristalov z večjim deležem aragonita. Raziskave so bile izvedene na laboratorijsko pripravljenih raztopinah.

Raziskovali so prav tako časovno spreminjanje absorbance  $A$  kot merila motnosti zaradi procesa jedrenja in kristalne rasti kalcijevega karbonata. (slika 3.4) Začetni dvig absorbance je zaradi nastajanja novih delcev. Nato sledi padanje absorbance zaradi usedanja večjih delcev.  $A_m$  predstavlja maksimalno vrednost  $A$  in je v primeru magnetne obdelave nižja (slika 3.4 b), kar pomeni, da je zavirano jedrenje in pospešena kristalna rast. Optimalne pogoje za pospešeno rast so določili pri magnetni obdelavi, kjer je jakost magnetnega polja saj 0,3 im zadrževalni čas vsaj 10 min. Zanimivo je dejstvo, da magnetni spomin traja še 120 ur po magnetni obdelavi (slika 3.6).

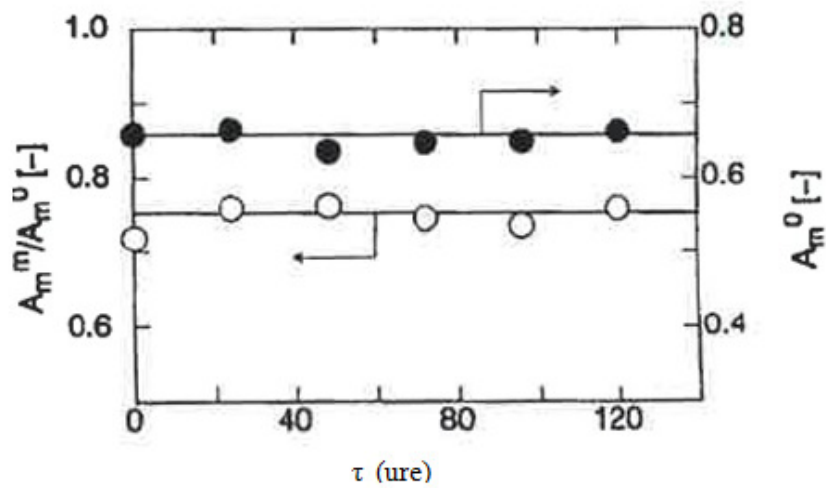
Eksperimentalno so opazovali časovno spreminjanje števila delcev  $N$  oziroma povečane velikost usedenih delcev. Ugotovili so, da z rastočo jakostjo magnetnega polja in povečanim zadrževalnim časom raste velikost delcev, njihovo število pa pada. To nakazuje, da magnetna obdelava vode zavira jedrenje in pospešuje kristalno rast (slika 3.5).



)<sup>13</sup>



Slika 3.5 Sprememba števila delcev v odvisnosti od magnetnega polja(a) in od časa (b)

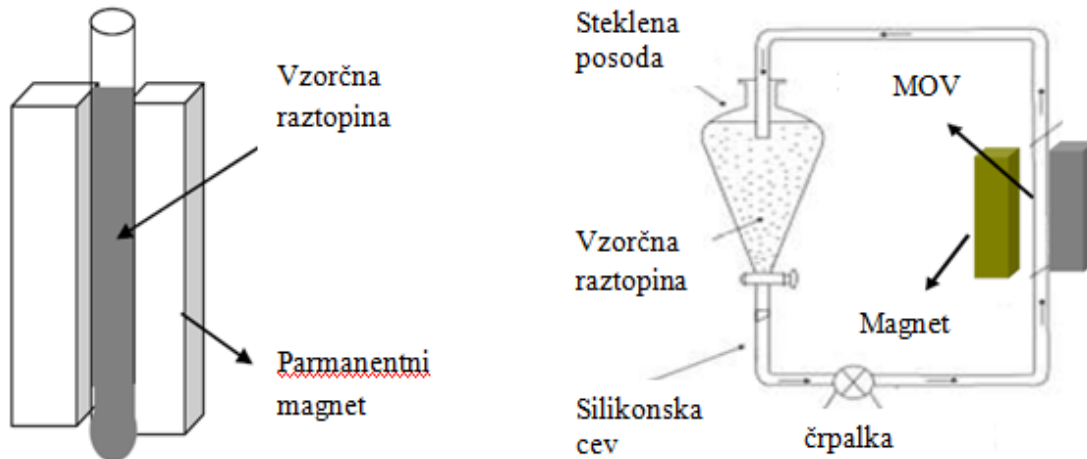


Slika 3.6: Magnetni spomin



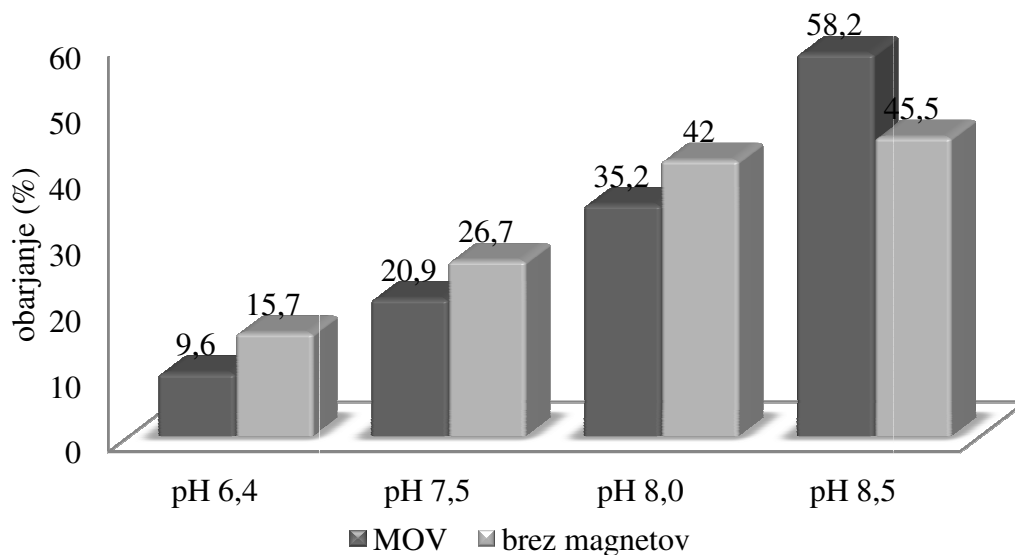
### 3.2.4.3 Raziskave MOV na dinamično magnetno polje

Raziskovalna ekipa iz Indonezije pod vodstvom Nelsona Saksona<sup>24</sup> je raziskovala učinkovitost obarjanja kalcijevega karbonata z MOV v statičnem in dinamičnem fluidnem sistemu (slika 3.7). Uporabljali so pripravljeno karbonatno raztopino vode, ki je vsebovala le  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{3-}$  in  $\text{HCO}_3^-$  ione.



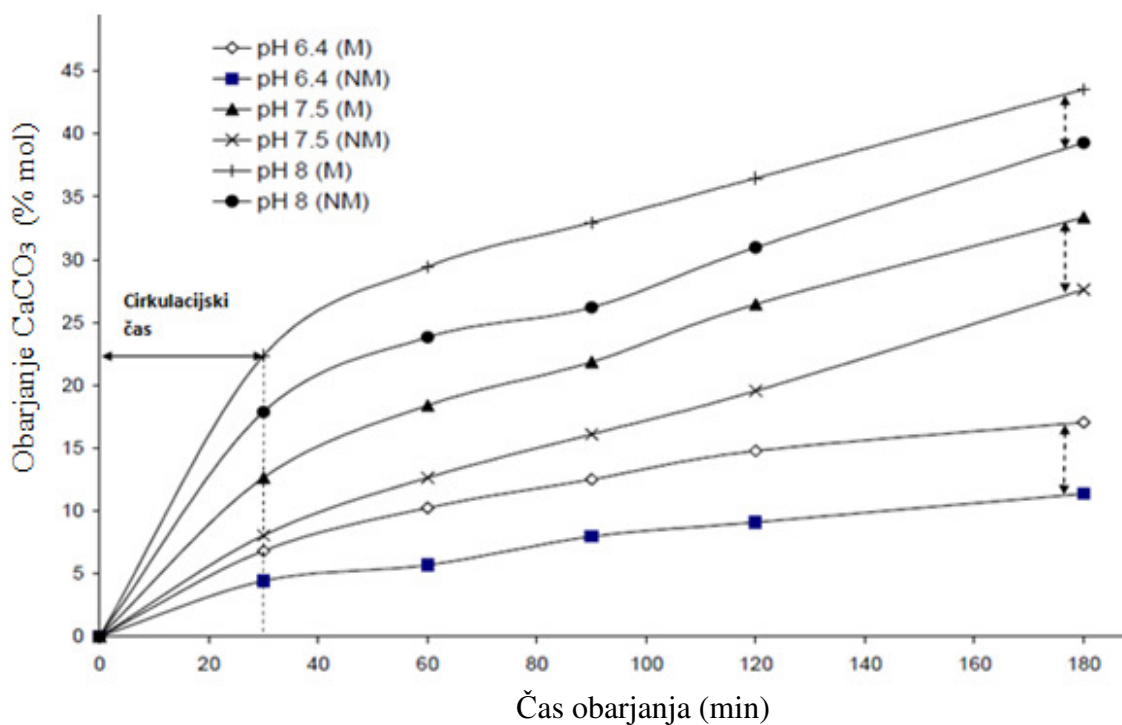
Slika 3.7: Magnetna obdelava v statičnem in dinamičnem fluidnem sistemu<sup>24</sup>

Zanimalo jih je, kako vpliva sprememba pH, cirkulacijski čas in pretok, na obarjanje  $\text{CaCO}_3$ . Prvi eksperimentalni del s permanentnimi magneti so izvedli za statičen fluid. Rezultat je pokazal, da se pri povečanju pH od 6,4 – 8 z MOV obarjanje zmanjša, poveča pa pri 8,5 v primerjavi z obarjanjem brez magnetov (slika 3.8).



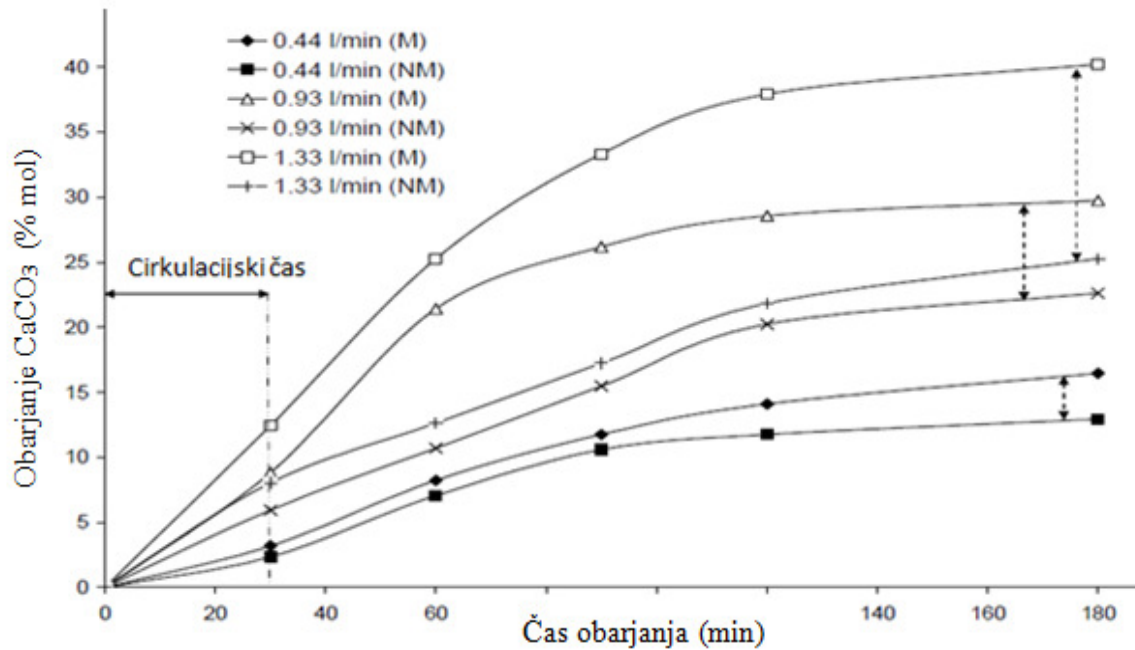
Slika 3.8: Vpliv pH na obarjanje kalcijevega karbonata pri magnetni in nemagnetni obdelavi<sup>24</sup>

Ekperimentalni del pri dinamičnem fluidnem sistemu kaže na povečanje obarjanja s povečanjem pH, cirkulacijskega časa in pretoka. Kot kaže spodnja (slika 3.9), se z magnetno obdelavo in s povečanjem pH povečuje obarjanje, ki je višje v primerjavi z nemagnetno obdelavo. S tem so ugotovili, da so učinki magnetne obdelave vode pri dinamičnem in statičnem sistemu med seboj različni. Pri statičnem fluidnem sistem verjetno velja, da se krepi hidratacija vode z namagnetnimi ioni, kar zmanjša obarjanje. Pri dinamičnem fluidnem sistemu pa naj bi imela Lorentzova sila in magnetno-hidrodinamični učinek pomembno vlogo pri povečanju deleža obarjanja.



Slika 3.9: Različne vrednosti pH pri (M) magnetni obdelavi in (NM) nemagnetni obdelavi vode<sup>24</sup>

Podobno kot v naši raziskavi, jih je zanimalo, kako vpliva spreminjanje hitrosti pretoka na magnetno obdelavo vode (slika 3.10). Raziskovali so s pretoki 0,44 l/min, 0,93 l/min in 1,33 l/min. Ugotovili so, da se z povečanjem hitrosti pretoka delež obarjanja kalcijevega karbonata povečuje. Obarjanje  $\text{CaCO}_3$  naj bi se z MOV povečalo za kar 59 krat.



Slika 3.10: Spreminjanje hitrosti pretoka pri (M) magnetni in (NM) nemagnetni obdelavi vode<sup>24</sup>

Wan Salida, in Johan S.<sup>25</sup> sta prav tako spreminjala hitrosti pretokov pri različnih cirkulacijskih časih izcedne vode. Zanimal ju je učinek odstranjevanja fosforja iz izcedne vode z magnetno obdelavo. Izcedna voda je sestavljena pretežno iz padavinske vode, onesnažene vode iz odplak in reakcijske vode, ki nastaja pri razgradnji odpadkov.

Ugotovila sta, da MOV zmanjšuje koncentracijo fosforja v izcedni vodi. Z povečanjem zadrževalnega časa je pričakovati večji delež odstranjenega fosforja. Z malim pretokom in večjim cirkulacijskim časom dobimo večji delež odstranjenega fosforja, v primerjavi z velikim pretokom in malim cirkulacijskim časom.

#### 3.2.4.4 Učinkovitost MOV

Vpliv šibkega magnetnega polja na kristalizacijo vodnega kamna je v zadnjih desetletjih raziskovalo veliko različnih avtorjev.

Nekatere znanstvene študije<sup>26</sup> nakazujejo, da je MOV neučinkovita. Naprave za magnetno obdelavo vode za domačo rabo naj bi bile prešibke, da bi lahko učinkovito vplivale na zmanjšanje oblog vodnega kamna.

Dolgoletne raziskovane Keisteja<sup>27</sup> kažejo, da se kalcijev karbonat obori v večjem deležu kot aragonit zaradi povečanja vpliva pH, ne pa zaradi magnetne obdelave vode. Pravi, da ni nobene razlike v trdoti vode pri pretvorbi kalcita v aragonit. Trdi, da je uporaba magnetnih naprav dobra tržna taktika prodajati okolju prijazne naprave, ki ne potrebujejo kemijskih substanc za mehčane vode.

Poročilo U.S Army Corps of Engineers<sup>28</sup> opisuje testiranja naprav za magnetno obdelavo vode. Raziskave kažejo da naprave za magnetno obdelavo vode v vročevodnih sistemih ne zmanjšajo nastanka vodnega kamna. Prav tako niso zaznali nobene spremembe v kristalizaciji kalcijevega karbonata v izpostavljenosti magnetov, kakor opisujejo proizvajalci teh naprav.

Številne do sedaj objavljene študije nakazujejo, da naj bi bila količina izločanja  $\text{CaCO}_3$  v splošnem odvisna le od temperature in hitrosti pretoka vode.

Drugi avtorji<sup>33-35</sup> pa poročajo o zmanjšanem nalaganju vodnega kamna v primeru magnetne obdelave vode. Ugotovili so, da se v primeru statične ali dinamične magnetne obdelave vode, ne glede ali imamo pripravljeno raztopino ali pa surovo vodo, poveča delež aragonita v primeru MOV. Prav tako je bilo ugotovljeno, da MOV zavira jedrenje, favorizira izločanje igličaste aragonitne strukture, ki se zaradi vpliva MOV nalaga tako, da je struktura prhka in lahko odstranljiva.

## 4 Izvedba eksperimentalne proge in meritev

Eksperimentalno delo se je izvajalo na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerze v Mariboru v Laboratoriju za termo-energetiko. Upoštevani so bili različni vplivi na izločanje vodnega kamna iz vodovodne vode z magnetno obdelavo, ter rezultati primerjani z vzorci brez uporabe metod za preprečevanje izločanja vodnega kamna.

Eksperiment je sestavljalo več posameznih stopenj. Posamezni del eksperimenta je potekal 10 dni pri delovni temperaturi 80 °C. Med potekom eksperimenta smo zagotovili konstantne pogoje ( pretok, t ), s katerimi smo simulirali dejansko stanje v gospodinjstvu.

### 4.1 Analiza vode uporabljene v eksperimentih

Pri izvajanju eksperimentov se je uporabila vodovodna voda mesta Maribor, katere analiza se je izvedla na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo, preglednica 4.1.

Preglednica 4.1: Analiza vode

Parameter	Vrednost
pH	7,54 (T=21,8 °C)
Prevodnost	526 $\mu$ s/cm (T=20,2 °C)
Skupna trdota	14,7°n
Karbonatna trdota (KT)	12,5°n
Nekarbonatna trdota (NKT)	2,2°n
Kalcijeva trdota (CaT)	10,7°n
Magnezijeva trdota (MgT)	4 °n
m	4,45
Klorid	19 mg/l
Nitratni dušik	4,31 mg/l
Nitrat	19,1 mg/l
Sulfat	32 mg/l
Celotni fosfor	0,04 mg/l
Fosfat	0,12mg/l
Ca <sup>2+</sup>	81,6 mg/l
Mg <sup>2+</sup>	18,3 mg/l
Na <sup>+</sup>	12,9 mg/l

Poseben poudarek eksperimenta je bil odločiti trdoto vode, saj trda voda povzroča največ nevšečnosti v gospodinjskih aparatih, cevovodih in sanitarnih armaturah. Določili smo karbonatno, nekarbonatno, celokupno, kalcijevo in magnezijevo trdoto.<sup>3</sup>

## 4.2 Eksperimentalna proga

Za preučitev raznih dejavnikov magnetne obdelave vode na izločanje vodnega kamna v toplovodnem cevnem sistemu na grelcih bojlerjev smo postavili merilno progo, načrtovano za simulacijo razmer v gospodinjstvu (slika 4.1).

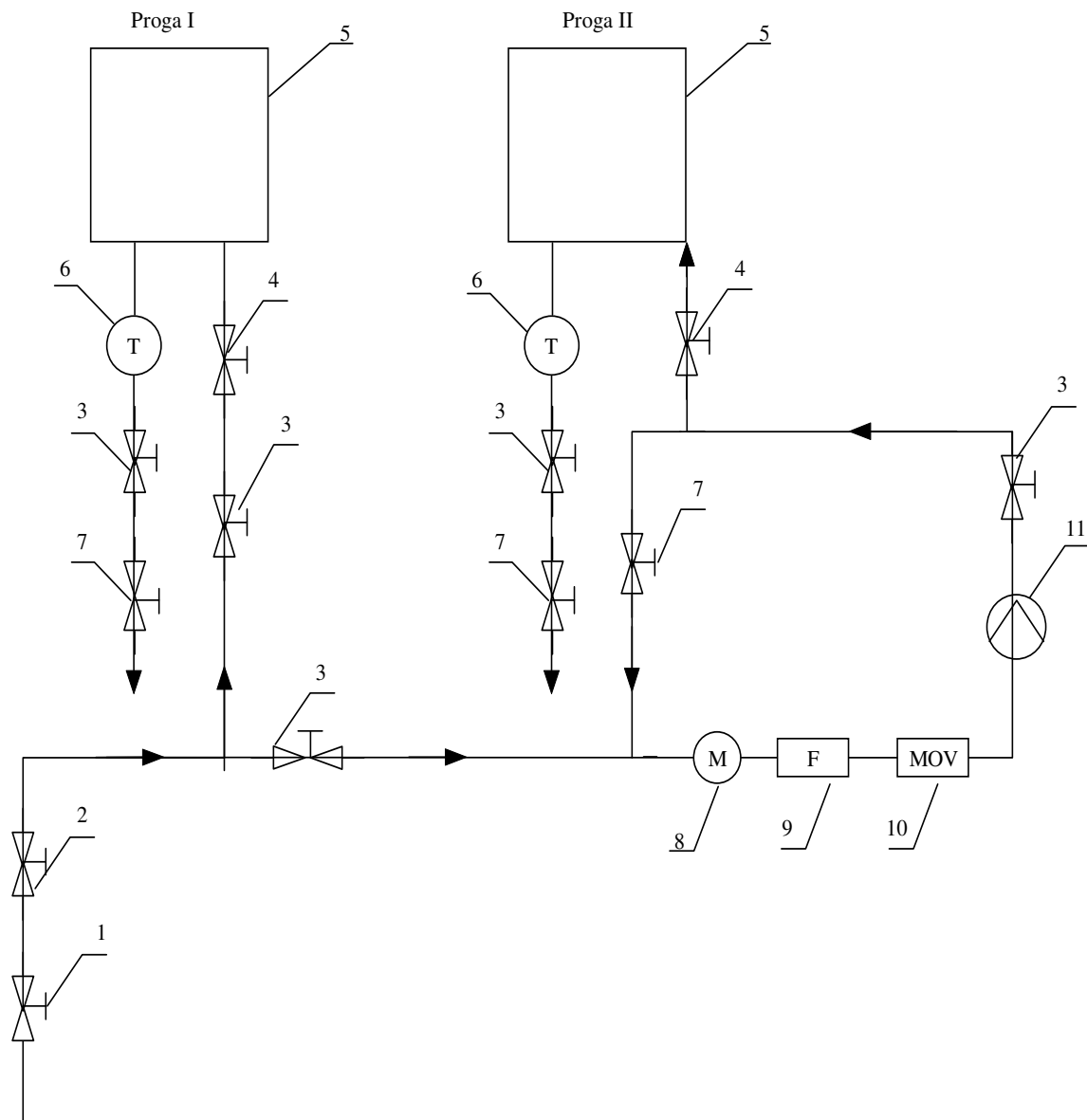
Merilna proga je sestavljena iz primerjalne proge I in proge z magnetno napravo II (slika 4.2).

Proga I je namenjena za primerjavo izločanja vodnega kamna in vključuje bojler (5) s prostornino 30 l, v katerem je vgrajen grelec z močjo 2000W. Na vtoku v bojler je vgrajen ventil z zasunom (3), za regulacijo vtoka in varnostni ventil (4). V iztoku iz bojlerja je termometer (3), ventil z zasunom (3) in pipa (7) za regulacijo na iztoku.

Proga II prav tako vključuje bojler s prostornino 30 l, v katerem je vgrajen grelec z močjo 2000 W. Na vtoku v bojler je vgrajen ventil z zasunom (3), ki omogoča regulacijo vtoka. V zanki so nameščeni pipa za regulacijo pretoka (7), merilec pretoka (8), s katerim merimo obtok v zanki, filter (9), ki je za odstranjevanje netopnih delcev, magnetna naprava (10) in črpalka (11), ki omogoča kroženje vode v zanki. Za zanko je varnostni ventil (4). Na iztoku iz bojlerja so enaki elementi kot v progi I.



Slika 4.1: Merilna proga



Legenda:

- |                       |                                |                     |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1 - vodovodna cev     | 5 – boljer                     | 9 - filter Atlas    |
| 2 - reducirni ventili | 6 – termometer                 | 10 - naprava za MOV |
| 3 - ventil z zasunom  | 7 - pipa za regulacijo pretoka | 11- črpalka         |
| 4 -varnostni ventil   | 8 - merilec pretoka            |                     |

Slika 4.2: Shema merilne proge z napravami

#### 4.2.1 Elementi in naprave testne proge

##### Reducirni ventil

Reducirni ventil je nameščen na začetku eksperimentalne proge, da se zmanjša tlačno nihanje, ki je v našem eksperimentu nezaželen pojav, ker moramo obratovati v pogojih, ki so konstantni in ponovljivi. Reducirni ventil reducira tlak iz vodovodnega omrežja na delovni tlak, ki znaša 2 bara (slika 4.3).



Slika 4.3. Reducirni ventil

##### Filter Atlas

V testno progo II je pred napravo za magnetno obdelavo vode nameščen filter Atlas z velikostjo por 50  $\mu\text{m}$ , z nalogo izločanja drobnih netopnih delcev, ki so prisotni v vodovodni vodi in lahko predstavljajo kalli za pričetek obarjanja vodnega kamna (slika 4.3).



Slika 4.4: Filter Atlas



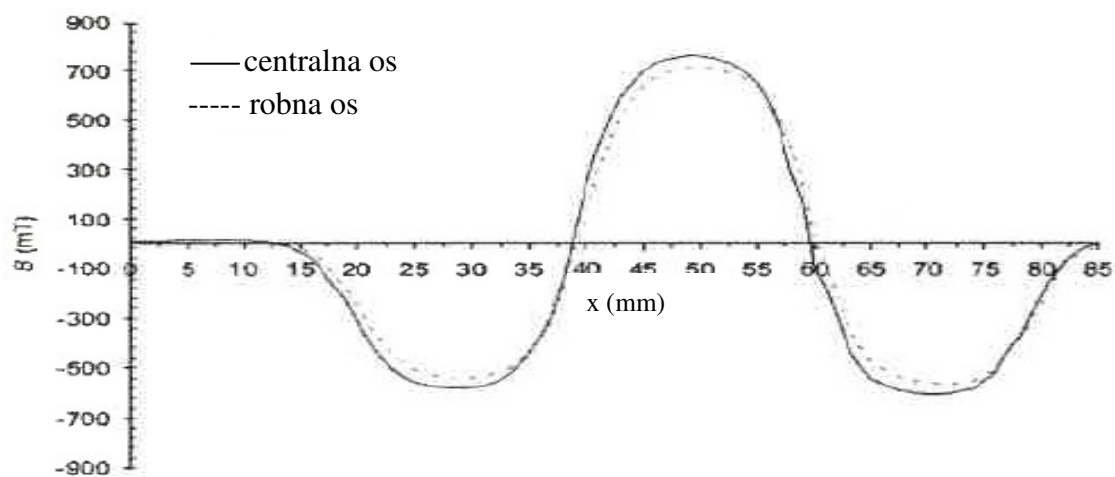
## Magnet Eko MIDI

Pri eksperimentalnem delu smo uporabljali magnet Eko MIDI (slika 4.5), katerega testiranje je bilo izvedeno v laboratoriju Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo.



Slika 4.5: Magnetna naprava

Predhodna testiranja so pokazala, da Eko MIDI magnetna naprava z močnim magnetnim poljem (slika 4.6) vpliva na kristalizacijo kalcijevega karbonata v vodovodni vodi, saj zmanjša vsebnost kalcita, ki ne tvori več oblog na grelcih za tolpo vodo.



Slika 4.6: Porazdelitev magnetnega polja v reži magnetne naprave

Izvedb magnetov je več vrst, uporaba je odvisna od vrste pretoka s katerim obratujemo. Magnet, ki smo ga uporabljali, je namenjen za gospodinjske razmere, medtem ko obstajajo tudi večji in močnejši magneti za industrijo.

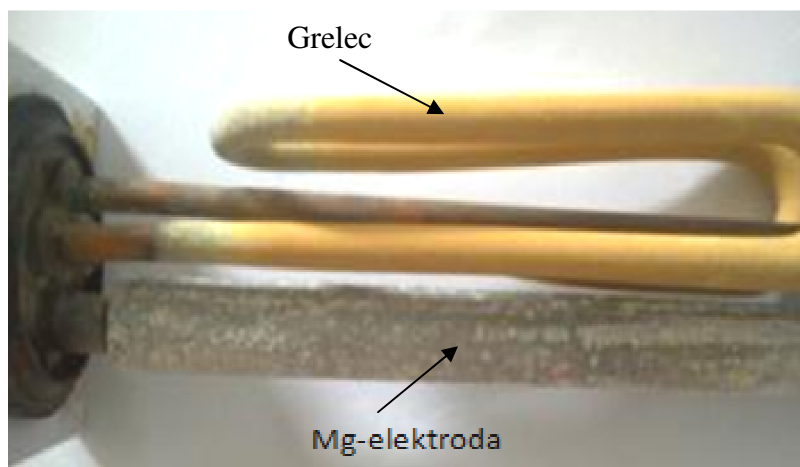
Predvideva se, da Eko MIDI pozitivno vpliva na sistem delovanja saj:

- zmanjšuje popravila,
- znižuje stroške energije za ogrevanja vode,
- eliminira uporabo kemičnih sredstev proti nastajanju vodnega kamna,
- za delovanje ne potrebuje energije,
- odstrani vodni kamen, ki je bil na grelcih že pred njihovo uporabo.

### Grelec in Mg- elektroda

Ekspirimenti so potekali z uporabo grelca moči 2000 W (slika 4.7) in vgrajeno Mg-elektrodo, ki preprečuje nastanek korozije. Dva eksperimenta sta bila izvedena brez Mg-elektrode, ker je bil tako še dodatno opazovan vpliv Mg ionov na izločanje vodnega kamna.

Raziskave s področja zaviranja kristalizacije  $\text{CaCO}_3$  z  $\text{Mg}^{2+}$  ioni poročajo, da  $\text{Mg}^{2+}$  ioni vplivajo na vrsto kristalizacije. Predvideva se, da že majhne koncentracije  $10^{-3}$  mol/l magnezijevih ionov zavirajo nastanek kalcitne kristalne oblike.



Slika 4.7: Grelec in Mg- elektroda

### 4.3 Izračun in meritve značilnih parametrov

Glavni namen diplomskega dela je bil analizirati vpliv različnih hitrosti pretoka skozi magnetno napravo za preprečevanje nastajanja vodnega kamna. Poročila različnih avtorjev pravijo, da magnetna naprava deluje optimalno, če je hitrost pretoka vode v mejah 0,5 do 2 m/s. Da bi tezo potrdili smo izvedli tri eksperimente, ki so 10 dni pri konstantnih pogojih potekali na obeh progah pri različnih hitrostih:

1. eksperiment -  $v = 0,11$  m/s,
2. eksperiment -  $v = 1,25$  m/s,
3. eksperiment -  $v = 2,5$  m/s,

V nadaljevanju smo se osredotočili še na vpliv  $Mg^{2+}$  ionov na izločanje vodnega kamna. Zato smo dodatno izvedli še dva eksperimenta pri enakih pogojih:

4. eksperiment -  $v = 0,11$  m/s brez Mg-elektrode v obeh linijah,
5. eksperiment -  $v = 1,25$  m/s brez Mg-elektrode v obeh linijah.

Vpliv različne hitrosti skozi magnetno napravo na izločanje vodnega kamna smo ugotavljali pri naslednjih vhodnih podatkih:

- moč grelca  $P = 2000$  W,
- hitrost vode med 0,11 m/s do 2,5 m/s,
- specifična kapaciteta vode  $c_p = 4,3$  kJ/kgK,
- temperatura vode na vtoku  $t_1 = 15^\circ\text{C}$
- temperaturi vode na iztoku  $t_2 = 80^\circ\text{C}$
- karakteristike magnetne naprave:
  - širina reže 0,405 cm,
  - dolžina reže 1,8 cm

#### 4.3.1 Prvi eksperiment - brez obtoka pri hitrosti 0,11 m/s

Volumski pretok skozi bojlerja brez (proga I) in z magnetom (proga II), da smo zagotovili temperaturo okoli 80 °C je znašal:

Toplotni tok:

$$\phi = q_m \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.1)$$

Masni pretok:

$$q_m = \frac{\phi}{c_p \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4.2)$$

$$q_m = \frac{2000W}{4,2kJ / kgK \cdot 60K}$$

$$q_m = 0,0078kg / s$$

Volumski pretok:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad (4.3)$$

$$q_v = \frac{0,0078kg / s}{1kg / l} = 468ml / min$$

Hitrost skozi magnetno napravo je znašala:

Presek:

$$S = a \cdot b$$

$$S = 0,729cm^2 = 7,29 \cdot 10^{-5} m^2$$

Preračunamo na povprečno vrednost pretoka:

Hitrost

$$q_v = 500ml / min = 8,3 \cdot 10^{-6} m^3 / s$$

$$v = \frac{q_v}{S} \quad (4.4)$$

$$v = \frac{8,3 \cdot 10^{-6} m^3 / s}{7,29 \cdot 10^{-5} m^2} = 0,11m / s$$

#### 4.3.2 Drugi. eksperiment - pri hitrosti $v = 1,25 \text{ m/s}$

V drugem eksperimentu je bil iztok iz obeh bojlerjev enak kot v prvem eksperimentu in znašal  $q_v = 500 \text{ ml/min}$ , da smo zagotovili temperaturo vroče vode okoli  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Volumski pretok v progi II z magnetom, znotraj obtoka, da smo dosegli hitrost pretoka vode skozi magnetno napravo  $1,25 \text{ m/s}$  je znašal:

$$q_v = v \cdot S$$

$$q_v = 1,25 \text{ m/s} \cdot 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 9,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} = 5,47 \text{ l/min}$$

Ker je znotraj obtoka ves čas odtekalo  $500 \text{ ml/min}$  obdelane vode v bojler, se mora na merilcu pretoka odčitati vrednost :

$$q_v = q_v (\text{skozi magnet}) - q_v (\text{iztok})$$

$$q_v = 5,47 \text{ l/min} - 500 \text{ ml/min}$$

$$q_v = 4,97 \text{ l/min}$$

#### 4.3.3 Tretji. eksperiment: pri hitrosti $v = 2,5 \text{ m/s}$

Eksperiment je potekal na progi z magnetno napravo z iztokom  $500 \text{ ml/min}$ . Da smo zagotovili skozi magnetno napravo hitrost  $2,5 \text{ m/s}$ , se mora na merilcu pretoka odčitati vrednost:

$$q_v = q_v (\text{skozi magnet}) - q_v (\text{iztok})$$

$$q_v = 10,94 \text{ l/min} - 500 \text{ ml/min}$$

$$q_v = 10,44 \text{ l/min}$$

Volumski pretok skozi magnet je dobljen z enačbo:

$$q_v = v \cdot S$$

$$q_v = 2,5 \text{ m/s} \cdot 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$q_v = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 10,94 \text{ l/min}$$

#### **4.3.4 Četrti eksperiment**

V obeh progah smo izločili Mg-elektrodo in eksperiment ponovili pri pogojih za zagotovitev hitrosti 0,11 m/s.

#### **4.3.5 Peti eksperiment**

Ponovno smo v obeh progah izločili Mg-elektrodi in eksperiment ponovili pri pogojih potrebnih za zagotovitev hitrosti 1,25 m/s.

## 5 Rezultati in diskusija

Vpliv lastnosti pretoka vode skozi magnetno napravo in vpliv  $Mg^{2+}$  ionov na izločanje vodnega kamna iz neobdelane vode smo sistematsko opazovali v nizu eksperimentov. Vsi eksperimenti so potekali neprekinjeno 10 dni pri  $t = 80\text{ °C}$  in delavnem tlaku 2 bara. Na osnovi predpostavke, da se kemijska sestava vode tekom izvajanja poskusov ni spremenila, smo upoštevali konstantno trdoto vode  $14,7\text{ °d}$  in konstantno koncentracijo  $Mg^{2+}$  ionov  $18,3\text{ mg/l}$ . V nadaljevanju so podani rezultati posameznih eksperimentov.

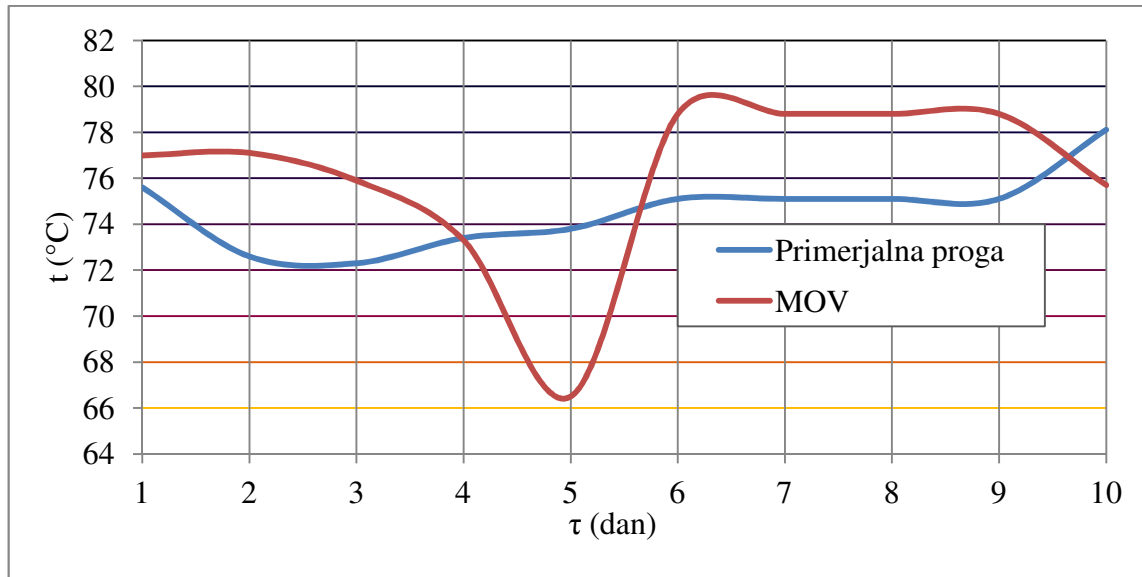
### 5.1 Prvi eksperiment - $v = 0,11\text{ m/s}$

Prvi eksperiment je potekal 10 dni, pri konstantnih pogojih z vključeno primerjalno progo in progo za magnetno obdelavo vode. V preglednici 5.1 in na slikah 5.1 in 5.2 so mejni parametri med potekom eksperimenta. Prikazana sta sliki odlučenega vodnega kamna (slika 5.3 in 5.4).

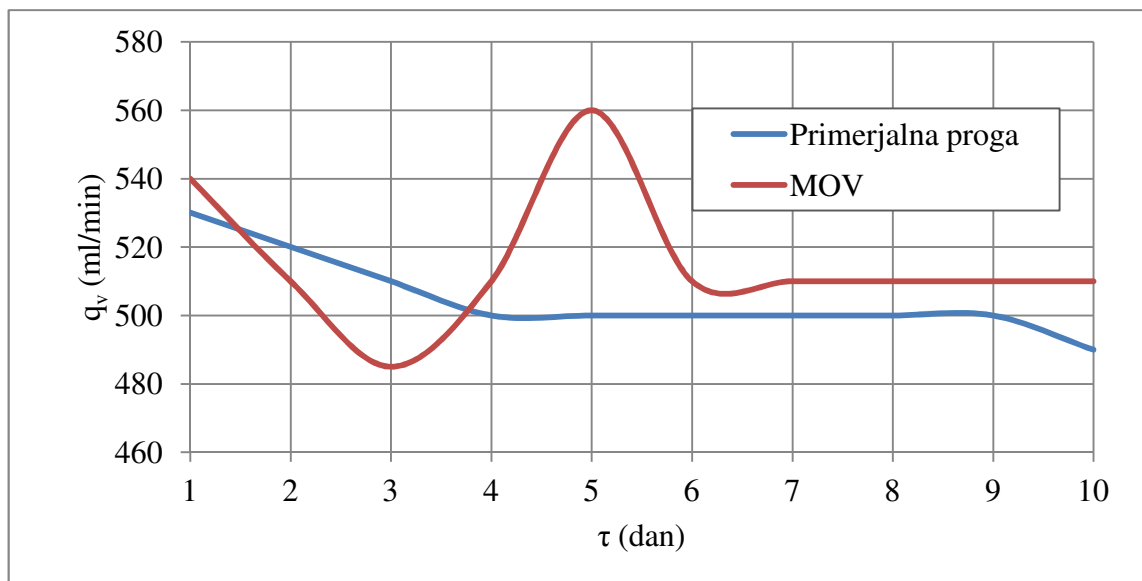
Preglednica 5.1: Odvisnost temperature in pretoka med prvim eksperimentom

Dan	Primerjalna proga		MOV	
	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)
1	75,6	530	77	540
2	72,6	520	77,1	510
3	72,3	510	75,9	485
4	73,4	500	73,3	510
5	73,8	500	66,5	560
6	75,1	500	78,8	510
7	75,1	500	78,8	510
8	75,1	500	78,8	510
9	75,1	500	78,8	510
10	78,1	490	75,7	510

Iz rezultatov sledi, da je povprečna temperatura tekom eksperimenta v primerjalni progi bila  $74,2\text{ °C}$ , v progi z MOV pa  $75,6\text{ °C}$ . Povprečni pretok v prvi progi pa  $505\text{ ml/min}$  in v drugi  $520\text{ ml/min}$ .



Slika 5.1: Spreminjanje temperature med 1. eksperimentom



Slika 5.2: Spreminjanje pretoka med 1. eksperimentom

Po končanem eksperimentu smo primerjali še vzorce vodnega kamna. Izkazalo se je, da je v liniji 2 z MOV nastalo nekoliko manj vodnega kamna, povprečna debelina lusk je bila 2,5 mm, v liniji 1 pa 3,5 mm (slika 5.3).





Slika 5.3: Izločen vodni kamen v primerjalni in magnetni progi.

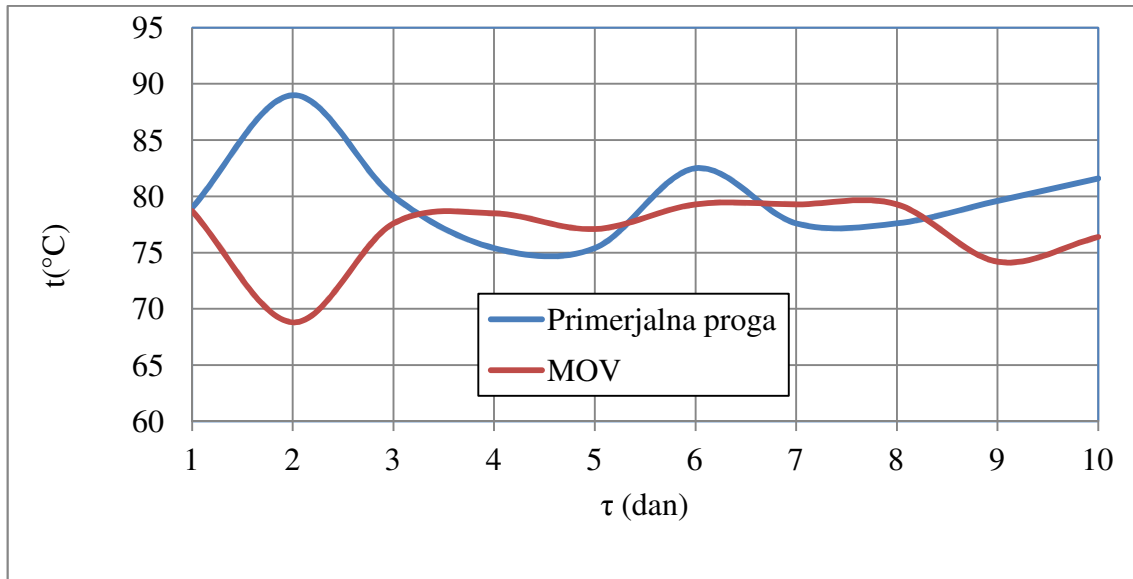
## 5.2 Drugi eksperiment - $v = 1,25$ m/s

Drugi eksperiment je prav tako potekal 10 dni pri konstantnih pogojih z vključeno primerjalno progo in progo z magnetno obdelavo vode. Da smo skozi magnetno napravo zagotovili hitrost 1,25 m/s smo nastavili obtok na merilcu pretoka na 5 l/min. Značilni parametri so razvidni v preglednici 5.2 in slikah 5.3 in 5.4.

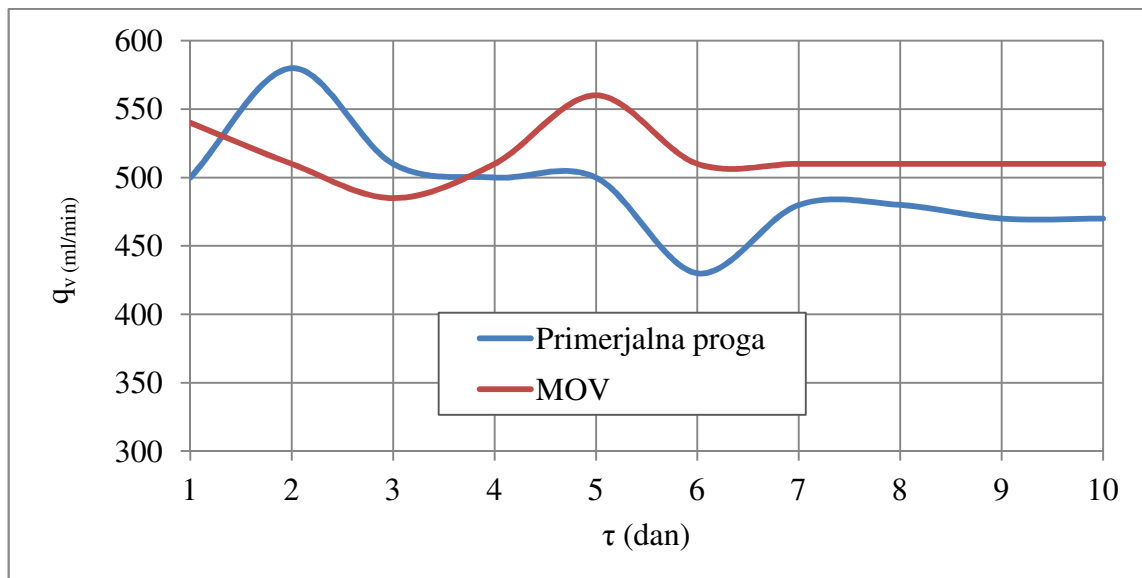
Preglednica 5.2: Odvisnost temperature in pretoka med drugim eksperimentom

Dan	Primerjalna proga		MOV		
	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)	q <sub>v</sub> (l/min)
1	79	500	78,7	540	5
2	89	580	68,8	510	5
3	80	510	77,6	485	5
4	75,4	500	78,5	510	5
5	75,4	500	77,1	560	5
6	82,5	430	79,3	510	5
7	77,6	480	79,3	510	5
8	77,6	480	79,3	510	5
9	79,6	470	74,2	510	5
10	81,6	470	76,4	510	5

Povprečna temperatura med eksperimentom je bila v primerjalni progi 79,8 °C, v progi za magnetno obdelavo vode pa 76,7 °C. Povprečen pretok je bil v prvi progi 492 ml/min v drugi progi pa 512 ml/min.



Slika 5.4: Spreminjanje temperature med 2. eksperimentom



Slika 5.5: Spreminjanje pretoka med 2. eksperimentom

Vzorci vodnega kamna po končanem eksperimentu so pokazali, da ni bistvene razlike med primerjalno progo in progo za magnetno obdelavo vode, vezano na količino in debelino lusk. V obeh primerih je debelina lusk približno 3,5 mm.

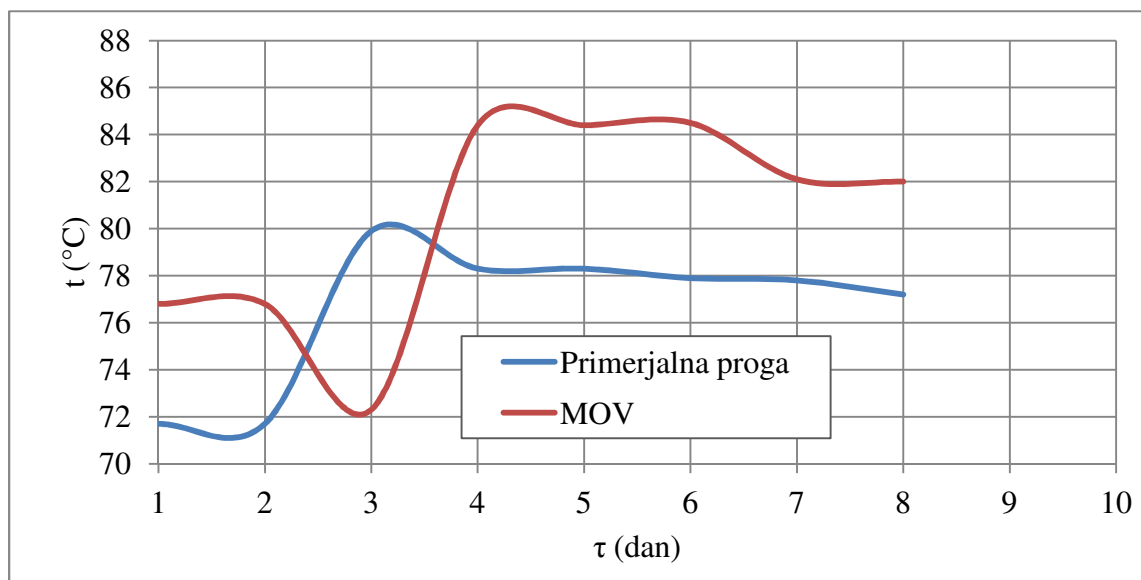
### 5.3 Tretji eksperiment – $v = 2,5 \text{ m/s}$

Eksperiment je potekal 8 dni pri konstantnih pogojih z vključeno primerjalno progo in progo za magnetno obdelavo vode. Da smo zagotovili hitrost  $2,5 \text{ m/s}$  smo na merilcu pretoka nastavili obtok na  $10,5 \text{ l/min}$ . Značilni parametri so razvidni iz preglednice 5.3 in slik 5.5 in 5.6.

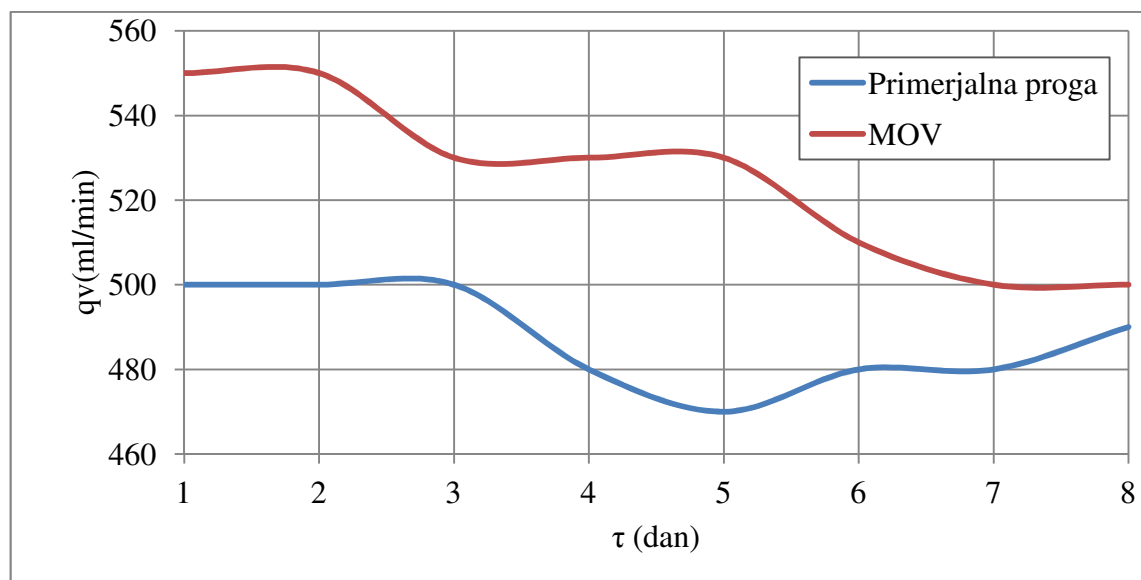
Preglednica 5.3: Odvisnost temperature in pretoka med tretjim eksperimentom:

Dan	Primerjalna proga		MOV		
	$t \text{ (}^\circ\text{C)}$	$q_v \text{ (ml/min)}$	$t \text{ (}^\circ\text{C)}$	$q_v \text{ (ml/min)}$	$q_v \text{ (l/min)}$
1	71,7	500	76,8	550	10,5
2	71,7	500	76,8	550	10,5
3	79,9	500	72,3	530	10,5
4	78,3	480	84,4	530	10,5
5	78,3	470	84,4	530	10,5
6	77,9	480	84,5	510	10,5
7	77,8	480	82,1	500	10,5
8	77,2	490	82,0	500	10,5

Povprečna temperatura med eksperimentom je bila v primerjalni progi  $76,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , v progi za magnetno obdelavo vode pa  $80,92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Povprečen pretok je bil v prvi progi  $488 \text{ ml/min}$ , v drugi progi pa  $525 \text{ ml/min}$ .



Slika 5.6: Spreminjanje temperature med 3. eksperimentom



Slika 5.7 : Spreminjanje pretoka med 3. eksperimentom

Vzorci vodnega kamna v progi za magnetno obdelavo vode se niso razlikovali v primerjavi z drugim eksperimentom. Debelina in količina lusk so bili enaki.



Slika 5.8: Vzorci vodnega kamna v primerjalni (levo) in magnetni (desno) progi

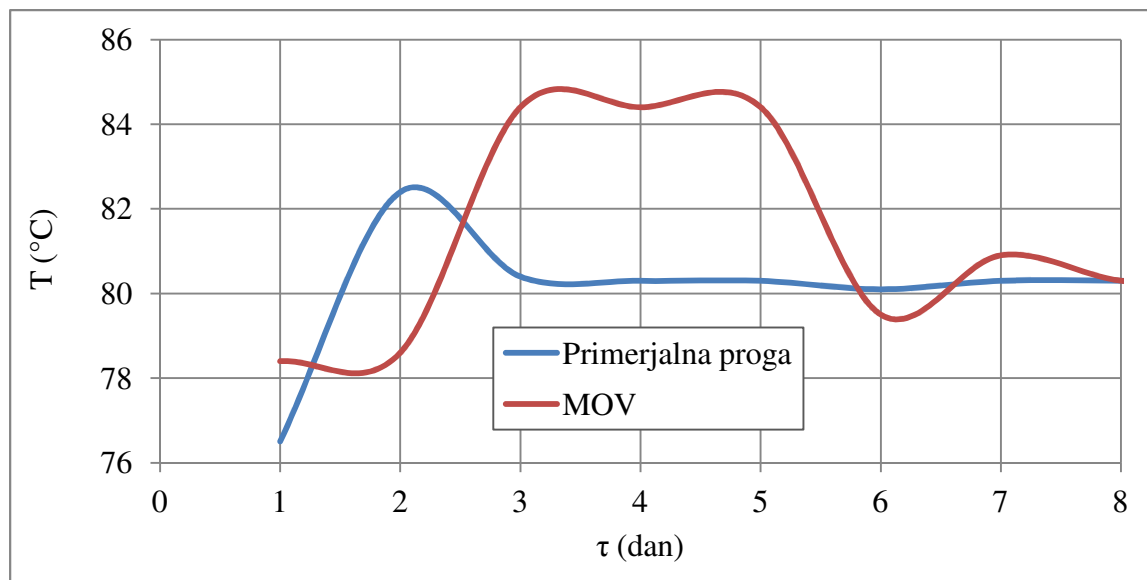
#### 5.4 Četrty eksperiment v = 0,11 m/s, brez Mg – elektrode

Rezultati četrtega eksperimenta so navedeni v preglednici 5.4 in prikazani na slikah 5.8, 5.9 in 5.10.

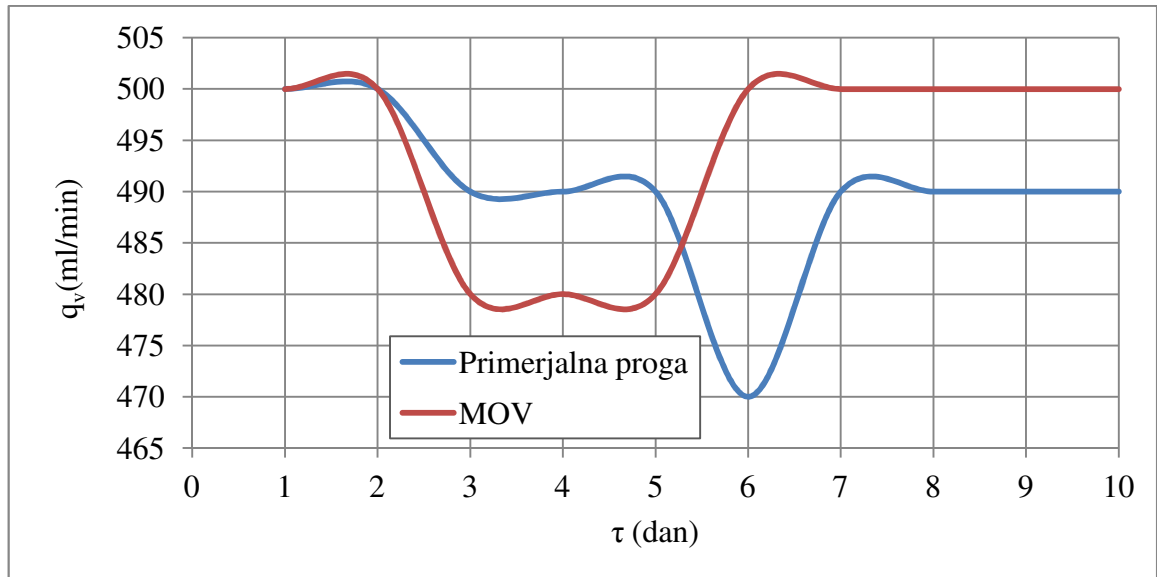
Preglednica 5.4: Odvisnost temperature in pretoka med četrty eksperimentom:

Dan	Primerjalna proga		MOV	
	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)	t (°C)	q <sub>v</sub> (ml/min)
1	76,5	500	78,4	500
2	82,4	500	78,6	500
3	80,4	490	84,4	480
4	80,3	490	84,4	480
5	80,3	490	84,4	480
6	80,1	470	79,5	500
7	80,3	490	80,9	500
8	80,3	490	80,3	500
9	80,2	490	80,2	500
10	80,0	490	80,6	500

Povprečna temperatura med eksperimentom je bila v primerjalni progi 80 °C v progi za magnetno obdelavo pa 81 °C. Povprečni pretok je bil v prvi progi 490 ml/min v drugi progi pa 494 ml/min.



Slika 5.9: Spreminjanje temperature med 4. eksperimentom



Slika 5.10: Spreminjanje pretoka med 4. eksperimentom

Četrti eksperiment, ki je potekal brez Mg-elektrode je dal najboljše rezultate glede zmanjšanja izločenega vodnega kamna. V progi z MOV se je izločilo bistveno manj vodnega kamna kot v primerjalni progi in je bila pokrita s čisto tanko plastjo vodnega kamna. Grelec v primerjalni progi je bil v celoti pokrit z debelo plastjo kamna.



Slika 5.11: Število lusk izločenih v primerjalni progi (levo) in v magnetni progi (desno)

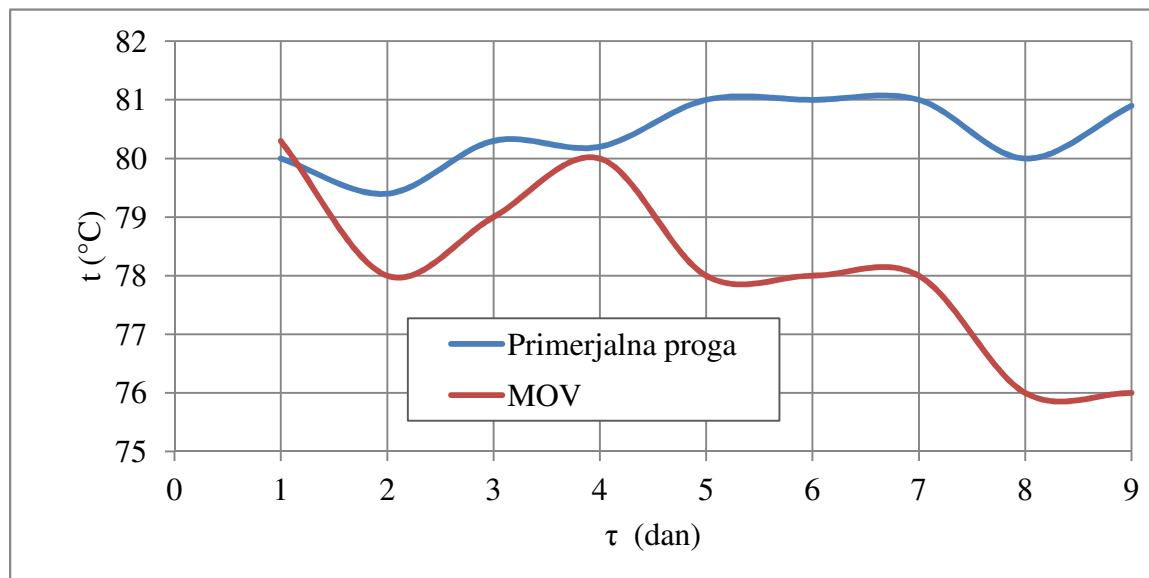
## 5.5 Peti eksperiment - $v = 1,25 \text{ m/s}$ , brez Mg-elektrode

Rezultati petega eksperimenta so navedeni v preglednici 5.5 in prikazani na slikah 5.11, 5.12 in 5.13.

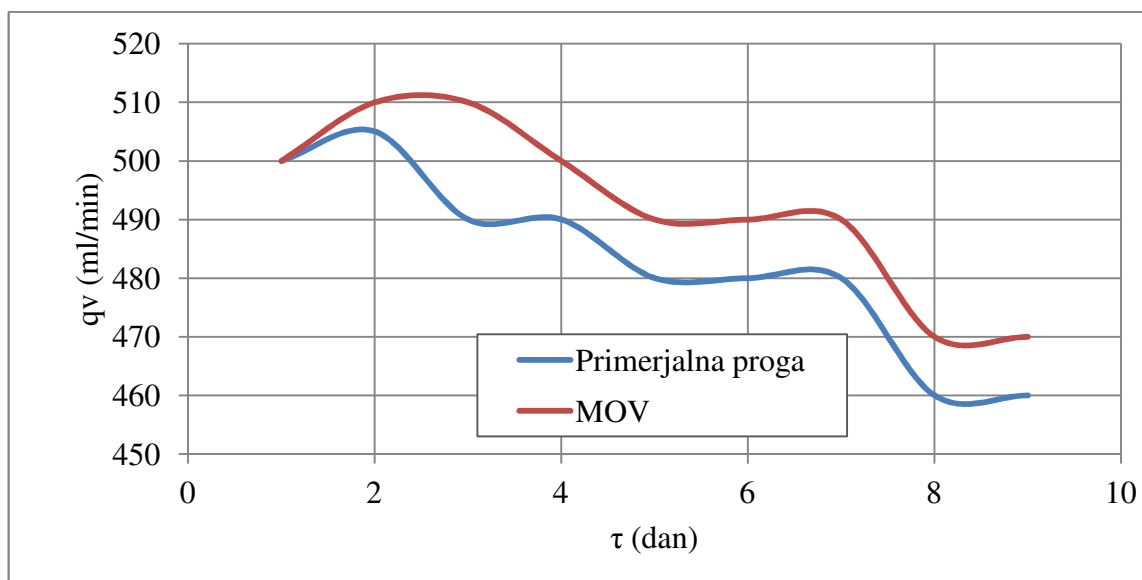
Preglednica 5.5: Odvisnost temperature in pretoka med petim eksperimentom:

Dan	Primerjalna proga		MOV		
	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$q_v$ (ml/min)	$t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$q_v$ (ml/min)	obtok
1	80	500	80,3	500	5
2	79,4	505	78	510	5
3	80,3	490	79	510	5
4	80,2	490	80	500	5
5	81	480	78	490	5
6	81	480	78	490	5
7	81	480	78	490	5
8	80	460	76	470	5
9	80,9	460	76	470	5

Povprečna temperatura med eksperimentom je bila v primerjalni progi  $80^{\circ}\text{C}$  v progi za magnetno obdelavo pa  $78^{\circ}\text{C}$ . Povprečen volumski pretok v prvi progi pa  $483 \text{ ml/min}$  in v drugi  $492 \text{ ml/min}$ .



Slika 5.12: Spreminjanje temperature med 5. eksperimentom



Slika 5.13: Spreminjanje pretoka med 4. eksperimentom

Peti eksperiment je prav tako potekal brez Mg-elektrode in je dal še boljše rezultate od zadnjega eksperimenta glede zmanjšanja vodnega kamna. V progi z MOV, kjer je bil obtok skozi magnet 1,25 m/s, se je izločilo bistveno manj vodnega kamna kot v primerjalni liniji. Grelec v MOV je bil komaj vidno prekrit s tanko plastjo vodnega kamna (slika 5.13).



Slika 5.14: Grelec v primerjalni progi





Slika 5.15: Grelec pri MOV

## 6 Zaključek

Za preučitev raznih dejavnikov magnetne obdelave vode smo postavili merilno progo s katero smo simulirali razmere v gospodinjstvu. Merilna proga je bila sestavljena iz primerjalne in proge z magnetno napravo Eko MIDI.

Eko MIDI magnetna naprava z močnimi magneti vpliva na kristalizacijo kalcijevega karbonata v vodovodni vodi in zmanjša vsebnost kalcita, ki tvori težko odstranljive obloge na grelcih za vročo vodo. Prav tako zmanjša stroške in toplotne izgube pri ogrevanju z vodo.

V diplomskem delu smo analizirali vpliv različnih hitrosti pretoka skozi magnetno napravo za preprečitev nastajanja vodnega kamna. Predvideva se, da magnetna naprava deluje optimalno, če je hitrost pretoka vode v mejah od 0,5 do 2 m/s.

Pri začetnih eksperimentih je bila zraven grleca nameščena Mg-elektroda, katere vpliv na izločanje vodnega kamna še ni povsem raziskan. Različni avtorji poročajo, da Mg-elektroda zmanjša korozijo in vpliva na kristalizacijo vodnega kamna. Ugotovili smo, da pri eksperimentih z Mg-elektrodo ni bistvene razlike v količini in debelini izločenega kamna med primerjalno in magnetno progo.

Zato smo izvedli še dodatna eksperimenta brez Mg-elektrod. Dobili smo bistveno boljše rezultate glede zmanjšanja količine vodnega kamna. Bistveno je bilo zmanjšanje vodnega kamna na grelcu magnetne proge. Učinek magnetne obdelave vode se je še povečal z povečano hitrostjo skozi magnetno napravo. Zato predvidevamo, da se z dodatkom Mg-elektrode vpliv MOV izrazito zmanjša.

Opravljen delo bi se dalo v prihodnosti nadgraditi z dodatnimi raziskavami Mg-elektrod na učinkovitost delovanja magnetne naprave. Prav tako pa tudi razširiti optimalne pogoje obratovanja magnetne naprave za preprečevanje nastajanja vodnega kamna na gospodinjskih aparatih.

## 7 Literatura

1. Ozim V., Kratek pregled kemije in tehnologije industrijske uporabe vode, zbrano Gradivo. Maribor: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 1988.
2. Korać V., Tehnologija vode. Zagreb: Arhitektonsko-gradževinsko-geodetski fakultet, 1962.
3. Trdota vode, [http://www2.arnes.si/~fperdi/VKI\\_3.html](http://www2.arnes.si/~fperdi/VKI_3.html) (dostop: maj 2012).
4. Statistični urad republike Slovenije, Pogled na vode v Sloveniji, Ljubljana, 2007. [http://www.stat.si/doc/pub/Pogled\\_na\\_vode\\_v\\_Sloveniji.pdf](http://www.stat.si/doc/pub/Pogled_na_vode_v_Sloveniji.pdf)
5. Doberšek, D., Optimizacija vročevodnega omrežja in vpliv vodnega kamna na prenostopote grelnih površin, doktorska disertacija, UM-FKKT, 2009
6. Hochleiter R., Mineralien, Bestimmen, Kennenlernen, Sammeln, Gondrom Bindlach, 2002
7. <http://www.zsholubyho.sk/geol%C3%B3gia/mikrosvet/mikrosvet/kalcit2.jpg>
8. Mindat.org - the mineral and locality database, <<http://www.mindat.org/>>.
9. Doberšek, D., Goričanec, D., Kropčič, J., The Influence of Physico – chemical Parameters on Water Scale Precipitation on Washing Machines' Heaters, Acta chim.Slov., 2007; 54/4, 719-724
10. Kristiansen, H., The calcium concentration at different temperatures as function of the pH for water in a carbonate equilibrium, *Vatten*. 1975; **1/75**, 7 – 15.
11. [http://www.ionizirana-voda.net/ionski\\_izmenjevalec.html](http://www.ionizirana-voda.net/ionski_izmenjevalec.html) (dostop: junij 2012)
12. Donaldson, J. D., Magnetic treatment of fluids – preventing scale, HDL, Symposia at the University of York Aston, 1988; 117.
13. Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K., Hatade, S., Effects of magnetic field on the formation of CaCO<sub>3</sub>, *Journal of colloid and interface science*, 1993; **156** 90 – 95.
14. Črepinsek - Lipus, L., Doberšek, D., Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. *Chem. eng. sci.*, 2007; **62/7**, 2089-2095.
15. Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K., Hatade, S., Effects of magnetic field on the formation of CaCO<sub>3</sub>, *Journal of colloid and interface science*, 1993; **156** 90 – 95.
16. Lipus L.c, Črepinsek L, Dispersion Destabilization in Magnetic Water Treatment, *Journal of Colloid and Interface Science* **236**, (2001), pp.60–66
17. <http://www.pur-lendava.com/elektroMagneti.html> (dostop: junij 2012)
18. E. Dalas: The effect of ultrasonic field on calcium carbonate scale formation, *Journal of Crystal Growth* 222 (2001) 287±292
19. Kristalna zgradba vaterita: [http://fserver.unimb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA\\_UC/RAT1\\_4/3\\_6\\_4\\_heksagonalna\\_gosta\\_kristalna\\_zgradba.html](http://fserver.unimb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/RAT1_4/3_6_4_heksagonalna_gosta_kristalna_zgradba.html)
20. Kristal vaterit. <http://en.wikipedia.org/wiki/Vaterite> (dostop junij 2012)
21. Agencija republike Slovenije za okolje, v [http://www.arso.gov.si/soer/celinske\\_vode.html](http://www.arso.gov.si/soer/celinske_vode.html) (dostop junij 2012)
22. [http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/programi/program\\_podzemne\\_2007.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/podzemne%20vode/programi/program_podzemne_2007.pdf)
23. V. Kozic, Magnetic field analysis on electromagnetic water treatment device, *Hungarian journal on industrial chemistry, Veszperm*, Vol. 34. pp. 51-54 (2006)

24. Nelson Saksono : *Effect magnetic field on calcium carbonate precipitation in static and dynamic fluid systems*, 14TH regional symposium chemical engineering, 2007, ISBN 978-979-16978-0-4
25. Wan Salida, *Effect of Magnetic Field on Phosphorus Removal in Leachate*, UMTAS 2011
26. Busch, K.W; Busch, M.A (1997). *"Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction"*, USA, 1997
27. Keister, T *"Non Chemical Devices: Thirty Years of Myth Busting"*, 2008
28. U.S. Army Corps of Engineers, *Magnetic wather treatment*, Public Works Technical Bulletin, USA, 15 June 2001
29. Paul D. Robillard, *Magnetic Water Treatment Devices*, USA
30. Marjana Simonič: *Priprave in čiščenje vode*, učbenik, Maribor: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2005
31. Reverzna osmoza, <http://najboljsavoda.si/reverzna-osmoza/> (dostop julij 2012)
32. Barret, R.A., Parsons, S.A., 1998. The influence of magnetic fields on calciumcarbonate precipitation. *Water Research* 32 (3), 609–612.
33. Grimes, S.M., 1988. *Magnetic field effect on crystals*. Tube International.
34. Coey, J.M.D., Cass, S., 2000. *Magnetic Water Treatment*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 209, 71–74

## 8 Življenjepis



### Europass življenjepis

#### Osební podatki

Priimek / Ime **Gregor Kravanja**

Naslov Travnerjeva ulica 4  
SI- 2000 Maribor

Telefon +3866132435

Prenosni telefon: +38642908199

E-pošta gregorkravanja@hotmail.com)

Državljanstvo Slovensko

Datum rojstva 3.4.1990

Spol Moški

#### Zaželena zaposlitev / zaželeno poklicno področje

**inženir kemijske tehnologije**

#### Izobraževanje in usposabljanje

Obdobje Od oktobra 2009 do maja 2012

Naziv izobrazbe in / ali nacionalne  
poklicne kvalifikacije Diplomirani inženir kemijske tehnologije (UNI)

Glavni predmeti / pridobljeno znanje in  
kompetence Pridobljeno znanje splošne in organske kemije, kemijske tehnike kot tudi matematike in fizike.

Naziv in status ustanove, ki je podelila  
diplomo, spričevalo ali certifikat Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (FKKT UM),  
Smetanova ulica 17  
2000 Maribor

Stopnja izobrazbe po nacionalni ali  
mednarodni klasifikacijski lestvici 6/2 univerzitetni program (1. bolonjska stopnja)

#### Znanja in kompetence

Materni jezik(i) **Slovenščina**

Drug(i) jezik(i)

Samovrednotenje

Evropska raven (*)	Razumevanje				Govorjenje				Pisanje	
	Slušno razumevanje		Bralno razumevanje		Govorno sporazumevanje		Govorno sporočanje			
<b>Angleščina</b>	C2	Usposobljeni uporabnik	C1	Usposobljeni uporabnik	C1	Usposobljeni uporabnik	C1	Usposobljeni uporabnik	B2	Samostojni uporabnik
<b>Nemščina</b>	B1	Samostojni uporabnik	A2	Osnovni uporabnik	A2	Osnovni uporabnik	A1	Osnovni uporabnik	A1	Osnovni uporabnik
<b>Hrvaščina</b>	C1	Usposobljeni uporabnik	B2	Samostojni uporabnik	B1	Samostojni uporabnik	B1	Samostojni uporabnik	A2	Osnovni uporabnik

Socialna znanja in kompetence	Komunikacijske veščine (član študentskega sveta FKKT UM)
Organizacijska znanja in kompetence	Sistemski pristop in obvladovanje kompleksnosti (posledica zahtevnosti študija)
Tehnična znanja in kompetence	Problematika vodnega kamna na grelnih površinah procesnih naprav (raziskovanje)
Računalniška znanja in kompetence	Dobro poznavanje računalniškega paketa MS Office (Word, PowerPoint, Excel). Poznavanje računalniškega programa The General Algebraic Modeling System (GAMS) .
Umetniška znanja in kompetence	Igranje kitare (samouk)
Druga znanja in kompetence	Napredni potapljač - Advanced Open Water Diver (SSI LEVEL 3).
Vozniško dovoljenje	B kategorija