

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI STUDIJ KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

Smjer: Kemijsko inženjerstvo

Denis Stjepan Vedrina

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE KAPILARNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: dr.sc. Juraj Božičević, red.prof .
Članovi ispitnog povjerenstva: dr.sc. Zoran Gomzi, red.prof .
dr.sc. Antun Glasnović, izv.prof.

Zagreb, 30. studenoga 2001.

ZAHVALA

Najtoplije zahvaljujem svom mentoru, profesoru Juraju Božičeviću, na pomoći, podršci i velikom povjerenju, zbog čega sam u svome radu uistinu uživao.

Zahvaljujem dr. Alojzu Cahariji i mr. Nenadu Bolfu na prijateljstvu i pomoći pri izradi rada, kao i mr. Mladenu Glasneru i znanstvenom novaku Goranu Galincu na pomoći i susretljivosti.

Također zahvaljujem tehničkim suradnicima Aleksandru Spiegelu i Vlatku Badurini, bez kojih bi izrada eksperimentalnog uređaja bila daleko teža.

Sadržaj

Sažetak

1. Uvod	1
2. Opći dio	
2.1 Polazište	2
2.2 Proračun koeficijenta prijenosa topline na stjenkama cijevi	6
2.3 Matematički model procesa u kapilarnom izmjenjivaču topline	8
2.4 Simulacijsko istraživanje	13
3. Eksperimentalni dio	
3.1. Projektiranje i izvedba laboratorijskog uređaja	14
3.2 Eksperimentalno istraživanje	19
4. Rezultati	
4.1 Rezultati simulacijskog istraživanja	20
4.2 Rezultati eksperimentalnog istraživanja	24
5. Rasprava	35
6. Zaključak	37
7. Literatura	38
8. Prilozi	
8.1 Popis oznaka	39
8.2 Simulacijski program	41
8.3 Karakteristike mjernih pretvornika i opreme	48
8.4 Životopis	52

Sažetak

Prikazano je matematičko modeliranje i eksperimentalno istraživanje procesa izmjene topline u kapilarnom izmjenjivaču topline.

Razvijen je matematički model koji povezuje raspoloživo znanje sa područja izmjene topline, te je provedeno simulacijsko istraživanje koje je poslužilo kao osnova za projektiranje i izgradnju posebnog izmjenjivača topline namijenjenog prijenosu uzoraka vlažnih plinova, uz zadržavanje karakterističnih svojstava plina. Opsežnim eksperimentalnim istraživanjem provjeren je postavljen model.

Ključne riječi:

kapilarni izmjenjivač topline, matematičko modeliranje, mjerenje pomoću računala

Summary

The heat exchange and accumulation process in the capillary heat exchanger has been experimentally studied and its model has been derived.

Based upon available knowledge and experiences the mathematical model of the process has been derived. The mathematical model served as a base for designing and constructing of special capillary heat exchanger its purpose being transport of humid gas sample with preservation of characteristic properties. The mathematical model has been validated through experimental results.

Key words:

capillary heat exchanger, mathematical modeling, computer aided measurement

1. UVOD

Pravilno uzorkovanje temeljno je za valjano određivanje fizičkih ili kemijskih svojstava stanovitog materijala. Uzorak treba biti reprezentativan i treba ga što prije dovesti do analizatora uz uvjet da mu i stanje i sastav ostanu nepromjenjeni. Postojanje prikladnog načina prijenosa uzorka do analizatora je često bitan korak za točnost analize. U ovom radu opisan je kapilarni izmjenjivač topline namijenjen prijenosu uzoraka vlažnog plina, koji je zamišljen, projektiran i izveden u laboratoriju Zavoda.

Rad na zadatku organiziran je u dva dijela. U prvom dijelu provedeno je povezivanje raspoloživog znanja i njegova pretvorba u matematički opis procesa izmjene topline. To je vrlo široko područje i ovim radom obuhvaćen je tek njegov manji dio, ali s ciljem da se razvije što je moguće bolji model procesa. Drugi dio obuhvatio je projektiranje i izvedbu uređaja, eksperimentalno istraživanje karakteristika i eksperimentalnu provjeru modela.

Izgradnja i ispitivanje uređaja za prijenos uzoraka pokazalo je potrebu rješavanja niza zadataka s područja primjene mikrooperacija kemijskog inženjerstva. Naime, da bi se iz struje vlažnog plina preuzeo i nepromijenjenih svojstava prenijeo uzorak do analizatora, potrebno je izvesti izmjenjivač topline posebnih karakteristika. U njemu bi se uzorak, zbog malog poprečnog presjeka cjevke kojom putuje, gibao velikom brzinom, što bi dalo mogućnost brzog ostvarenja analize, a zbog grijanja cjevke ostao bi u temperaturnom području u kojem nema kondenzacije, što bi osiguralo točnost analize. Zamišljen je i izgrađen, dakle, izmjenjivač topline u kojem se vlažni zrak prenosi kapilarom zadane duljine.

Sva mjerenja i vođenje procesa izvedeno je pomoću računala. Oprema je sastavljena od suvremenih mjernih osjetila temperature, tlaka i protoka, i upravljivih jedinica za zagrijavanje i održavanje željene vrijednosti protoka procesnih fluida. Primjena takve opreme zahtjevala je stjecanje i povezivanje različitih znanja i vještina.

2. OPĆI DIO

2.1 Polazište

Postoji bogata literatura [1, 2, 3] koja opisuje proces izmjene topline. U načelu, postoje dva pristupa matematičkom opisivanju svakog procesa: empirijski, na osnovi eksperimentalnih podataka, i egzaktni, na osnovi raspoloživog teorijskog znanja. U praksi se međutim najviše povezuju oba pristupa, te se teorijski matematički opis procesa izveden na temelju raspoloživog znanja dopunjuje eksperimentalnim podacima. Predmet ovog istraživanja je mogućnost dinamičkog matematičkog opisivanja procesa izmjene topline u kapilarnom izmjenjivaču topline, razvoj dinamičkog i statičkog matematičkog modela, te eksperimentalno određivanje parametara danog procesa.

Osnovu djelovanja izmjenjivača čini prijenos topline. Ovaj proces prvenstveno je zavisan od hidrodinamičkih karakteristika struja fluida. Temperature bilo kojeg dijela fluida ili stijenke unutar izmjenjivača funkcije su vremena i položaja, što znači da je motreni proces tipičan proces s raspodijeljenim parametrima. Strujanje opisuje Reynoldsova značajka, pa tako razlikujemo laminarno ($Re < 2100$), prijelazno ($2100 < Re < 10000$), i turbulentno strujanje ($Re > 10000$). Vrsta ulaza u cijev, početni poremećaji, hrapavost stijenke cijevi i drugi faktori utječu na obje ove granice.

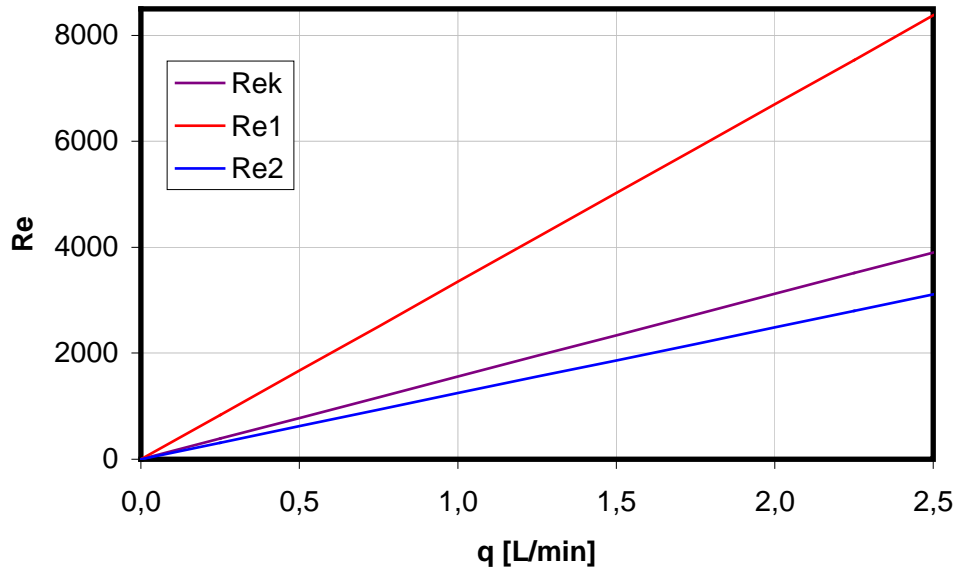
$$Re = \frac{\tau_{ukup}}{\tau_{lam}} = \frac{\rho \frac{v^2}{2}}{\eta \frac{v}{d}} = \frac{F_i}{F_{tr}} = \frac{vd\rho}{\eta}$$

Reynoldsova značajka definira se kao omjer ukupnog fluksa količine gibanja i fluksa kod molekularnog gibanja.

Vrijednosti Reynoldsovih značajka za ispitivani uređaj prikazane su na slici 2.1 kao funkcija protoka plina kroz kapilaru, odnosno kapljevine kroz cijevi 1 i 2. Za maksimalan protok plina od $q_k = 0,6$ L/min vrijednost Reynoldsove značajke jest $Re_{max} = 936$ i strujanje je laminarno, dok je za vodu pri maksimalnom protoku $q_1 = 2,5$ L/min $Re_{1,max} = 8375$ za cijev 1 i $Re_{2,max} = 3112$ za cijev 2, pa je strujanje unutar laminarnog i prijelaznog područja.

Maksimalna vrijednost protoka vlažnog zraka određena je izmjerama kapilare, tj. otporima strujanju zraka, dok je maksimalna vrijednost protoka vode određena

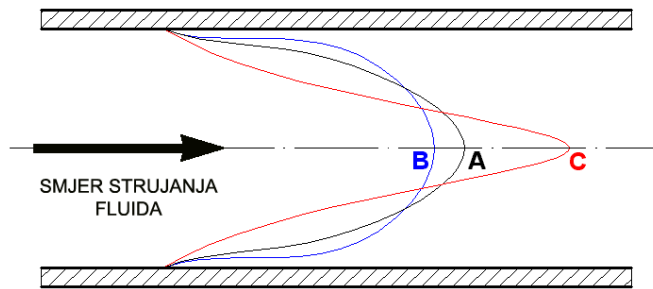
temperaturom vode na izlazu iz grijala pri stalnoj vrijednosti snage grijala (za protok vode od 2,5 L/min, $T_{clu} = 37,05^{\circ}\text{C}$).



Slika 2.1 Reynoldsova značajka procesnih struja kao funkcija protoka u kapilarnom izmjenjivaču topline

Pri protjecanju fluida kroz cijev uz potpuno razvijen, izoterman i laminaran tok, razvija se parabolična raspodjela brzine po uzdužnom presjeku cijevi, s maksimalnom brzinom u osi cijevi i brzinom nula na zidu (krivulja A, slika 2.2). Protjecanje se može vizualizirati kao niz koncentričnih ljuski koje klize jedna pored druge i između kojih ne postoji znatno miješanje.

Ulaskom fluida u cijev koja je s vanjske strane grijana, uspostaviti će se temperaturni gradijent u fluidu s višom temperaturom uz zid i nižom temperaturom u osi cijevi. Viskoznost kapljevina opada sa porastom temperature, dok kod plinova raste; te će unutar grijane cijevi postojati gradijent viskoznosti, koji dodatno utječe na raspodjelu brzina u radijalnom smjeru. Tako izmjena topline razvija radijalnu komponentu brzine koja utječe na oblik parabole. Ovo je pojednostavljeno prikazano na slici 2.2.

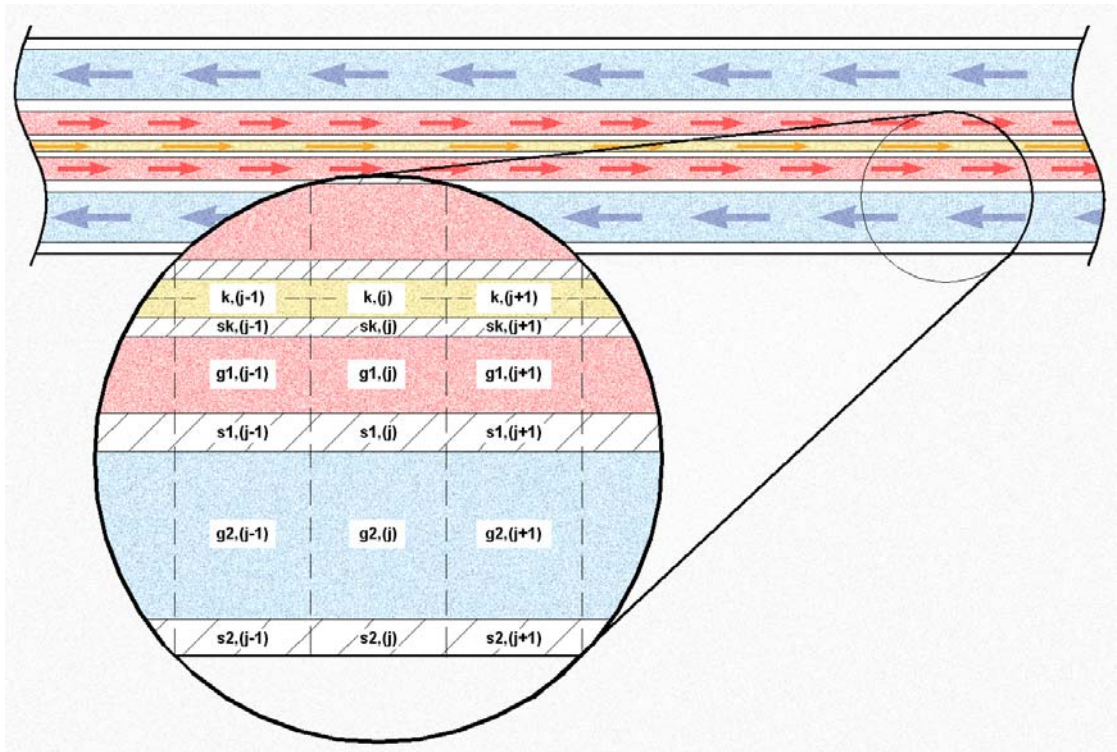


Slika 2.2 Efekt prijelaza topline na raspodjelu brzina pri laminarnom protjecanju. Krivulja **A** predstavlja raspodjelu brzina pri izotermnom protjecanju, krivulja **B** raspodjelu brzina pri grijanju kapljevina ili hlađenju plinova, a krivulja **C** raspodjelu brzina pri grijanju plinova ili hlađenju kapljevina

Temperatura u bilo kojem dijelu fluida funkcija je vremena i prostora u aksijalnom i radijalnom smjeru cijevi, te bi egzaktni matematički opis neizoternog laminarnog protjecanja fluida u ispitnom uređaju bio u obliku sustava parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Za određivanje vrijednosti koeficijenta prijelaza topline postoji veliki broj izraza dobivenih rješavanjem parcijalnih diferencijalnih jednačbi uz određene rubne uvjete, koje opisuju temperaturu kao funkciju položaja i empirijskih izraza, koji povezuju hidrodinamička i toplinska svojstva sustava pomoću bezdimenzijskih značajki.

Međutim, pri izradi dinamičkog matematičkog modela procesa u toplinskom izmjenjivaču, praktičnije je podijeliti procesni prostor na prikladan broj segmenata, pri čemu se smatra da se u svakom od njih događa proces s usredotočenim parametrima u aksijalnom smjeru. Zatim se postavlja jednačba dinamičke toplinske bilance za svako mjesto toplinske akumulacije u segmentu. Sada se proces izmjene topline u pojedinom segmentu može matematički opisati sustavom običnih diferencijalnih jednačbi čiji je broj jednak broju mjesta akumulacije energije u segmentu.

Na slici 2.3 pojednostavljeno je prikazan presjek procesnog prostora kapilarnog izmjenjivača topline.



Slika 2.3. Pojednostavljeni prikaz procesnog prostora s odgovarajućim indeksnim oznakama mjesta akumulacije energije

Prema slici 2.3, u svakom segmentu postoji šest mjesta akumulacije topline: zrak unutar kapilare, stijenka kapilare, voda unutar cijevi 1, stijenka cijevi 1, voda unutar cijevi 2 i stijenka cijevi 2. Broj segmenata ovisi o izmjerama i režimu rada izmjenjivača, o svojstvima strujećih fluida i o željenoj točnosti dobivenog modela procesa.

2.2 Proračun koeficijenta prijenosa topline na stijenama cijevi

Za različite hidrodinamičke uvjete postoji veliki broj empirijskih jednadžbi za računanje koeficijenta prijenosa topline na stijenama cijevi. Ovdje će biti citirane samo one koje su primjenjive na proces izmjene topline u ispitnom uređaju, unutar danog radnog područja. Jednadžbe vrijede u slučaju kada temperaturni gradijent nije velik i stoga ne utječe bitno na promjenu fizičkih svojstava fluida.

Od svih modela koji opisuju izmjenu topline između fluida i stijenke, najčešće se rabi Sieder-Tateova korelacija [1, 2]. Sastavljena je na temelju kriterijske jednadžbe za prisilnu konvekciju; $Nu = f(Re, Pr)$, uz izraze koji obuhvaćaju izmjere realnog sustava i promjenu dinamičke viskoznosti fluida s temperaturom po radijalnom presjeku cijevi, te se uz razne pretpostavke pomoću ove korelacije može opisati velik broj različitih procesa izmjene topline. Ovaj model vrijedi u slučajevima kada je temperatura stijenke cijevi stalna, što i jest u našem slučaju, i pod pretpostavkom da je strujanje u području razvijenog toka. Sieder-Tateova korelacija izražena bezdimenzijskim značajkama je:

$$Nu = 1,86 \cdot Re^{1/3} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = 1,86 \cdot \left(\frac{vd\rho}{\mu}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Koeficijent prijenosa topline u anularnom prostoru može se predvidjeti pomoću izraza sličnim onima za cirkularne prostore, no nužno je upotrijebiti ekvivalentan promjer. Tako Sieder-Tateova jednadžba za anularni prostor pri laminarnom strujanju glasi [2]:

$$\frac{\alpha \cdot D_e}{\lambda} = 1,86 \cdot \left(\frac{vd\rho}{\mu}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{D_e}{L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14},$$

gdje je D_e ekvivalentan promjer, definiran sljedećom jednadžbom:

$$D_e = 4 \cdot r_H = 4 \cdot \frac{A}{l_p} = \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)}{\pi \cdot (D_2 + D_1)} = D_2 - D_1$$

Za prijelazno područje u anularnim prostorima koristi se korelacija Hausena [1]:

$$Nu = 0,116 \cdot (\text{Re}^{2/3} - 125) \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_e}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Jednadžba koja opisuje prijenos topline sa horizontalnog cilindra prirodnom konvekcijom često se koristi pri procjeni gubitaka topline s horizontalnih cjevovoda, i njome će se opisati prijelaz topline sa vanjske cijevi izmjenjivača na okolinu.

$$Nu = 0,53 \cdot Gr^{1/4} \cdot \text{Pr}^{1/4}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = 0,53 \cdot \left(\frac{D^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \right)^{1/4}$$

Osnovna pretpostavka pri razmatranju prijelaza topline sa stijenke kapilare na zrak jest da je protjecanje zraka nestlačivo, što je vidljivo iz vrijednosti Machove značajke koja za maksimalan protok zraka od 0,6 L/min iznosi $Ma = 0,058$. Machova značajka dana je izrazom $Ma = u_x / c$, gdje je u_x brzina fluida, a c brzina zvuka u promatranom fluidu, koja se može izračunati iz jednadžbe [1]:

$$c = 316,228 \cdot \left(\chi \frac{p}{\rho} \right)^{1/2},$$

gdje je χ eksponent adijabate, c_p/c_v koji za dvoatomne plinove iznosi 1.40, p tlak plina i ρ gustoća plina.

2.3 Matematički model procesa u kapilarnom izmjenjivaču topline

Matematički model procesa u j -tom segmentu čine dakle šest običnih diferencijalnih jednažbi koje su izvedene iz temeljnog izraza:

$$\text{promjena stanja toplinske akumulacije} = \text{dovedena toplina} - \text{odvedena toplina}$$

U tablici 2.1 dani su matematički izrazi za članove temeljne jednažbe. Izrazi su poznati i često se njima služimo u inženjerskoj praksi, pa stoga ovdje neće biti objašnjavani.

	Promjena stanja toplinske akumulacije	Dovedena toplina	Odvedena toplina
Kapilara	$V_k \rho_{vz} C_{Pvz} \frac{dT_{k(j)}}{dt}$	$q_k \rho_{vz} C_{Pvz} T_{k(j-1)} + \alpha_{ku} S_{ku} [T_{sk(j)} - T_{k(j)}]$	$q_k \cdot \rho_{vz} C_{Pvz} T_{k(j)}$
Stijenka kapilare	$V_{sk} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{sk(j)}}{dt}$	$\lambda_T \frac{n}{L} A_{sk} [T_{sk(j-1)} - T_{sk(j)}] + \alpha_{kv} S_{kv} [T_{1(j)} - T_{sk(j)}]$	$\alpha_{ku} S_{ku} [T_{sk(j)} - T_{k(j)}]$
Cijev 1	$V_1 \rho_{g1} C_{Pg1} \frac{dT_{1(j)}}{dt}$	$q_g \rho_{g1} C_{Pg1} T_{1(j-1)}$	$q_g \rho_{g1} C_{Pg1} T_{1(j)} + \alpha_{kv} S_{kv} [T_{1(j)} - T_{sk(j)}] + \alpha_{1u} S_{1u} [T_{1(j)} - T_{s1(j)}]$
Stijenka cijevi 1	$V_{s1} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{s1(j)}}{dt}$	$\lambda_T \frac{n}{L} A_{s1} [T_{s1(j-1)} - T_{s1(j)}] + \alpha_{1u} S_{1u} [T_{1(j)} - T_{s1(j)}]$	$\lambda_T \frac{n}{L} A_{s1} [T_{s1(j)} - T_{s1(j+1)}] + \alpha_{1v} S_{1v} [T_{s1(j)} - T_{2(j)}]$
Cijev 2	$V_2 \rho_{g2} C_{Pg2} \frac{dT_{2(j)}}{dt}$	$q_g \rho_{g2} C_{Pg2} T_{2(j+1)} + \alpha_{1v} S_{1v} [T_{s1(j)} - T_{2(j)}]$	$q_g \rho_{g2} C_{Pg2} T_{2(j)} + \alpha_{2u} S_{2u} [T_{2(j)} - T_{s2(j)}]$
Stijenka cijevi 2	$V_{s2} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{s2(j)}}{dt}$	$\lambda_T \frac{n}{L} A_{s2} [T_{s2(j+1)} - T_{s2(j)}] + \alpha_{2u} S_{2u} [T_{2(j)} - T_{s2(j)}]$	$\lambda_T \frac{n}{L} A_{s2} [T_{s2(j)} - T_{s2(j-1)}] + \alpha_{2v} S_{2v} [T_{s2(j)} - T_{ok}]$

Tablica 2.1

Uvrštavanjem pojedinih izraza u osnovnu jednadžbu i njihovim sređivanjem dobivamo ranije navedenih šest diferencijalnih jednadžbi koje opisuju dinamičko vladanje motrenog segmenta. Pretpostavlja se pri tome, da se izrazi koji opisuju prijenos topline kondukcijom unutar stijenki kapilare i cijevi mogu se zanemariti.

Kapilara

$$V_k \rho_{vz} C_{Pvz} \frac{dT_{k(j)}}{dt} = q_k \rho_{vz} C_{Pvz} T_{k(j-1)} + \alpha_{ku} S_{ku} [T_{sk(j)} - T_{k(j)}] - q_k \rho_{vz} C_{Pvz} T_{k(j)}$$

$$\frac{dT_{k(j)}}{dt} = - \frac{q_k \rho_{vz} C_{Pvz} + \alpha_{ku} S_{ku}}{V_k \rho_{vz} C_{Pvz}} T_{k(j)} + \frac{q_k}{V_k} T_{k(j-1)} + \frac{\alpha_{ku} S_{ku}}{V_k \rho_{vz} C_{Pvz}} T_{sk(j)}$$

Stijenka kapilare

$$V_{sk} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{sk(j)}}{dt} = \alpha_{kv} S_{kv} [T_{1(j)} - T_{sk(j)}] - \alpha_{ku} S_{ku} [T_{sk(j)} - T_{k(j)}]$$

$$\frac{dT_{sk(j)}}{dt} = - \frac{\alpha_{kv} S_{kv} + \alpha_{ku} S_{ku}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{sk(j)} + \frac{\alpha_{kv} S_{kv}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{1(j)} + \frac{\alpha_{ku} S_{ku}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{k(j)}$$

Cijev 1

$$V_1 \rho_{g1} C_{Pg1} \frac{dT_{1(j)}}{dt} = q_g \rho_{g1} C_{Pg1} T_{1(j-1)} - q_g \cdot \rho_{g1} C_{Pg1} T_{1(j)} - \alpha_{kv} S_{kv} [T_{1(j)} - T_{sk(j)}] - \alpha_{1u} S_{1u} [T_{1(j)} - T_{s1(j)}]$$

$$\frac{dT_{1(j)}}{dt} = - \frac{q_g \rho_{g1} C_{Pg1} + \alpha_{kv} S_{kv} + \alpha_{1u} S_{1u}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{1(j)} + \frac{q_g}{V_1} T_{1(j-1)} + \frac{\alpha_{kv} S_{kv}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{sk(j)} + \frac{\alpha_{1u} S_{1u}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{s1(j)}$$

Stijenka cijevi 1

$$V_{s1} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{s1(j)}}{dt} = \alpha_{1u} S_{1u} [T_{1(j)} - T_{s1(j)}] - \alpha_{1v} S_{1v} [T_{s1(j)} - T_{2(j)}]$$

$$\frac{dT_{s1(j)}}{dt} = -\frac{\alpha_{1u} S_{1u} + \alpha_{1v} S_{1v}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{s1(j)} + \frac{\alpha_{1u} S_{1u}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{1(j)} + \frac{\alpha_{1v} S_{1v}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{2(j)}$$

Cijev 2

$$V_2 \rho_{g2} C_{Pg2} \frac{dT_{2(j)}}{dt} = q_g \rho_{g2} C_{Pg2} T_{2(j+1)} + \alpha_{1v} S_{1v} [T_{s1(j)} - T_{2(j)}] - q_g \rho_{g2} C_{Pg2} T_{2(j)} - \alpha_{2u} S_{2u} [T_{2(j)} - T_{s2(j)}]$$

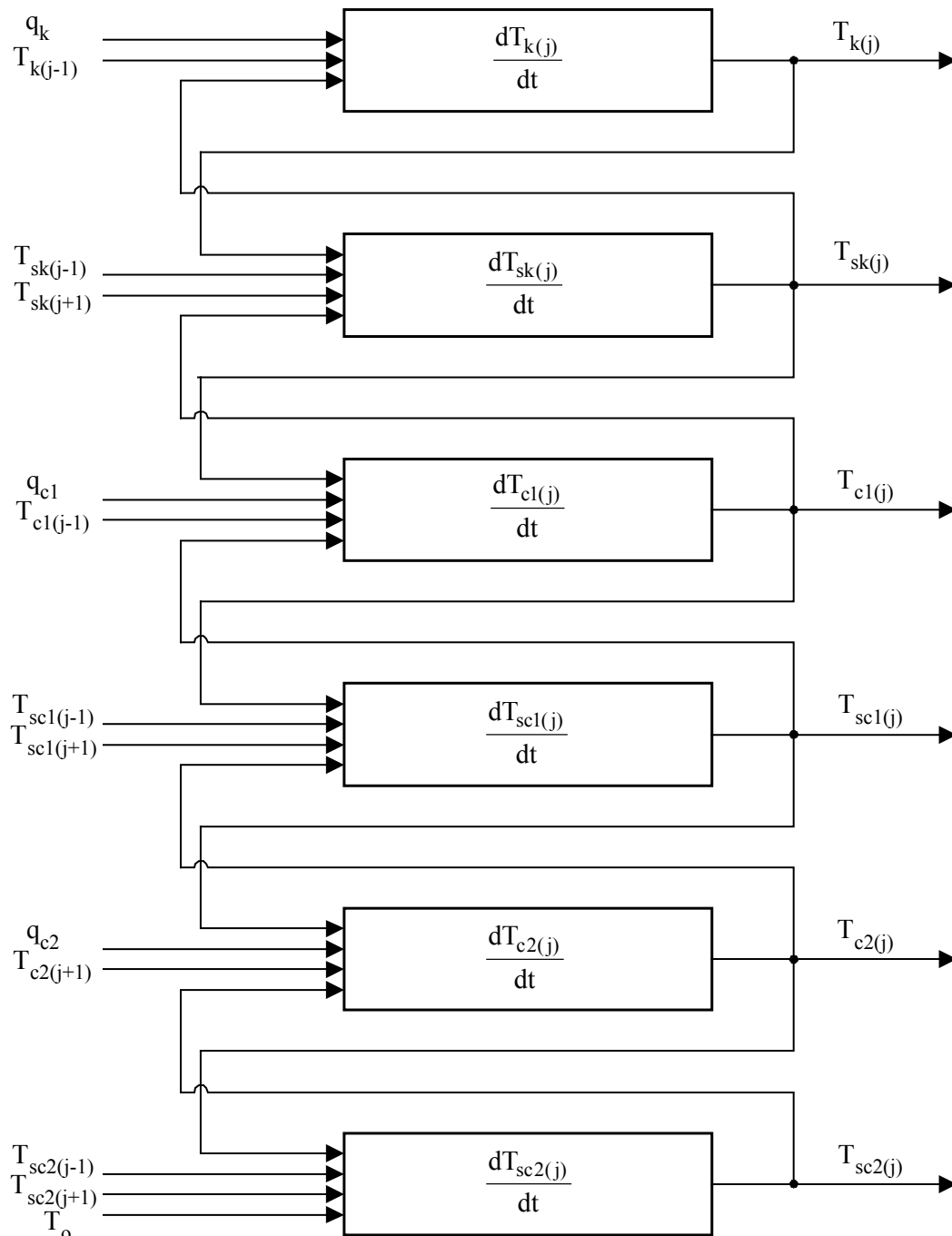
$$\frac{dT_{2(j)}}{dt} = -\frac{\alpha_{1v} S_{1v} + \alpha_{2u} S_{2u} + q_g \rho_{g2} C_{Pg2}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{2(j)} + \frac{q_g}{V_2} T_{2(j+1)} + \frac{\alpha_{1v} S_{1v}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{s1(j)} + \frac{\alpha_{2u} S_{2u}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{s2(j)}$$

Stijenka cijevi 2

$$V_{s2} \rho_T C_{PT} \frac{dT_{s2(j)}}{dt} = \alpha_{2u} S_{2u} [T_{2(j)} - T_{s2(j)}] - \alpha_{2v} S_{2v} [T_{s2(j)} - T_{ok}]$$

$$\frac{dT_{s2(j)}}{dt} = -\frac{\alpha_{2u} S_{2u} + \alpha_{2v} S_{2v}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{s2(j)} + \frac{\alpha_{2u} S_{2u}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{2(j)} + \frac{\alpha_{2v} S_{2v}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{ok}$$

Primjenjujući sustavski pristup, razvijen je prikaz međuzavisnosti karakterističnih ulaznih i izlaznih veličina promatranog procesa. Posebnost je ovog prikaza, da su jasno vidljive uzročno-posljedične veze karakterističnih veličina, a lako je proučavati i osjetljivost procesa na promjenu parametara.



Slika 2.4 Prikaz međuzavisnosti ulaznih i izlaznih veličina procesa.

U svrhu opisivanja mogućih radnih stanja procesa razvijen je statički model, i to tako da su dinamički članovi u jednadžbanma izjednačeni s nulom.

Kapilara

$$\frac{q_k \rho_{vz} C_{Pvz} + \alpha_{ku} S_{ku}}{V_k \rho_{vz} C_{Pvz}} T_{k(j)} = \frac{q_k}{V_k} T_{k(j-1)} + \frac{\alpha_{ku} S_{ku}}{V_k \rho_{vz} C_{Pvz}} T_{sk(j)}$$

Stijenka kapilare

$$\frac{\alpha_{kv} S_{kv} + \alpha_{ku} S_{ku}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{sk(j)} = \frac{\alpha_{kv} S_{kv}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{1(j)} + \frac{\alpha_{ku} S_{ku}}{V_{sk} \rho_T C_{PT}} T_{k(j)}$$

Cijev 1

$$\frac{q_g \rho_{g1} C_{Pg1} + \alpha_{kv} S_{kv} + \alpha_{1u} S_{1u}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{1(j)} = + \frac{q_g}{V_1} T_{1(j-1)} + \frac{\alpha_{kv} S_{kv}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{sk(j)} + \frac{\alpha_{1u} S_{1u}}{V_1 \rho_{g1} C_{Pg1}} T_{s1(j)}$$

Stijenka cijevi 1

$$\frac{\alpha_{1u} S_{1u} + \alpha_{1v} S_{1v}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{s1(j)} = \frac{\alpha_{1u} S_{1u}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{1(j)} + \frac{\alpha_{1v} S_{1v}}{V_{s1} \rho_T C_{PT}} T_{2(j)}$$

Cijev 2

$$\frac{\alpha_{1v} S_{1v} + \alpha_{2u} S_{2u} + q_g \rho_{g2} C_{Pg2}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{2(j)} = \frac{q_g}{V_2} T_{2(j+1)} + \frac{\alpha_{1v} S_{1v}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{s1(j)} + \frac{\alpha_{2u} S_{2u}}{V_2 \rho_{g2} C_{Pg2}} T_{s2(j)}$$

Stijenka cijevi 2

$$\frac{\alpha_{2u} S_{2u} + \alpha_{2v} S_{2v}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{s2(j)} = \frac{\alpha_{2u} S_{2u}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{2(j)} + \frac{\alpha_{2v} S_{2v}}{V_{s2} \rho_T C_{PT}} T_{ok}$$

2.4 Simulacijsko istraživanje

Na temelju izvedenog matematičkog modela procesa provedena su simulacijska istraživanja. U tu svrhu napisan je simulacijski program u programskom jeziku Matlab, čiji se kod nalazi u prilogu 8.2.

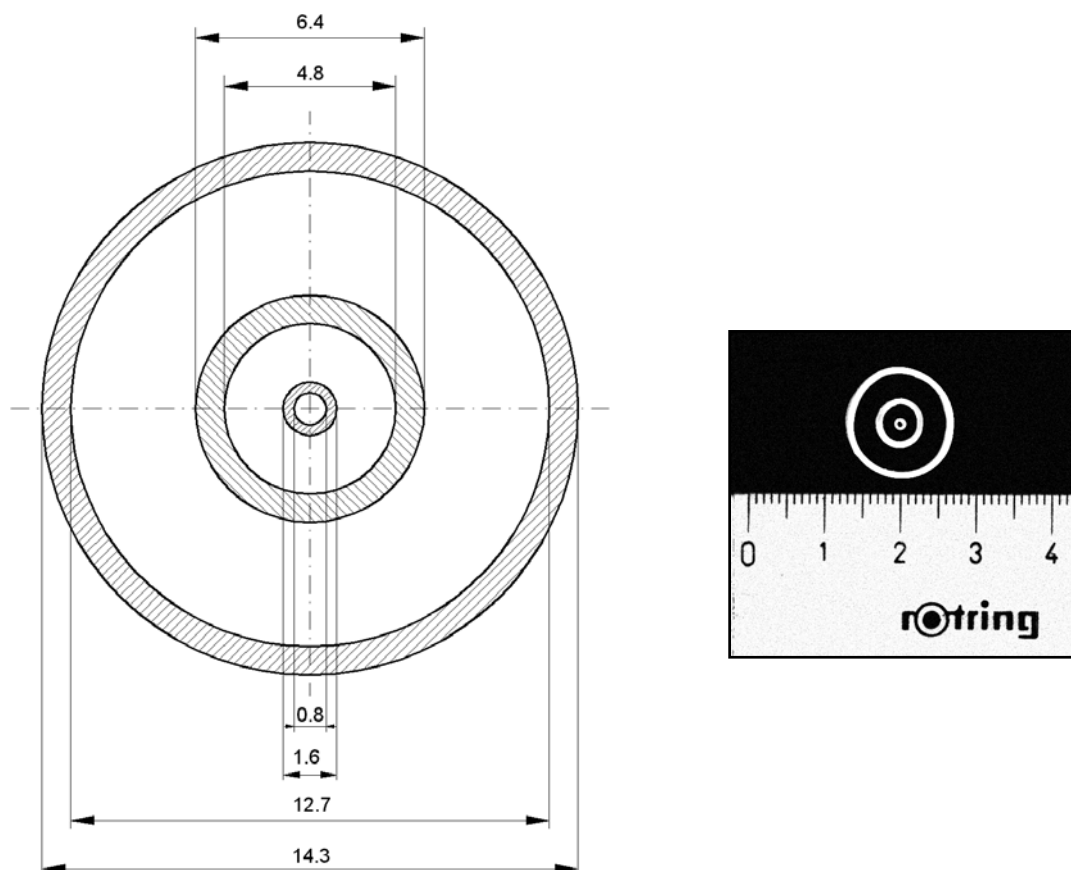
Simulacijskim istraživanjem ispitivana su moguća radna stanja procesa izmjene topline u ispitnom uređaju. Također, cilj istraživanja procesa simuliranjem bio je utvrditi raspodjelu temperatura po duljini izmjenjivača za različite radne uvjete.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 Projektiranje i izvedba laboratorijskog uređaja

Na osnovi simulacijskog istraživanja, vlastitih stečenih iskustava i primjenjenih općih načela gradnje izmjenjivača zamišljen je i izveden laboratorijski ispitni izmjenjivač topline duljine 4,4 m u kojem se vlažni zrak prenosi kapilaram.

Kapilara se nalazi unutar dvije koncentrične cijevi kroz koje prolazi kapljevina. Izmjenjivač je konstruiran tako da grijuća voda kroz unutarnju cijevku teče paralelno struji vlažnog zraka te na kraju izmjenjivača ulazi u vanjski plašt kojim struji u suprotnom smjeru i na taj način osigurava bolju izmjenu topline između unutarnje cijevi i kapilare, te smanjuje gubitak topline na okolinu. Kapilara i cijevke prikladnih su promjera, izrađene od politetrafluoretilena (teflona). Poprečni presjek izmjenjivača i karakteristične veličine prikazane su na slici 3.1.



Slika 3.1. Poprečni presjek izmjenjivača sa karakterističnim izmjerama te "scan" presjeka u realnoj veličini.

Cjelokupan ispitni uređaj pojednostavljeno je prikazan na slici 3.2 [literatura] i opisat će se ovako: Okolišni zrak stanja **1** (T_{ok} , p_{ok} , H_{ok}) komprimira se kompresorom **C-01** pogonjenog motorom **M**. Motor je spojen povratnom vezom s osjetilom i regulatorom tlaka **PIC-01** u regulacijski krug (dvpoložajni regulator) koji održava stalnu akumulaciju zraka u spremniku **T-01**. Sigurnosni ventil **PV-01** osigurava da tlak u spremniku ne prelazi maksimalno dopuštenu vrijednost od 3 bara.

Zrak iz spremnika prenosi se u termohigrostat (dvotemperaturni generator vlažnog zraka) u kojem se ostvaruje točno definirano stanje struje vlažnog zraka uz pomoć dvije na različitim temperaturama termostahirane komore. U prvoj je smješten saturator, **S**, a u drugoj ispitna komora, **IK**, u kojoj se održava željeno stanje vlažnog zraka. Strujeći kroz saturator zagrijava se zrak stanja **2** (T_{ok} , RH_0 , p) i zasićuje vodenom parom pri temperaturi T_s , pa odvodi u ispitnu komoru gdje se pri temperaturi T_{IK} postiže i održava željena relativna vlažnost RH_{IK} [lit, KIV,5].

Automatska stabilizacija protoka vlažnog zraka na željenoj vrijednosti ostvaruje se regulacijskim krugom sa PI načinom regulacije koji čine turbinsko osjetilo protoka **FT-01** i regulacijski ventil **FV-01**. Zrak stanja **3** zatim prolazi kroz laboratorijsko protočno grijalo **H-01** upravljive snage koje je napravljeno za potrebe eksperimenta i povezano s tristorskim uređajem. Iz grijala izlazi zrak stanja **4** (T_{KU} , p_2 , $H_{KU} = H_3$), te ulazi u kapilarni izmjenjivač topline **E-01**, iz kojeg izlazi stanja **5** (T_{KI} , p_3 , H_{KI}).

Voda stanja **6** (T_6 , p_6), što struji anularnim prostorom izmjenjivača kao grijući fluid, dobavlja se iz vodovodne mreže preko ventila **FV-02** s ručnim upravljanjem. Protok grijuće vode regulira se krugom sa P načinom reguliranja kojeg čine turbinsko osjetilo protoka **FV-03** i regulacijski ventil **FV-03**. Voda zatim ulazi u grijalo upravljive snage **H-02** (**TT-02** i **TC-02**) u kojem se ostvaruje toplinska akumulacija karakterizirana temperaturom T_{CIU} . Iz grijala izlazi voda stanja **7** (T_{CIU} , p_7) i ulazi u kapilarni izmjenjivač topline.

Karakteristične oznake mjernih pretvornika protoka, temperature i vlažnosti i pripadajući simbola mjerenih veličina pregledno su dani u tablici 3.1.

FT-01	q_k	TT-02	T_{ki}
FT-03	q_l	TT-03	T_{c1u}
HT-01	$\varphi_{ku}, \%$	TT-04	T_{c1i}
HT-02	$\varphi_{ku}, \%$	TT-05	T_{c2i}
TT-01	T_{ku}	TT-06	T_{ok}

Tablica 3.1 Oznake pretvornika i simboli mjernih veličina.

Protok zraka kroz kapilaru q_k mjeri se turbinskim mjerilom serije FLR1000 tvrtke Omega, FT-01. Mjerno mu je područje 1 do 5 L/min, a izlazni naponski signal (0 do 5 Vdc) je prilagođen tako da se može uklopiti u sustav za akviziciju podataka i automatsko vođenje. Signal se mijenja proporcionalno protoku u području od 0 do 5 V, te se preko A/D kartice vodi na računalo.

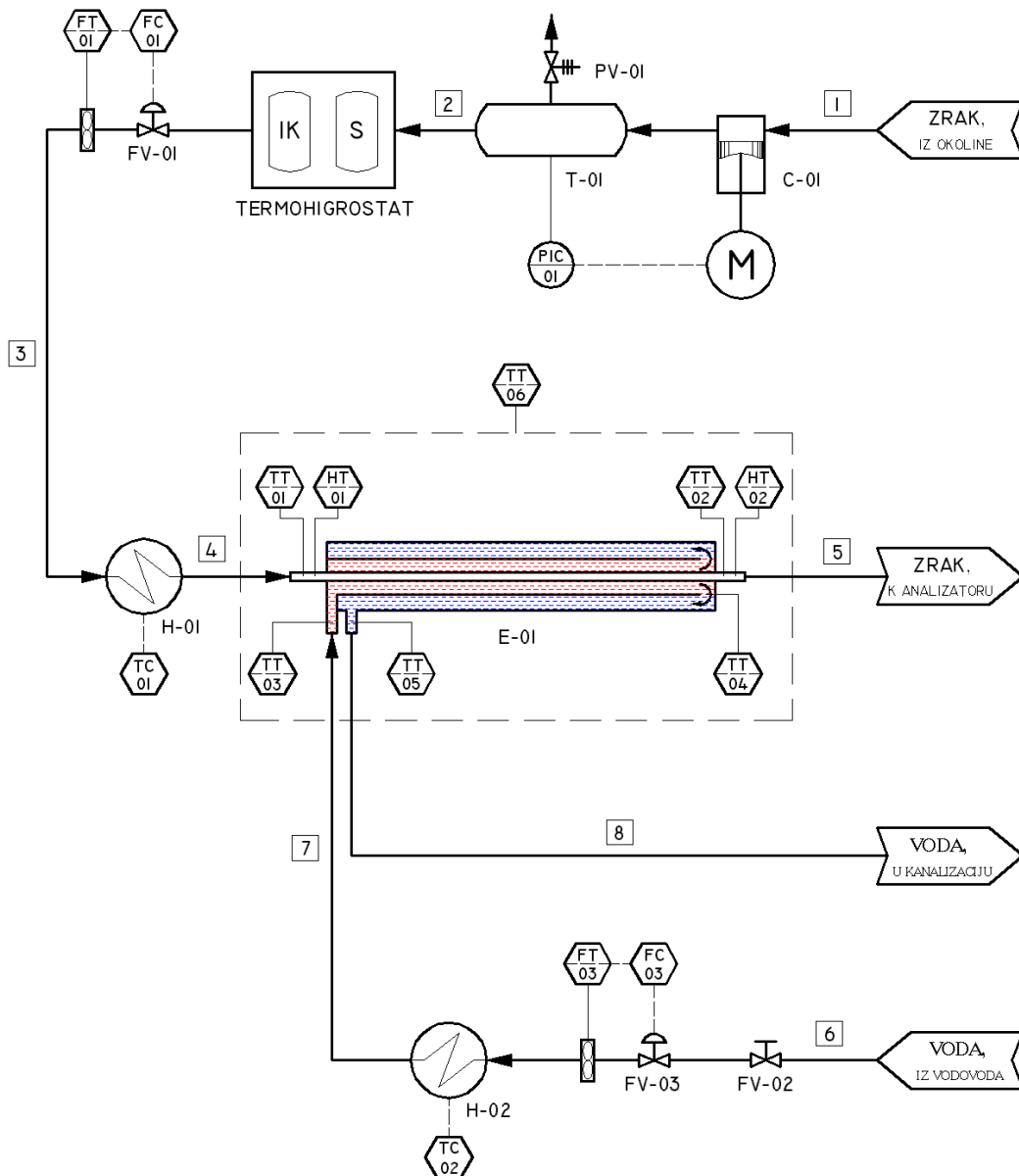
Osjetila serije FLR1000 rabe Peltonov tip turbine za određivanje protoka plina. Odnos brzine okretanja turbine i protoka plina linearan je na širokom dinamičkom području. Elektrooptički sustav sastoji se od diode koja emitira energiju u infracrvenom dijelu spektra. Energija zračenja se ili reflektira ili absorira iz “žbica” položenih na malom kotaču turbine. Reflektirana energija se detektira foto-diodom.

Temperatura se mjeri na smišljeno odabranim mjestima ispitnog poluvodičkim mjernim osjetilima Omega AD590 i termoparovima NiCr-Ni izvanredno male mase s pripadajućim pretvornicima.

Mjerne karakteristike osjetila i pretvornika dane su u prilogu 8.4. Mjerila i mjerni pretvornici prema podacima iz kataloga slijedivi su prema primarnim etalonima NIST-a.

Kako je već rečeno u uvodu, cjelokupni proces u potpunosti se vodi računalom, programom vlastite izrade prilagođenim za akviziciju podataka mjerenja, ispitivanje i vođenje ovog procesa, napisanim u programskom jeziku Basic (MS Visual Basic 5.0). Signali s mjernih osjetila preko odgovarajućih elektroničkih sklopova dovode se do akvizicijskih A/D kartica u računalo, gdje se digitaliziraju i prevode u brojčanu vrijednost koje odgovaraju pojedinoj mjernoj veličini. Na temelju izmjerenih vrijednosti generiraju se

prema odgovarajućim algoritmima za vođenje upravljački signali kojima se djeluje na regulacijske ventile protoka zraka (PI algoritam) i vode (P algoritam), te na grijala zraka i vode putem D/A kartice u računalu. Upravljavljajući signali mogu se također po volji namještati neovisno o ovim algoritmima putem dodatnih opcija u programu. Izmjerene vrijednosti mjernih veličina se zatim rabe za njihov prikaz na ekranu računala u realnom vremenu s ciljem praćenja njihovih dinamičkih promjena, a isto tako se upisuju u tekstualnu datoteku radi kasnije obrade, analitičke i grafičke.



Slika 3.2. Prikaz izmjenjivača topline i mjerne instrumentacije.

Značenje oznaka na slici 3.2 pregledno je prikazano u tablici 3.2.

M	elektromotor
C-01	stapni kompresor
PIC-01	osjetilo tlaka s indikatorom i dvopoložajni regulator tlaka
PV-01	sigurnosni ventil, $p_{\max} = 2$ bar
T-01	spremnik zraka, $V = 0,01 \text{ m}^3$
S	saturator
IK	ispitna komora
FT-01	mjerno osjetilo protoka zraka
FT-02	mjerno osjetilo protoka vode
FV-01	upravljivi ventil za regulaciju protoka zraka
FV-02	ventil za vodu s ručnim upravljanjem
FV-03	upravljivi ventil za regulaciju protoka vode
FC-01	regulator protoka zraka proporcionalno-integralnog djelovanja
FC-02	regulator protoka vode proporcionalnog djelovanja
H-01	grijalo zraka upravljive snage
H-02	grijalo vode upravljive snage
TC-01	regulator temperature ulazne struje zraka
TC-02	regulator temperature ulazne struje vode
TT-01	osjetilo temperature ulazne struje zraka
TT-02	osjetilo temperature izlazne struje zraka
TT-03	osjetilo temperature vode na ulazu u izmjenjivač topline
TT-04	osjetilo temperature vode na kraju izmjenjivača
TT-05	osjetilo temperature vode na izlazu u izmjenjivač
HT-01	osjetilo vlažnosti ulazne struje zraka
HT-02	osjetilo vlažnosti izlazne struje zraka
E-01	kapilarni izmjenjivač topline

Tablica 3.2. Opis oznaka na slici 3.2.

3.2 Eksperimentalno istraživanje

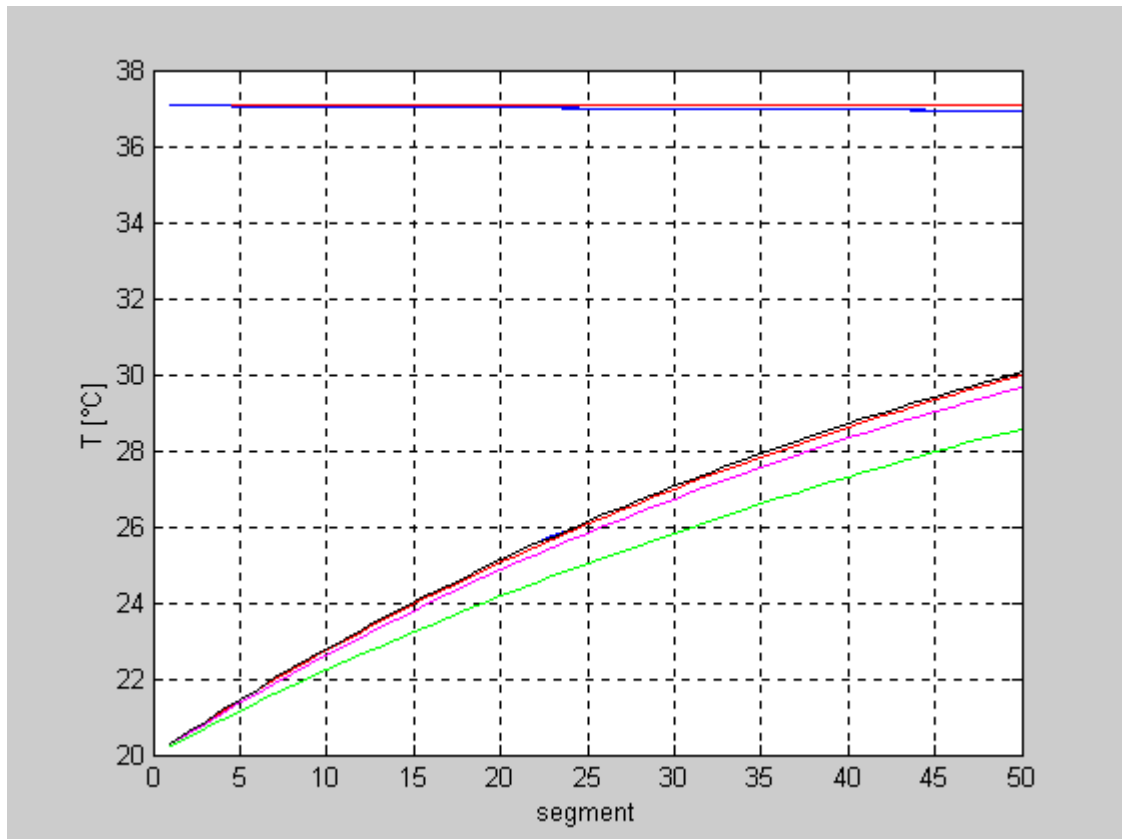
Eksperimentalno istraživanje procesa izmjene topline u ispitnom uređaju provedeno je u dva dijela.

U prvome dijelu eksperimentalno je određena statička i dinamička karakteristika grijala vode pri stalnoj i maksimalnoj vrijednosti snage grijala. Pri konstantnoj snazi grijala i uz konstantnu temperaturu vode na ulazu u grijalo, temperatura na ulazu u kapilarni izmjenjivač topline funkcija je samo protoka vode. Na osnovu ovog istraživanja određeno je radno područje protoka grijućeg fluida u izmjenjivaču od 1,0 L/min do 2,5 L/min, a pripadne temperature na ulazu u izmjenjivač su 66,25 °C i 37,05 °C.

U drugome dijelu snimljeni su odzivi procesa na skokomične promjene protoka grijućeg fluida pri stalnoj temperaturi zraka na ulazu, pri čemu se protok vode mijenjao u granicama radnog područja procesa za -0,5 L/min. Snimljeni su odzivi za protoke zraka od 0,2 do 0,6 L/min.

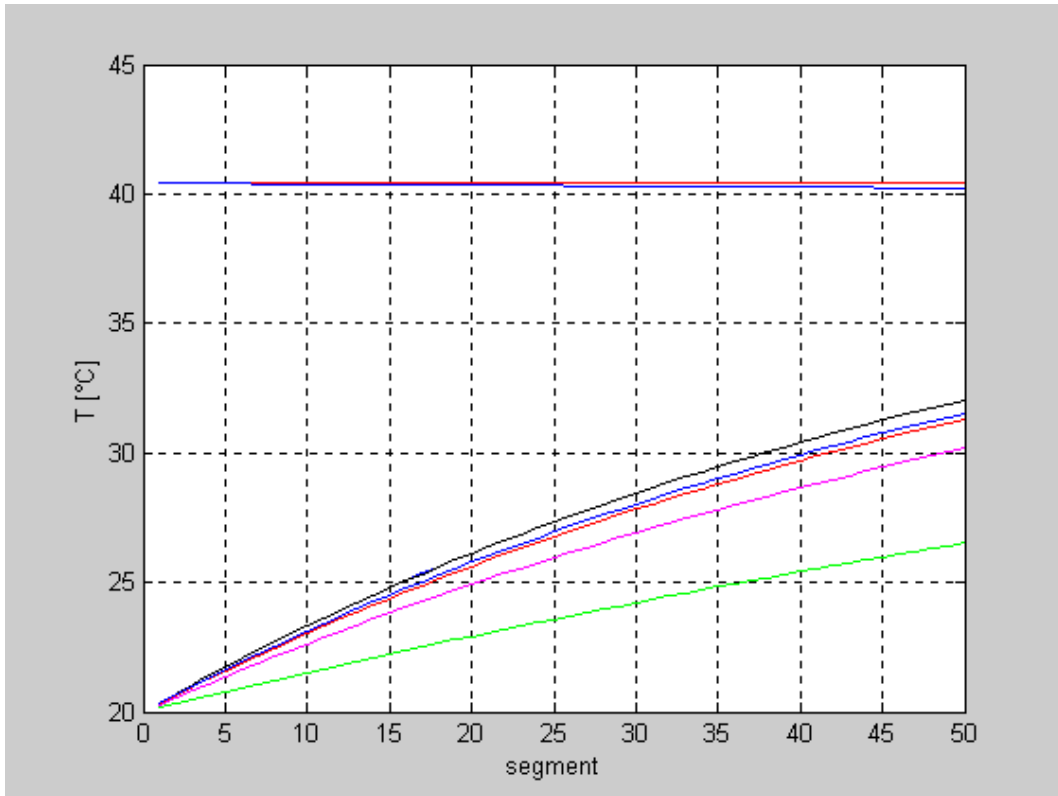
4. REZULTATI

4.1 Rezultati simulacijskog istraživanja

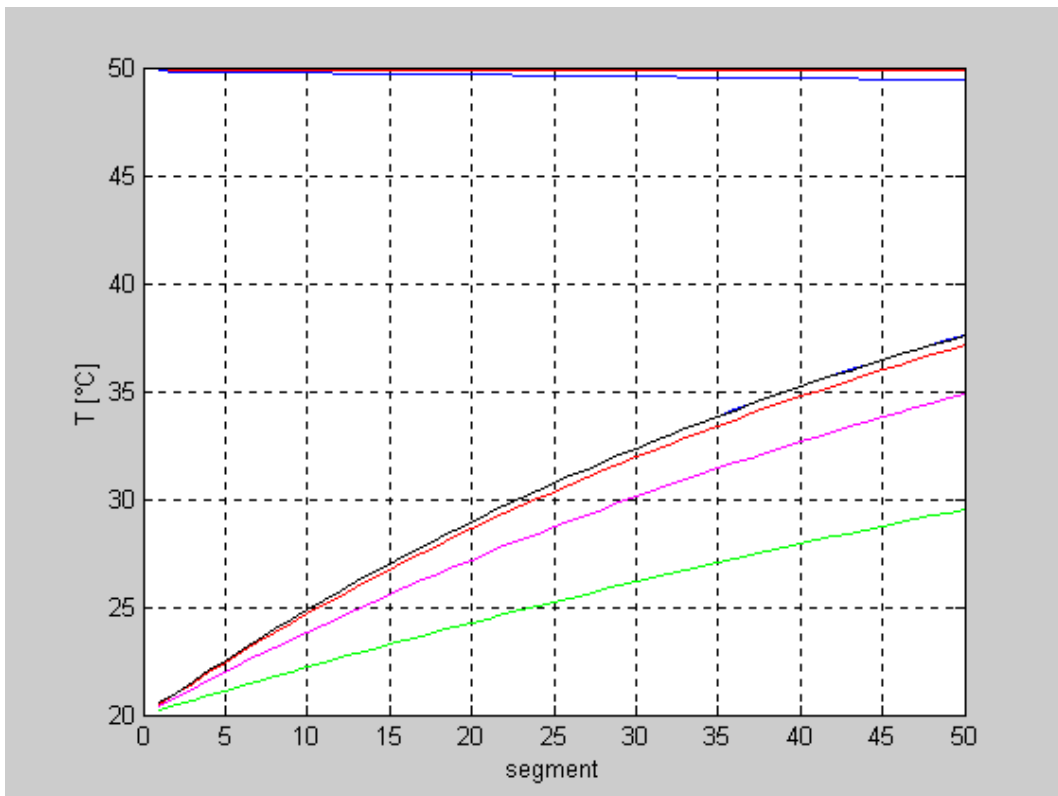


Slika 4.1.1 Raspodjela temperatura po segmentima za $q_1 = 2,5$ L/min za različite protoke zraka kroz kapilaru:

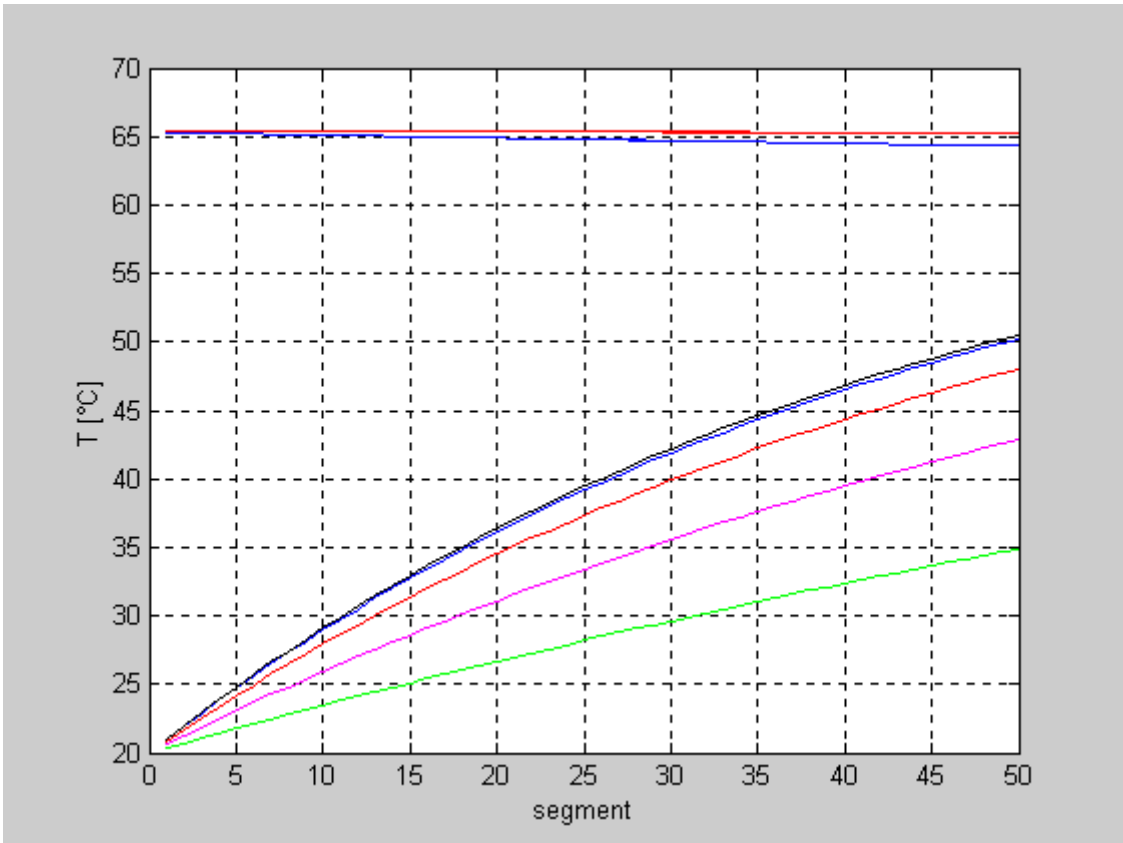
- $q_K = 0,2$ L/min
- $q_K = 0,3$ L/min
- $q_K = 0,4$ L/min
- $q_K = 0,5$ L/min
- $q_K = 0,6$ L/min



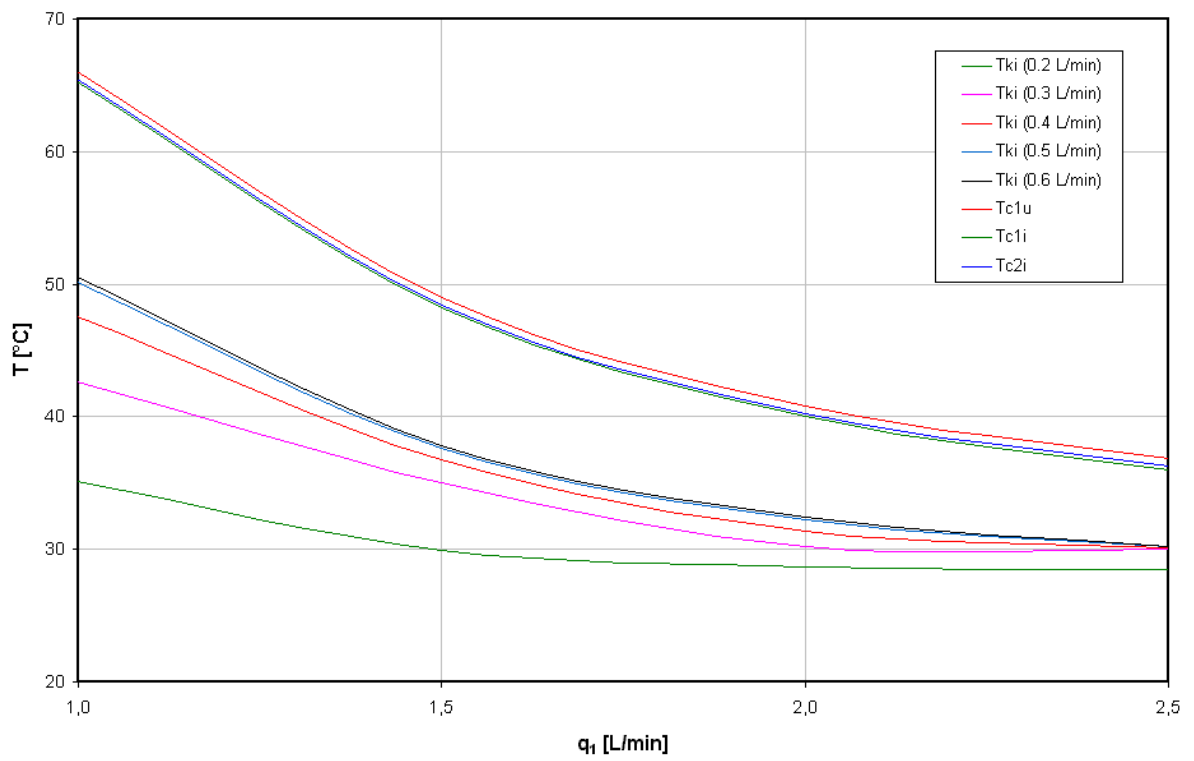
Slika 4.1.2 Raspodjela temperatura po segmentima za $q_1 = 2,0$ L/min



Slika 4.1.3 Raspodjela temperatura po segmentima za $q_1 = 1,5$ L/min

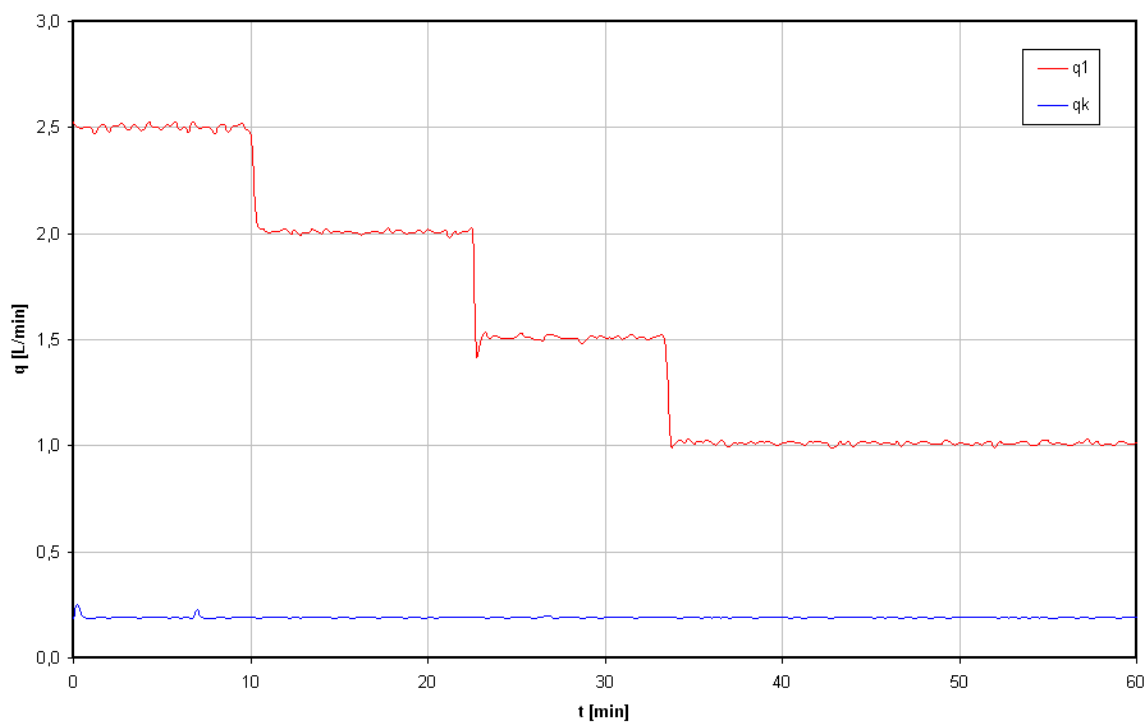
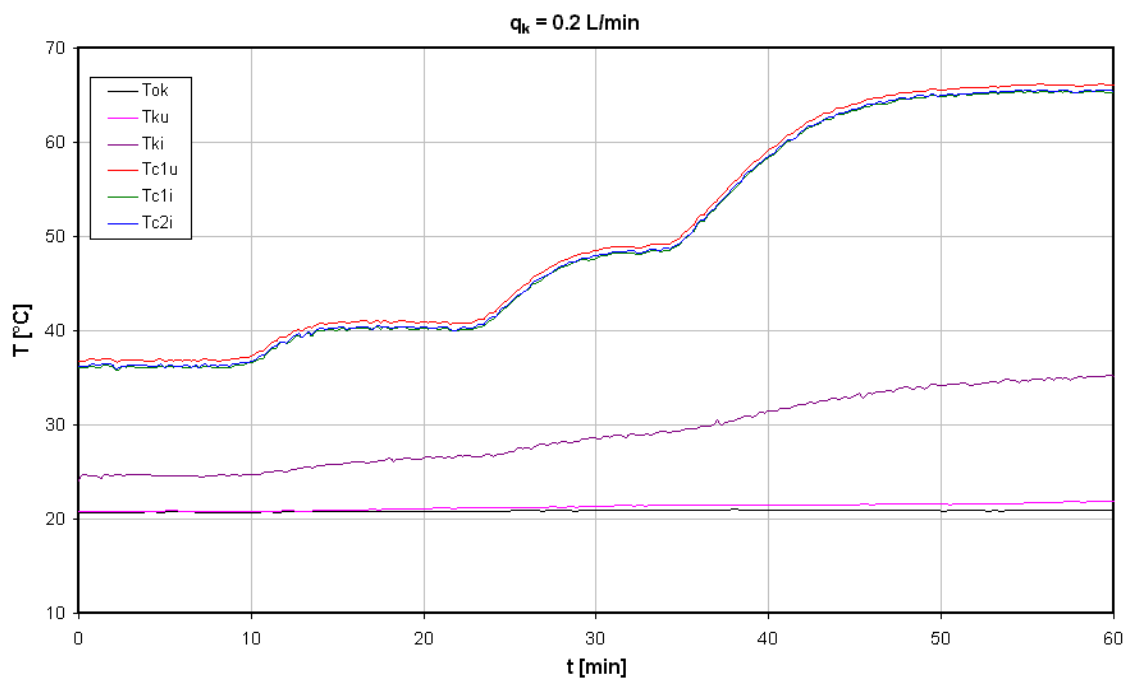


Slika 4.1.4 Raspodjela temperatura po segmentima za $q_1 = 1,0$ L/min

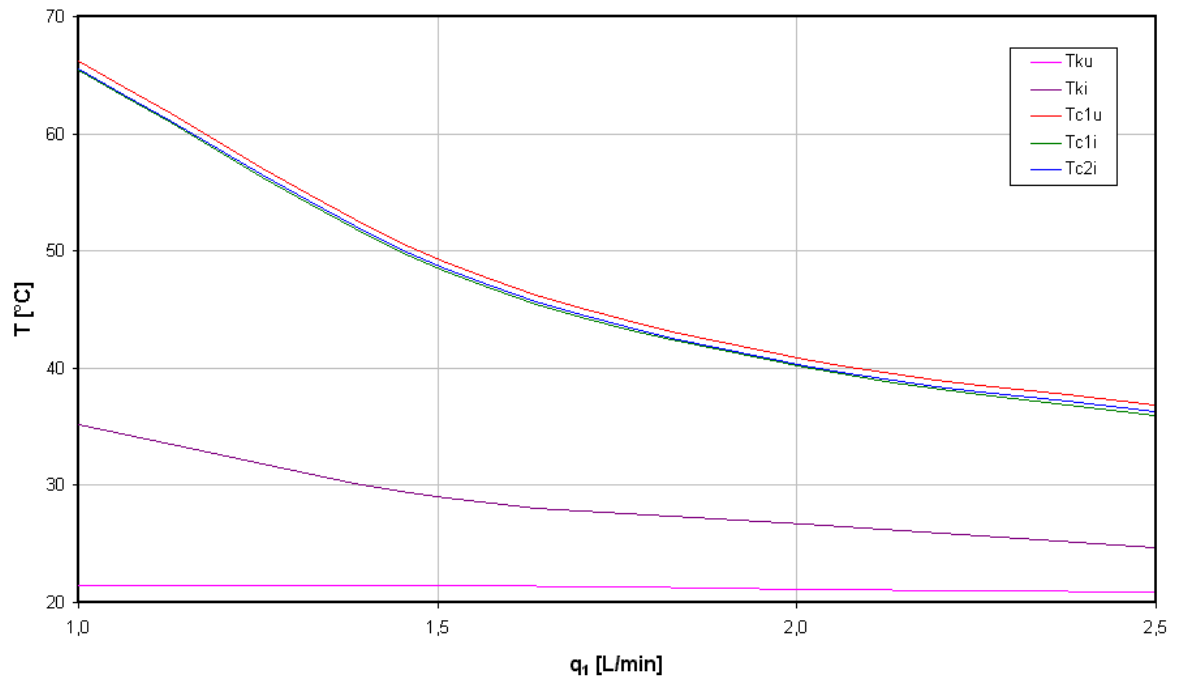


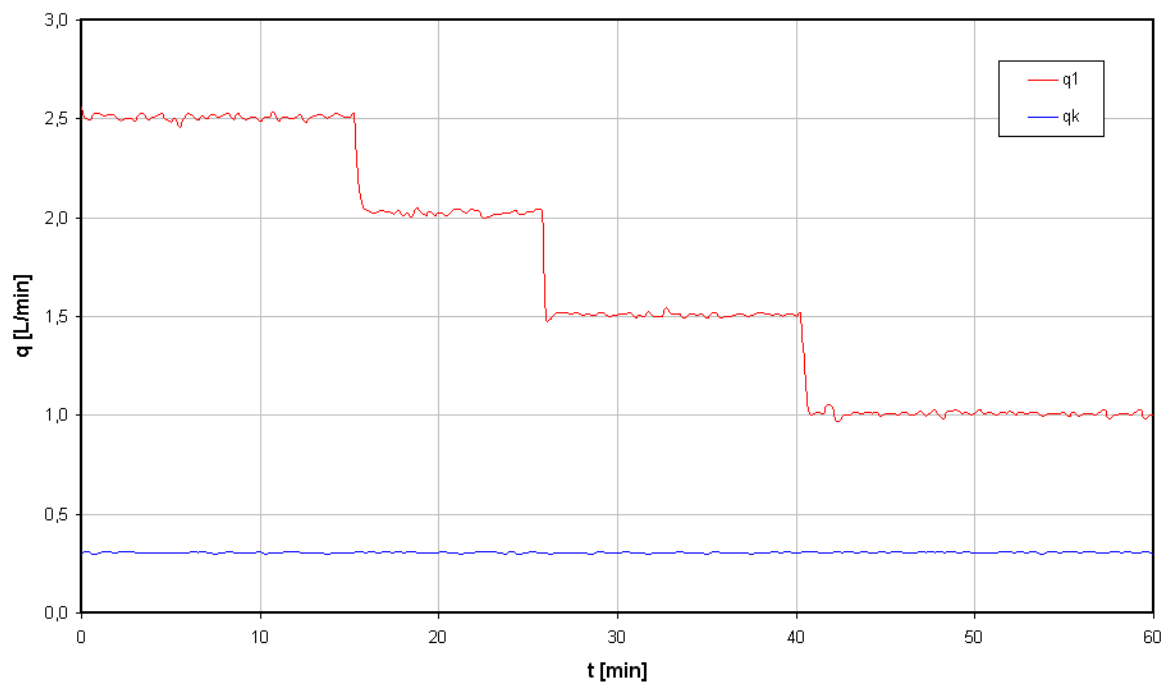
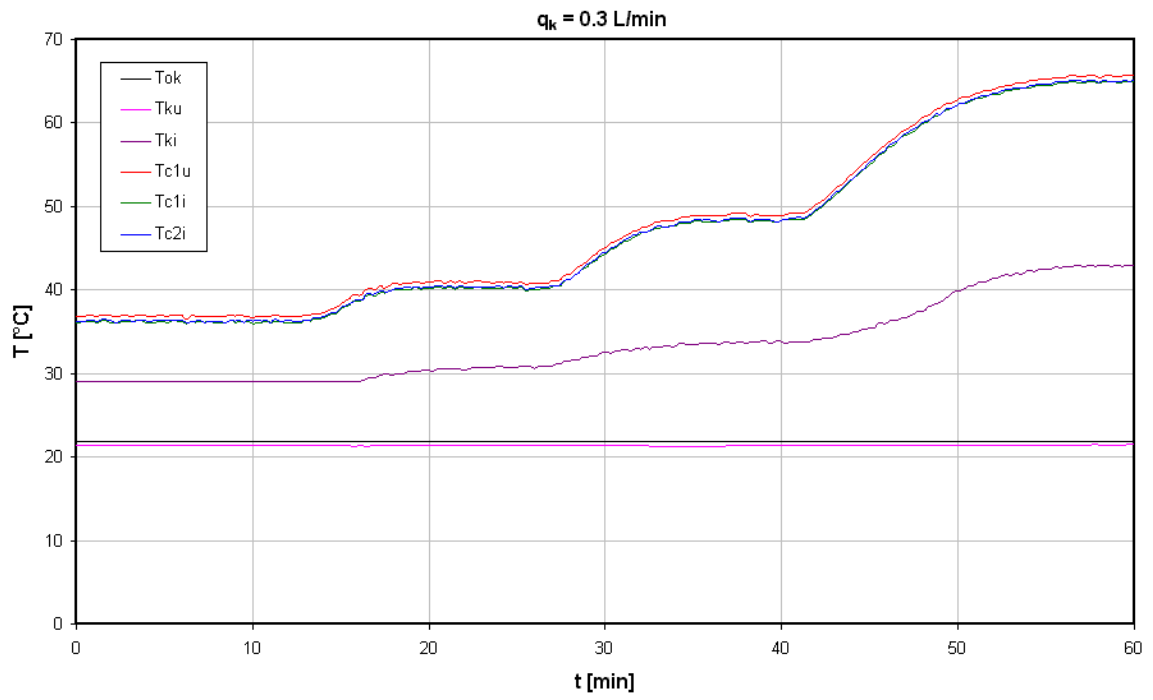
Slika 4.1.5. Statičke karakteristike za različite protoke plina, dobivene iz modela procesa

4.2 Rezultati eksperimentalnog istraživanja

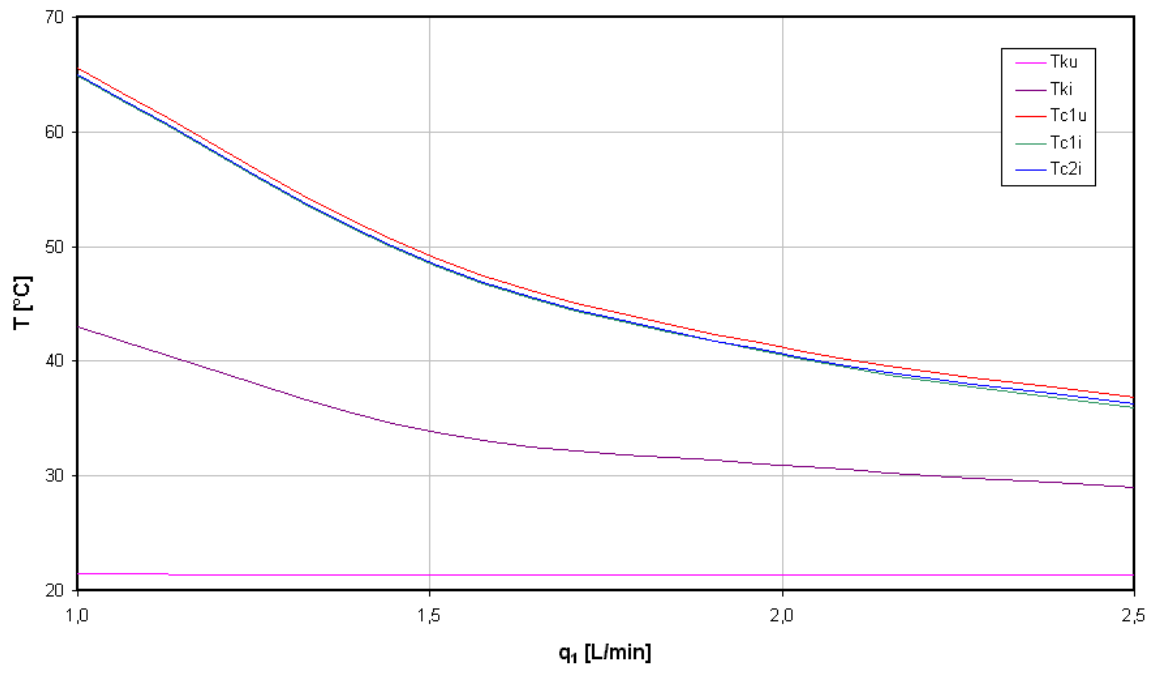


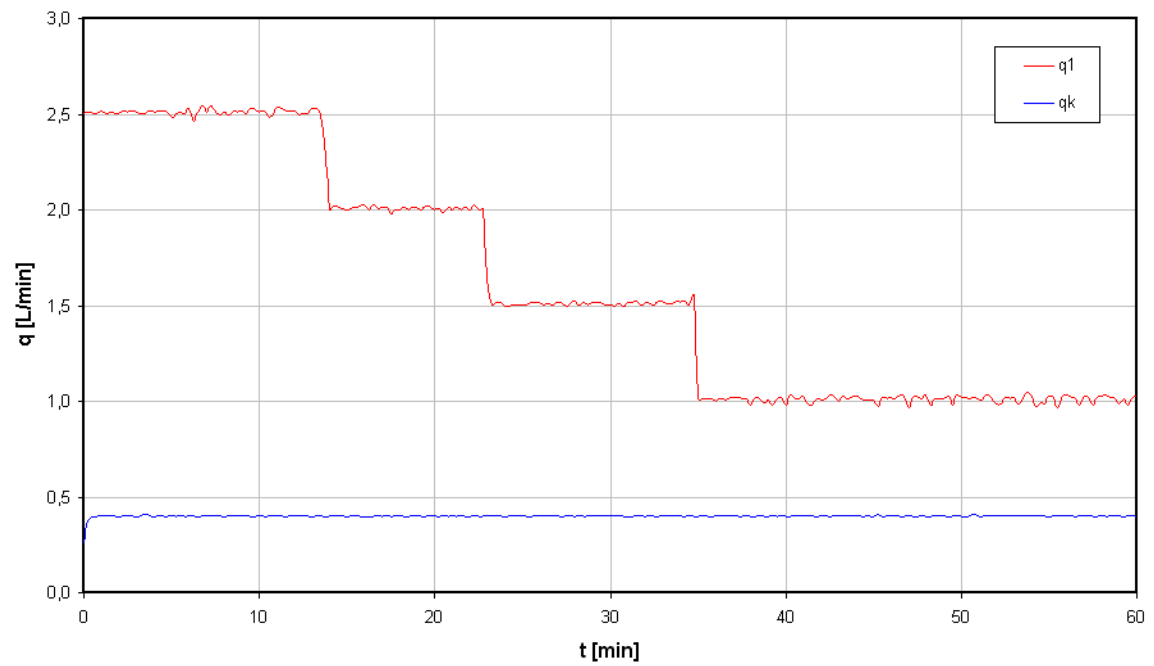
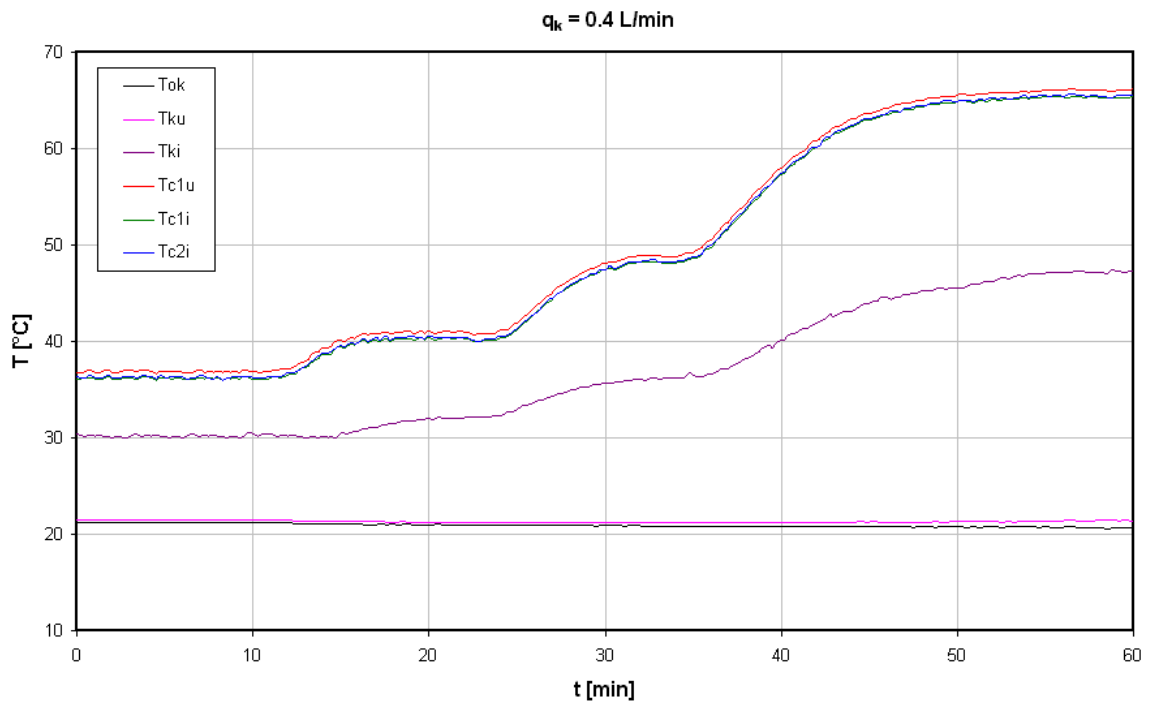
Statička karakteristika pri $q_k = 0.2 \text{ L/min}$



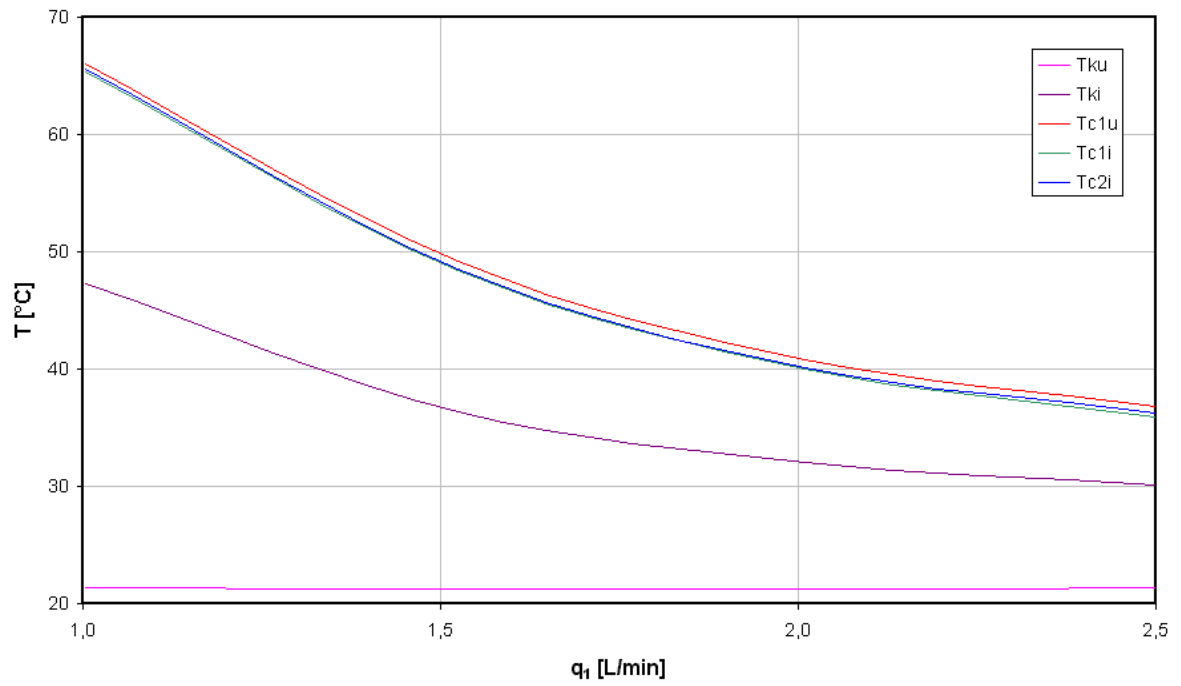


Statička karakteristika pri $q_k = 0.3 \text{ L/min}$

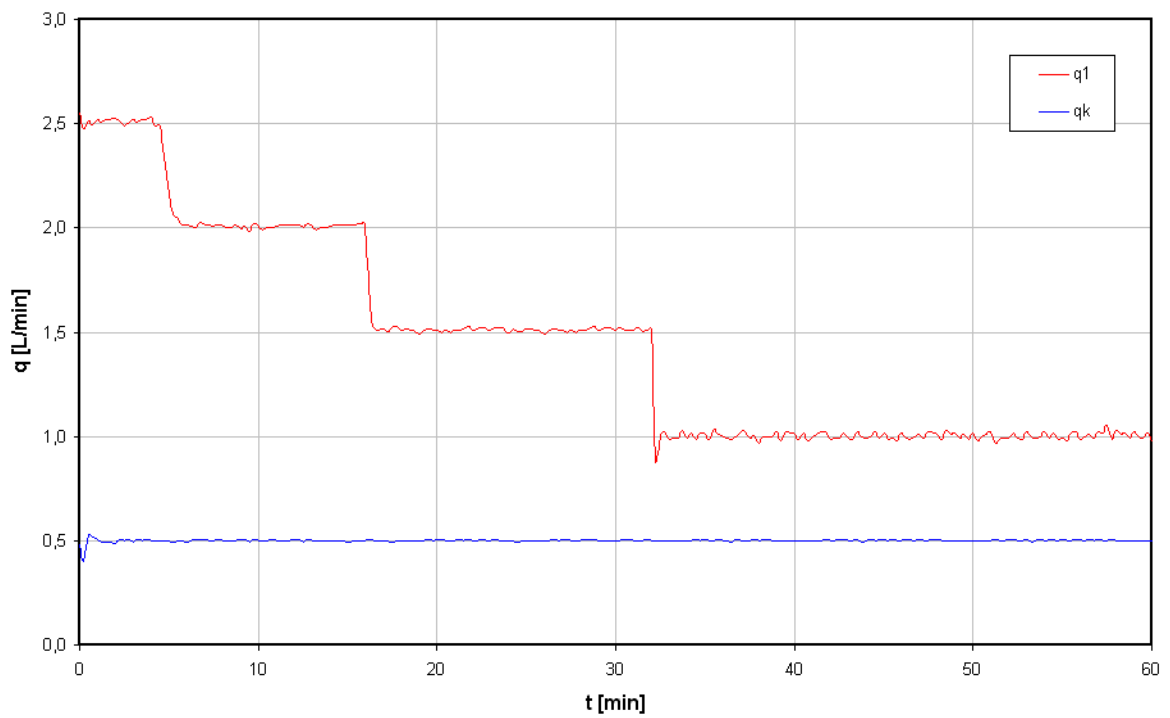
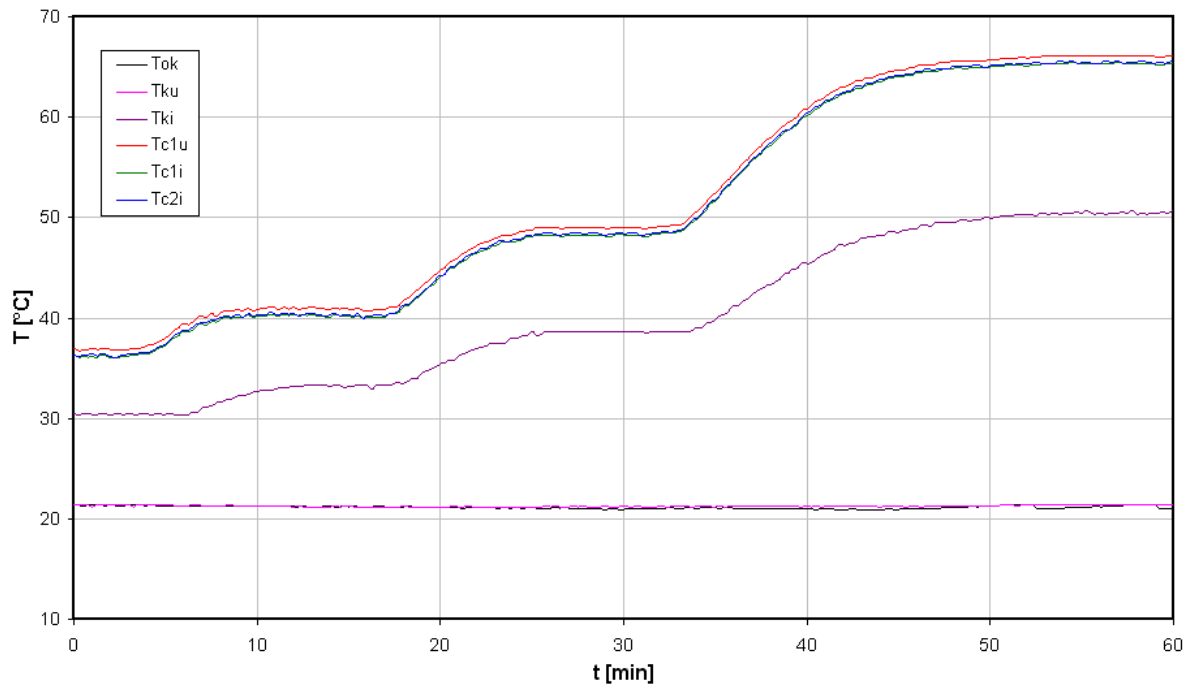




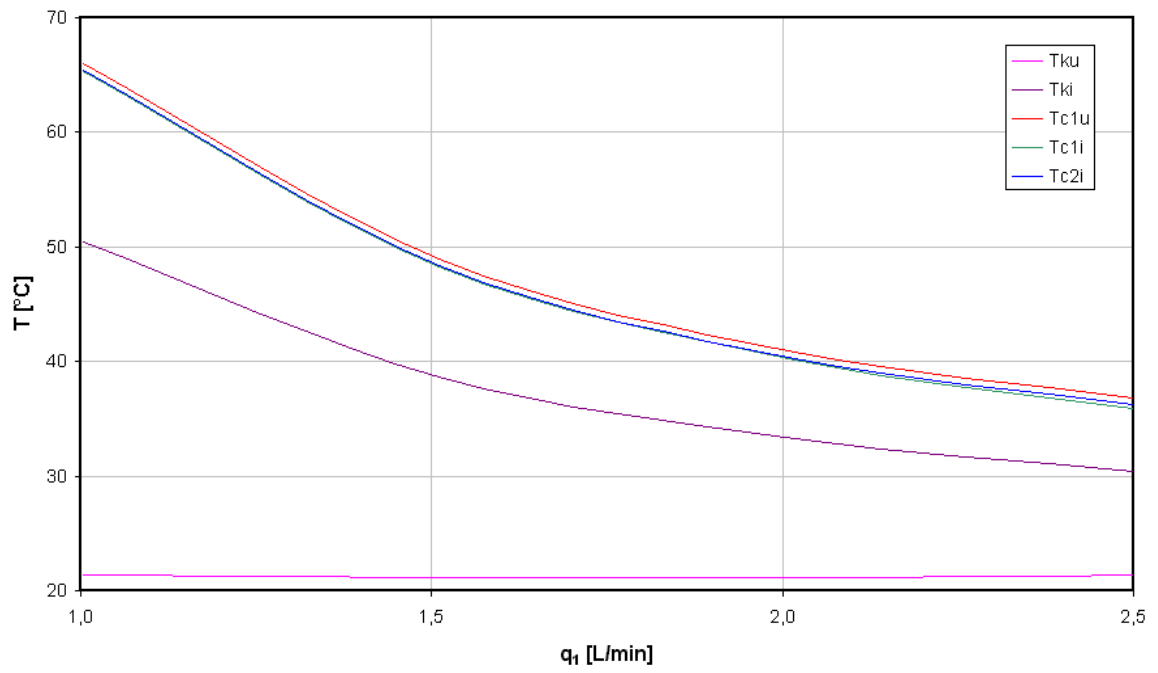
Statička karakteristika pri $q_k = 0.4 \text{ L/min}$

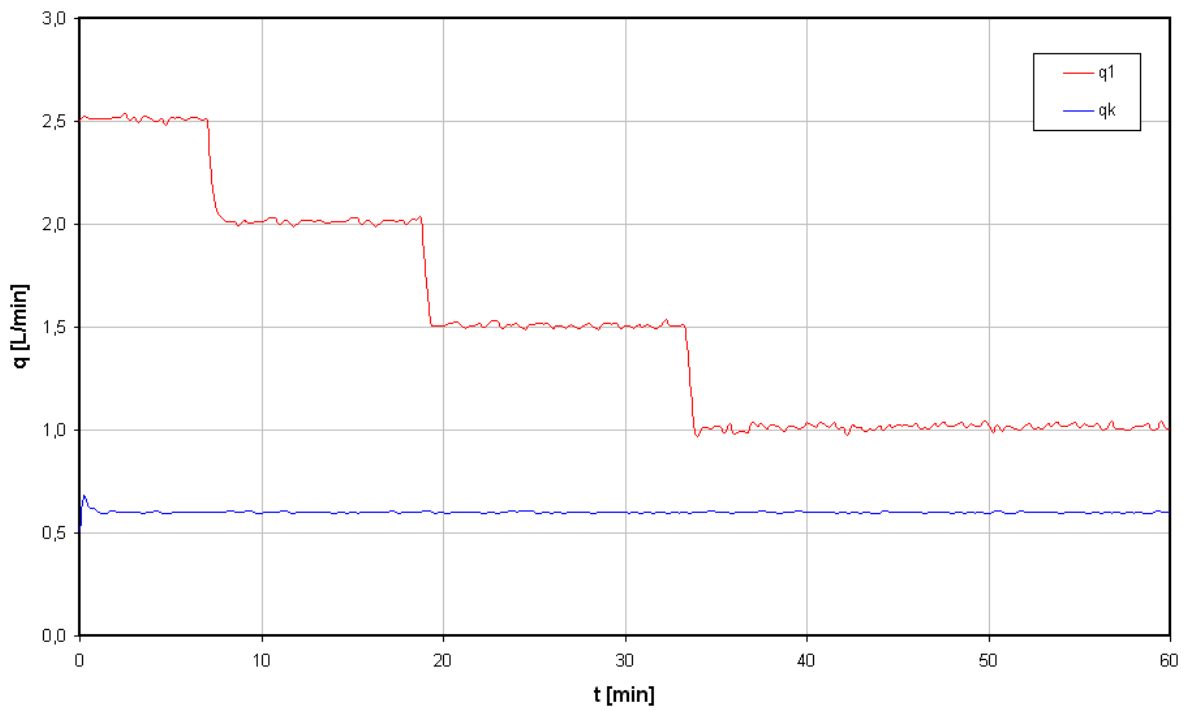
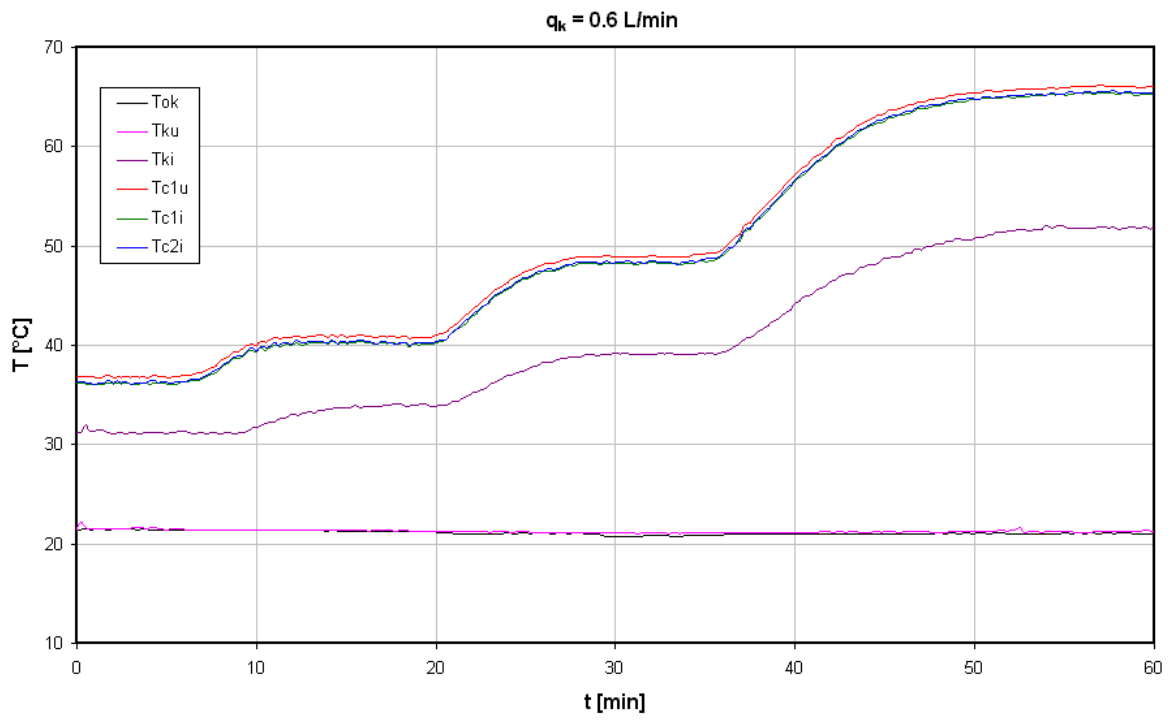


$q_k = 0.5 \text{ L/min}$

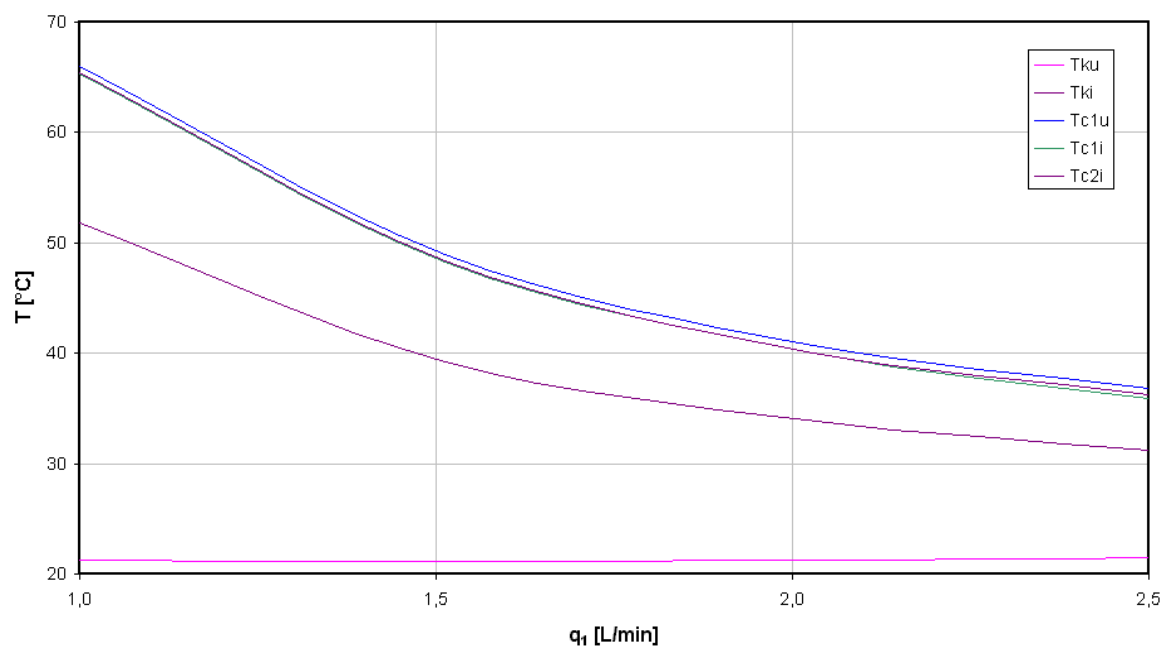


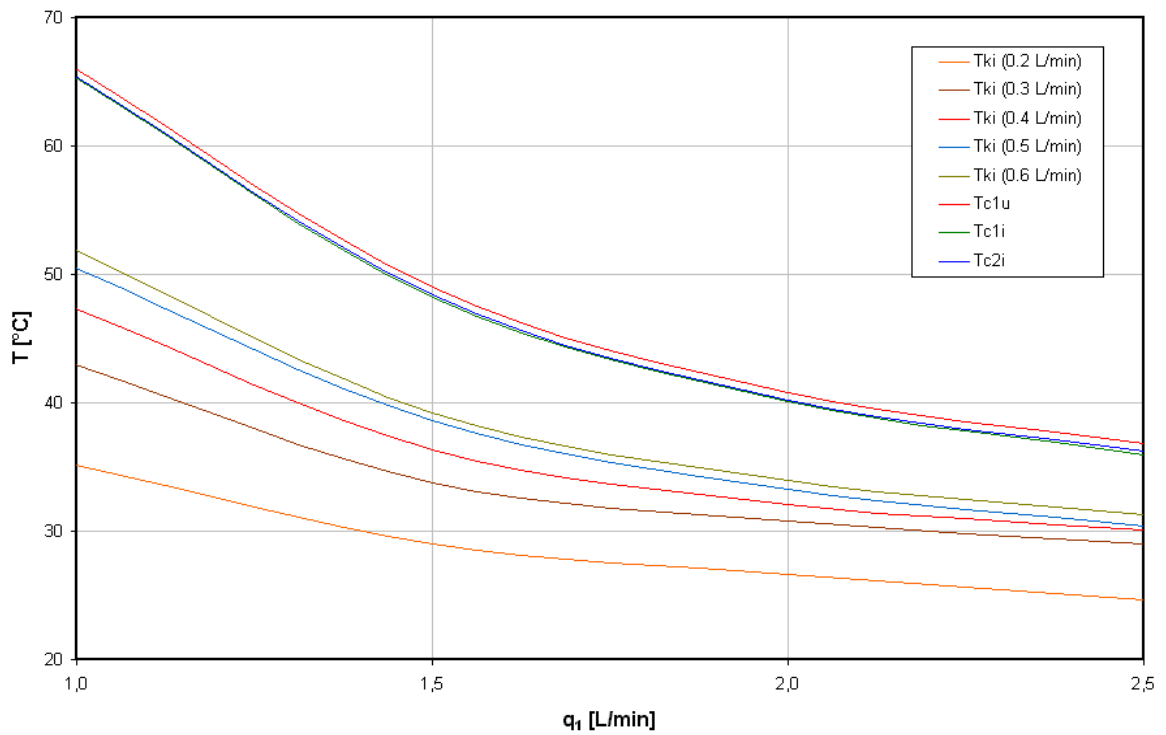
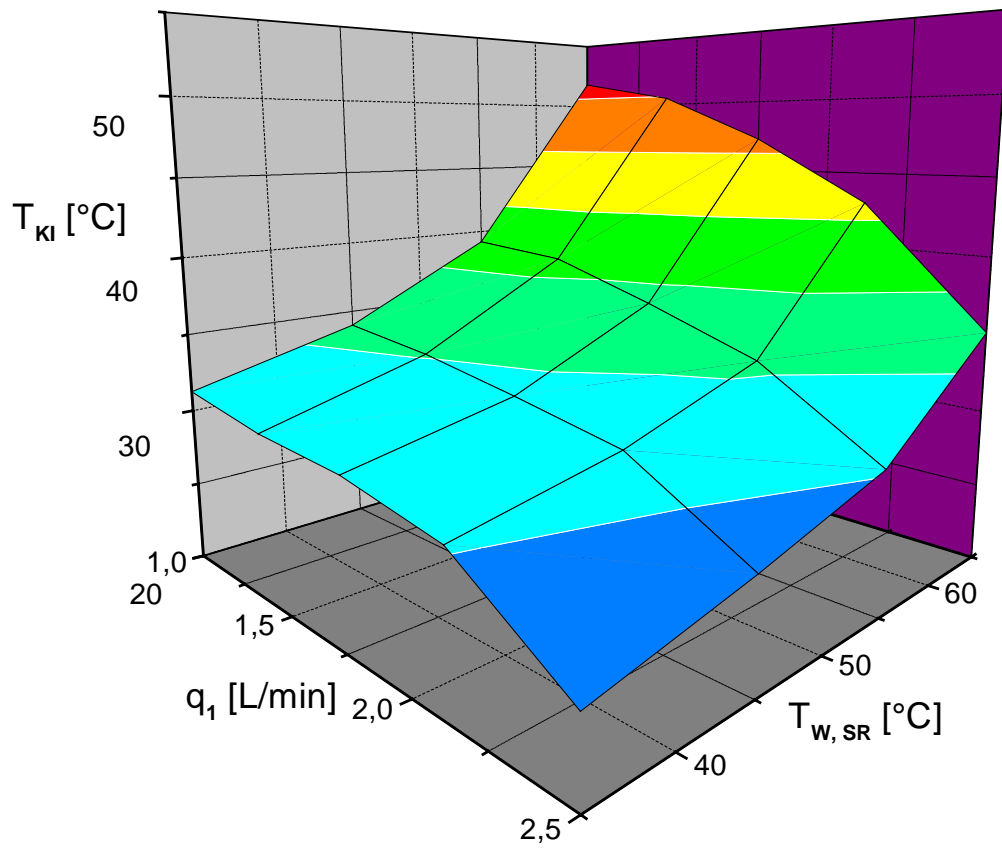
Statička karakteristika pri $q_k = 0.5 \text{ L/min}$





Statička karakteristika pri $q_k = 0.6 \text{ L/min}$





Slika 4.2.a i b Statičke karakteristike za različite protoke plina

5. RASPRAVA

Zamišljanje građe izmjenjivača bio je prvi korak pri ostvarenju projektnog zadatka. Zatim je izveden dinamički matematički model procesa topline izmjene i prijenosa tvari, kako bi se definirale karakteristične ulazne i izlazne veličine i uočilo njihovo međudjelovanje. Izrađeni simulacijski program, a zatim simulacijsko istraživanje bili su osnova za projektiranje izvedbe.

Kapilarni izmjenjivač topline opremljen je najsuvremenijim mjernim osjetilima temperature, protoka i tlaka, koji su povezani putem analogno digitalnih pretvornika sa računalom. Na računalu je izveden akvizicijski program u programskom jeziku Visual Basic s kojim se cjelokupan proces u potpunosti automatski vodi. Mjerenje karakterističnih procesnih veličina i vođenje procesa je provodi se putem tri akvizicijske kartice i više krugova mjernih pretvornika. Program na ekranu daje preglednu vizuelnu prezentaciju i grafički prikaz dinamičkih promjena karakterističnih veličina procesa.

Zatim je provedeno eksperimentalno istraživanje na konvencionalan način, uvažavajući sustavski pristup. Izazvana je pobuda (uzrok) u obliku smišljene promjene karakterističnih ulaznih veličina: protoka uzorka zraka kroz kapilaru, temperature uzorka na ulazu kapilare, temperature i protoka grijućeg medija i motreni su odzivi (posljedice) karakterističnih izlaznih veličina, temperatura na smišljeno odabranim mjestima u izmjenjivaču. Tako je dobiven prikaz dinamičkog vladanja procesa.

Povezujući vrijednosti ovih veličina u ustaljenim stanjima s protokom i temperaturom grijućeg fluida na ulazu u izmjenjivač dobivene su statičke karakteristike procesa za različite protoke zraka kroz kapilaru. Na slici 4.2.b dan je skup krivulja što prikazuje ovisnost temperature uzorka zraka na izlazu iz kapilare, T_{ki} , za dane radne uvjete procesa. Vidljivo je da povećanjem protoka zraka temperatura raste, što znači da je prijenos topline grijućeg fluida na kapilaru veći, što se može objasniti teorijom hidrodinamičkog i toplinskog graničnog sloja u laminarnim uvjetima.

U laminarnom području protjecanja fluida postoji dakle hidrodinamički granični sloj fluida, koji se nalazi neposredno uz stijenku cijevi i čija je brzina jednaka nuli. Ovaj sloj predstavlja glavni otpor prijelazu topline sa stijenke cijevi na fluid, a njegova debljina ovisi o brzini strujanja fluida i o fizičkim svojstvima fluida. Povećanjem protoka, odnosno brzine strujanja fluida, debljina ovog sloja se smanjuje, te se smanjuje i otpor prijelazu topline.

Prijelazom iz laminarnog u turbulentno područje debljina hidrodinamičkog graničnog sloja postaje neovisna o daljnjem povećanju brzine. Ovo je također vidljivo na slici 4.2.b, pa se može zaključiti da granična vrijednost protoka nije postignuta u ovim uvjetima. No, vidljivo je i da daljnje povećanje protoka grijanog fluida ne bi imalo velikog utjecaja na njegovu izlaznu temperaturu, odnosno daljnje povećanje protoka ne bi povećalo prijenos topline. Ovdje je zapravo riječ o superponiranju dvaju utjecaja na prijenos topline: otpor prijenosu se smanjuju s povećanjem protoka, dok se vrijeme zadržavanja uzorka u izmjenjivaču smanjuje.

Pri objašnjenju matematičkog modela procesa važno je istaknuti, da se nije razmatrao utjecaj posebne geometrije sustava na proces prijenosa topline (kapilarne sile), već je primjenjena klasična teorija koja empirijski povezuje hidrodinamiku i uvjete prijenosa topline.

Simuliranjem je ustanovljena dobra podudarnost modela i eksperimenta u ustaljenim stanjima procesa. Koeficijenti prijelaza topline na stijenkama kapilare i cijevi računati su prema izrazima danim u poglavlju 2.2. Pri tom je pretpostavljeno da fizička svojstva fluida ne mijenjaju svoju vrijednost u radnom području temperatura u procesu, što je u skladu s literaturnim podacima. Tako su koeficijenti prijenosa topline dani samo kao funkcija Reynoldsove značajke.

6. Zaključak

1. Zamišljen je kapilarni izmjenjivač topline. Razvijen je dinamički matematički model procesa koji se u njemu odvija. Model je poslužio kao osnovica za projektiranje laboratorijskog uređaja. Zatim je provedeno eksperimentalno istraživanje dinamičkog vladanja procesa, i to tako da su izazvane prijelazne pobude promjenom protoka i temperatura. Mjerenja u potpunosti pomoću računala.
2. Utvrđen je visok stupanj podudarnosti vladanja modela procesa i stvarnog procesa.
3. Stečena su znanja s područja prijenosa topline, konstruiranja izmjenjivača topline, nova znanja vezana uz eksperimentalno istraživanje: znanja iz mjerenja i vođenja procesa, povezivanja signala na računalo i njihove obrade.

7. Literatura

7.1 Knjige

Beer, E.: Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb 1994.

Byron Bird, R., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., New York 1960.

McAdams, William H.: Heat Transmission, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York 1954.

7.2 Standardi

Instrument Society of America, American National Standard, Instrumentation Symbols and Identification, ANSI/ISA-S5.1-1985

Instrument Society of America, American National Standard, Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems, ISA-S5.3-1983

8. Prilozi

8.1 Popis oznaka

Indeksi:

k – kapilara

T – teflon (stijenka)

g – grijući (topli) fluid

A_1 – poprečni presjek anularnog prostora cijevi 1

A_2 – poprečni presjek anularnog prostora cijevi 2

A_k – poprečni presjek cijevke kapilare

A_{sk} – površina poprečnog presjeka stijenke cijevke kapilare

A_{s1} – površina poprečnog presjeka stijenke cijevi 1

A_{s2} – površina poprečnog presjeka stijenke cijevi 2

C_{Pvz} – specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka

C_{PT} – specifični toplinski kapacitet teflona

C_{Pg1} – specifični toplinski kapacitet fluida u cijevi 1

C_{Pg2} – specifični toplinski kapacitet fluida u cijevi 2

n – broj zamišljenih segmenata

L – duljina izmjenjivača

q_k – protok kroz kapilaru

q_g – protok grijućeg medija

S_{ku} – unutarnja površina plašta cijevke kapilare

S_{kv} – vanjska površina plašta cijevke kapilare

S_{1u} – unutarnja površina plašta cijevi 1

S_{1v} – vanjska površina plašta cijevi 1

S_{2u} – unutarnja površina plašta cijevi 2

S_{2v} – vanjska površina plašta cijevi 2

T_k – temperatura zamišljenog segmenta kapilare

T_1 – temperatura zamišljenog segmenta cijevi 1

T_2 – temperatura zamišljenog segmenta cijevi 2

T_{sk} – temperatura zamišljenog segmenta stijenke kapilare

T_{s1} – temperatura zamišljenog segmenta stijenke cijevi 1

T_{s2} – temperatura zamišljenog segmenta stijenke cijevi 2

V_k – volumen zamišljenog segmenta kapilare

V_1 – volumen anularnog prostora cijevi 1

V_2 – volumen anularnog prostora cijevi 2

V_{sk} – volumen zamišljenog segmenta stijenke kapilare

V_{s1} – volumen zamišljenog segmenta stijenke cijevi 1

V_{s2} – volumen zamišljenog segmenta stijenke cijevi 2

α_{ku} – koefijent prijelaza topline kapilara-stijenka kapilare

α_{kv} – koeficijent prijelaza topline stijenka kapilare- cijev 1

α_{1u} – koefijent prijelaza topline cijev 1-stijenka cijevi 1

α_{1v} – koeficijent prijelaza topline stijenka cijevi 1- cijev 2

α_{2u} – koefijent prijelaza topline cijev 2-stijenka cijevi 2

α_{2v} – koeficijent prijelaza topline stijenka cijevi 2- okolina

ρ_T – gustoća teflona

ρ_{vz} – gustoća uzorka vlažnog zraka

ρ_{g1} – prosječna gustoća fluida u cijevi 1

ρ_{g2} – prosječna gustoća fluida u cijevi 2

λ_T – toplinska vodljivost teflona

8.2 Simulacijski program

```
% KAPILARNI MIKROIZMJENJIVAE TOPLINE ZA UZORKOVANJE i
% PRIJENOS VLAZNOG ZRAKA
% Istrostrujni izmjenjivac topline
% Simulacija, Verzija m5, studeni 2001.

clear all;

%-----
%                PODACI O PROCESU
%-----

%-----
%                Parametri procesa
%-----

% -- ZRAK T=40°C -----

roz = 1.1308;           % gustoca zraka,[kg/m3]
cpz = 1006.6;          % toplinski kapacitet zraka,[J/(kg°C)]
lamz = 0.02723;        % toplinska vodljivost zraka,[W/(mK)]
betaz = 1/313;         % koeficijent toplinskog sirenja,[1/K]
etaz = 1.906e-5;       % dinamicka viskoznost zraka,[Pas]
PrZ = 0.69640;         % Prandtlova znacajka za zrak

% -- VODA, 40°C -----

rov = 994.59;          % gustoca vode,[kg/m3]
cpv = 4183;            % toplinski kapacitet vode,[J/kg°C]
lamv = 0.624;          % toplinska vodljivost vode,[W/mK]
etav = 0.000852;       % dinamicka viskoznost vode,[Pas]
PrV = 1.73129;         % Prandtlova znacajka za vodu

%-----
% Geometrijske izmjere izmjenjivaca topline
%-----

n = 50;                % broj segmenata izmjenjivaca topline
L = 4.4;               % ukupna duljina izmjenjivaca topline,[m]
```

```

% -- unutarnji promjeri:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m] ---
du = [0.8e-3; 4.8e-3; 12.7e-3];

% -- vanjski promjeri:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m] ---
dv = [1.6E-3; 6.4E-3; 14.3E-3];

% -- ekvivalentni promjeri:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m] ---
de1 = du(2)-dv(1);
de2 = du(3)-dv(2);
de = [du(1); de1; de2];

% -- unutrašnje površine segmenata:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m] ---
Su=du*pi*L/n;
Sv=dv*pi*L/n;

% -- površina poprecnih presjeka:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m] ---
Ak =(du(1)^2)*pi/4;
A1 = (du(2)^2-dv(1)^2)*pi/4;
A2 = (du(3)^2-dv(2)^2)*pi/4;
A = [Ak; A1; A2];

% -- volumen segmenata:
%     kapilare, 1.cijevi, 2.cijevi, [m3] ---
V = A*L/n;

%-----
%                               Pocetni uvjeti
%-----
qk=0.2/6e4;           % protok zraka kroz kapilaru,[m3/s]
qt=2.5/6e4;           % protok grijuceg medija kroz cijev 1,[m3/s]
qt2=qt;               % protok grijuceg medija kroz cijev 2,[m3/s]

q = [qk; qt; qt2];

Tku=20+273.2;         %temperatura na ulazu u kapilaru, [K]
Tok=20+273.2;         % temperatura okolnog zraka,[K]

% temperatura vode na ulazu u cijev 1 (staticka
karakteristika grijala vode), [K]
Tt1u = 12.129*(qt*6e4)^2-61.296*(qt*6e4)+114.55+273.15;

```

```
% ODREDJANJE REZIMA STRUJANJA I KOEFICIJENATA PRIJELAZA
% TOPLINE
```

```
% Re<2100 laminarno
% 2100<Re<10000 prijelazno
% Re>10000 turbulentno
```

```
ReK = (qk/A(1))*de(1)*roz/etaz;
Re1 = (qt/A(2))*de(2)*rov/etav;
Re2 = (qt2/A(3))*de(3)*rov/etav;
```

```
alfaKu = 1.86*(ReK^0.333)*(PrZ^0.333)*...
        ((de(1)*n/L)^0.333)*lamz/de(1);
```

```
if Re1 < 2100 %Sieder-Tate za laminarno
    alfaKv =
    1.86*(Re1^0.333)*(PrV^0.333)*((de(2)*n/L)^0.333)*lamz/de(2);
else % Monrad-Pelton za prijelazno
    alfaKv = 0.116*(Re1^0.667-...
        125)*(PrV^0.333)*((1+de(2)*n/L)^0.667)*lamz/de(2);
end
alfalu = alfaKv;
```

```
if Re2 < 2100 %Sieder-Tate za laminarno
    alfa1v =
    1.86*(Re2^0.333)*(PrV^0.333)*((de(3)*n/L)^0.333)*lamz/de(3);
else % Monrad-Pelton za prijelazno
    alfa1v = 0.116*(Re2^0.667-...
        125)*(PrV^0.333)*((1+de(3)*n/L)^0.667)*lamz/de(3);
end
```

```
alfa2u = alfa1v;
```

```
alfa2v = 0.53*(((dv(3)^3)*(roz^2)*9.81*betaz*(Ttlu-...
    Tok))/(etaz^2))^0.25*(PrZ^0.25)*lamz/dv(3);
```

```
alfa=[alfaKu alfaKv alfa1u alfa1v alfa2u alfa2v];
```

```

% -----
% Proracun stacionarnog stanja
% -----
%
% Rjesavanje pomocu matrica
%     1. definiranje dijelova matrice koeficijenata
%     2. sastavljanje matrice koeficijenata
%     3. sastavljanje vektora rjesenja
%     4. racunanje vektora nepoznanica
%
% 1. definiranje dijelova matrice koeficijenata
% bez obzira na broj segmenta, matrica koeficijenata ima 36
% podmatrica
%
%      | M11  M12  M13  M14  M15  M16 |
%      | M21  M22  M23  M24  M25  M26 |
%  M = | M31  M32  M33  M34  M35  M36 |
%      | M41  M42  M43  M44  M45  M46 |
%      | M51  M52  M53  M54  M55  M56 |
%      | M61  M62  M63  M64  M65  M66 |
%
% M11
m11a = diag(ones(n,1),0);
m11a = -(qk*roz*cpz+alfa(1)*Su(1))*m11a;
m11b = diag(ones((n-1),1),-1); m11b=qk*roz*cpz*m11b;
m11 = m11a+m11b;
%
% M21
m21=zeros(n);
% M31
m31=zeros(n);
% M41
m41=alfa(1)*Su(1)*diag(ones(n,1),0);
% M51
m51=zeros(n);
% M61
m61=zeros(n);
%
% M12
m12=zeros(n);

```



```

% M22
m22a=diag(ones(n,1),0);
m22a=-(qt*rov*cpv+alfa(2)*Sv(1)+alfa(3)*Su(2))*m22a;
m22b=diag(ones((n-1),1),-1);
m22b=qt*rov*cpv*m22b;
m22=m22a+m22b;
% M32
m32=zeros(n);
m32(1,n)=qt2*rov*cpv;
% M42
m42=alfa(2)*Sv(1)*diag(ones(n,1),0);
% M52
m52=alfa(3)*Su(2)*diag(ones(n,1),0);
% M62
m62=zeros(n);
%
% M13
m13=zeros(n);
% M23
m23=zeros(n);
% M33
m33a=diag(ones(n,1),0);
m33a=-(qt2*rov*cpv+alfa(4)*Sv(2)+alfa(5)*Su(3))*m33a;
m33b=diag(ones((n-1),1),-1);
m33b=qt2*rov*cpv*m33b;
m33=m33a+m33b;
% M43
m43=zeros(n);
% M53
m53=alfa(4)*Sv(2)*diag(ones(n,1),0);
% M63
m63=alfa(5)*Su(3)*diag(ones(n,1),0);
%
% M14
m14=alfa(1)*Su(1)*diag(ones(n,1),0);
% M24
m24=alfa(2)*Sv(1)*diag(ones(n,1),0);
% M34
m34=zeros(n);
% M44
m44=-(alfa(1)*Su(1)+alfa(2)*Sv(1))*diag(ones(n,1),0);
% M54
m54=zeros(n);
% M64
m64=zeros(n);
%
% M15
m15=zeros(n);
% M25
m25=alfa(3)*Su(2)*diag(ones(n,1),0);

```

```

% M35
m35=alfa(4)*Sv(2)*diag(ones(n,1),0);
% M45
m45=zeros(n);
% M55
m55=-(alfa(3)*Su(2)+alfa(4)*Sv(2))*diag(ones(n,1),0);
% M65
m65=zeros(n);
%
% M16
m16=zeros(n);
% M26
m26=zeros(n);
% M36
m36=alfa(5)*Su(3)*diag(ones(n,1),0);
% M46
m46=zeros(n);
% M56
m56=zeros(n);
% M66
m66=-(alfa(5)*Su(3)+alfa(6)*Sv(3))*diag(ones(n,1),0);
% 2. sastavljanje matrice koeficijenata
%
% matrica koeficijenata
M=[m11 m12 m13 m14 m15 m16;
    m21 m22 m23 m24 m25 m26;
    m31 m32 m33 m34 m35 m36;
    m41 m42 m43 m44 m45 m46;
    m51 m52 m53 m54 m55 m56;
    m61 m62 m63 m64 m65 m66];
% 3. sastavljanje vektor rjesenja
%
% Vektor rjesenja im 6*n elemenata
R=zeros(5*n,1);
R(1)=-qk*roz*cpz*Tku;
R(n+1)=-qt*rov*cpv*Tt1u;
Ra=-alfa(6)*Sv(3)*Tok*ones(n,1);
R=[R;Ra];
% 4. raeunanje vektora nepoznanica
%
% Nepoznanice su u vektoru dimenzija 6*n po sljedecem
% rasporedu
% X=[Tk,1...Tk,n Tt1,1...Tt1,n Tt2,1...Tt2,n Tsk,1...Tsk,n
% Ts1,1...Ts1,n Ts2,1...Ts2,n]
X=M\R;
Xc=X-273.2;
Tk=Xc(1:n);
Tt1=Xc((n+1):(2*n));
Tt2=Xc((2*n+1):(3*n));
Tsk=Xc((3*n+1):(4*n));
Ts1=Xc((4*n+1):(5*n));

```

```
Ts2=Xc((5*n+1):(6*n));

plot(Tk,'m'), xlabel('segment'), ylabel('T [°C]')
hold on
plot(Tt1,'r')
plot(Tt2,'b')
grid on;

%plot(Tsk,'m')
%hold on;
%plot(Ts1,'r')
%plot(Ts2,'b')
%grid on;
```

8.3 Karakteristike mjernih pretvornika i opreme

8.3.1 Osjetila protoka serije FLR1000

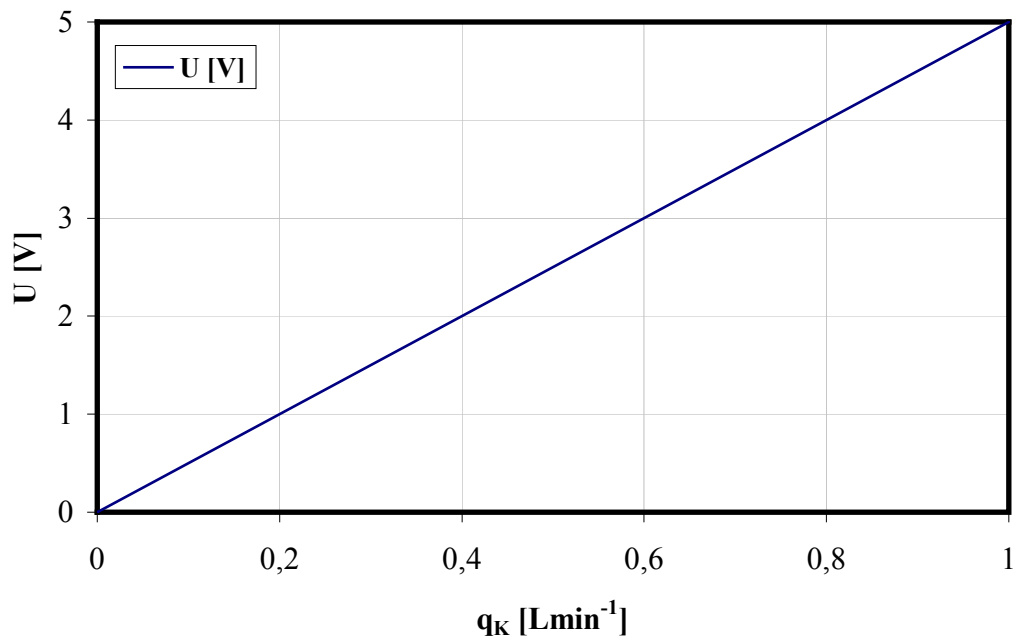
Turbinska osjetila i pretvornici protoka serije FLR1000 namijenjena su mjerenju malih protoka, od 2 mL/min pa sve do 5 L/min. Osjetila mogu imati široku primjenu od industrijske do laboratorijske. Osjetila protoka iz serije FLR1000 napajaju se s 12 Vdc i prilagođena su tako da se mogu uklopiti u sustav akvizicije podataka jer imaju izlazni signal od 0 do 5 Vdc.

FLR1000 serija osjetila rabi Peltonov tip turbinskog kotačića za određivanje protoka flida. Brzina okretanja kotačića turbine linearna je na širokom dinamičkom području. Elektrooptički sustav sastoji se od diode koja emitira energiju u infracrvenom dijelu spektra. Energija zračenja se ili reflektira ili absorira iz “žbica” položenih na malom kotaču turbine. Reflektirana energija se detektira foto-diodom. Prema tome, kotačić turbine se okreće kao odziv na protok plina, te se tako stvaraju električni impulsi.

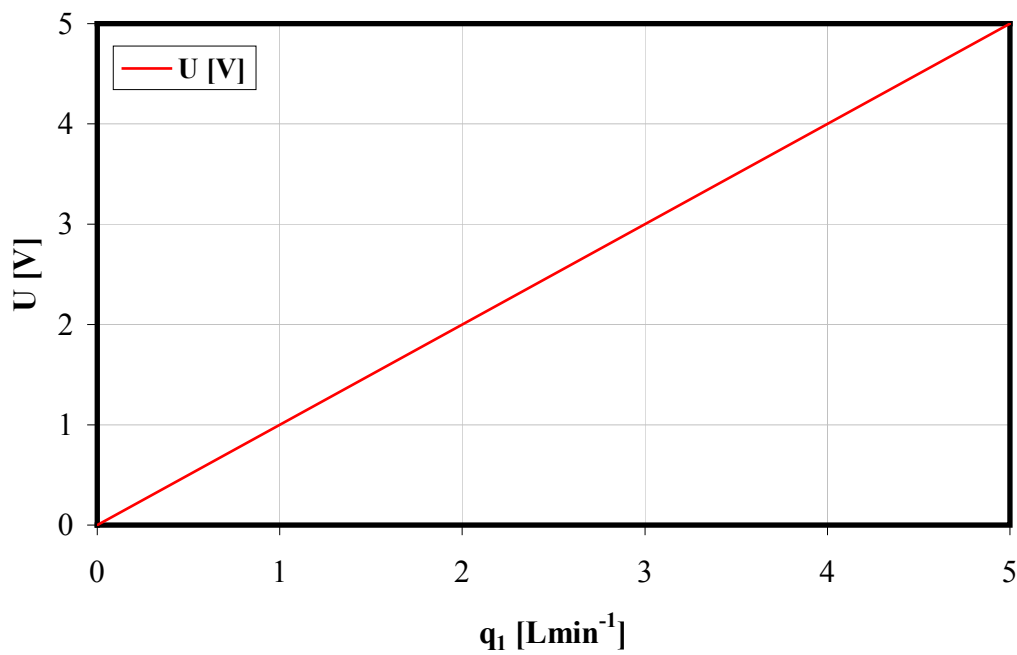
Električni krug daje istosmjerni naponski izlaz proporcionalan protoku. Osjetilo može podnijeti 20% veći protok od navedenog mjernog područja bez oštećenja.

Specifikacija:

Mjerno područje:	0,2 do 1,0 L/min (FLR1004, protok plina) 0,2 do 5,0 L/min (FLR1012, protok kapljevine)
Max.pad tlaka:	6,2 kPa (0,9 PSI, 0,9’’H ₂ O) 41,4 kPa (6 PSI)
Točnost:	±3 % PMO
Izlazni signal:	0 do 5 Vdc, ugodivo ± 20%
Napajanje:	12,5 ± 2 Vdc regulirano 30 mA
Materijal:	40% staklo napunjeno poliphenelen-sulfidom
Temp.područje:	0 do 50 °C
Temp.osjetljivost:	± 0,2 % / °C
Linearnost:	± 3% PMO
Ponovljivost:	± 0,5 PMO od 50 do 100% max.protoka plina, ± 0,2 PMO za kapljevine



Slika 8.1 Baždarna karakteristika - FLR 1004



Slika 8.2 Baždarna karakteristika - FLR 1012

8.3.2 Elektronički upravljani ventil PV-14 B

Elektronički upravljani ventil upravljiv je pomoću električnog strujnog signala (4-20 mA) i proporcionalno podešava protok od potpuno zatvorenog do potpuno otvorenog stanja ventila. Ovaj ventil je moguće programirati da djeluje direktno i reverzno. Pri direktnom djelovanju s porastom iznosa strujnog signala ventil se otvara, dok se pri reverznom djelovanju s porastom iznosa strujnog signala ventil zatvara.

Također, ova jedinica se može programirati da reagira na prestanak strujnog signala tako da ventil otvori ili zatvori u potpunosti ako signal padne ispod 3,5 mA ili prijeđe iznos od 20,5 mA. Napajanje jedinice je +12 Vdc.

8.3.3 Elektronički upravljani proporcionalni ventil Omega serije PV100

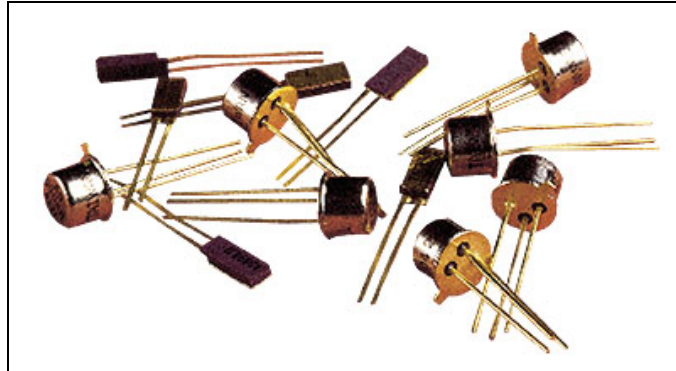
Elektronički regulirani proporcionalni ventila Omega serije PV-100 namijenjeni su reguliranju protoka plinova. Ventil je upravlján naponskim signalom od 0 do 5 Vdc, te djeluje direktno, tj veći iznos upravljačkog napona uzrokuje veće gibanje stapa ventila i veći protok.

Specifikacija

Vrsta ventila:	2-way, normalno zatvoren
Vlažni dijelovi:	nerđajući čelik
Napajanje:	12-24 V DC
Potrošak energije:	7 W max.
Upravljački signal:	0-5 V dc
Linearno područje:	15-85 % punog protoka
Vrijeme odziva:	40 msec pri tlaku 0 100 msec pri maksimalnom tlaku
Ponovljivost:	± 5 % na linearnom području

8.3.4 Temperaturno osjetila OMEGA AD-590

“AD-590 Solid State Temperature Sensor” je osjetilo temperature malih dimenzija koje pretvara temperaturni ulaz u proporcionalni linearni strujni izlaz. Napredna tehnologija u AD-590 osobito je pogodna za posebna mjerenje temperature u mjernom području od -55 do 150 °C gdje se zahtijeva pouzdanost, linearnost i točnost. Veličina i brzi odziv čine ga idealnim za primjene gdje su dimenzije od velike važnosti.



Slika 8.3 “Solid state” osjetilo temperature OMEGA AD-590 izrađuje se u dvije verzije (“case” i “flat pack”)

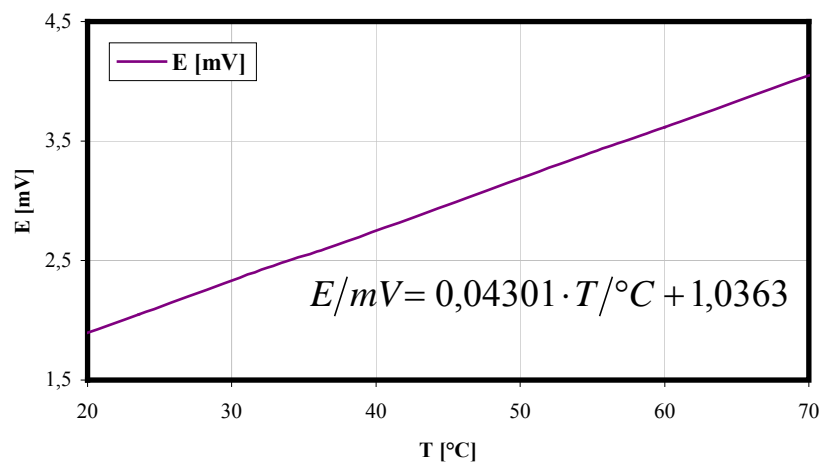
Specifikacija:

Nominalni strujni izlaz na 25°C : $298,2 \mu\text{A}$

Nominalni temperaturni koeficijent: $1 \mu\text{A/K}$

Mjerna nesigurnost: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

8.3.5 Temperaturno osjetilo termopar NiCr – Ni



Slika 8.4 Baždarna karakteristika termopara NiCr - Ni

8.4 Životopis

Rođen: 9. studenoga.1975. u Zagrebu, Republika Hrvatska
Srednja škola: Tehnička škola Ruđera Boškovića (1990. - 1994.)
Fakultet: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (1994. - 2001.)
Jezici: govori, čita i piše engleski, čita i razumije njemački
Područje rada: kemijsko inženjerstvo, mjerenja i vođenje procesa, informatika