

# MERJENJE LOMNEGA KOLIČNIKA S FIBEROPTIČNIM ODBOJNOSTNIM SENZORJEM

A.Suhadolnik, A.Babnik, J.Možina

**KLJUČNE BESEDE:** optična vlakna, vlakenskooptični senzorji, odbojnostni senzorji, lomni količnik, merjenje karakteristik, merjenje koncentracije raztopin, eksperimentalne raziskave, eksperimentalni rezultati

**POVZETEK:** Razvili smo verzijo fiberoptičnega odbojnostnega senzorja za merjenje lomnih količnikov tekočin. Senzor omogoča merjenje lomnega količnika z natančnostjo 0.001. Prikazani so eksperimentalni rezultati merjenja lomnega količnika različnih raztopin NaCl v vodi.

## REFRACTIVE INDEX MEASUREMENT USING OPTICAL FIBER REFLECTION SENSOR

**KEY WORDS:** optic fibres, fibre optic sensors, reflection sensors, reflective index, characteristic measurement, solution concentration measurements, experimental research, experimental results

**ABSTRACT:** In this contribution, the optical fiber reflection sensor for the determination of the refractive index of liquids is described. The measuring system has an accuracy of 0.001. The experimental results of refractive index measurements of aqueous solutions of NaCl are presented.

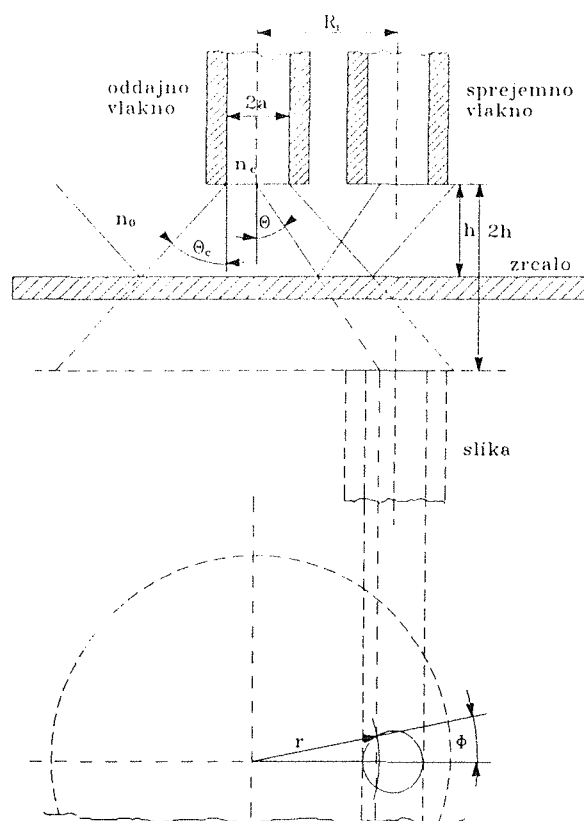
### 1. UVOD

Z optičnimi vlakni je možno izdelati senzorje za merjenje številnih fizikalnih, kemijskih in drugih veličin<sup>(1)</sup>. Med njimi imajo posebno mesto intezitetni odbojnostni senzorji<sup>(2)</sup>. Pri tovrstnih senzorjih merimo količino svetlobe, ki po odboju na zrcalni površini, postavljeni nasproti konici oddajnega vlakna, vstopa v sprejemno vlakno. Oddajno in sprejemno vlakno sta med seboj vzporedni in postavljeni pravokotno na zrcalno površino. Število sprejemnih in lansirnih vlaken je lahko različno<sup>(3)</sup>. Tak senzor ustreza za detekcijo pomikov zrcalne ploskve v smeri osi vlaken. Z različnimi oblikami senzorskih konic<sup>(4)</sup> lahko dosežemo linearnost odziva na delu merilnega območja. Ti senzorji se uporabljajo predvsem kot senzorji pomika<sup>(5)</sup>, pretoka<sup>(6)</sup>, kot hidrofoni<sup>(7)</sup> in merilci pritiska<sup>(2, 8)</sup>. Uporabni so tudi kot detektorji prisotnosti tekočine<sup>(9)</sup>. V tem prispevku poročamo o uporabi tovrstnega senzorja za merjenje lomnega količnika tekočin. Nova metoda merjenja lomnega količnika s fiberoptičnim odbojnostnim senzorjem predstavlja dopolnitev že znanih metod<sup>(10, 11, 12, 13)</sup>.

### 2. TEORETIČNE OSNOVE

Fiberoptični odbojnostni senzor za merjenje lomnega količnika tekočin je sestavljen iz dveh večrodovnih optičnih vlaken (slika 1). Vlakno, po katerem prihaja svetloba do zrcala, imenujemo oddajno vlakno. Sprejemno vlakno, ki je vzporedno oddajnemu, sprejema del odbite svetlobe in jo vodi do fotodiode.

Celotna svetlobna moč  $P_t$  v vstopnem vlaknu se zmanjša ob izstopu iz vlakna zaradi Fresnelovega odboja  $P_i = T_i(n_0)P_t$ , kjer je  $T_i(n_0)$  Fresnelov transmissijski



Slika 1: Fiberoptični odbojnostni senzor

koeficient in  $P_i$  svetlobna moč sevana iz oddajnega vlakna.

Zrcalo je postavljeno na razdalji  $h$  od konice senzorja. Svetloba zapušča oddajno vlakno pod maksimalnim kotom  $\theta_c$ , ki je izražen z naslednjo enačbo

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{NA}{n_0}\right) \quad (1)$$

NA predstavlja numerično odprtino vlakna in  $n_0$  lomni količnik medija, ki obdaja vlakno.

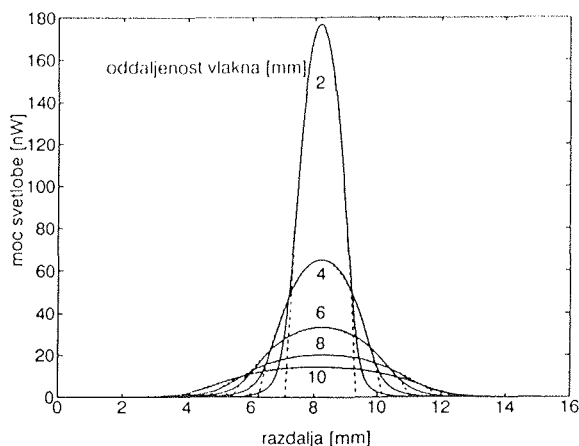
Povezava med intenzitetno porazdelitvijo svetlobe  $I(r, 2h)$  na ravnini, ki je za razdaljo  $2h$  oddaljena od površine zrcala in sevano močjo  $P_i$  je naslednja:

$$P_i = \int_0^R \int_0^{2\pi} I(r, 2h) r \, d\theta \, dr \quad (2)$$

kjer  $r$  predstavlja oddaljenost opazovane točke od osi oddajnega vlakna,  $\theta$  pa kot med zveznico obeh osi vlaken in opazovano točko (slika 1).  $R$  je radij konusa izstopnega žarka svetlobe na oddaljenosti  $2h$ ,  $R = a + 2h \, \text{tg}(\theta_c)$ , in  $a$  premer jedra vlakna. Intenzitetna porazdelitev  $I(r, 2h)$  je odvisna le od kota  $\theta$ .

Intenzitetno porazdelitev na ravni površini smo merili za različne oddaljenosti  $2h$  z detektorjem, ki je imel majhno točkasto odprtino in se je gibal po premici, ki pravokotno seka os vlakna. Odprtina detektorja je bila manjša od  $100 \, \mu\text{m}$ . Dolžina merjenega vlakna, ki je bil ovit na cilindru s premerom  $0.11 \text{ m}$  je bila  $12 \text{ m}$  in debelina jedra vlakna  $1 \text{ mm}$ . He-Ne laser je bil uporabljen kot izvor svetlobe. Slika 2 prikazuje merjene rezultate aproksimirane s parabolo.

Iz meritev je razvidno, da lahko privzamemo parabolično intenzitetno porazdelitev na razdalji  $2h$  od jedra vlakna  $I(r, 2h) = A(1 - r^2/B^2)$ . Majhna odstopanja od položene parabole so opazna pri nizki intenziteti. Parametra  $A$  in  $B$  lahko določimo z uporabo enačbe (2). Intenzitetna porazdelitev ima po preračunu naslednjo obliko



Slika 2: Intenzitetna porazdelitev svetlobe na oddaljenosti  $2h$  od vlakna

$$I(r, 2h) = \frac{2P_i}{\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3)$$

V kolikor zanemarimo izgube pri prenosu svetlobe po obeh vlaknih in absorpcijo v merjenem mediju, lahko razmerje moči  $\eta(2h, n_0)$  med izhodno svetlobo  $P_o(2h, n_0)$  in celotno vhodno svetlobno močjo  $P_i$  v odvisnosti od razdalje med konicama vlaken in zrcalno površino podamo z naslednjim izrazom

$$\eta(2h, n_0) = \frac{P_o(2h, n_0)}{P_i} = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{\theta_c} T_i(n_0) T_o(r, 2h, n_0) \cdot \frac{2}{\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r \, d\theta \, dr \quad (4)$$

V tem integralu predstavlja  $\theta_c = \arccos((R_i^2 + r^2 - a^2) / 2rR_i)$ , in  $R_i$  razdaljo med osema obeh vlaken. Sprejeta svetloba na sprejemnem vlaknu  $P_o(2h, n_0)$  je zmanjšana zaradi Fresnelovega odboja na prehodu svetlobe iz enega medija v drugega. Fresnelov transmissijski koeficient  $T_o(r, 2h, n_0)$  je odvisen od lomnega količnika medija in kota vpadnega žarka.

$$T_o(r, 2h, n_0) = \frac{1}{2} \frac{\sin(2U) \sin(2V)}{\sin^2(U+V) \cos^2(U-V)} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2U) \sin(2V)}{\sin^2(U+V)} \quad (5)$$

Tu predstavlja  $n_c$  lomni količnik jedra vlakna, parametra  $U$  in  $V$  pa sta določena z izrazoma  $U = \arctg(r/(2h))$  in po Snellovem lomnem zakonu  $V = \arcsin(\sin(U)n_0/n_c)$ .

Fresnelov koeficient na oddajnem vlaknu  $T_i(n_0)$  lahko izrazimo za pravokotni iztopajoč žarek:

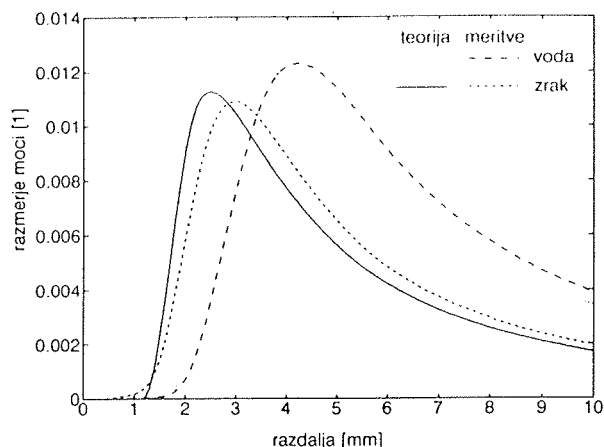
$$T_i(n_0) = \frac{4n_c n_0}{(n_c + n_0)^2} \quad (6)$$

Meje integriranja  $R_1$  in  $R_2$  so podane z naslednjimi izrazi:

$$\begin{aligned} R \leq R_i - a & \Rightarrow R_1 = 0 \\ & R_2 = 0 \\ R_i - a < R < R_i + a & \Rightarrow R_1 = R_i - a \\ & R_2 = R \\ R \geq R_i + a & \Rightarrow R_1 = R_i - a \\ & R_2 = R_i + a \end{aligned} \quad (7)$$

Faktor razmerja moči  $\eta(d, n_0)$  je bil izračunan za različne razdalje med optičnim vlaknom in zrcalom. Slika 3 prikazuje izračunan faktor  $\eta(d, n_0)$  pri različnih razdaljah ( $h = 0$  do  $14 \text{ mm}$ ) in lomnem količniku  $n_0 = 1$  za zrak in  $n_0 = 1.332$  za vodo. Pri izračunu teoretičnih krivulj so bili upoštevani naslednji podatki  $a = 0.5 \text{ mm}$ ,  $R_i = 2.2 \text{ mm}$ ,  $NA = 0.47$  in  $n_c = 1.495$ .

Horizontalni zamik obeh krivulj v odvisnosti od lomnega količnika je osnova za uporabo tega senzorja pri določanju lomnega količnika tekočin.



Slika 3: Teoretično izračunano razmerje  $\eta$  za zrak in vodo v odvisnosti od razdalje med konico senzorja in zrcalno površino

### 3. EKSPERIMENTALNI SISTEM

V senzorsko konico smo vgradili tri med seboj vzporedna optična vlakna, ki so nameščena drugo za drugim (slika 4). Prvo oddajno vlakno dovaja svetlobo na zrcalo, sprejemni vlakni pa svetlobo sprejemata in jo usmerjata na svetlobna detektorja. Dodatno sprejemno vlakno na dvojni oddaljenosti od osi oddajnega vlakna služi za poznejšo kompenzacijo merjenega signala. Da se pokaže, da kompenzirani signal ne vsebuje sprememb zaradi nihanja intenzitete svetlobe izvora, sprememb zaradi odbojnosti površine in absorpcije v tekočini<sup>(14)</sup>. Celoten eksperimentalni sistem je prikazan na sliki 4. Kot svetlobni izvor smo uporabili HeNe laser moči 5 mW in valovne dolžine 633 nm. Svetlobno moč smo merili s Si fotodiodama in optičnim merilnikom moči (Anritsu ML910B). Za odmik konic vlaken od zrcalne površine smo uporabili pozicionirno mizo, gnano s koračnim motorjem. Celoten sistem je bil računalniško upravljan. Pri

eksperimentalnem delu smo uporabljali plastična PMMA (polimetil metaakrilat) vlakna s premerom jedra 0.5 mm, numerično odprtino  $NA=0.47$  in koračnim lomnim profilom jedra ( $n_c = 1.495$ ). Senzorsko glavo in pomično zrcalo smo pomočili v merjeno tekočino.

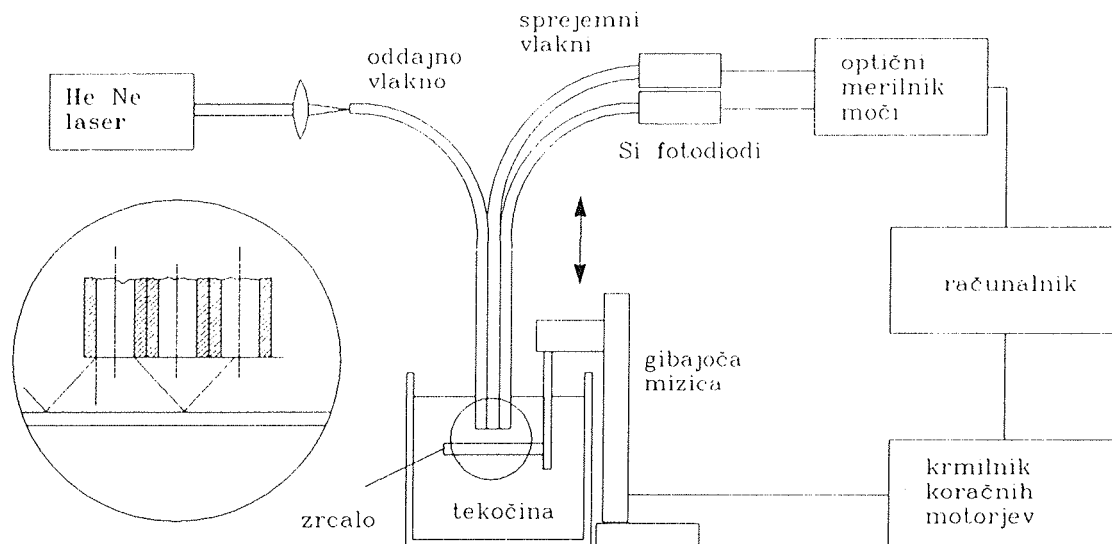
### 4. MERITVE IN REZULTATI

Lomne količnike smo merili na vzorcih raztopine kuhinjske soli (NaCl) v vodi. Koncentracije so se gibale od 0 % do 25% raztopine pri temperaturi 20°C. Lomne količnike pripravljenih raztopin smo predhodno izmerili z Abbejevim refraktometrom pri isti temperaturi.

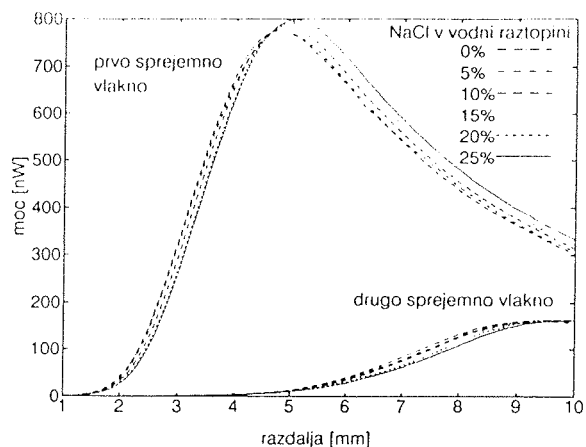
Senzorsko konico smo pomočili v tekočino z določenim lomnim količnikom, oz. koncentracijo ter opazovali signal pri oddaljevanju čel vlaken od zrcalne površine. Začetna točka odmikanja je bila na mestu dotika vlaken in zrcalne površine, največji odmik pa je bil 10 mm. Meritve smo ponavljali z različnimi koncentracijami raztopin soli, pri čemer je bila začetna točka vedno na istem mestu. Slika 5 prikazuje merjene signale na obeh sprejemnih vlaknih pri različnih koncentracijah soli (NaCl) v vodi.

Na sliki 6 je prikazan kompenziran signal oziroma razmerje odzivov obeh vlaken prikazanih na sliki 5. Podobne rezultate smo dobili tudi pri merjenju različnih raztopin soli LiBr in glicerina v vodi.

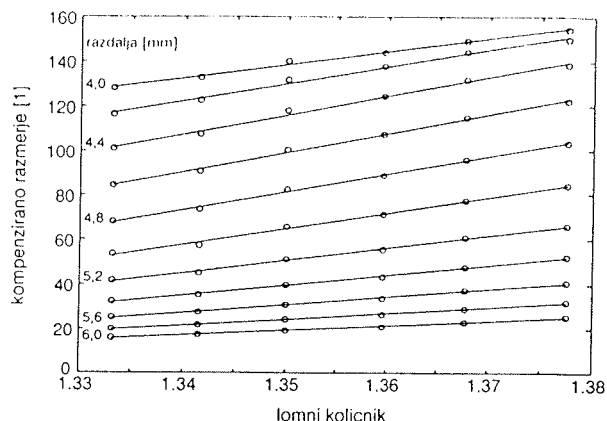
Na tej osnovi lahko z upoštevanjem zveze med koncentracijo in lomnim količnikom umerimo senzor. Razmerje obeh odzivov v odvisnosti od lomnega količnika pri različnih zamikih prikazuje slika 7. Odvisnost razmerja odzivov od lomnega količnika je linearna pri odmikih od 4 do 6 mm.



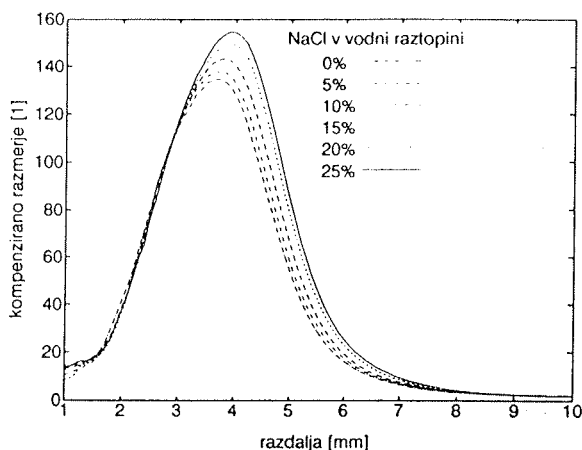
Slika 4: Eksperimentalni sistem



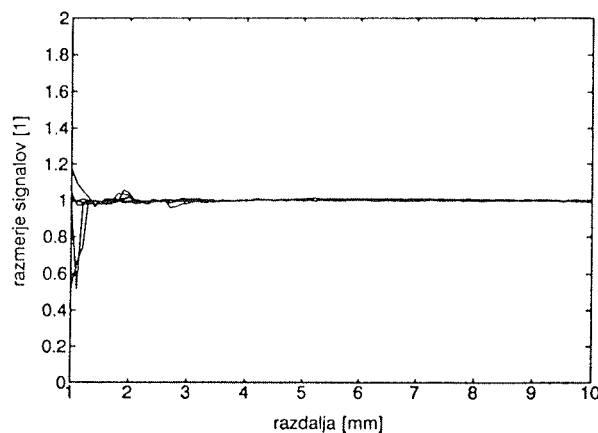
Slika 5: Izhodni signal na obeh sprejemnih vlaknih pri različnih koncentracijah NaCl v vodi z različnim odmikom konice senzora od zrcala



Slika 7: Kompenziran signal v odvisnosti od lomnega



Slika 6: Kompenziran signal v odvisnosti od odmika pri različnih koncentracijah raztopine kuhinjske soli v vodi



Slika 8: Stabilnost senzora

Merili smo tudi časovno stabilnost signala. Meritev lomnega količnika raztopine smo ponavljali z dvournim časovnim zamikom pri isti koncentraciji in isti začetni točki, nakar smo kompenzirane signale meritev delili z začetno meritvijo (slika 8). Ponovljivost kompenzirane signala pri večjih odmikih (uporabno področje) je zadovoljiva. Signala dveh časovno zamaknjenih meritev brez kompenzacije nista enaka, kar utemeljuje uporabo metode kompenzacije.

## 5. ZAKLJUČKI

Na osnovi dobljenih rezultatov ugotavljamo, da opisani odbojnostni senzor s tremi optičnimi vlakni ustreza za merjenje lomnih količnikov, oz. koncentracij raztopin. Za izbrane primere raztopin smo določili optimalne razdalje med konicami vlaken in zrcalno površino. Dosežena natančnost pri določevanju lomnega količnika znaša 0.001.

## 6. LITERATURA

1. E. Udd: Fiber optic sensors, A. Wiley, Interscience publication, New York, 1991
2. C. M. Davis: Fiber optic sensors: an overview, Optical engineering, Vol. 24, 1985
3. B. Culshaw, J. Dakin: Optical fiber sensors, Vol. 2, Artech House, Boston, 1988
4. D. A. Krohn: Intensity modulated fiber optic sensors: Overview, Fiber Optic Sensors IV, SPIE 718, Massachusetts, 1986
5. R. O. Cook and C. W. Hamm, Fiber optic lever displacement transducer, Appl. Opt. Vol.18, 1979
6. H. M. Ghezelaigh, B. E. Jones, R. C. Spooncer: An optical fibre petal flowmeter for low gasflows, Fiber Optic Sensors, SPIE 586, France, 1985
7. F. W. Cuomo: Pressure and pressure gradient fiber-optic lever hydrophones, J. Aco. Soc.Am., Vol. 73, 1983
8. K. Iwamoto and I. Kamata, Pressure sensor using optical fibers Appl. Opt., Vol.29, 1990
9. W. B. Spillman: Industrial uses of fiber optic sensors, Fiber Optic Sensors IV, SPIE 718, Massachusetts, 1986
10. T. Takeo, H. Hattori: Optical fiber sensor for measuring refractive index, Jap. J. Appl.Phys., Vol. 21, 1982

11. E. Karrer and R. S. Orr, A photoelectric refractometer, J. Opt. Soc. Am., Vol 36, 1946
12. N. S. Kapany, J. N. Pike: Fiber optics. Part IV. Photorefractometer, J. Optical Soc. Am., Vol. 47, 1957
13. K. Spenner et al.: Experimental investigation of fiber optic liquid level sensors and refractometers, Proc. 1st Int. Conf. Optical Fibre Sensors, London (IEE Conf. Publ. 221), 1983
14. C. P. Cockshott, S. J. Pacaud: Compensation of an optical reflective sensor, Sensors and Actuators, Vol. 17, 1989

*as. mag. Alojz Suhadolnik,  
Aleš Babnik, dipl.ing.,  
izr. prof. dr. Janez Možina,  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Murnikova 2  
61000 Ljubljana*

*Prispelo: 29.06.92*

*Sprejeto: 13.07.92*