

UŠTEDA ENERGIJE GRIJANJA UPOTREBOM UČINKOVITOG VENTILACIJSKOG SUSTAVA KORIŠTENJEM OTPADNE TOPLINE ZRAKA

WASTE-HEAT RECOVERY BENEFITS USING HIGH EFFICIENCY VENTILATION SYSTEMS

Vladimir Tudić¹

¹ Veleučilište u Karlovcu, Meštrovićeva 10, 47000 Karlovac, Hrvatska,
vladimir.tudic@vuka.hr

Sažetak: Korištenjem sustava ventilacije kao naprednog tehničkog sustava s prisilnom izmjenom zraka koji služi za dovođenje svježeg vanjskog i odvođenje onečišćenog zraka iz stambenog prostora dolazi do velikih toplinskih gubitaka. Iz tog razloga sastavni dio kvalitetnog ventilacijskog sustava mora biti učinkoviti izmjenjivač zraka HE (engl. Heat Exchanger). Uloga pasivnog toplinskog izmjenjivača je prijenos topline otpadnog zraka svježem vanjskom zraku bez međusobnog miješanja. Učinkovitost toplinske pretvorbe (engl. efficiency) HE izravno utječe na uštedu energije grijanja smanjujući potrebnu energiju za dogrijavanje hladnog svježeg zraka u stambenom prostoru, što je osobito značajna ušteda u hladnim zimskim mjesecima. Uz toplinsku uštedu navedeni tehnički sustavi danas nude pregršt mogućnosti dodatne filtracije i sterilizacije zraka ugrađenim modulima i senzorima, kao i bežično upravljanje sustavima uređaja uz nadzor svih parametara zraka pomoću Smart-phone ili tablet uređaja.

Gljučne riječi: toplinski gubici, izmjenjivač zraka, učinkovitost, upravljanje, nadzor parametara

Abstract: Technical imperfection of usage of simple ventilation system as technical system with forced air exchange is great heat lost. Efficient Heat Exchanger (HE) is a fundamental part of advanced ventilation system because of its essential importance - an air heat recovery. HE directly decreases the heat loss by using the heat of exhaust air and transferring this heat to fresh air without mixing air currents. It is especially major issue in winter months when need for heat is enlarged. Controlling system with programmable microcontroller provides wide working algorithms and air flow modes. Regardless air heat recovery these systems today can offer additional features like air filtering, air sterilization and air parameters monitoring. Air parameters monitoring and controlling may be realized with application on Smart-phone or tablet device.

Keywords: controlling, efficiency, heat loss, Heat Exchanger, monitoring

1. KVALITETA ZRAKA U ZATVORENIM PROSTORIMA

U današnje vrijeme zbog karakterističnog načina života i rada provedemo gotovo 90 % vremena u zatvorenom prostoru. U takvom prostoru udahnemo dnevno približno 25 000 puta i to minimalnu količinu od 35-40 m³ zraka. Kakav to zrak udišemo? Poznato je da su u zatvorenim prostorima u zraku prisutni *zagađivači* tj. određena koncentracija *lebdećih* čestica organskog i anorganskog porijekla. Mogući organski-biološki zagađivači prisutni u zraku su virusi, bakterije, pelud, spore gljivica i sive plijesni, životinjska dlaka, grinje. Nadalje, mogući anorganski zagađivači su prašina umjetno sintetiziranih materijala i spojevi iz elektroničkih

uređaja, hlapljive kemikalije i sredstva za čišćenje, CO, CO₂, kao i prirodni plin radon. Povećana koncentracija lebdećih čestica u tijelu čovjeka u duljem periodu vremena može uzrokovati oštećenja imunološkog, neurološkog, reproduktivnog sustava [1-NIOSH].

Prvo najčešće dolazi do nastajanja niza bolesti respirativnog sustava. Fenomen je nazvan *Sindrom bolesne zgrade*¹ (engl. *Sick Building Syndrom* - SBS). Uočljivi simptomi kod ljudi su iritacija sluznice oči, nosa i grla, glavobolja, povećano znojenje, umor, opća slabost, vrtoglavica, mučnina, mentalni poremećaji. Ukoliko 20 % radne snage ili korisnika prostora ima navedene simptome u skladu s preporukom američkog državnog instituta za zdravlje i sigurnost na radu NIOSH (engl. *The National Institute for Occupational Safety and Health*) zgrada se označava kao *bolesna zgrada*. Svi navedeni kemijski i biološki izvori zagađenja zraka ukoliko dulje vremena utječu na čovjeka mogu uzrokovati akutne i kronične zdravstvene probleme, a neki su dokazano kancerogeni [2- ncbi].

Što uzrokuje problem bolesne zgrade? S ciljem povećanja energetske učinkovitosti današnje zgrade su postale gotovo zrako-nepropusne i vlago-nepropusne. Vlago-nepropusnost dodatno pospješuje nanošenje plastičnih premaza i boja na unutarnje i vanjske zidove na novim zgradama jednako kao i kod starijih zgrada nakon rekonstrukcije, prenamjene ili obnove. S vremenom dolazi do povećane akumulacije vlage u namještaju i zidovima unutarnjeg prostora.

Jedini način da se izbjegne takav problem je ugradnja učinkovitog sustava ventilacije.

2. VRSTE VENTILACIJSKIH SUSTAVA

Postoje razni načini, standardi i kategorije na koji se način mogu razlikovati i podijeliti sustavi ventilacije zraka. Za početak treba se podsjetiti da se u životnom prostoru odvija i svojevrsna *prirodna* ventilacija. Riječ je o strujanju zraka uzrokovanog razlikom temperatura unutar zatvorenog prostora (cirkulacija unutar prostorije između rjeđeg toplijeg zraka i gušćeg hladnijeg zraka). Međutim takva cirkulacija zraka unutar prostorije ne doprinosi poboljšanju kakvoće zraka. Nadalje, poznata je i prirodna cirkulacija zraka uzrokovana razlikom tlaka unutar prostorije (podtlak vertikalne cijevi ili dimnjaka). U ovom slučaju radi se o prihvatljivoj ventilaciji i djelomičnom poboljšanju kakvoće zraka unutarnjih prostora. Koristi se i prirodna cirkulacija zraka uzrokovana razlikom tlaka izvan prostora zgrade na njenim dijagonalnim ili suprotnim stranama koja nastaje zbog obilaska vjetra oko zgrade. Takva ventilacija zraka bez potrebe tehničkih sustava tradicionalno se koristi u zemljama umjerene i toplije klime, uglavnom uz morske predjele.

Jedino tehnički sustavi ventilacije mogu osigurati dostatnu količinu zraka za sve potrebe i slučajeve u zgradarstvu, a zajednički im je naziv HVAC sustavi (engl. *Heating, Ventilation, and Air-Conditioning system*). Protok zraka u tom slučaju uzrokovan je razlikom tlaka uslijed pogona elektromotornog ventilatora. Zapravo se provodi tzv. regulirana ili upravljana ventilacija tj. istovremena izmjena zraka dovodnim i odvodnim cijevima iz prostora. Kod takvih izmjena velikih protoka zraka dolazi do velikih gubitaka topline i stoga sustavi moraju imati ugrađen toplinski izmjenjivač HE (engl. *Heat Exchanger*) za korištenje povratne topline otpadnog zraka.

Zrak u unutarnjim prostorima može biti 2-5 puta više zagađen od vanjskog zraka te zbog toga mnogi konstruktori HVAC sustava osobito za škole i fakultete pokušavaju izraditi sustav za što veću dobavu svježeg zraka. Povećana količina svježeg zraka prvenstveno stvara trošak

¹ Izraz koji se koristi za opisivanje posljedica na zdravlje i raspoloženje kod dužeg boravka ljudi u zatvorenom prostoru bez odgovarajuće ventilacije u skladu s preporukama američke agencije za zaštitu okoliša (http://www.epa.gov/iaq/pdfs/sick_building_factsheet.pdf).

ugradnje i operativnog održavanja HVAC sustava ali i značajno mijenja mikroklimatske uvjete (vlažnost/suhoću zraka) kao i potrošnju električne energije u zgradi. Stoga se u skladu s preporukom EPA² (engl. *United States Environmental Protection Agency*) za škole i fakultete količina protoka svježeg zraka ograničava na vrijednost 25 m³/h (prostornih metara u sat vremena po jednoj osobi). Navedeni standard postavilo je društvo American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). Postoje i drugi standardi koji određuju količinu protoka zraka u unutarnjim prostorima obzirom na način korištenja prostora. U Pravilniku o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti na radu za radne i pomoćne prostorije i prostore (N.N. 42/05, 113/06) propisana je brzina kretanja zraka u radnim prostorijama (Član 119.), a u Članu 139. (N.N. 6/84) stoji da se pri normalnim mikroklimatskim uvjetima moraju umjetnim provjetravanjem osigurati količine svježeg zraka po zaposlenom radniku 20-30 m³/h.

Senzorima HVAC sustava mogu se mjeriti prisutna količina vlage i koncentracija CO₂. Napredni HVAC sustavi imaju i modove rada u kojima se mogu i takvi parametri postaviti u prvi plan u željenom algoritmu rada.

Najveći trošak energije u zgradama vezan je neposredno uz zagrijavanje prostora i posljedično na održavanje željene temperature unutarnjeg zraka. Odabir količine protoka svježeg zraka od 10, 20 ili 30 m³ u sat vremena po jednoj osobi direktno će se implicirati na trošak energije. Stoga je najvažniji detalj u uštedi energije grijanja korištenjem povratne topline otpadnog zraka upravo toplinski izmjenjivač zraka HE vrlo visoke učinkovitosti.

3. UČINKOVITOST IZMJENJIVAČA TOPLINE

Učinkovitost toplinske pretvorbe (engl. *efficiency*) pasivnog izmjenjivača topline HE biti će razmatran u najjednostavnijoj konstrukcijskoj izvedbi kao što je u slučaju limenog pločastog izmjenjivača s križno-protusmjernim protokom zraka (engl. *cross-counterflow heat exchanger*) predloženim na slici 1. Riječ je o izmjenjivaču s paralelno postavljenim tankim aluminijskim limovima na vrlo maloj udaljenosti (2-3 mm) kroz koje prolazi zrak u dva suprotna smjera. Konstrukcija kućišta sadrži dva ulaza i izlaza za zrak i bočne oplate od pocinčanog lima.



Slika 1: Predodžba pločastog izmjenjivača zraka tvrtke Xiamen AIR-ERV Technology Co. [3].

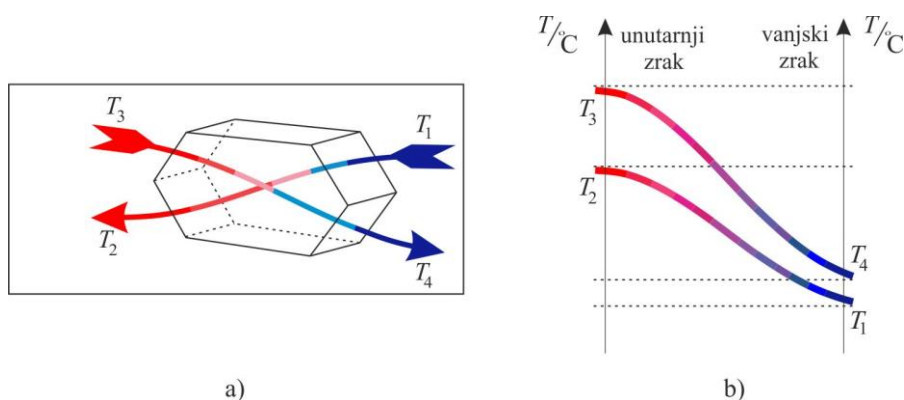
Kako bi se pojednostavio proračun učinkovitosti pasivnog izmjenjivača topline zanemarene su entalpijske promjene u strujama zraka uz pretpostavku da tijekom prolaska zraka kroz izmjenjivač ne dolazi do promjene relativne vlažnosti zraka. Učinkovitost tzv. toplinskog

² Preporuka Američke agencije za zaštitu okoliša o optimalnom protoku svježeg zraka za prostorije u kojima boravi više ljudi (<http://www.epa.gov/iaq/schooldesign/hvac.html#Energy%20Recovery%20Ventilation>).

transfera η_{HR} (eta) definira se u skladu s europskom normom EN 13053:2003 [4] i energetsom jednadžbom kao omjer povratne topline Q_{pov} (engl. *Heat Recovery* Q_{HR}) i ukupne topline-energije sustava Q_{uk} (engl. Q_p) [5]:

$$\eta_{HR} = \frac{Q_{HR}}{Q_p} = \frac{Q_{pov}}{Q_{uk}} = \frac{m_1 c_{1p} \Delta T_{31}}{m_2 c_{2p} \Delta T_{21}} = \frac{\Delta T_{31}}{\Delta T_{21}} = \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

gdje su m_1 i m_2 masa zraka u ulaznoj i izlaznoj grani izmjenjivača, c_{1p} i c_{2p} specifični toplinski kapaciteti zraka u tzv. ulaznoj i izlaznoj grani izmjenjivača, a T_1 , T_2 i T_3 su vrijednosti temperatura zraka na stranama izmjenjivača u skladu s predodžbom na slici 2. Temeljna pretpostavka je ravnoteža protoka i gustoće zraka u obje grane: $m_1 = m_2$ i $c_{1p} = c_{2p}$.



Slika 2: a) Predodžba smjera protoka zraka i oznake temperatura na ulazu/izlazu izmjenjivača zraka; b) Predodžba topline zraka u dijagramu temperatura u skladu s oznakama u a).

Također, u skladu s [5] definira se ukupna učinkovitost sustava η_{uk} koja je nešto manja od učinkovitosti toplinskog transfera η_{HR} (za približno 2-4 %), jer je povratna energija Q_{HR} umanjena za iznos utrošene električne energije (P_{el}) potrebne za rad sustava upravljanja i pogon ventilatora:

$$\eta_{uk} = \frac{Q_{HR} - P_{el}}{Q_p}. \quad (2)$$

Obzirom na izmjerene vrijednosti ukupne učinkovitosti HVAC sustava η_{uk} , određuju se klase toplinske pretvorbe (EN 13053 A1: Amendment 2010). Najveća klasa H1 dodjeljuje se HVAC sustavu koji ima dokazanu učinkovitost toplinskog transfera η_{HR} veću od 75 % i ukupnu učinkovitost veću od 71 %. Standard se odnosi na ispitivanja pri referentnim vrijednostima temperature $T_3 = 25^\circ\text{C}$ i $T_1 = 5^\circ\text{C}$ u klasama brzine protoka zraka $\leq 1,5$ m/s (V1) do klase V5 (> 3 m/s) u skladu s normom EN 308³.

³ Norma EU CSN EN 308 propisuje postupke testiranja i ispitivanja toplinskih izmjenjivača tipa zrak-zrak u HVAC uređajima koji koriste povratnu toplinu zraka (<http://www.en-standard.eu/csn-en-308>).

4. UŠTEDA ENERGIJE GRIJANJA

Izračun uštede energije grijanja prostora korištenjem HVAC sustava proveden je u dva primjera: 1) Slučaj – Tablica 1– stambeni prostor sa zahtjevom za jednu izmjenu volumena zraka u 2 sata kontinuiranim radom, i 2) Slučaj – Tablica 2 – učionica sa zahtjevom za 2 izmjene volumena zraka u jednom satu, 8 sati dnevno. Sagledana su dva komparacijska slučaja uštede energije u odnosu na slučaj kada sustav ventilacije nema izmjenjivač topline (HE). Ušteda energije grijanja prostora u odnosu na rad ventilacijskog sustava bez HE i HVAC sustava (I), i međusobna komparacija s drugim HVAC sustavom (II) veće učinkovitosti.

Projektiranje HVAC sustava i evidentni izračun uštede za svaki pojedinačni slučaj stambenog ili poslovnog prostora zahtjeva točne ulazne podatke. Prvenstveno volumen razmatranog prostora i temperaturnu razliku unutarnjeg i vanjskog zraka, uz naravno odabir najmanje jedne od klasa brzine protoka zraka (V1-V5) kao i podatak o učinkovitosti HVAC sustava.

4.1. Primjer stambenog prostora

Odabran je prosječan stambeni prostor – stan površine 60 m², visine stropa 2,5 m, s dvije izmjene volumena zraka stana (150 m³) u jednom danu (u 24 sata) kontinuiranim radom, učinkovitosti HVAC sustava od 50 % i 80 % ($\eta_{HR}=0,5-0,8$), uz temperaturnu razliku unutarnjeg i vanjskog zraka od 20 °C ($T_3=25$ °C i $T_1=5$ °C). U skladu s jednadžbom (3) količina potrebne topline Q_h ili korištene energije E_{heat} (u W) za zagrijavanje zraka u nekoj jedinici vremena (t) ovisi o gustoći zraka $\rho_z=1,2$ kg/m³, volumenu V (m³), broju izmjena zraka I_z (1/h), specifičnom toplinskom kapacitetu zraka $c_{pz}=1010$ W/kgK=0,2806 J/kgK, temperaturnoj razlici ΔT (K) iznosi:

$$Q_h = E_{heat} = \rho_z V I_z c_z \Delta T. \quad (3)$$

Ušteda energije Q_u tijekom rada HVAC sustava je iznos koji se dobiva kao razlika bez i s radom HVAC sustava, odnosno umnoškom Q_h s učinkovitosti η_{HR} :

$$Q_u = E_{heat} \cdot \eta_{HR} = \rho_z V I_z c_z \Delta T \cdot \eta_{HR}. \quad (4)$$

Rezultati izračuna za 1) razmatrani slučaj prikazani su u Tablici 1. Za stambeni prostor površine 60 m² volumena 150 m³ uz jednu izmjenu volumena zraka u periodu od dva sata u periodu od 6 mjeseci godišnje potrebna energija za dogrijavanje zraka za 20 °C iznosi 2218 kWh, naravno za sustav bez toplinskog izmjenjivača zraka HE. HVAC sustavi koji imaju HE uz $\eta_{HR}=0,5$ uštede polovinu tog iznosa, dakle 1109 kWh. Još učinkovitiji sustavi kao na primjer HVAC II sustav iz Tablice 1 uz $\eta_{HR}=0,8$ uštede 80 % energije za dogrijavanje zraka za 20 °C ili točno 1775 kWh godišnje. Ukoliko se grubo uzme da je cijena jednog kWh električne energije nešto malo iznad jedne kune, evidentna je godišnja ušteda učinkovitih sustava koja može u prikazanom slučaju biti i do 2000 kn godišnje.

Druga korist koja je jednako značajna a dolazi kao rezultat uštede je smanjenje emisije CO₂ u atmosferu jer se direktno smanjuje utrošak energije potrebne za grijanje.

Tablica 1: Predodžba uštede energije grijanja zraka u stambenom prostoru.

Veličina	Volumen	Izmjena zraka	Učinkovitost	Toplina= Energija	Ušteda energije /h	Dnevna ušteda	Godišnja ušteda
Oznaka	V	I_z	η	Q_h	Q_u	Q_u	Q_u
Jedinica	m ³	1/h	%	kWh	kWh	kWh	kWh
Bez HE	150	0,5	0	0	0	0	0
HVAC I	150	0,5	0,5	0,5051	0,2525	6,1	1.109,2
HVAC II	150	0,5	0,8	0,5051	0,4041	9,7	1.774,6

4.1. Primjer učionice

Za prostor kao što je učionica površine 110 m² volumena 420 m³ uz dvije izmjene volumena zraka u periodu od jednog sata u periodu od 9 mjeseci godišnje potrebna energija za dogrijavanje zraka za 20 °C iznosi 12.535 kWh, naravno za sustav bez toplinskog izmjenjivača zraka HE. HVAC sustavi koji imaju HE uz $\eta_{HR}=0,5$ uštede pola tog iznosa, dakle 6.268 kWh. Još učinkovitiji sustavi kao na primjer HVAC II sustav iz Tablice 2 uz $\eta_{HR}=0,8$ uštede 80 % energije za dogrijavanje zraka za 20 °C ili točno 10.028 kWh godišnje. Ukoliko se grubo uzme da je cijena jednog kWh električne energije nešto malo iznad jedne kune, evidentna je godišnja ušteda učinkovitih sustava koja može u prikazanom slučaju biti i do 12.000,00 kn godišnje po učionici. Ušteda na razini cijele škole sa 10 učionica može biti približno 120.000,00 kn godišnje. Svi rezultati izračuna u primjeru uštede energije grijanja u slučaju učionice predočeni su u Tablici 2.

Tablica 2: Predodžba uštede energije grijanja zraka u školskoj učionici.

Veličina	Volumen	Izmjena zraka	Učinkovitost	Toplina= Energija	Ušteda energije /h	Dnevna ušteda	Godišnja ušteda
Oznaka	V	I_z	η	Q_h	Q_u	Q_u	Q_u
Jedinica	m ³	1/h	%	kWh	kWh	kWh	kWh
Bez HE	420	2,0	0	0	0	0	0
HVAC I	420	2	0,5	5,66	2,83	22,6	6.267,8
HVAC II	420	2	0,8	5,66	4,53	36,2	10.028,5

5. ZAKLJUČAK

Energetska učinkovitost i korištenje obnovljivih izvora energije strateške su odrednice nacionalne energetske politike i pretpostavke za održivi razvoj gospodarskog razvoja Republike Hrvatske. Stalna skrb o zaštiti okoliša, povećanju energetske učinkovitosti i korištenju obnovljivih izvora energije, uključujući i **održivu gradnju** jedna od temeljnih komponenti održivog korištenja prirodnih dobara i održivog gospodarskog razvoja Hrvatske. Primjenom mjera energetske učinkovitosti Hrvatska treba smanjiti neposrednu potrošnju energije za 9% u razdoblju od 2008. do 2016. godine (Direktiva o energetske učinkovitosti i energetskim uslugama 2006/32/EZ).

S druge strane EU inicijativa 20-20-20 preporučuje smanjenje potrošnje energije do 2020. godine za 20 % i smanjenje emisije stakleničkih plinova, ponajviše CO₂ za 20 %. Upravo ugradnjom i korištenjem učinkovitih HVAC sustav s ugrađenim HE moguće je približiti se ciljanim vrijednostima ušteda i smanjenja.

LITERATURA

- [1] Available from http://www.epa.gov/iaq/pdfs/sick_building_factsheet.pdf Accessed: 2014-05-29.
- [2] Available from <http://www.epa.gov/iaq/schooldesign/hvac.html#Energy%20Recovery%20Ventilation> Accessed: 2014-05-29.
- [3] Available from <http://airerv.en.china.cn/selling-leads/detail,1275709728,AIRERV-ERDflat-plate-heat-exchanger.html> Accessed: 2014-05-28.
- [4] Handel, C., European Ventilation Industry Association (EVIA), *Ventilation with heat recovery is a necessity in "nearly zero" energy buildings*, HVAC Journal, Brussels, 03/2011, Available from <http://www.rehva.eu/index.php?id=239> Accessed: 2014-05-28.
- [5] Kaup, C., *Energy recovery in air handling units with high performance heatrecovery based on cycle compound system*, Umwelt Campus Birkenfels, Presentation ISH 2011, Available from http://www.howatherm.de/howatherm/files/lectures/24_RLT_Heating_clemson_summer_school.pdf Accessed: 2014-05-30.
- [6] Mišćević, Lj., Tudić, V., *Značaj ventilacijskih sustava u energetske gotovo nultoj arhitekturi*, HGK, Županijska Komora Karlovac, Seminar, 02/07/2013, Available from <http://www.hgk.hr/zk/karlovac/seminar-znacaj-ventilacijskih-sustava-u-energetski-gotovo-nultoj-arhitekturi> Accessed: 2014-05-25.
- [7] Mišćević, Lj., „Konzorcij PASIVNA KUĆA HRVATSKA“, Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, 05/2014, Available from <https://mail.google.com/mail/u/0/?hl=hr&shva=1#inbox/145c85b0695c892f?projector=1> Accessed: 2014-05-31.
- [8] Olsen, B.W., International Centre for Indoor Environment and Energy, *Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria*, HVAC Journal, Brussels, 4/2012. Available from http://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/04-2012/revision-of-en-15251_rj1204.pdf, Accessed: 2014-05-29.
- [9] Pasivna kuća, *Pass-Net Projekt*, Available from <http://www.pasivnakuca.hr/> Accessed: 2014-05-30.
- [10] Regea, Vijesti: "Održani 6. dani pasivne kuće u Hrvatskoj", Available from <http://www.regea.org/vijesti/odr%C5%BEani-6.-dani-pasivne-ku%C4%87e-u-hrvatskoj.html>, Accessed: 2014-05-31.