



**KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE NA NISKONAPONSKOJ STRANI  
ENERGETSKIH TRANSFORMATORA U POVRŠINSKOM KOPU "DRMNO"**

**ELECTRICITY QUALITY ON THE LOW VOLTAGE SIDE OF POWER  
TRANSFORMERS IN THE OPEN PIT MINE "DRMNO"**

Nemanja Živković, Vladimir A. Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu opisano je merenje i analiza kvaliteta električne energije na 0,4 kV strani energetskih transformatora. Merenja su vršena na trafostanici Rudnik 4 i Pogonskoj stanici B-2000. Prikazani su rezultati merenja, njihova analiza i upoređivanje sa datim standardima i propisima.

**Ključne reči:** Kvalitet električne energije, energetski transformator, pogonska stanica B-2000, površinski kop Drmno.

**Abstract**– The paper describes the measurements and analysis of electric power quality at the 0.4 kV side of a power transformers. Measurements were done at the substation Rudnik 4 and the power station B-2000. The results of measurements, their analysis and comparison with the given standards and regulations are presented.

**Keywords:** Power quality, power transformer, Belt conveyor B-2000, open pit mine "Drmno".

**1. UVOD**

Zbog svoga značaja u životu savremenog sveta, električna energija, podleže određenim normama, standardima ili preporukama u pogledu raspoloživosti i pouzdanosti napajanja, kao i stabilnosti osnovnih parametara. Polazeći od toga, dobija se veoma široka postavka pitanja, koja su objedinjena pod pojmom kvaliteta električne energije, odnosno može se govoriti o:

1. Upotrebnom kvalitetu,
2. Ekološkom kvalitetu i
3. Tehničkom kvalitetu električne energije [1].

Najčešće kada se pominje kvalitet električne energije, podrazumeva se tehnički kvalitet. Tehnički kvalitet ima prvorazredni značaj i pažnju, zbog toga što je jedan od važnijih parametara, koji određuje cenu i atraktivnost proizvoda ili usluge. Stoga, on obuhvata kvalitet isporuke, kvalitet isporučene električne energije i komercijalni kvalitet (kvalitet tržišnih odnosa).

Kvalitet isporuke uključuje probleme pouzdanosti, efikasnosti i sigurnosti napajanja, koji se rešavaju u postupku planiranja, razvoja i tokom redovnog održavanja mreže.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.

Kvalitet isporučene električne energije generalno je vezan za kvalitet napona na priključcima potrošača i vezan je za rad potrošača, poremećaje u radu sistema, kao i međusobne uticaje.

Komercijalni kvalitet definiše uređenost odnosa snabdevač (distribucija) i potrošač i njihovu interakciju.

Ukoliko kvalitet električne energije nije zadovoljavajući može se javiti niz problema. Među najznačajnijim problemima je pojava viših harmonika, koji imaju za posledicu:

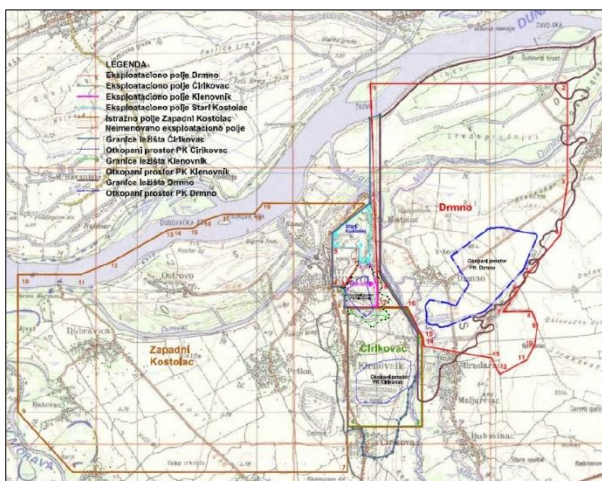
- Prevelika struja nultog provodnika,
- Pregrevanje transformatora,
- Pregrevanje i nepravilan rad električnih motora,
- Uticaj harmonika na prekidače i zaštitne releje,
- Uticaj na elektronsku opremu i telekomunikacije,
- Uticaj na rad statičkih energetskih pretvarača,
- Pojava rezonancije u mreži,
- Naprezanje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije,
- Izobličenje mrežnog napona usled toka harmonijskih struja i dr.

U ovom radu razmatraće se kvalitet isporučene električne energije na niskonaponskoj (NN) strani energetskih transformatora sa koje se snabdevaju električnom energijom potrošači u površinskom kopu "Drmno", kod Kostolca. Cilj je da se utvrdi stanje kvaliteta električne energije i poređenjem sa relevantnim standardima da njegova ocean.

**2. O POVRŠINSKOM KOPU "DRMNO"**

Kostolac se nalazi u peri-panonskom delu severo istočne Srbije, na udaljenosti od Beograda od 90 km, gde se Požarevačka greda (pobrđe istočno od Velike Morave) spušta na obale Dunava. Nalazi se zapadno od Velike Morave, a periferni delovi grada prostiru se do desne obale Dunava, na obalama Dunavca.

Istočno od Kostolca, da desnoj obali Velike Morave na površini od oko 3074 ha nalazi se površinski kop (PK) "Drmno". Na slici 1 prikazan je kompletan kostolački rudarsko-energetski basen sa označenim kopom "Drmno" [2]. U jugoistočnom delu prilikom otvaranja i razrade površinskog kopa formirano je spoljašnje odlagalište, koje zauzima prostor od oko 196 ha. Nakon toga formirano je unutrašnje odlagalište sa pet etažih niveleta. Takođe, prema termoelektrani "Kostolac A" nalazi se transportni sistem za prevoz uglja koji spada u osnovnu opremu kopa "Drmno".



Sl. 1. Kostolački rudarsko-energetski basen [2]

## 2.1. Napajanje PK “Drmno”

Površinski kop “Drmno” raspolaže sa transformatorskom stanicom (TS) „Rudnik 1“ TS 110/6 kV, 2 x 16 MVA, smeštenoj na istočnoj strani kopa, zatim „Rudnik 3“ TS 110/6 kV, 2 x 16 MVA, smeštenoj na istočnoj strani kopa, te TS 110/6 kV, 1 x 16 MVA, „Rudnik 2“ smeštenoj na zapadnoj strani kopa, u selu Drmno, TS 35/6 kV, 6,3 MVA, MO1 i mobilnom trafostanicom MO1 smeštenoj na zapadnoj strani kopa. Na osnovu raspoloživog kapaciteta se može reći da je njihova instalirana snaga dovoljna za snabdevanje energijom kopa proizvodnje od  $9 \cdot 10^6$  tona uglja ali nedovoljna za predviđeno povećanje kapaciteta od  $12 \cdot 10^6$  tona uglja na godišnjem nivou. U okviru snabdevanja kopa energijom nalaze se i 110 kV dalekovodi:

- dalekovod br. 1196 Veliko Gradište - Rudnik 1, dužina 22,9 km,
- dalekovod br. 1128/1, TE Kostolac A – TS Rudnik 1, dužina 12,074 km,
- dalekovod br. 1128/2, TS Rudnik 1 – TS Rudnik 2, dužina 6,735 km,
- dalekovod br. 1160 TS Rudnik 2 – RP Drmno, dužine 2,572 km i
- dalekovod br. 1159 RP Drmno - TE Kostolac A, dužine 9,9 km.

Takođe, kop poseduje i nadzemnu kablovsku 6 kV mrežu i trafo stanice 6/0,4 kV.

## 2.2. Radni pogon PK “Drmno”

Na PK „Drmno“ otkopavanje otkrivke vrši se u okviru šest BTO (bager-traka-odlagač) sistema, dok se transport iste obavlja dvokrilno po istočnoj i zapadnoj strani kopa. Eksploatacija uglja vrši se duž dva sistema etažnih transporterata, sa zajedničkim izvoznim transporterima do lokacije raspodelnog bunkera.

Otkopavanje i transport uglja obavlja se pomoću BTD (bager-traka-deponija) sistema, koji obuhvata dva sistema etažnih transporterata, pri čemu na prvoj etaži rade rotorni bageri u tandemu sa samohodnim transporterom u visinskom radu, dok je na drugoj etaži pozicioniran bager vedričar koji radi dubinski.

## 3. POGONSKA STANICA B-2000

Za pogon transportne trake koristi se pogonska stanica B-

2000 koja ima četiri pogona za okretanje transportne trake. Elektromotori su predviđeni za rad sa frekventnim pretvaračima, odabrani prema mašinskoj specifikaciji, Minimalna snaga motora pri radu sa frekventnim pretvaračem je 1000 kW (snaga bez pretvarača 1300 kW), nominalne brzine 1000 ob/min.

Brzina kretanja trake je oko 5 m/s. Ugrađene su četiri jedinice frekventnih pretvarača. Ova pogonska stanica napaja se iz TS “Rudnik 4” 6,9/0,4 kV.

Većina razvijenih zemalja sveta, kao i najznačajnije međunarodne organizacije su donele tehničke propise – standard sa navođenjem graničnih vrednosti osnovnih parametara kvaliteta električne energije od kojih zavisi stabilnost rada EES-a (efektivna vrednost napona, frekvencija i sl.). Ostali parametri spominjani ranije su definisani pojedinačno ili u sklopu sveobuhvatnijih dokumenata o kvalitetu električne energije. Ovi propisi su u obliku ili obavezujućih ili neobavezujućih preporuka.

## 4. MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 4.1. Merni sistem

Za merenje je korišćen mrežni analizator prenosnog tipa, Dranetz Power Guide 4400, prenosivi, ručni, osmokanalni profesionalni merni sistem (slika 2) [3]. On može da nadgleda, snima i prikazuje podatke na četiri naponska kanala i četiri strujna kanala istovremeno. Dizajniran je da zadovolji kako IEEE 1159 tako i IEC 61000-4-30 standard za zahtevanu tačnost i merenja. On takođe može pratiti usklađenost na osnovu EN (evropskih) standard, EN 50160, koji je identičan sa srpskim standardom SRPS EN 50160:2012 [4].



Sl. 2. Mrežni analizator Dranetz Power Guide 4400 [3]

### 4.2. Merno mesto 1 (MM1)

Mrežni analizator je postavljen 11.08.2021. na niskonaponskom razvodnom ormanu i izvršena su merenja parametara i kvaliteta električnog napajanja na objektu „Pogonska stanica B-2000“ u trajanju od 7 dana. Merni instrument je postavljen na ormanu niskog napona trafo polja na Pogonskoj stanici B-2000 kao što se može videti na slici 3.

### 4.3. Merno mesto 2 (MM2)

Mrežni analizator je postavljen 18.08.2021. na niskonaponskom razvodnom ormanu i izvršena su merenja parametara i kvaliteta električnog napajanja na objektu TS “Rudnik 4” 6,9/0,4 kV u trajanju od 7 dana. Merni instrument je postavljen na ormanu niskog napona trafo polja u trafostanici, kao što se može videti na slici 4.

### 4.4. Standard SRPS EN 50160

Za analizu mernih rezultata primenjene su odredbe srpskog standarda SRPS EN 50160:2012, kao i uslovi merenja [4].



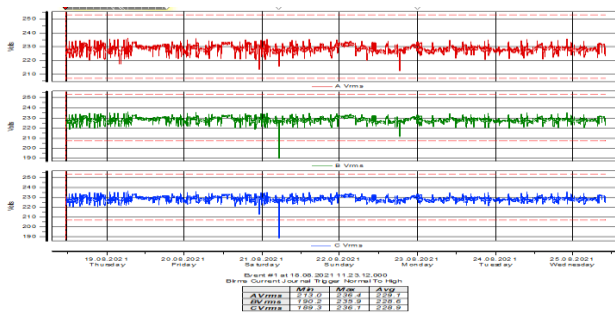
Sl. 3. Postavka mrežnog analizatora – MM1 (levo) i MM2

## 5. REZULTATI MERENJA

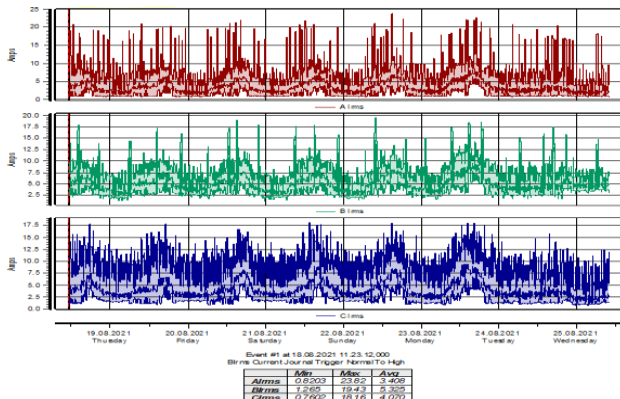
Na slikama 4 i 5 se nalaze dijagrami promene efektivnih vrednosti faznih napona i struja u sve tri faze u posmatranom periodu.

Efektivne vrednosti napona su uglavnom stabilne (slika 4) i kreću se oko  $\pm 5\%$  nazivnog napona uz pojedina kratkotrajna smanjenja na od  $-10\%$  (faza A) do  $-18\%$  (C). Vidi se da se efektivne vrednosti faznih struja (slika 5) kreću se u granicama od 23,82 A do 0,7602 A u zavisnosti od doba dana i opterećenja mreže. Sa grafika se može videti da u toku svih dana u nedelji postoje jednake oscilacije opterećenja, uključujući i vikend. Treća faza je manje opterećena od prve dve.

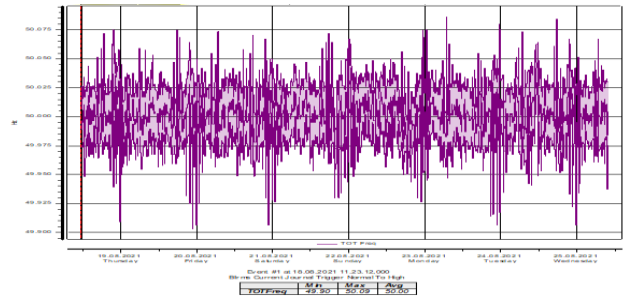
Nominalna frekvencija napona napajanja je 50 Hz. Pri normalnim pogonskim uslovima srednja vrednost osnovne frekvencije od deset sekundi u nekoj distributivnoj mreži mora biti u sledećim opsezima  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  (tj. od 49,5 Hz do 50,5 Hz) tokom 95% nedelje, odnosno  $50 \text{ Hz} - 6\% / +4\%$  (tj. od 47 Hz do 52 Hz) tokom preostalih 5% nedelje, prema standardu SRPS EN 50160 [4]. Na slici 6 prikazano je kretanje frekvencije u periodu merenja i može se videti da joj se vrednosti kreću od 49,90 Hz do 50,09 Hz, što znači da je zadovoljen kriterijum iz pomenutog standarda.



Sl. 4. Efektivne vrednosti faznih napona

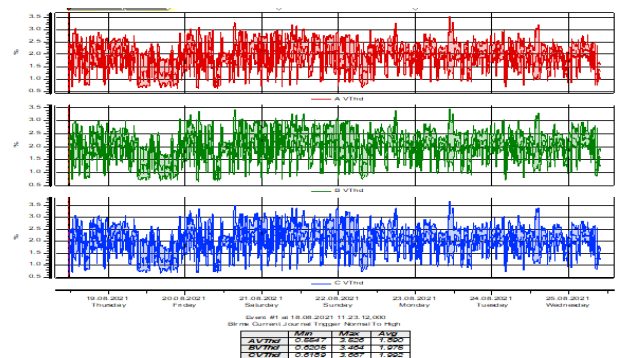


Sl. 5. Efektivne vrednosti faznih struja



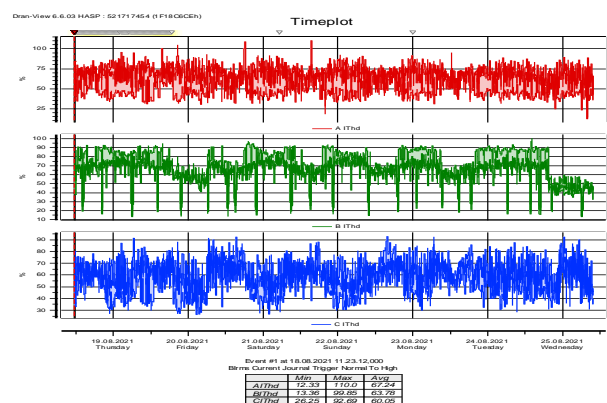
Sl. 6. Frekvencija

Viši harmonici su dobijeni u obliku ukupne harmonijske distorzije (THD) nakon FFT analize snimljenih talasnih oblika napona i struje. Na slici 7 je prikazan THD napona, koji ne prelazi vrednost od 3,67%. Može se zaključiti da ne postoji povećan THD napona, s obzirom na 8% granicu koja je predviđena srpskim standardom.



Sl. 7. Promena THDU tokom perioda merenja

U pogledu totalnog harmonijskog izobličenja struje (THDI) može se zaključiti da je on povećan. Vrednosti THDI tokom vremena merenja prikazane na su slici 8. Može se uočiti da su dobijeni iznosi veći u odnosu na vrednosti predviđene standardima ( $\text{THDI} < 20\%$ ). Maksimalna vrednost THDI za period merenja od 7 dana je čak 110%, što ukazuje na moguće pojave problema.

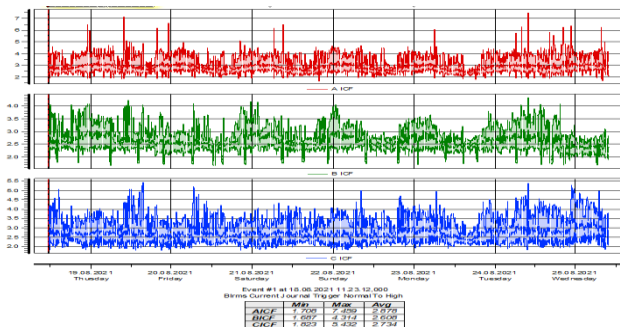


Sl. 8. Promena THDI tokom perioda merenja

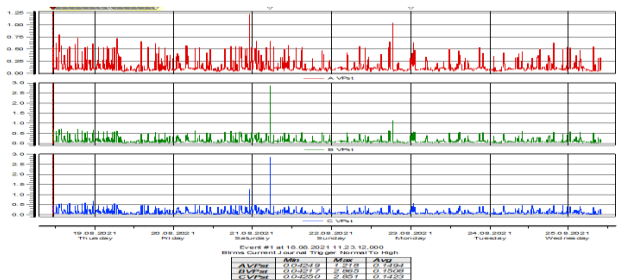
Rezultati snimanja promene krest faktora struje prikazani su na slici 9. Sa slike se može zaključiti da i krest faktor struje prelazi očekivane vrednosti, što potvrđuje izobličenje talasnog oblika struje.

Na slici 10 prikazane su promene flikera u posmatranom periodu. Na osnovu prikazanih grafika uočljivo je nekoliko velikih pikova u sve tri posmatrane faze.



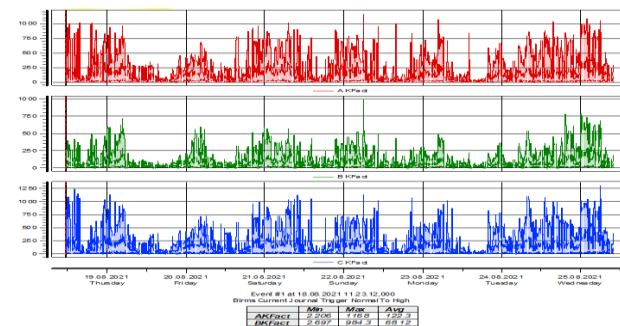


Sl. 9. Promena krest faktora struje u toku 7 dana



Sl. 10. Promena flikera napona u toku 7 dana

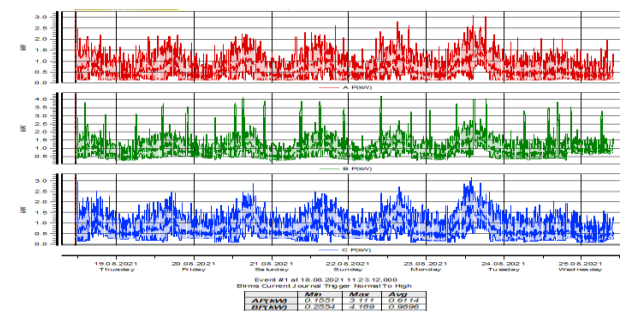
Na slici 11 prikazanu su rezultati merenja K-faktora. Što je veći K faktor to su veći gubici u transformatoru izazvani povećanim nivoim viših harmonica, pa se sa slike 11 može zaključiti da K faktor može predstavljati problem. Olakšavajuća okolnost je ta što kada je K faktor veliki, efektivna vrednost struje je mala pa se transformator neće pregrejavati.



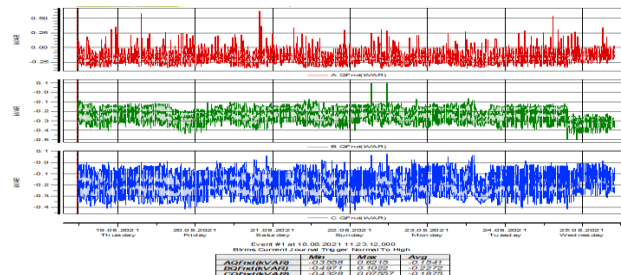
Sl. 11. Promena K faktora u toku 7 dana

Na slikama 12-14 prikazani su nedeljni dijagrami aktivne, reaktivne i prividne snage. Jasno se sa prikazanih grafika vidi da je potrošnja kako aktivne tako i reaktivne snage ujednačena svih 7 dana u nedelji.

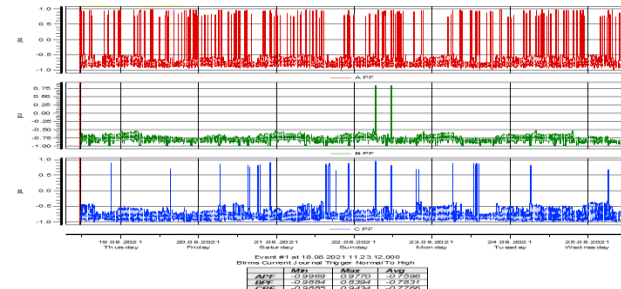
U pogledu vrednosti faktora snage treba napomenuti da se isti nalazio u opsegu očekivanih vrednosti (od -1 do +1).



Sl. 12. Dijagram aktivne snage u toku nedelju dana



Sl. 13. Dijagram reaktivne snage u toku nedelju dana



Sl. 14. Promena faktora snage tokom merenja

## 6. ZAKLJUČAK

Upoređujući dobijene rezultate merenja, sa aspekta kvaliteta napona može se zaključiti da su neki indikatori kvaliteta u skladu sa nacionalnim standardom, ali i da ima odstupanja. To se odnosi na vrednosti THDI i krest faktora struje. Ovo može potencijalno predstavljati problem. Takođe, K faktor je u pojedinim slučajevima bio veliki, što može biti problem za transformator, koji se tada dodatno greje, a izolacija brže stari.

## 7. LITERATURA

- [1] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, „Kvalitet električne energije“, TEMPUS-CEFES, FTN, Novi Sad, 2007.
- [2] V. Bulatović, M. Trifunović, “Razvojne perspektive površinske eksploatacije uglja u kostolačkom basenu”, XIII međunarodna konferencija OMC 2018, Zlatibor, 17-20. 10. 2018., pp.6-13.
- [3] Power guide 4400, User’s guide, Dranetz, New Jersey, 2005.
- [4] SRPS EN 50160:2012, „Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža”, Institut za standard. Srbije, Beograd, 2012.

### Kratka biografija:



**Nemanja Živković** rođen je u Banja Luci 1992. godine. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka 2018. god. iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine. Master rad odbranio je 2021. godine, na istom fakultetu.



**Vladimir Katić** rođen je u Novom Sadu 1954. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god., a od 2002 je u zvanju redovnog profesora Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.