

Optimasi Lebar Celah Udara Generator *Axial* Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fase

Hari Prasetyo¹, Sugeng Waluyo²

Abstract-- This study designs a 1-phase permanent magnet generator with double-sided axial coreless 10 stator poles to get optimum output voltage and power. Permanent magnet generator is chosen because it does not require a DC excitation current and the maintenance is relatively easy, so it has potential to be applied on a low head pico hydro power plant. The design uses NdFeB (Neodymium-Iron-Boron) type permanent magnet. The study was conducted by simulation to get the flux density in the stator coil using FEMM 4.2 applications. Simulation is done with the air gap width varies from 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm. The depth of the magnet in the yoke varies from 0%, 5%, 10%, and 50% of the magnet thickness. Then, the flux density is used to estimate the output voltage and power of the generator. The results show that minimum output of 52.85 V and 195,56 VA is obtained at air gap distance of 5 mm and the depth of the magnet in yoke is 50%. Maximum output of 87,25 V and 322.84 VA is obtained at air gap distance of 2 mm and the depth of the magnet in yoke is 0% of the magnet thickness.

Intisari— Studi ini melakukan desain generator magnet permanen aksial 1 fase bertipe *double sided coreless stator* 10 kutub dengan tujuan mendapatkan *output* tegangan dan daya optimal. Generator magnet permanen dipilih karena tidak memerlukan arus eksitasi DC serta sistem pemeliharaan yang relatif mudah sehingga berpotensi diterapkan pada pembangkit listrik tenaga piko hidro *head* rendah. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB (Neodymium-Iron-Boron). Penelitian dilakukan dengan cara simulasi untuk mendapatkan rapat fluks pada kumparan stator menggunakan aplikasi FEMM 4.2. Simulasi dilakukan dengan variasi lebar celah udara dengan lebar 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm serta kedalaman magnet pada *yoke* 0%, 5%, 10%, dan 50% dari tebal magnet. Rapat fluks yang didapatkan digunakan untuk memperkirakan *output* tegangan dan daya generator. Hasilnya, *output* terkecil diperoleh pada jarak celah udara 5 mm dan kedalaman magnet pada *yoke* 50% dari tebal magnet, yaitu sebesar 52,85 V dengan daya 195,56 VA. Sedangkan *output* terbesar pada jarak celah udara 2 mm dan kedalaman magnet pada *yoke* 0% dari tebal magnet sebesar 87,25 V dengan daya 322,84 VA.

Kata Kunci— Generator magnet permanen, FEMM 4.2, rapat fluks, tegangan, daya.

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi potensial air dengan *head* rendah dan atau debit relatif kecil menjadi energi listrik memerlukan

¹Dosen, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman. Jl. Mayjend Sungkono KM 05 Blater Purbalingga 53371 Indonesia (telp/fax: 0281-6597000 email: aydinhari@yahoo.com)

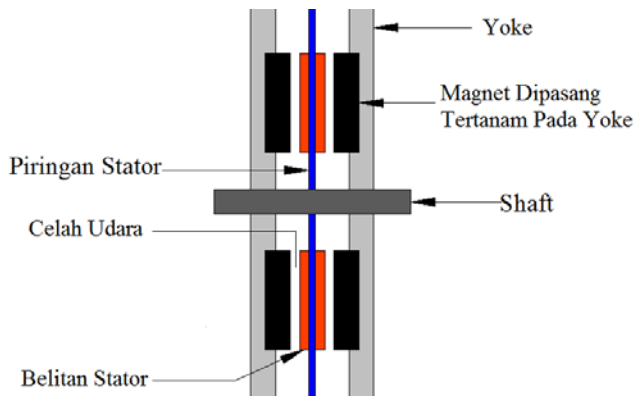
²Dosen, Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman. Jl. Mayjend Sungkono KM 05 Blater Purbalingga 53371 Indonesia (telp/fax: 0281-6597000 email: sugeng_walj@yahoo.com)

ketersediaan teknologi generator putaran rendah. Pengembangan generator magnet permanen (PMG) menjadi alternatif mengingat konstruksi kutub rotor relatif sederhana dibanding generator konvensional, sehingga secara teknis lebih mudah jika diperlukan jumlah kutub rotor yang lebih banyak dalam upaya menurunkan kecepatan putar nominal generator. Salah satu aspek penting dalam desain generator magnet permanen adalah rapat fluks yang melingkupi kumparan stator (kumparan jangkar). Kuantitas rapat fluks pada kumparan stator akan mempengaruhi *output* tegangan dan daya generator magnet permanen [1].

Terkait kajian dan pengembangan generator magnet permanen, beberapa penelitian telah dilakukan. Irasari membandingkan karakteristik magnet *barium ferit* (BaF12O19) dengan *neodyum iron boron* (NdFeB) [2]. Hasilnya, fluks NdFeB sepuluh kali lebih besar dibandingkan BaF12O19. Arnold melakukan optimasi desain generator magnet permanen DC 8 watt 3 fase *axial* menggunakan perangkat lunak FEMLAB dengan peningkatan kinerja output daya 30% [3]. Nurtjahjomulyo melakukan rancang bangun PMG radial pada putaran rendah (<1000 rpm) [4]. Bahtiar melakukan *simulasi menggunakan* perangkat lunak FEM untuk mengoptimasi ketebalan magnet pada rotor magnet permanen fluks radial [5]. Ahmed melakukan inovasi desain menggunakan Simulink MATLAB untuk peningkatan efisiensi generator magnet permanen *axial* yang diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin [6]. Prasetyo melakukan rancang bangun prototipe generator magnet permanen 1 fase tipe *axial* putaran 500 rpm dengan kajian tegangan dan frekuensi [7]. Hasil prototipe generator diuji pada skala laboratorium dan menghasilkan tegangan 12 V pada frekuensi 50 Hz.

Studi ini bertujuan mendapatkan *output* tegangan dan daya yang maksimal pada desain generator magnet permanen *axial* 1 fase bertipe *double sided coreless stator* 10 kutub. Variabel yang diamati adalah rapat fluks magnet pada stator dengan variasi lebar celah udara antara magnet dan belitan stator serta kedalaman magnet pada *yoke*. Analisis dilakukan menggunakan *software* FEMM 4.2.

Gbr. 1 menunjukkan rotor-stator generator magnet permanen *double sided coreless stator*. Belitan stator diapit oleh dua magnet yang terdalam pada *yoke* (piringan rotor). Celah udara merupakan jarak antara magnet dengan belitan stator. Kedalaman magnet merupakan persentase tebal magnet yang tertanam pada *yoke*. Kedalaman magnet pada *yoke* 0% berarti magnet menempel pada *yoke*, sedangkan kedalaman magnet pada *yoke* 50% berarti setengah tebal magnet tertanam pada *yoke*.



Gbr. 1 Celah udara dan magnet pada yoke.

II. GENERATOR MAGNET PERMANEN

A. Dimensi Generator Magnet Permanen

Tabel I menunjukkan spesifikasi desain generator magnet permanen yang digunakan sebagai acuan optimasi fluks magnet pada kumparan stator.

TABEL I
SPESIFIKASI GENERATOR MAGNET PERMANEN

Material Magnet permanen	NdFeB N42
Material Yoke	Pure Iron
Jumlah lilitan (N)	80
Tipe kawat	AWG 16; 1,3 mm
Frekuensi elektris (f)	50 Hz
Jumlah slot (Ns)	10
Jumlah fasa (Nph)	1
Radius luar magnet (ro)	105 mm
Radius dalam magnet (ri)	65 mm
Jumlah magnet (Nm)	10
Jarak antar magnet (ζf)	26.9 mm
Tebal magnet (lm)	10 mm
Tipe Stator	Tanpa Inti
Remanensi magnet (B)	1.3 Tesla

B. Optimasi Rapat Fluks Magnet Pada Kumparan Stator

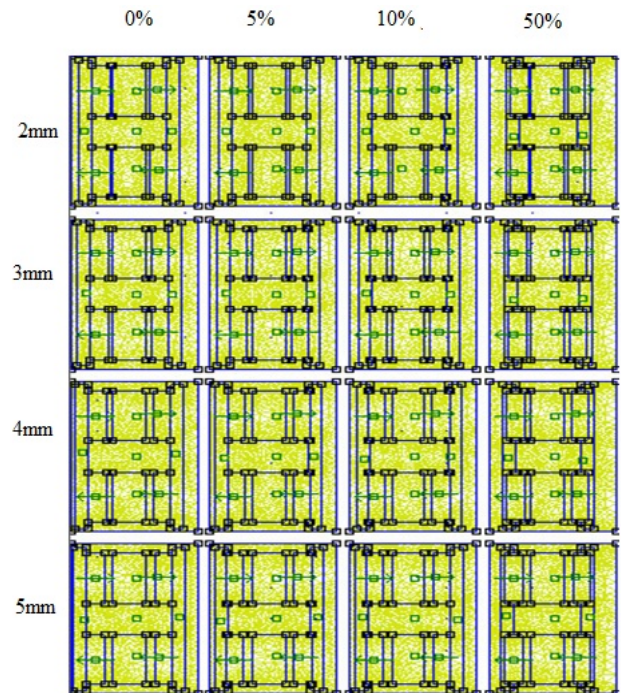
Variabel yang diamati untuk mendapatkan rapat fluks optimal dalam studi ini adalah lebar celah udara dan pemasangan magnet permanen di yoke. Analisis dilakukan dengan metode pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 serta perhitungan.

Gbr. 2 menunjukkan model stator dan rotor dengan variasi lebar celah udara 2 mm, 3 mm, 4mm, dan 5mm serta kedalaman magnet pada yoke 0%, 5%, 10%, dan 50% dari tebal magnet. Stator tanpa inti menggunakan kawat AWG 16 dengan diameter sebesar 1,3 mm.

Rapat fluks (B_r) hasil simulasi digunakan untuk menghitung rapat fluks maksimum (B_{max}) menggunakan (1).

Rapat fluks maksimum yang melingkupi belitan stator merupakan parameter yang sangat penting agar generator dapat memiliki *output* tegangan dan daya yang optimal. Oleh karena itu, dengan parameter belitan stator, magnet dan yoke

yang sama perlu dikaji konstruksi yang optimal khususnya pemasangan magnet pada yoke serta ukuran lebar celah udara yang memungkinkan konstruksi dapat dilakukan baik. Hal ini merupakan tujuan dari studi yang dilakukan.



Gbr. 2 Pemodelan generator magnet permanen.

$$B_{max} = B_r \cdot \frac{l_m}{l_m + \delta} \tag{1}$$

dengan:

- B_{max} = Kerapatan fluks magnet maximum (tesla)
- B_r = Kerapatan fluks magnet (tesla)
- l_m = Ketebalan magnet (m)
- δ = Jarak antara rotor dengan stator (m)

Rapat fluks maksimum (B_{max}) yang diperoleh digunakan untuk menghitung fluks maksimum menggunakan (2).

$$\Phi_{max} = A_{magn} \cdot B_{max} \tag{2}$$

Φ_{max} = Fluks maksimum (weber)

A_{magn} = Area magnet (m²)

B_{max} = Densitas fluks maksimum (weber)

Dengan demikian, tegangan *output* (rms) dapat dihitung sesuai (3).

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times N \times f \times \Phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \tag{3}$$

dengan

E_{rms} = Output tegangan generator (volt)

- N = Jumlah lilitan per kumparan.
- f = Frekuensi listrik (Hz)
- Φ_{max} = fluks magnet (Wb)
- N_s = Jumlah kumparan
- N_{ph} = Jumlah fasa (1 fasa)

Besar daya *output* generator dalam satuan VA diperoleh dengan mengalikan output tegangan generator dengan kapasitas hantar arus stator 3,7 A.

$$P = V I \tag{4}$$

dengan

P = Kapasitas daya generator (watt)

V = Tegangan generator (volt)

I = Kemampuan hantar arus kawat stator / KHA (ampere)

III. SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Gbr. 3 menunjukkan hasil simulasi FEMM 4.2 dari pemodelan Gbr. 2. Kuantitas rapat fluks magnet (Br) yang melingkupi kumparan stator hasil simulasi ditampilkan dalam Tabel II, dengan *trend line* seperti Gbr. 5. Semakin dalam penempatan magnet pada *yoke*, semakin kecil rapat fluks magnet yang melingkupi kumparan stator. Hal ini dapat dijelaskan bahwa semakin dalam magnet tertanam dalam *yoke* maka semakin kecil luas permukaan *yoke* (Gbr. 4) yang digunakan untuk melewati fluks sehingga rapat fluks semakin kecil sebanding dengan kedalaman magnet dalam *yoke*. Berdasarkan nilai reluktansi material, semakin kecil luas permukaan material maka akan semakin besar reluktansinya sehingga akan memperkecil besar fluks magnet, seperti ditunjukkan dalam (5).

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \tag{5}$$

dengan,

\mathcal{R} = Reluktansi

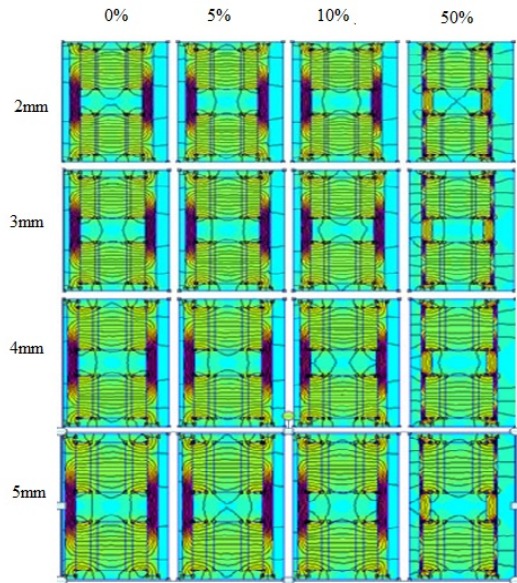
μ = Permeability

A = luas penampang

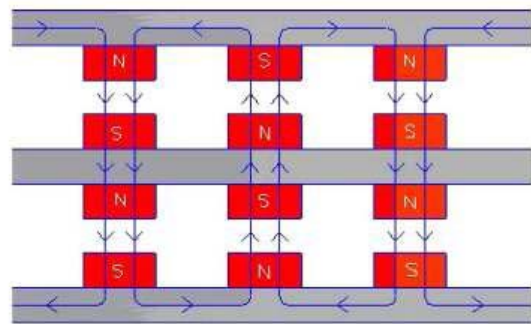
Dengan demikian, semakin dalam magnet pada *yoke* akan memperkecil luas penampang *yoke*, sehingga reluktansi *yoke* meningkat. Akibatnya, aliran fluks magnet berkurang dan menyebabkan rapat fluks magnet berkurang, termasuk pada belitan stator.

Merujuk pada (1), semakin tebal magnet (l_m) maka semakin kecil rapat fluks maksimal, sehingga semakin dalam magnet ditanam pada *yoke* maka semakin kecil ketebalan magnetnya. Oleh karena itu semakin dalam magnet pada *yoke* semakin kecil rapat fluks maksimumnya. Kuantitas fluks maksimum yang melingkupi kumparan stator dihitung menggunakan (2). Hasilnya ditampilkan dalam Tabel III, dengan *trend line* seperti Gbr. 6. Semakin dalam penempatan

magnet pada *yoke*, semakin kecil fluks yang melingkupi kumparan stator pada jarak celah udara yang sama.



Gbr. 3 Hasil simulasi.



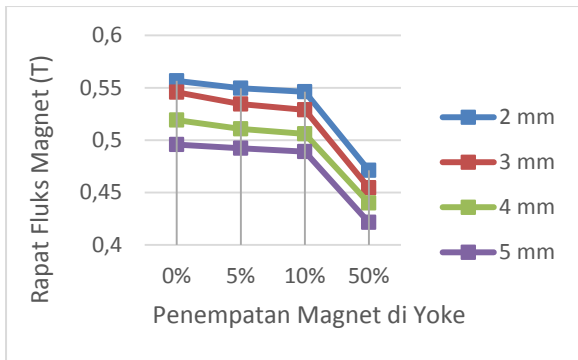
Gbr. 4 Aliran fluks pada *yoke*.

TABEL II
RAPAT FLUKS DENGAN VARIASI CELAH UDARA Δ DAN KEDALAMAN PENEMPATAN MAGNET PADA *YOKE*

δ (mm)	Rapat Fluks (Tesla)			
	Br (0%)	Br (5%)	Br (10%)	Br (50%)
2	0,556613	0,549501	0,546241	0,471186
3	0,545747	0,534386	0,528989	0,454576
4	0,519086	0,510736	0,506024	0,440057
5	0,495832	0,492226	0,489052	0,421464

Kuantitas fluks maksimum yang melingkupi kumparan stator digunakan untuk menghitung tegangan menggunakan (3). Tegangan *rms* yang dihasilkan generator sebanding dengan nilai fluks maksimum sehingga tren nilai tegangan dengan variabel celah udara dan kedalaman magnet identik dengan nilai fluks magnet dengan variabel celah udara dan

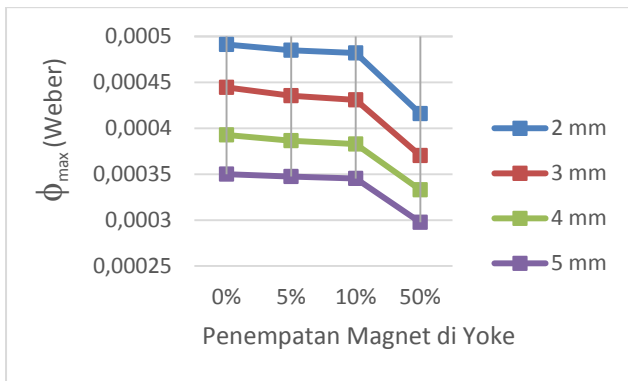
kedalaman magnet. Hasilnya diperlihatkan pada Tabel IV, dengan *trend line* seperti Gbr. 7. Semakin dalam penempatan magnet pada *yoke*, semakin kecil tegangan *output* generator pada jarak celah udara yang sama.



Gbr. 5 *Trend line* rapat fluks magnet (Br).

TABEL III
FLUKS (ϕ_{max}) DENGAN VARIASI CELAH UDARA Δ DAN KEDALAMAN PENEMPATAN MAGNET PADA *YOKE*

δ (mm)	Fluks (Webber)			
	ϕ_{max} (0%)	ϕ_{max} (5%)	ϕ_{max} (10%)	ϕ_{max} (50%)
2	0,0004913	0,0004850	0,0004821	0,0004159
3	0,0004446	0,0004354	0,0004310	0,0003703
4	0,0003927	0,0003864	0,0003828	0,0003329
5	0,0003500	0,0003475	0,0003453	0,0002976



Gbr. 6 *Trend line* fluks maksimum (ϕ_{max}).

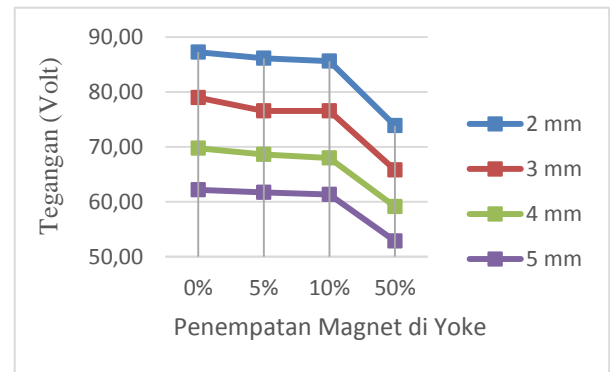
Variasi tegangan sesuai lebar celah udara dan penempatan magnet pada *yoke* dipergunakan untuk menghitung daya *output* menurut (4) dengan kuantitas arus adalah kemampuan hantar arus pada kawat yang digunakan, yaitu AWG 16, sebesar 3,7 A.

Tabel V menunjukkan daya output generator dengan *trend line* pada Gbr. 8. Semakin dalam penempatan magnet pada

yoke, semakin kecil daya *output* generator pada jarak celah udara yang sama.

TABEL IV
TEGANGAN *OUTPUT* DENGAN VARIASI CELAH UDARA Δ DAN KEDALAMAN PENEMPATAN MAGNET PADA *YOKE*

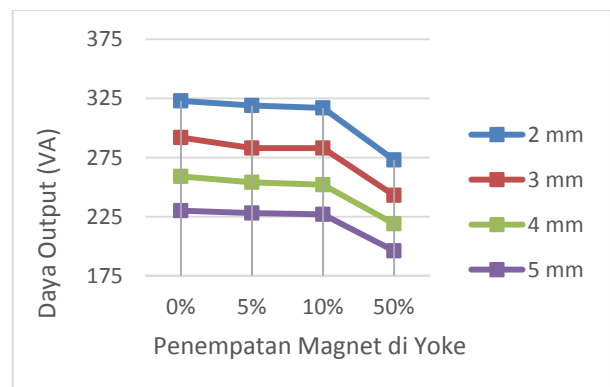
δ (mm)	Tegangan (Volt)			
	V (0%)	V (5%)	V (10%)	V (50%)
2	87,25	86,14	85,62	73,86
3	78,96	76,55	76,55	65,78
4	69,74	68,62	67,99	59,12
5	62,16	61,72	61,33	52,85



Gbr. 7 *Trend line* tegangan *output*.

TABEL V
DAYA *OUTPUT* DENGAN VARIASI CELAH UDARA Δ DAN KEDALAMAN PENEMPATAN MAGNET PADA *YOKE*

δ (mm)	Daya Output (VA)			
	V (0%)	V (5%)	V (10%)	V (50%)
2	322,84	318,70	316,79	273,28
3	292,15	283,22	283,22	243,40
4	259,05	253,91	251,54	218,76
5	229,99	228,35	226,90	195,56



Gbr. 8 *Trend line* daya *output*.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan simulasi, disimpulkan bahwa tegangan *output* terbesar didapat pada jarak celah udara sebesar 2 mm, pada penempatan magnet 0%, yaitu sebesar 87,25 V, dan 73,86 V pada penempatan magnet 50%. Tegangan output terkecil didapat pada jarak 5 mm dengan tegangan sebesar 62,16 V pada penempatan magnet 0% dan 52,85 V pada penempatan magnet 50%. Sedangkan daya *output* terbesar didapat pada generator dengan stator tanpa inti pada celah udara 2 mm, yaitu sebesar 322,84 VA pada penempatan magnet 0%, dan 273,28 VA pada penempatan magnet 50%. Daya output terkecil didapat pada celah udara 5 mm, yaitu sebesar 229,99 VA pada penempatan magnet 0% dan 195,56 VA pada penempatan magnet 50%.

REFERENSI

- [1] Gieras, Jacek F., Rong Jie-Wang, Maarten J Kamper.. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine. Second edition. Springer. New York*, 2008
- [2] Irasari,P.,dkk, “Aplikasi Magnet Permanen Ba12Fe19O dan NdFeB Pada Generator Magnet Permanen Putaran Rendah”. *Jurnal Sains Material Indonesia*,Vol 11 No 1 hal: 38-41.LIPI, 2007.
- [3] Arnold,D.P.,et al, “Design optimization of an 8W, microscale axial-flux, permanent-magnet generator”. *Journal of Micromechanics and Microengineering* S290–S296. 2006.
- [4] Nurtjahjomulyo,A.. “Rancang Bangun Generator Turbin Angin Tipe Aksial Kapasitas 200 W”. *Jurnal Teknologi Dirgantara*. 2010.
- [5] Bahtiar,G., *Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial*. UI.Jakarta, 2012.
- [6] Ahmed,D., Ahmad, A., “An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine”, 6th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-6), 2013.
- [7] Prasetijo, H., *Prototipe Generator Magnet Permanen Axial AC 3 Fasa Sebagai Komponen Pembangkit Listrik Pico Hidro*, Unsoed, Purwokerto, 2013.