



Rancang Bangun Purwarupa Bilah TSD-500 pada PLTB 10 x 0,5 kWp Pilot Project Smart Grid in Microgrid Universitas Udayana

I Putu Elba Duta Nugraha
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Udayana
Jimbaran, Indonesia
elba.nugraha@unud.ac.id

Widyadi Setiawan
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Udayana
Jimbaran, Indonesia
widyadi@ee.unud.ac.id

Abstract — Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) 10 x 0,5 kWp pada Pilot Project Smart Grid in Microgrid Universitas Udayana memiliki kapasitas daya 5 kWp dengan menggunakan 10 buah turbin angin terdiri dari 2 buah turbin angin GH-500W dan 8 buah turbin angin TSD-500. Kondisi di lapangan saat ini, terdapat satu buah turbin angin tipe The Sky Dancer-500 (TSD-500) yang tidak berfungsi karena bilah kincir anginnya yang rusak. Hal ini mengakibatkan PLTB tidak bekerja secara maksimal. Solusi yang diusulkan adalah membuat desain berdasarkan bilah yang rusak, kemudian dibuatkan purwarupa bilah baru untuk menggantikan bilah yang rusak tersebut. Desain purwarupa bilah disesuaikan dengan jenis, bentuk, tipe *aerofoil*, dan ukuran bilah yang ada pada PLTB. Desain bilah yang diusulkan adalah jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dengan bentuk *taper* menggunakan *aerofoil* NACA 4412 dan batasan daya maksimum 500 Wp. Purwarupa bilah didesain menggunakan Autodesk Inventor 2018 dan disimulasikan menggunakan QBlade v.09 sehingga dapat dilihat gambaran kinerja dari purwarupa bilah. Dari hasil simulasi diperoleh daya maksimum yang dihasilkan purwarupa bilah pada kecepatan angin 12 m/s adalah 506,7 Wp. Kemudian berdasarkan hasil simulasi diproduksi purwarupa bilah menggunakan bahan kayu pinus.

Kata Kunci— *Smart Grid*, PLTB, bilah TSD-500.

I. PENDAHULUAN

Pilot Project Smart Grid in Microgrid merupakan hasil kerja sama (MoU) nomor 1714/UN414.1.31/KS/2015 antara BALITBANG Kementerian ESDM dengan Universitas Udayana untuk bersama-sama mengembangkan teknologi di bidang energi dan sumber daya mineral khususnya dalam pengembangan energi baru terbarukan.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) pada Pilot Project Smart Grid in Microgrid Universitas Udayana memiliki kapasitas daya 5 kWp dengan menggunakan 10 buah turbin angin terdiri dari 2 buah turbin angin GH-500W dan 8 buah turbin angin TSD-500.

Kondisi di lapangan saat ini, terdapat satu buah turbin angin tipe The Sky Dancer-500 (TSD-500) yang tidak berfungsi karena bilah kincir anginnya yang rusak. Hal ini mengakibatkan PLTB tidak bekerja secara maksimal.

Solusi yang diusulkan untuk memaksimalkan kinerja PLTB tersebut adalah dengan membuat rancangan dari bilah yang rusak, kemudian dibuatkan purwarupa bilah baru untuk menggerakkan turbin angin yang rusak. Perancangan bilah disesuaikan dengan jenis, bentuk, tipe *aerofoil*, dan ukuran bilah yang ada pada PLTB 10 x 0,5 kWp. Dalam penelitian ini, dirancang bilah jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) bentuk *taper* menggunakan *aerofoil* NACA 4412 dan batasan daya maksimum 500 Wp. Hasil perancangan disimulasikan sehingga dapat dilihat gambaran kinerja dari bilah yang akan dibuat. Kemudian berdasarkan hasil simulasi diproduksi purwarupa bilah yang sesuai.

II. METODE DAN PROSEDUR

Studi literatur merupakan tahapan awal yang dilakukan dalam perancangan ini. Tahapan ini merupakan tahapan untuk mengumpulkan data relevan yang berkaitan dengan bilah TSD-500. Tahapan selanjutnya adalah melakukan proses pengukuran bilah yang rusak, pengukuran ini untuk mengetahui panjang (r) dan lebar ($chord$) bilah.

Pada bagian penentuan parameter bilah, diperlukan perhitungan efisiensi sistem dengan memanfaatkan data spesifikasi teknis dari Lentera Bumi Nusantara (LBN) selaku produsen turbin angin, kemudian ditentukan geometri bilah dengan mencari nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) parsial, jari-jari parsial, *flow angle*, *twist*, dan *chord*.

Data yang diperoleh kemudian digunakan dalam perancangan menggunakan *software* Autodesk Inventor untuk menghasilkan gambar kerja dari bilah TSD-500.

Memasuki tahap akhir dari perancangan, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Qblade, proses ini juga memasukkan nilai geometri bilah untuk mendapatkan nilai *power coefficient* (C_p) dan pengaruh daya terhadap kecepatan angin.

Hasil dari simulasi harus sesuai dengan spesifikasi dari bilah TSD-500 yang akan menghasilkan daya maksimal 500 Wp pada kecepatan angin 12 m/s ke atas. Setelah mendapatkan hasil simulasi yang sesuai, kemudian akan dilanjutkan dengan tahap produksi purwarupa bilah menggunakan bahan kayu pinus.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Parameter Bilah

Perancangan bilah dilakukan dengan menentukan parameter awal bilah yaitu berupa efisiensi sistem secara keseluruhan. Efisiensi sistem secara keseluruhan terdiri atas efisiensi bilah, efisiensi transmisi, efisiensi generator dan efisiensi *controller*.

Pada perancangan ini efisiensi bilah menggunakan nilai efisiensi terendah yaitu 30% dan efisiensi tertinggi 40% yang merupakan nilai ekstrak energi maksimum untuk bilah turbin angin tipe *propeller*. Berdasarkan data spesifikasi teknis milik LBN selaku produsen turbin angin TSD-500, diperoleh nilai-nilai efisiensi maksimum sebagai berikut; efisiensi transmisi sebesar 100%, efisiensi generator 90%, dan efisiensi *controller* 90%. Maka nilai efisiensi sistem (K) pada efisiensi bilah 30% adalah:

$$K = \eta_{Bilah} \times \eta_{Transmisi} \times \eta_{Generator} \times \eta_{Kontroler}$$

$$K = 0,3 \times 1 \times 0,9 \times 0,9 = 0,243$$

Menggunakan rumus yang sama maka diperoleh nilai K pada efisiensi bilah 40% adalah 0,324.

Berdasarkan data spesifikasi teknis diketahui daya listrik maksimum (P_e) dari turbin angin TSD-500 adalah sebesar 500 Wp pada kecepatan angin maksimum (V_{max}) 12m/s. Maka daya angin (P_a) pada efisiensi bilah 30% adalah:

$$P_a = \frac{P_e}{K} = \frac{500}{0,243} = 2057,613$$

Menggunakan rumus yang sama maka diperoleh nilai P_a pada efisiensi bilah 40% adalah 1543,209.

Dengan diketahui massa jenis angin (ρ) di atas permukaan laut adalah 1,225 kg/m³. Maka luas sapuan bilah (A) pada efisiensi bilah 30% dapat dihitung:

$$A = \frac{2 \times P_a}{\rho \times V_{max}^3} = \frac{2 \times 2057,613}{1,225 \times 12^3} = 1,944 \text{ m}^2$$

Menggunakan rumus yang sama maka diperoleh nilai A pada efisiensi bilah 40% adalah 1458 m².

Nilai jari-jari (R) yang diperoleh dari hasil pengukuran bilah yang rusak adalah 0,8 m. Seluruh nilai dari parameter yang telah diperoleh dari hasil perhitungan dan pengukuran ditunjukkan pada Tabel 3.1.

TABEL 3.1. PARAMETER PERANCANGAN BILAH

P_e (Watt)	Efisiensi					P_a (Watt)	V_{max} (m/s)	A (m ²)	R (m)
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem				
500	0,3	1	0,9	0,9	0,243	2057,613	12	1,944	0,8
	0,4				0,324			1543,209	

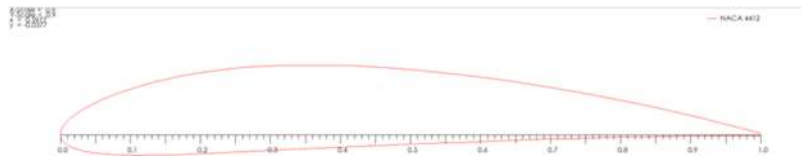
B. Penentuan Geometri Bilah

Pada tahap ini ditentukan bentuk bilah, jumlah bilah, profil *aerofoil* dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Pada perancangan ini geometri bilah yang digunakan adalah jenis yang serupa dengan bilah TSD-500 pada PLTB yaitu menggunakan *aerofoil* NACA 4412. Parameter geometri bilah ditunjukkan pada Tabel 3.2.

TABEL 3.2. PARAMETER GEOMETRI BILAH

Bentuk Bilah	<i>Aerofoil</i>	C_l/C_d	α	C_l	TSR	Jumlah Bilah (B)
<i>Taper</i>	NACA 4412	133,6	6°	1,14	7	3

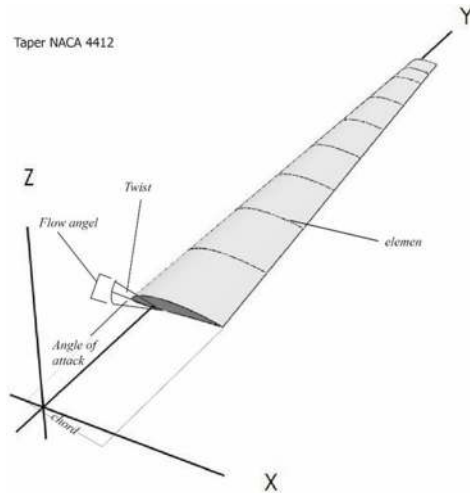
Sudut serang (α) adalah sudut datangnya tumbukan angin pada *aerofoil*, sedangkan *lift coefficient* (C_l) merupakan koefisien gaya angkat. Koefisien gaya angkat harus lebih besar dari *drag coefficient* (C_d) agar bilah dapat berputar. *Aerofoil* NACA 4412 memiliki sudut serang 6° dan *lift coefficient* 1,14. Spesifikasi dari *Aerofoil* NACA 4412 ditunjukkan pada Gambar 3.1.



GAMBAR 3.1. AEROFOIL NACA 4412

Parameter lain yang diperlukan dalam perancangan bilah adalah *Tip Speed Ratio* (TSR), TSR adalah perbandingan kecepatan angin terhadap kecepatan ujung bilah. Secara umum nilai TSR dipengaruhi oleh jumlah bilah yang digunakan. Pada perancangan ini nilai TSR (λ) yang digunakan adalah 7 karena jumlah bilah yang digunakan adalah 3 buah.

Bilah yang dirancang dibagi menjadi 10 elemen seperti terlihat pada Gambar 3.2. TSR parsial merupakan TSR pada setiap elemen bilah, *flow angle* merupakan sudut datangnya aliran angin yang mengenai setiap elemen bilah. Berbeda dengan bilah *taperless* yang memiliki *chord* (lebar) yang sama pada setiap elemen, karakteristik bilah *taper* memiliki perbedaan *chord* pada setiap elemennya.



GAMBAR 3.2. GEOMETRI BILAH TAPER NACA 4412

Pada elemen awal ditetapkan jari-jari parsial r_0 sebesar 0,17 m. Untuk mencari nilai jari-jari parsial (r) pada elemen 1 sampai 10 dapat menggunakan rumus:

$$r = r_0 + \left(\frac{R - r_0}{n} \right) \times \text{elemen}$$

contoh perhitungan untuk mencari nilai jari-jari parsial pada elemen ke-1:

$$r_1 = 0,17 + \left(\frac{0,8 - 0,17}{10} \right) \times 1 = 0,233 \text{ m}$$

untuk menghitung TSR parsial pada tiap elemen bilah digunakan rumus:

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \times \lambda$$

Contoh perhitungan nilai TSR parsial pada jari-jari parsial $r_0 = 0,17$ m:

$$\lambda_r = \frac{0,17}{0,8} \times 7 = 1,487$$

selanjutnya dapat dihitung nilai *flow angle* (ϕ) sebagai berikut:

$$\phi = \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) = \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \left(\frac{1}{1,487} \right) = 22,72^\circ$$

kemudian dihitung nilai *twist* (sudut puntir) dengan menggunakan sudut serang (α) *aerofoil* NACA 4412 sebesar 6° sebagai berikut:

$$\beta = \phi - \alpha = 22,72 - 6 = 16,72^\circ$$

Twist (β) sangat mempengaruhi proses perancangan bilah. Untuk *twist* yang tidak linear, perlu dilinearkan. Sebagai contoh, LBN menggunakan teknik linearisasi 75% dari jari-jari yang digunakan, maka diambil *twist* pada elemen ke-6 dan 7. Linearisasi dapat dihitung menggunakan Microsoft Excel dengan menampilkan grafik hasil dari *optimum twist* dengan menggunakan rumus $y = -6,3053x + 12,216$ dengan y adalah *optimum twist* dan x adalah jari-jari parsial elemen.

Untuk menghitung nilai *chord* pada tiap elemen digunakan rumus:

$$C_r = \frac{16 \times \pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right)}{9 \times \lambda^2 \times B \times C_l}$$

contoh perhitungan nilai *chord* pada elemen ke-0 dengan jari-jari parsial 0,17 m:

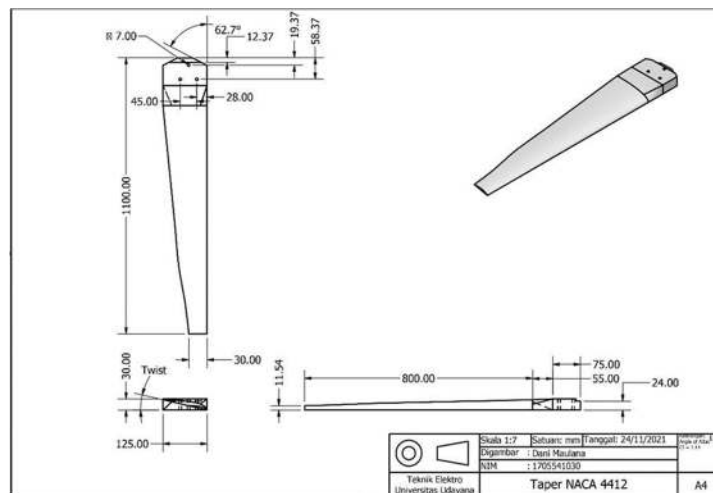
$$C_r = \frac{16 \times 3,14 \times 0,8 \times \left(\frac{0,8}{0,17}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 1,14} = 0,125 \text{ m}$$

Setelah diperoleh nilai jari-jari parsial, TSR parsial, *flow angle*, *twist*, *optimum twist*, dan *chord* pada tiap elemen, maka didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

TABEL 3.3. GEOMETRI BILAH TAPER NACA 4412

Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR parsial	<i>Flow angle</i> (deg)	<i>Twist</i> (deg)	<i>Optimum twist</i> (deg)	<i>Linear twist</i> (deg)	<i>Chord</i> (m)
0	0,170	1,48	22,72	16,72	11,6		0,125
1	0,233	2,04	17,4	11,42	10,8		0,092
2	0,296	2,59	14,1	8,08	10,0		0,072
3	0,359	3,14	11,8	5,78	9,2		0,059
4	0,422	3,69	10,2	4,10	8,4		0,051
5	0,485	4,24	8,8	2,84	7,6		0,044
6	0,548	4,80	7,9	1,85	6,9	6,9	0,039
7	0,611	5,35	7,1	1,06	6,1	6,1	0,035
8	0,674	5,90	6,4	0,42	5,3		0,032
9	0,737	6,45	5,9	-0,12	4,5		0,029
10	0,800	7,00	5,4	-0,58	3,7		0,027

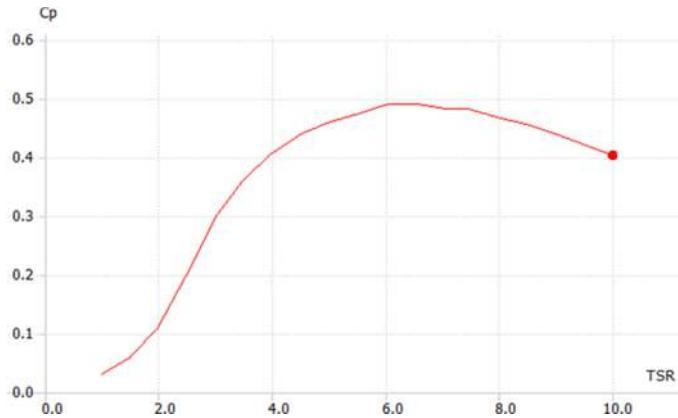
Berdasarkan nilai-nilai tersebut kemudian dibuat rancangan 3D dan gambar kerja dari bilah TSD-500 menggunakan *software* Autodesk Inventor 2018 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



GAMBAR 3.3. GAMBAR KERJA PERANCANGAN BILAH TSD-500

C. Simulasi Bilah TSD-500

Power coefficient (C_p) adalah parameter yang mengukur sejauh mana turbin angin mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Tujuan utama dari menghitung *power coefficient* adalah untuk mengevaluasi sejauh mana turbin angin dapat mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. *Power coefficient* berkisar antara 0 dan 1, di mana 1 akan mengindikasikan bahwa seluruh energi kinetik angin telah dikonversi menjadi energi listrik. Untuk mengetahui perbandingan nilai *power coefficient* (C_p) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) digunakan Rotor Blade Element Momentum (BEM) Simulation pada QBlade. Grafik simulasi perbandingan C_p terhadap TSR ditunjukkan pada Gambar 3.4.



GAMBAR 3.4. GRAFIK PERBANDINGAN NILAI C_p TERHADAP TSR

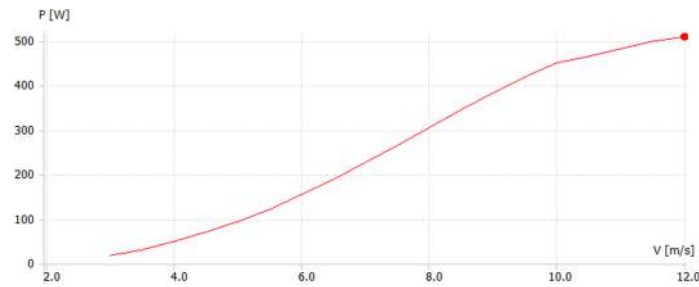
Nilai *power coefficient* (C_p) dipengaruhi oleh bentuk bilah dan jenis *aerofoil* yang digunakan. Pada Gambar 3.4 dapat diamati bahwa nilai C_p maksimum dari bilah bentuk *taper aerofoil* NACA 4412 adalah sebesar 0,48 atau 48%.

Selanjutnya dijalankan simulasi perbandingan daya generator terhadap kecepatan angin pada turbin angin. Berdasarkan spesifikasi teknis PLTB TSD-500, daya yang dihasilkan oleh generator adalah 500 Wp pada kecepatan angin 12 m/s. Pada simulasi menggunakan Turbine BEM Simulation pada QBlade, dengan diketahui nilai *cut in wind speed* dari TSD-500 adalah 3 m/s maka pada kecepatan angin minimum 3 m/s diperoleh nilai daya generator sebesar 17,18 Wp sedangkan pada kecepatan angin maksimum 12 m/s, nilai daya generator adalah sebesar 506,7 Wp. Hasil simulasi perbandingan nilai daya generator terhadap kecepatan angin dapat dilihat pada Tabel 3.4.

TABEL 3.4. PERBANDINGAN NILAI DAYA GENERATOR TERHADAP KECEPATAN ANGIN

V (m/s)	P (Wp)
3	17,18
4	48,33
5	94,12
6	153,4
7	224,89
8	303,08
9	381,86
10	448,21
11	481,01
12	506,7

Berdasarkan hasil pada Tabel 3.4, dibuat grafik perbandingan nilai daya generator terhadap kecepatan angin pada yang dapat dilihat pada Gambar 3.5.



GAMBAR 3.4. GRAFIK PERBANDINGAN NILAI DAYA GENERATOR TERHADAP KECEPATAN ANGIN

D. Perancangan Purwarupa Bilah

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa rancangan yang dibuat telah sesuai dengan spesifikasi teknis turbin angin TSD-500, maka penelitian dilanjutkan dengan pembuatan purwarupa berdasarkan gambar teknis dengan menggunakan bahan yang sesuai dengan spesifikasi teknis yaitu kayu pinus. Hasil produksi purwarupa bilah dapat dilihat pada Gambar 3.5.



GAMBAR 3.5. PURWARUPA BILAH TSD-500

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi terhadap rancangan bilah TSD-500 diperoleh nilai *power coefficient* (C_p) maksimum dari bilah bentuk *taper aerofoil* NACA 4412 ini adalah sebesar 0,48 atau 48%. Dalam praktiknya, *power coefficient* biasanya berkisar antara 0,3 hingga 0,5 untuk turbin angin komersial. Jika dilihat dari simulasi perbandingan daya generator terhadap kecepatan angin pada turbin angin, pada kecepatan angin maksimum 12 m/s, nilai daya generator adalah sebesar 506,7 Wp. Hal ini telah sesuai dengan spesifikasi teknis turbin angin TSD-500 yaitu daya maksimum 500 Wp pada kecepatan 12 m/s. Bisa disimpulkan berdasarkan hasil simulasi tersebut bahwa rancangan telah bekerja dengan baik.

Purwarupa bilah turbin angin TSD-500 telah berhasil dibuat berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi dengan bahan kayu pinus. Belum dilakukan pengujian lapangan terhadap purwarupa bilah tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh DIPA PNBPN Universitas Udayana TA-2023 sesuai dengan Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian B/1.688/UN14.4.A/PT.01.03/2023, tanggal 02 Mei 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Shemmeri, T. (2010). *Wind Turbines*. Bookboon.
- [2] Arieyasa, I. D., Partha, C. G. I., & Sukerayasa, I. W. (2020). Analisis Perbandingan Unjuk Kerja Wind Turbine TSD-500 dan GH-0.5 K di Pilot Project Smart Grid Teknik Elektro Universitas Udayana. *Jurnal SPEKTRUM* Vol, 7(1).
- [3] Browning, J. R., Manwell, J. F., & McGowan, J. G. (2009). A Techno-economic Analysis of a Proposed 1.5 MW Wind Turbine with a Hydrostatic Drive Train. *Wind Engineering*, 33(6), 571-585.
- [4] Dahlan, B. 2016. Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan NACA 4412 Dan 4415 dari Bahan Kayu Mahoni (*Swietenia Macrophylla*) dan Pinus (*Pinus Merkusii*) (disertasi). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Hau, E. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Science & Business Media.
- [6] Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics (Vol. 1)*. Berlin: Springer.
- [7] Ragheb, M. (2014). Wind Energy Conversion Theory, Betz Equation. *Wind Energie*.
- [8] Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5(9), 3425-3449.