

# JURNAL TEKNIK

Engineering and Technology Journal





[Home](#) [About](#) ▾ [People](#) ▾ [Issue](#) ▾ [Submissions](#) ▾ [Announcements](#)

[Search](#)

[Home](#) / [Editorial Team](#)

## Editorial Team

### Editorial Team

#### EDITOR IN CHIEF :



Name : [Dr. David Setiawan, ST., MT](#)

Affiliation : [Universitas Lancang Kuning](#)

email : [dsetia@unilak.ac.id](mailto:dsetia@unilak.ac.id)

Sinta ID : [5973810](#)

Google Scholar ID: [xcST5b4AAAAJ](#)

Scopus ID : [57193501172](#)

Riau, Indonesia

#### EDITORIAL BOARD :



1.

Name : [Widya Apriani, S.T., M.T.](#)  
Affiliation : [Universitas Lancang Kuning](#)  
Email : [widya@unilak.ac.id](mailto:widya@unilak.ac.id)  
Sinta ID : [202872](#)  
Google Scholar ID: [ZidvEHwAAAAJ](#)  
Scopus ID : [57200091463](#)  
Riau, Indonesia



2. Name : [Boby Samra, ST., MT.](#)  
Affiliation : [Universitas Lancang Kuning](#)  
Email : [boby@unilak.ac.id](mailto:boby@unilak.ac.id)  
Sinta ID : [6004073](#)  
Google Scholar ID: [2w8CwdgAAAAJ](#)  
Scopus ID : [57200085272](#)  
Riau, Indonesia



3. Name : [Indra Wijaya, S.Pd., M.Pd.T](#)  
Affiliation : [Universitas Putra Indonesia YPTK Padang](#)  
Email : [indrawijaya25@gmail.com](mailto:indrawijaya25@gmail.com)  
Sinta ID : [6003242](#)  
Google Scholar ID: [VQraobAAAAJ](#)  
Scopus ID : -  
Sumatera Barat, Indonesia



4. Name : [Dr. Rizky Ema Wulansari, S.Pd., M.Pd.T](#)  
Affiliation : [Universitas Negeri Padang](#)  
Email : [sariema15@gmail.com](mailto:sariema15@gmail.com)  
Sinta ID : -  
Google Scholar ID: [uC37RXcAAAAJ](#)  
Scopus ID : [57193502350](#)  
Sumatera Barat, Indonesia



5.  
Name : [Mhd Arief Hasan, S.Kom, M.Kom](#)  
Affiliation : [Universitas Lancang Kuning](#)  
email : [m.arief@unilak.ac.id](mailto:m.arief@unilak.ac.id)  
Sinta ID : [202879](#)  
Google Scholar ID: [xfXdBiAAAAJ](#)  
Scopus ID : [57203022634](#)  
Riau, Indonesia



6.  
Name : [Isra Mouludi, S.Kom, M.Kom](#)  
Affiliation : [Akademi Teknologi Industri Padang](#)  
Email : [isra.mouludi@gmail.com](mailto:isra.mouludi@gmail.com)  
Sinta ID : [6028512](#)  
Google Scholar ID: [B1qZGTcAAAAJ](#)  
Scopus ID : [57200211249](#)  
Sumatera Barat, Indonesia

**Editorial Address :**

Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning  
Jl. Yos Sudarso KM.8, Umban Sari, Rumbai, Kota Pekanbaru, Riau 28266  
Office: (0761) 53581 | Phone: 085271220118  
Email: [jurnalteknik@unilak.ac.id](mailto:jurnalteknik@unilak.ac.id)

## MENU JURNAL

[Editorial Team](#)

[Peer Reviewers](#)

[Author Guidelines](#)

[Publication Ethics](#)

[Publication Frequency](#)

[Peer Review Process](#)

[Publisher](#)

[Focus and Scope](#)

[Plagiarism Check](#)

Contact

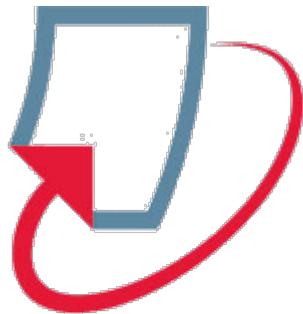
Indexing

Copyright and License

**Download Template :**



**Auxiliary Tools**



**turnitin<sup>®</sup>**

[Open Journal System](#)



p-ISSN : 1858-4217



e-ISSN : 2622-710X

## Information

[For Readers](#)

[For Authors](#)

[For Librarians](#)

[Print ISSN : 1858-4217](#)  
[DOI : 10.31849/2622-710X](#)

[Online ISSN : 2622-710X](#)

[Jurnal Teknik Visitor History](#)





pISSN :

1858 4219



eISSN:

9 772622 710124

Jurnal Teknik: is licensed under a [Creative Commons Attribution International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Editorial Office of Jurnal Teknik Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso KM.8, Umban Sari, Rumbai, Kota Pekanbaru, Riau 28266

Platform &  
workflow by  
OJS / PKP



Home About ▾ People ▾ Issue ▾ Submissions ▾ Announcements

Search

## Current Issue

**Vol. 14 No. 2 (2020): Volume 14, No. 2 Tahun 2020**

Volume 14, No. 1 Tahun 2020

**DOI:** <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2>

**Published:** 2020-10-31

## Articles

### **Pengaruh Kemiringan Pantai Buatan Permeabel dan Impermeabel terhadap Kofisien Refleksi**

Ilham Ziaulhaq, Sigit Sutikno, Rinaldi  
148-152



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.4899>

Abstract views: 35 , pdf downloads: 58

### **Aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Prediksi Erosi Lahan dengan Metode MUSLE**



Aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Prediksi Erosi Lahan dengan Metode MUSLE

Rianty Sihalohe, Bambang Sujatmoko, Manyuk Fauzi  
153-162



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.5041>



 Abstract views: 45 ,  pdf downloads: 54

### **Metode Pengukuran Aliran Air Tanah di Lahan Gambut**

Muhammad Agung Pribadi, Sigit Sutikno, Koichi Yamamoto  
163-169

 pdf

 DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.5046>

 Abstract views: 33 ,  pdf downloads: 43

### **Analisis Persepsi Mahasiswa terhadap Jalur Pendestrian Kampus**

(STUDI KASUS JALUR PENDESTRAN UNIVERSITAS PANCASILA)

Wita Meutia, Prima Jiwa Osly, Nuryani Tinumbia, Radhitya Rio Arvian  
170-177

 pdf

 DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.5328>



 Abstract views: 9 ,  pdf downloads: 16

### **The Drainage Design on Umban Sari Street from STA 0+500 until STA 0+750 Rumbai Sub-District Pekanbaru City**

Fadli Gunawan, Virgo Trisep Haris, Muthia Anggraini  
178-187

 pdf

 DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.4528>

 Abstract views: 6 ,  pdf downloads: 5

### **Angkutan Sedimen Sungai Siak disekitar Pilar Jembatan Siak I**

Risenal Nick, Virgo Trisep Haris, Fitridawati Soehardi  
188-192

 pdf

 DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.4649>

 Abstract views: 9 ,  pdf downloads: 12

### **Analisis Biaya Pemeliharaan dan Perawatan Kantor Pelayanan Bea dan Cukai Pekanbaru**

Weno Dwi, Zainuri, Widya Apriani

203-207



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.4909>

Abstract views: 17 , pdf downloads: 23

### **Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Tanaman Hidroponik**

David Setiawan, Hamzah Eteruddin, Latifa Siswati

208-215



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.5377>

Abstract views: 50 , PDF downloads: 61

### **Optimalisasi Pengaturan Tegangan di Jaringan Listrik Dengan Menggunakan Genetik Algoritma**

zulfahri, Abrar Tanjung, Monice Monice

216-222



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.5113>

Abstract views: 10 , PDF downloads: 7

### **Analisis Transien Pada Sistem Transmisi 150 Kv Riau Setelah Beroperasinya PLTU Tenayan Raya Menggunakan Powerworld Simulator**

Indra Gunawan, Hamzah Eteruddin, Usaha Situmeang

223-231



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.2287>

Abstract views: 39 , PDF downloads: 14



### **PERENCANAAN TRAFFIC LIGHT PADA PERSIMPANGAN JALAN GARUDA SAKTI - JALAN MELATI - JALAN BINAWIDYA KOTA PEKANBARU**

sahat hutabarat

193-202



DOI : <https://doi.org/10.31849/teknik.v14i2.4949>

 Abstract views: 7,  pdf downloads: 6

[View All Issues](#)



Subject: Jurnal Teknik is a journal in the field general of Electrical Engineering, Civil Engineering and Architecture.

Please Download the Jurnal Teknik Writing Template by clicking link : [TEMPLATE MS.WORD](#)

pISSN : 1858-4217

eISSN : 2622-710X

## MENU JURNAL

[Editorial Team](#)

[Peer Reviewers](#)

[Author Guidelines](#)

[Publication Ethics](#)

[Publication Frequency](#)

[Peer Review Process](#)

[Publisher](#)

[Focus and Scope](#)

[Plagiarism Check](#)

[Contact](#)

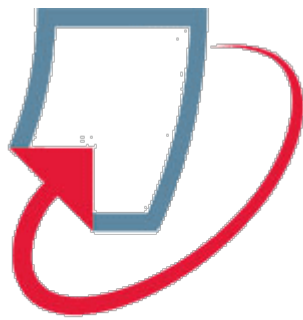
[Indexing](#)

[Copyright and License](#)

Download Template :



Auxiliary Tools



turnitin®

Open Journal System





p-ISSN : 1858-4217



e-ISSN : 2622-710X

## Information

[For Readers](#)

[For Authors](#)

[For Librarians](#)

[Print ISSN : 1858-4217](#)

[Online ISSN : 2622-710X](#)

[Jurnal Teknik Visitor History](#)

[DOI : 10.31849/2622-710X](#)





INTERNATIONAL  
STANDARD  
SERIAL  
NUMBER  
INTERNATIONAL CENTRE



pISSN :

1858 4219



eISSN:

9 772622 710124

Jurnal Teknik: is licensed under a [Creative Commons Attribution International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Editorial Office of Jurnal Teknik Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso KM.8, Umban Sari, Rumbai, Kota Pekanbaru, Riau 28266

Platform &  
workflow by  
**OJS / PKP**

## ANALISIS TRANSIEN PADA SISTEM TRANSMISI 150 KV RIAU SETELAH BEROPERASINYA PLTU TENAYAN RAYA MENGUNAKAN *POWERWORLD SIMULATOR*

Indra Gunawan<sup>1</sup>, Hamzah Eteruddin<sup>2</sup>, Usaha Situmeang<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning Pekanbaru.

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

E-mail: boyindra66@gmail.com, hamzah@unilak.ac.id, usahasitumeang@unilak.ac.id

### ABSTRAK

Dalam proses penyaluran energi listrik kestabilan sistem merupakan hal yang sangat penting. Salah satu masalah dalam kualitas daya yaitu stabilitas transien. Riau merupakan salah satu provinsi yang ada di Indonesia, dengan luas wilayah 87.023,66 km<sup>2</sup>. Pertumbuhan jumlah penduduk provinsi Riau sangat besar yaitu pada tahun 2016 sebesar 6.500.971 jiwa dan tahun 2017 meningkat menjadi 6.657.911 jiwa. Riau defisit energi listrik sebesar 270 MW dari kebutuhan listrik 600 MW. Dalam upaya untuk memenuhi kebutuhan listrik maka sistem transmisi Riau telah mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tenayan Raya. Dengan penambahan ini perlu dilakukan kajian mengenai kestabilan transien yang terjadi pada sistem. Analisa dilakukan pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa untuk melihat respon sudut rotor generator menggunakan *software Powerworld Simulator 20*. Pada saat gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada ujung sisi kirim saluran transmisi dari gardu induk Tenayan Raya menuju gardu induk Teluk Lembu diperoleh waktu pemutus sebesar 0,29 detik dengan sudut pemutus kritis 108,6266°. Hasil simulasi menggunakan *powerworld simulator* diperoleh waktu pemutus maksimum 0,36 detik. Jarak titik gangguan berbanding lurus dengan waktu dan sudut pemutus kritis, semakin jauh titik gangguan pada saluran transmisi maka semakin besar sudut pemutus kritis.

Kata kunci : Kualitas Daya, Stabilitas Transien, Hubung Singkat 3 Fasa

### ABSTRACT

*In the process of distributing electrical energy the stability of the system is very important. One problem in power quality is transient stability. Riau is one of the provinces in Indonesia with an area of 87,023.66 km<sup>2</sup>, and has a very large population growth which is from 6,500,971 people in 2016 to 6,657,911 in 2017. Therefore the need for electrical energy is very large. Riau has a defisit of electrical energy of 270 MW from electricity needs of 600 MW. In an effort to meet electricity needs, the Riau transmission system has operated a Steam Power Plant (PLTU) in the Tenayan Raya region. With this addition, it is necessary to study the transient stability that occurs in the system. The analysis was carried out when there was a 3-phase short circuit disturbance to see the generator rotor angle response using Powerworld Simulator 20 software. When a 3-phase short circuit interference occurred at the end of the transmission line from the Tenayan Raya substation to Teluk Lembu substation the breaker time was 0.29 seconds with a critical breaker angle of 108.6266°. From the simulation results using the powerworld simulator, it is proven that the maximum breaker time is 0.36 seconds. The point of disturbance is directly proportional to the time and angel of the critical breaker, the farther the point of interference on the transmission line, the greater the critical breaker angle.*

*Keyword : Power Quality, Transient stability, 3 - phase short circuit*

### 1. PENDAHULUAN

Dalam proses penyaluran energi listrik perlu adanya kestabilan kualitas daya. *Power Quality* (Kualitas Daya) merupakan salah satu persoalan dalam sistem tenaga listrik, persoalan ini meliputi perubahan bentuk tegangan maupun perubahan frekuensi yang dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan operasi pada peralatan [1]. Dalam proses

penyaluran energi listrik kestabilan sistem merupakan hal yang sangat penting, kestabilan yang baik bertujuan untuk dapat melayani konsumen secara kontinyu. Kestabilan yang baik tersebut adalah bagaimana suatu sistem tenaga listrik dapat memenuhi dan melayani beban secara stabil dan terus menerus dengan tegangan yang stabil, serta dapat memenuhi standar yang berlaku.

Riau merupakan salah satu provinsi yang ada di Indonesia. Dari data Badan Pusat Statistik provinsi Riau memiliki luas 87.023,66 km<sup>2</sup> dan dengan jumlah penduduk pada tahun 2016 sebesar 6.500.971 jiwa, tahun 2017 sebesar 6.657.911 jiwa, tahun 2018 sebesar 6.814.909 jiwa, dan pada tahun 2019 sebesar 6.971.745 jiwa [2]. Dengan pertumbuhan ini sekitar 2,3 % akan dibutuhkan energi listrik sangat besar.

Menurut surat kabar Tribun Pekanbaru pihak PLN menyatakan Riau defisit energi listrik sebesar 270 MW dari kebutuhan listrik 600 MW [3]. Dalam upaya untuk memenuhi kebutuhan listrik maka Unit Pelayanan Transmisi (UPT) Pekanbaru telah mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tenayan Raya. Dengan penambahan ini perlu dilakukan kajian mengenai kestabilan transien yang terjadi pada sistem [4]–[8].

Masalah pada sistem tenaga listrik yang sering muncul adalah masalah yang berkaitan dengan dinamika dan stabilitas sistem untuk merespon gangguan yang terjadi, karena masalah dinamika dan stabilitas sistem tersebut sangat berkaitan erat dengan unjuk kerja sistem yang mencerminkan kondisi setiap saat, baik kondisi normal maupun kondisi gangguan, serta pemulihannya [9]. Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai suatu keadaan sistem untuk kembali lagi ke keadaan normal atau stabil setelah mengalami gangguan [10]–[12].

Stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kondisi operasi awal yang diberikan, untuk mendapatkan kembali keadaan kestabilan operasi setelah terjadi gangguan, dengan sebagian besar variabel sistem dibatasi sehingga praktis seluruh sistem tetap utuh [13].

## 2. METODE PENELITIAN

Masalah pada sistem tenaga listrik yang sering muncul adalah masalah yang berkaitan dengan dinamika dan stabilitas sistem untuk merespon gangguan yang terjadi, karena masalah dinamika dan stabilitas sistem tersebut sangat berkaitan erat dengan unjuk kerja sistem yang mencerminkan kondisi setiap saat, baik kondisi normal maupun kondisi gangguan, serta pemulihannya. Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai suatu keadaan sistem untuk kembali lagi ke keadaan normal atau stabil setelah mengalami gangguan. Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan osilasi tegangan, frekuensi dan daya. Oleh karena itu perlu pengaturan agar osilasi yang terjadi segera kembali ke kondisi normal.

### Stabilitas Sistem Tenaga

Stabilitas *steady state* merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keadaan sinkron antara mesin terhadap gangguan kecil, yaitu gangguan kecil/perlahan yang merupakan fluktuasi beban normal rata-rata. Gangguan ini dapat diatasi

oleh regulator tegangan (AVR) dan *governor* turbin secara otomatis. Namun bila batas *power transfer* dilampaui, mesin akan kehilangan sinkron. Selain itu kondisi lepas sinkron dapat terjadi apabila secara tiba-tiba ada beban besar yang dipasang atau dilepas. Dengan perubahan yang cepat atau pembebanan yang tiba-tiba tersebut, akan menyebabkan terjadinya guncangan pada sistem tenaga listrik [6].

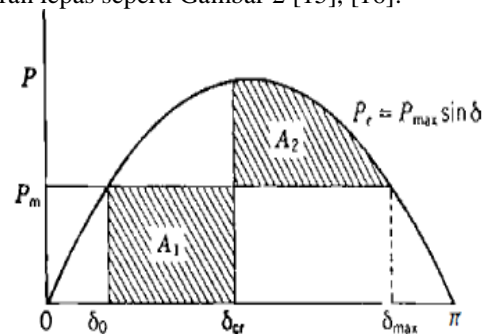
Sedangkan berdasarkan paper IEEE *definition and classification of power system stability* klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu [13] :

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

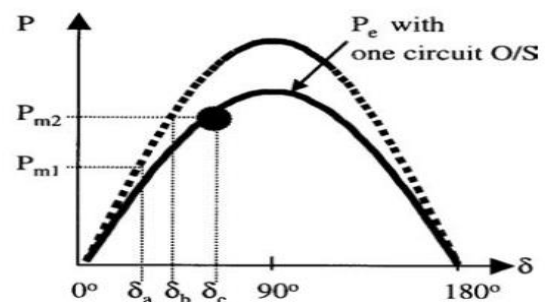
### Kriteria Sama Luas Pada Stabilitas

Kriteria sama luas tidak dapat digunakan secara langsung dalam sistem dimana tiga atau lebih mesin diwakili. Meskipun fenomena fisik diamati pada masalah dua mesin pada dasarnya sama seperti dalam kasus *multimachine*. Namun, keakuratan dari perhitungan numerik meningkat dengan jumlah mesin dipertimbangkan dalam studi stabilitas transien [14].

Dengan menggabungkan perilaku dinamis generator sebagaimana didefinisikan oleh persamaan ayunan, dengan hubungan sudut-daya, digunakan untuk menggambarkan konsep stabilitas sementara menggunakan kriteria luas yang sama seperti pada Gambar 1 dan hubungan sudut daya ketika satu saluran lepas seperti Gambar 2 [15], [16].



Gambar 1. Kurva kriteria sama luas



Gambar 2. Hubungan sudut daya ketika satu saluran lepas

### Perhitungan Sudut Dan Waktu Pemutus Kritis

Dalam kasus tertentu baik sudut pemutus kritis



maupun waktu pemutus kritis dapat dihitung [14].

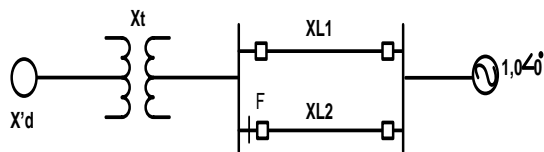
$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \quad (1)$$

Jika area  $A_2$  adalah

$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2)$$

$$= P_{max}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{max})(\delta_{max} - \delta_{cr})$$

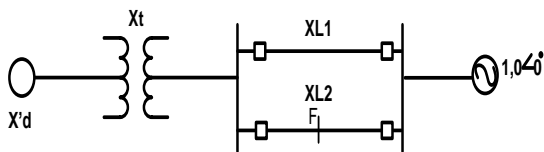
Dengan menyatakan rumus-rumus  $A_1$  dan  $A_2$ , dengan memindahkan suku-sukunya, maka diperoleh sudut pemutus kritis pada ujung sisi kirim seperti Gambar 3 [14].



Gambar 3. Single line sistem gangguan dititik F

$$\cos \delta_{cr} = (P_m/P_{maks})(\delta_{maks} - \delta_0) + \cos \delta_{maks} \quad (3)$$

Rangkaian untuk menentukan reaktansi sistem saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada tengah saluran transmisi seperti Gambar 4.



Gambar 4. Single line sistem gangguan dititik F

$$X_{Sebelum\ gangguan} = X'_d + X_T + \frac{X_L}{2} \quad (4)$$

Rangkaian reaktansi saluran transmisi pada saat gangguan hubung singkat 3 fasa seperti gambar diatas ditransformasikan  $\Delta$ -Y [17].

$$X_A = \frac{(X_{L1})(X_{L2}/2)}{(X_{L1})+(X_{L2}/2)+(X_{L2}/2)} \quad (5)$$

$$X_B = \frac{(X_{L1})(X_{L2}/2)}{(X_{L1})+(X_{L2}/2)+(X_{L2}/2)} \quad (6)$$

$$X_C = \frac{(X_{L2}/2)(X_{L2}/2)}{(X_{L1})+(X_{L2}/2)+(X_{L2}/2)} \quad (7)$$

$$X_D = X'_d + X_T + X_A \quad (8)$$

Sehingga nilai reaktansi selama gangguan ditulis [17].

$$X_{Selama\ Gangguan} = \frac{(X_B)(X_C)+(X_B)(X_D)+(X_D)(X_C)}{(X_C)} \quad (9)$$

Dan nilai reaktansi setelah gangguan diperoleh [17].

$$X_{Sesudah\ Gangguan} = X'_d + X_T + X_{L1} \quad (10)$$

Jika nilai reaktansi sebelum dan sesudah gangguan telah didapatkan, Kemudian untuk menentukan nilai  $r_1$  dan  $r_2$  dihitung menggunakan persamaan [17].

$$r_1 = \frac{X_{Sebelum\ Gangguan}}{X_{Selama\ Gangguan}} \quad (11)$$

$$r_2 = \frac{X_{Sebelum\ Gangguan}}{X_{Sesudah\ Gangguan}} \quad (12)$$

Maka nilai sudut pemutus kritis pada saat gangguan berada jauh dari sisi kirim dapat dihitung dengan persamaan [17].

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \frac{(\frac{P_m}{P_{mak}}(\delta_{mak}-\delta_0)+r_2 \cos \delta_{mak}-r_1 \cos \delta_0)}{r_2-r_1} \quad (13)$$

Kita lihat dari lengkungan sudut daya sinusoidal bahwa [17].

$$\delta_{maks} = (\pi - \delta_0) \text{ radian} \quad (14)$$

Maka dapat dihitung waktu pemutus kritis ( $t_{cr}$ ) [17].

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr}-\delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (15)$$

Keterangan :

- $P_m$  = Daya mekanis generator (MW)
- $P_{maks}$  = Daya maksimum generator (MW)
- $\delta_0$  = Sudut rotor awal generator (Derajat)
- $\delta_{maks}$  = Sudut rotor maksimum generator (Derajat)
- $\delta_{cr}$  = Sudut pemutus kritis (Derajat)
- $t_{cr}$  = Waktu pemutus kritis (Detik)
- $X'_d$  = Reaktansi transien generator (p.u)
- $X_T$  = Reaktansi transformator (p.u)
- $X_L$  = Reaktansi saluran (p.u)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

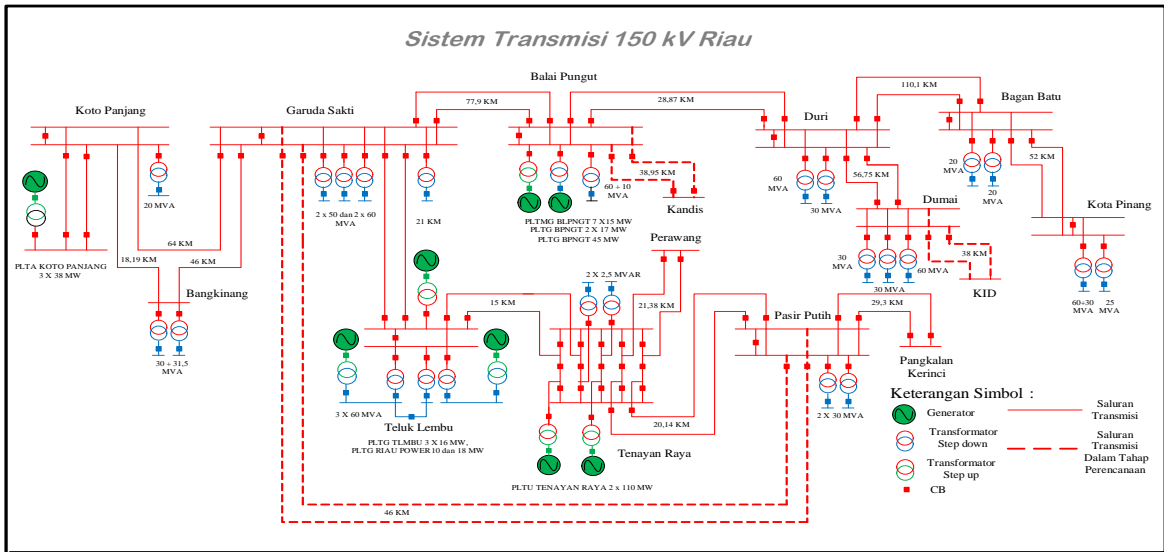
Sistem interkoneksi merupakan kumpulan dari beberapa pusat tenaga listrik yang dihubungkan oleh suatu jaringan transmisi. Sistem tenaga listrik yang digunakan pada sistem transmisi Riau menggunakan tegangan 150 kV. Sistem tenaga listrik di Riau terhubung interkoneksi sistem transmisi Sumatera bagian tengah. Sistem transmisi Sumatera bagian tengah yang terdiri dari sistem transmisi 150 kV Sumatera Barat, sistem transmisi Jambi dan sistem transmisi Riau. Sistem interkoneksi ini bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem tenaga listrik dalam rangka penyaluran energi listrik menuju pusat beban. Sistem transmisi Riau yang menghubungkan antara pusat tenaga listrik dan gardu induk. Jenis pusat pembangkit listrik yang ada di Riau terdiri dari :

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)
2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
3. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
4. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)
5. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)

Sistem Transmisi Riau dihubungkan melalui saluran udara tegangan tinggi (SUTT). Saluran transmisi ini bertujuan untuk menanggulangi kekurangan daya yang sedang terjadi di wilayah Riau

sehingga kontinuitas penyaluran daya terjaga. PT. PLN (Persero) Penyaluran dan pusat pengaturan beban (P3B) Riau merupakan unit yang mengelola

operasi sistem tenaga listrik dan mengatur beban yang terdapat di Riau. Untuk *single line* Sistem Transmisi 150 kV Riau seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Single line diagram sistem tenaga listrik riau

**Waktu Pemutus Kritis ( $t_{cr}$ ) Berdasarkan Metode Kriteria Sama Luas**

Gangguan hubung singkat 3 fase diasumsikan terjadi pada 2 titik, yaitu : pada titik 0% dan 50% dari panjang saluran transmisi. Pada saat gangguan terjadi pada titik 0% (ujung sisi kirim) dari panjang saluran transmisi dititik F seperti Gambar 3. Generator Tenayan Raya yang dihubungkan melalui saluran transmisi paralel menuju bus tak terhingga, dimana tegangan pada bus tak terhingga yaitu  $1\angle 0^0$  p.u.

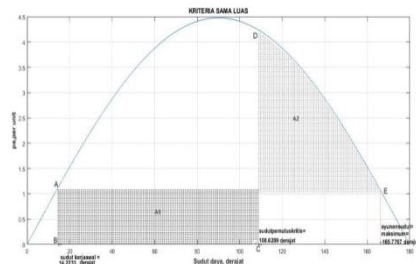
Kemudian waktu pemutus kritis saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fase pada saluran Tenayan Raya menuju Teluk Lembu. Dengan sudut kerja awal rotor generator  $\delta_0 = 14,2238^\circ = 0,2468$  radian dan  $P_m = 1,1$  p.u. Pada saat gangguan hubung singkat 3 fase pada titik F seperti Gambar 3 diperoleh nilai sudut pemutus kritis ( $\delta_{cr}$ ) sebesar  $108,6266^\circ = 1,8959$  radian dan untuk waktu pemutus kritis ( $t_{cr}$ ) sebesar 0,29 detik.

Hasil perhitungan sudut dan waktu pemutus kritis dengan program *matlab* didapatkan seperti pada Gambar 5 dan kurva kriteria sama luas untuk menentukan sudut pemutus kritis seperti Gambar 6.

```

=====
==          SUDUT DAN WAKTU PEMUTUS KRITIS          ==
==          METODE KRITEIA SAMA LUAS                  ==
=====
= Sudut pemutus kritis = 108.6289 derajat =
= Waktu pemutus kritis = 0.29001 detik =
=====
    
```

Gambar 5. Perhitungan waktu dan sudut pemutus kritis menggunakan *matlab*



Gambar 6. Kriteria sama luas untuk gangguan pada ujung sisi kirim

Dari hasil simulasi menggunakan *matlab* diperoleh nilai sudut pemutus kritis menggunakan metode kriteria sama luas seperti Gambar 6 sebesar  $108,6289^\circ$  dengan waktu pemutus kritis sebesar  $0,29001$  detik serta sudut ayunan maksimum sebesar  $165,7767^\circ$ . Dari Gambar 6 terlihat sudut awal rotor pada titik A dimana daya listrik yang ditransfer sebesar  $1,1$  p.u. Pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fase sudut awal rotor maju dari  $\delta_0$  menuju sudut pemutus kritis  $\delta_{cr}$  yang artinya berubah dari titik B menuju titik C dan daya listrik yang ditransfer sama dengan 0. Jika gangguan hubung singkat 3 fase dihilangkan pada sudut  $\delta_{cr}$  keluaran daya listrik berubah dan naik menuju titik D. Akibatnya kecepatan rotor generator menurun  $P_e$  (daya listrik) berubah dari titik D menuju titik E. Lalu kecepatan rotor generator kembali serempak meskipun sudut rotor generator telah maju sampai  $\delta_{mak}$  yaitu  $165,7767^\circ$ .

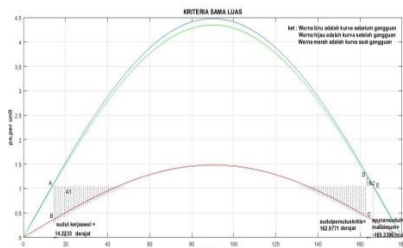
Pada saat gangguan hubung singkat 3 fase terjadi dititik 50% dari panjang saluran pada titik F seperti Gambar 4, diperoleh nilai sudut pemutus kritis ( $\delta_{cr}$ ) sebesar  $163,1170^\circ = 2,8469$  radian dan untuk waktu pemutus kritis ( $t_{cr}$ ) sebesar  $0,3641$  detik.

Kemudian perhitungan sudut dan waktu pemutus kritis dengan program matlab didapatkan hasil seperti pada Gambar 7 dan kurva kriteria sama luas untuk menentukan sudut pemutus kritis seperti Gambar 8.

```

=====
==          SUDUT DAN WAKTU PEMUTUS KRITIS          ==
==          METODE KRITEIRA SAMA LUAS                  ==
=====
= Sudut pemutus kritis = 162.9771 derajat =
= Waktu pemutus kritis = 0.36404 detik =
=====
    
```

Gambar 7. Perhitungan waktu dan sudut pemutus kritis menggunakan *matlab*

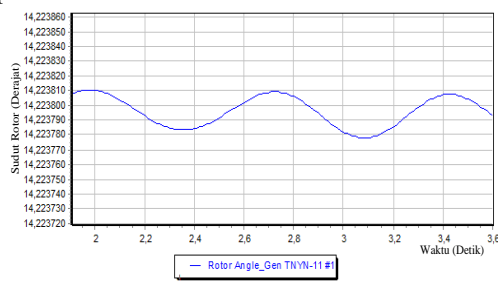


Gambar 8. Kriteria sama luas untuk gangguan pada tengah saluran

Dari hasil simulasi menggunakan *matlab* diperoleh nilai sudut pemutus kritis menggunakan metode kriteria sama luas seperti Gambar 8 sebesar 162,9771° dengan waktu pemutus kritis sebesar 0,36404 detik serta sudut ayunan maksimum sebesar 165,3396°. Dari Gambar 8 terlihat sudut awal rotor pada titik A dimana daya listrik yang ditransfer sebesar 1,1 p.u. Pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa sudut awal rotor maju dari  $\delta_0$  menuju sudut pemutus kritis  $\delta_{cr}$  yang artinya berubah dari titik B menuju titik C. Jika gangguan hubung singkat 3 fasa dihilangkan pada sudut  $\delta_{cr}$  keluaran daya listrik berubah dan naik menuju titik D. Akibatnya kecepatan rotor generator menurun  $P_e$  (daya listrik) berubah dari titik D menuju titik E. Lalu kecepatan rotor genarator kembali serempak meskipun sudut rotor generator telah maju sampai  $\delta_{mak}$  yaitu 165,3396°.

**Simulasi Menggunakan *Powerworld Simulator***

Pada saat simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* untuk sudut rotor generator Tenayan pada saat sistem beroperasi normal tanpa gangguan seperti Gambar 9.



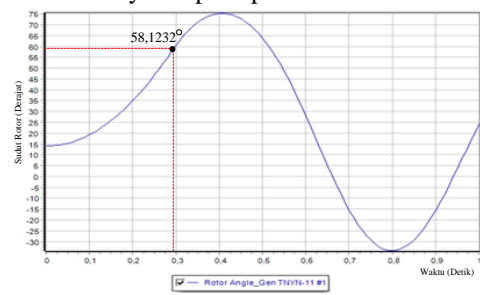
Gambar 9. Sudut rotor generator tenayan pada saat kondisi normal

Gambar 9 merupakan hasil simulasi sudut rotor generator Tenayan dalam keadaan normal tanpa gangguan menggunakan *powerworld simulator*. Terlihat sudut awal kerja rotor generator Tenayan Raya berada pada 14,2238° pada saat keadaan normal.

Dalam melakukan simulasi studi kasus kestabilan transien ini dibuat suatu skenario gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu untuk melihat perubahan sudut rotor generator dan menilai kondisi sistem apakah masih stabil, dengan gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada ujung sisi kirim dan saat gangguan berada jauh dari ujung sisi kirim, dengan waktu pemutus kritis 0,29 detik. Lalu dilakukan simulasi dengan waktu pemutus secara acak setelah gangguan terjadi untuk melihat kondisi sistem serta mengetahui batas maksimum waktu pemutus.

**Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Pada Jarak 0% Dengan  $t_{cr} = 0,29$  Detik**

Setelah didapatkan waktu pemutus kritis maka dilakukan simulasi gangguan hubung singkat 3 fasa pada jarak 0% saluran Tenayan Raya menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,29 detik setelah gangguan bekerja maka respon sudut generator Tenayan seperti pada Gambar 10.

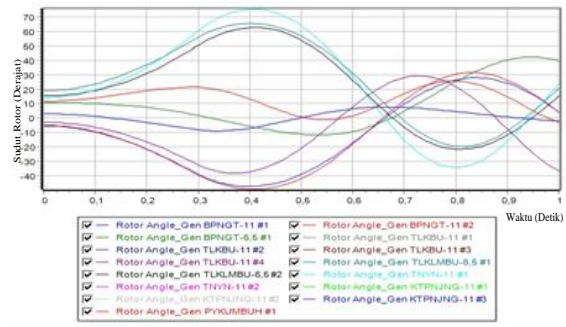


Gambar 10. Waktu pemutus kritis 0,29 detik

Gambar 10 menunjukkan respon sudut generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran yang menghubungkan GI Tenayan menuju GI Teluk Lembu. Lalu waktu pemutus kritis yang telah dihitung dimasukkan kedalam simulasi untuk memutuskan gangguan. Kemudian terlihat terjadinya ayunan pada saat waktu pemutus 0,29 detik setelah gangguan terjadi. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* sistem masih stabil karena grafik menunjukkan terjadinya ayunan dan didapatkan sudut pemutus sebesar 58,1232° lebih kecil dari sudut pemutus kritis sebesar 108,6266°.

Kemudian respon sudut rotor generator pada sistem tenaga listrik Riau pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan

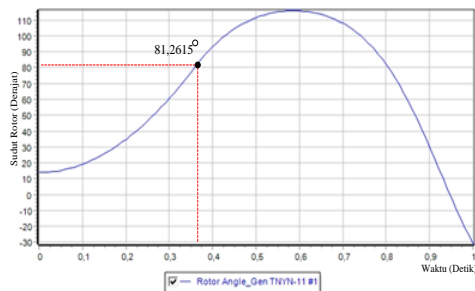
menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,29 detik setelah gangguan seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Waktu pemutus kritis 0,29 detik

Gambar 11 menunjukkan respon sudut rotor generator pada saat terjadi gangguan 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Masing-masing generator mengalami osilasi dan perubahan sudut rotor cukup besar. Respon sudut rotor dari generator Tenayan yang mempunyai sudut rotor normal sebelum gangguan yaitu  $14,2238^\circ$  kemudian setelah gangguan mengalami perubahan dengan nilai sudut rotor maksimum sebesar  $75,354^\circ$  pada detik ke 0,410 sedangkan sudut rotor minimum setelah gangguan  $-34,004^\circ$  pada detik ke 0,8.

Lalu dilakukan percobaan dengan waktu pemutus berbeda lebih lambat yaitu 0,36 detik setelah gangguan bekerja untuk melihat respon sudut generator, lalu respon sudut rotor generator Tenayan dengan  $t_{cr} = 0,36$  detik pada Gambar 12.

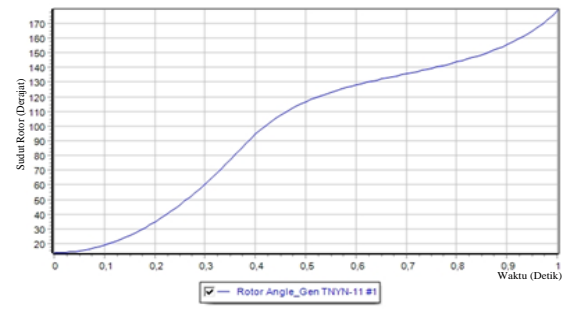


Gambar 12. Waktu pemutus kritis 0,36 detik

Gambar 12 menunjukkan respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus 0,36 detik setelah gangguan terjadi sistem masih stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan terjadinya ayunan sudut rotor dan didapatkan sudut pemutus sebesar  $81,2615^\circ$  lebih kecil dari sudut pemutus kritis sebesar  $108,6266^\circ$ .

Lalu dilakukan percobaan dengan waktu pemutus berbeda dan lebih lambat yaitu 0,37 detik setelah gangguan bekerja untuk melihat respon sudut

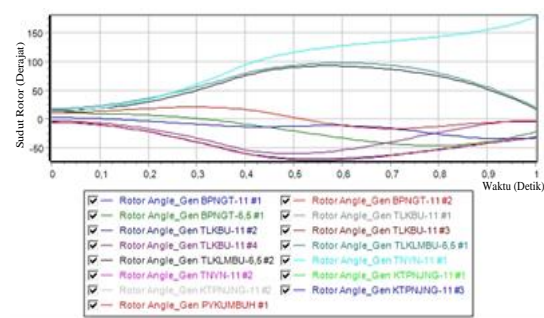
generator, lalu respon sudut rotor generator Tenayan dengan  $t_{cr} = 0,37$  detik pada Gambar 13.



Gambar 13. Waktu pemutus kritis 0,37 detik

Gambar 13 menunjukkan respon sudut generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus 0,37 detik setelah gangguan terjadi sistem tidak stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan tidak terjadinya ayunan sudut rotor.

Kemudian respon sudut rotor generator pada sistem UPT Pekanbaru pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,37 detik setelah gangguan seperti pada Gambar 14.



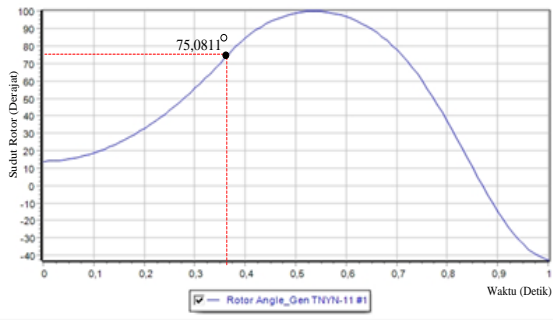
Gambar 14. Waktu pemutus kritis 0,37 detik

Gambar 14 menunjukkan respon sudut rotor generator pada saat terjadi gangguan 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus gangguan 0,37 detik setelah gangguan. Masing-masing generator mengalami osilasi dan perubahan sudut rotor sangat besar. Dengan waktu pemutus 0,37 detik setelah gangguan terjadi sistem tidak stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan tidak terjadinya ayunan sudut rotor.

### Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Pada Jarak 50% Dengan $t_{cr} = 0,3641$ Detik

Setelah didapatkan waktu pemutus kritis maka dilakukan simulasi gangguan hubung singkat 3 fasa pada jarak 50% saluran Tenayan Raya menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,3641

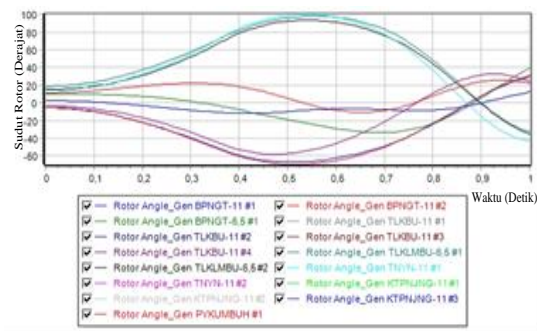
detik setelah gangguan bekerja maka respon sudut generator Tenayan seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Waktu pemutus kritis 0,3641 detik

Gambar 15 menunjukkan respon sudut generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Lalu waktu untuk pemutus kritis yang telah dihitung dimasukkan kedalam simulasi. Terlihat terjadinya ayunan pada saat waktu pemutus 0,3641 detik setelah gangguan terjadi. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* maka sistem masih stabil karena grafik menunjukkan terjadinya ayunan dan didapatkan sudut pemutus sebesar 75,0811° lebih kecil dari sudut pemutus kritis sebesar 163,1170°.

Kemudian respon sudut rotor generator pada sistem UPT Pekanbaru pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,3641 detik setelah gangguan seperti pada Gambar 16.

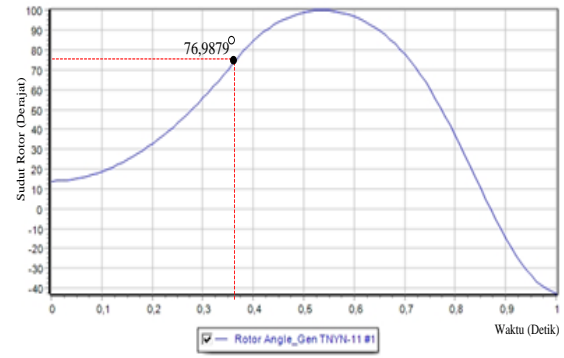


Gambar 16. Waktu pemutus kritis 0,3641 detik

Gambar 16 menunjukkan respon sudut rotor generator pada saat terjadi gangguan 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus 0,3641 detik setelah gangguan terjadi. Masing-masing generator mengalami osilasi dan perubahan sudut rotor cukup besar. Respon sudut rotor dari generator Tenayan Raya yang mempunyai sudut rotor normal sebelum gangguan yaitu 14,2238°. Kemudian setelah gangguan mengalami perubahan dengan nilai sudut rotor maksimum sebesar 100,209° pada detik ke 0,540

sedangkan sudut rotor minimum setelah gangguan - 42,511° pada detik ke 0,1.

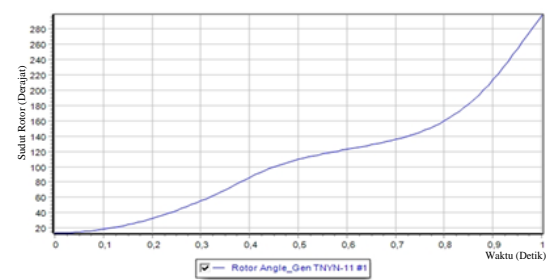
Lalu dilakukan percobaan dengan waktu pemutus berbeda dan lebih lambat yaitu 0,37 detik setelah gangguan bekerja untuk melihat respon sudut generator, lalu respon sudut rotor generator Tenayan dengan  $t_{cr} = 0,37$  detik seperti pada Gambar 17.



Gambar 17. Waktu pemutus kritis 0,37 detik

Gambar 17 menunjukkan respon sudut generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus 0,37 detik setelah gangguan terjadi sistem masih stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan terjadinya ayunan sudut rotor dan didapatkan sudut pemutus sebesar 76,9879° lebih kecil dari sudut pemutus kritis sebesar 163,1170°.

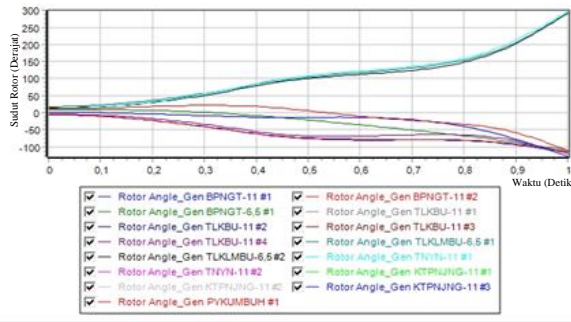
Lalu dilakukan percobaan dengan waktu pemutus berbeda dan lebih lambat yaitu 0,39 detik setelah gangguan bekerja untuk melihat respon sudut generator, lalu respon sudut rotor generator Tenayan dengan  $t_{cr} = 0,39$  detik pada Gambar 18.



Gambar 18. Waktu pemutus kritis 0,39 detik

Gambar 18 menunjukkan respon sudut generator saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan waktu pemutus 0,39 detik setelah gangguan terjadi sistem tidak stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan tidak terjadinya ayunan sudut rotor.

Kemudian respon sudut rotor generator pada sistem UPT Pekanbaru pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu dengan waktu pemutus kritis 0,39 detik setelah gangguan seperti pada Gambar 19.



Gambar 19. Waktu pemutus kritis 0,39 detik

Gambar 19 menunjukkan respon sudut rotor generator pada saat terjadi gangguan 3 fasa pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu. Dengan

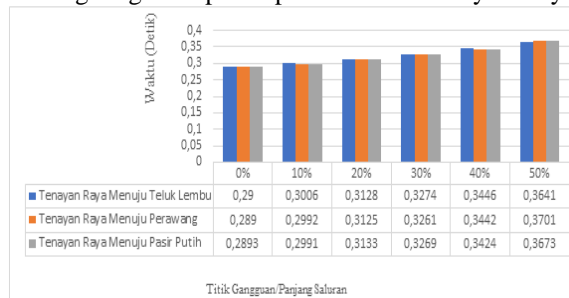
waktu pemutus gangguan 0,39 detik setelah gangguan. Masing-masing generator mengalami osilasi dan perubahan sudut rotor sangat besar. Dengan waktu pemutus 0,39 detik setelah gangguan terjadi sistem tidak stabil. Hasil simulasi menggunakan *Powerworld Simulator* menunjukkan tidak terjadinya ayunan sudut rotor.

Setelah dilakukan perhitungan waktu dan sudut pemutus kritis pada saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan Raya menuju Teluk Lembu. Lalu dengan cara yang sama dilakukan perhitungan waktu dan sudut pemutus kritis Tenayan Raya menuju Perawang dan Tenayan Raya menuju Pasir Putih seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan waktu dan sudut pemutus kritis

Bus Tujuan	Titik Gangguan	Perhitungan Manual		Perhitungan Matlab	
		$\delta_{cr} (^{\circ})$	$t_{cr}(s)$	$\delta_{cr} (^{\circ})$	$t_{cr}(s)$
Teluk Lembu	0%	108,6266°	0,29	108,6289°	0,29001
	10%	115,7525°	0,3006	115,7494°	0,30075
	20%	124,1179°	0,3128	124,1051°	0,31288
	30%	134,5578°	0,3274	134,3745°	0,32718
	40%	147,6667°	0,3446	147,6575°	0,34479
	50%	163,1170°	0,3641	162,9771°	0,36404
Perawang	0%	108,1743°	0,289	108,2545°	0,2892
	10%	114,8701°	0,2992	114,9557°	0,29934
	20%	124,0519°	0,3125	124,1626°	0,31274
	30%	133,7346°	0,3261	133,8813°	0,32629
	40%	147,3830°	0,3442	147,5758°	0,34448
	50%	168,186°	0,3701	168,7245°	0,37082
Pasir Putih	0%	108,3343°	0,2893	108,3176°	0,28934
	10%	114,7494°	0,2991	114,7383°	0,29906
	20%	124,5514°	0,3133	124,5478°	0,31333
	30%	134,3304°	0,3269	134,3184°	0,32693
	40%	145,9329°	0,3424	145,9304°	0,34238
	50%	165,7676°	0,3673	165,7389°	0,36725

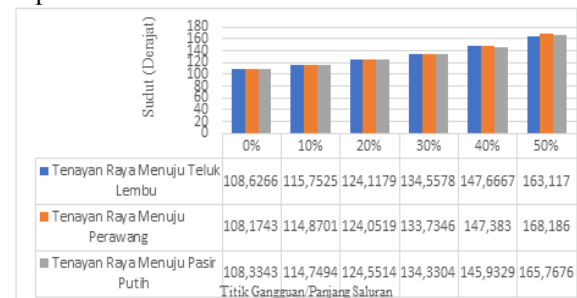
Dari Tabel 1 diperoleh grafik waktu pemutus kritis dan sudut pemutus kritis berdasarkan titik gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan Raya



Gambar 20. Grafik waktu pemutus kritis berdasarkan titik gangguan

Gambar 20 dan 21 merupakan perbandingan sudut dan waktu pemutus kritis berdasarkan titik gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran Tenayan Raya menuju Teluk Lembu, Tenayan Raya

menuju Teluk Lembu, Tenayan Raya menuju Perawang dan Tenayan Raya menuju Pasir Putih seperti Gambar 20 dan 21.



Gambar 21. Grafik sudut pemutus kritis berdasarkan titik gangguan

menuju Perawang dan Tenayan Raya menuju Pasir Putih. Terlihat pada grafik, semakin jauh titik gangguan maka sudut dan waktu pemutus kritis semakin besar.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan nilai sudut kerja awal generator Tenayan Raya sebesar  $14,2238^\circ$ , untuk sudut pemutus kritis  $108,6266^\circ = 1,8959$  radian dan nilai waktu pemutus kritis 0,29 detik untuk gangguan hubung singkat 3 fasa pada ujung sisi kirim saluran transmisi.

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *powerworld* pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu saat gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada jarak 0% dengan waktu pemutus kritis 0,29 dan 0,36 detik sistem masih stabil karena grafik respon sudut rotor menunjukkan terjadinya ayunan, lalu sistem tidak stabil pada waktu pemutus 0,37 detik setelah gangguan terjadi.

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *powerworld* pada saluran Tenayan menuju Teluk Lembu saat gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada jarak 50% dengan waktu pemutus kritis 0,3641 dan 0,37 detik sistem masih stabil karena grafik respon sudut rotor menunjukkan terjadinya ayunan, lalu sistem tidak stabil pada waktu pemutus 0,39 detik setelah gangguan terjadi.

Semakin jauh titik gangguan pada saluran transmisi maka sudut dan waktu pemutus kritis semakin besar.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Hendry, H. Eteruddin, and A. Atmam, "Analysis of Voltage Sag Due to Short Circuit on the Sub System in Central Sumatera," *Int. J. Electr. Energy Power Syst. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [2] Badan Pusat Statistik Provinsi Riau, "Jumlah Penduduk Menurut Kabupaten / Kota di Provinsi Riau, 2010-2019," 2020. [Online]. Available: <https://riau.bps.go.id/dynamic/table/2016/10/03/6/jumlah-penduduk-menurut-kabupaten-kota-di-provinsi-riau-2011-2017.html>.
- [3] Nolpitos Hendri, "Live Streamins: PLN Ungkap Riau Masih Kekurangan Daya Listrik 270 MW," *Tribunpekanbaru.com*, Pekanbaru, Mar-2018.
- [4] H. Eteruddin and A. A. Mohd Zin, "Analisis Penambahan Pembangkit Baru dan Gardu Induk di Tenayan Raya, terhadap Sistem Kelistrikan Riau," in *Applied Engineering Seminar (AES)*, 2010.
- [5] H. Eteruddin and A. A. Mohd Zin, "Pengaruh Penambahan Gardu Induk Tenayan Raya terhadap Sistem Kelistrikan Sumbar – Riau – Jambi," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri (SNTIKI) 2*, 2010.
- [6] H. Eteruddin and A. A. Mohd Zin, "Dampak Pembangunan Pembangkit 2 x 100 MVA dan Gardu Induk 150 kV di Tenayan Raya terhadap Sistem Kelistrikan Riau," in *Seminar Nasional Pengkajian dan Penerapan Teknologi Industri*, 2010, pp. 173–178.
- [7] H. Eteruddin and A. A. Mohd Zin, "Pengaruh Penambahan Gardu Induk Tenayan Raya terhadap Sistem Kelistrikan Sumbar – Riau," in *Seminar Nasional 2 Teknologi dan Rekayasa (SN2TR)*, 2010.
- [8] H. Eteruddin, D. Setiawan, and H. P. Sitepu, "Modifikasi Sistem ATS-AMF Diesel Emergency Generator Pada PLTU dengan Metode Warming Up," *J. Tek.*, vol. 14, no. 2, pp. 129–136, 2020.
- [9] H. Eteruddin, A. A. Mohd Zin, and B. Belyamin, "Line Differential Protection Modeling with Composite Current and Voltage Signal Comparison Method," *Telkomnika*, vol. 12, no. 1, Mar. 2014.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability And Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [11] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [12] C. W. Taylor, "Power System Stability and Control," 2006.
- [13] P. Kundur, J. Paserba, V. Vittal, and G. Anderson, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, p. 15, 2004.
- [14] J. J. Grainger and W. D. Stevenson Jr, *Power System Analysis*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [15] J. R. N. Chiappin and M. J. de Oliveira, "Emergence of cooperation among interacting individuals," *Phys. Rev. E - Stat. Physics, Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.*, vol. 59, no. 6, pp. 6419–6421, 1999.
- [16] N. Jenkins *et al.*, *Embedded Generation*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [17] C. Cekdin, *Sistem Tenaga Listrik*, Kedua. Yogyakarta: Andi Offset, 2007.