

BS

ISBN 978-979-1334-20-4

PROSIDING  
SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI IV  
CALL FOR PAPER

**PENERAPAN TEKNOLOGI UNTUK MENINGKATKAN  
KESEJAHTERAAN MASYARAKAT SECARA BERKELANJUTAN**

**BUKU**



FAKULTAS SAINS TEKNOLOGI & PSIKOLOGI  
UNIVERSITAS TEKNOLOGI YOGYAKARTA  
5 APRIL 2008

---

## SUSUNAN PANITIA

**Pelindung** : Rektor Universitas Teknologi Yogyakarta  
**Penanggung Jawab** : Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

**Ketua** : Agus Sujarwadi  
**Sekretaris** : Arif Nur Rohman  
**Bendahara** : Sudarmi  
**Sie Acara** : Arief Hermawan  
Erik Iman HU  
Joko Sutopo  
Diby Susilo  
Arif Nasiruddin  
Endi Marlina  
Iwan Hartadi TU  
Damar Prasetyo  
Sutarman  
Suhirman  
Yunus Indra Purnama  
Yuli Asriningtyas  
Addy Suyatno  
**Sie Prosiding** : Satyo Nuryadi  
Arif Pramudwiyatmoko  
**Sie Perlengkapan** : Tri Waluyo  
Euis Marlina  
Bruri Wijayanto  
**Sie Konsumsi** : Meiliyah Ariani

## DAFTAR ISI

SUSUNAN PANITIA	i
SAMBUTAN REKTOR	ii
KATA PEMBUKA PANITIA	iv
DAFTAR ISI	v
BUKU 1	
STUDI KOMPARASI KEMAMPUAN GESER BERDASARKAN MODIFIKASI TEORI MEDAN TEKAN (MTMT) DAN SNI 03-2847-2002 PADA BALOK DIATAS DUA TUMPUAN SEDERHANA Yogie Risdianto, Kurdian Suprap	1-8
PENGAJIAN KONSEP PENGEMBANGAN DAMPAK RENDAH DALAM UPAYA MENGURANGI LIMPASAN AIR HUJAN Robby Yussac Tallar, Grinaldo Dita	9-16
DAMPAK REVITALISASI ALUN-ALUN TERHADAP KINERJA SIMPANG (STUDI KASUS REVITALISASI ALUN-ALUN KOTA KENDAL – JAWA TENGAH) Wilarso Hermanto, Devi Handayani	17-24
PENGEMBANGAN MODEL PROSES PRODUKSI PEMBANGUNAN RUMAH PASCA BENCANA BERBASIS KEMAMPUAN LOKAL DI INDONESIA Dewi Larasati, M Donny Koerniawan, Kiki Zakiyatus Solihah	25-34
EVALUASI KINERJA STRUKTUR BAJA BERTINGKAT RENDAH DENGAN ANALISIS <i>PUSHOVER</i> Olga Pattipawaej, Cindrawaty Lesmana, Choerudin S	35-42
STUDI ANALITIS DAN EKSPERIMENTAL PERILAKU BALOK BAJA AKIBAT BEBAN TERPUSAT Yosafat Aji Pranata	43-51
PENATAAN RUANG SEBAGAI SALAH SATU UPAYA MITIGASI BENCANA PADA GEMPA BUMI DIY 2006 Endy Marlina	52-69
KARAKTERISTIK MEKANIK DAN DAKTILITAS PANEL BANGUNAN RINGAN KOMPOSIT LIMBAH FLY ASH-SEKAM-IJUK-PC-ADITIF Yulianto P Prihatmaji	70-86
PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA MERAH DAN PLESTER DARI KONSTRUKSI DINDING SEBAGAI AGREGAT HALUS PADA CAMPURAN BETON BARU Harianto Hardjasaputra, Frengky Sutanto	87-101
'PERTAHANAN SUMBER AIR' SEBAGAI STRATEGI PENANGGULANGAN BENCANA SECARA ALAMI OLEH MASYARAKAT DI LERENG GUNUNG SINDORO ( KASUS DESA KAPENCAR, KECAMATAN KERTEK, KABUPATEN WONOSOBO) Vg Sri Rejeki, Nindy Soewarno	102-108

	ix
PEMANFAATAN BIOMASSA LIMBAH TONGKOL JAGUNG SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF Untoro Budi Surono	41-49
PENGLASTERAN BENTUK PERMUKAAN UJUNG KAYU BULAT SENGON LAUT DIAMETER KECIL SEBAGAI DASAR PENYUSUNAN PANDUAN PROSES PEMBELAHAN BAGI OPERATOR PENGGERGAIAN Ibnu Hisyam	50-58
PENGARUH WAKTU AGING TERHADAP SIFAT MEKANIK CORAN <i>SCRAP</i> ALUMINIUM PADA KOMPONEN Puli Sutrisna	59-66
EVALUASI PENGGANTIAN JAM OPERASI PELUMAS MEDITRAN S SAE-40 PADA MESIN DIESEL PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK CUMMINS KTA 38-G5 REPLACEMENT OF OPERATION HOUR FOR LUBRICANT OF MEDITRAN S SAE-40 AT DIESEL ENGINE POWER PLANT CUMMINS KTA 38-G5 Mochamat Slamet Riyadi, Rini Dharmastiti, Mudjijana	67-73
PENGARUH VARIASI KOMPOSISI TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN LIMBAH INDUSTRI PATI AREN-LIMBAH PERTANIAN SECARA CO-COMBUSTION Supriyadi, Retno Rosariastuti, Dwi Aries Himawanto, Choirul Anam	74-82
PERANCANGAN IMPELER UNTUK <i>DRY-PIT NONCLOG CENTRIFUGAL PUMP</i> UNTUK KAPASITAS 250 GPM DAN <i>HEAD</i> 100 FT Agung Kristanto	83-93
STRUKTUR DAN SIFAT OPTIK FILM TIPIS $GA_2O_3:MN$ (2%) YANG DITUMBUHKAN DENGAN REAKTOR <i>DC MAGNETRON SPUTTERING</i> Putut Marwoto, Sugianto	94-99
TRANSMISIBILITAS PAPARAN GETARAN TIGA SUMBU ORTHOGONAL TERHADAP TUBUH MANUSIA PADA POSISI DUDUK STATIS Wijaya, S.C.A., Wijaya, A.R., Subagyo	100-105
 <b>BUKU 5</b>	
PERBAIKAN KEANDALAN (N-1) SISTEM TENAGA LISTRIK PLN JAWA TENGAH DAN DIY Hartoyo	1-14
RANCANG BANGUN PEMANCAR DAN PENGIRIM SISTEM KOMUNIKASI BEBAS SADAP DENGAN <i>FREQUENCY HOPPING SPREAD SPECTRUM</i> Budi Prasetya, Danar Aji, Irwan Dinata, Basuki Rahmat, Budianto	15-22
PENENTUAN CUTOFF FREQUENCY UNTUK LOWPASS FILTERPADA SENSOR ACCELEROMETER GERAK DINAMIK ROKET BALISTIK Sri Kliwati, Wahyu Widada	23-27
PENGEMBANGAN RADAR SIGNAL GENERATOR UNTUK APLIKASI TRACKING TRAYEKTORI ROKET JARAK JAUH Wahyu Widada, Sri Kliwati	28-33

---

**PERBAIKAN KEANDALAN (N-1) SISTEM TENAGA LISTRIK  
PLN JAWA TENGAH DAN DIY**

Hartoyo

Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta

**ABSTRAK**

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan melakukan perbaikan keandalan subsistem tenaga listrik 150 kV Jawa Tengah dan DIY dengan: (1) Melakukan studi pengaruh gangguan kontingensi (N-1) terhadap perubahan arus dan tegangan pada sistem; (2) Melakukan inventarisasi bus yang tegangannya di luar batas operasi, (3) Melakukan inventarisasi saluran transmisi yang mengalami pembebanan kritis dan/atau melebihi batas operasi; dan (4) Melakukan perbaikan untuk mengatasi kelemahan elemen sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY akibat kontingensi N-1.

Obyek penelitian ini adalah jaringan subsistem tenaga listrik 150 kV Jawa Tengah dan DIY dengan 68 bus dan 138 saluran transmisi. Penelitian ini berlangsung pada bulan Januari 2006 sampai dengan Juni 2006. Data penelitian yang berupa konfigurasi jaringan, data parameter sistem, dan data operasi diperoleh dari PT. PLN (Persero) Unit Pengatur Beban Ungaran Jawa Tengah. Data operasi yang diambil adalah data beban puncak tanggal 25 Januari 2006. Teknik analisis data menggunakan analisis aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* dengan bantuan program aplikasi ETAP versi 4.0. Analisis aliran daya diterapkan pada sistem dalam keadaan normal, dan keadaan kontingensi. Kontingensi (N-1) yang dipilih adalah lepasnya satu saluran transmisi Weleri-Batang dan satu saluran transmisi Sayung-Kudus. Pemilihan kontingensi dipilih berdasarkan pada kondisi pembebanan saluran diatas 50% dan kriteria (N-1) tidak terpenuhi. Kriteria keandalan menggunakan indeks keandalan keamanan N-1.

Hasil Penelitian ini menyimpulkan bahwa:

1. Subsistem tenaga listrik 150 kV Jawa Tengah dan DIY dalam keadaan kontingensi menyebabkan terjadinya perubahan tegangan pada bus dan arus pada saluran transmisi. Kontingensi 1 dengan lepasnya satu saluran transmisi Weleri-Batang menyebabkan penurunan tegangan yang melanggar batas bawah operasi yang ditetapkan sebesar 135 kV pada bus Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1. Kontingensi 2 dengan lepasnya satu saluran transmisi Sayung-Kudus menyebabkan penurunan tegangan yang melanggar batas bawah operasi pada bus Cepu, Bora, Rembang, Pati, Jepara, dan Tanjungjati. Perubahan arus pada saluran transmisi akibat kontingensi 1 dan 2 tidak menyebabkan pembebanan lebih.
2. Terdapat beberapa saluran transmisi yang pembebanannya kritis diatas 50%, yaitu saluran Krapyak-Randugarut, Randugarut-Kaliwungu, Kaliwungu-Weleri, Weleri-Batang, dan Batang-Pekalongan, saluran transmisi tersebut terhubung secara radial.
3. Terdapat beberapa bus yang melanggar batas bawah operasi saat terjadi kontingensi 1 dan 2, yaitu bus: Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, Bumiayu 1, Cepu, Bora, Rembang, Pati, Jepara dan Tanjungjati.
4. Perbaikan keandalan untuk mengatasi kelemahan sistem adalah dengan (1) menambah instalasi saluran transmisi baru Ungaran-Weleri, Krapyak-Weleri yang memotong Ungaran-Krapyak, dan Weleri-Pekalongan, serta (2) menambah pemasangan satu unit kapasitor sebesar 25 MVAR di bus Kudus. Perbaikan sistem dinyatakan efektif karena kriteria keandalan keamanan N-1 terpenuhi dan dapat menurunkan pembebanan saluran transmisi yang kritis dan meningkatkan tegangan bus yang melewati batas bawah operasi.

**Kata kunci:** keandalan, keamanan, sistem tenaga listrik, kontingensi (N-1), aliran daya

## A. LATAR BELAKANG

Peran utama dari suatu sistem tenaga listrik adalah menyediakan dan menyalurkan energi listrik secara andal dan terus menerus kepada beban. Secara umum keandalan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan sistem untuk memberikan suatu pasokan tenaga listrik yang cukup dengan kualitas yang memuaskan. Keandalan sistem tenaga listrik ditentukan oleh penilaian kecukupan (*adequacy assesment*) dan penilaian keamanan (*security assesment*). Hal itu berarti keandalan suatu sistem tenaga listrik ditentukan oleh kemampuan sistem untuk memasok energi listrik yang cukup ke pelanggan yang memenuhi persyaratan dengan cara yang memuaskan dan kemampuan sistem untuk tetap mampu bertahan akibat adanya gangguan yang mendadak seperti hubung singkat atau hilangnya elemen sistem yang tak dapat diantisipasi (Kim, 2003; Pottonen, 2005; dan Yeu, 2005).

Pada saat ini, kebanyakan sistem tenaga listrik sudah merupakan sistem interkoneksi antara satu pusat pembangkit dengan pembangkit lainnya dengan harapan apabila salah satu dari pusat pembangkit atau saluran transmisi mengalami gangguan maka pasokan tenaga listrik tetap dapat berjalan. Di sisi lain, interkoneksi sistem tenaga listrik juga mempunyai beberapa kelemahan. Salah satu kelemahannya adalah apabila terjadi gangguan pada salah satu sistem, karena adanya beban lebih dan ketidakstabilan tegangan, akan berpengaruh ke sistem yang lain. Gangguan yang pada awalnya bersifat sementara dan terjadi pada bagian sistem yang mengalami gangguan saja, jika tidak ada tindakan perbaikan untuk mengatasi gangguan tersebut, maka gangguan akan tetap berlangsung dan terjadi pelepasan bertingkat yang pada akhirnya akan mengakibatkan pemadaman total (Brown, 2005).

Pada kenyataannya, gangguan yang berupa lepasnya elemen sistem (*outage*) dalam sistem tenaga listrik adalah sesuatu yang tidak dapat sepenuhnya dihindarkan. Lepasnya elemen sistem dapat terjadi karena gangguan (*force outage*) atau karena pemeliharaan (*planned outage*). *Forced outage* adalah lepasnya elemen sistem yang disebabkan oleh adanya gangguan (*fault*) misalnya saluran transmisi yang terkena sambaran petir, terkena badai, kerusakan pada transformator atau generator, sedangkan *planned outage* adalah lepasnya elemen sistem karena adanya pemeliharaan peralatan pada sistem tersebut. Pemeliharaan peralatan dari sistem tenaga listrik sebagian besar memerlukan pembebasan tegangan yang berarti bahwa peralatan yang dipelihara harus dikeluarkan dari operasi (Marsudi, 1990).

Sistem tenaga listrik 150 kV PLN Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan subsistem dari sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali) yang memberikan pelayanan tenaga listrik yang meliputi Jawa Tengah dan DIY. Perusahaan listrik tersebut dituntut untuk menyediakan dan menyalurkan tenaga listrik dengan andal dan bermutu kepada pelanggan. Namun hal tersebut masih belum seperti yang diharapkan. Masih seringnya terjadi gangguan pada suatu saluran atau elemen sistem yang menyebabkan terjadinya pemutusan dan meluas ke saluran atau ke elemen sistem yang lain yang berakibat terlepasnya sistem secara bertingkat. Data gangguan yang terjadi di sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY berdasarkan laporan tahunan (2005) menunjukkan bahwa telah terjadi 264 kali gangguan selama tahun 2004. Bahkan pernah terjadi pemadaman total dan pemadaman bergilir berkali-kali pada sistem Jawa-Madura-Bali. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat keandalan sistem masih perlu diperbaiki. Dampak dari ketidakandalan sistem tenaga listrik dapat meluas dan mempengaruhi kehidupan berjuta-juta manusia yang berakibat pada kerugian ekonomi yang besar.

Untuk memberikan pelayanan yang andal, sistem tenaga listrik harus tetap utuh dan mampu mengatasi berbagai macam gangguan yang mungkin terjadi. Dengan demikian

merupakan suatu hal yang sangat penting bahwa sistem harus direncanakan dan dioperasikan agar dalam keadaan kontingensi atau terlepasnya suatu elemen sistem baik itu generator atau saluran transmisi tidak akan mengalami kehilangan beban. Disamping itu, agar kemungkinan keadaan kontingensi yang paling merugikan tidak menyebabkan pemutusan daya yang tidak terkontrol dan meluas yang mengakibatkan pelepasan yang bertingkat dan pemadaman total.

Dengan demikian perlu dilakukan studi tentang keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik yaitu dengan melakukan analisis aliran daya terhadap sejumlah kasus-kasus kontingensi N-1 (lepasnya salah satu elemen sistem). Hasil-hasil analisis tersebut digunakan untuk mengidentifikasi elemen-elemen sistem yang lemah. Elemen-elemen sistem yang lemah dapat berupa bus yang tegangannya melanggar batasan operasi dan saluran transmisi yang mengalami pembebanan kritis atau mengalami beban lebih. Setelah elemen-elemen sistem yang lemah teridentifikasi, selanjutnya dilakukan perbaikan sistem agar sistem tenaga listrik menjadi lebih andal.

## B. RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana pengaruh gangguan kontingensi (N-1) terhadap perubahan arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY?
2. Bus-bus mana saja yang tegangannya melewati batas operasi yang diijinkan akibat gangguan kontingensi (N-1)?
3. Saluran-saluran transmisi mana saja yang mengalami pembebanan kritis dan mengalami beban lebih akibat gangguan kontingensi (N-1)?
4. Perbaikan apa saja yang dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY akibat gangguan kontingensi (N-1)?

## C. TUJUAN PENELITIAN

1. Untuk memperoleh informasi tentang pengaruh gangguan kontingensi (N-1) terhadap perubahan arus dan tegangan pada sistem.
2. Untuk mengidentifikasi bus-bus sistem yang tegangannya melewati batas operasi yang diijinkan akibat gangguan kontingensi (N-1).
3. Untuk mengidentifikasi saluran-saluran transmisi yang mengalami pembebanan kritis dan mengalami beban lebih akibat gangguan kontingensi (N-1)
4. Melakukan perbaikan keandalan sistem tenaga listrik PT. PLN Area Jawa Tengah dan DIY akibat gangguan kontingensi (N-1).

## E. MANFAAT PENELITIAN

1. Penelitian ini dapat dipergunakan sebagai acuan dalam perencanaan dan pengoperasian sistem dan upaya untuk memperbaiki keandalan khususnya pada sistem tenaga listrik 150 kV PLN Jawa Tengah dan DIY untuk mengatasi gangguan kontingensi (N-1).
2. Dapat dipergunakan untuk media pembelajaran mata kuliah Sistem Tenaga Listrik.

## D. TINJAUAN PUSTAKA

### 1. Keandalan Sistem Tenaga Listrik

Keandalan suatu sistem tenaga listrik ditentukan oleh penilaian kecukupan (*adequacy assessment*) dan penilaian keamanan (*security assesment*). Penilaian kecukupan berkaitan dengan kemampuan sistem untuk memasok energi listrik ke pelanggan yang memenuhi persyaratan dengan cara yang memuaskan. Penilaian keamanan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap mampu bertahan akibat adanya gangguan yang

mendadak seperti hubung singkat atau hilangnya elemen sistem yang tak dapat diantisipasi. Hal ini termasuk respon sistem yang diakibatkan oleh lepasnya pembangkit dan saluran transmisi (Pottonen, 2005; Kiril, 2003; dan Yeu, 2005).

Keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik dapat dicapai dengan melakukan operasi sistem yang toleran terhadap keluarnya salah satu elemen sistem (*single outage*) ataupun keluarnya lebih dari satu elemen sistem (*multiple outage*). Artinya, dengan keluarnya salah satu elemen sistem (atau lebih) seharusnya tidak menyebabkan keluarnya elemen sistem secara bertingkat (*cascading outage*) yang mengakibatkan pemadaman sebagian atau pemadaman total. Suatu sistem tenaga listrik yang mampu bertahan, utuh, dan tidak mengalami pemadaman akibat keluarnya salah satu elemen sistem dikatakan sistem tersebut andal atau aman dengan kriteria N-1 (Alvarado dan Oren, 2004).

Kriteria keandalan keamanan N-1 merupakan kriteria yang fundamental dalam operasi sistem tenaga listrik yang diterima dan dipergunakan hampir di seluruh dunia (universal). Dengan terpenuhinya tingkat keandalan keamanan N-1 secara kasar sama dengan terpenuhinya keseimbangan antara kebutuhan beban dengan jumlah pembangkitan. Dengan demikian suatu sistem tenaga listrik yang andal paling tidak harus memenuhi kriteria keandalan keamanan N-1. Pemenuhan kriteria keandalan N-1 tersebut harus dilakukan dengan tidak mempersoalkan biaya (Alvarado dan Oren, 2004).

Salah satu faktor penting dalam operasi sistem tenaga listrik adalah keinginan untuk mempertahankan keamanan sistem (*system security*). Keamanan sistem meliputi kegiatan yang direncanakan untuk mempertahankan operasi sistem apabila terjadi kegagalan komponen sistem. Sebagai contoh, suatu unit pembangkit mungkin harus keluar sistem (*off-line*) karena kegagalan peralatan pembantu. Dengan mempertahankan sejumlah pembangkit cadangan berputar yang sesuai, unit-unit pembangkit yang tersisa pada sistem dapat mengatasi kekurangan daya tanpa turunya frekuensi yang terlalu rendah atau tanpa perlu melakukan pemutusan beberapa beban (*load shedding*). Dalam pembangkitan dan pengiriman tenaga listrik, apabila suatu saluran transmisi mengalami kerusakan karena terkena badai sehingga menyebabkan saluran terputus, maka saluran transmisi yang tersisa akan memikul beban yang lebih besar namun masih berada pada batasan yang diijinkan.

Peralatan sistem tenaga didesain untuk dioperasikan dalam batasan tertentu, maka kebanyakan peralatan sistem tenaga diproteksi oleh peralatan otomatis yang dapat mengakibatkan peralatan terputus dari sistem jika batasan-batasan dilanggar. Apabila beberapa gangguan terjadi pada suatu sistem yang melanggar batasan operasi, maka kejadian tersebut akan diikuti sederetan aksi lanjutan yang akan memutuskan peralatan dari sistem. Apabila proses kegagalan bertingkat ini berlanjut maka sebagian besar atau keseluruhan sistem akan jatuh sehingga terjadi pemadaman total (*system blackout*).

Sebagai contoh dari suatu urutan kejadian yang dapat menyebabkan pemadaman total mungkin bermula dari suatu saluran tunggal yang terbuka akibat kegagalan isolasi, saluran transmisi yang tersisa dalam sistem akan mengambil aliran yang mengalir pada saluran yang terbuka. Apabila satu saluran yang tersisa pada saat ini terlalu kelebihan beban, saluran tersebut dapat terputus yang diakibatkan oleh kerja relai sehingga menyebabkan saluran yang tersisa juga mengalami beban lebih. Proses ini disebut dengan istilah gangguan yang bertingkat (*cascading outage*). Suatu sistem tenaga listrik harus mampu untuk mengatasi gangguan tersebut terutama menghindari kegagalan yang bertingkat.

## 2. Analisis Kontingensi dengan Metode Aliran Daya *Newton-Raphson*

Kontingensi adalah suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih generator dan/atau transmisi (Ditjen LPE, 2004). Kontingensi N-1 adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya satu komponen sistem yaitu satu saluran transmisi atau satu generator. Kontingensi N-k adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya sejumlah k komponen sistem.

Untuk mengevaluasi unjuk kerja dan keandalan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan analisis kontingensi. Analisis ini dilakukan dengan simulasi gangguan pada suatu unit pembangkit atau saluran transmisi dan menyelidiki pengaruh gangguan tersebut terhadap tegangan bus dan aliran daya aktif saluran. Pendekatan tradisional untuk analisis kontingensi keadaan mantap dilakukan dengan menguji semua kontingensi secara berurutan. Pada sistem tenaga listrik yang besar pengujian kontingensi secara lengkap dengan mengikutsertakan semua kemungkinan kontingensi adalah tidak efisien karena memerlukan waktu proses yang lama. Di sisi lain, pengujian kontingensi yang dipilih berdasarkan pengalaman dan perasaan (intuisi) dari perencana tidaklah memadai karena kemungkinan akan mengabaikan kasus-kasus kontingensi yang kritis. Dengan demikian diperlukan suatu daftar kontingensi yang dipilih dan melakukan analisis kontingensi hanya untuk kasus-kasus kontingensi yang dipilih tersebut.

Suatu sistem tenaga listrik mungkin mengalami kondisi kontingensi, antara lain: (1) lepasnya unit pembangkit dan/atau saluran transmisi akibat adanya gangguan, dan (2) adanya penambahan atau pengurangan yang tiba-tiba dari kebutuhan beban pada sistem tenaga listrik. Meskipun banyak kontingensi lain yang dapat terjadi, namun hanya kontingensi-kontingensi yang mempunyai probabilitas yang tinggi (*credible*) yang akan dipertimbangkan.

Kriteria yang digunakan untuk menentukan keandalan sistem, salah satunya dengan menggunakan kriteria keandalan keamanan N-1 (Pottonen, 2005, Kundur, 2003, Marsudi, 1990). Metode ini menggambarkan tingkat keandalan sistem dengan memperhitungkan kemungkinan gangguan unit pembangkit dan juga gangguan peralatan transmisi. Dengan kriteria indeks keandalan keamanan N-1 apabila dalam sistem terdapat N buah elemen baik unit pembangkit maupun peralatan transmisi, sistem tidak akan kehilangan beban (tidak terjadi pemadaman) apabila sebuah elemen sistem mengalami gangguan.

Salah satu teknik dalam analisis kontingensi adalah dengan metode aliran daya *Newton-Raphson*. Grainger dan Stevenson (1998) menyelesaikan analisis kontingensi menggunakan metode aliran daya *Newton-Raphson*. Metode ini mencoba untuk mensimulasikan pengaruh gangguan kontingensi pada saluran transmisi terhadap perubahan tegangan bus dan sudut fase tegangan serta menyelesaikan secara baik komputasi numeris analisis kontingensi pada sistem interkoneksi tenaga listrik.

## G. METODE PENELITIAN

### 1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan evaluasi terhadap jaringan sistem tenaga listrik 150 kV PLN Jawa Tengah dan DIY dan melakukan upaya perbaikan keandalan dengan mensimulasikan pengaruh gangguan kontingensi (N-1) terhadap perubahan arus saluran cabang dan tegangan bus pada sistem dengan metode aliran daya *Newton-Raphson*.

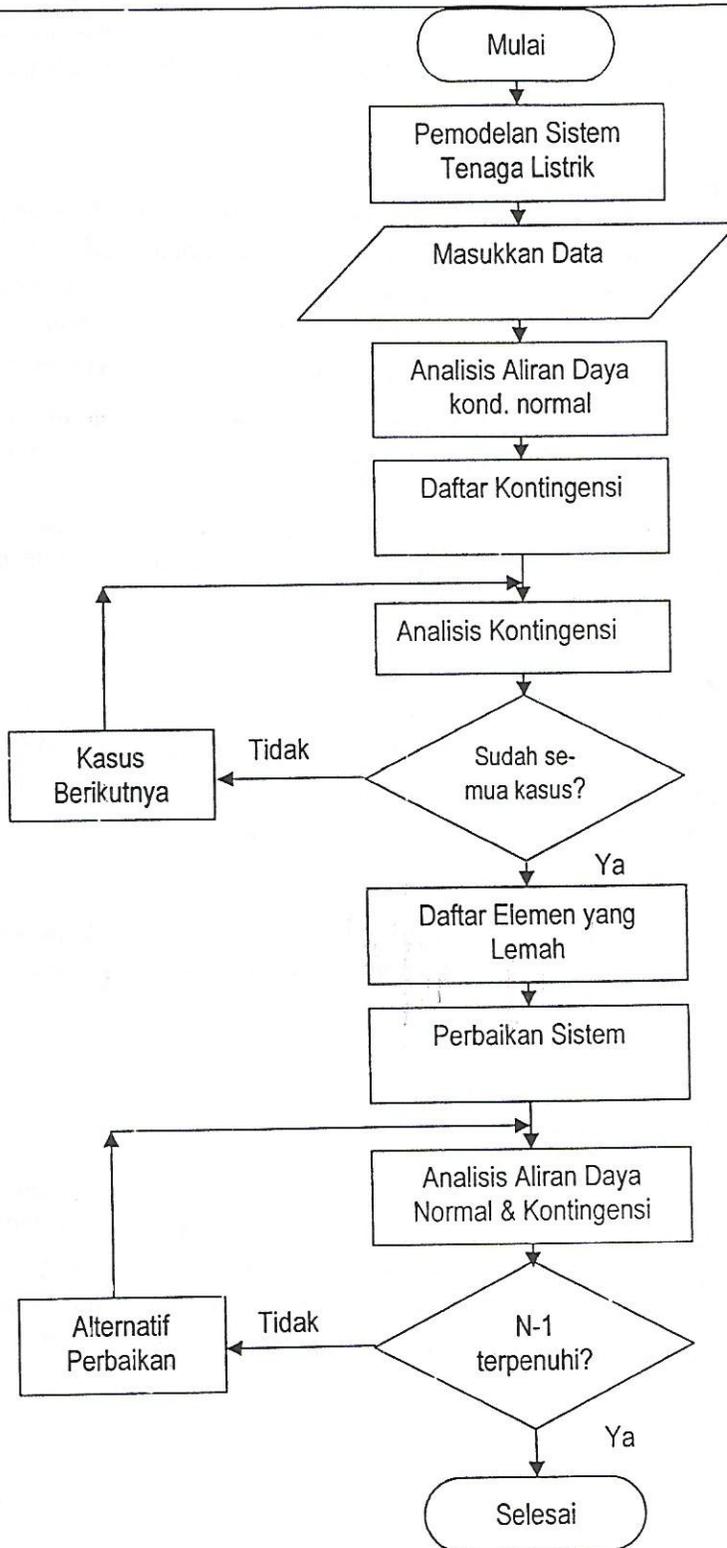
Pemilihan kontingensi berdasarkan pada kondisi pembebanan saluran diatas 50% dan kriteria keamanan (N-1) tidak terpenuhi. Kriteria keandalan yang digunakan adalah dengan indeks keamanan N-1. Aturan yang digunakan untuk menentukan batas tegangan operasi adalah dengan aturan Jaringan Jawa-Madura-Bali, yaitu 150 kV + 5% (157,5 kV) untuk batas atas dan 150 kV - 10% (135 kV) untuk batas bawah. Pembebanan saluran kritis adalah

pembebanan yang melebihi 50 % dari  $I_n$  penghantar. Besarnya arus saluran transmisi yang menyebabkan lepasnya saluran transmisi dari sistem menggunakan setelan arus lebih sebagai pengaman saluran transmisi, yaitu  $1,25 \times I_n$  penghantar.

Rancangan dan kerangka penelitian ini direncanakan melalui beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Melakukan survei dan mencari data operasi dan gambar diagram satu garis sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY.
2. Membuat model sistem tenaga listrik 150 kV PLN Jawa Tengah dan DIY.
3. Melakukan *input* data: generator, beban, bus dan parameter-parameter saluran.
4. Melakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY pada keadaan normal dengan program ETAP.
5. Memilih jenis kontingensi
6. Melakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik PLN Jawa Tengah dan DIY pada keadaan kontingensi dengan program ETAP.
7. Mengidentifikasi elemen-elemen sistem tenaga listrik (bus dan saluran transmisi) yang lemah dari hasil analisis aliran beban saat keadaan normal dan keadaan kontingensi.
8. Melakukan perbaikan sistem tenaga listrik.
9. Mengecek efektivitas perbaikan keandalan sistem dengan melakukan studi aliran daya pada keadaan normal dan keadaan kontingensi seperti tahap nomor 7 dan 8. Jika perbaikan yang dilakukan belum efektif mengulangi tahap nomor 10 dan 11 sampai berhasil dalam perbaikan keandalan sistem dengan kriteria keandalan keamanan N-1.

Tahapan-tahapan penelitian dapat digambarkan dalam diagram air berikut ini.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

## 2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FT UNY dan di Unit Pengatur Beban Ungaran Jawa Tengah Jalan Jenderal Sudirman km 23 Ungaran Jawa Tengah. Waktu yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah enam bulan, yaitu dari bulan Juni 2007 sampai Desember 2007.

## 3. Data Penelitian dan Cara Pengumpulan Data

Data penelitian ini adalah data operasi sistem tenaga listrik 150 kV dari Unit Pengatur Beban Ungaran, meliputi: konfigurasi jaringan; data bus, data parameter saluran, data kapasitas pembangkit, kapasitas transformator terpasang, dan data kapasitor/reaktor terpasang. Data bus yang diambil, meliputi: besarnya tegangan bus  $V_p$ , sudut fase tegangan  $\delta_p$ , daya aktif pembangkit  $P_G$  dan daya reaktif pembangkit  $Q_G$ , daya aktif beban  $P_L$  dan daya reaktif beban  $Q_L$ , jenis bus (*slack* bus, P-V bus, P-Q bus). Data parameter saluran meliputi: resistansi (R), reaktansi (X), susceptansi (B), Arus nominal (In) penghantar, panjang saluran (l), dan jenis kabel.

Cara pengumpulan data adalah dengan dokumentasi yang berupa data operasi. Data yang dianalisis adalah data operasi saat beban puncak pada tanggal 25 Januari 2006 pukul 19.00 WIB yang bebannya relatif besar.

## 4. Alat dan Instrumen Penelitian

Alat atau instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa komputer (PC) dan perangkat lunak program ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) versi 4.0 yang digunakan untuk menganalisis aliran daya sistem tenaga listrik. Sedangkan pengambilan data dilakukan dengan dokumentasi yang berupa data operasi sistem tenaga listrik.

## 5. Analisis Data

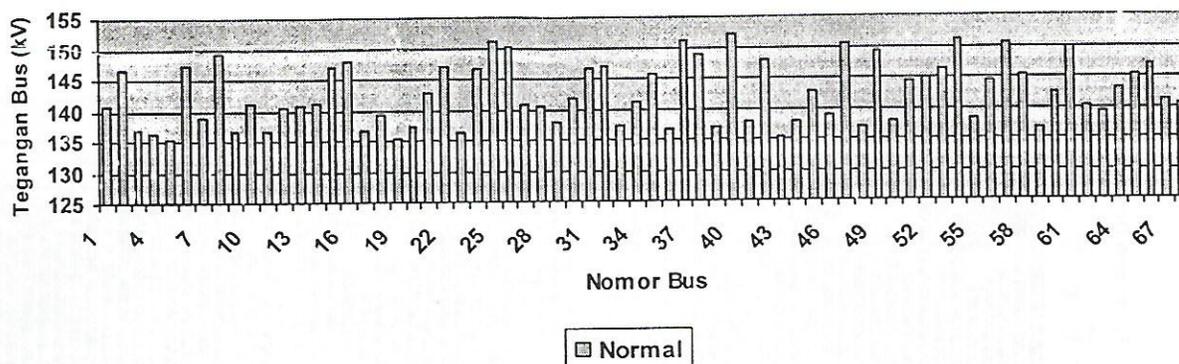
Analisis data dilakukan dengan simulasi program analisis aliran daya (*load flow analysis*) menggunakan perangkat lunak program ETAP versi 4.0. Analisis aliran daya diterapkan pada kondisi normal dan pada kondisi kontingensi

## H. HASIL PENELITIAN

### 1. Kondisi Sistem dalam Keadaan Normal

#### Tegangan Bus Sistem

Besarnya tegangan bus sistem pada saat tidak ada gangguan (normal) paling kecil sebesar 135,200 kV di bus beban Pemalang dan tegangan paling besar adalah 152,000 kV di bus pembangkit PLTGU Tambak Lorok. Dengan demikian pada saat tidak ada gangguan (normal) tegangan pada setiap bus pada sistem tidak ada yang melewati batas tegangan operasi yang telah ditentukan. Profil tegangan bus sistem pada keadaan normal adalah sebagai berikut:



**Gambar 2.** Profil Tegangan Bus Saat Kondisi Normal Sebelum Diperbaiki

### Pembebanan Saluran Transmisi

Pembebanan saluran transmisi pada keadaan tidak ada gangguan (normal) yang paling kecil adalah 4 A pada ruas saluran transmisi Purwodadi-Kedungombo dan pembebanan yang terbesar adalah 564 A pada ruas saluran transmisi Krapyak-Randugarut. Terdapat beberapa ruas saluran transmisi yang mengalami pembebanan diatas 50% dari arus nominal saluran transmisi, seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 berikut:

**Tabel 1** Daftar Saluran Transmisi yang Bebannya diatas 50% pada Keadaan Normal

NO.	Nama Saluran Trar.smisi	Arus (A)	In Penghantar (A)	% Pembebanan
1.	Krapyak-Randugarut	534	930	60,65
2.	Randugarut-Kaliwungu	530	930	56,99
3.	Kaliwungu-Weleri	405	600	67,50
4.	Weleri-Batang	378	600	63,00
5.	Batang-Pekalongan	341	600	56,83

Saluran antara bus-bus tersebut terhubung secara radial bahkan sampai bus Bumiayu 1. Dengan demikian saluran antara bus-bus tersebut sangat rawan dan berpotensi menyebabkan pemadaman yang berurutan pada daerah yang dilayani oleh bus-bus tersebut apabila terjadi gangguan.

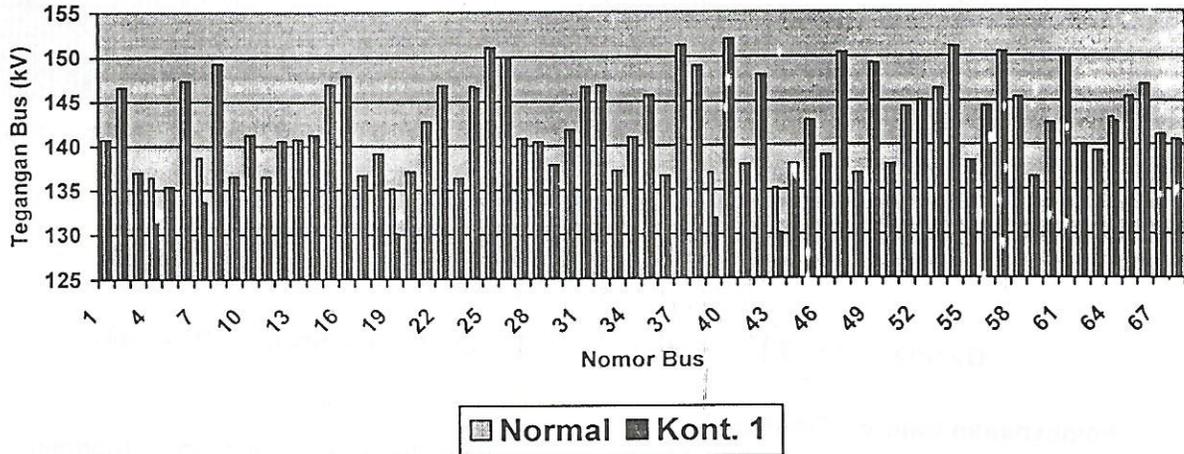
Pada saluran transmisi ganda (*double*) yang mengalami pembebanan diatas 50% dari arus nominal penghantar, apabila terjadi gangguan pada salah satu salurannya, maka saluran lainnya akan mengalami pembebanan diatas 100% dan jika melebihi 1,25 x arus nominal (In) penghantar akan terjadi pembebanan berlebih (*overload*) yang mengakibatkan relai arus lebih (OCR) bekerja dan memutuskan saluran transmisi tersebut. Hal yang demikian akan mengancam keamanan dan keandalan sistem.

## 2. Kondisi Sistem dalam Keadaan Kontingensi 1

### Perubahan Tegangan Bus

Kontingensi 1 adalah keadaan sistem saat terjadi gangguan pada salah satu saluran transmisi antara bus Weleri dan bus Batang yang mengakibatkan lepasnya satu saluran. Pada saat terjadi gangguan akan mempengaruhi terjadinya perubahan tegangan bus, terutama bus-bus yang berdekatan dengan lokasi gangguan. Beberapa bus mengalami penurunan tegangan yang cukup besar, bahkan beberapa bus mengalami penurunan sampai di bawah batas yang

ditetapkan yaitu 135 kV. Perbandingan tegangan bus pada kondisi normal dan saat kontingensi 1 dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



**Gambar 3.** Profil Tegangan Bus pada Kondisi Normal dan Saat Kontingensi 1

Pada kasus kontingensi 1 terdapat lima bus yang mengalami penurunan cukup besar, yaitu Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1. Kelima bus tersebut mengalami penurunan sampai melanggar batas bawah tegangan nominal sistem yang ditetapkan sebesar 135 kV. Bus-bus tersebut merupakan sederet bus yang terhubung secara radial mulai dari bus Krpyak-Randugarut-Kaliwungu-Weleri-Batang-Pekalongan-Pemalang-Kebasen 1 dan Bumiayu 1

#### **Pembebanan Saluran Transmisi**

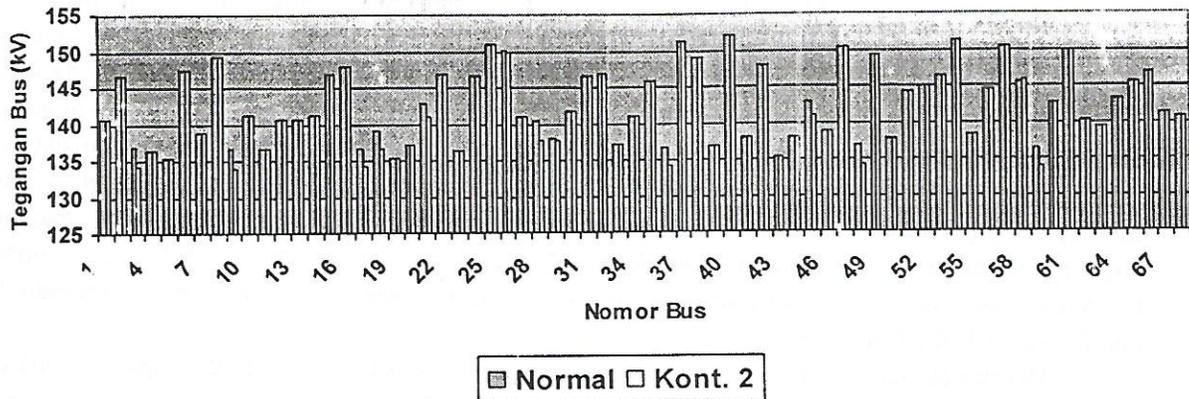
Saat terjadi gangguan pada satu saluran transmisi akan menyebabkan pembebanan pada saluran transmisi mengalami perubahan terutama pada bus-bus yang terhubung dan dekat dengan saluran yang keluar dari sistem. Pada saluran transmisi Weleri-Batang terdapat dua buah saluran yang masing-masing saluran dibebani sebesar 378 A pada kondisi normal. Berdasarkan analisis aliran daya, saat terjadi gangguan pada salah satu saluran (saluran 1), menyebabkan saluran yang lain (saluran 2) menanggung beban sebesar 739 A yang lebih besar dari kemampuan hantar arus penghantar sebesar 600 A (ACSR240/40). Dengan demikian saluran 2 mengalami pembebanan sebesar  $739/600 \times 100\% = 123,167\%$ . Harga tersebut masih lebih kecil dari 125% In penghantar. Pada kondisi seperti ini saluran transmisi 2 tidak keluar dari sistem, namun hanya mengalami pembebanan kritis. Kondisi ini sangat rawan terjadi pembebanan lebih yang mengakibatkan pemadaman apabila ada kenaikan beban.

### **3. Kondisi Sistem dalam Keadaan Kontingensi 2**

#### **Perubahan Tegangan Bus**

Kontingensi 2 adalah keadaan sistem saat terjadi gangguan pada salah satu saluran transmisi antara bus Sayung dan bus Kudus yang mengakibatkan lepasnya satu saluran. Pada saat terjadi gangguan akan mempengaruhi terjadinya perubahan tegangan bus, terutama bus-bus yang berdekatan dengan lokasi gangguan. Beberapa bus mengalami penurunan tegangan yang cukup besar, bahkan beberapa bus mengalami penurunan sampai di bawah batas yang

ditetapkan yaitu 135 kV. Perbandingan tegangan bus pada kondisi normal dan saat kontingensi 1 dapat dilihat pada gambar 4 berikut.



Gambar 4 Profil Tegangan Bus pada Kondisi Normal dan Saat Kontingensi 2

Pada kasus kontingensi 2 terdapat enam bus yang mengalami penurunan cukup besar sampai melanggar batas bawah tegangan nominal sistem yang ditetapkan sebesar 135 kV. Bus-bus tersebut adalah Cepu, Blora, Remabang, Pati, Jepara, dan Tanjungjati. **Pembebanan Saluran Transmisi**

Pada saluran transmisi Sayung-Kudus terdapat dua buah saluran yang masing-masing saluran dibebani sebesar 294 A pada kondisi normal. Berdasarkan analisis aliran daya, saat terjadi gangguan pada salah satu saluran (saluran 1), menyebabkan saluran yang lain (saluran 2) menanggung beban sebesar 473 A. Kemampuan hantar arus saluran transmisi tersebut adalah 1,2 kA untuk jenis penghantar ACSR240/40. Dengan demikian saluran 2 mengalami pembebanan sebesar  $473/1200 \times 100\% = 39,41\%$ . Tingkat pembebanan tersebut jauh lebih kecil dari setelan relai arus lebih yang besarnya  $1,25 \times 1200 = 1500$  A. Dengan demikian tingkat pembebanan pada saluran transmisi tersebut tidak mengakibatkan beban lebih pada saluran lainnya pada saat terjadi gangguan.

#### 4. Identifikasi Elemen Sistem yang Lemah

Permasalahan di sisi barat adalah: terdapat beberapa saluran transmisi yang mengalami pembebanan kritis, yang pembebanannya diatas 50%. Saluran transmisi yang pembebanannya diatas 50% adalah saluran transmisi : (1) Krapyak-Randugarut, (2) Randugarut-Kaliwungu, (3) Kaliwungu-Weleri, (4) Weleri-Batang, dan (5) Batang-Pekalongan. Saluran transmisi tersebut terhubung secara radial dengan jarak yang cukup panjang dan belum ada koneksi yang membentuk *loop*. Pada saat sistem dalam keadaan kontingensi 1, yaitu terlepasnya salah satu saluran transmisi Weleri-Batang, terdapat beberapa bus yang tegangannya melanggar batasan yang ditentukan. Bus-bus yang tegangannya melanggar batas yang ditetapkan adalah bus Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1.

Permasalahan di sisi timur adalah pada saat sistem dalam keadaan kontingensi 2, yaitu terlepasnya salah satu saluran transmisi Sayung-Kudus, terdapat beberapa bus yang tegangannya melanggar batasan yang ditentukan. Bus-bus yang tegangannya melanggar batas yang ditetapkan adalah: Cepu, Blora, Rembang, Pati, Jepara, dan Tanjungjati.

## 5. Perbaikan Sistem

Untuk mengatasi permasalahan di sisi barat dilakukan dengan menambah instalasi saluran transmisi baru yang menghubungkan Ungaran dengan Weleri, dan Krpyak dengan Weleri yang memotong Ungaran-Krpyak, serta Weleri-Pekalongan. Panjang saluran transmisi antara Ungaran-Weleri adalah 51 km, sedang panjang saluran Krpyak-Weleri adalah 41 km. Jarak antara Weleri-Pekalongan adalah 47,30 km.

Dengan pemasangan instalasi saluran transmisi baru tersebut pembebanan pada saluran transmisi yang ada sebagian dialihkan ke saluran transmisi yang baru dengan demikian beban pada saluran transmisi yang lama berkurang. Disamping itu, dengan pemasangan instalasi transmisi baru tersebut jaringan antara bus Krpyak sampai Pekalongan menjadi terhubung secara *loop* tidak lagi radial sehingga akan meningkatkan keandalan sistem. Permasalahan rendahnya tegangan pada bus Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1 juga dapat teratasi dengan pemasangan instalasi baru tersebut karena pasokan daya untuk bus-bus tersebut akan lebih dekat karena ada koneksi antara bus Ungaran dengan bus Weleri sehingga tegangan pada bus Weleri, Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1 akan meningkat.

Permasalahan bagian timur adalah terjadi penurunan tegangan pada sejumlah bus di ujung bagian timur sistem, yaitu bus Cepu, Blora, Rembang, Pati, Jepara dan Tanjungjati. Penurunan tegangan tersebut akibat kekurangan pasokan daya reaktif pada ujung sistem tersebut, karena jaraknya yang jauh dari sumber daya reaktif. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dipasang satu unit kapasitor 25 MVAR untuk memasok daya reaktif pada sistem. Pemasangan kapasitor tersebut dipilih pada bus yang berada di tengah dari keenam bus yang mengalami permasalahan tegangan rendah tersebut agar dampak dari pemasangan kapasitor tersebut dirasakan pengaruhnya oleh keenam bus tersebut. Pemasangan kapasitor dilakukan di bus Kudus yang letaknya di tengah dari keenam bus tersebut. Dengan pemasangan kapasitor tersebut diharapkan tegangan bus disekitar pemasangan kapasitor tersebut dapat meningkat.

## 6. Pengujian Efektifitas Perbaikan Sistem

Hasil pengujian yang telah dilakukan dengan analisis aliran daya pada sistem yang telah diperbaiki baik pada kondisi normal maupun kondisi kontingensi 1 dan kontingensi 2 menunjukkan bahwa perbaikan sistem yang dilakukan berhasil memperbaiki kelemahan sistem yang ada. Hal tersebut ditunjukkan oleh: (1) setelah sistem diperbaiki tidak terdapat tegangan bus yang melanggar batasan operasi baik itu pada keadaan normal, keadaan kontingensi 1 maupun pada keadaan kontingensi 2, (2) perbaikan sistem telah berhasil mengatasi pembebanan kritis pada saluran transmisi. Dengan demikian kriteria keandalan keamanan N-1 terpenuhi, yaitu pada keadaan kontingensi (N-1), tidak ada besaran-besaran sistem yang melanggar batas operasi yang ditetapkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbaikan sistem yang dilakukan adalah efektif.

## I. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kontingensi 1 dengan lepasnya saluran transmisi yang menghubungkan antara bus Weleri dan bus Batang menyebabkan penurunan tegangan yang melanggar batas bawah operasi yang ditetapkan sebesar 135 kV pada bus Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, dan Bumiayu 1, sedang perubahan arus pada saluran transmisi tidak menyebabkan pembebanan lebih pada sistem tenaga listrik tersebut. Kontingensi 2 dengan lepasnya

saluran transmisi yang menghubungkan antara bus Sayung dan bus Kudus menyebabkan penurunan tegangan yang melanggar batas bawah operasi yang ditetapkan sebesar 135 kV pada bus Cepu, Blora, Rembang, Pati, Jepara, dan Tanjungjati, sedang perubahan arus pada saluran transmisi tidak menyebabkan pembebanan lebih pada sistem tenaga listrik tersebut.

2. Terdapat beberapa saluran transmisi yang pembebanannya kritis diatas 50%, yaitu saluran Krpyak-Randugarut, Randugarut-Kaliwungu, Kaliwungu-Weleri, Weleri-Batang, dan Batang-Pekalongan, saluran transmisi tersebut terhubung secara radial;
3. Terdapat beberapa bus yang melanggar batas bawah operasi saat terjadi kontingensi 1 dan 2, yaitu bus: Batang, Pekalongan, Pemalang, Kebasen 1, Bumiayu 1, Cepu, Blora, Rembang, Pati, Jepara, dan Tanjungjati.
4. Upaya yang dilakukan untuk memperbaiki keandalan dan mengatasi kelemahan sistem adalah dengan: (1) menambah instalasi saluran transmisi baru Ungaran-Weleri dan Krpyak-Weleri yang memotong Ungaran-Krpyak, serta Weleri-Pekalongan, (2) menambah pemasangan kapasitor sebesar 25 MVAR di bus Kudus. Upaya perbaikan yang dilakukan adalah sangat efektif karena kriteria keandalan keamanan N-1 terpenuhi. Perbaikan sistem yang dilakukan dapat mengatasi kelemahan sistem, yaitu dapat menurunkan pembebanan saluran transmisi yang kritis dan meningkatkan tegangan bus yang melewati batas bawah operasi.

#### J. SARAN

1. Hasil penelitian ini hendaknya dapat dipergunakan sebagai masukan PT. PLN untuk mengembangkan sistem dalam rangka meningkatkan keandalan subsistem tenaga listrik 150 kV Jawa Tengah dan DIY.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengevaluasi sistem tenaga listrik secara menyeluruh dengan melibatkan seluruh kemungkinan kontingensi yang terjadi baik kontingensi (N-1), kontingensi (N-2), dan kontingensi pada bus. Disamping itu juga memperhatikan aspek stabilitas dengan melihat respon sistem akibat terjadinya keadaan kontingensi. Dengan demikian dapat diperoleh informasi yang menyeluruh dan lengkap yang dapat dipergunakan untuk pengembangan dan perbaikan keandalan sistem.
3. Perlunya dilakukan perencanaan operasi sistem tenaga listrik secara terus-menerus sebagai antisipasi terhadap perkembangan beban dan perkembangan konfigurasi jaringan transmisi dalam rangka meningkatkan keamanan dan keandalan sistem tenaga listrik.

#### K. DAFTAR PUSTAKA

- Alvarado, Fernando. dan Oren, Shmuel. 2004. *Transmission System Operation and Interconnection*. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
- Brown, Ryan. (ed). 2004. *Reliability Enhancement of The Avista Electric Power System*. Gonzaga University, Spokane.
- Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral. 2004. *Aturan Jaringan Jawa-Madura-Bali*. Jakarta.
- Grainger, John J. dan Stevenson, William D.. 1998. *Power System Analysis*. McGraw-Hill International Edition, Singapore.
- Kim, Hyungchul. 2003. *Evaluation of Power System Security and Development of Transmission Price Method*. A Dissertation, Texas A&M University.
- Marsudi, Djiteng. 1990. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Balai Penerbit dan Humas ISTN, Jakarta.

- 
- PLN. 2005. *Laporan Tahunan PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Tengah dan DIY*. P3B Region Jawa Tengah dan DIY.
- Pottonen, Liisa. 2005. *A Method for The Probabilistic Security Analysis of Transmission Grid*. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology.
- Yeu, Rodney. 2005. *Post-Contingency Equilibrium Analysis*. IEEE Toronto Centennial Forum on Reliable Power Grids in Canada.