

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian dan Analisis Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis mikrokontroler Arduino Uno R3 dalam melakukan perpindahan sumber listrik antara PLN dan genset secara otomatis. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi operasional, yaitu kondisi PLN normal, PLN padam, proses starter genset, perpindahan sumber, serta pengujian sistem proteksi tegangan.

Hasil pengujian sistem ditunjukkan pada tabel-tabel berikut:

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sistem ATS

NO	Kondisi Sistem	Tegangan Input LCD/Multimeter	Respon Sistem	Hasil
1	PLN Normal	210/209V	PLN Menyuplai Beban	Berhasil
2	PLN Padam	0/0V	Genset Start Otomatis	Berhasil
3	Genset Stabil	225/229V	Beban Pindah ke Genset	Berhasil
4	PLN Kembali Normal	222/208V	Beban pindah ke PLN	Berhasil
5	Tegangan Tidak Stabil	<198V / > 240V	Sistem Proteksi Aktif	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4.2, pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis mikrokontroler Arduino pada berbagai kondisi operasi. Pada kondisi pertama, saat tegangan PLN berada pada nilai normal sebesar 210 V pada LCD dan 209 V pada multimeter, sistem bekerja dengan baik dimana sumber PLN langsung menyuplai beban.

Pada kondisi kedua, ketika terjadi pemadaman PLN dan tegangan input terbaca 0 V, sistem berhasil mendeteksi hilangnya sumber tegangan dan secara otomatis memberikan perintah untuk menghidupkan genset (genset start otomatis).

Setelah genset berhasil menyala dan menghasilkan tegangan yang stabil sebesar 225 V pada LCD dan 229 V pada multimeter, sistem kemudian memindahkan suplai beban dari PLN ke genset. Hal ini menunjukkan bahwa proses transfer sumber daya dapat berjalan sesuai dengan program yang telah dirancang.

Pengujian berikutnya dilakukan ketika sumber PLN kembali normal dengan tegangan sebesar 222 V pada LCD dan 208 V pada multimeter. Sistem mampu mendeteksi kembalinya sumber PLN dan secara otomatis memindahkan kembali beban dari genset ke PLN.

Selain itu, dilakukan pengujian proteksi tegangan dengan memberikan kondisi tegangan di bawah 198 V dan di atas 240 V. Pada kondisi tersebut, sistem proteksi bekerja dengan baik sehingga dapat mencegah pengoperasian sistem pada tegangan yang tidak sesuai dengan batas yang telah ditentukan.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem ATS berbasis mikrokontroler Arduino yang dirancang telah bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan, yaitu mampu melakukan perpindahan sumber listrik secara otomatis serta memberikan proteksi terhadap kondisi tegangan yang tidak normal.

Tabel 4. 2 Pengujian Tegangan PLN dengan Sensor ZMPT101B

NO	Waktu	Tegangan PLN (V)	Kondisi Sensor	Status Arduino	Relay PLN	Keterangan
1	16.24	226V	Normal	Stable	ON	PLN Normal
2	16.26	211V	Normal	Stable	ON	Beban disuplai PLN
3	16.39	194V	Under Voltage	Warning	OFF	PLN Tidak Stabil
4	16.40	0V	Zero	Starting Genset	OFF	PLN Padam
5	16.46	249V	High Voltage	Warning	OFF	PLN Tidak Stabil

Berdasarkan Tabel 4.3, pengujian tegangan PLN dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dan mikrokontroler Arduino dalam mendeteksi kondisi tegangan masukan serta memberikan respon sesuai program yang telah dirancang.

Pada pengujian pertama pukul 16.24, tegangan PLN terbaca sebesar 226 V. Nilai tersebut masih berada pada rentang tegangan normal sehingga sensor mendeteksi kondisi normal, Arduino berada pada status stable, dan relay PLN dalam keadaan ON. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber PLN dapat digunakan untuk menyuplai beban.

Pengujian kedua pada pukul 16.26 menunjukkan tegangan sebesar 211 V. Tegangan ini juga masih berada pada batas operasi normal sehingga Arduino tetap berada pada status stable dan relay PLN tetap ON. Dengan demikian, beban masih disuplai oleh sumber PLN.

Pada pengujian ketiga pukul 16.39, tegangan PLN turun menjadi 194 V. Nilai tersebut berada di bawah batas minimum yang telah ditentukan, sehingga sistem mendeteksi kondisi under voltage. Arduino memberikan status warning dan relay PLN berubah menjadi OFF sebagai bentuk proteksi terhadap tegangan rendah yang dapat membahayakan peralatan.

Pengujian keempat dilakukan saat sumber PLN padam dengan tegangan terbaca 0 V. Sensor mendeteksi kondisi zero voltage, Arduino berada pada status starting genset untuk menyalakan genset, dan relay PLN juga OFF. Pada kondisi ini sistem akan menjalankan proses perpindahan ke sumber cadangan, yaitu genset.

Selanjutnya, pada pengujian kelima pukul 16.46, tegangan PLN meningkat hingga 249 V. Tegangan tersebut melebihi batas maksimum yang telah ditentukan sehingga sistem mendeteksi kondisi high voltage. Arduino memberikan status warning dan relay PLN tetap OFF untuk mencegah beban menerima tegangan yang terlalu tinggi.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sensor tegangan ZMPT101B dan program proteksi pada Arduino telah bekerja dengan baik dalam mendeteksi kondisi tegangan normal, tegangan rendah, tegangan tinggi, maupun pemadaman PLN, sehingga sistem ATS dapat memberikan respon yang sesuai untuk menjaga keamanan dan keandalan sistem.

Tabel 4. 3 Pengujian Tegangan Genset dengan Sensor ZMPT101B

NO	Waktu	Tegangan Genset (V)	Kondisi Sensor	Status Arduino	Relay Genset	Keterangan
1	18:10	220V	Normal	Stable	ON	Genset Normal
2	18:11	223V	Normal	Stable	ON	Beban disuplai Genset
3	18:17	198V	Under Voltage	Warning	OFF	Genset Tidak Stabil
4	18:17	0V	Zero	Protection Mode	OFF	Genset Padam
5	18:18	242V	High Voltage	Warning	OFF	Genset Tidak Stabil

Berdasarkan Tabel 4.4, pengujian tegangan genset dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor ZMPT101B dan mikrokontroler Arduino dalam mendeteksi kondisi tegangan keluaran genset serta memberikan respon sesuai dengan program yang telah dirancang.

Pada pengujian pertama pukul 18.10, tegangan genset terbaca sebesar 220 V. Nilai tersebut berada pada rentang tegangan normal sehingga sensor mendeteksi kondisi normal, Arduino berada pada status stable, dan relay dalam keadaan ON. Hal ini menunjukkan bahwa genset dapat digunakan sebagai sumber suplai listrik.

Pengujian kedua pada pukul 18.11 menunjukkan tegangan genset sebesar 223 V. Tegangan tersebut masih berada pada batas operasi normal sehingga Arduino tetap berada pada status stable dan relay tetap ON. Pada kondisi ini, beban berhasil disuplai oleh genset.

Pada pengujian ketiga pukul 18.17, tegangan genset turun menjadi 198 V. Nilai tersebut berada pada batas bawah tegangan yang ditentukan sehingga sistem mendeteksi kondisi under voltage. Arduino memberikan status warning dan relay berubah menjadi OFF sebagai bentuk proteksi untuk mencegah beban menerima tegangan yang tidak stabil.

Pengujian keempat dilakukan ketika genset padam dan tegangan terbaca sebesar 0 V. Sensor mendeteksi kondisi zero voltage, Arduino berada pada status protection mode, dan relay juga OFF. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber genset tidak dapat digunakan untuk menyuplai beban, dan menunggu tegangan pada genset masuk lagi agar program dapat merecovery bahwa genset kembali normal.

Selanjutnya, pada pengujian kelima pukul 18.18, tegangan genset meningkat hingga 242 V. Nilai tersebut melebihi batas maksimum yang telah ditentukan sehingga sistem mendeteksi kondisi high voltage. Arduino memberikan status warning dan relay tetap OFF untuk melindungi beban dari tegangan berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sensor ZMPT101B dan program proteksi pada Arduino telah bekerja dengan baik dalam mendeteksi kondisi tegangan normal, tegangan rendah, tegangan tinggi, maupun kondisi genset padam, sehingga sistem ATS dapat menentukan apakah sumber genset layak digunakan untuk menyuplai beban.

Tabel 4. 4 Pengujian PLN Padam dan Transfer Genset

No	Waktu Padam	Tegangan Genset	Respon Arduino	Relay Starter	Genset	Waktu	Keterangan
1	10:47	0V	Detect loss	OFF	OFF	0 Detik	PLN Mati
2	10:47:05	0V	Start Genset	ON	ON	5 Detik	Starter Aktif
3	10:47:26	222V	Stable	OFF	ON	26 Detik	Genset Hidup dan Normal

Berdasarkan Tabel 4.5, pengujian dilakukan untuk mengetahui respon sistem ATS ketika terjadi pemadaman PLN hingga genset berhasil menyala dan siap digunakan sebagai sumber cadangan.

Pada pengujian pertama pukul 10:47, tegangan genset masih terbaca sebesar 0 V karena sumber PLN baru saja padam dan genset belum dinyalakan. Arduino mendeteksi hilangnya sumber tegangan (detect loss), relay starter masih dalam kondisi OFF, dan genset belum beroperasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem berhasil mendeteksi pemadaman PLN.

Lima detik setelah pemadaman, yaitu pada pukul 10:47:05, Arduino memberikan perintah untuk menghidupkan genset. Relay starter berubah menjadi ON sehingga motor starter genset bekerja untuk menyalakan mesin. Pada tahap ini, genset mulai melakukan proses starting dan kurang dari 2 detik untuk menyalakan genset, namun sistem sensor tegangan masih membaca tegangan genset supaya pada display terbaca bahwasan nya genset telah menyala.

Selanjutnya, pada pukul 10:47:26, genset berhasil menyala dan stabil yang menghasilkan tegangan sebesar 222 V. Arduino mendeteksi bahwa tegangan genset telah berada pada kondisi normal dan stabil, sehingga relay starter kembali OFF karena proses starting telah selesai. Genset tetap berada dalam kondisi ON dan siap digunakan untuk menyuplai beban.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem ATS mampu mendeteksi pemadaman PLN, menjalankan proses starting genset secara otomatis, serta memastikan bahwa genset telah menghasilkan tegangan yang stabil sebelum digunakan sebagai sumber cadangan. Waktu yang dibutuhkan sejak PLN padam hingga genset siap beroperasi adalah sekitar 26 detik.

Tabel 4. 5 Pengujian Transfer Genset ke PLN Kembali Stabil

No	Waktu Menyala	Tegangan PLN	Respon Arduino	Relay Genset	Genset	Waktu	Ket
1	11:01	220V	Switching	OFF	ON	10 Detik	PLN Hidup
2	11:01:10	218V	Stopping Genset	ON	OFF	15 Detik	Genset Mati
3	11:01:21	216V	Stabil	OFF	OFF	21 Dertik	Normal

Berdasarkan Tabel 4.6, pengujian dilakukan untuk mengetahui respon sistem ATS ketika sumber PLN kembali normal setelah sebelumnya beban disuplai oleh genset.

Pada pengujian pertama pukul 11:01, tegangan PLN terbaca sebesar 220 V. Arduino mendeteksi bahwa sumber PLN telah kembali normal dan memasuki proses switching. Pada tahap ini, relay genset berubah menjadi OFF untuk mempersiapkan perpindahan suplai beban dari genset ke PLN, sedangkan genset masih dalam kondisi ON. Proses ini berlangsung selama 10 detik untuk memastikan bahwa tegangan PLN telah stabil dan tidak mengalami gangguan sesaat.

Selanjutnya, pada pukul 11:01:10, tegangan PLN terbaca sebesar 218 V dan Arduino masuk ke tahap stopping genset. Relay genset berubah menjadi ON untuk memberikan perintah penghentian mesin, sehingga genset berhasil dimatikan. Proses penghentian genset berlangsung selama 15 detik setelah PLN kembali normal.

Pada pengujian terakhir pukul 11:01:21, tegangan PLN terbaca sebesar 216 V dan sistem berada pada kondisi stabil. Relay genset dan genset sama-sama dalam keadaan OFF, yang menunjukkan bahwa proses perpindahan sumber telah selesai dan beban kembali disuplai oleh sumber PLN secara normal.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem ATS mampu mendeteksi kembalinya tegangan PLN, melakukan perpindahan beban dari genset ke PLN secara otomatis, serta mematikan genset setelah memastikan bahwa sumber PLN telah berada pada kondisi stabil. Waktu yang dibutuhkan sejak PLN kembali normal hingga sistem kembali pada kondisi operasi normal adalah sekitar 21 detik.

Tabel 4. 6 Pengujian Sistem Proteksi Tegangan

No	Tegangan (V)	Jenis Tegangan	Jenis Gangguan	LCD Status	Ket
1	242V	Genset	Over Voltage	!GEN TRIP! OVER VOLTAGE	Protection Mode, Wait Stable
2	198V	Genset	Under Voltage	!GEN TRIP! UNDER VOLTAGE	Protection Mode, Wait Stable
3	0V	Genset	Drop Voltage	!GEN TRIP! UNSTABLE	Protection Mode, Wait Stable

Berdasarkan hasil pengujian sistem proteksi tegangan pada *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis Arduino Uno R3, dilakukan simulasi beberapa kondisi gangguan tegangan untuk mengetahui respon sistem terhadap kondisi abnormal pada sumber listrik genset.

Pada kondisi pertama, tegangan sebesar 242 V terdeteksi sebagai over voltage. Sistem kemudian mengaktifkan mode proteksi dengan menampilkan status pada LCD “!GEN TRIP! OVER VOLTAGE”. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berhasil mendeteksi tegangan yang melebihi batas aman kerja dan secara otomatis masuk ke mode proteksi untuk mencegah kerusakan peralatan.

Pada kondisi kedua, tegangan sebesar 198 V terdeteksi sebagai under voltage. Sistem kembali merespon dengan mengaktifkan proteksi dan menampilkan status “!GEN TRIP! UNDER VOLTAGE”. Kondisi ini menunjukkan bahwa tegangan berada di bawah batas normal operasi sehingga sistem melakukan pengamanan dengan menghentikan suplai dari genset.

Sementara pada kondisi ketiga, tegangan 0 V terdeteksi sebagai drop voltage atau kondisi tidak stabil (*unstable*). Sistem merespon dengan status “!GEN TRIP! UNSTABLE”, yang menandakan tidak adanya suplai tegangan dari genset sehingga sistem masuk ke mode proteksi penuh.

Selanjutnya, pada seluruh kondisi gangguan tersebut, ketika tegangan kembali normal dan stabil, sistem akan melakukan proses pemulihan (*recovery*). Pada tahap ini, LCD akan menampilkan status “GEN: CHEK” selama 2 detik sebagai indikator bahwa sistem sedang melakukan pengecekan ulang kondisi tegangan. Setelah itu, display akan menampilkan pesan “GEN RECOVERED ready to use” yang menandakan bahwa kondisi genset telah kembali normal dan siap digunakan kembali dalam sistem ATS.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem proteksi tegangan pada ATS berbasis Arduino Uno R3 bekerja dengan baik dalam mendeteksi berbagai kondisi gangguan tegangan, baik over voltage, under voltage, maupun kehilangan tegangan total. Sistem juga mampu menampilkan status gangguan secara real-time pada LCD serta mengaktifkan mode proteksi untuk menjaga keamanan beban listrik.

Tabel 4. 7 Pengujian Delay Sistem

No	Jenis Delay	Set Delay (Detik)	Hasil Aktual (Detik)	Selisih	Keterangan
1	Start Genset	15 Detik	18.92 Detik	3.92 Detik	Sesuai
2	Transfer PLN	7 Detik	8.40 Detik	1.40 Detik	Sesuai
3	Stop Genset	5 Detik	5.03 Detik	0.03 Detik	Sesuai

Berdasarkan hasil pengujian delay pada sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis Arduino Uno R3, dilakukan pengukuran terhadap tiga proses utama yaitu start genset, transfer ke PLN, dan stop genset. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi waktu tunda (delay) yang telah diprogram dibandingkan dengan waktu aktual yang terjadi pada sistem.

Pada proses start genset, set delay yang ditentukan pada display adalah 5 detik, namun pada program saya mengatur di setiap perpindahan detik, di ubah menjadi 3 detik, yang membuat per 1 detik nya di hitung 3 detik, yang membuat total 5 detik pada display menghasilka 15 detik real time, namun hasil pengukuran menunjukkan waktu aktual sebesar 18,92 detik dengan selisih 3,92 detik. Selisih ini terjadi karena adanya jeda perpindahan pada kalimat diplay dan respons mekanik dari sistem starter genset serta delay eksekusi relay.

Pada proses transfer PLN, set delay sebesar 7 detik menghasilkan waktu aktual 8,40 detik dengan selisih 1,40 detik. Perbedaan ini dipengaruhi oleh proses switching kontaktor yang tidak langsung bekerja secara ideal serta adanya waktu respon dari sistem kontrol.

Sementara itu, pada proses stop genset, set delay 5 detik menghasilkan waktu aktual 5,03 detik dengan selisih yang sangat kecil yaitu 0,03 detik. Hal ini menunjukkan bahwa proses penghentian genset memiliki tingkat kestabilan yang paling baik dibandingkan proses lainnya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ATS bekerja dengan cukup baik, dimana seluruh proses delay masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi kontrol otomatis. Perbedaan waktu

yang terjadi dipengaruhi oleh faktor mekanis relay, kontaktor, serta respon sistem elektronik secara keseluruhan.

Tabel 4. 8 Pengujian Ketahanan Baterai pada Mini-UPS

No	Percobaan	Waktu Start	Waktu Stop	Waktu Ketahanan
1	Percobaan 1	05.20	17.00-19.21	12 Jam – 14 Jam
2	Percobaan 2	20:03	23:23	3 Jam 20 Menit
3	Percobaan 3	2.30	4.49	2 Jam 56 Menit
4	Percobaan 4	6.28	9.26	2 Jam 15 Menit

Berdasarkan Tabel 4.8, pengujian ketahanan baterai pada Mini-UPS dilakukan sebanyak tiga kali percobaan dengan waktu pengisian (charging) baterai selama 1 jam 30 menit sebelum setiap pengujian. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan Mini-UPS dalam menyuplai daya ke sistem ATS dan proteksi tegangan saat sumber daya utama tidak tersedia.

Pada percobaan pertama, panel hanya berada pada kondisi standby tanpa adanya proses perpindahan sumber listrik. Pada kondisi ini, beban yang ditanggung oleh Mini-UPS relatif kecil sehingga baterai mampu bertahan selama 3 jam 20 menit, yaitu dari pukul 20.03 WIB hingga 23.23 WIB.

Pada percobaan kedua dan ketiga, selain menyuplai daya ke sistem, Mini-UPS juga digunakan untuk menguji proses perpindahan antara sumber PLN dan genset. Pengujian tersebut menyebabkan relay dan beberapa komponen kontrol bekerja lebih sering, sehingga konsumsi daya meningkat. Akibatnya, waktu ketahanan baterai menjadi lebih singkat, yaitu 2 jam 56 menit pada percobaan kedua dan 2 jam 15 menit pada percobaan ketiga.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa lama ketahanan baterai Mini-UPS dipengaruhi oleh kondisi operasi sistem dan besarnya konsumsi daya. Semakin banyak komponen yang aktif dan semakin sering relay bekerja selama proses pengujian, maka semakin besar energi yang digunakan sehingga waktu ketahanan baterai menjadi lebih pendek.

4.2 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan seluruh hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) berbasis Arduino Uno R3 mampu bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang. Sistem berhasil mendeteksi kondisi tegangan PLN dan genset, melakukan perpindahan sumber listrik secara otomatis, serta mengaktifkan sistem proteksi ketika terjadi gangguan tegangan.

Hasil pengujian delay menunjukkan adanya perbedaan antara waktu yang diprogram dengan waktu aktual. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh waktu respon relay, kontaktor, dan proses stabilisasi tegangan genset. Meskipun demikian, selisih waktu yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga tidak mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

Pada pengujian ketahanan Mini-UPS, waktu operasi baterai berbeda pada setiap percobaan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kondisi beban, dimana pada percobaan kedua dan ketiga sistem juga melakukan pengujian perpindahan antara PLN dan genset sehingga relay dan komponen kontrol bekerja lebih sering dan menyebabkan konsumsi daya meningkat.

Secara keseluruhan, sistem ATS dan proteksi tegangan berbasis Arduino Uno R3 yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu mampu melakukan perpindahan sumber listrik secara otomatis, memberikan proteksi terhadap gangguan tegangan, serta mempertahankan operasi sistem melalui Mini-UPS ketika terjadi gangguan pada sumber daya utama.