

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

4.1 Pengujian Karakteristik Piezoelektrik

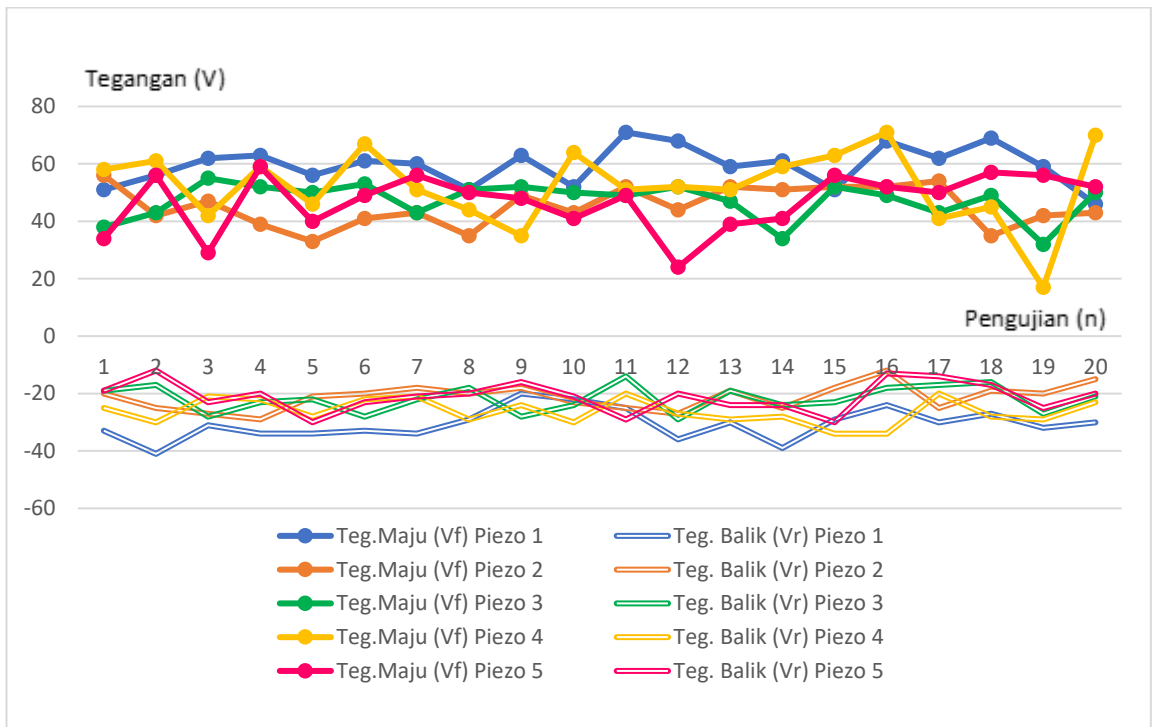
Pengujian karakteristik dilakukan untuk mendapatkan data karakteristik elemen piezoelektrik serta simulator yang digunakan pada pengujian selanjutnya. Adapun pengambilan data karakteristik tersebut adalah sebagai berikut:

4.1.1 Pengujian Karakteristik Elemen Piezoelektrik

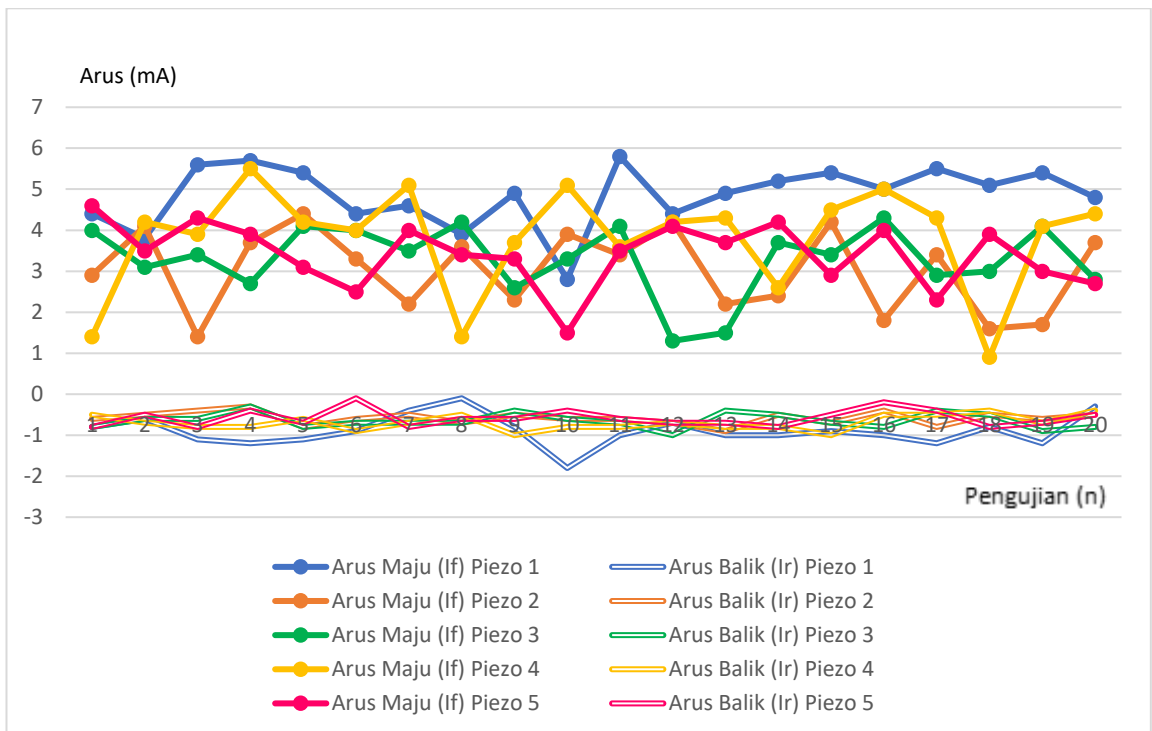


Gambar 4.1 Desain Panel Piezoelektrik yang Dipasang pada Anak Tangga Penghasil Listrik

Pada pengujian ini diambil 5 buah sampel elemen piezoelektrik PZT diameter 3,5 mm yang dipasang pada dudukan busa ati dan papan triplex seperti nampak pada gambar 4.1 diatas. Bagian penekan berupa busa putih dan busa ati digunakan pada pembuatan panel anak tangga piezoelektrik. Sehingga pada pengujian ini dilakukan dengan memberikan tekanan menggunakan jari tangan secara langsung pada bagian tengah elemen piezoelektrik. Tekanan diberikan sebanyak 20 kali untuk tiap elemen yang diuji agar variasi data didapatkan serta data yang didapat tersebut lebih akurat. Hasil pengujian nampak pada gambar 4.2 dan gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.2 Grafik Pengujian Tegangan 5 Buah Sampel Elemen Piezoelektrik



Gambar 4.3 Grafik Pengujian Arus 5 Buah Sampel Elemen Piezoelektrik

Sesuai dengan landasan teori, yaitu menghasilkan beda potensial listrik saat terjadi *displacement* atau perubahan tekanan. Dari data pengujian tersebut, didapatkan adanya tegangan maju, tegangan balik, arus maju dan arus balik saat elemen piezoelektrik ditekan. Data pengujian 5 sampel tersebut kemudian dijumlahkan dan dirata-rata untuk karakteristik umum elemen piezoelektrik yang digunakan dalam penelitian ini. Rata-rata tegangan yang dihasilkan oleh 5 sampel tersebut untuk tegangan maju sebesar 50,23 V-peak dengan arus maju 3,682 mA sehingga daya yang dihasilkan sebesar 185,28 mW tiap elemen. Sedangkan untuk tegangan dan arus balik sebesar -24,21 V-peak dan -0,68 mA. Adapun data rata-rata pengujian 5 buah sampel piezoelektrik disajikan dalam tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Rata-rata Pengujian 5 Buah Sampel Piezoelektrik

Sampel Elemen Piezoelektrik		Tegangan Maju (V)	Tegangan Balik (V)	Arus Maju (mA)	Arus Balik (mA)
1	Rata-rata	59,45	-30,65	4,85	-0,895
	Maks	71	-20	5,8	-0,1
	Min	46	-41	2,8	-1,8
2	Rata-rata	45,25	-21,3	3,02	-0,585
	Maks	56	-12	4,4	-0,3
	Min	33	-29	1,4	-0,9
3	Rata-rata	47,2	-21,85	3,3	-0,645
	Maks	55	-14	4,3	-0,3
	Min	32	-29	1,3	-1
4	Rata-rata	52,35	-26,2	3,82	-0,695
	Maks	71	-20	5,5	-0,4
	Min	17	-34	0,9	-1
5	Rata-rata	46,9	-21,05	3,42	-0,58
	Maks	59	-12	4,6	-0,1
	Min	24	-30	1,5	-0,8
Rata-rata Total		50,23	-24,21	3,682	-0,68

4.1.2 Pengujian Karakteristik Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik



Gambar 4.4 Panel Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik

Pengujian ini dilakukan untuk mendapat data karakteristik panel simulator mini yang berisi 15 elemen piezoelektrik yang diparalel. Sesuai dengan prinsip seri-paralel sebuah rangkaian listrik, jika sebuah sumber listrik dipasang secara serial maka nilai tegangan total adalah penjumlahan dari sumber tegangan yang terpasang, sedangkan nilai arusnya sama. Jika dipasang secara paralel maka nilai arus total adalah penjumlahan dari arus yang dihasilkan masing-masing sumber listrik yang terpasang, sedangkan nilai tegangan total sama dengan nilai sebuah sumber listrik yang terpasang. Dilakukan perhitungan sederhana dari karakteristik umum tegangan dan arus yang dihasilkan tiap elemen piezoelektrik seperti di bawah ini:

$$\text{Tegangan Piezo} = 50,23 \text{ V-peak}$$

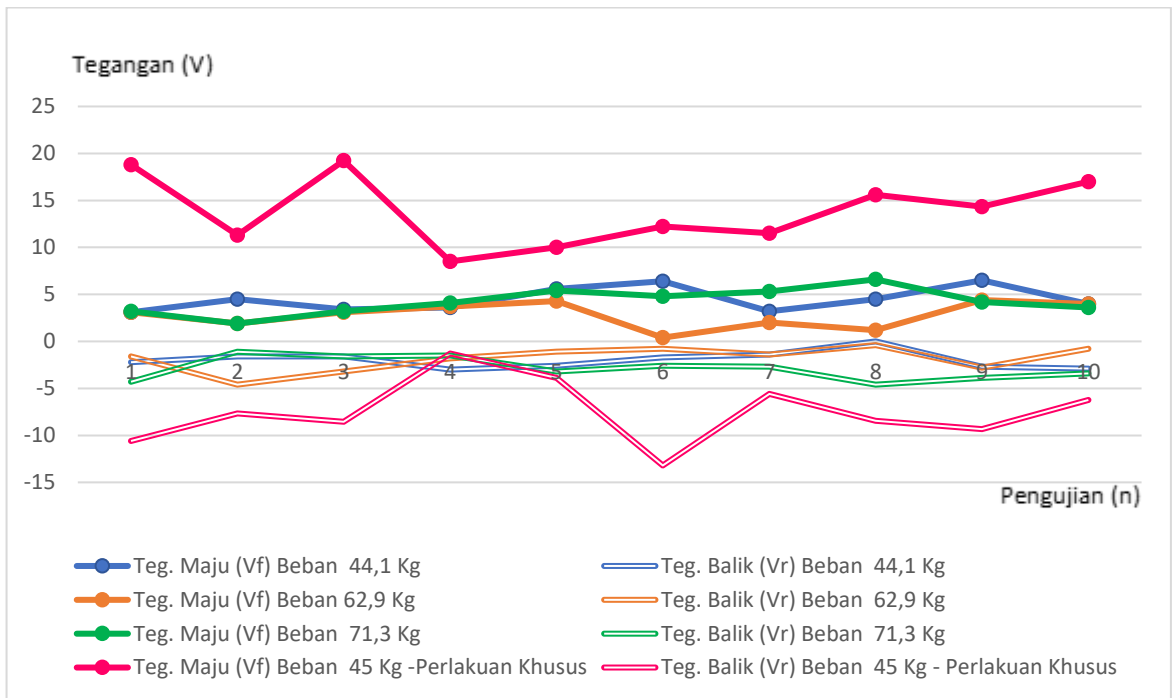
$$\text{Arus Piezo} = 3,682 \text{ mA}$$

Sehingga, jika diparalel akan menghasilkan tegangan total sebesar 50,23 V-*peak* dan Arus total sebesar $15 \times 3,682 \text{ mA} = 55,23 \text{ mA}$.

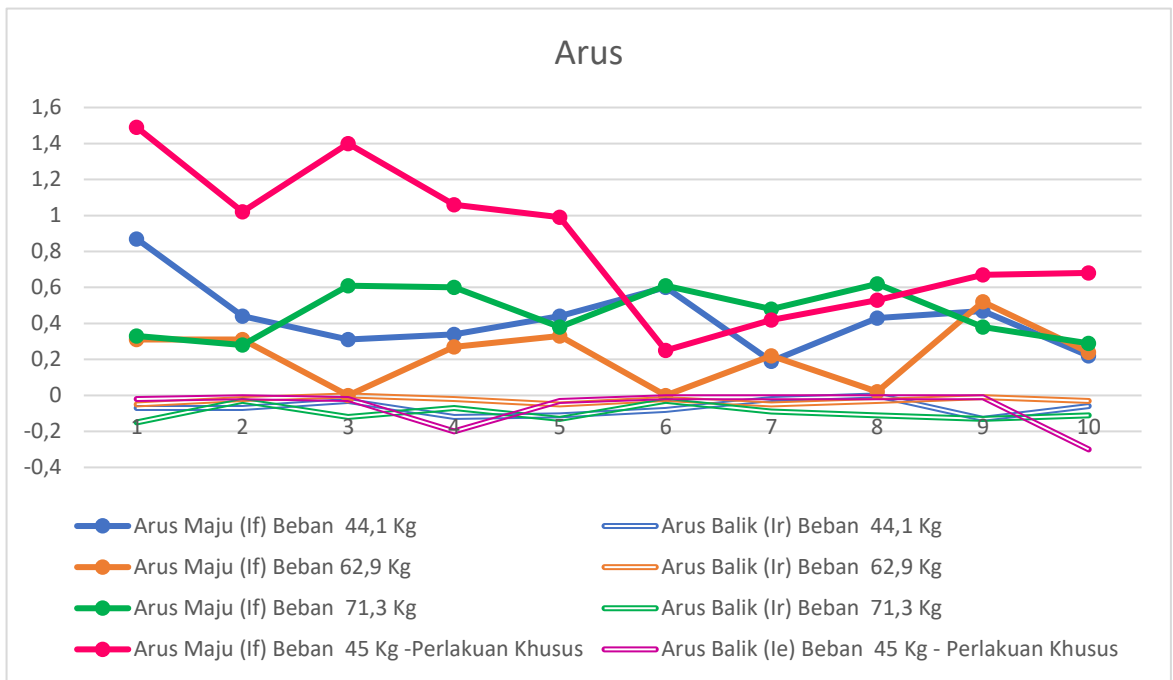
Perhitungan sederhana diatas kemudian dibandingkan dengan data *real* atau data pengukuran yang disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.6 dan gambar 4.7. Pengujian dilakukan menggunakan beban berupa berat badan yang berbeda kemudian panel mini tersebut diinjak sebanyak 10 kali untuk mendapat variasi data karakteristik secara *real*. Pengukuran menggunakan 2 buah multimeter, difungsikan sebagai voltmeter dan ampere-meter sehingga dapat mengamati nilai arus dan tegangan secara bersamaan pada saat pengukuran seperti nampak pada gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 Pengujian Panel Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik dengan 2 Buah Multimeter



Gambar 4.6 Grafik Data Pengukuran Tegangan Panel Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik



Gambar 4.7 Grafik Data Pengukuran Arus Panel Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik

Dari pengujian yang dilakukan, nilai tegangan dan arus yang dihasilkan panel simulator mini tersebut sangat jauh dari nilai perhitungan. Seperti yang tertera pada tabel 4.2, nilai tegangan rata-rata tertinggi yaitu pada beban 44,1 kg hanya sebesar 4,48 Volt. Sedangkan arus rata-rata tertinggi juga pada beban 44,1 kg yang hanya sebesar 0,431 mA. Sedangkan untuk perbedaan beban yang diberikan nilai keluaran tegangan dan arus sedikit mengalami peningkatan jika beban semakin bertambah.

Tabel 4.2 Rata-rata Pengujian Panel Simulator Mini Paralel 15 Piezoelektrik

Beban (Berat Badan)	Tegangan Maju (V)	Tegangan Balik (V)	Arus Maju (mA)	Arus Balik (mA)
44,1 Kg	4,48	-1,97	0,431	-0,069
62,9 Kg	2,81	-1,85	0,222	-0,028
71,3 Kg	4,23	-2,89	0,458	-0,097
45 Kg (Perlakuan Khusus)	13,856	-7,478	0,851	-0,062

Terlalu rendahnya nilai arus dan tegangan yang dihasilkan panel simulator mini ini terjadi karena faktor titik jatuh beban pada saat menginjak panel di mana tidak semua elemen rata menerima beban. Selain itu, sifat tegangan dan arus saat terkena tekanan tidak sama sehingga tegangan dan arus yang dihasilkan adalah selisih dari perbedaan sifat tegangan dan arus elemen piezoelektrik pada panel. Pengaruh resistansi komponen elektronik didalam kedua alat ukur juga membuat terjadinya penurunan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan simulator mini tersebut. Sehingga dilakukan pengukuran hanya dengan sebuah multimeter yang bergantian difungsikan sebagai pengukur tegangan kemudian mengukur arus.



Gambar 4.8 Pengujian Panel Simulator Mini dengan 1 Buah Multimeter

Hasil dari pengukuran dengan sebuah multimeter pada gambar 4.8 menunjukkan peningkatan nilai tegangan serta arus simulator mini. Hal ini membuktikan bahwa resistansi yang terdapat pada alat ukur mempengaruhi nilai pengukuran simulator mini. Karena digunakan 2 buah maka nilai resistansi juga semakin besar sedangkan arus yang dihasilkan kecil. Sehingga diketahui bahwa keluaran piezoelektrik sangat sensitif terhadap besar resistansi beban dan alat ukur yang terpasang.

4.1.3 Pengujian Karakteristik Simulator Tangga Penghasil Listrik



Gambar 4.9 Simulator Tangga Penghasil Listrik

Simulator tangga penghasil listrik yang nampak pada gambar 4.9 terdiri atas 40 buah piezoelektrik yang diparalel pada tiap buah anak tangganya dengan desain lapisan yang dapat diamati pada gambar 4.1 dan 4.10. Pada simulator tersebut terdapat LED-strip 12 Vdc untuk menguji serta membuktikan simulator tangga tersebut dapat menghasilkan listrik. Terdapat juga box panel yang berisi aki dan inverter DC-AC namun pada laporan tugas akhir ini tidak dijelaskan penggunaan kedua komponen tersebut.



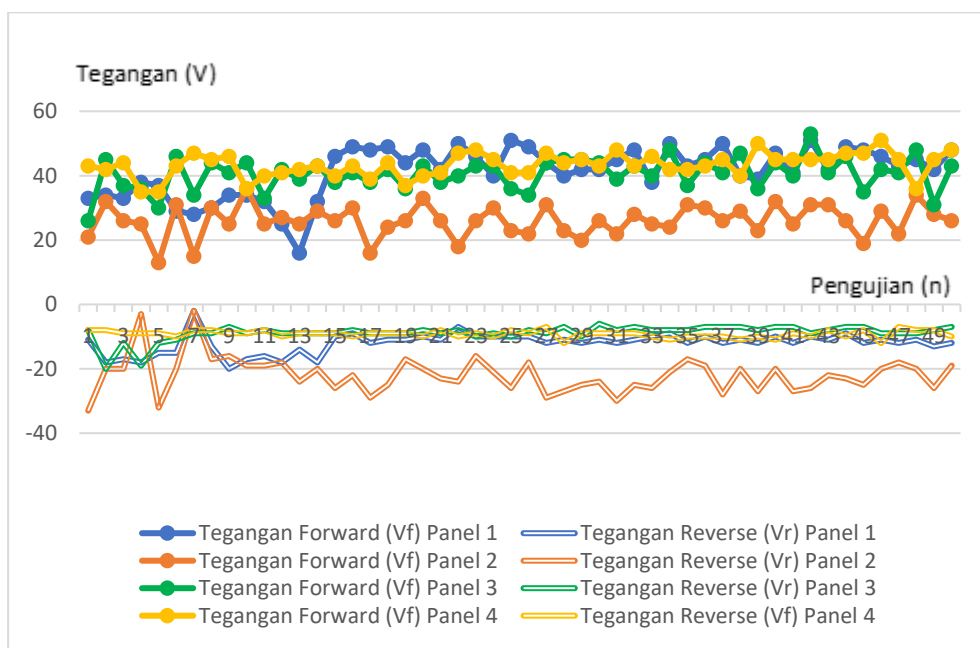
Gambar 4.10 Simulator Tangga Penghasil Listrik Nampak Bagian Dalam

Pada pengujian karakteristik simulator tangga ini diberikan beban sebesar ± 70 Kg menggunakan berat badan manusia atau rata-rata berat badan orang dewasa di Indonesia. Pengujian tersebut dilakukan dengan menguji keluaran tegangan dan arus tiap panel anak tangga tersebut. Tiap anak tangga diinjak sebanyak 50 kali (naik dan turun tangga) untuk mendapatkan data keluaran tegangan dan arusnya dalam kondisi tanpa beban. Sebelumnya dilakukan juga perhitungan sederhana menggunakan karakteristik umum tegangan dan arus yang dihasilkan tiap elemen piezoelektrik seperti di bawah ini:

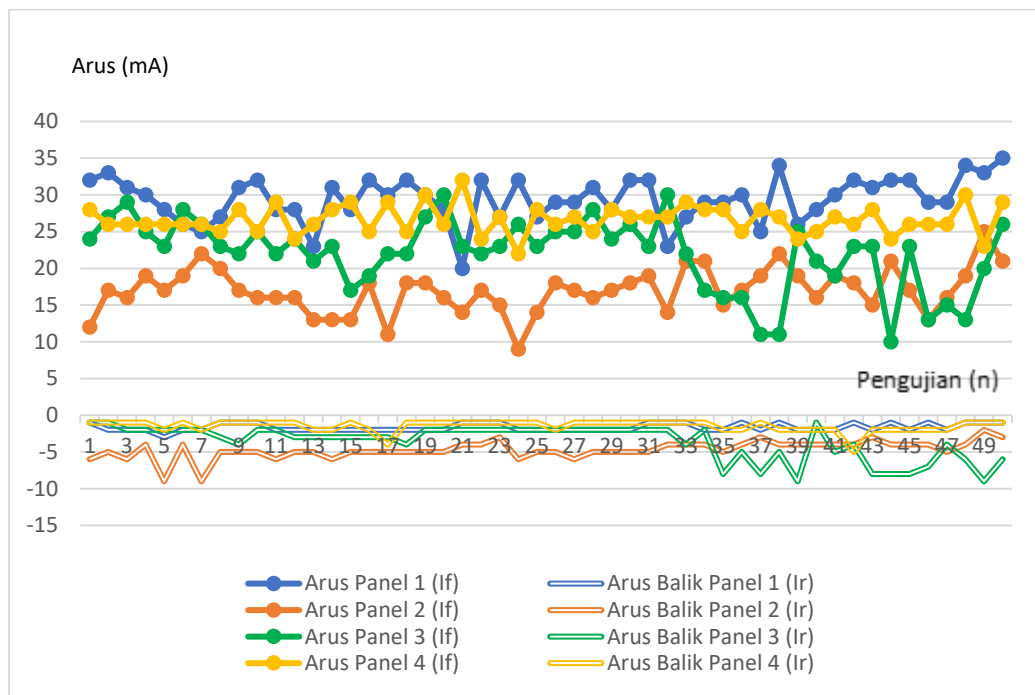
$$\text{Tegangan Piezo} = 50,23 \text{ V-peak}$$

$$\text{Arus Piezo} = 3,682 \text{ mA}$$

Karena setiap panel anak tangga terkonfigurasi paralel 40 buah elemen, maka tegangan total yang dapat dihasil sebesar 50,23 V-peak dan Arus total yang dapat dihasilkan tiap panel sebesar $40 \times 3,682 \text{ mA} = 147,28 \text{ mA}$. Perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan data pengujian keluaran tegangan dan arus simulator tangga penghasil listrik. Data Pengujian tersebut disajikan dalam bentuk grafi pada gambar 4.11 dan gambar 4.12



Gambar 4.11 Grafik Data Pengukuran Tegangan Panel Anak Tangga



Gambar 4.12 Grafik Data Pengukuran Arus Panel Anak Tangga

Berdasarkan gambar 4.11 dan 4.12 diatas dapat nilai tegangan serta arus yang dihasilkan tiap panel berbeda satu sama lain serta nilainya tidak konstan. Untuk pengujian tegangan, panel nomer 4 memiliki kestabilan tegangan yang direntan yang relatif tinggi dibanding panel lain. Sedangkan panel nomer 2 memiliki rentan nilai tegangan yang lebih rendah dibanding panel lain pada pengujian ini. Jika hasil pengujian 50 kali pijakan tersebut dirata-rata didapatkan nilai tegangan rata-rata tertinggi pada panel nomer 4 yaitu sebesar 43,3 Volt. Sedangkan terendah pada panel nomer 2 hanya sebesar 26,02 Volt. Untuk pengujian tegangan, nilai rata-rata hasil pengujian khususnya panel nomer 4 telah mendekati nilai perhitungan atau nilai keluaran yang seharusnya dihasilkan oleh tiap panel anak tangga yaitu sebesar 50,23 Volt.

Untuk pengujian arus, memanfaatkan resistansi yang terdapat pada alat ukur yang digunakan. Hal ini dilakukan karena saat dipasang beban yaitu resistor 100 Ω kemudian alat ukur arus dihubungkan, nilai arus tidak dapat terukur atau sangat kecil nilainya begitupun nilai tegangannya menjadi lebih rendah dibanding

pengukuran tanpa beban. Pada pengujian arus ini, panel nomer 1 nampak memiliki kestabilan pada level tegangan yang lebih tinggi daripada panel lainnya. Sedangkan panel nomer 2 cenderung lebih rendah nilai arusnya dibanding panel yang lain. Rata-rata hasil pengujian arus didapatkan bahwa panel nomer 1 memiliki arus rata-rata tertinggi yaitu 29,44 mA sedangkan panel nomer 2 memiliki arus rata-rata terendah yaitu 16,98 mA. Nilai rata-rata arus yang dihasilkan masih cukup jauh dari harapan atau nilai perhitungan yang mencapai 147,28 mA.

Hal tersebut dapat diakibatkan beberapa faktor antara lain titik jatuh beban (pijakan) yang tidak sama rata antar-elemen piezoelektrik di tiap panel serta sifat arus yang dihasilkan oleh tiap elemen tidak sama pada saat diinjak sehingga nilai arus total adalah selisih antara arus yang bersifat positif dan arus yang bersifat negatif (hukum kirchoff) khususnya untuk panel nomer 2. Selain itu, besar kecil nilai arus dan tegangan yang mampu dihasilkan tiap panel anak tangga pada simulator ini juga ditentukan oleh kondisi busa penekan, jika sudah semakin menipis maka nilai arus dan tegangannya menurun.

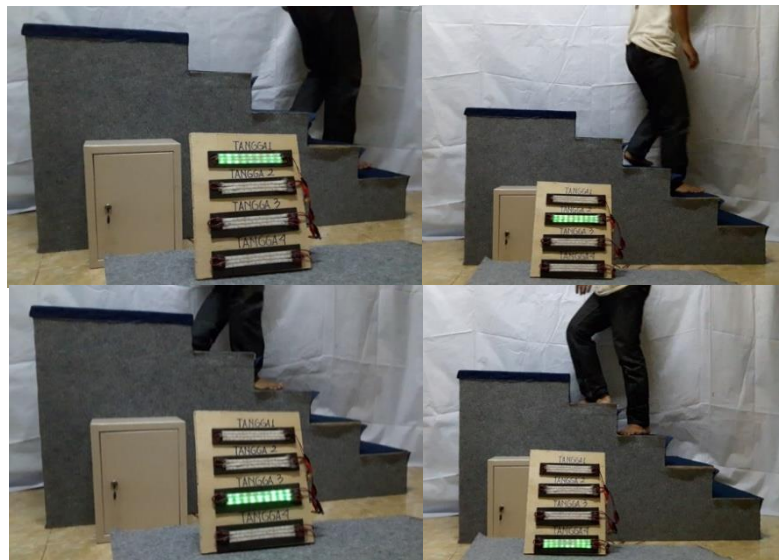
Nilai rata-rata pengujian panel nomer 1 hingga nomer 4 dapat diamati pada tabel 4.3. di bawah ini, sedangkan untuk data keseluruhan pengujian dapat diamati pada lampiran laporan tugas akhir ini.

Tabel 4.3 Nilai Rata-rata Pengujian Panel Anak Tangga Piezoelektrik

PANEL ANAK TANGGA	1	2	3	4
Rata-rata Tegangan (Volt)	41,3	26,02	40,58	43,3
Rata-rata Tegangan Balik (Volt)	-12,02	-21,88	-8,88	-9,22
Arus (mA)	29,44	16,98	22,02	26,64
Arus Balik (mA)	-1,66	-4,72	-3,6	-1,48
Rata-rata Daya Listrik (mW)	1215,8	441,81	893,57	1153,51

Dari nilai rata-rata tegangan dan arus tersebut kemudian didapat nilai daya rata-rata yang dapat dihasilkan oleh masing-masing panel piezoelektrik. Sehingga jika

dirata-rata, simulator tangga penghasil listrik ini dapat menghasilkan $\pm 0,9$ watt tiap pijakan pada anak tangganya. Jika digunakan sebuah aki (*accumulator*) dengan kapasitas 12Vdc/7Ah atau 84 watt/jam dengan level tegangan pengisian sebesar 13,8 V maka diprediksikan membutuhkan ± 27 kali pijakan untuk tiap anak tangga agar aki tersebut terisi penuh. Namun, nilai tersebut masih dalam taraf perhitungan matematis sederhana serta potensi energi yang dapat dihasilkan tangga penghasil listrik ini.



Gambar 4.13 Pengujian Simulator Tangga Penghasil Listrik dengan LED-Strip

Pengujian lain dilakukan dengan menghubungkan tiap anak tangga dengan beban LED-strip berspesifikasi 12Vdc seperti pada gambar 4.13. Hasil dari uji coba tersebut, LED-strip berhasil menyala saat anak tangga diinjak atau setelah menerima pijakan sehingga dapat disimpulkan bahwa energi listrik yang dihasilkan tiap anak tangga telah sesuai atau mendekati data pengujian diatas. Pada pengujian ini terdapat kendala yaitu, LED-strip hanya menyala jika LED dihubungkan langsung dengan output piezoelektrik. Apabila dilakukan pengukuran arus (alat ukur seri dengan sumber dan beban) maka LED-strip tidak dapat menyala. Hal tersebut dapat disebabkan nilai resistansi alat ukur yang mengakibatkan arus tidak dapat sampai ke beban atau nilai arus yang mengalir LED-strip menjadi sangat kecil. Hal tersebut didukung dengan pengukuran tegangan pada saat dipasang

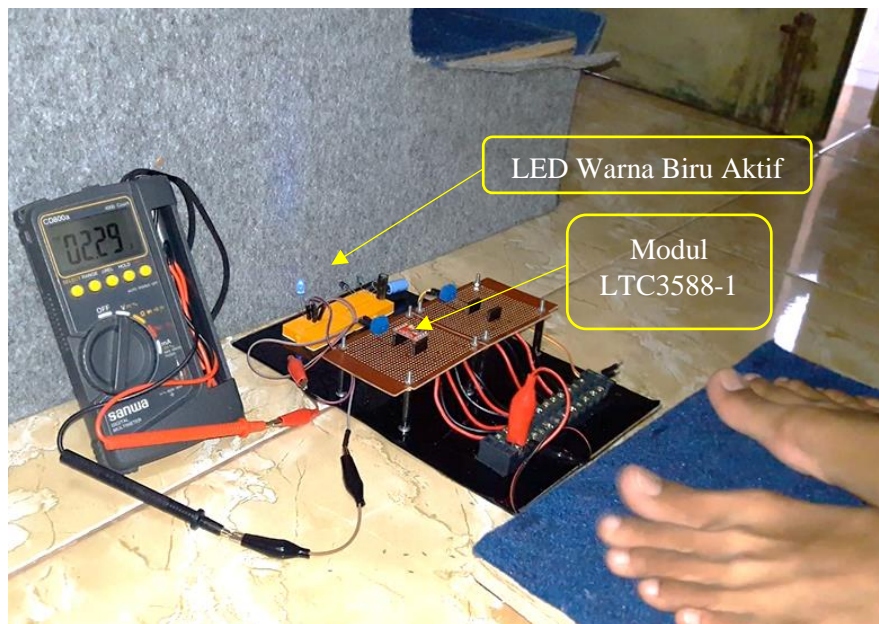
rangkaian pengukuran arus di mana nilai tegangan juga menjadi sangat kecil tidak seperti pada pengujian tanpa beban sebelumnya.

4.2 Analisis Penggunaan Modul Harvester LTC3588

Seperti yang telah dijelaskan pada bab 3, terdapat beberapa pengujian untuk menganalisis penggunaan modul LTC3588 sebagai modul pemanen energi pada anak tangga penghasil listrik ini. Analisis yang dilakukan menggunakan hasil pengujian karakteristik serta perhitungan yang telah dilakukan pada poin 4.1 diatas. Adapun hasil pengujian serta analisis penggunaan modul LTC3588 adalah sebagai berikut.

4.2.1 Pengujian keluaran LTC3588 dengan LED

Pada pengujian ini digunakan sebuah LED ukuran 5mm berwarna biru. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tegangan output LTC3588 sudah mampu mengaktifkan LED serta berapa pijakan yang diperlukan agar LED dapat aktif. LED dihubungkan dengan output LTC3588 kemudian simulator diberi tekanan berupa pijakan kaki.



Gambar 4.14 Pengujian Keluaran LTC3588-1 menggunakan LED Warna Biru

Pada gambar 4.14 menunjukkan LED mulai aktif pada tegangan 2,29 V. Untuk mencapai tegangan 2,29 V tersebut simulator mini dengan 15 piezoelektrik yang diparalel memerlukan 2 kali pijakan. Adapun tabel pengujian menggunakan panel simulator mini ini dapat diamati pada tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Pengujian Output LTC3588 dengan Nyala LED

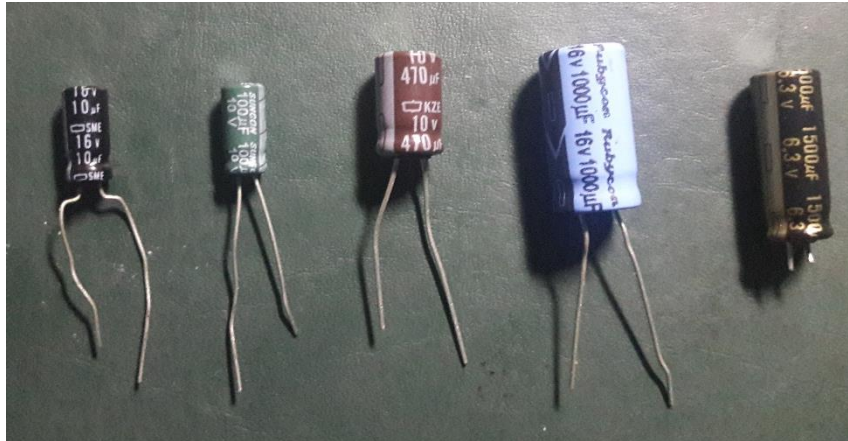
Pijakan No.	Tegangan Terukur	Status LED	Tegangan saat Pijakan dilepaskan	Status LED saat Pijakan dilepaskan
1	0,98 V	OFF	2,26 V	OFF
2	2,30 V	ON	2,24 V	OFF
3	2,24 V	ON	2,30 V	OFF
4	2,30 V	ON	2,31 V	OFF
5	2,31 V	ON	2,29 V	OFF

Pada tabel 4.4 tersebut menunjukkan status LED saat panel simulator dipijak dan saat pijakan dilepaskan. Dapat diamati tegangan awal yaitu 0,98 V terukur, tegangan tersebut adalah kondisi terakhir sebelum pengujian yang didokumentasikan dan diambil datanya untuk tabel 4.4, sehingga kapasitor pada modul LTC3588-1 masih menyimpan muatan listrik. Saat pijakan pertama diberikan, nilai tegangan naik secara signifikan ke 2,26 V. Namun pada kondisi ini LED masih belum dapat aktif. Saat pijakan kedua diberikan LED langsung aktif pada tegangan 2,30 V dan beberapa saat kemudian OFF kembali. Pada saat kondisi OFF tersebut, tegangan yang terukur adalah 2,24 V atau mengalami penurunan tegangan. Sebelum pijakan ketiga diberikan, nilai 2,24 V tersebut sempat mengalami perubahan menjadi 2,21 V. Kemudian pijakan ketiga diberikan, tegangan kembali ke 2,24 V dan menyalakan LED dan sesaat kemudian LED OFF kembali. Setelah pijakan dilepas, tegangan mencapai 2,30 namun LED tetap OFF. Kondisi nomer 2 dan 3 terus berulang di pijakan nomer 4, nomer 5, dst.

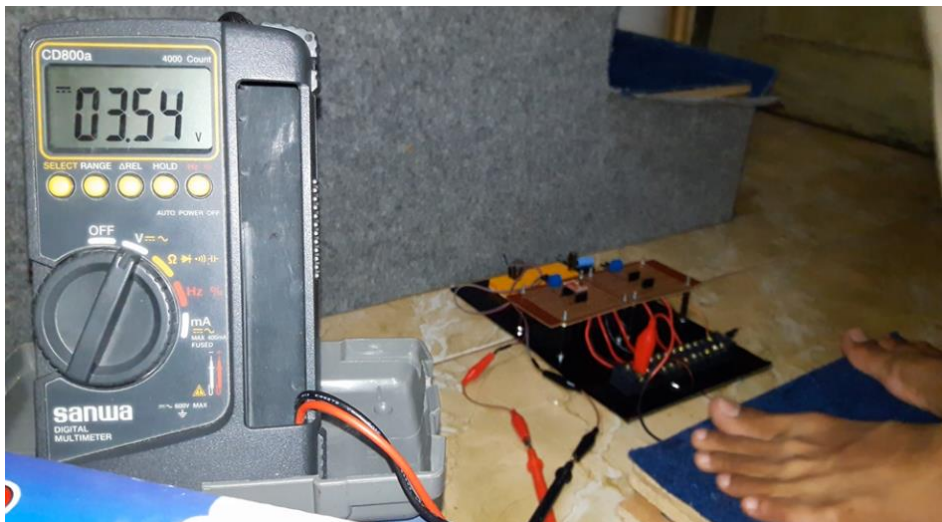
Hal tersebut menunjukkan bahwa hanya saat diberi tekanan maka arus output LTC3588 mampu menyalakan LED. Pada saat tekanan tidak diberikan maka tidak terjadi aliran arus yang keluar dari modul LTC3588. Pada pijakan pertama, tegangan keluaran belum mencapai minimum untuk mengaktifkan LED. Muatan listrik tersimpan pada kapasitor modul LTC3588. Setelah pijakan kedua diberikan, tegangan mencapai minimum untuk mengaktifkan LED sehingga terdapat arus mengalir untuk mengaktifkan LED. Arus yang mengalir tersebut menandakan pengurangan muatan listrik pada kapasitor modul LTC sehingga LED kembali OFF dan hal tersebut yang membuat perubahan nilai tegangan sesaat sebelum diberi pijakan kembali. Meski tegangan terlihat relatif sama saat setelah dipijak namun LED tidak aktif menandakan kurangnya jumlah muatan atau batas muatan yang nantinya berubah menjadi arus untuk mengaktifkan LED. Sehingga, saat pijakan berikutnya diberikan terjadi pengisian muatan kembali di mana batas muatan untuk mengaktifkan LED tercapai dan membuat LED aktif meski beberapa saat saja.

4.2.2 Pengujian Keluaran LTC3588 dengan Kapasitor (Eksternal)

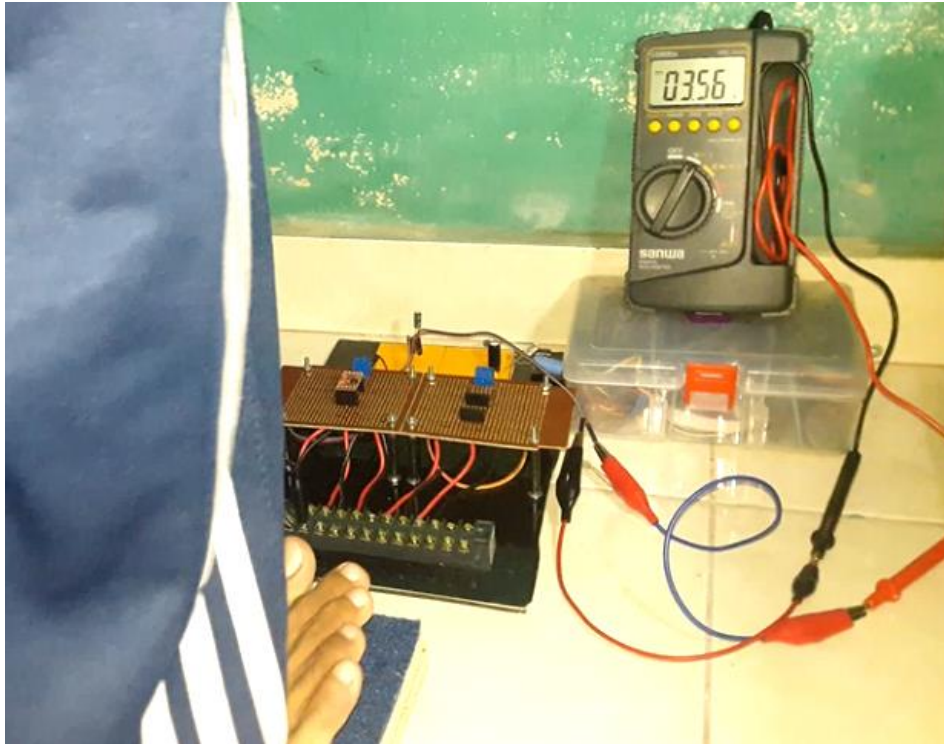
Berbeda dengan pengujian menggunakan LED, pengujian ini bertujuan mengisi kapasitor eksternal atau media penyimpanan sekunder. Pengujian menggunakan beberapa kapasitor elco dengan nilai yang bervariasi. Pengujian menitik beratkan pada jumlah pijakan untuk mengisi kapasitor serta level tegangan maksimum pengisian yang dapat dicapai menggunakan LTC3588-1. Adapun kapasitor elco yang digunakan yaitu kapasitas 10uF/16V, 100uF/10V, 470uF/10V, 1000uF/16V, 1500uF/6.3V yang nampak pada gambar 4.15 di bawah ini dan pengujian dengan panel simulator pada gambar 4.16 dan 4.17.



Gambar 4.15 Kapasitor yang digunakan dalam pengujian



Gambar 4.16 Pengujian Pengisian Kapasitor 10uF/16V dengan LTC3588-1



Gambar 4.17 Pengujian Pengisian Kapasitor 100uF/16V dengan LTC3588-1

Pada pengujian ini, untuk melakukan pengisian terhadap kapasitor beban yang diberikan terhadap panel simulator sebesar 45 Kg berupa berat badan. Panel kemudian diinjak beberapa kali hingga pengukuran menunjukkan telah mencapai level tegangan maksimum yang mampu dicapai kapasitor. Durasi tiap pijakan adalah 1 detik atau dalam waktu 1 detik panel simulator ditekan sebanyak 1 kali. Adapun pengambilan data yang berhasil dilakukan untuk pengisian kapasitor ini adalah dapat diamati pada tabel 4.5

Tabel 4.5 Pengujian Pengisian Kapasitor (Eksternal) dengan modul LTC3588-1

No	Kapasitas Kapasitor	Rata-rata Kenaikan Tegangan	Tegangan Maksimum	Jumlah Pijakan
1	10uF/16V	0,266	3,6	11
2	100uF/10V	0,04438	3,61	90

Pada tabel 4.5 tersebut menunjukkan pengaruh kapasitas kapasitor terhadap jumlah pijakan untuk mencapai nilai tegangan maksimum kapasitor. Pada

pengujian tersebut, untuk kapasitor 10uF mencapai tegangan maksimum pada pijakan ke-11 dari 13 pijakan yang diberikan. Sedangkan kapasitor 100uF mencapai tegangan maksimum 3,61 V pada pijakan ke-90 tetapi relatif mencapai kestabilan nilai tegangan pada level tegangan 3,60 V saat rentan pijakan ke-84 lebih. Sehingga rata-rata kenaikan tegangan untuk kapasitor 10uF adalah 0,266 V untuk mencapai tegangan maksimum pada 11 pijakan. Sedangkan kapasitor 100uF memiliki rata-rata kenaikan tegangan sebesar 0,04438 V untuk mencapai tegangan maksimum 3,61 V.

Analisa terhadap nilai arus dilakukan melalui perhitungan karena menggunakan alat ukur nilai arus tidak terbaca. Menggunakan persamaan 2.8 atau rumus umum untuk mencari nilai kapasitas kapasitor yaitu,

$$C = \frac{Q}{V} ,$$

dengan C adalah kapasitas kapasitor (Farad) dan Q adalah muatan listrik (Coulomb) serta V adalah tegangan listrik (Volt). Sehingga untuk mendapatkan nilai Q dapat digunakan persamaan yaitu,

$$Q = C \times V.$$

Sedangkan untuk mencari nilai arus (I), digunakan rumus umum mencari nilai arus berdasarkan perbandingan jumlah muatan listrik dibagi dengan satuan waktu atau dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut

$$I = \frac{Q}{t} ,$$

dengan variabel t adalah satuan waktu namun, dalam hal ini perubahan nilai arus dan juga muatan listrik dipengaruhi oleh pijakan yang terjadi sehingga satuan waktu tersebut disamakan dengan jumlah atau frekuensi pijakan yang diberikan terhadap panel piezoelektrik. Sehingga pada pengujian, durasi waktunya adalah 1 pijakan tiap detik. Adapun analisis untuk arus yang mengalir ke kapasitor adalah sebagai berikut,

a. Kapasitor 10uF/16V

$$C = 10 \times 10^{-6} \text{ F},$$

$$V_{Max \text{ Kapasitor}} = 16 \text{ V},$$

$$Q_{Max \text{ Kapasitor}} = C \times V_{Max \text{ Kapasitor}},$$

$$Q_{Max \text{ Kapasitor}} = 10 \times 10^{-6} \text{ F} \times 16 \text{ V} = 16 \times 10^{-5} \text{ Coulomb} = 160 \mu\text{C},$$

$$Q_{Tegangan \ 3,6V} = 10 \times 10^{-6} \text{ F} \times 3,6 \text{ V} = 36 \mu\text{C} \text{ (22,5\% Max. Kapasitor } 10\mu\text{F)}.$$

Sehingga arus yang mengalir yaitu,

$$I = \frac{Q_{Tegangan \ 3,6V}}{t} = \frac{36 \mu\text{C}}{11 \text{ pijakan}} = 3,27 \mu\text{A}$$

b. Kapasitor 100uF/10V

$$C = 100 \times 10^{-6} \text{ F},$$

$$V_{Max \text{ Kapasitor}} = 10 \text{ V},$$

$$Q_{Max \text{ Kapasitor}} = C \times V_{Max \text{ Kapasitor}},$$

$$Q_{Max \text{ Kapasitor}} = 100 \times 10^{-6} \text{ F} \times 10 \text{ V} = 10^{-3} \text{ Coulomb} = 1 \text{ mC},$$

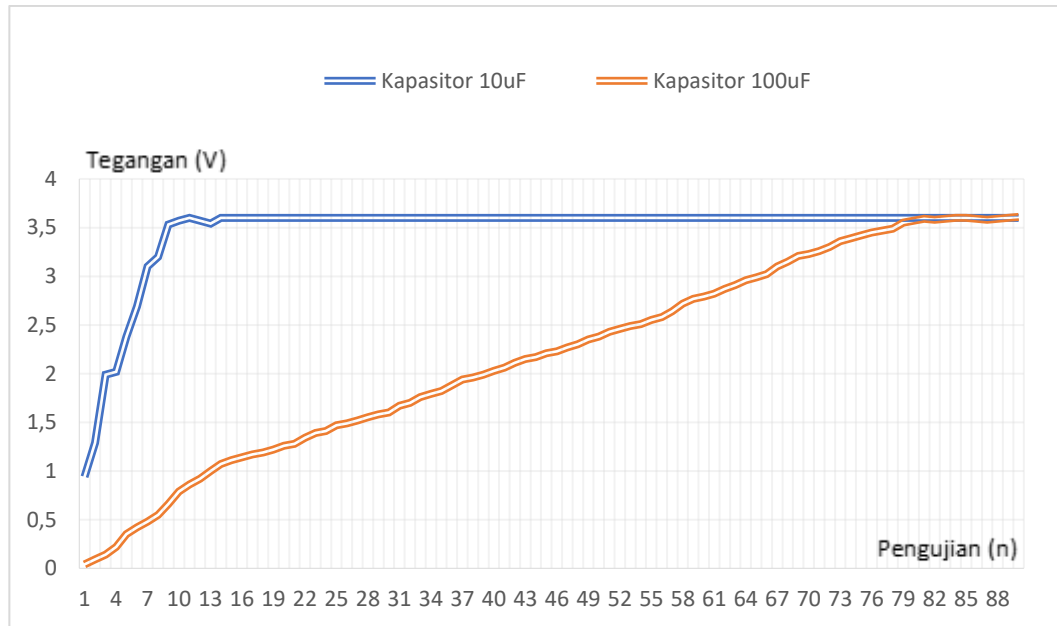
$$Q_{Tegangan \ 3,6V} = 100 \times 10^{-6} \text{ F} \times 3,6 \text{ V} = 360 \mu\text{C} \text{ (36\% Max. Kapasitor } 100\mu\text{F)}.$$

Sehingga arus yang mengalir yaitu,

$$I = \frac{Q_{Tegangan \ 3,6V}}{t} = \frac{360 \mu\text{C}}{90 \text{ pijakan}} = 4 \mu\text{A}$$

Dari analisis tersebut diketahui bahwa arus yang mengalir menuju kapasitor untuk 10uF sebesar 3,27uA dan kapasitor 100uF sebesar 4uA. Hal tersebut yang membuat pembacaan pengukuran tidak dapat dilakukan karena arus sangat kecil. Pada pengujian ini, juga terdapat kendala yaitu, 2 buah modul LTC tersebut tidak dapat mengeluarkan output setelah dilakukan pengujian terhadap

kapasitor masing-masing 10uF/16V dan 100uF/10V. Sebelum mengalami kendala tersebut telah dilakukan uji coba pengisian kapasitor sekaligus mengaktifkan LED seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 dan poin 4.2.3. Namun pengujian tersebut belum sempat dilakukan pengambilan data. Adapun data pengujian disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Grafik Pengujian Pengisian Kapasitor

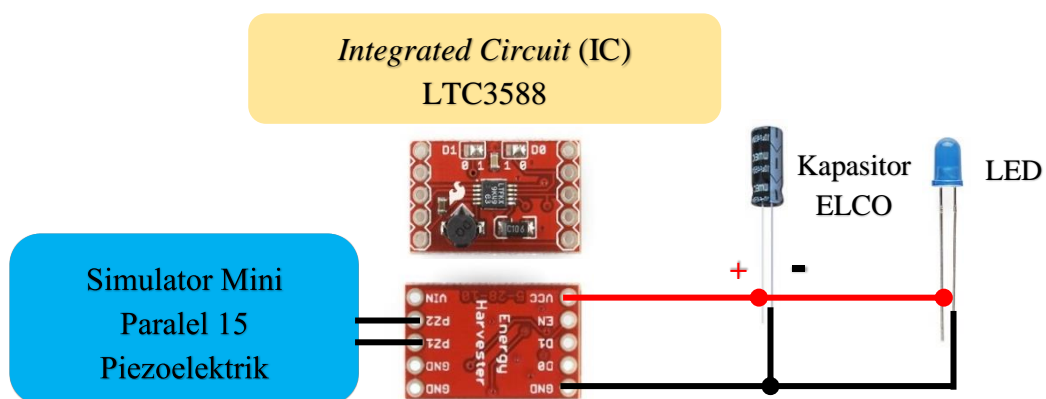
Dari gambar 4.18 tersebut dapat diamati bahwa semakin besar nilai kapasitas kapasitor maka waktu pengisian dalam hal ini adalah jumlah pijakan yang diberikan akan semakin lama atau semakin banyak. Hal tersebut ditinjau dari nilai rata-rata kenaikan tegangan. Semakin besar kapasitas kapasitor, kenaikan rata-ratanya semakin kecil atau *range* semakin sempit. Pada pengujian ini diketahui kemampuan pengisian kapasitor hanya mencapai tegangan 3,6 V atau hanya sebatas pengaturan tegangan keluaran LTC3588-1 yaitu sebesar 3,6 V. Selain itu, jika kapasitor 10uF memerlukan ± 11 pijakan sedangkan kapasitor 100uF memerlukan ± 90 pijakan.

Apabila diamati sekilas, kapasitas 100uF adalah 10 kali dari kapasitas kapasitor 10uF begitupun hasil pengujian jumlah pijakan untuk mengisi 100uF hampir 10 kali lipat jumlah pijakan yang diperlukan kapasitor 10uF untuk

mencapai tegangan maksimal pengisian. Sehingga terdapat linearitas kapasitas kapasitor dengan jumlah pijakan yang harus diberikan untuk mencapai tegangan maksimum yaitu 3,6V. Karena terkendala modul LTC3588-1 yang tidak dapat mengeluarkan output seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sehingga untuk mengetahui berapa jumlah pijakan agar kapasitor dengan kapasitas 470uF, 1000uF, dan 1500uF mencapai tegangan 3,6V digunakan kelipatan 10 kali jumlah pijakan dari uji coba kapasitor 10uF dan 100uF. Jika disederhanakan menjadi 1uF tiap pijakan untuk beban uji 45 Kg. Untuk efisiensi sistem pengisian kapasitor 10uF dan 100uF menggunakan LTC3588 dengan input 15 piezoelektrik diparalel yang memiliki daya listrik (rata-rata pengukuran) sebesar 11,79 mW atau 11.790 uF adalah 0,122 %.

4.2.3 Pengujian Pengisian Kapasitor untuk Mengaktifkan LED

Pada pengujian ini menggabungkan 2 uji coba sebelumnya yaitu mengaktifkan LED dan pengisian kapasitor. Hal yang menjadi titik berat pada pengujian ini adalah nilai tegangan maksimum yang dapat dicapai kapasitor sekaligus mengaktifkan LED dan waktu LED kembali tidak aktif setelah tidak diberi pijakan. Pengujian ini juga menggunakan 5 buah kapasitor yang digunakan pada pengujian sebelumnya yaitu 10uF, 100uF, 470uF, 1000uF dan 1500uF dengan skema seperti gambar 4.19 di bawah ini.



Gambar 4.19 Skema Pengujian Pengisian Kapasitor dan Mengaktifkan LED

Pengujian ini telah berhasil dilakukan untuk seluruh kapasitas kapasitor yang digunakan pada penelitian ini. Namun, pada pengujian awal tidak

dilakukan dokumentasi serta pengambilan data terlebih dahulu untuk memastikan apakah sistem sudah bekerja. Saat pengambilan data dilakukan, seperti yang telah dijelaskan pada poin 4.2.2 bahwa 2 buah modul LTC3588-1 yang digunakan mengalami kendala tidak dapat menghasilkan output kembali setelah pengujian dan pengambilan data pengisian kapasitor 10uF dan 100uF sehingga tidak dapat dilakukan pengambilan data serta dokumentasi untuk kapasitor lain serta simulator tangga penghasil listrik. Meski tidak terlalu detail, hasil pengujian sebelumnya masih dapat dipaparkan dan diamati pada tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6 Pengujian Pengisian Kapasitor untuk Mengaktifkan LED

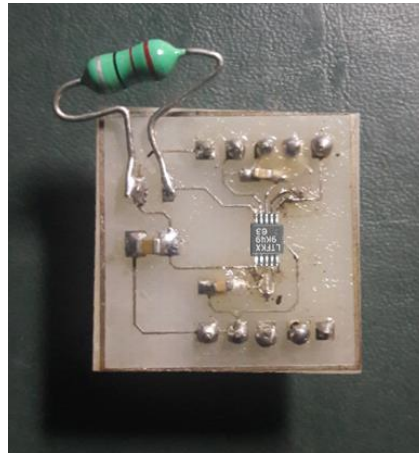
No	Kapasitor	Teg. Maksimum	Teg. Minimum LED Aktif	Durasi LED Aktif	Teg. Setelah LED OFF
1	10uF	$\pm 2,5$ V	$\pm 2,3 - 2,4$ V	≤ 3 detik	$\leq 2,3$ V
2	100uF	$\pm 2,5$ V	$\pm 2,3 - 2,4$ V	≤ 5 detik	$\leq 2,3$ V
3	470uF	$\pm 2,5$ V	$\pm 2,3 - 2,4$ V	≤ 7 detik	$\leq 2,3$ V
4	1000uF	$\pm 2,5$ V	$\pm 2,3 - 2,4$ V	≤ 10 detik	$\leq 2,3$ V
5	1500uF	$\pm 2,5$ V	$\pm 2,3 - 2,4$ V	≥ 15 detik	$\leq 2,3$ V

Pada tabel 4.6 tersebut, pengisian atau tegangan maksimum yang dapat dicapai kapasitor hanya sebesar $\pm 2,5$ V. Pada saat tegangan mencapai 2,3 V LED mulai aktif untuk pengujian seluruh kapasitor. Tegangan tidak dapat bertambah lebih dari tegangan maksimum meski terus diberi pijakan. Pemberian pijakan hanya menambah durasi LED untuk aktif. Kapasitas kapasitor menentukan lama waktu LED untuk OFF hingga mencapai nilai tegangan tertentu.

4.2.4 Pengujian Pengisian Baterai Menggunakan LTC3588-2

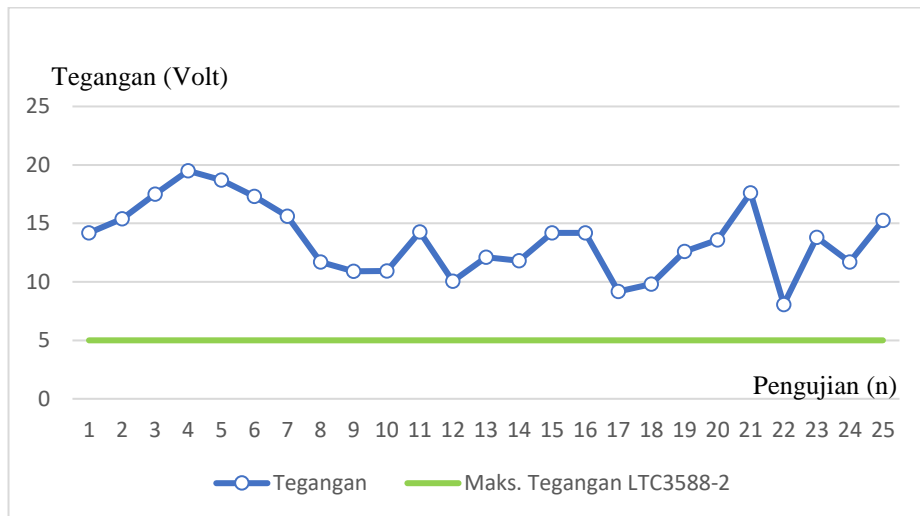
Pada pengujian ini, LTC3588 yang digunakan adalah versi kedua dari LTC sebelumnya. Memiliki kemampuan tegangan output tertinggi yang dapat dipilih sebesar 5 V. Dengan nilai tegangan tersebut, pengaplikasiannya menjadi lebih mudah. Namun, khusus untuk LTC3588-2 hanya tersedia IC saja atau tidak

seperti modul LTC3588-1 sebelumnya. Sehingga perlu dibuat terlebih dahulu dan di-integrasikan dengan komponen lainnya seperti kapasitor dan induktor. Pembuatan berdasarkan skematik dan spesifikasi dalam datasheet IC. Adapun hasil pembuatan modul LTC3588-2 tersebut nampak seperti gambar 4.20 di bawah ini.

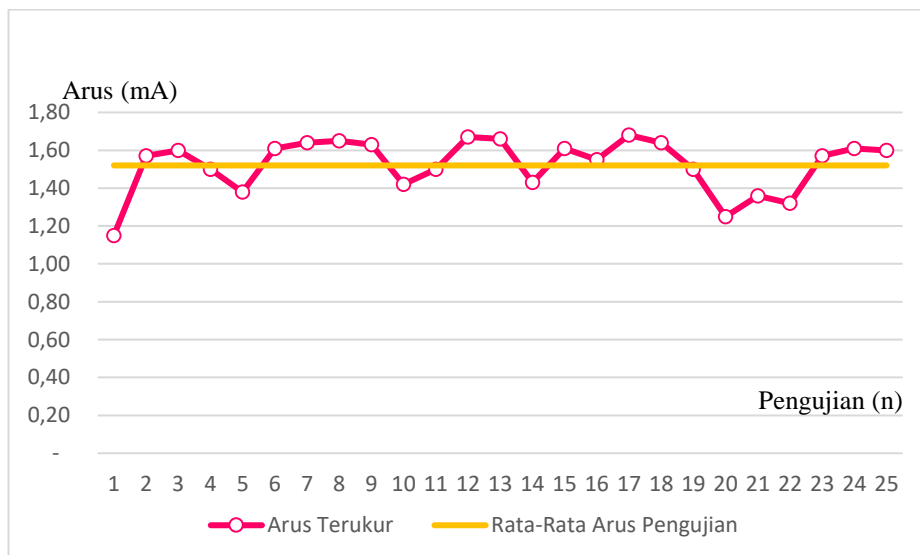


Gambar 4.20 Modul LTC3588-2

Modul LTC3588-2 tersebut kemudian diuji karakteristiknya untuk mengetahui kesesuaian dengan datasheet. Pengujian tersebut menggunakan panel anak tangga nomer 4, di mana panel tersebut memiliki keluaran paling tinggi dibanding panel anak tangga yang lain. Pengujian tersebut dilakukan dengan memberikan beban ± 70 Kg sebanyak 25 kali pijakan. Adapun hasil pengujian karakteristik tersebut tersaji dalam grafik pada gambar 4.21 dan gambar 4.22 di bawah ini.



Gambar 4.21 Pengujian Tegangan LTC3588-2



Gambar 4.22 Pengujian Arus LTC3588-2

Dari gambar 4.21 didapatkan bahwa tegangan yang dihasilkan melampaui batas tegangan output sesuai datasheet yaitu 5 V. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan kapasitor atau induktor yang dimungkinkan masih kurang sesuai spesifikasi. Namun, hal ini tidak menjadi masalah karena masih dapat digunakan sebagai regulator untuk melakukan mekanisme pengisian baterai nantinya. Rata-rata pengukuran tegangan sebesar 13,58 V. Sedangkan arus yang

hasilkan rata-rata mencapai 1,52 mA dari 25 kali pijakan yang diberikan yang dapat diamati pada gambar 4.22.

Pada uji coba pengisian baterai digunakan 2 buah baterai yang dirangkai secara serial berkapasitas masing-masing 2600mAh. Selain uji coba dengan 2 baterai, dilakukan uji coba 4 buah baterai yang dirangkai secara serial di mana 3 buah baterai berkapasitas 2450mAh merk Eneloop dan 1 buah lainnya kapasitas 2600mAh. Rangkaian baterai tersebut kemudian dihubungkan dengan output LTC3588-2 serta mengukur nilai tegangannya. Pengujian dilakukan untuk mengamati peningkatan nilai tegangan, peningkatan nilai tegangan menandakan terisinya (*charging*) baterai. Selain nilai tegangan, pengamatan juga dilakukan terhadap jumlah pijakan untuk mencapai perubahan nilai tegangan pada pengisian baterai. Pada pengujian ini, komponen LTC3588-2 terpasang dibagian dalam simulator tangga sedangkan baterai diletakkan dibagian luar agar mudah dihubungkan dengan multimeter pengukur tegangan seperti nampak pada gambar 4.23 dan hasil pengukuran nampak pada tabel 4.7.



Gambar 4.23 Tata Letak Komponen Pengujian Pengisian Baterai dengan LTC3588-2

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Pengisian Baterai dengan LTC3588-2

Rangkaian Serial	Kenaikan Tegangan	Jumlah Pijakan
2 Baterai 2600 mAh	0,01 V	± 5 Pijakan
3 Baterai 2450 mAh + 1 Baterai 2600mAh	0,01 V	± 10 Pijakan

Pada tabel 4.7 diketahui untuk menaikkan tegangan 0,01 V pada rangkaian serial 2 buah baterai 2600mAh memerlukan setidaknya 5 pijakan untuk tiap anak tangga pada simulator tangga penghasil listrik. Sedangkan jumlah anak tangga yang terdapat pada simulator adalah 4 buah anak tangga. Sehingga diperlukan 5 kali kegiatan menaiki dan menuruni tangga simulator atau 20 pijakan kaki untuk seluruh panel pada simulator tangga tersebut. Untuk rangkaian serial 4 buah baterai, agar terjadi penambahan 0,01 V diperlukan kurang lebih 10 pijakan tiap anak tangga. Sehingga pada uji coba ini, untuk menaikkan tegangan sebesar 0,01 V diperlukan 10 kali kegiatan menaiki dan menuruni tangga simulator atau 40 pijakan kaki untuk seluruh panel pada simulator tangga tersebut. Adapun dokumentasi pada saat pengujian pengisian baterai nampak pada gambar 4.23 dan gambar 4.24 di bawah ini.



Gambar 4.23 Pengujian Pengisian Baterai dengan Tegangan Awal 1,78 V



Gambar 4.24 Pengujian Pengisian Baterai dengan Tegangan Setelah Naik-Turun Tangga sebesar 1,79 V

Pada gambar 4.23 dan 4.24 tersebut, tegangan awal pengisian 2 buah baterai sebesar 1,78 V. Setelah menaiki dan menuruni tangga sebanyak 4 kali atau total 16 pijakan kaki diberikan pada simulator tangga tersebut. Beban yang diberikan pada pengujian ini adalah ± 70 Kg berat badan. Tegangan awal sebesar 1,78 V adalah tegangan total dari konfigurasi serial baterai. Seharusnya jika tegangan minimum baterai 1,2 V dikalikan 2 akan menghasilkan tegangan sebesar 2,4 V. Namun, kondisi baterai 2600mAh yang digunakan masing-masing hanya berkisar 0,9 V saja atau terjadi *losses* sebesar 0,3 V tiap baterai. Hal tersebut dikarenakan terjadi penurunan kapasitas yang telah menjadi sifat baterai Ni-MH seperti yang telah dipaparkan pada Bab II. Selain itu, kualitas baterai 2600mAh tidak cukup baik.

Hal tersebut telah dibandingkan dengan baterai 2450 mAh di mana jika menggunakan 2 buah baterai 2450 mAh, tegangan awal mencapai 2,3 hingga 2,4 V lebih dan untuk mencapai kenaikan 0,01 V diperlukan lebih dari 80 pijakan untuk total pijakan pada simulator tangga penghasil listrik atau setidaknya 20 pijakan tiap panel anak tangga. Hal tersebut pernah dilakukan namun tidak terdokumentasikan. Meski demikian, telah didapatkan data bahwa semakin besar kapasitas baterai yang digunakan maka semakin banyak jumlah pijakan yang harus diberikan pada panel anak tangga.