

## UPAYA PENINGKATAN RESOLUSI SENSOR *LOAD CELL* PADA TIMBANGAN ELEKTRONIK

Eka Mandayatma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

<sup>1</sup>[mectronku1305@gmail.com](mailto:mectronku1305@gmail.com)

### ABSTRACT

*Electronic scales are weight measurement instrument that are widely used both in the laboratory and in the industry. One of the main sensors of electronic scales is Load Cell. Direct use of Load Cell only resulted in standard resolution of load cell and the ADC system used so that the scale's resolution is quite low because it is only determined by Load Cell's measurement range and ADC resolution in which ADC's dynamic range could not be achieved. This study done an electrical effort to increase the scale's resolution so that the weighing accuracy could be better. Improving the resolution is done with electronic signal processor and conditioners using summing and leveling amplifiers and eliminating noise is done by filtering. Data processing was done by comparing resolution value from Load Cell with and without signal conditioning. Load Cell with weight range 0-5kg using 200x amplification resulted in 113 mV – 1200 mV output. Using standar resolution ADC of 20mV/bit, the result will be 0000 0110 until 0011 1110. By adding Levelling Amplifier circuit, the output will be 48 mV for 0 kg wight and 4,87 V for 5kg weight. ADC result in this condition is from 0000 0010 to 1111 1100. ADC usage without levelling is 22% and with levelling is 98%. Without levelling, weight resolution is 89 gr/bit and with levelling is 20 gr/bit. Weight resolution increase to 345%.*

**Keywords:** *Electronic scales, resolution, leveling*

### ABSTRAK

Timbangan elektronik merupakan alat ukur berat yang banyak digunakan baik di laboratorium maupun di dunia usaha. Salah satu sensor utama dari timbangan elektronik adalah Load Cell. Penggunaan Load Cell secara langsung hanya akan memberikan resolusi standar dari Load Cell maupun sistem ADC yang digunakan, sehingga resolusi dari timbangan akan cukup rendah karena hanya ditentukan oleh rentang pengukuran Load Cell dan resolusi ADC dimana rentang dinamis dari ADC tidak tercapai. Pada penelitian ini akan dilakukan upaya elektronik agar terjadi peningkatan resolusi dari timbangan sehingga ketelitian penimbangan bisa lebih baik. Upaya peningkatan resolusi dilakukan dengan pengolah dan pengkondisi sinyal elektronik antara lain dengan penguat, summing dan levelling amplifier serta untuk mencegah derau diupayakan dengan filtering. Pengolahan data dilakukan dengan membandingkan nilai resolusi dari Load Cell tanpa pengkondisi sinyal dan resolusi Load Cell dengan pengkondisi sinyal. Load Cell dengan rentang beban 0 – 5 kg dalam pengkondisian dengan penguatan 200x didapat output 113 mV sampai 1200 mV. Dengan ADC standar pada resolusi 20 mV/bit akan didapat 0000 0110 sampai 0011 1110 Dengan menambahkan rangkaian Leveling Amplifier didapat output 48 mV untuk beban 0 kg dan 4,87 Volt untuk beban 5 kg, output ADC pada rentang 0000 0010 sampai 1111 1100. Pemakaian ADC tanpa leveling 22% dan dengan leveling 98%. Tanpa leveling resolusi penimbangan adalah 89 grm/bit dan dengan leveling 20 grm/bit. Peningkatan resolusi penimbangan 345%.

**Kata kunci :** Timbangan elektronik, resolusi, leveling

## PENDAHULUAN

Resolusi yang rendah pada penggunaan ADC disebabkan salah satunya adalah tidak tercapainya rentang skala penuh baik pada masukan (*input*) dan keluaran (*output*). Rentang keluaran skala penuh bisa diperoleh jika masukan berada pada rentang skala penuh

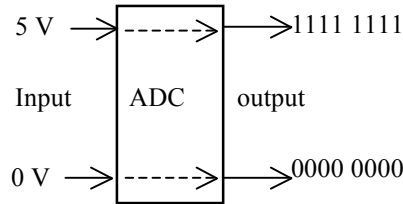
Untuk mendapatkan rentang skala penuh pada keluaran ADC maka diperlukan pula rentang masukan dalam skala penuh pula. Dengan kata lain pada situasi ini diperlukan pergeseran level untuk membawa level output sensor agar span sesuai untuk input ADC (Ron Mancini, 2005). Untuk ADC 8 bit, agar output bernilai 1111 1111 (FF skala penuh) diperlukan masukan tegangan analog 0 sampai 5 Volt dengan referensi  $\frac{1}{2} V_{cc}$ . Permasalahan yang ada ialah tidak semua masukan ADC berada pada rentang 0 sampai 5 volt, artinya tidak berada pada rentang skala penuh. Hal ini berarti data keluaran juga tidak berada pada rentang skala penuh. Kondisi ini menyebabkan inefisiensi dari ADC. Akibat lain yang timbul adalah resolusi pengukuran rendah. Rekayasa perangkat keras (*hardware*) bisa dibuat untuk mendapatkan rentang skala penuh. Pengukuran berat (*timbangan*) dengan menggunakan sensor Load Cell merupakan cara cukup mudah bila digabung dengan ADC karena keluaran dari sensor tersebut sudah dalam bentuk tegangan. Tegangan keluaran dari Load Cell tidak selalu berada pada jangkauan skala penuh dari masukan ADC. Jika keluaran Load Cell langsung diberikan kedalam ADC maka tidak didapat rentang skala penuh dimana berakibat pembacaan berat akan mempunyai resolusi yang rendah.

## KAJIAN PUSTAKA

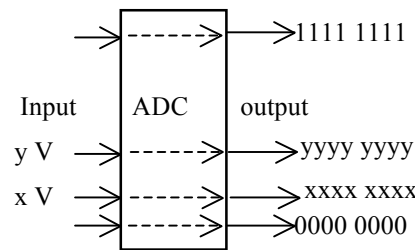
Pada pengolahan sinyal analog menggunakan komputer atau mikroprosesor akan selalu dibutuhkan komponen atau sub komponen pengubah data analog menjadi data digital yang dikenal dengan *Analog to Digital Conversion* (ADC). Dalam penggunaan ADC ada batasan-batasan tentang data (tegangan) masukan dan data keluaran. Jika diambil salah satu contoh ADC yang mempunyai rentang data analog masukan 0 – 5 Volt serta data keluaran merupakan data 8 bit, maka bisa dikatakan bahwa rentang masukan adalah tegangan analog 0 sampai 5 Volt sedang keluaran data biner 0000 0000 sampai 1111 1111.

Tegangan masukan untuk ADC dalam prakteknya tidak akan selalu bernilai 0 – 5 Volt, tetapi hanya berada pada rentang tersebut. Ini berarti ADC tidak akan bekerja full

scale yang berarti pula ada sejumlah data bit yang tidak terpakai. Hal ini tentu merupakan kerugian yang sebenarnya bisa dilakukan perbaikan atau rekayasa agar semua bit data bisa dimanfaatkan. Gambar 1a menunjukkan jika ADC bertegangan masukan skala penuh dan data keluaran juga berskala penuh. Sedangkan gambar 1b. menunjukkan jika ADC tidak bekerja pada skala penuh. Pada gbr 1b, terlihat akan ada rentang input dan output yang kosong (tidak terpakai) yang akan memperkecil resolusi dari ADC.



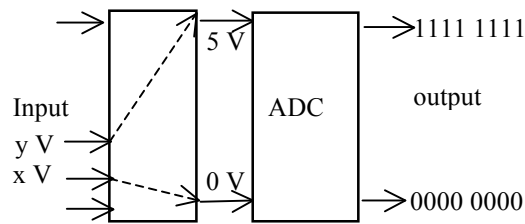
Gbr 1a. ADC dengan input skala penuh



Gbr 1b. ADC dengan input range kurang dari skala penuh.

Dari gambar 1b, data output tergantung dari masukan. Jika masukan x Volt maka data output bernilai xxx xxxx dan jika masukan y Volt keluaran yyy yyy. Bisa dilihat bahwa bit data antara 0000 0000 sampai xxx xxxx dan yyy yyy sampai 1111 1111 tidak terpakai dan hal ini jelas suatu kerugian.

Rekayasa perangkat keras bisa meminimalisir kerugian tersebut dengan memanfaatkan kombinasi rangkaian penguat, adder maupun summing amplifier untuk membentuk rangkaian leveling amplifier yang mampu mengoptimalkan kerja ADC yang selalu berada pada kerja skala penuh. Gambar 2 memperlihatkan konsep leveling amplifier. Input x Volt dibawa ke 0 Volt dan input y volt dibawa ke 5 volt.

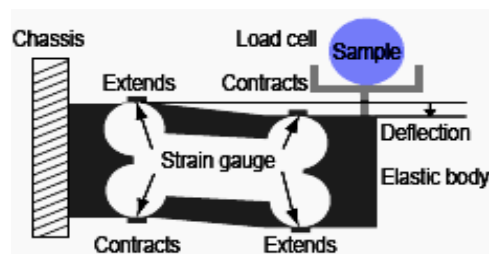


Gbr 2. Konsep leveling Amplifier

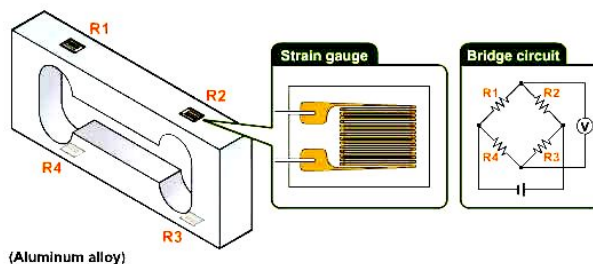
Tersedianya penguat operasional dalam berbagai jenis akan memudahkan dalam pembentukan rangkaian-rangkaian matematik seperti perkalian maupun penjumlahan . Perkalian merupakan inti dari penguat yang bisa dibentuk dalam penguatan membalik (inverting amplifier) maupun penguatan tak membalik (non inverting amplifier), sedangkan penjumlahan adalah menjumlah dari beberapa input yang masuk.

**2.1 Load Cell**

Load Cell merupakan sensor yang cukup populer untuk pengukuran Force terutama untuk pengukuran berat (timbangan elektronik). Penggunaan Load Cell sangat simple dan sangat memudahkan dalam implementasinya. Prinsip kerja secara singkat dari Load Cell adalah terjadinya shears atau stress dari suatu benda (misalnya logam). Dalam Load Cell, shears dan stress ini diwujudkan dalam bentuk perubahan panjang (regangan) permukaan, dan perubahan panjang ini ditangkap oleh sensor sekunder berupa strain gauge yang akan mengubah perubahan panjang (regangan) menjadi perubahan resistansi.



Gbr 3. Konstruksi Load Cell dan pola deformasi  
<http://www.shimadzu.com/an/balance/support/hiroba/bean/be>



TE-147  
 Gbr 4. Load cell dan posisi strain gauge

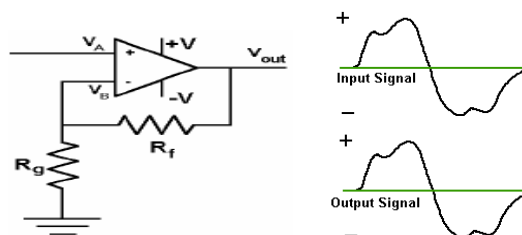
Gbr 3 memperlihatkan salah satu konstruksi Load Cell yang mendapat beban disatu sisi sementara sisi lain dibuat fixed. Disatu bagian akan Exstend (memanjang) dan bagian lain akan contract (memendek)

Selama proses penimbangan, beban yang diberikan mengakibatkan reaksi terhadap elemen logam pada Load Cell yang mengakibatkan perubahan bentuk secara elastis. Gaya yang ditimbulkan oleh regangan ini (positif dan negatif) di conversikan kedalam sinyal listrik oleh strain gauge (pengukur regangan) yang terpasang pada spring element, yaitu ditempat yang mengalami pemanjangan dan pemendekan. Strain gauge yang dipasang pada bagian Exstend akan bertambah resistansinya sementara yang dipasang pada bagian Contract akan berkurang nilai resistansinya.

Strain gauge disusun dengan konfigurasi jembatan dengan suply sebesar 10 volt, dengan terjadinya regangan maka resistansi strain gauge berubah dan akan menyebabkan terjadinya perubahan tegangan output pada rangkaian bridge. Tegangan keluaran dari bridge ini masih sangat kecil sehingga perlu diperkuat, diolah serta dikondisikan untuk mendapatkan tegangan yang diperlukan untuk tingat berikutnya.

## 2.1 Penguat tak membalik.

Penguat tak membalik (*non inverting amplifier*) menguatkan sinyal input dengan penguatan  $V_o/V_i$  dan tidak terjadi pembalikan polaritas, artinya polaritas output sama dengan polaritas input. Pada penguatan dengan gain tinggi, maka nilai penguatan hanya tergantung pada Nilai  $R_f$  dan  $R_{in}$ , sedangkan pada penguatan rendah nilai gain-nya seperti pada Pers.1



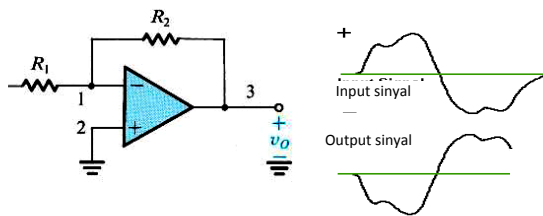
**Gbr 5a. Konfigurasi penguat non inverting**  
**5b. Polaritas input dan output non inverting**

Gain atau penguatan dari konfigurasi non inverting

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (1)$$

**2.2 Penguat Membalik**

Konfigurasi lain dari penguat opamp adalah penguat membalik (inverting amplifier). Penguatan  $A_v = V_o/V_i$  dan terjadi pembalikan polaritas antara input dan output.



Gbr 6a. Konfigurasi penguat inverting,  
Gbr 6b. Polaritas input dan output penguat

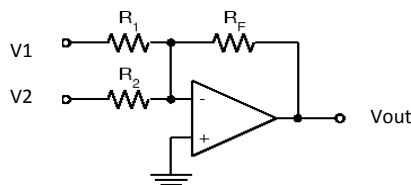
Seperti ditunjukkan pada Gbr 6a dan 6b, terjadi pembalikan polaritas antara input dan output. Penguatan atau gain dari penguat inverting

$$A_v = - \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Tanda (-) menunjukkan bahwa pada penguat tersebut terjadi pembalikan polaritas.

**2.3 Penguat penjumlah**

Penguat penjumlah (summing amplifier) pada dasarnya dua buah atau lebih penguat dengan unity gain yang dijadikan satu untuk mendapatkan fungsi matematik penjumlahan input. Penguat ini lazimnya dibangun dengan mode inverting karena pada mode ini nilai penguatan hanya ditentukan oleh nilai  $R_f$  dan  $R_{in}$ . Jika nilai  $R_f$  dan  $R_{in}$  dibuat sama maka nilai output akan merupakan penjumlahan dari inputnya. Untuk mendapatkan hasil yang tidak membalik maka pada output bisa di inverting lagi dengan unity gain.



Gbr 7 Penguat Penjumlah

Untuk  $R_1 = R_2 = R_{in}$ , Fungsi alih dari penguat penjumlah ini adalah

$$V_o = -(V_1 + V_2) \frac{R_f}{R_{in}} \quad (3)$$

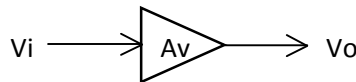
Jika  $R_f = R_{in}$  maka

$$V_o = -(V_1 + V_2) \quad (4)$$

## 2.4 Leveling Amplifier

Leveling amplifier atau interface analog diperlukan mengingat level tegangan input dan kebutuhan ADC tidak sama (*not equal span*) (Ron Mancini, 2005). Dengan leveling amplifier bisa diatur penyekalaan untuk menyesuaikan sesuai dengan kebutuhan (Chandrashekhara Mithlesh, 2012)

Secara matematis sebuah penguat akan mempunyai fungsi alih seperti digambarkan pada gambar 6.



Gbr 8 Fungsi alih penguat

Dimana

$$V_o = V_i \cdot A_v + C \quad (5)$$

C adalah konstanta bebas yang berasal dari system amplifier. Jika nilai  $C = 0$  maka fungsi alih adalah

$$V_o = V_i \cdot A_v \quad (6)$$

Dan disebut sebagai penguat ideal.

Jika rentang input berada pada  $V_i(1)$  sampai  $V_i(2)$  dan dikehendaki suatu output  $V_o(1)$  sampai  $V_o(2)$  dimana diantaranya tidak ada nilai 0 (nol) maka harus dilakukan dengan leveling amplifier dan tidak bisa dilakukan dengan amplifier ideal biasa.

Sesuai dengan pers (5) jika kebutuhan input output dimasukkan akan menjadi sbb:

$$V_o = V_i \cdot A_v + C$$

$$V_o(2) = V_i(2) \cdot A_v + C \quad (7)$$

$$V_o(1) = V_i(1) \cdot A_v + C \quad (8)$$

$$V_o(2) - V_o(1) = \{V_i(2) - V_i(1)\} \cdot A_v$$

$$A_v = \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} \quad (9)$$

Persamaan 9 menunjukkan bahwa penguatan untuk system leveling yang dikehendaki bisa dihitung karena  $V_o$  dan  $V_i$  diketahui. Substitusi pers 9 kesalah satu persamaan 7 atau 8 untuk mencari konstanta

Dari pers. 5 dan 9 suatu rentang nilai tegangan bisa didapat sehingga suatu sistem (misal ADC) bisa bekerja optimal sesuai dengan tegangan input yang dibutuhkan

$$V_o(2) = V_i(2) \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} + C$$

$$\text{Sehingga } C = V_o(2) - V_i(2) \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} \quad (10)$$

Dengan diketahui penguatan (pers 9) dan konstanta (pers 10) maka didapatkan fungsi alih

$$\text{dari leveling yang dikehendaki, yakni : } V_o = V_i \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} + \left\{ V_o(2) - V_i(2) \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} \right\}$$

## 2.5 ADC

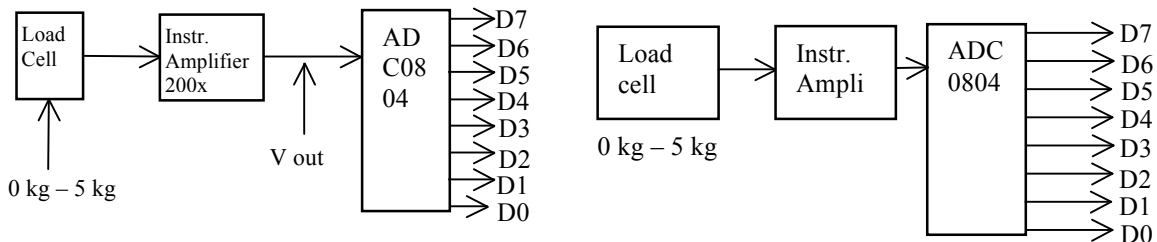
ADC 0804 merupakan rangkaian terintegrasi yang mampu mengubah masukan berupa tegangan analog menjadi data biner 8 bit. Dalam penelitian ini digunakan ADC diskrit untuk mempermudah memberikan gambaran akan upaya peningkatan atau optimalisasi ADC, meskipun dalam aplikasinya dapat digunakan pada ADC hybrid yang sudah terintegrasi dengan system yang lain. Seperti pada gbr konfigurasi standar ADC dengan input tegangan analog pada pin 6 dan data output D0 sd D7 pada pin 18 sd 11. Tombol start digunakan untuk memulai konversi secara manual, artinya setiap ada perubahan tegangan input perlu meng-enable tombol start untuk mendapatkan konversi. Untuk operasi normative, tegangan referensi diberikan  $\frac{1}{2} V_{cc}$  dan  $V_{in(-)}$  di-ground. Data keluaran



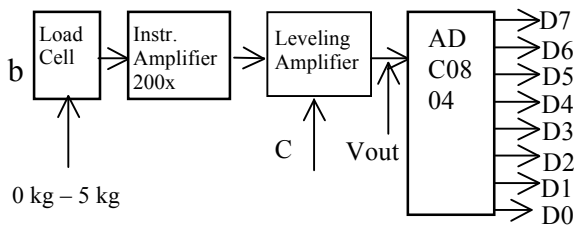
digunakan aktif high, artinya data logika tinggi (1) dinyatakan dengan LED yang menyala. Penggunaan ADC 0804 a

**METODE PENELITIAN**

Metode penelitian dilakukan dengan eksperimental pada pengukuran output timbangan yang melibatkan sensor berat Load Cell dan ADC 8 bit dari type 0804. Eksperimen dilakukan pada rentang beban antara 0 kg sampai 5 kg penguat instrumentasi dan rangkaian leveling amplifier.



**Gbr 10a. Konversi output Load cell tanpa leveling**



**Gbr 10b. Konversi output load cell dengan leveling**

Gambar 10a memperlihatkan pengkondisian timbangan elektronik tanpa leveling (dikondisikan apa adanya) sedangkan gambar 10b. memperlihatkan rekayasa pengkondisian dengan menambah rangkaian leveling amplifier.

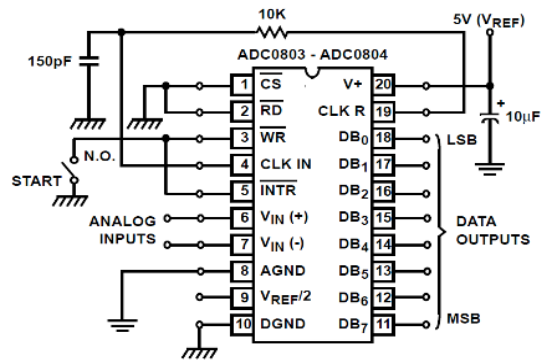
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Pengukuran output tanpa leveling amplifier**

Dibuat span kenaikan 0,5 kg pada pengamatan sensor berat Load Cell.

**Tabel 1. Pengujian timbangan tanpa leveling**

No	Berat kg	Vout (mV)	Output ADC	Bobot ADC
1	0	113	0000 0110	6
2	0,5	209	0000 1011	11
3	1	340	0001 0010	18
4	1,5	434	0001 0101	23
5	2	570	0001 1110	30
6	2,5	672	0010 0011	35
7	3	762	0010 1000	40
8	3,5	855	0010 1101	45
9	4	970	0011 0011	51
10	4,5	1045	0011 0111	55
11	5	1200	0011 1110	62



Gbr 9 Konfigurasi rangkaian ADC

Tabel 1 memperlihatkan hasil pengukuran respon output dari sensor Load Cell yang dihubungkan dengan penguat dengan gain 200x

**4.2 Perencanaan leveling**

Leveling Amplifier diharapkan bisa memberikan output 0 Volt saat berat 0 kg (113 mV) dan 5 Volt saat berat 5 kg (1200 mV). Hal ini dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan full scale ADC seperti Gambar 2, dimana output minimum dari timbangan akan dibuat menjadi 0 dan output maksimum dari timbangan akan dibuat menjadi 5 Volt .Dari kebutuhan ini diketahui  $V_i(1) = 113 \text{ mV}$ ,  $V_i(2) = 1200 \text{ mV}$ ,  $V_o(1) = 0 \text{ V}$  dan  $V_o(2) = 5 \text{ Volt}$ . Mengacu pada pers.7 & 8

$$\begin{aligned} 5000 &= 1200A_v + C \\ 0 &= 113 A_v + C \end{aligned}$$


---


$$\begin{aligned} 5000 &= 1087A_v \\ A_v &= 4,6 \end{aligned}$$

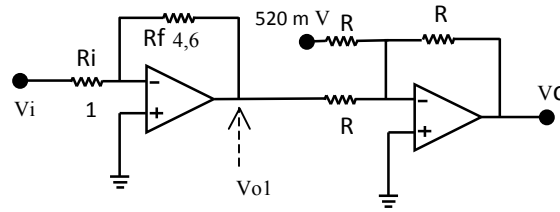
Substitusi kesalah satu persamaan, ditemukan  $C = 520 \text{ mV} = 0,52 \text{ Volt}$

$$V_o = V_i \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} + \left\{ V_o(2) - V_i(2) \frac{V_o(2) - V_o(1)}{V_i(2) - V_i(1)} \right\}$$

$$V_o = V_i \frac{5000 - 0}{1200 - 113} + \left\{ 5000 - 1200 \frac{5000 - 0}{1200 - 113} \right\}$$

$$V_o = 4,6V_i - 520$$

Dari perhitungan ini maka rangkaian leveling yang dibutuhkan adalah sebuah penguat dengan penguatan  $A_v = 4,6$  dan ditambah dengan konstanta  $- 520 \text{ mV}$



Gbr 11. Rangkaian leveling

Tabel 2 Test rangkaian leveling

Vi (mV)	Vo1(mV)	Vo (mV)
113	-520	0
1200	-5520	5000

Secara perhitungan maka rangkaian Gbr 11 sudah sesuai seperti yang diharapkan (tabel 2)

#### 4.3 Pengukuran dengan leveling amplifier

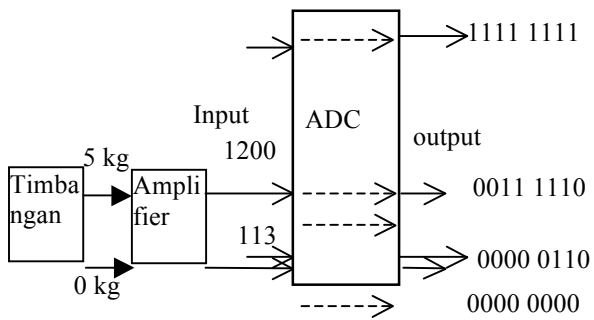
Pengukuran selanjutnya adalah dengan melakukan penimbangan dimana rangkaian timbangan dikondisikan dengan menambah rangkaian leveling dengan susunan seperti Gambar 10b. Span beban tetap 0 – 5 kg dengan jangkah 0,5 kg seperti Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian timbangan dengan leveling

No	Berat kg	Vout (mV)	Output ADC	Bobot ADC
1	0	48	0000 0010	2
2	0,5	570	0001 1110	30
3	1	1030	0011 0111	55
4	1,5	1560	0101 0010	82
5	2	1940	0110 0110	102
6	2,5	2360	0111 1101	125
7	3	2930	1001 1010	154
8	3,5	3334	1010 1111	175
9	4	3830	1100 1010	202
10	4,5	4332	1110 0100	228
11	5	4870	1111 1100	252

#### 4.4 Pembahasan

Menghubungkan data pada tabel 1 maupun tabel 2 dengan Gambar 1b dan Gambar 2 diperoleh ilustrasi sbb:



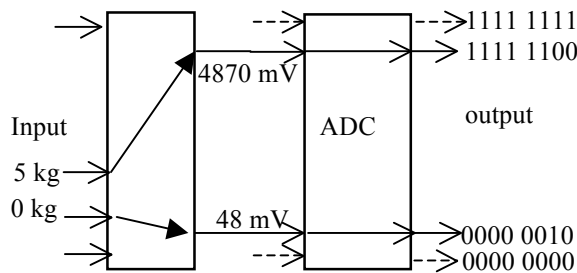
Gbr 12 ADC dengan pengkondisian tanpa leveling amplifier.

Dari gambar 12 dimana pengkondisian tanpa leveling amplifier didapat nilai output analog maupun digital yang linier saja. Pada beban 0 kg didapat output amplifier 113 mV, dengan resolusi standar ADC sekitar 19 mV/bit didapat keluaran ADC 0000 0110b atau 6d. Sedang pada beban 5 kg didapat output 1200 mv atau biner 00111110 dengan bobot 62. Dari analisa ini maka output ADC dengan bobot 63 s/d 255 tidak terpakai dan 0 s/d 6 juga tidak terpakai.

$$\%ADC = \frac{62 - 6}{255} \times 100\% = 22\%$$

Resolusi per bit

$$Resolusi = \frac{5000 - 0}{62 - 6} = 89 \text{ grm / bit}$$



Gbr 13. ADC dengan pengkondisian dengan leveling amplifier.

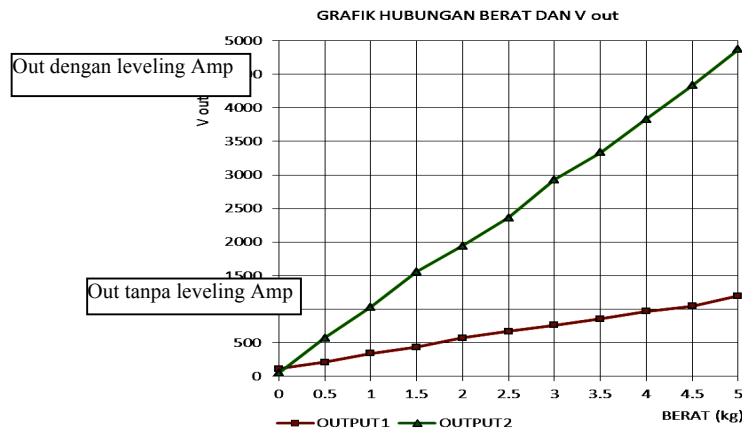
Dari ilustrasi Gambar 13, pada beban 0 kg memberikan output analog 48 mV dan ADC 0000 0010b atau 2d. Sedangkan pada beban 5 kg output analog 4870 mV atau ADC 1111

1100b atau 252d. Dari ilustrasi tersebut terjadi kenaikan resolusi maupun persentase penggunaan ADC.

$$\%ADC = \frac{252 - 2}{255} \times 100\% = 98\%$$

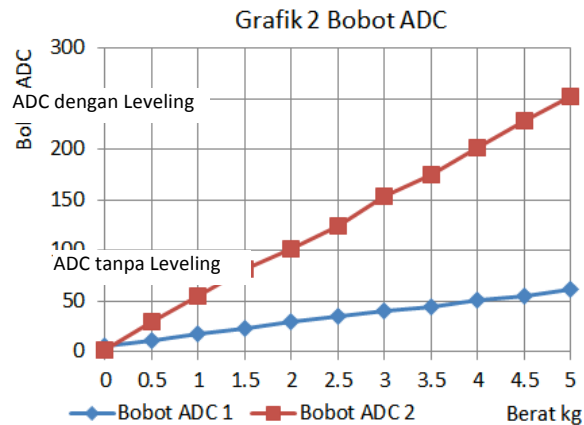
Resolusi per bit

$$Re\ solusi = \frac{5000 - 0}{252 - 2} = 20\text{ grm} / \text{ bit}$$



Gbr 14. Grafil output pengkondisi sinyal

Gambar 14 memperlihatkan perbandingan output pengkondisi baik tanpa leveling maupun dengan leveling. Tanpa leveling pengkondisi memberikan rentang output antara 113 mV sampai 1200 mV untuk beban 0 – 5 kg (sekitar 22% penggunaan ADC) Sedangkan dengan menggunakan leveling didapat output antara 48 mV sampai 4870 mV yang mendekati kebutuhan optimal input ADC 0804 (sekitar 98% penggunaan ADC).



**Gbr 15. Grafik Pemakaian ADC**

Peningkatan resolusi dalam penimbangan

$$\% \text{Res} = \frac{86 - 20}{20} \times 100\% = 345\%$$

## KESIMPULAN

Leveling amplifier bisa memperbaiki kinerja ADC dengan meningkatkan resolusi tiap step bit secara perangkat keras (hardware). Tanpa rangkaian leveling,

Penggunaan ADC 22%, Resolusi timbangan 89 gram/bit. Dengan rangkaian Leveling amplifier

Penggunaan ADC 98% Resolusi timbangan 20 gram/bit. Penggunaan ADC maupun resolusi terjadi peningkatan lebih dari 345 %.

## DAFTAR PUSTAKA

Dafid F, Stout, Handbook of Operational Amplifier Circuit Design, McGraw-Hill Book Company, 1976

Chandrashekar Mithlesh, A.S Umesh, *Design and Simulation of Op Amp Integrator and Its Applications*, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-1, Issue-3, February 2012

Ron Mancini, Sensor to ADC-Analog Interface Design, Analog Application Journal, Texas Instrument, 2005,

<http://www.ti.com/lit/an/slyt173/slyt173.pdf>