

Rancang Bangun Spirometer Berbasis Komputer Untuk Pengukuran Volume Cadangan Inspirasi, Ekspirasi, dan Kapasitas Vital Paru

Shindu Ramandita¹, Drs. R. Arif Wibowo, M.Si², Triwiyanto, S.Si, M.T³

^{1,2} Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga

³ Jurusan Teknik Elektromedik, Politeknik Kesehatan Kementrian Kesehatan Surabaya
e-mail : ramandita.shindu@gmail.com

Abstrak

Paru-paru merupakan organ vital pada sistem respirasi yang berhubungan dengan sistem peredaran darah manusia dan perlu untuk diperhatikan, sebab paru-paru bertugas untuk melakukan pertukaran gas untuk menstabilkan suplai oksigen pada aliran darah manusia. Fungsi paru-paru ini dipengaruhi oleh proses ventilasi paru-paru, proses difusi di alveoli serta sirkulasi darah yang baik. Ventilasi paru-paru yang baik dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain besarnya volume paru-paru statik dan dinamik. Dengan mengukur volume paru-paru dapat diketahui kemampuan paru untuk mengembang, serta ada atau tidaknya obstruksi dan restriksi. Spirometri adalah suatu metode untuk menilai fungsi paru-paru dengan mengukur volume udara yang dikeluarkan oleh pasien dari paru-paru saat ekspirasi. Pada penelitian ini dirancang sebuah spirometer digital untuk pengukuran Inspiratory Reserve Volume (IRV), Expiratory Reserve Volume (ERV) dan Vital Capacity (VC) berbasis mikrokontroler ATmega16. Sensor yang digunakan pada mouthpiece merupakan sensor tekanan MPX2050 GP, dengan tampilan hasil pengukuran pada komputer. Kalibrasi alat menggunakan peak flow meter untuk mengukur volume ekspirasi puncak. Perancangan untuk analisis, tampilan spirogram serta volume kapasitas paru-paru menggunakan Delphi. Konversi dari tekanan terukur menjadi volume menggunakan dasar rumus Poiseuille, dimana tingkat akurasi alat sebesar 83.63%.

Kata kunci : Spirometer, Volume Paru, Mikrokontroller

Abstract

Lungs are vital organs in the respiratory system associated with the circulatory system of humans that need to be considered, because lungs is responsible for gas exchange to stabilizing the supply of oxygen in the human bloodstream. Lungs function is highly influenced by process lungs ventilation, diffusion process in the alveoli and blood circulation. Lungs ventilation was favorably affected by many factors, including the magnitude of static and dynamic lung volumes. By measuring the volume of lungs capability the lungs to expand can be determined, as well as whether there is any obstruction and restriction. Spirometry is a method for assessing lungs function by measuring the volume of air expelled by lungs of a patient during expiration. In this study a digital spirometer was designed for Inspiratory Reserve Volume (IRV), expiratory Reserve Volume (ERV) and Vital Capacity (VC) measurement based on ATmega16 microcontroller. Sensor that used in its mouthpiece is MPX2050 GP pressure sensor, with measurement results display on the computer. Instrument calibration is using a peak flow meter to measure the peak expiratory volumes. Designs of analysis, display and volume spirogram lung capacity are using Delphi. Conversion of the measured pressure to a volume based on Poiseuille formula, with accuracy rate of 83.63%.

Keywords: Spirometer, Lungs Volume, Microcontroller

PENDAHULUAN

Paru-paru merupakan organ vital pada sistem pernapasan (respirasi) yang berhubungan dengan sistem peredaran darah (sirkulasi) manusia, paru-paru (yang sering disebut dengan paru) sangat penting untuk diperhatikan, sebab organ ini bertugas untuk melakukan pertukaran gas untuk menstabilkan suplai oksigen pada aliran darah manusia, proses pertukaran oksigen ini dilakukan melalui sistem peredaran darah kecil yaitu ketika darah dipompa menuju paru-paru untuk melakukan pembuangan gas karbondioksida (CO_2) dan untuk mengangkut gas oksigen (O_2). Jika darah mengalami kekurangan oksigen, maka tubuh akan mengalami ketidakseimbangan, salah satu contohnya adalah otak, dimana saat otak mengalami kekurangan oksigen, maka manusia akan merasa lelah dan lesu karena dampak kurangnya suplai oksigen. Tanpa bernafas tentu manusia tidak akan dapat hidup, karena oksigen dibutuhkan oleh darah yang akan didistribusikan ke seluruh tubuh untuk dapat menjalankan fungsinya, sehingga paru-paru penting untuk dijaga dengan baik.

Fungsi paru-paru ini dipengaruhi oleh proses ventilasi paru-paru (pertukaran udara antara udara luar hingga ke alveoli paru-paru), proses difusi di alveoli serta sirkulasi darah yang baik. Ventilasi paru-paru yang baik dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain besarnya volume paru-paru statik dan dinamik. Dengan mengukur volume paru-paru dapat diketahui kemampuan paru untuk mengembang, serta ada atau tidaknya kelainan paru (obstruksi dan restriksi).

Spirometri adalah suatu metode untuk menilai fungsi paru-paru dengan mengukur volume udara yang dikeluarkan oleh pasien dari paru-paru saat ekspirasi. Ini adalah metode yang dapat diandalkan untuk membedakan antara gangguan saluran napas obstruktif (misalnya asma) dan penyakit restriktif (di mana ukuran dari paru-paru berkurang, misalnya penyakit paru-paru fibrosis). Spirometri merupakan cara yang paling efektif menentukan tingkat keparahan penyakit kronis pada paru [7].

Beberapa volume dan kapasitas pada paru yang dapat diukur adalah volume tidal (TV), yaitu volume udara yang diinspirasikan dan diekspirasikan pada setiap pernapasan normal, volume ini menggambarkan secara sekilas kondisi respirasi seseorang, volume cadangan inspirasi (IRV) yaitu volume tambahan udara yang dapat diinspirasikan di atas volume tidal normal, volume cadangan ekspirasi (ERV) yaitu jumlah udara yang masih dapat dikeluarkan dengan ekspirasi kuat setelah akhir suatu ekspirasi, dan kapasitas vital (VC), yaitu volume inspirasi cadangan yang dijumlahkan dengan volume tidal dan volume ekspirasi cadangan

yang merupakan jumlah udara maksimal yang dapat dihirup dari paru-paru setelah inspirasi dan ekspirasi maksimal [12].

Alat yang digunakan untuk mengukur volume paru disebut spirometer. Spirometer merupakan salah satu peralatan yang digunakan untuk dasar tes fungsi paru sebagai ujian pendahuluan kondisi kesehatan paru-paru pasien. Selain itu, pengujian menggunakan spirometer ini sering digunakan untuk mencari penyebab sesak napas, menilai dampak kontaminan pada fungsi paru-paru, efek obat-obatan, dan proses untuk pengobatan penyakit.

Namun, kebanyakan spirometer yang dibuat memberikan keluaran (output) berupa spirogram yang tercetak pada lembaran kertas, data keluaran masih analog belum digital, sehingga tidak dapat diolah langsung dengan komputer. Sedangkan spirometer yang canggih, disamping harganya mahal, prosedur pengelolaannya rumit dan memerlukan teknisi yang terlatih untuk mengoperasikannya [11].

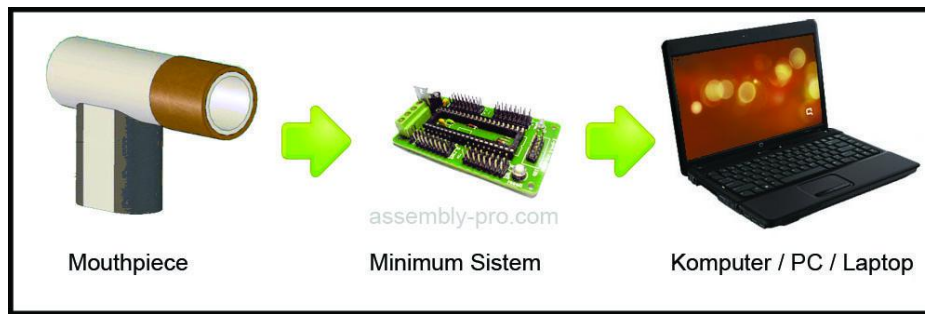
Di sisi lain, beberapa tahun belakangan ini penelitian yang melibatkan *Personal Computer* (PC) sudah mulai banyak dikembangkan. Manfaat penggunaan PC dalam spirometer adalah analisis hasil spirogram yang diolah kembali menggunakan peranti lunak (*software*) dapat menghasilkan diagnosis yang lebih akurat dan mudah untuk dioperasikan. Dengan menggunakan program pada PC, ahli medis, dokter dan tenaga medis lainnya dapat menambahkan kebutuhan lainnya seperti data, identitas pasien dan dapat disimpan dengan aman pada memori PC [11].

Dari fenomena ini, maka diperlukan sebuah inovasi untuk menciptakan sistem spirometer yang terkomputerisasi dengan harga terjangkau, mudah digunakan, biaya operasional rendah, serta dilengkapi dengan sistem uji volume dan kapasitas paru-paru yang dapat ditampilkan melalui layar komputer. Dengan melakukan pengembangan terhadap spirometer yang murah dan handal ini akan memungkinkan para dokter untuk membuat penilaian yang lebih akurat dan kuantitatif terhadap kesehatan paru-paru pasien, dan masyarakat pun dapat secara mandiri memiliki dan memanfaatkan spirometer untuk diagnosis dini terhadap kelainan paru-paru pada diri dan keluarganya.

METODE PENELITIAN

Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

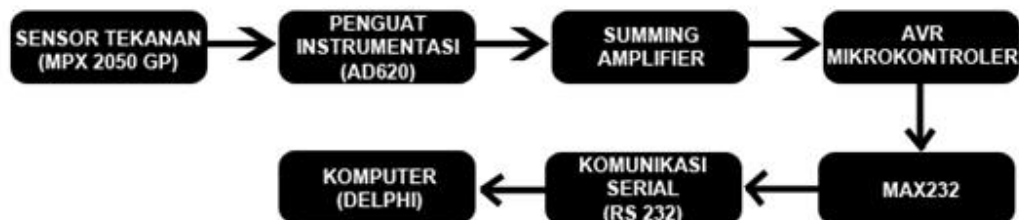
Pada penelitian ini, akan dirancang suatu sistem spirometer yang diprogram melalui PC yang menggunakan koneksi kabel serial, dan dilengkapi sensor tekanan MPX serta modul pada bagian *mouthpiece*. Skema perancangan alat secara lengkap pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema proses kerja alat Spirometer

Mouthpiece dilengkapi dengan sensor tekanan MPX dan penguat instrumentasi AD620 yang berfungsi untuk mengukur tekanan pada pipa mulut saat dioperasikan. Sensor MPX adalah sensor untuk mengukur tekanan udara, memberikan tegangan output yang akurat dan linier berbanding lurus dengan tekanan yang diterapkan. Kemudian *Minimum System* mengolah data IRV, ERV dan VC yang diterima. Rangkaian Amplifier adalah perangkat amplifier untuk memperkuat tegangan yang diperoleh oleh sensor MPX untuk diolah pada *Minimum System*. Komunikasi serial kabel RS232 digunakan sebagai penghubung antara *minimum system* dengan laptop.

Blok diagram spirometer pada Gambar 2 menggambarkan sistem spirometer secara keseluruhan dan hubungan antara rangkaian pendukung dengan komputer pribadi (PC).



Gambar 2 Blok Diagram Sistem Spirometer

Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Perancangan *software* pada laptop menggunakan Delphi 7.0, yang berfungsi untuk mengontrol kerja dan pengolah data yang kemudian akan ditampilkan pada layar monitor dengan hasil spirogram beserta hasil pengukuran volume paru orang coba. *flowchart software* dapat dilihat pada Gambar 5. Perancangan *software* meliputi proses interupsi orang coba, penampilan grafik spirogram program melalui monitor, serta penyimpanan data orang coba melalui memori komputer. Data yang diterima oleh komputer akan diolah oleh program Delphi yang kemudian akan menjadi output berupa laju aliran volume paru yang diukur dalam satuan (ℓ/detik). Untuk konversi dari tekanan menjadi volume menggunakan hukum Poiseuille dengan literatur rumus:

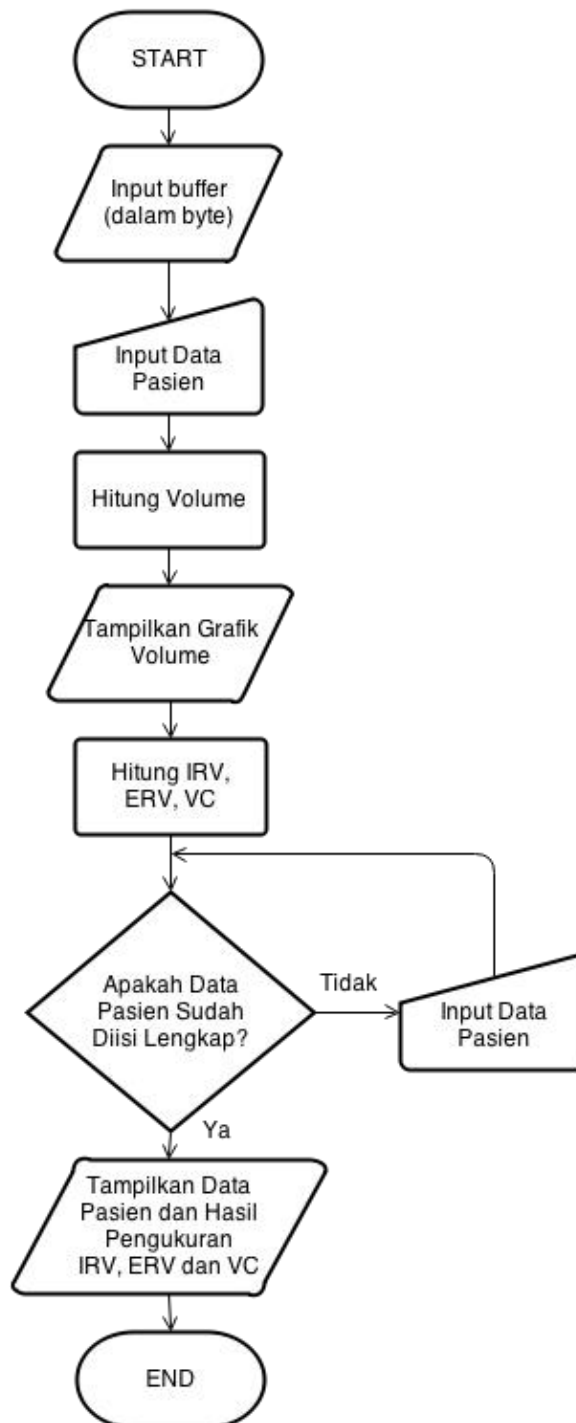
$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi r^4} I_V \quad (1)$$

sehingga diperoleh persamaan:

$$I_V = \Delta P \frac{\pi r^4}{8\eta L} \quad (2)$$

Sehingga output yang dihasilkan adalah laju aliran volume I_V yaitu volume per detik (V/t).

Diagram alir rancangan program spirometer digital seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram alir program

HASIL DAN PEMBAHASAN

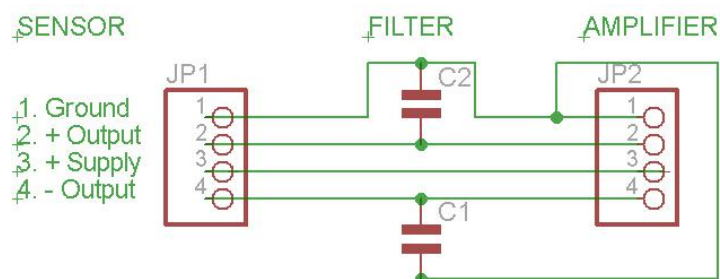
Mouthpiece

Mouthpiece berfungsi untuk menerima input berupa tekanan yang diberikan oleh orang coba, pada *mouthpiece* ini sensor MPX 2050 GP ditempatkan sebagai transduser yang berfungsi menerima tekanan yang diberikan oleh orang coba dan mengkonversikannya menjadi tegangan (V) yang selanjutnya diteruskan ke rangkaian *amplifier* dan ADC hingga diterima oleh program delphi pada PC.

Mouthpiece didesain sedemikian rupa untuk mendapatkan peletakan sensor yang tepat sehingga tekanan yang diterima dan udara yang ditiupkan orang coba tidak mampat di dalam pipa *mouthpiece*, salah satu cara untuk mengurangi mampat yang terjadi di dalam pipa adalah memberikan lubang ventilasi kecil pada ujung pipa untuk jalan keluar tekanan udara yang ditiupkan oleh orang coba.

Sensor MPX 2050GP

Sensor yang berada pada bagian dalam *mouthpiece* ditempatkan pada persimpangan pipa berbentuk T, sensor ini kemudian diberikan sepasang filter pada bagian output sensor untuk mengurangi *noise* yang dihasilkan dari sensor, filter ini adalah sebuah kapasitor berukuran 100 nano farad, peletakkannya adalah pada kedua ujung output, dimana kapasitor pada output positif dan negatif itu akan terhubung pada *ground* sensor (*Low Pass*) untuk menghilangkan *noise*.

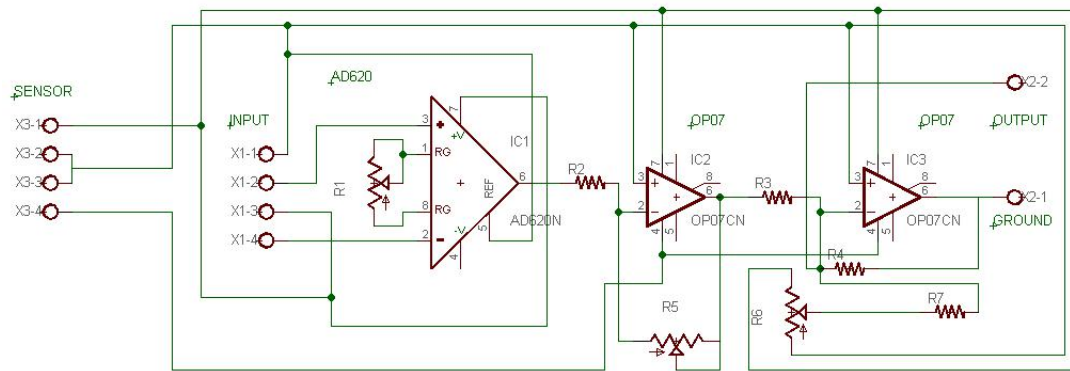


Gambar 4 Pemasangan filter pada sensor MPX 2050 GP

Penguat Amplifier AD620 dan *Summing*

Penguat amplifier AD620 berfungsi sebagai penguat input yang diterima sensor berupa tegangan. Pada hasil uji sensor, kondisi standar yang dimiliki sensor adalah 0,1 mV, selanjutnya input tersebut dilanjutkan menuju penguat amplifier AD620 yang disana akan mengalami penguatan tegangan hingga 186 kali.

Selanjutnya tegangan ini menuju rangkaian *summing* yang melalui penguat inverting dulu untuk menguatkan tegangan dan membalikkan nilai negatif yang dihasilkan.



Gambar 5 Rangkaian Penguat AD620 dan Summing Amplifier

Mikrokontroler

Mikrokontroler pada alat ini menggunakan IC AT Mega 16 dengan menggunakan kristal 11.059200 MHz, mikrokontroler ini berfungsi sebagai regulator dan juga sebagai penghubung antara komputer dan sensor dengan menggunakan koneksi serial dan sensor sebagai transduser untuk menerima input dari orang coba. Regulator ini berfungsi membatasi tegangan yang masuk ke dalam rangkaian mikrokontroler. Pada mikrokontroler ini batas tegangan maksimal yang digunakan adalah 5 volt. Mikrokontroler ini juga yang bertugas mengatur konversi tegangan yang diterima dari sensor menjadi data digital dalam satuan bit.

Pengolahan Data Menggunakan Delphi

Comport mengolah data yang diberikan oleh mikrokontroler agar dapat terbaca di Delphi. Untuk setting pada *comport* ini, *baud rate* yang diberikan harus disetel sama seperti *baud rate* yang ada pada mikrokontroler. Setelah melalui setting *comport* dan program pada AVR, selanjutnya adalah mengolah data *buffer* yang diterima tadi menjadi grafik yang akan menunjukkan volume paru-paru. Dengan menggunakan rumus perbandingan antara tekanan dan byte pada ADC yang besarnya mulai dari 0 hingga 255 maka akan diperoleh nilai tekanan yang sebanding dengan byte yang digunakan sebagai acuan ukuran pada ADC.

Konversi tekanan menjadi volume menggunakan hukum *Poiseuille* dengan literatur rumus (2), dengan ΔP sebagai input tekanan yang sudah dikonversikan dalam satuan *byte*. Untuk viskositas menggunakan CO_2 pada manusia karena hembusan udara yang dikeluarkan oleh manusia adalah karbondioksida, viskositasnya (η) adalah $149,332 \mu\text{P}$ yang kemudian disesuaikan menjadi satuan Poise yaitu $149,332 \times 10^{-6} \text{ P}$, yang pada akhirnya hasil pengukuran *flow* dapat diperoleh menggunakan implementasi tersebut. Kondisi yang tercatat adalah kondisi pengukuran pada saat $t=1 \text{ s}$, sehingga didapat nilai volume paru.

Untuk memulai pengukuran maka kondisi *standby* harus disesuaikan pada kondisi 2300-2800 dimana kondisi tersebut adalah kondisi pernafasan tidal pada manusia normal yaitu sekitar 500 ml. Sehingga saat pengukuran dilakukan, orang coba akan melakukan pernafasan tidal seperti kondisi normal yang terukur menggunakan spirometer.

Untuk mendapatkan nilai ERV, maka saat orang coba menghembuskan nafas semaksimal mungkin maka nilai volume akan menurun hingga titik puncak ekspirasi yang bisa dilakukan orang coba, sehingga akan diperoleh nilai pengukuran volume terendah yang bisa dibaca oleh program yang dimana volume tersebut adalah volume residu yang tersisa pada paru-paru, kemudian untuk menghitung nilai ERV dari pengukuran tersebut adalah menghitung selisih antara nilai volume tidal terendah yaitu 2300 ml dengan volume residu yang terukur pada program, sehingga dari perhitungan selisih tersebut diperoleh nilai ERV yang diinginkan.

Untuk mendapatkan nilai IRV, ketika orang coba menghirup nafas semaksimal mungkin maka nilai volume akan bertambah hingga titik puncak inspirasi yang bisa dilakukan orang coba, sehingga akan diperoleh nilai pengukuran volume tertinggi yang bisa dibaca oleh program yang dimana volume tersebut adalah volume total paru-paru yang bisa disimpan pada paru-paru, kemudian untuk menghitung nilai IRV dari pengukuran tersebut adalah menghitung selisih antara nilai volume tidal tertinggi yaitu 2800 ml dengan volume total paru-paru yang terukur pada program, sehingga dari perhitungan selisih tersebut diperoleh nilai IRV yang diinginkan.

Selanjutnya untuk mengukur VC, dimana orang coba akan menghirup nafas semaksimal mungkin dilanjutkan dengan menghembuskan nafas semaksimal mungkin, maka program akan bekerja untuk mencari nilai tertinggi yang bisa dibaca dari inspirasi maksimal kemudian program akan mencari nilai terendah yang bisa dibaca yang selanjutnya adalah menghitung selisih dari nilai keduanya sehingga diperoleh nilai VC yang diinginkan.

Kalibrasi

Logika yang digunakan pada proses kalibrasi ini adalah membandingkan volume puncak ekspirasi (PEF) yang dihitung pada alat kalibrator (*Peak Flow Meter*) dengan hasil kapasitas vital paru paksa (FVC).

Pada proses kalibrasi, keluaran *flow* yang dihasilkan kompresor dipasangkan pada kalibrator (*Peak Flow Meter*) hingga rapat yaitu dengan menutup rapat bagian-bagian yang memungkinkan terjadinya kebocoran udara dan menyesuaikan hasil yang diperoleh hingga konstan menuju beberapa kondisi yaitu 250 lpm (liter per menit), 200 lpm, 150 lpm, 100 lpm

dan mengujinya sebanyak 6 kali untuk masing-masing kondisi. Hal yang sama dilakukan terhadap *mouthpiece* alat, kemudian dilakukan pencatatan.

Setelah hasil pengukuran diperoleh, maka data yang diperoleh spirometer yang masih dalam satuan mililiter (ml) dikonversi menjadi liter per menit (lpm) sesuai alat kalibrator, kemudian kalkulasi error dilakukan dengan menghitung satu per-satu hasil pengukuran dibandingkan dengan alat kalibrator (*Peak Flow Meter*). Setelah diperoleh error pada masing-masing data kemudian diambil rata-rata dari total error yang terjadi pada setiap kondisi pengukuran. Dari hasil kalibrasi, didapatkan rata-rata error alat sebesar 12.8% untuk kondisi kalibrator 250 lpm, 21% untuk kondisi kalibrator 200 lpm, 14% untuk 150 lpm, dan 17.67% untuk 100 lpm. Sehingga didapatkan rata-rata error alat sebesar 16.37% dan tingkat akurasi spirometer sebesar 83.63%.

Uji Coba Alat Pada Manusia

Setelah proses kalibrasi selesai, dilakukan pengujian alat pada manusia. Sebelumnya dilakukan *reset* pada program sehingga posisi standby berada pada posisi tengah volume tidal, yaitu 2550 ml; diperoleh dari perhitungan volume residu 1100 ml, volume ekspirasi 1200 ml, volume tidal 500 ml, dan volume inspirasi 2200. Setelah orang coba menggunakan *mouthpiece* dan penutup hidung, dilakukan pernapasan biasa (tidal).

Langkah pengukuran untuk mendapatkan ERV adalah dengan ekspirasi maksimal yaitu menghembuskan nafas sekuat-kuatnya, kemudian dilanjutkan dengan menghembuskan nafas seperti biasa. Untuk mendapatkan pengukuran IRV adalah dengan melakukan inspirasi maksimal yaitu menghisap nafas sekuat-kuatnya, dilanjutkan dengan menghembuskan nafas seperti biasa.

Pengukuran VC didapatkan dengan melakukan inspirasi maksimal yaitu menghisap nafas sekuat-kuatnya dilanjutkan ekspirasi maksimal yaitu menghembuskan nafas sekuat-kuatnya. Hasil dari pengukuran disajikan pada tabel sebagai berikut:

Tabel 1 Hasil Pengukuran Pada Manusia

Nama orang coba, Umur dan Jenis kelamin	Jenis Pengukuran	Pada Alat (ml)
Orang coba 1 23th, Pria	ERV	701
	IRV	387
	VC	2097
Orang coba 2	ERV	431
	IRV	402

23th, Pria	VC	1498
Orang coba 3 23th, Pria	ERV	251
	IRV	72
	VC	914
Orang coba 4 21th, Wanita	ERV	147
	IRV	522
	VC	1318
Orang coba 5 22th, Wanita	ERV	147
	IRV	282
	VC	1064
Orang coba 6 23th, Wanita	ERV	132
	IRV	147
	VC	779

Setelah proses pengukuran selesai, dari hasil yang ditunjukkan tersebut, terlihat bahwa volume paru pada pria lebih besar daripada wanita secara umum, hal ini disebabkan oleh beberapa perbedaan yang mungkin bisa mempengaruhi kapasitas paru manusia seperti pekerjaan, aktivitas, tinggi badan, berat badan, tempat tinggal dan umur. Beberapa kriteria diatas tentu akan mempengaruhi kapasitas dan volume paru pada seseorang, sebab mereka mempunyai kondisi lingkungan dan aktivitas yang tidak sama satu dengan yang lainnya.

Untuk visualisasi paru-paru, hasil yang diperoleh pada penelitian ini masih sederhana dan masih perlu dikembangkan lagi, karena pada program ini visualisasi masih menggunakan gambar biasa sebagai penunjuk kondisi pernafasannya. Untuk identifikasi obstruksi atau kelainan paru, spirometer digital ini bisa digunakan sebagai alat penunjang dari pembacaan data spirogram yang dihasilkan.

Alat ini telah dibandingkan dengan spirometer standar, hasil yang diperoleh menunjukkan nilai yang mendekati hasil yang terbaca pada spirometer standar tersebut. Pengukuran dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran yang dilakukan pada spirometer digital dengan spirometer standar. Hasil yang terhitung pada alat adalah 3,5 liter sedangkan pada spirometer digital adalah 3,2 liter dan 3,7 liter saat dilakukan pengukuran. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa tingkat akurasi alat cukup memadai untuk dilakukan pengukuran volume paru pada manusia.

KESIMPULAN DAN SARAN

Rancang bangun spirometer berbasis mikrokontroler dilengkapi analisis dengan menggunakan rumus Poiseuille sebagai konversi tekanan menjadi volume telah berhasil dilakukan, volume yang terukur kemudian ditampilkan sebagai nilai kapasitas paru IRV, ERV, dan VC yang ditampilkan dalam grafik spirogram. Tingkat akurasi spirometer digital yang telah dirancang adalah 83.63%.

Untuk meningkatkan keakuratan pengukuran maka diperlukan rangkaian pembatas tegangan pada input tegangan sensor yang dapat mempengaruhi hasil pembacaan data. Untuk meningkatkan kenyamanan penggunaan alat spirometer digital ini perlu ditambahkan karet pelindung *mouthpiece* berbahan karet sehingga lebih bersih dan higienis serta mudah dibersihkan. Tampilan visualisasi paru sebaiknya ditingkatkan menjadi lebih lembut dan *real* untuk mendapatkan visualisasi paru-paru yang lebih bagus. Serta sebaiknya ditambahkan parameter besaran fisis seperti tinggi badan, berat badan, pekerjaan, dan parameter-parameter lain yang mungkin diperlukan untuk penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adeniyi, B.O, Erhabor, G.E, 2011, *The Peak Flow Meter And Its Use In Clinical Practice*, African Journal of Respiratory Medicine.
- [2] Anonim, 2002, Atmel "Data Sheet 8-bit AVR Mikrokontroler ATmega16", Atmel Corporation.
- [3] Anonim, 2002, *Ultralow Offset Voltage Operational Amplifiers*, Analog Devices, Inc.
- [4] Anonim, 2008, *50 kPa On-Chip Temperature Compensated and Calibrated Silicon Pressure Sensors: MPX2050 Series*, Freescale Semiconductor, Inc.
- [5] Anonim, 2011, *Instrumentation Amplifier AD620*, Analog Devices, Inc.
- [6] Barrett, Kim, et al., 2010, *Ganong's Review of Medical Physiology*, 23rd Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [7] Bellamy, David, 2005, *Spirometry in Practice*, Second Edition, British Thoracic Society COPD Consortium.
- [8] CPSA, 1998, "Spirometry and Flow Volume Measurements, Standards & Guidelines", College of Physicians and Surgeons of Alberta.
- [9] Davidovits, Paul, 2008, *Physics in Biology and Medicine*, Third Edition, Academic Press, Elsevier Inc.
- [10] Giancoli, 1998, *Fisika*, Edisi Kelima, Jilid 1, Jakarta: Penerbit Erlangga
- [11] Glynn, Jeremy, et al., 2009, Low-cost, Open-source Spirometer.
- [12] Guyton, Arthur C., Hall, John E., 2006, *Textbook of Medical Physiology*, 11th Edition, Philadelphia, Pennsylvania: Elsevier Saunders.
- [13] Halsall, Fred, 1985, *Introduction to Communication and Computer Networks*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [14] Johns, David P., and Pierce, Rob, 2011, *Pocket Guide to Spirometry*, Third Edition, New South Wales, Australia: McGraw-Hill
- [15] O'Malley, John, 1992, *Schaum's Outline of Theory and Problems of BASIC CIRCUIT ANALYSIS*, Second Edition, The McGraw-Hill Companies Inc.

- [16]Price, Sylvia A, dan Wilson, Lorraine M., 1994, *Patofisiologi: Konsep Klinis Proses-Proses Penyakit*, Edisi 4, Jakarta: EGC

Disetujui oleh

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Drs. R. Arif Wibowo, M.Si
NIP. 19640928 199102 1 001

Triwiyanto, S.Si, M.T
NIP. 1973052 200312 1 002