

# Alat Mekanikal Sederhana Untuk Memprediksi Volume Tidal Paru-paru

Chong Wai Lup<sup>1,a)</sup> and Siti Nurul Khotimah<sup>1,b)</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Biofisika (Afiliasi Penulis Pertama dan Kedua),  
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>a)</sup> chwailup@gmail.com (corresponding author)

<sup>b)</sup> nurul@fi.itb.ac.id

## Abstrak

*Suatu alat mekanikal sederhana adalah suatu alat tanpa memakai listrik yang dapat dibangun ulang menggunakan materi yang mudah ditemukan dalam kehidupan sehari-hari. Volume tidal paru-paru merupakan volume paru-paru yang mewakili volume normal yang telah dipindahkan antara menarik dan menghembus nafas saat upaya lebih tidak dikenakan. Spirometer mekanikal sederhana ini adalah penting bagi masyarakat umum untuk mendeteksi penyakit paru-paru tanpa harus pergi ke rumah sakit.*

*Kata-kata kunci: sederhana, mekanikal, alat, paru-paru, volume tidal, spirometer*

## PENDAHULUAN

### Alat Mekanikal Sederhana

Banyak daripada alat-alat yang ditemukan dalam kehidupan sehari-hari manusia memiliki bahan utama yang berbasis elektronik. Alat-alat ini menggunakan sensor dalam mendeteksi perubahan dari parameter fisik dan transduser untuk mengkonversikannya ke sinyal listrik.

Alat mekanikal tidak wajib memiliki bagian elektronik dan tidak memerlukan listrik untuk berfungsi. Suatu alat mekanikal sederhana berarti suatu alat yang tidak menggunakan listrik dan tidak rumit serta mudah untuk dibangun dari bahan-bahan yang dapat ditemukan dalam kehidupan sehari-hari.

### Paru-paru

Kapasitas total paru-paru orang dewasa adalah 6 liter [1]. Ukuran paru-paru manusia ditentukan oleh genetik, kelamin dan tinggi badan. Faktor-faktor lain seperti obesitas dan tinggal di tanah tinggi juga memberi kontribusi kepada ukuran paru-paru. Sebagai contoh, orang yang tinggal di tempat yang lebih tinggi memiliki paru-paru yang lebih besar daripada mereka yang tinggal di tempat yang lebih rendah.

### Volume Tidal

Volume tidal adalah volume paru-paru yang mewakili volume udara normal yang dipindahkan antara menarik dan menghembus nafas saat tanpa upaya lebih dikenakan [2]. Dalam orang dewasa muda dan sehat, volume tidalnya adalah kira-kira 500 mL per inspirasi atau 7 mL / kg massa tubuh.

**Pengukuran Volume Paru-paru**

Volume paru-paru dapat diukur dengan suatu teknik yang dikenal sebagai spirometri. Lazimnya seseorang perlu ke rumah sakit untuk mengukur volume paru-parunya. Perangkat yang digunakan untuk spirometri adalah spirometer. Pengetahuan tentang volume paru-paru penting terutama untuk diagnosa penyakit yang terkait dengan paru-paru seperti asma dan penyakit gangguan kronik pulmonari (*chronic obstructive pulmonary disease*) [2].

**Tujuan Proyek**

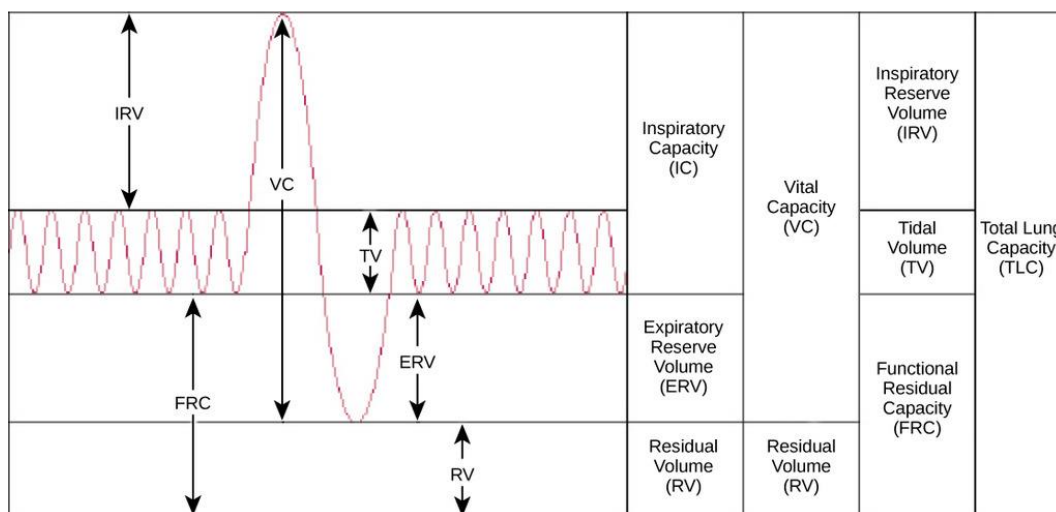
Tujuan dari proyek ini adalah untuk membuat suatu alat mekanikal sederhana untuk memprediksi volume tidal paru-paru. Sub tujuan adalah untuk mengestimasi volume cadangan (*reserve*) inspiratory, volume cadangan ekspiratori dan volume sisa (*residual*).

Percobaan yang berhasil dalm proyek ini sangat berguna dan praktis bagi masyarakat umum untuk mengestimasi volume tidal paru-paru mereka tanpa perlu berkunjung ke klinik kesehatan atau rumah sakit.

**TEORI**

**Volume dan Kapasitas Paru-paru Manusia**

Ada perbedaan antara volume dan kapasitas paru-paru. Ini dapat dilihat jelas pada Gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Volume dan kapasitas paru-paru

Volume paru-paru mengukur jumlah udara pada suatu fungsi seperti menarik nafas dan dapat dibagi kepada 4 unit:

- (1) Volume tidal (TV);
- (2) Volume cadangan (*reserve*) ekspiratori (ERV);
- (3) Volume cadangan (*reserve*) inspiratori (IRV);
- (4) Volume sisa (*residual*) (RV);

Kapasitas paru-paru pula terdiri dari dua atau lebih volume yaitu:

- (1) Kapasitas total paru-paru (TLC);
- (2) Kapasitas vital (VC);
- (3) Kapasitas inspiratori (IC);
- (4) Kapasitas sisa (*residual*) fungsional (FRC);

Terdapat perbedaan volume paru-paru antara pria dan wanita. Laki-laki secara relative memiliki volume paru-paru yang lebih besar seperti yang dapat dilihat pada Tabel 1 saat dibandingkan dengan yang perempuan. Akan tetapi, untuk volume tidal, baik laki-laki atau perempuan masing-masing memiliki rata-rata volume yang sama yaitu 0.5 liter.

Tabel 1. Volume rata-rata paru-paru orang dewasa yang sehat [3]

Volume	Volume (liter)	
	Pria	Wanita
Volume cadangan inspiratori (IRV)	3.1	1.9
Volume tidal (TV)	0.5	0.5
Volume cadangan ekspiratori (ERV)	1.2	0.7
Volume sisa (RV)	1.2	1.1

Rangkuman untuk kombinasi berbeda volume paru-paru yang membentuk kapasitas paru-paru dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Kapasitas paru-paru orang dewasa yang sehat [3]

Volume	Volume rata-rata (liter)		Turunan
	Pria	Wanita	
Kapasitas vital	4.6	3.1	IRV + TV + ERV
Kapasitas inspiratori	3.5	2.4	IRV + TV
Kapasitas sisa fungsional	2.3	1.8	ERV + RV
Kapasitas paru-paru total	5.8	4.2	IRV + TV + ERV + RV

### Rasio Volume Tidal

Rasio volume tidal relatif kepada ketiga jenis volume lain dapat dihitung dengan menggunakan angka pada Tabel 1.

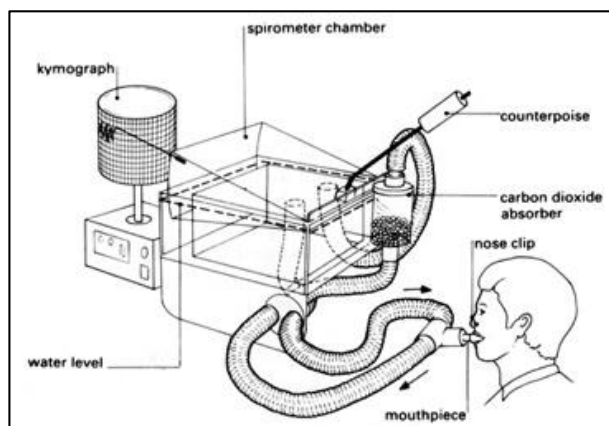
Untuk laki-laki, rasio volume tidal terhadap volume cadangan inspiratori adalah 0.161, rasio volume tidal terhadap volume cadangan ekspiratori adalah 0.417 dan ratio volume tidal terhadap volume sisa adalah 0.417.

Untuk perempuan, rasio volume tidal terhadap volume cadangan inspiratori adalah 0.263, rasio volume tidal terhadap volume cadangan ekspiratori adalah 0.714 dan ratio volume tidal terhadap volume sisa adalah 0.455.

Rasio-rasio tersebut dapat digunakan untuk memprediksi harga volume cadangan inspiratori, volume cadangan ekspiratori dan volumen sisa ketika volume tidal sudah diketahui.

### Spirometer Air

Spirometer air adalah instrumen untuk mengukur volume inspiratori, ekspiratori dan tidal paru-paru. Spirometer ini terdiri dari suatu bagian mulut untuk menghembus dan menarik nafas seperti yang di Gambar 2 di bawah. Penyerap karbon dioksida (biasanya *soda lime*) berada di selang menarik nafas untuk menghindari orang yang sedang menggunakan spirometer dari menghirup karbon dioksida yang berlebihan.



Gambar 2. Spirometer air [4]

Katup-katup ada di kedua selang menarik dan menghembus bafas untuk memastikan aliran udara pada satu arah. Aliran udara saat menarik nafas (menuju ke orang) dan menghembus nafas (menuju ke spirometer) adalah berlawanan antara satu sama lain.

Imbangan (*counterbalance*) digunakan untuk mengimbangi gerakan ruangan spirometer saat bergerak ke atas dan bawah. Saat udara mulai memenuhi ruangan spirometer, imbangan akan membantu untuk mengangkatnya dengan pelan.

Ruangan spirometer akan bergerak ke atas dan bawah ketika pernafasan dan pergerakannya dapat direkam menggunakan *kymograph* berupa silinder berotasi dengan pena yang dapat melacak pada kertas graf.

Volume sisa (*residual*) tidak dapat diukur secara fisik karena tidak mungkin bagi seseorang untuk menghembus keluar semua udara dari paru-paru. Jikalau ada orang yang dapat melakukan itu, paru-parunya akan gagal total. Jadi, volume sisa lazimnya ditentukan dari informasi volume yang lain.

### Mendeteksi Penyakit Paru-paru

Penggunaan spirometer untuk spirometri penting untuk mendeteksi penyakit paru-paru seperti asma dan penyakit gangguan kronik pulmonari (*chronic obstructive pulmonary disease, COPD*) [2]. Seseorang yang menderita COPD ketika dia memiliki satu atau lebih dari tanda-tanda seperti berikut:

- (1) Batuk yang berlangsung lama (lebih lama dari 3 bulan);
- (2) Batuk berlendir;
- (3) Pernafasan pendek;
- (4) Infeksi paru-paru (flu, bronkhitis akut, radang paru-paru dll) yang berlangsung lebih lama dari orang lain;
- (5) "Wheezing" (mendesah - suara bersiul saat bernafas);
- (6) Merasa lelah;
- (7) Kehilangan berat badan tanpa upaya;

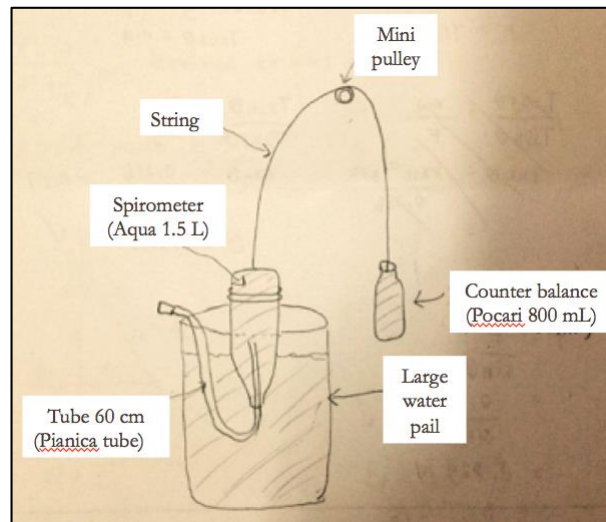
## METODOLOGI

### Spirometer Air Sederhana

Percobaan pertama dilakukan menggunakan materi dan bahan seperti di Gambar 3:

- (1) satu katrol mini;
- (2) satu tali panjang (3 m);
- (3) satu botol air mineral *Aqua* (1.5 L);
- (4) satu botol *Pocari Sweat* (800 mL);

- (5) satu ember besar;
- (6) satu selang pianika (panjang total 0.5 m);



Gambar 3. Setelan untuk percobaan pertama

Sebelum mencapai setelan seperti di atas yakni setelah beberapa persiapan tahapan awal, ada beberapa perubahan yang telah dilakukan. Perubahan yang dilakukan adalah seperti berikut:

- (1) daripada memakai plastisin sebagai imbalan pada tahapan awal, botol *Pocari Sweat* 800 mL digunakan sebagai pengganti imbalan. Ini dilakukan karena plastisin terlalu ringan untuk mengangkat botol saat udara mulai memenuhi botol besar;
- (2) plastisin pada mulanya dipakai untuk mengamankan posisi selang pada mulut botol *Aqua* 1.5L (sebagai spirometer). Ini adalah untuk memastikan selang tetap di posisi saat udara mulai memenuhi botol besar dan selang tidak keluar dari mulut botol. Setelah persiapan tahapan awal, penggunaan plastisin pada bagian mulut botol ditingkirkan karena ia tidak cukup merekat dan mulai pecah kepada bagian-bagian kecil mengotori air;
- (3) botol *Big Cola* 3L yang digunakan pada tahapan awal telah diganti dengan ember besar setelah menemukan kesulitan untuk mengamankan posisi selang saat udara mulai masuk ke dalam botol. Selang juga tidak cukup panjang terutamanya saat botol mulai diangkat ke atas saat dipenuhi udara dan selang lepas dari botol *Big Cola*
- (4) Satu lagi katrol mini ditambahkan dengan tali yang lebih panjang agar jarak antara imbalan dan botol spirometer semakin jauh untuk menghindari tabrakan antara imbalan dan botol;
- (5) Berat pada imbalan dicocokkan dengan waktu untuk mengangkat botol spirometer saat udara mulai memenuhi supaya cukup pelan untuk pengamatan dan merekam data menggunakan spirogram (pensil dan kertas graf) nanti;
- (6) Selang yang lebih panjang digunakan;
- (7) Pensil akan diikat pada sudut tegak pada bagian kiri imbalan. Ini untuk memastikan pensil tetap pada posisi saat merekam gerakan pada kertas graf;

### Percobaan Kedua

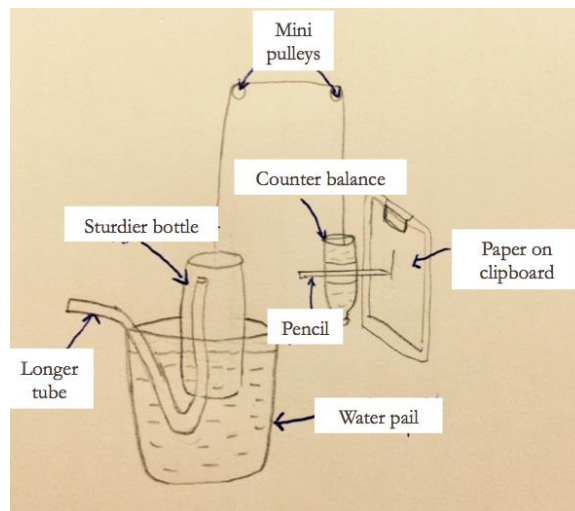
Ini adalah tindak lanjut dari percobaan pertama. Di bawah adalah daftar materi dan bahan yang dipakai:

- (1) Dua katrol mini;
- (2) Satu tali panjang (3 m);
- (3) Satu botol minum (1.2 L);
- (4) Satu botol *Pocari Sweat* (800 mL);

- (5) Satu ember besar;
- (6) Satu selang transparan berdiameter 0.8 cm (panjang 1m);

Beberapa modifikasi telah dilakukan pada percobaan kedua, yaitu:

- (1) Selang yang lebih panjang untuk menggantikan selang pianika yang lebih pendek sebelum ini (untuk memudahkan pergerakan selang untuk meniup udara ke dalam botol);
- (2) 2 katrol mini digunakan (untuk gerakan yang lebih mulus);
- (3) Tinggi imbang dan botol telah dibetulkan pada tinggi yang sesuai (agar imbang akan berada di lantai saat botol mencapai tinggi mulut ember);
- (4) Satu pensil telah dipasang pada imbang dan satu papan jepit (*clipboard*) beserta kertas graf diperkenalkan pada percobaan ini ;



Gambar 4. Setelan percobaan kedua

Proses dari percobaan kedua adalah seperti berikut:

- (1) Pada mulanya, selang baru yang lebih panjang dipasang pada mulut botol besar dengan suatu logam dan pengikat kabel (*cabel tie*). Ini adalah untuk menghindari selang tersebut dari keluar dari posisi saat udara mulai memenuhi botol;
- (2) Kemudian, botol besar dipenuhi dengan air dan ditenggelamkan dalam ember air. Imbang juga dipenuhi sampai batas 250 mL (kira-kira sepertiga volume);
- (3) Dua katrol diamankan dengan tali rafia;
- (4) Udara dihembus oleh pengguna dan mulai memenuhi botol besar dengan udara;
- (5) Dapat diperhatikan bahwa botol besar bergerak pelan ke atas dan imbang bergerak ke bawah;
- (6) Tanda pensil direkam pada selembarnya kertas graf pada papan jepit;
- (7) Seluruh proses telah direkam menggunakan telpon genggam mode video;

Evaluasi dari percobaan kedua adalah seperti berikut:

- (1) Kedua botol bergerak pada laju yang cukup pelan untuk pensil menghasilkan goresan pada kertas;
- (2) Gerakannya cukup tegak;
- (3) Selang baru yang lebih panjang tidak mengganggu udara dari mengalir ke dalam botol dan selang lebih mudah untuk digerakkan (bengkok);
- (4) Setelan ini hanya dapat mengamati proses menghembus nafas;



Gambar 5. (a) Setelan keseluruhan. (b) Atas: dua katrol mini, Tengah:imbangan, pensil dan papan jepit dengan kertas graf, Bawah: Botol dengan selang panjang

### Kalibrasi dan Pengambilan Data

Setelah percobaan kedua, setelan sudah hampir sempurna untuk kalibrasi dan pengambilan data.

Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan gelas ukur 500 mL. Setelah botol minum besar (1.2 L) sudah dipenuhi dengan air, ia ditenggelamkan terbalik ke dalam ember air. Selang transparan (0.8 diameter) dimasukkan ke dalam botol. Udara dihembus ke dalam botol melalui selang tadi dan panjang garis yang digores dicatat. Proses tersebut diulangi tiga kali. Rata-rata diperoleh.

Volume tidal tiga peserta telah diperoleh. Informasi tentang ketiga peserta tersebut dapat dilihat di Tabel 3 di bawah.

Tabel 3. Informasi peserta yang terlibat dalam pengambilan data

	A	B	C
Kelamin	Laki-laki	Perempuan	Laki-laki
Usia (tahun)	34	34	36
Tinggi	173 cm	167 cm	170 cm
Massa	72 kg	76 kg	80 kg
Latar belakang	Mahasiswa Sehat	Ibu rumah tangga Perenang	Satpam Perokok

Setiap dari ketiga peserta diminta untuk menghembus nafas secara normal (tidak dipaksakan) untuk tiga kali. Volume tidal ketiga orang tersebut diprediksi dengan data kalibrasi dengan membandingkan panjang garis yang diperoleh.

## HASIL DAN DISKUSI

### Kalibrasi

Proses kalibrasi telah dicatat dan Tabel 4 menunjukkan volume rata-rata per unit panjang adalah 59.2 mL/cm.

Tabel 4. Data kalibrasi

Panjang garis (cm)	Volume (mL)	Volume / Panjang (mL/cm)	Rata-rata Volume / Panjang (mL/cm)
15.2	850	55.9	59.2
14.0	850	60.7	
13.1	800	61.1	

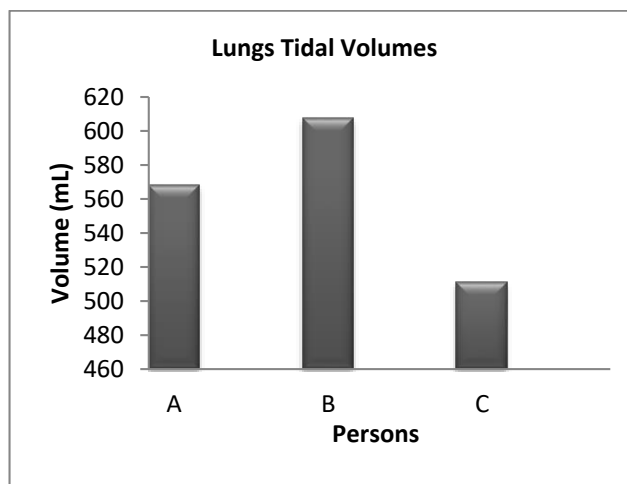
### Data

Data 3 peserta yang telah berpartisipasi dalam pengambilan data volume tidal dapat dilihat dari Tabel 5 di bawah.

Tabel 5. Volume tidal ketiga peserta

	Panjang garis (cm)	Konversi Volume (mL)	Rata-rata Konversi Volume (mL)
A	8.6	509	568
	9.7	574	
	10.5	622	
B	9.4	556	608
	12.6	746	
	8.8	521	
C	9.1	539	511
	7.5	444	
	9.3	551	





Gambar 6. Perbandingan volume tidal secara visual ketiga peserta

**Diskusi**

Daripada ketiga peserta yang terlibat dalam pengambilan data volume tidal, peserta B memiliki volume tidal terbesar pada 608 mL. Ini merupakan 108 mL lebih tinggi dari volume tidal rata-rata orang dewasa sehat (laki-laki dan perempuan). Ini mungkin dikarenakan peserta B adalah seorang perenang.

Peserta C memiliki volume tidal terkecil di antara 3 peserta. Peserta C adalah perokok dan mungkin karena itu peserta C memiliki rentan nafas yang lebih pendek dibandingkan dengan peserta A (568 mL) dan peserta B. Namun, tidal volume yang direkam adalah 511 mL, masih 11 mL di atas rata-rata.

Dari data volume tidal yang sudah dicatat, volume cadangan inspiratory, volume cadangan ekspiratori dan volume sisa dapat diproyeksikan dengan menggunakan rasio yang pernah didiskusikan sebelum ini. In dapat di lihat di Tabel 6, 7 dan 8.

Tabel 6. Estimasi volume cadangan inspiratori menggunakan rasio

	Volume cadangan inspiratori, IRV(liter)	% perbedaan dari rata-rata umum IRV
A (pria)	3.5	13.9
B (wanita)	2.3	21.6
C (pria)	3.2	2.4

Tabel 7. Estimasi volume cadangan ekspiratori menggunakan rasio

	Volume cadangan ekspiratori, ERV (liter)	% perbedaan dari rata-rata umum ERV
A (pria)	1.4	13.6
B (wanita)	0.9	21.6
C (pria)	1.2	2.1

Tabel 8. Estimasi volume sisa menggunakan rasio

	Volume sisa , RV(litres)	% perbedaan dari rata-rata umum RV
A (pria)	1.4	13.6
B (wanita)	1.3	21.4
C (pria)	1.2	2.1

### Saran

Beberapa saran praktis untuk percobaan pada waktu mendatang dalam membuat spirometer air mekanikal sederhana:

- (1) Imbangan yang lebih stabil dapat digunakan agar tidak bergoyang dan menggunakan pensil yang lebih tajam untuk merekam goresan yang lebih tepat pada kertas graf;
- (2) Suatu silinder berotasi dengan kertas graf dapat digunakan untuk merekam data. Ini juga dapat mengamati *rate* pernafasan;
- (3) Dua selang berkatup dapat diperkenalkan untuk merekam bukan hanya saat menghembus nafas (seperti dalam proyek ini) tetapi juga dapat merekam bagian menarik nafas;
- (4) *Soda lime* dapat digunakan untuk menyerap karbon dioksida yang berupa produk samping dari menghembus nafas karena seluruh spirometer air adalah suatu sistem ventilasi tertutup;

### KESIMPULAN

Suatu alat mekanikal sederhana untuk memprediksi volume tidal paru-paru telah dicoba dan berhasil memperoleh hasil yang memuaskan. Volume tidal dari ketiga peserta yang telah berpartisipasi dalam pengambilan data adalah 568 mL, 608 mL dan 511 mL. Hasil tersebut adalah di atas rata-rata volume tidal paru-paru yaitu 500 mL.

Estimasi volume cadangan inspiratori ketiga peserta adalah 3.5 L, 2.3 L dan 3.2 L. Estimasi volume cadangan ekspiratori adalah 1.4 L, 0.9 L dan 1.2 L. Estimasi volume sisa ketiga peserta adalah 1.4 L, 1.3 L dan 1.2 L.

Hasil dari proyek ini adalah berguna dan praktis bagi masyarakat umum untuk mengestimasi volume tidal paru-paru mereka tanpa perlu ke klinik kesehatan atau rumah sakit. Alat mekanikal sederhana ini baik untuk mendeteksi penyakit paru-paru secara dini di rumah.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada supervisornya atas bimbingan dan inspirasi dalam penyelesaian proyek ini. Terima kasih kepada FMIPA ITB yang telah menyediakan program Magister Pengajaran Fisika.

### REFERENSI

1. <https://www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/the-respiratory-system-39/gas-exchange-across-respiratory-surfaces-220/lung-volumes-and-capacities-834-12079/> (17 May 2016)
2. <https://www.lung.ca/lung-health/lung-disease/spirometry> (17 May 2016)
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lung\\_volumes](https://en.wikipedia.org/wiki/Lung_volumes) (17 May 2016)
4. [http://www.nuffieldfoundation.org/sites/default/files/PB\\_using-a-spirometer-spirometer-diagram-500.jpg](http://www.nuffieldfoundation.org/sites/default/files/PB_using-a-spirometer-spirometer-diagram-500.jpg) (17 May 2016)
5. <https://www.biologycorner.com/worksheets/lungcapacity.html> (17 May 2016)
6. <http://www.cliffsnotes.com/study-guides/anatomy-and-physiology/the-respiratory-system/lung-volumes-and-capacities> (17 May 2016)