

BAB II

LANDASAN TEORI

A. TINJAUAN PUSTAKA

Penyelaman manusia dan eksplorasi lingkungan bawah laut telah berlangsung sejak zaman kuno untuk tujuan olahraga, rekreasi, komersial, serta strategi militer. Menyelam adalah aktivitas bawah air yang mempengaruhi struktur dan fungsi tubuh. Aktivitas penyelaman dilakukan dengan atau tanpa alat bantu napas. Kemajuan teknologi alat penyelaman meningkatkan kemampuan eksplorasi penyelam. Penyelam dapat menemukan lokasi bawah air yang sebelumnya sulit dijangkau dengan bantuan teknologi alat penyelaman mutakhir sehingga memudahkan mencapai tempat yang lebih dalam.^{6,7}

Perubahan dan pengaruh fisiologis yang disebabkan oleh berenang, penyelaman, dan menjelajah alam bawah laut dan atau tanpa menggunakan peralatan khusus penting untuk diteliti. Menyelam dapat mempengaruhi struktur dan fungsi tubuh. Penyelam akan terpajan oleh beberapa faktor selama penyelaman seperti risiko tenggelam, turunnya suhu dan peningkatan tekanan penyelaman. Penyakit akibat penyelaman bermacam-macam yang memerlukan kecepatan, ketepatan diagnosis dan tatakasana. Penyakit dekompresi, barotrauma, dan penyakit penyelaman lain selalu melibatkan paru pada proses patogenesisnya.^{6,8,9}

Penelitian pengaruh penyelaman terhadap paru, pernapasan, jantung, peredaran darah dan organ tubuh lain berguna pada peningkatan adaptasi manusia terhadap berbagai lingkungan. Perkembangan penelitian tentang penyelaman sering terhambat oleh faktor lingkungan dan biaya yang tinggi. Faktor lingkungan yaitu perubahan cuaca dan iklim yang ekstrim. Penelitian penyelaman terhadap faal paru dapat menggunakan RUBT atau dikenal juga sebagai *hiperbaric chamber*. Penggunaan RUBT menjadi jembatan pengganti pengaruh situasi lingkungan bawah laut terhadap perubahan fisiologis manusia. Tinjauan kepustakaan ini disusun untuk memahami pengaruh terhadap fungsi dan penyakit paru akibat penyelaman.^{8,10,11}

1. DEFINISI DAN KATEGORI PENYELAMAN

Penyelaman adalah kegiatan yang dilakukan pada tekanan lebih dari 1 ATA dibagi menurut jenis lingkungan, kedalaman, tujuan, dan teknologi alat bantu. Lingkungan penyelaman berupa kondisi didalam air atau penyelaman basah, maupun penyelaman kering menggunakan RUBT. Penyelaman berdasarkan kedalaman dibagi menjadi dangkal, sedang, dan dalam. Perairan dangkal yaitu kedalaman maksimal 10 meter, sedang 10 meter sampai 30 meter, sedangkan dalam lebih dari 30 meter.^{12,13}

Kegiatan menyelam dikategorikan menurut tujuan yaitu militer pertahanan keamanan negara, komersial, ilmiah, serta olah raga rekreasi. Militer pelaksana penyelam angkatan bersenjata yaitu Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI-AL). Penyelaman untuk tujuan komersial yaitu sebagai contoh penyelaman untuk kepentingan konstruksi di bawah permukaan air, pengeboran lepas pantai, penangkapan ikan, mencari benda didasar laut. Eksplorasi ilmiah selam dilakukan untuk kepentingan keilmuan dan penelitian yaitu penelitian biologi, geologi, arkeologi dan kelautan. Olah raga dan rekreasi selam dilakukan bertujuan untuk mempertahankan, meningkatkan kondisi kesehatan dan kebugaran jiwa raga, serta rekreasi atau wisata bawah air.^{14,15,16}

Teknologi alat bantu napas penyelam dibagi menjadi tiga metode yaitu menahan napas, menggunakan alat SCUBA, dan metode saturasi. Metode penyelaman menahan napas disebut juga metode *apnea* adalah metode menyelam paling sederhana dan tertua. Tekanan tubuh mengalami peningkatan saat menahan napas dan turun ke kedalaman. Penyelam mengambil napas dengan hiperventilasi untuk memperpanjang durasi sebelum menyelam. Hiperventilasi sebelum menyelam membatasi peningkatan kenaikan tekanan parsial arteri karbondioksida (PaCO_2). Penyelaman tahan napas misalnya penyelaman menggunakan kaca mata renang (*googling*) atau masker wajah disertai pipa napas yang disebut juga *snorkel*.^{17,18}

Metode penyelaman dengan alat bantu SCUBA dipergunakan untuk turun lebih dalam ke dalam air dengan durasi lebih lama. Manfaat penggunaan SCUBA yaitu mengurangi waktu dekompresi sehingga banyak digunakan untuk

penyelaman komersial dan militer. Rerata penggunaan SCUBA yaitu kedalaman 60-130 kaki atau *feet* (ft) dengan waktu maksimal 10 menit. Tabung SCUBA berisi udara campuran terdiri dari oksigen, helium-oksigen, helium-nitrogen-oksigen, serta hidrogen-nitrogen-oksigen. Campuran gas pada tabung SCUBA berguna untuk menjaga tekanan atmosfer dalam saluran pernapasan.^{18,19,20}

Sirkuit napas SCUBA dibagi dua macam yaitu terbuka dan tertutup. Sirkuit terbuka SCUBA lebih sering digunakan karena udara pernapasan langsung dihembuskan keluar dalam air. Campuran gas tabung SCUBA sistem sirkuit terbuka menggunakan campuran nitrogen dan oksigen. Perbandingan campuran nitrogen oksigen SCUBA 75% banding 25%, atau 60% banding 40%. Sistem sirkuit tertutup SCUBA jarang digunakan karena sistem ini sangat rumit dan memerlukan pemeliharaan khusus serta biaya cukup mahal. Sistem sirkuit tertutup SCUBA memiliki kantong pernafasan, kotak kimiawi dan suatu alat elektronis penyaring oksigen yang dapat mengontrol jumlah O₂ pada kedalaman lebih dari 1.000 ft. Penggunaan sistem sirkuit tertutup SCUBA memberikan cukup udara untuk turun dan naik kembali ke permukaan sehingga membutuhkan latihan yang sangat khusus.^{20,21,22}

Metode penyelaman saturasi digunakan untuk kepentingan komersial yaitu industri minyak untuk pengelasan saluran bawah air. Penyelam metode saturasi bertujuan mengadaptasikan tubuh penyelam dengan gas inert agar dapat bertahan lama dikedalaman 200 sampai 300 meter (m). Kompresi tubuh penyelam dilakukan secara bertahap menggunakan tabung pernapasan berupa campuran oksigen bertekanan parsial tinggi, nitrogen, dan helium sebagai gas inert. Kompresi bertahap penyelaman saturasi berguna mencegah kejadian disbarisme terhadap penyelam.^{23,24}

Penyelaman basah berbeda dengan kering. Penyelaman kering yaitu menggunakan RUBT dilakukan untuk latihan penyelam pemula beradaptasi terhadap lingkungan bawah air. Penyelaman RUBT kering berguna sebagai media penelitian sipil dan militer. Tekanan didalam RUBT dapat diatur menyerupai tekanan pada kedalaman untuk melihat batas kemampuan penyelam. Penyelaman di lingkungan ketinggian berbeda dengan dibawah permukaan air laut. Lingkungan

penyelaman ketinggian yaitu di danau pegunungan. Penyelaman di ketinggian memerlukan prosedur dekompresi berbeda dibandingkan air laut atau air tawar dataran rendah. Penyelam di ketinggian menghadapi hambatan suhu lebih rendah dibanding air laut.^{25,26}

Penyelam amatir untuk tujuan rekreasi adalah individu yang tidak mendapat pelatihan khusus menyelam atau hanya singkat sebelum melakukan aktivitas menyelam. Penyelam amatir dapat berasal dari kalangan sipil atau militer tanpa pelatihan khusus dan intensif menyelam. Cedera akibat menyelam lebih sering terjadi pada penyelam amatir karena ketidaktahuan teknik penyelaman yang benar.^{27,28,29}

2. FISIKA PENYELAMAN

Penyelaman pada kedalaman lebih dari 20 meter berisiko besar terhadap keselamatan dan kesehatan penyelam sehingga harus dilakukan dengan syarat tertentu dan menggunakan alat selam terstandar. Penyelaman berdampak terhadap organ terutama paru. Hukum fisika berperan penting menjelaskan proses pengaruh tekanan kedalaman bawah laut terhadap tubuh dan organ manusia. Unsur fisika berperan pada proses penyelaman yaitu tekanan, suhu, serta komposisi gas. Penyelam harus mentoleransi dan mengkompensasi perubahan tekanan, suhu dan komposisi gas.^{30,31}

a. Tekanan

Tekanan adalah faktor lingkungan terpenting mempengaruhi penyelam. Pada saat penyelaman tekanan atmosfer di permukaan laut dengan di dalam laut berbeda. Tubuh penyelam akan terpapar peningkatan tekanan berbanding lurus dengan kedalaman. Paparan tekanan dihitung berdasar gaya per satuan luas yaitu Newton per meter persegi. Perubahan paru, peredaran darah, dan jantung penyelam diinduksi oleh tekanan didalam air. Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan terdapat di permukaan cairan akan menyebar ke seluruh arah secara merata dan tidak berkurang pada setiap tempat di bawah permukaan laut. Kompresi terhadap penyelam berasal dari dua unsur yaitu tekanan air dan tekanan atmosfer di atasnya.

Tekanan akan meningkat bila seseorang menyelam di bawah permukaan air karena perbedaan berat dari atmosfer dan berat air di atas penyelam.^{30,31}

Tekanan atmosfer adalah berat atmosfer pada permukaan tubuh bervariasi sesuai ketinggian di atas permukaan air laut dan kondisi cuaca lokal. Tekanan atmosfer konstan yaitu 760 milimeter Hidragyrum (mmHg) setara 14,7 *Pounds per square inch* (Psi) dijadikan dasar ukuran untuk 1 atmosfer (ATM). Tekanan akan meningkat 1 ATA untuk setiap kedalaman 10 m atau 33 kaki. Hukum fisika berhubungan dengan penyelaman dan tekanan yaitu hukum Boyle, Dalton, Charles, dan Henry.^{31,32}

Hukum Boyle menyatakan bila suhu absolut dipertahankan konstan maka volume gas akan berbanding terbalik dengan tekanan absolutnya. Hukum Boyle berlaku terhadap semua gas-gas di dalam ruangan-ruangan tubuh sewaktu penyelam masuk ke dalam air maupun sewaktu naik ke permukaan. Volume udara rongga tubuh akan mengecil secara proporsional ketika menuju kedalaman dan sebaliknya udara yang mengisi rongga tubuh akan membesar secara proporsional ketika menyelam naik. Penyelam yang menghirup napas penuh di permukaan akan merasakan paru-parunya semakin lama semakin tertekan oleh air di sekelilingnya sewaktu penyelam tersebut turun.^{30,32}

Tekanan udara di dalam paru-paru seimbang dengan tekanan udara atmosfer sebelum menyelam yaitu rata-rata 760 mmHg atau 1 ATM pada permukaan laut. Udara akan mengalir ke dalam paru saat menyelam sehingga tekanan udara di dalam paru harus lebih rendah daripada tekanan udara atmosfer. Kondisi tersebut diperoleh dengan membesarnya volume paru. Sebagai contoh apabila seorang penyelam SCUBA menghirup napas penuh atau sebanyak 6 liter ke kedalaman 10 meter atau 2 ATA dengan menahan napas maka udara di dalam dadanya akan berlipat ganda volumenya menjadi 12 liter dan penyelam tersebut harus menghembuskan 6 liter udara saat naik ke permukaan untuk menghindari agar paru-parunya tidak meledak.^{31,32}

Hukum Dalton menyatakan bahwa jumlah tekanan suatu campuran gas adalah jumlah tekanan parsial tiap gas yang membentuk campuran gas jika menempati seluruh ruang. Tekanan parsial tiap gas meningkat selama tekanan

meningkat keseluruhan. Udara adalah suatu campuran yang terdiri dari oksigen 20% dan nitrogen (N_2) 80%. Tekanan parsial suatu gas di dalam campuran diperoleh dengan mengalikan persentase gas dengan tekanan total pada tekanan sesuai kedalaman. Hukum Charles menyatakan bila tekanan konstan, volume dari sejumlah gas tertentu adalah berbanding lurus dengan suhu absolut. Hukum Charles berhubungan dengan sifat kompresi dan dekompresi gas juga berkaitan dengan gas dalam aliran darah berwujud cair di tubuh manusia yang dapat menjadi lewat jenuh saat menyelam dengan udara tekan (tabung).^{32,33}

Di permukaan laut (1 ATA) dalam tubuh manusia terdapat kira-kira 1 liter larutan nitrogen. Apabila seorang penyelam turun sampai kedalaman 10 meter (2 ATA) tekanan parsial dari nitrogen yang dihirupnya menjadi 2 kali lipat dan akhirnya yang terlarut dalam jaringan juga menjadi 2 kali lipat (2 liter). Waktu sampai terjadinya keseimbangan tergantung pada daya larut gas di dalam jaringan dan pada kecepatan suplai gas ke dalam jaringan oleh darah. Hal tersebut sesuai dengan hukum Henry. Hukum Henry menetapkan bahwa ketika tekanan parsial gas meningkat maka lebih banyak gas yang terlarut dalam seluruh cairan sampai terjadi saturasi. Oksigen untuk metabolisme dan nitrogen adalah gas inert disebarkan keseluruhan sirkulasi cairan tubuh meningkat seiring peningkatan tekanan. Gas terlarut menjadi supersaturasi dan dilepaskan sebagai gelembung gas ketika tekanan menurun. Hukum Henry tersebut berpengaruh tidak langsung pada penyakit dekompresi. Rumus persamaan hukum Boyle, Dalton, Charles, dan Henry dijelaskan pada tabel satu.

Tabel 1. Rumus Persamaan hukum Boyle, Dalton, Charles, dan Henry

Hukum fisika	Rumus persamaan
Boyle	$PV = \text{konstan} = P_1V_1 = P_2V_2$
Dalton	$P \text{ total} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$
Charles	$V/T = \text{konstan} = V_1/T_1 = V_2/T_2$
Henry	$H_i = C_{si} / p_i$

Keterangan : P: tekanan gas pada suhu tetap; V: volume gas pada suhu tetap; P1: tekanan gas pada keadaan 1, V2: volume gas pada keadaan 1; P2: tekanan gas pada keadaan 2, V2: volume gas pada keadaan 2; P total: tekanan parsial gas kumulatif; Hi: konstanta sifat gas; Csi: konsentrasi maksimum kejenuhan senyawa; pi: tekanan parsial gas.

Dikutip dari (11)

Perubahan respons paru bersifat reversibel dan ireversibel berupa penurunan ventilasi, peningkatan ruang rugi fisiologis dan volume cadangan ekspirasi. Peningkatan tekanan hidrostatis menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan alveolar dengan dinding dada. Peningkatan tekanan alveolar memicu kontraksi otot napas inspirasi mengatasi dispnea akibat penurunan KV. Penurunan aliran ekspirasi diakibatkan oleh aliran turbulen. Peningkatan ruang rugi pernapasan akibat fenomena choke yaitu penurunan diameter saluran napas distal karena resistensi saluran napas. Peningkatan resistensi memicu kontraksi otot napas dengan meningkatkan frekuensi napas.^{34,35}

b. Suhu

Penyelam terpapar suhu air yang menyebabkan hilangnya panas secara progresif selama penyelaman. Hipotermia terjadi pada penyelam tanpa pakaian pelindung dan suhu air di bawah suhu *termoneutral* atau setara dengan 93-95° Fahrenheit (F). Penyelam pada suhu air tropis atau setara 76-82° F memerlukan beberapa bentuk pakaian pelindung termal untuk penyelaman yang aman. Perlindungan termal efektif dalam mencegah hipotermia dan disesuaikan dengan suhu air yang diharapkan. Penurunan suhu lingkungan sekitar saat penyelaman mempengaruhi mukosa saluran napas. Suhu air laut dan perairan dipengaruhi cuaca, musim, dan iklim.^{36,37}

Suhu bawah air makin menurun seiring penurunan kedalaman. Suhu dingin memicu bronkokonstriksi saluran napas. Stres dingin memicu peningkatan volume oksigen (VO₂) untuk menghasilkan panas metabolik dan meminimalkan perubahan suhu tubuh. Denyut jantung meningkat sebagai upaya mempertahankan sirkulasi tubuh akibat penurunan suhu. Vasokonstriksi terjadi sebagai respons refleks terhadap penyelaman dan suhu tubuh yang lebih rendah. Mukosa saluran napas cenderung kering akibat suhu dingin berakibat kerentanan kapiler terhadap jejas. Tekanan tinggi disertai paparan oksigen tinggi terhadap saluran napas kering akibat suhu dingin menyebabkan cedera saluran napas. Cedera saluran napas berulang penyelam mempengaruhi penurunan faal paru yaitu VEP1. Penyelam tidak mematuhi aklimatisasi dan waktu penyelaman menunjukkan penurunan VEP1 lebih

besar. Kebutuhan energi untuk berenang di bawah air juga mengharuskan penyelam mempertahankan tingkat kecukupan fisik yang wajar.^{38,39}

c. Komposisi gas

Udara bebas terdiri atas komposisi nitrogen lebih besar dibanding oksigen. Tabung selam berisi udara campuran terdiri dari oksigen, helium-oksigen, helium-nitrogen-oksigen, serta hidrogen-nitrogen-oksigen. Komposisi udara berpengaruh terhadap kelarutan gas didalam darah. Fisiologis tubuh penyelam menghadapi stresor fisika yaitu peningkatan tekanan hidrostatik, densitas gas, tekanan parsial gas, serta kelarutan gas. Strain penyelaman adalah respons fisiologis tubuh menghadapi beban perbedaan lingkungan. Posisi penyelam, perubahan tekanan lingkungan penyelaman, aktivitas fisik bawah air, dan peningkatan densitas gas berakibat maladaptasi organ tubuh. Peningkatan densitas gas memicu perubahan aliran gas, penurunan aliran ekspirasi, dan peningkatan ruang rugi pernapasan.^{40,41}

Penyelam saat menghirup udara pada tekanan 6 ATA maka tekanan partial oksigen (PO_2) yang diinspirasi akan menjadi sekitar 126 kilo pascal (kPa) atau setara 945 mmHg dan PO_2 alveolar adalah sekitar 120 kPa atau setara 900 mmHg. Hal ini di bawah ambang batas untuk *oxygen convulsion* yaitu sekitar 2 ATA tetapi di atas ambang batas toksisitas oksigen paru jika paparan diteruskan selama lebih dari beberapa jam. Pada kondisi di atas permukaan laut gas nitrogen terdapat dalam udara pernapasan sebesar 79%. Nitrogen tidak mempengaruhi fungsi tubuh karena sangat kecil yang larut dalam plasma darah karena rendahnya koefisien kelarutan pada tekanan di atas permukaan laut. Nitrogen membatasi seberapa dalam udara dapat dihirup dan memiliki tiga efek yang tidak diinginkan.^{40,41,42}

Helium adalah gas inert pengencer yang lebih disukai pada tekanan yang lebih besar dari 6 ATA. PO_2 inspirasi sekitar 0,5 ATA (50 kPa atau 375 mmHg) diberikan untuk memberikan margin keamanan jika terjadi kesalahan dalam pencampuran gas dan untuk memberikan perlindungan terhadap hipoventilasi atau pertukaran gas yang rusak. Tingkat PO_2 ini berada di bawah ambang batas toksisitas oksigen paru bahkan selama *saturation dives* yang panjang. Masalah khusus pada helium adalah konduktivitas panasnya yang sangat tinggi yang cenderung menyebabkan hipotermia kecuali lingkungan penyelam dipanaskan. Kehilangan

panas secara radiasi dan evaporasi umumnya tidak berubah, tetapi kehilangan panas secara konveksi dari saluran pernapasan dan kulit sangat meningkat. Sehingga ruangan dipertahankan pada suhu setinggi 30 sampai 32° C selama *saturation dives* dengan campuran helium-oksigen. Tekanan yang dapat dicapai saat menghirup campuran helium-oksigen saat ini dibatasi oleh *high-pressure nervous syndrome* (HPNS). *High-pressure nervous syndrome* adalah keadaan hipereksitasi dari sistem saraf pusat yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik perdetik dan tidak adanya perubahan tekanan parsial gas. *High-pressure nervous syndrome* pertama kali terlihat pada tekanan sekitar 20 ATA dan menjadi masalah serius bagi penyelam dengan tekanan lebih dari 50 ATA.^{41,42,43}

3. PENGARUH PENYELAMAN TERHADAP ORGAN KARDIORESPIRASI

Penyelam terpajan oleh beberapa faktor mempengaruhi organ kardiorespirasi. Pengaruh suhu dingin dan udara kering di jalan napas menyebabkan kehilangan panas. Lingkungan bawah air memberikan tekanan ke paru yaitu paparan tekanan ambien tinggi, perubahan karakteristik gas, dan efek kardiovaskular pada sirkulasi pulmonal. Penyelam terpajan oleh beberapa faktor selama penyelaman yaitu risiko tenggelam, penurunan suhu, dan peningkatan tekanan lingkungan.^{43,44}

Potensi bahaya keadaan gawat darurat untuk menolong pasangan menyelamnya dengan berenang cepat menimbulkan perubahan hemodinamik berupa peningkatan aliran darah dari perifer ke rongga dada. Peningkatan aliran darah perifer ke rongga dada meningkatkan volume darah intratoraks 700 mililiter (ml) sehingga menurunkan volume paru secara mekanis 300 ml dari KV. Peningkatan tekanan PO₂ dan tekanan PN₂ di darah menyebabkan penurunan *cardiac output* (CO) karena penurunan denyut jantung dan isi sekuncupnya atau *stroke volume* (SV) jantung.^{44,45}

Dampak menyelam pada fungsi paru tergantung faktor paparan menyelam individual. Subjek rentan menunjukkan perburukan fungsi paru signifikan bahkan setelah penyelaman di air dangkal. Peningkatan PO₂ selama penyelaman dapat menyebabkan kerusakan epitel jalan napas. Peningkatan usaha napas dan densitas

gas akibat penyelaman akan menyebabkan peningkatan kerja otot napas dan KV. Perubahan efek merugikan jangka panjang akibat menyelam di paru yaitu penyakit saluran napas kecil dan percepatan penurunan fungsi paru. Paparan berulang stres oksidatif penyelam menyebabkan kerusakan epitel saluran napas serta destruksi jaringan penyangga sehingga menimbulkan efek seperti penyakit paru obstruktif kronik (PPOK). Percepatan penurunan fungsi paru akibat menyelam terjadi karena paparan paru dan saluran udara terhadap hiperoksia dan stres dekompresi. Perubahan fungsi paru dan vaskular setelah penyelaman sering berada pada fase subklinis. Perubahan fungsi VEPI paru diduga dipengaruhi oleh lama penyelaman, suhu dingin lingkungan, dan tekanan dekompresi. Penelitian *cross-sectional* menunjukkan bahwa penyelam memiliki volume paru besar dan rasio VEPI/KVP lebih rendah menandakan adanya penyakit saluran udara obstruktif atau keterbatasan aliran udara.^{45,46}

Perubahan patologi paru penyelam dapat berkembang menjadi *pulmonary oxygen toxicity* (POT) atau disebut juga toksisitas oksigen pulmonal. *Pulmonary oxygen toxicity* terjadi akibat hiperoksia jika PO_2 adalah antara 50-300 kPa atau setara 375–2250 mmHg. Fase akut POT bersifat reversibel mengarah ke perubahan patologi ireversibel. Fase akut POT diikuti fase kronis disebut *biphasic*. Fase akut ditandai eksudasi dan edema interstisial serta alveolar. Perubahan patologi fase akut ditandai kehilangan sel epitel tipe 1 alveolar, penghancuran endotelium kapiler pulmonal, distensi limfatik, edema septum alveolar, dan infiltrat sel inflamasi. Fase eksudatif akut POT dimulai setelah 8 jam pernapasan oksigen dan berlangsung 5–12 hari jika paparan oksigen dilanjutkan. Perubahan patologi fase akut bersifat reversibel meskipun dapat mengancam nyawa. Fase kronis POT disebut juga fase proliferasi ditandai oleh peningkatan sel alveolar tipe 2. Fungsi sel alveolar tipe 2 adalah menggantikan semua sel alveolar tipe 1 yang rusak. Fase proliferasi mengakibatkan penghalang darah-udara meningkat karena peningkatan viskositas 4-5 kali. Fase proliferasi POT bersifat ireversibel sehingga akan terus berlangsung meskipun paparan oksigen dihentikan.^{47,48} Pengaruh penyelaman terhadap paru dijelaskan pada tabel dua.

Tabel 2. Pengaruh penyelaman terhadap paru

Penyebab	Perubahan patofisiologis	Efek samping klinis
Peningkatan tekanan Oksigen	Hiperoksia	Stres oksidatif Inflamasi saluran napas
Nitrogen	<i>Mikrobubble</i> gas vena	Penurunan kapasitas difusi Hipertensi pulmonal
Tenggelam	Pengumpulan darah sentral Penurunan komplians paru	Sesak napas
SCUBA Gas napas	Gas kering dan dingin Peningkatan densita gas Peningkatan resistensi saluran napas	Kehilangan suhu pernapasan Inflamasi saluran napas Obstruksi saluran napas
Regulator tekanan	Peningkatan usaha napas	Sesak napas Sesak napas Pengeringan dan pendinginan mukosa saluran napas
Pengerahan tenaga	Peningkatan kerja pernapasan	Sesak napas Retensi karbon dioksida (CO ₂) Exertion induces bronchoconstriction Kegagalan fungsi kapiler
Air	Peningkatan konduksi dan konveksi panas Peningkatan kehilangan panas saluran napas	Edema paru <i>Cold stress</i> Hipotermia Hipopnea Apnea

Dikutip dari (16)

4. PENGARUH PENYELAMAN TERHADAP ORGAN LAIN

Menyelam adalah olahraga membutuhkan kesiapan fisik tingkat tinggi. Penyelam harus mampu mengadaptasikan kemampuan fisik berhubungan kecepatan, kekuatan, daya tahan, kelincahan, tingkat konsumsi oksigen maksimum tinggi, keterampilan teknis terhadap fisiologi dan nutrisi untuk menghadapi kejadian dan peristiwa tidak terduga. Keahlian penting seorang penyelam adalah penggunaan paru yang benar untuk bernapas yang benar mengatur konsumsi udara cukup. Tingkat kesiapan fisik dan kinerja motor penyelam penting untuk tujuan kekuatan militer. Tidak ada perbedaan bermakna pada karakteristik antropometrik penyelam terhadap pengaruh fisiologis. Kesiapan fisik penyelam selama persiapan

memiliki efek signifikan terhadap kesiapan fisik penyelam militer angkatan laut.^{49,50}

Aktifitas menyelam berisiko terhadap organ karena gejala laten mempunyai efek terhadap otak, medulla spinalis, mata dan paru. Penyelaman mengakibatkan tekanan kompresi dan tekanan ambien gas pada tubuh dalam ruang tertutup meningkat. Tubuh berusaha menyamakan kedudukan tekanan antara lingkungan dan ruang tubuh, keadaan obstruksi, tekanan dapat meningkat ke titik cedera jaringan. Daya ekspansi dan kontraksi ini menyebabkan trauma jaringan lokal, pembengkakan pembuluh darah, edema dan barotrauma. Riwayat penyakit paru obstruktif atau kelainan anatomi seperti kista paru dapat meningkatkan kemungkinan barotrauma paru. Penyelaman pada kedalaman lebih dari 20 meter mempunyai risiko besar terhadap keselamatan dan kesehatan penyelam. Penyelaman lebih 20 meter harus dilakukan dengan syarat tertentu dan menggunakan alat selam yang memenuhi standar SCUBA. Penelitian Kemenkes RI tahun 2006 di pulau Bungin Nusa Tenggara Barat terhadap penyelam tradisional tanpa alat SCUBA menunjukkan efek penyelaman kedalaman yaitu nyeri persendian, gangguan pendengaran ringan sampai ketulian, barotrauma atau perdarahan akibat tubuh mendapat tekanan yang berubah secara tiba-tiba pada beberapa organ/jaringan. Kelainan dekompresi akibat tidak tercukupinya gas nitrogen akibat penurunan tekanan mendadak menimbulkan gejala sakit persendian, susunan syaraf, saluran pencernaan, jantung, paru-paru dan kulit.^{49,50}

5. PENYAKIT AKIBAT PENYELAMAN

Penyakit berhubungan dengan penyelaman bermacam-macam. Penyebab penyakit penyelaman tersering adalah penyakit dekompresi. Barotrauma penyakit akibat tekanan, penurunan visibilitas, narkosis gas selam, serta emboli udara adalah gangguan akibat penyelaman. Penatalaksanaan penyakit akibat penyelaman disesuaikan dengan proses patogenesis penyakit. Pencegahan kejadian penyakit akibat penyelaman adalah lebih baik karena sebagian besar korban tidak selamat akibat keterlambatan dan jarak jauh saat proses transpor ke fasilitas kesehatan.⁵¹

a. Barotrauma

Manusia memiliki banyak rongga udara didalam tubuh yaitu telinga, sinus, gigi, perut dan paru. Rongga didalam tubuh rentan mengalami barotrauma. Barotrauma dapat terjadi pada penyelaman atau pendakian. Dengan meningkatnya tekanan selama penurunan, volume gas dalam rongga tubuh yang mengandung udara, seperti paru-paru, telinga tengah, sinus paranasal, dan saluran pencernaan, berkurang. Jika tekanan di ruang-ruang ini tidak menyamakan dengan tekanan sekitar akan terjadi cedera jaringan karena gaya yang ditimbulkan oleh perbedaan tekanan antara tekanan sekitar dan rongga tubuh. Kompresi paru terhadap volume di bawah volume residu selama penyelaman dengan nafas dalam dapat menyebabkan perdarahan paru. Gangguan terkait menyelam yang paling umum dijumpai pada penyelam adalah barotrauma pada telinga tengah. Barotrauma juga bisa melibatkan sinus paranasal, masker selam, dan kantong udara yang terkait dengan pengisian gigi. Cedera saraf wajah telah dilaporkan sebagai komplikasi dari barotrauma telinga tengah dan merupakan bentuk barotrauma yang paling serius mempengaruhi paru-paru.^{51,52}

Barotrauma di organ paru menimbulkan peregangan yang berlebihan di jaringan paru. Proses barotrauma paru terjadi saat naik atau turun kedalaman. Barotrauma paru waktu turun jarang terjadi baik pada *breath hold diving* maupun penyelaman dengan alat selam. *Breath hold diving* selam tanpa alat tetap mempunyai resiko mengalami barotrauma paru *descent* karena penyelam tidak mempunyai suplai udara untuk mengequalisasi tekanan intrapulmonal dengan tekanan sekeliling. Tekanan intrapulmonal dipertahankan sama dengan sekeliling dengan menurunkan volume paru saat fase permulaan *breath hold diving*.^{53,54}

Barotrauma paru waktu naik kepermukaan terjadi akibat penurunan tekanan sekeliling dan sesuai hukum Boyle. Volume udara didalam paru ikut mengembang ketika naik ke permukaan. Keterlambatan ekshalasi memicu udara terperangkap, pengembangan berlebih volume paru (*overdistension of the lungs*), serta peningkatan tekanan intrapulmonal. Ruptur paru (*brust lung*) terjadi ketika overdistensi melebihi batas elastisitas paru.^{55,56}

b. Pulmonary Barotrauma

Behnke dan Polak dan Adams pertama melaporkan kejadian barotrauma paru-paru dalam penyelam naik karena pernafasan yang tidak memadai dan ekspansi paru-paru yang berlebihan. Penyelaman permukaan dari kedalaman 4 ft dapat menyebabkan barotrauma paru setelah menghirup udara terkompresi. Tekanan intrapulmonal meningkat akan menghasilkan gradien transpulmoner sebesar 95 hingga 110 cmH₂O yang dapat memecahkan alveoli. Gas dalam ruang interstisial paru dapat memasuki mediastinum yang menjadi emfisema mediastinum dan memasuki ruang pleura menjadi pneumotoraks. Barotrauma paru dapat terjadi tanpa adanya kejadian tekanan berlebih yang jelas. *Tetzlaff et.al* mencatat penurunan aliran *mid-expiration* pada 25% kapasitas vital penyelam yang menderita barotrauma paru-paru dan menyarankan bahwa peningkatan risiko untuk barotrauma paru dapat diidentifikasi dengan pengujian fungsi paru. Para peneliti ini mengidentifikasi 13 kelainan paru-paru di antara 15 pasien dengan barotrauma paru yang menjalani pemeriksaan *computerized tomography-scan* (CT-Scan) torak dan menyarankan bahwa barotrauma paru yang tidak dapat dijelaskan dapat berasal dari penyakit paru okultisme.^{57,58}

Dalam sebuah penelitian terhadap 31 pasien dengan barotrauma paru dari penyelaman Harker dan rekan kerja melaporkan didapatkan 25% dengan pneumomediastinum, 10% dengan emfisema subkutan, 6% dengan pneumoperikardium, 3% dengan pneumopericoneium, 3% dengan pneumoperitoneum, dan 3% dengan pneumotoraks. Infiltrat paru disebabkan oleh aspirasi yang terdapat pada lebih dari setengah dari subyek. Komplikasi yang paling serius dari barotrauma paru terjadi akibat embolisasi otak yang dapat menyebabkan hilangnya kesadaran dan biasanya terjadi dalam beberapa menit setelah naik ke permukaan. Gejala yang kurang parah antara lain hemiplegia, pingsan dan kebingungan, gangguan penglihatan, kejang, vertigo, dan sakit kepala. Apnea, ketidaksadaran, dan henti jantung dapat terjadi pada sekitar 5% korban penyelaman karena udara mengisi ruang jantung dan pembuluh darah besar. Terapi yang dibutuhkan adalah rekompresi darurat di ruang hiperbarik.^{58,59}

d. Emfisema paru

Penyelam terpapar gas padat di bawah kondisi hiperbarik dan hiperoksik sehingga berisiko terkena penyakit pernapasan. Efek jangka panjang gangguan fungsi pernafasan telah dilaporkan pada penyelam komersial yang melakukan penyelaman dalam. Paru penyelam terpapar gas hiperoksia di kedalaman dan terjadi dekompresi tekanan saat naik ke permukaan. Penyelaman meningkatkan reaksi stres oksidatif dan *decompression sickness* menyebabkan kerusakan dan menimbulkan reaksi inflamasi saluran nafas. Perubahan struktur jalan nafas akibat inflamasi DCS. Malondialdehid (MDA) dan Leukotrien B4 (LTB4) digunakan sebagai biomarker stres oksidatif pada saluran nafas akibat penyelaman. Peningkatan MDA dan LTB4 menjadi penanda kelainan saluran nafas kecil atau *Small Airway Disease*.^{60,61,62}

Kerusakan sel epitel saluran nafas akibat paparan stres oksidatif tinggi penyelam bersifat reversibel tidak seperti PPOK yang ireversibel. Regenerasi sel epitel saluran nafas dapat dilakukan dengan menghentikan kegiatan penyelaman beberapa periode waktu. Tidak ada pedoman pasti berapa lama penghentian kegiatan selam untuk mengembalikan kerusakan sel epitel saluran nafas akibat stres oksidatif. Perbaikan sel epitel dan jaringan penyangga saluran nafas bervariasi bergantung respons individual. Penyelaman dapat menimbulkan penyakit saluran nafas kecil atau *small airway disease* ditandai obstruksi aliran udara kronis bervariasi menimbulkan gangguan saluran nafas bronkiolus, produksi lendir berlebih, inflamasi, serta fibrosis. *Small airway disease* adalah proses patologis ditandai peradangan dan fibrosis saluran nafas kecil. Pemeriksaan histopatologis menunjukkan peradangan bronkus kecil dan bronkiolus.^{63,64,65} Inflamasi seluler, metaplasia sel goblet, fibrosis, peningkatan dinding saluran nafas menyebabkan obstruksi saluran udara. Patogenesis *small airway disease* penyelam mirip penyakit PPOK. Kelainan patologi *small airway disease* penyelam didapatkan oklusi lumen saluran nafas, metaplasia sel goblet, metaplasia sel squamosa, ulkus mukosa, hipertrofi otot, infiltrasi sel inflamasi, dan fibrosis saluran nafas kecil berdiameter < 2 mm.^{66,67,68}

d. Emboli pembuluh darah

Mikroembolism gas didalam vena terjadi ketika peyelam naik kepermukaan terlalu cepat tanpa adaptasi cukup. Penurunan kedalaman, peningkatan densitas gas, dan alat bantu pernapasan penyelam mempengaruhi ventilasi secara mekanis. Penyelaman di perairan dangkal 0-50 meter (m) di air laut menggunakan peralatan scuba berisiko terkena penyakit dekompresi. Emboli udara terjadi akibat masuknya gas dari alveoli ke sistem vena paru.

Emboli gas terbawa ke jantung dan kemudian masuk ke dalam sistem sirkulasi arterial sehingga menimbulkan obstruksi emboli gas di pembuluh koroner, serebral dan lainnya. Emboli udara terjadi ketika distensi hebat paru, pembuluh darah kecil, dan peregangan kapiler. Gejala klinis emboli udara yaitu kehilangan kesadaran, gelisah, konvulsi, gangguan penglihatan, vertigo, gangguan saraf sensorik, nyeri dada, aritmia. Emboli gas berpotensi menimbulkan *cerebrovascular accident* (CVA) susunan saraf pusat (SSP) bila terjadi lebih dari 30 menit. Terapi emboli udara yaitu rekompresi dengan menggunakan ruang udara bertekanan tinggi atau hiperbarik *chamber*^{68,69}

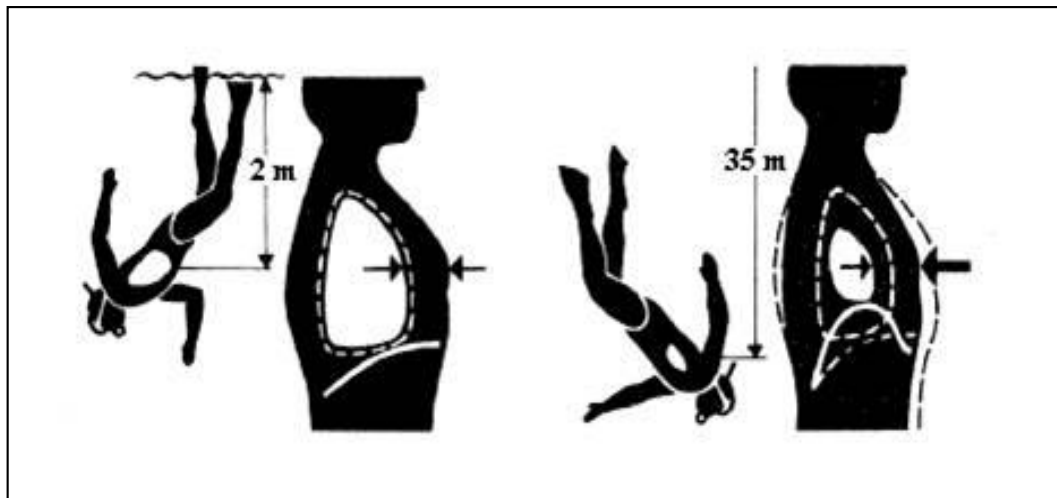
e. Penyakit dekompresi

Bila seorang penyelam menuju ke permukaan secara perlahan-lahan maka nitrogen terlarut dapat dihilangkan melalui paru. Namun demikian bila seorang penyelam naik ke permukaan dengan cepat, nitrogen keluar larutan dilepas melalui respirasi dengan cepat sekali, malahan akan membentuk gelembung gas dalam jaringan, yang mengakibatkan *decompression sickness* (DCS). Penyakit dekompresi akibat penyelaman terjadi ketika gelembung gas inert sebelumnya terlarut jaringan dilepaskan ke darah dan jaringan selama penyelaman. Penyakit dekompresi disebut juga *Bends* atau *Compressed air illness*, *Caisons Disease*, *Dysbarism*, dan *Aeroembolism*. Pengaruh terbesar DCS yaitu terhadap organ sistem saraf pusat. Ukuran gelembung akibat DCS bervariasi sehingga pembentukan gelembung gas tidak selalu menimbulkan gejala klinis. Patensi foramen ovale besar pada penyelam mempercepat gejala DCS akibat *right to left shunt shunting* (RLS). *Venous gas embolism* (VGE) akibat DCS sering ditemukan pada pemeriksaan

ultrasonografi Doppler. Penumpukan gelembung emboli gas VGE menjadi predisposisi emboli arteri serebral.^{69,70}

Penyakit dekompresi adalah proses patofisiologis sistemik disebabkan oleh gelembung dan *endotel micro particle* (EMP). Gelembung mikropartikel adalah penanda mencerminkan kompetensi fungsi endotel dan biologi vaskular. Mikropartikel endotelial adalah vesikula submikron berdiameter $0,1\pm 1,0$ mikrometer (μm) dihasilkan sel apoptosis atau aktif berprotein permukaan sel, sitoplasma dan konstituen inti. *Endotel micro particle* mengekspresikan penanda permukaan spesifik dari sel induk. Kemunculan EMP merupakan penanda disfungsi endotel dan berfungsi terhadap proses biologis respon inflamasi, koagulasi, angiogenesis, dan trombosis. Penyakit dekompresi disebabkan oleh gelembung intravaskular terbentuk akibat dari penurunan tekanan ambien terlalu cepat.^{68,69,70}

Penatalaksanaan penyakit dekompresi adalah bertujuan melawan efek hipoksia pada jaringan. Pengobatan penyakit dekompresi terdiri dari gabungan saling melengkapi yaitu oksigenasi dan rekompresi. Oksigenasi diberikan melalui metode hiperbarik atau normobarik. Oksigenasi bertujuan melawan hipoksia jaringan dan mengurangi tekanan nitrogen terlarut plasma atau jaringan serta mempercepat kelarutan kembali gelembung gas nitrogen. Proses rekompresi adalah tindakan darurat dan harus dilakukan secepatnya. Penggabungan oksigenasi dan rekompresi adalah paling baik karena menyatukan keuntungan dari masing-masing terapi. Oksigen tekanan tinggi berdifusi ke dalam jaringan tanpa melewati darah sehingga langsung dapat mengurangi gelembung gas.^{69,70} Dekompresi paru dapat dalam penyelaman dilihat pada gambar satu.



Gambar 1. Dekompresi paru pada penyelaman.

Dikutip (16)

f. Edema paru

Edema paru saat menyelam terjadi akibat peningkatan *afterload* hipereaktivitas vaskular dipicu oleh suhu dingin ditambah peningkatan preload lingkungan bawah air hiperbarik. Tiga mekanisme akumulasi cairan ekstravaskular edema paru penyelam yaitu imersi air bersuhu dingin menimbulkan gradien tekanan hidrostatik terhadap tubuh menyebabkan pergeseran darah vena perifer. Imersi air menyebabkan efek pengumpulan darah sehingga terjadi redistribusi darah ke *vascular bed* pembuluh darah paru. Mekanisme ketiga penyebab edema paru yaitu kontraksi intens diafragma otomatis selama fase menahan napas menghasilkan pergeseran darah dari kapiler paru ke alveoli. Kegagalan kapiler menahan tekanan menyebabkan akumulasi air di kapiler paru. Edema paru akut non-kardiogenik terjadi akibat permeabilitas kapiler paru meningkat, atau ketika tekanan hidrostatik kapiler paru melebihi tekanan plasma onkotik kardiogenik.^{70,71}

g. Emfisema subkutis

Peneliti Edmonds tahun 2006 membagi akibat barotrauma paru saat naik ke permukaan menjadi empat yaitu kerusakan jaringan paru, emfisema subkutis, pneumotoraks, dan emboli udara. Emfisema subkutis terjadi akibat ruptur alveoli diikuti pelepasan gas ke jaringan interstitial paru. Gas menyebar disepanjang jaringan renggang di sekitar pembuluh darah besar dan jalan napas menuju hilus

kemudian ke mediastinum dan leher menimbulkan emfisema mediastinalis dan subkutan.^{71,72}

Gejala klinis emfisema subkutis yaitu nyeri di bawah sternum, penyempitan batas jantung, peredupan suara jantung, atau krepitasi suara jantung. Pneumotoraks terjadi akibat robekan pleura visceralis sehingga udara masuk ke dalam cavum pleura dan menimbulkan pneumotoraks. Pneumotoraks disertai perdarahan disebut hemopneumotoraks. Udara terperangkap di dalam cavum pleura terus mengembang dan menimbulkan kenaikan tekanan selama naik ke permukaan. Gejala klinis nyeri pleural mendadak di daerah cavum pleura terkena, dispneu dan takipneu.^{71,72,73}

6. RUANG UDARA BERTEKANAN TINGGI

Ruang udara bertekanan tinggi merupakan sebuah tabung dari plat baja atau aluminium *alloy* dan dibuat sedemikian rupa sehingga mampu diisi udara tekan mulai 1 ATA sampai beberapa ATA tergantung jenis dan penggunaannya. Ruang ini dapat berfungsi apabila diisi dengan udara bertekanan serta dapat menghasilkan udara bertekanan dengan kompresor yang mampu memberikan tekanan sampai setara kedalaman 50 meter. Jenis RUBT ada dua yaitu *multiplace chamber* dan *monoplace chamber*. *Multiplace chamber* dapat menampung beberapa orang yang digunakan untuk pengobatan dan dapat diisi oleh tekanan mulai dari 1 ATA sampai 4 ATA. *Monoplace chamber* sering juga digunakan untuk pengobatan atau transport pasien dari suatu tempat ke tempat yang memadai. *Multi space chamber* hanya dapat menampung satu orang pasien.^{71,72}

Ruang udara bertekanan tinggi pertama kali dibuat oleh Henshaw pada tahun 1662 di Inggris dengan menciptakan Domicilium untuk meneliti kegunaan tekanan tinggi pada penyembuhan penyakit klinis namun ternyata gagal karena tidak ditemukannya dasar-dasar ilmiah. Dokter anestesia Orville Cuningham pada tahun 1928 mendirikan rumah sakit di Kansas Amerika Serikat bernama "*Steel Ball Hospital*" berdasarkan prinsip *hyperbaric oxygen therapy* (HBOT) untuk mengobati penyakit jantung koroner. Paul Bert dokter dari Amerika menggunakan HBOT untuk menggambarkan toksisitas dan kejang tipe *grand mal* akibat tekanan tinggi dan toksisitas O₂.^{72,73}

Alat RUBT di Indonesia pertama kali dimiliki oleh Lembaga Kesehatan Kelautan (Lakesla) Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL) dan ditempatkan di rumah sakit TNI AL (RSAL) dr. Ramelan di Surabaya tahun 1960. Penggunaan RUBT di RSAL Surabaya pertama kali di Indonesia adalah untuk mengobati penyakit dekompresi akibat penyelaman dan trauma militer. Alat RBUT di Indonesia sampai dengan tahun 2011 berjumlah >100 unit dimiliki oleh rumah sakit dan perseorangan. Ruang Udara Bertekanan tinggi dapat dilihat pada gambar dua.^{73,74}



Gambar 2. Tabung Ruang Udara Bertekanan Tinggi.

Dikutip (43)

a. **Klasifikasi Ruang Udara Bertekanan Tinggi**

Ruang Udara Bertekanan Tinggi Berdasarkan kegunaannya, memiliki beberapa klasifikasi antara lain *Recompression Chamber*, *Decompression Chamber*, *Submersible Decompression Chamber*, *Surface* atau *Deck Decompression Chamber*. Komite Fasilitas Kesehatan Amerika dan Asosiasi Nasional Proteksi Kebakaran Amerika (Kanada 1981) didukung oleh Institusi Standar Nasional Amerika membagi RUBT dengan berbagai kelas antara lain RUBT kelas A dan B yang digunakan untuk manusia serta RUBT kelas C yang digunakan untuk penelitian. US Navy RUBT membagi RUBT menjadi yaitu basah, kering dan kombinasi.^{73,74}

Jenis dari RUBT dibedakan menjadi beberapa yaitu *Large Multipartmen Chamber*, *Large Multipartmen for Treatment*, *Portable High Pressure Multi-Man Chamber*, *Portable One Man High or Low Pressure Chamber*, *Portable One Man High or Low Pressure Chamber*. *Large Multipartmen Chamber* lebih untuk satu orang dengan tekanan pada chamber lebih dari 5 ATA. *Large Multipartmen for treatment* dipakai dalam pengobatan, mampu diisi dengan tekanan 2 sampai 4 ATA dan mampu menampung beberapa orang. *Portable High Pressure Multi-Man Chamber* dapat dan mudah untuk dipindahkan dipakai untuk pengobatan penyelaman atau pekerjaan Caisson dan mampu menampung lebih dari 1 orang. *Portable One Man High or Low Pressure Chamber* merupakan dekompresi permukaan pada satu orang dan berguna untuk pengobatan atau transport.^{73,74} *Large Multipartmen Chamber* dapat dilihat pada gambar tiga.



Gambar 3. *Large Multipartmen Chamber*

Dikutip (44)

Berdasarkan ukuran, bentuk dan kemampuan tekanan, RUBT dibagi menjadi *Monoplace*, *Multiple* dan *TOPOX*. *Monoplace* atau RUBT tunggal terbuat dari dua bahan yaitu akrilik yang mempunyai tekanan maksimal 3 ATA maksimal dan Baja yang mempunyai tekanan maksimal 6 ATA. *Multiple* “*Walkin Chamber*” atau disebut juga RUBT Ganda yang bisa digunakan untuk beberapa orang dan mempunyai maksimal tekana 6 ATA. *TOPOX* atau RUBT Topikal adalah bentuk

sederhana dari RUBT yang mempunyai tekanan maksimal 2 ATA.^{73,74} Multiplace chamber dan monoplace chamber dapat dilihat pada gambar empat dan lima



Gambar 4. *Multiplace chamber*

Dikutip dari (74)



Gambar 5. *Monoplace chamber*

Dikutip dari (74)

b. Komponen Penyusun Ruang Udara Bertekanan Tinggi

Komponen penyusun dari Ruang Udara Bertekanan Tinggi terbagi menjadi beberapa bagian yaitu pintu, jendela, ventilasi udara segar, pendinginan dan pemanasan, pengaturan kelembapan udara, badan (*Hull*), perabot, serta sistem pipa instrumentasi dan pengoperasian. Pintu RUBT merupakan pintu yang dalam keadaan tertutup mampu menahan tekanan yang besar dalam 1 sisi maupun 2 sisi. Pintu ini pada umumnya berbentuk bulat dan pipih tetapi dapat dimodifikasi sesuai kegunaannya. Sekeliling pintu diberikan lapisan karet agar kedap udara. Karet pelapis harus tergolong *high-elastic rubber* dan tahan terhadap minyak maupun oli. Engsel pintu dipasang dibagian samping bukan dibagian atas untuk meringankan saat membuka pintu.^{74,75}

Jendela berguna untuk mengamati kegiatan di dalam RUBT. Jendela pada dindingnya dipasang semacam jendela permanen yang ditutup dengan kaca tebal. Kaca terbuat dari gelas acrylic atau gelas mineral yang tidak mudah pecah bila mendapat tekanan. Jika kaca pecah sangat berbahaya bagi orang yang berada didalam RUBT karena akan mengalir penurunan tekanan secara mendadak. Ventilasi udara segar harus ada pada RUBT karena tanpa ventilasi kadar CO₂ di dalam RUBT akan bertambah. Kadar CO₂ bila kadarnya lebih dari 45-65 *part per milion* (ppm) akan berbahaya. Ruang Udara Bertekanan Tinggi yang ukuran kecil biasanya tidak ada ventilasi. Kerugian pada RUBT kecil yaitu akan timbul suara bising di dalam RUBT. Tempat ruang udara masuk dan udara keluar biasanya diletakkan secara diagonal agar pengaliran udara dapat terjamin.^{75,76}

Pendinginan dan pemanasan harus ada pada RUBT. Jika tekanan udara di dalam RUBT dinaikan suhu udara di dalamnya juga akan naik dan jika tekanan udara dikurangi suhu udara akan turun. Oleh sebab itu RUBT dilengkapi dengan alat pendingin dan pemanas. Pengaturan kelembapan udara didalam RUBT diatur dengan menempatkan absorbent seperti silica gel sebagai penyerap uap air. Blower digunakan agar udara dapat mengalir melalui absorbent tersebut sedangkan untuk mengukur kelembapan udara digunakan alat yaitu higrometer. Badan (*Hull*) umumnya 2 ruang dan pintu dilapisin karet. Sistem pipa terdiri dari lubang masuk dan keluar udara yang mempunyai pembuangan yang letaknya berjauhan dan

mempunyai klep ekualisasi. Instrumentasi dan pengoperasian terdapat panel kontrol yang mudah dibaca. Pengukuran tekanan atau kedalaman terdapat didalam dan dipanel. Flow meter digunakan untuk mengukur kecepatan ventilasi.^{76,77}

c. Mekanisme Kerja Ruang Udara Bertekanan Tinggi

Mekanisme kerja RUBT mirip dengan kondisi yang dialami oleh penyelam. Efek utama RUBT meliputi mekanika gas dan peningkatan tekanan parsial O₂. Mekanisme kerja RUBT diterapkan berdasarkan hukum fisika Boyle, Charles, dan Henry.^{77,78} Hukum fisika Boyle pada tahun 1662 menjelaskan peningkatan tekanan ruang akan menurunkan volume gas.^{77,78} Mekanisme kerja dan aplikasi klinis RUBT dijelaskan pada tabel tiga.

Tabel 3. Mekanisme kerja dan aplikasi klinis RUBT

Mekanisme	Aplikasi klinis
Hiperoksigenasi	<i>Decompression sickness</i> Keracunan CO Okultasi arteri retinal sentral <i>Crush injury/compartement syndrome</i> Penyembuhan <i>skin graft</i> atau <i>flap</i> Anemia kehilangan darah berat
Penurunan ukuran gelembung	Emboli udara atau gas
Vasokonstriksi	<i>Crush injury/compartement syndrome</i> Luka bakar termal
Angiogenesis	Masalah penyembuhan luka Penyembuhan <i>skin graft</i> atau <i>flap</i> Hambatan cedera radiasi
Proliferasi fibroblas / sintesis kolagen	Masalah penyembuhan luka Hambatan cedera radiasi
<i>Leukocyte oxidative killing</i>	Nekrosis infeksi jaringan lunak Osteomielitis refrakter Masalah penyembuhan luka
Menurunkan <i>adherence</i> leukosit intravaskuler	<i>Crush injury/compartement syndrome</i>
Penurunan peroksidase lipid	Keracunan CO <i>Crush injury/compartement syndrome</i>
Hambatan toksin	<i>Clostridial myonecrosis</i>
Sinergi antibiotik	Nekrosis infeksi jaringan lunak Osteomyelitis refrakter

Dikutip dari (46)

Hukum Boyle juga menjelaskan kondisi paru saat penyelaman bahwa peningkatan tekanan ke paru akan menurunkan volume gas di paru. Tekanan tinggi pada rongga toraks akan menekan parenkim paru sehingga gas didalam paru memadat. Kadar O₂ terlarut tinggi meningkatkan kecepatan penyembuhan jaringan,

merangsang angiogenesis, membunuh bakteri anaerob, dan mengurangi pembengkakan jaringan. Tekanan 1 ATM adalah tekanan udara pada tempat dengan ketinggian 1 meter (m) diukur dari permukaan laut. Tekanan 1 ATM sama dengan 76 *centimeter hidrargyrum* (cmHg). Persamaan satuan pengukuran tekanan dijelaskan pada tabel empat.

Tabel 4. Persamaan satuan pengukuran tekanan

Tekanan awal	Persamaan
1 mb	= 0,01 bar
1 bar	= 105 Pa
1 atm	= 76 cmHg
1 cmHg	= 1,01x105 Pa
1 atm	= 101,325 kPa

Keterangan : mb: milibar; Pa: Pascal; atm: atmosfer; cmHg: centimeter Hidrargyrum; kPa: kilo Pascal.

Dikutip dari (47)

d. Prinsip Kerja Ruang Udara Bertekanan Tinggi

Ruang udara bertekanan tinggi digunakan untuk terapi dan latihan penyelam. Fungsi RUBT adalah penting untuk tatalaksana penyakit akibat penyelaman. Penyakit dekompresi adalah penyakit penyelaman tersering diobati oleh RUBT. Penurunan keacunan oksigen hiperoksia penyelam juga dapat diterapi menggunakan RUBT. Ruang udara bertekanan tinggi tidak hanya mengeluarkan oksigen tekanan tinggi tetapi juga menetralsir keracunan oksigen. Simulasi penyelaman kering dilakukan dengan RUBT.^{79,80} Satuan pengukuran tekanan kedalaman didalam RUBT menggunakan satuan ATA.^{80,81}

Tabel 5. Persamaan kedalaman dengan ATA

Kedalaman	Tekanan absolut
Di permukaan	1 ATA
10 meter	2 ATA
20 meter	3 ATA
30 meter	4 ATA

Keterangan : ATA: Tekanan atmosfer absolut

Dikutip dari (47)

Ruang udara bertekanan tinggi berperan penting di dunia militer dan menyelam profesional. Penggunaan RUBT tersering yaitu untuk penatalaksanaan dan perawatan penyakit dekompresi, intoksikasi karbon monoksida, gas gangren, emboli udara, infeksi jaringan lunak, dan iskemia perifer traumatik. Penggunaan

RUBT berlebih menimbulkan efek samping yaitu keracunan oksigen dan memicu gangguan aktivitas respons imun. Gangguan aktivitas respons imun yaitu redistribusi monosit dan sub-populasi sel T, penurunan rasio *cluster differentiation* 4(CD4) atau CD8 darah, limpa, tetapi meningkat di paru.^{81,82}

7. EFEK MENYELAM TERHADAP FUNGSI PARU

Nilai faal paru dipengaruhi berbagai faktor yaitu umur, TB, jenis kelamin dan latihan fisik. Nilai faal paru tertinggi dicapai umur 19-21 tahun karena fungsi pernapasan dan sirkulasi darah meningkat dari masa usia anak menjadi optimal pada umur 20-30 tahun kemudian menurun karena penuaan. Difusi, ventilasi, ambilan oksigen dan semua parameter faal paru akan turun sesuai pertambahan umur setelah mencapai titik maksimal pada umur dewasa muda. Tes fungsi paru menggunakan spirometri dilakukan secara teratur terhadap penyelam. Fungsi paru optimal penting untuk meminimalkan risiko penyelaman.^{82,83}

a. Efek jangka pendek

Resistensi jalan napas berbanding lurus dengan densitas gas ketika aliran laminar. Peningkatan kepadatan rongga toraks pada kondisi tekanan tinggi dibawah permukaan air akan meningkatkan resistensi jalan napas. Tekanan ambien tinggi menghasilkan peningkatan densitas gas menghasilkan aliran di saluran napas besar menjadi turbulen dan meningkat secara substansial. Kapasitas pernapasan berbanding terbalik dengan akar kuadrat kerapatan gas sehingga pada kedalaman 30 m ventilasi volunter maksimum berkurang 50% dibandingkan dengan nilai permukaan laut. Keterbatasan ventilasi di kedalaman terjadi karena peningkatan kepadatan gas membatasi kapasitas paru. Kapasitas paru di lingkungan menyelam lebih rendah dari kapasitas sistem kardiovaskular. Peningkatan usaha pernapasan di bawah air menyebabkan penurunan ventilasi alveolar berakibat hiperkarbia. Hipoventilasi penyelam diperparah oleh pencampuran gas paru buruk akibat difusi gas rendah di lingkungan padat.^{83,84}

Penelitian menunjukkan menyelam di ruang kering RUBT menggunakan udara sebagai gas pernapasan menunjukkan perubahan aliran ekspirasi atau volume paru hingga 24 jam serta penurunan sementara dalam *diffusion capacity of the lung*

for carbon monoxide (DLCO) setelah kedalaman simulasi 39-87 m. Penurunan fungsi paru mencapai maksimum pada 20 menit setelah penyelaman berkorelasi dengan *microbubbles* gas vena yang terdeteksi menggunakan ultrasonografi Doppler. Subjek menghirup oksigen murni selama dekompresi tidak menunjukkan *mikrobubbles* atau penurunan DLCO signifikan. *Microbubbles* gas vena mikro menyebabkan perubahan DLCO setelah menyelam. Penurunan kapasitas difusi secara signifikan lebih tinggi pada subjek yang memiliki *microbubbles* gas vena dibandingkan dengan subyek tanpa *microbubbles* gas vena.^{83,84,85}

Penelitian melaporkan perubahan indeks spirometri setelah menyelam SCUBA basah menggunakan udara sebagai gas pernapasan. Penurunan aliran dan volume ventilasi dilaporkan setelah penyelaman laut terbuka di kedalaman 10 m dan 50 m atau di air dingin. Tidak ada perubahan bermakna dalam aliran atau volume ventilasi yang ditemukan pada subyek sehat setelah menyelam basah di kedalaman 4,5 m di kolam atau 50 m di ruang hiperbarik basah pada suhu 27° celcius (C). Penelitian terhadap penyelam rekreasi melaporkan terjadi penurunan bermakna nilai KVP setelah penyelaman di laut terbuka pada suhu air sedang. Pengaruh *submergence loading* paru statis serta efek kehilangan air berkontribusi signifikan terhadap perubahan fungsi paru setelah penyelaman. Penurunan kapasitas difusi pada kedalaman dangkal tidak berhubungan dengan tekanan dekompresi tetapi karena edema paru subklinis atau atelektasis.^{84,85,86}

Toksisitas oksigen memicu perubahan fungsi paru setelah *saturation dives* dengan paparan O₂ konsentrasi tinggi. Penyelam *saturation dives* mengalami perubahan setelah 21 hari menunjukkan peningkatan KVP dan APE, serta penurunan DLCO. Tanda-tanda klinis toksisitas oksigen paru dan penurunan DLCO terjadi pada tekanan parsial oksigen yang dianggap aman (<50 kPa). Terdapat korelasi kuat diperoleh antara penurunan kapasitas difusi paru dan paparan hiperoksia kumulatif. Perubahan fungsi paru setelah *saturation dives* disebabkan oleh mekanisme *counteracting* volume paru statis dan dinamis serta pertukaran gas paru.^{85,86}

b. Efek jangka panjang

Lingkungan menyelam memberikan tekanan ke paru akibat paparan tekanan tinggi, perubahan karakteristik gas, dan efek kardiovaskular sirkulasi paru.

Multifaktor penyelaman mempengaruhi fungsi paru secara akut dan berpotensi menyebabkan efek berkepanjangan terakumulasi secara bertahap dengan paparan penyelaman berulang. Bukti eksperimen penyelaman penelitian longitudinal menunjukkan efek buruk jangka panjang dari menyelam terhadap paru penyelam komersial, yaitu penyakit saluran napas kecil dan percepatan penurunan fungsi paru. Bukti penelitian menunjukkan bahwa menyelam dengan SCUBA memungkinkan perubahan pada fungsi paru setelah berhubungan dengan *immersion*, suhu dingin sekitar, dan stres dekompresi, perubahan fungsi paru-paru meskipun tidak bermakna. Dampak penyelaman pada fungsi paru sangat tergantung faktor paparan menyelam individu. Subjek rentan secara klinis maka perburukan fungsi paru dapat terjadi bahkan setelah penyelaman scuba air dangkal.^{86,87,88}

Peneliti Lorrain-Smith di tahun 1899 menunjukkan menghirup oksigen dengan tekanan parsial lebih tinggi dari 50 kPa penyelam menyebabkan kerusakan paru, edema paru dan inflamasi saluran napas. Inflamasi paru akibat PO_2 tinggi meningkatkan konsentrasi oksida nitrat yang dihembuskan. Penyelam mengalami proses peningkatan konsentrasi darah di rongga toraks. Konsentrasi darah rongga toraks meningkatkan perbaikan ventilasi.^{86,87,88}

Penyelam profesional terlatih memiliki volume paru lebih besar dibandingkan orang biasa. Kapasitas vital paksa penyelam bernilai lebih besar dibanding VEPI yang menyebabkan penurunan rasio VEPI/KVP akibat efek menahan napas dan tahanan selama penyelaman. Penelitian faal paru penyelam menunjukkan penurunan *forced expiratory flow 25-50* (FEF25-50) berhubungan dengan lama menyelam. Penelitian *Skogstad* selama 3 tahun pada penyelam menunjukkan penurunan nilai VEPI bermakna berhubungan dengan perubahan fungsi jalan napas kecil. Penurunan nilai VEPI penyelam menunjukkan nilai lebih bermakna dibanding orang normal. Penelitian *Crosbie* mendapatkan penurunan rasio nilai VEPI/KVP seiring peningkatan nilai KVP. Penurunan rasio VEPI/KVP penyelam disertai penurunan nilai *transfer factor of the lung for carbon monoxide* (TLCO). Peningkatan volume paru penyelam berhubungan rasio nilai VEPI/KVP mirip dengan kondisi PPOK disebut sebagai *large lung*. Penelitian *Davey* menunjukkan hubungan bermakna antara kedalaman penyelaman dengan nilai KVP

namun tidak berhubungan dengan VEP1. Proses peningkatan KVP berhubungan dengan lama penyelaman. Perubahan paru penyelam adalah berada di struktur jalan napas kecil dan perubahan sementara faal paru terlihat setelah penyelaman. Penelitian efek merokok terhadap faal paru penyelam diteliti oleh *Suzuki* menunjukkan tidak ada perbedaan nilai KVP, VEP1, FEF75 antara kelompok penyelam perokok dan tidak. Penyelam perokok menunjukkan penurunan APE lebih bermakna dibanding bukan perokok. Kombinasi merokok dan penyelaman mempercepat penurunan nilai VEP1 sehingga dianjurkan tidak merokok bagi penyelam.^{87,88,89}

Fungsi paru ditemukan lebih rendah pada penyelam dibandingkan bukan penyelam yaitu VEP1, KVP, FEF25-75, *maximal voluntary volume* (MVV) dan *maximal expiratory flow* (MEF). Penurunan fungsi paru penyelam mengindikasikan perubahan keterbatasan aliran udara akibat paparan gas penyelaman. Gangguan fungsi paru penyelam terjadi akibat perubahan struktur fibro-elastis saluran napas kecil (*small airways*). Penurunan laju aliran ekspirasi atau APE lebih besar di penyelam oksigen dari pada penyelam udara. Paparan oksigen kumulatif lebih tinggi menghasilkan efek toksik.^{87,88}

Paparan hiperoksik intermiten memerlukan pemulihan akibat efek samping pada fungsi paru. Tekanan oksigen inspirasi (PIO_2) meningkat selama menyelam sampai 100-170 kPa. Paparan jangka panjang $PIO_2 >50$ kPa menghasilkan efek toksik ringan hingga parah. Potensi keparahan keracunan oksigen meningkat seiring peningkatan PIO_2 . Pencegahan efek toksik PIO_2 tinggi penyelam dilakukan pembatasan paparan terhadap O_2 . Eksposur $PIO_2 <175$ kPa selama 2 jam setiap hari selama menyelam dianggap tidak menghasilkan kerusakan paru persisten. Penurunan MEF25-50 disebut juga aliran ekspirasi maksimal diperoleh penyelam pengguna tabung oksigen akibat efek samping eksposur oksigen kumulatif.^{88,89}

Penyelam profesional dan terlatih memiliki volume dan ventilasi prediksi paru besar. Peningkatan volum paru adalah akibat pembesaran ukuran alveoli. Volume paru besar penyelam menurunkan rasio VEP1/KVP dan aliran ekspirasi volume paru sehingga menunjukkan disfungsi saluran napas kecil. Perubahan fungsi paru penyelam berkorelasi dengan indeks paparan oksigen konsentrasi tinggi

menyelam. Tekanan parsial oksigen mencapai tingkat beracun tanpa disadari saat menyelam dengan oksigen murni atau campuran nitrogen-oksigen ditandai peningkatan fraksi. Penelitian Watt memperoleh hasil penurunan VEPI dan KVP signifikan pada penyelam scuba selama periode tiga sampai empat tahun.^{88,89}

Penyelam sering memiliki volume paru besar dan rasio VEPI/KVP rendah yang menunjukkan penyakit saluran napas obstruktif atau keterbatasan aliran udara. Penurunan fungsi paru akibat paparan menyelam telah dilaporkan pada penyelam komersial terjadi karena paparan terus menerus terhadap hiperoksia dan stres dekomresi. Proses perubahan saluran napas terjadi akibat radang paru subklinis dan perubahan vaskular. Perubahan patologis menyebabkan perkembangan penyakit saluran napas kecil pada penyelam. Perubahan fungsi paru setelah satu penyelaman scuba telah diketahui berhubungan dengan *immersion*, suhu dingin sekitar dan tekanan dekomresi. Dampak penyelaman pada fungsi paru bergantung pada faktor-faktor paparan penyelaman individu. Subjek rentan secara klinis mengalami perburukan fungsi paru cepat bahkan setelah penyelaman air dangkal.^{89,90}

8. JENIS AKTIVITAS MENYELAM DAN EFEK PERNAPASANNYA

a. *Snorkeling*

Snorkeling adalah bentuk penyelaman manusia yang paling sederhana, tetapi seperti yang dijelaskan sebelumnya, efek pernapasan membatasi penyelam pada kedalaman 50 cm. Banyak bentuk lain dari menyelam telah berevolusi.^{90,91}

b. *Breath-Hold Diving*

Metode menyelam yang paling sederhana adalah dengan menahan nafas atau disebut juga *Breath-Hold Diving*. Metode menahan napas masih digunakan untuk mengumpulkan mutiara, spons dan makanan dari dasar laut. Setelah menghirup udara, waktu menahan nafas biasanya terbatas 60 hingga 75 detik. Rekor kedalaman saat ini adalah 214 m. Banyak mekanisme pada paru yang luar biasa dan berinteraksi untuk memungkinkan hal ini. Volume paru menurun saat tekanan meningkat menurut hukum *Boyle*. Volume paru pada 10 ATA yang awalnya 6 liter

akan berkurang menjadi sekitar 600 ml. Volume paru ini jauh di bawah *residual volume* (RV) dan dengan hilangnya 5,4 kg daya apung.^{90,91}

Penyelam selama penurunan ke sebuah titik tercapai maka tubuh mencapai daya apung netral dan tubuh akan tenggelam di bawah kedalaman tersebut. Penyelam dengan metode menahan napas telah mengembangkan teknik yang disebut *glossopharyngeal insufflation* untuk meningkatkan volume paru-paru sebelum menyelam. *Glossopharyngeal insufflation* adalah teknik di mana udara dibawa ke orofaring dan dikompresi sebelum dipaksa ke paru-paru yang tekanannya sudah sepenuhnya meningkat. Tekanan paru meningkat di atas atmosfer berpotensi menyebabkan barotrauma dan volume paru-paru meningkat 2 liter atau lebih di atas kapasitas paru total normal. Teknik yang sama juga telah digunakan oleh pasien dengan penyakit pernapasan berat untuk meningkatkan aliran udara ekspirasi dan meningkatkan volume bicara. Prosedur serupa adalah dengan teknik *glossopharyngeal exsufflation* yaitu memungkinkan penyelam untuk berlatih mengurangi volume paru-paru mereka di bawah RV. Penyelaman sampai kedalaman 200 m maka paru-paru harus hampir benar-benar kolaps dan penyelam harus kembali saat naik ke permukaan. Kemampuan seorang manusia untuk melakukan manuver ini bertentangan dengan tentang mekanika paru.^{90,91}

c. *Self-contained underwater breathing apparatus (SCUBA) diving.*

Selama beberapa tahun ada keinginan agar penyelam berenang-bebas dengan membawa pasokan gas mereka sendiri. Keinginan ini pertama kali dicapai pada tahun 1943. Sistem ini didasarkan pada katup permintaan yang dikendalikan oleh kedua ambien tekanan dan inspirasi penyelam. SCUBA *diving* biasanya terbatas hingga kedalaman 30 m. Kedalaman yang lebih besar dimungkinkan tetapi tindakan kehati-hatian khusus harus diambil untuk menghindari penyakit dekompresi. Penyelam SCUBA jauh lebih *mobile* daripada penyelam dengan helm dan dapat bekerja di hampir semua posisi tubuh.^{90,91}

Penyelaman SCUBA dilakukan pada kedalaman 18-39 m atau kurang dari itu tergantung pada kebutuhannya, dan disesuaikan dengan kecepatan arus (maksimal 1 knot). Dalam keadaan normal penyelaman SCUBA dilakukan pada kedalaman 18 m selama 60 menit, sedangkan maksimalnya dilakukan pada kedalaman 39 m

selama 10 menit. SCUBA digunakan untuk melakukan tugas penyelaman di air dangkal yang memerlukan mobilitas tinggi, tetapi dapat diselesaikan dalam waktu relatif singkat. Penyelaman SCUBA sering dilakukan untuk melakukan pemeriksaan, pencarian benda-benda, penelitian, pengamatan pertumbuhan biota laut, perbaikan atau perawatan ringan pada kapal. Penyelaman SCUBA dapat juga dijadikan penunjang bagi objek wisata bawah air (*underwater tourism*) yang dapat menghasilkan devisa yang cukup banyak untuk negara.^{91,92}

Semua penyelam SCUBA harus menguasai teknik *Emergency Swimming Ascend* (ESA) yaitu berenang bebas ke permukaan dengan cepat sambil selalu menghembuskan napas. Di samping itu penyelaman SCUBA seharusnya selalu dilakukan bersama mitra selam (*buddy diver*) dan diperlukan adanya penyelam cadangan yang selalu siap menyelam bila dibutuhkan. Dalam menggunakan alat-alat SCUBA penyelam harus mematuhi prosedur yang benar supaya tidak mengalami komplikasi atau penyakit akibat penyelaman. Keuntungan penyelaman SCUBA ini ialah persiapannya cepat, tidak banyak memerlukan dukungan logistik, praktis, mobilitasnya tinggi dan gangguan yang ditimbulkan oleh peralatan selam sangat minimal. Walaupun mempunyai keuntungan tetapi ada juga kerugiannya diantaranya ialah terbatasnya suplai udara dalam scuba sehingga kedalaman dan lamanya pun terbatas.^{93,94}

9. FISILOGIS DAN PEMERIKSAAN FUNGSI PARU

a. Fisiologis paru

Paru adalah satu-satunya organ tubuh yang berhubungan dengan lingkungan diluar tubuh, yaitu melalui sistem pernafasan. Fungsi paru utama untuk respirasi yaitu pengambilan oksigen dari luar masuk ke dalam saluran nafas dan diteruskan kedalam darah. Oksigen digunakan untuk proses metabolisme karbon dioksida yang terbentuk pada proses tersebut dikeluarkan dari dalam darah ke udara luar. Proses respirasi dibagi atas tiga tahap utama yaitu ventilasi, difusi dan perfusi. Ventilasi berkaitan dengan masuk dan keluarnya udara antara alveolus dan atmosfer. Difusi berhubungan dengan perpindahan oksigen dan karbondioksida

melalui membran kapiler alveolus. Perfusi berkaitan dengan transportasi oksigen dan karbondioksida dalam darah dan cairan tubuh ke dan dari sel.^{95,96}

Paru-paru, baik pada saat ekspirasi maupun inspirasi, dapat dikembangkan dan dikontraksikan dengan dua cara, yaitu dengan gerakan turun dan naik dari diafragma untuk memperbesar atau memperkecil diafragma, depresi dan elevasi costa untuk meningkatkan dan menurunkan diameter anteroposterior dari rongga dada. Pada pernapasan normal dan tenang biasanya hanya memakai gerakan dari diafragma. Selama inspirasi, kontraksi dari diafragma akan menarik permukaan bawah paru ke bawah. Kemudian selama ekspirasi, diafragma akan berelaksasi dan sifat elastik daya lenting paru, dinding dada dan perut akan menekan paru-paru.^{95,96}

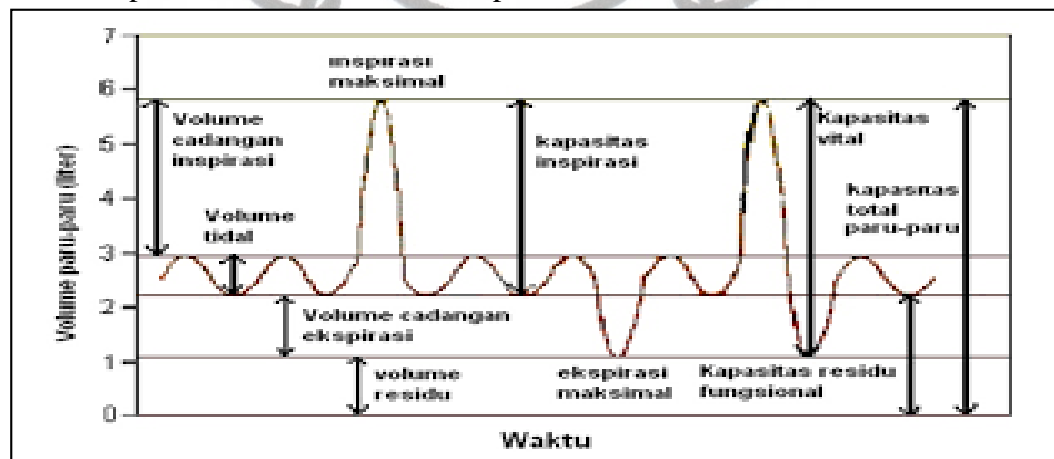
b. Pemeriksaan fungsi paru

Pemeriksaan fungsi paru mengevaluasi sistem ventilasi dan alveoli secara tidak langsung dan tidak invasif. Umur pasien, tinggi, berat badan, etnis dan jenis kelamin harus dicatat sebelum pemeriksaan dilakukan karena data-data tersebut penting dalam hal perhitungan nilai prediksi. Secara umum, pemeriksaan fungsi paru dibagi dalam 3 kategori yaitu pertama adalah pemeriksaan terhadap kecepatan aliran udara di dalam saluran pernafasan, mencakup pengukuran sesaat atau rata-rata kecepatan aliran udara di saluran nafas sewaktu ekshalasi paksa maksimal untuk mengetahui resistensi saluran pernafasan. Termasuk juga dalam kategori ini adalah tes inhalasi bronkodilator dan tes provokasi bronkus. Yang kedua adalah pengukuran volume dan kapasitas paru yaitu pengukuran terhadap berbagai kompartemen yang mengandung udara di dalam paru dalam rangka mengetahui air trapping (hiperinflasi, overdistensi) atau pengurangan volume. Pengukuran ini juga dapat membantu membedakan gangguan restriktif dan obstruktif pada sistem pernafasan. Dan yang ketiga adalah pengukuran kapasitas pertukaran gas melewati membran kapiler alveolar dalam rangka menganalisa keberlangsungan proses difusi. Hasil pemeriksaan fungsi paru diinterpretasikan melalui perbandingan nilai pengukuran yang didapat dengan nilai prediksi pada individu normal. Prediksi nilai normal itu sendiri mencakup berbagai variabel seperti umur, tinggi, berat badan, dan jenis kelamin. Ada juga beberapa faktor lain yang potensial mempengaruhi

interpretasi tetapi belum diperhitungkan seperti ras, polusi udara, status sosioekonomi.^{97,98}

Penilaian Faal paru pada orang normal pernah dilakukan di Indonesia pada tahun 1992 bekerjasama antara Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, Fakultas Kedokteran Universitas Airlangga, Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia, Lembaga penelitian Universitas Indonesia, Universitas Oregon, *Boering Ingelheim Pharma Service Indonesia* dengan asisten teknik dari world health organization (WHO) dengan nama *Pneumobile Project Indonesia*. Penelitian ini mendapatkan nilai rata-rata VEP1, KVP dan APE pada laki-laki normal dan perempuan normal Indonesia yang dapat dipakai sebagai bahan acuan pemeriksaan spirometri di Indonesia.^{99,100}

Spirometri normal didefinisikan dari bentuk kurva *flow-volume* yang normal, berupa gambaran manuver KVP diikuti dengan inspirasi yang dalam. Sebuah kurva *flow-volume* yang normal mempunyai puncak yang tajam yang dicapai dalam waktu yang singkat diikuti dengan penurunan yang gradual menuju titik O pada kurva ekspirasi. Bentuk dari kurva inspirasi haruslah bulat.^{99,100}



Gambar 6. Volume dan kapasitas paru

Dikutip (18)

Ketika nilai VEP1 berkurang, maka nilai VEP1/KVP juga akan berkurang yang menunjukkan suatu pola obstruksi. Rasio VEP1/KVP yang normal adalah $>0,75$ untuk individu yang berusia kurang dari 60 tahun dan $>0,70$ untuk yang berusia diatas 60 tahun. Namun *Adrien Shifren* menyebutkan bahwa suatu defek

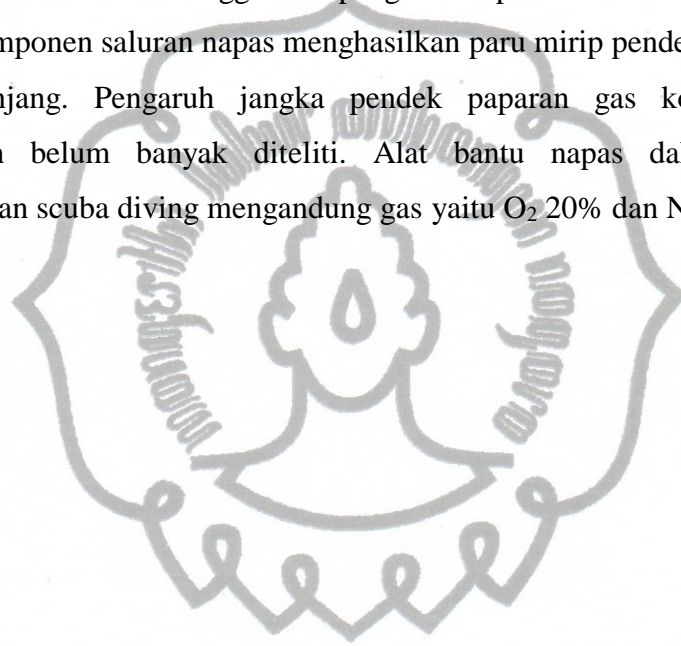
obstruksi dapat disangkakan bila $VEP1/KVP < 70$ tanpa memandang usia. Bila sangkaan defek obstruktif telah dibuat, maka perlu dilanjutkan dengan upaya untuk menentukan beratnya derajat obstruksi dan menilai reversibilitas dari obstruksi yang terjadi. Nilai prediksi VEP1 yang normal adalah 80%-120%. VEP1 70-79% nilai prediksi menunjukkan hambatan aliran udara ringan, VEP1 51-69% nilai prediksi menunjukkan hambatan aliran udara sedang, dan bila VEP1 $< 50\%$ nilai prediksi digolongkan hambatan aliran udara berat.^{101,102}

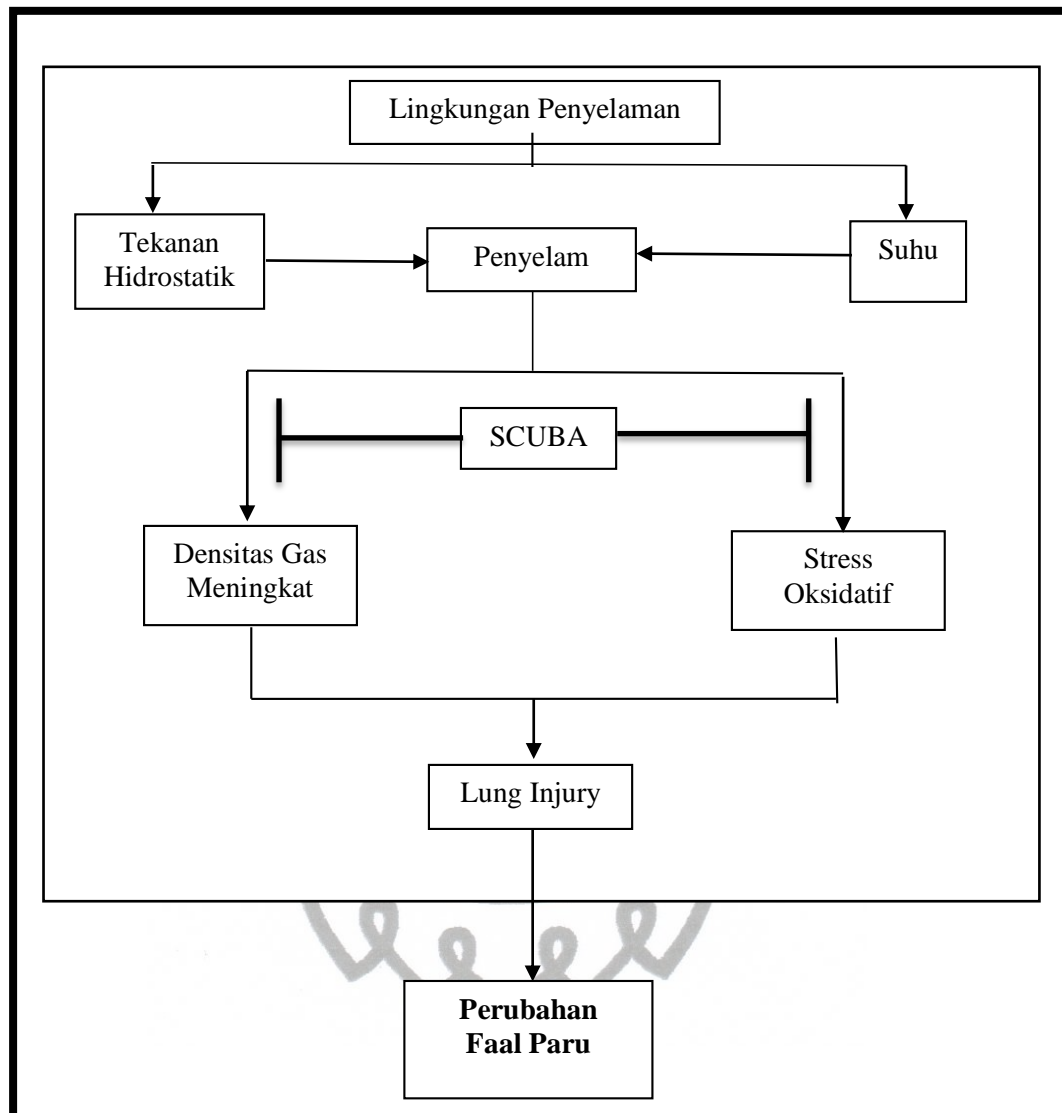
Pemeriksaan spirometri juga dapat digunakan untuk mendiagnosa kelainan penyakit paru restriktif, walaupun untuk *gold standard* haruslah diperiksa nilai kapasitas paru total (KPT)-nya. Kelainan restriktif dapat disangkakan bila nilai $VEP1/KVP > 75\%$ nilai prediksi. Kelainan restriktif ringan bila KVP 60-80% nilai prediksi, restriksi sedang bila KVP 50-60% nilai prediksi dan restriksi berat bila $KVP < 50\%$ nilai prediksi. Bila defek obstruktif terjadi maka kurva flow-volume akan berubah membentuk gambaran konkaf. Pada kurva masih dapat dilihat adanya puncak awal yang tajam dan cepat, tetapi aliran ekspirasi melemah lebih cepat daripada normal, sesuai dengan beratnya derajat obstruksi yang terjadi.^{103,104}

B. KERANGKA TEORI

Penyelam menggunakan aparatus penyelaman untuk beraktivitas didalam air. Lingkungan dan aparatus penyelaman dapat digantikan oleh RUBT. Lingkungan penyelaman memiliki berbagai faktor yang mempengaruhi fisik dan organ penyelam yaitu suhu, peningkatan tekanan hidrostatik, peningkatan densitas gas, stres oksidatif, dan tekanan parsial oksigen. Peningkatan tekanan hidrostatik akan menurunkan tekanan rekoil paru. Tekanan memiliki efek yang kompleks dan penting mempengaruhi PaO_2 dan $PaCO_2$. Dua faktor utama mempengaruhi mekanika saluran napas yaitu peningkatan densitas gas dan tekanan air pada tubuh. Peningkatan densitas gas dan penyelaman menyebabkan peningkatan usaha bernapas sehingga mengganggu pertukaran gas. Peningkatan densitas gas saat menyelam berkontribusi terhadap perubahan jaringan penyangga dan alveoli sehingga membentuk emfisematus. Emfisematus paru disertai peningkatan densitas gas akan mengakibatkan gangguan gas darah penyelam yaitu PaO_2 dan $PaCO_2$.

Stres oksidatif menghirup oksigen konsentrasi tinggi saat menyelam akan merusak epitel saluran napas. Kerusakan epitel saluran napas memicu peningkatan resistensi saluran napas dan kerja otot napas. Tekanan parsial oksigen tinggi akibat paparan gas selam meningkatkan stimulus terhadap kemoreseptor di medula oblongata. Peningkatan kerja otot napas dan kondisi emfisematus akan mempengaruhi perubahan faal paru VEP1, KVP, dan VEP1/KVP. Peningkatan paparan gas konsentrasi tinggi mempengaruhi epitel saluran napas. Perubahan struktur komponen saluran napas menghasilkan paru mirip penderita PPOK dalam jangka panjang. Pengaruh jangka pendek paparan gas konsentrasi tinggi penyelaman belum banyak diteliti. Alat bantu napas dalam penyelaman menggunakan scuba diving mengandung gas yaitu O₂ 20% dan N₂ 80%.





Gambar 7. Kerangka Teori

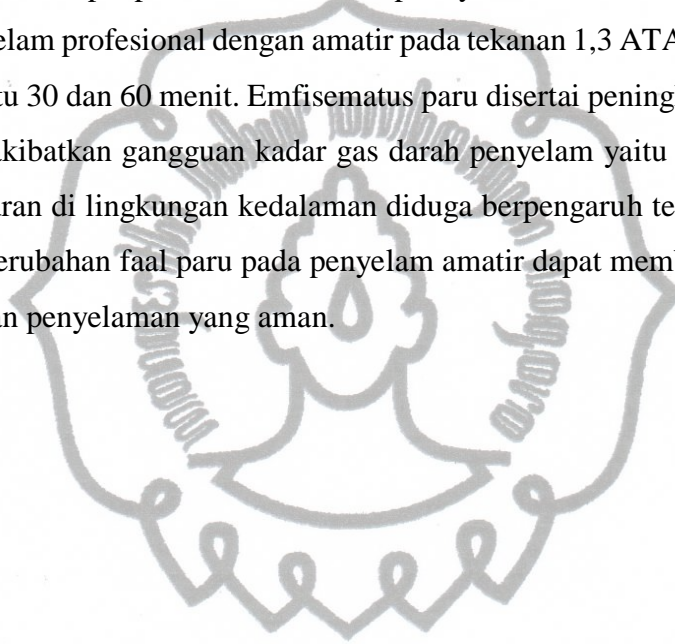
C. KERANGKA KONSEPTUAL

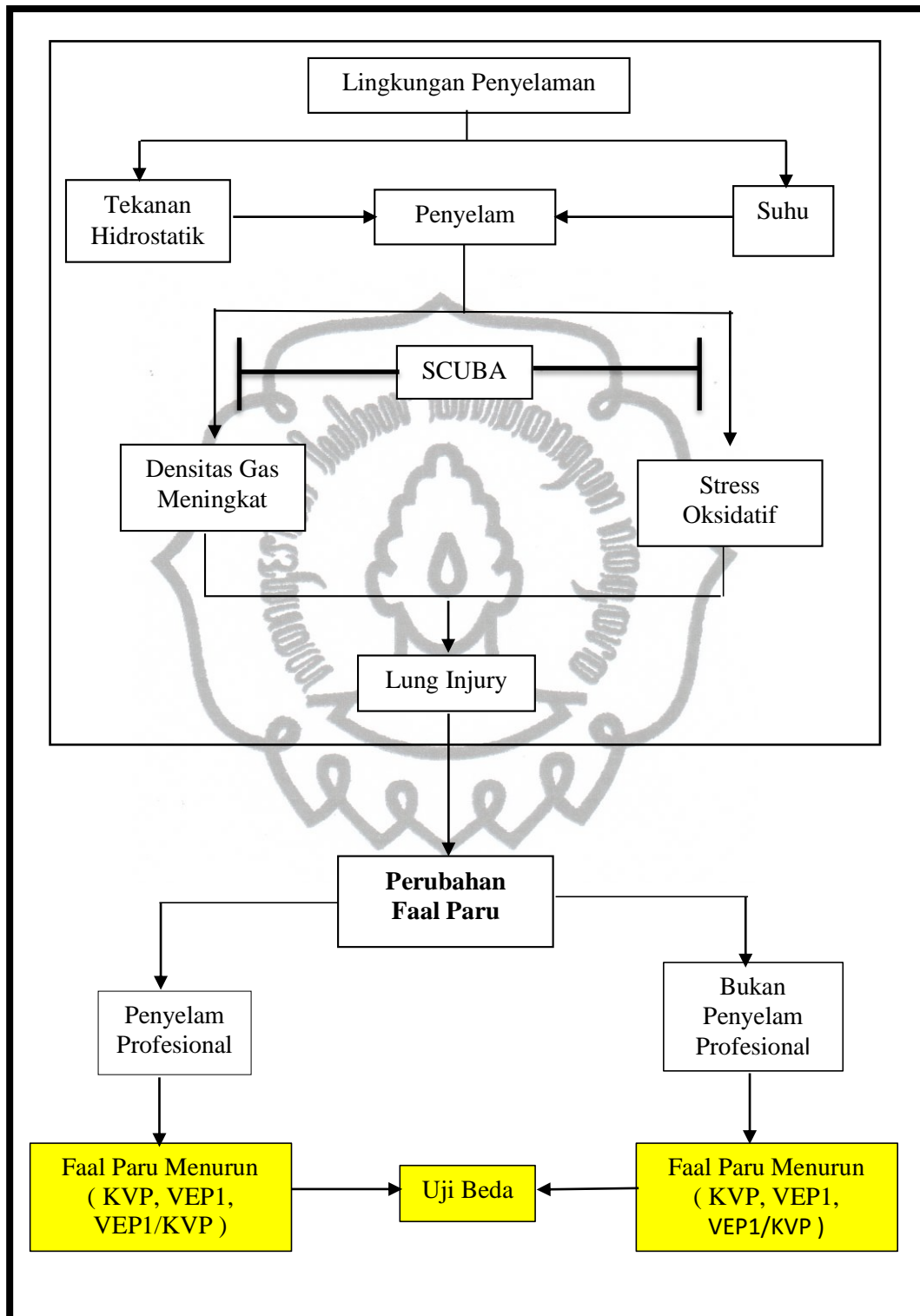
Faktor-faktor berpengaruh terhadap penyelam yaitu suhu, peningkatan tekanan hidrostatik, peningkatan densitas gas, stres oksidatif, dan tekanan parsial oksigen. Suhu, tekanan hidrostatik, dan peningkatan densitas gas akan memicu penurunan recoil paru sehingga membentuk kondisi emfisematus paru. Stres oksidatif dan peningkatan tekanan parsial oksigen akan menyebabkan peningkatan resistensi saluran napas kemudian akan mempengaruhi faal paru.

Penyelam profesional mengalami dampak menahun akibat aktivitas selam jangka lama, sehingga berisiko mengalami gangguan difusi gas dan faal paru lebih

berat dibanding orang normal bukan penyelam. Efek samping penyelaman dapat diminimalisir dengan mematuhi aturan kedalaman dan waktu penyelaman. Orang normal non penyelam yang melakukan aktivitas menyelam dapat mengalami efek samping gangguan faal paru. Gangguan faal paru orang normal bukan penyelam dapat lebih berat dibanding penyelam profesional. Perubahan faal paru bukan penyelam bersifat cepat karena paparan imersion dan oksigen konsentrasi tinggi.

Diduga terdapat perubahan nilai faal paru yaitu VEP1, KVP, dan VEP1/KVP antara penyelam profesional dengan amatir pada tekanan 1,3 ATA pada waktu yang berbeda yaitu 30 dan 60 menit. Emfisematus paru disertai peningkatan densitas gas akan mengakibatkan gangguan kadar gas darah penyelam yaitu PaO₂ dan PaCO₂. Waktu paparan di lingkungan kedalaman diduga berpengaruh terhadap perubahan faal paru. Perubahan faal paru pada penyelam amatir dapat memberikan gambaran dan pedoman penyelaman yang aman.





Gambar 8. Kerangka Konsep

Keterangan : Yang diteliti

D. HIPOTESIS

Berdasarkan uraian latar belakang masalah penelitian diatas, dapat dirumuskan hipotesis penelitian adalah sebagai berikut :

1. Terdapat perbedaan nilai faal paru pada tekanan 1,3 ATA setelah 10 menit pada penyelam profesional dibanding bukan penyelam profesional.
2. Terdapat perbedaan nilai faal paru pada tekanan 1,3 ATA setelah 20 menit pada penyelam profesional dibanding bukan penyelam profesional.
3. Terdapat perbedaan nilai faal paru pada tekanan 1,5 ATA setelah 10 menit pada penyelam profesional dibanding bukan penyelam profesional.
4. Terdapat perbedaan nilai faal paru pada tekanan 1,5 ATA setelah 20 menit pada penyelam profesional dibanding bukan penyelam profesional.

