

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.1.1 *Time of Useful Consciousness***

##### **2.1.1.1 Definisi TUC**

Pada ketinggian, keadaan atmosfer berbeda dari kondisi di permukaan bumi. Beberapa karakteristik penting dari keadaan eksternal di ketinggian termasuk tekanan udara yang rendah, di mana tekanan udara menurun seiring dengan ketinggian dan memengaruhi pernapasan serta metabolisme tubuh manusia. Ketersediaan oksigen juga berkurang karena tekanan udara yang rendah, yang dapat menyebabkan hipoksia atau kekurangan oksigen dalam tubuh, serta memengaruhi kinerja fisik dan kognitif (R.Davis *et al.*, 2022). Tekanan udara memiliki pengaruh besar terhadap aktivitas penerbangan. Berikut ini disajikan tabel yang berisi data mengenai tekanan udara pada setiap ketinggian.



**Tabel 2.1** Tekanan udara di ketinggian

| Ketinggian |        | Tekanan<br>(mmHg) | PO <sub>2</sub><br>(mmHg) | PAO <sub>2</sub><br>(mmHg) | PACO <sub>2</sub><br>(mmHg) |
|------------|--------|-------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| (m)        | (ft)   |                   |                           |                            |                             |
| 0          | 0      | 759.97            | 159.21                    | 103.0                      | 40.0                        |
| 305        | 1,000  | 733.04            | 153.57                    | 98.2                       | 39.4                        |
| 610        | 2,000  | 706.63            | 148.04                    | 93.8                       | 39.0                        |
| 914        | 3,000  | 681.23            | 142.72                    | 89.5                       | 38.4                        |
| 1,219      | 4,000  | 656.34            | 137.50                    | 85.1                       | 38.0                        |
| 1,524      | 5,000  | 632.46            | 132.50                    | 81.0                       | 37.4                        |
| 1,829      | 6,000  | 609.09            | 127.60                    | 76.8                       | 37.0                        |
| 2,134      | 7,000  | 586.49            | 122.87                    | 72.8                       | 36.4                        |
| 2,438      | 8,000  | 564.64            | 118.29                    | 68.9                       | 36.0                        |
| 2,743      | 9,000  | 543.31            | 113.82                    | 65.0                       | 35.4                        |
| 3,048      | 10,000 | 522.73            | 109.51                    | 61.2                       | 35.0                        |
| 3,353      | 11,000 | 502.92            | 105.36                    | 57.8                       | 34.4                        |
| 3,658      | 12,000 | 483.36            | 101.26                    | 54.3                       | 33.8                        |
| 3,962      | 13,000 | 464.82            | 97.38                     | 51.0                       | 33.2                        |
| 4,267      | 14,000 | 446.53            | 93.55                     | 47.9                       | 32.6                        |
| 4,572      | 15,000 | 429.01            | 89.88                     | 45.0                       | 32.0                        |
| 4,877      | 16,000 | 411.99            | 86.31                     | 42.0                       | 31.4                        |
| 5,182      | 17,000 | 395.73            | 84.50                     | 40.0                       | 31.0                        |
| 5,486      | 18,000 | 379.73            | 79.55                     | 37.8                       | 30.4                        |
| 5,791      | 19,000 | 364.49            | 76.36                     | 35.9                       | 30.0                        |
| 6,096      | 20,000 | 349.50            | 73.22                     | 34.3                       | 29.4                        |
| 6,401      | 21,000 | 335.28            | 70.24                     | 33.5                       | 29.0                        |
| 6,706      | 22,000 | 321.31            | 67.31                     | 32.8                       | 28.4                        |
| 7,010      | 23,000 | 307.85            | 64.49                     | 32.0                       | 28.0                        |
| 7,315      | 24,000 | 294.89            | 61.78                     | 31.2                       | 27.4                        |
| 7,620      | 25,000 | 282.45            | 59.17                     | 30.4                       | 27.0                        |

Sumber : Diadaptasi dari R.Davis *et al.*, 2022.

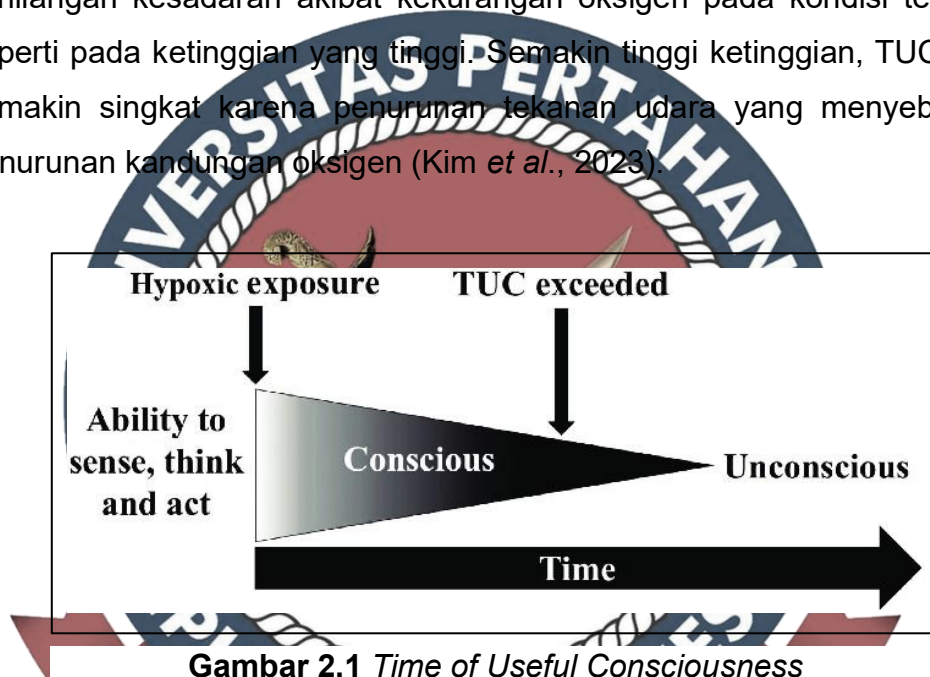
Penurunan tekanan atmosfer pada ketinggian menyebabkan penurunan tekanan parsial oksigen dalam darah dan jaringan tubuh, sehingga mengurangi ketersediaan oksigen untuk sel-sel tubuh. Hipoksia, atau kekurangan oksigen, yang terjadi akibat kondisi tekanan udara rendah pada ketinggian tinggi, dapat menyebabkan berbagai dampak pada fisiologis tubuh. Hipoksia dapat mengganggu fungsi normal sel-sel tubuh, termasuk otak dan jantung, serta memicu reaksi tubuh seperti peningkatan laju pernapasan dan detak jantung, serta vasokonstriksi untuk mengalihkan aliran darah ke organ vital (Sherwood, 2018; Guyton & Hall, 2020). Gejala hipoksia meliputi sesak napas, kelelahan, pusing, dan bahkan kehilangan kesadaran, yang dapat berujung pada kondisi serius seperti kejang atau koma jika tidak ditangani dengan cepat dan tepat (R.Davis *et al.*, 2022; Guyton & Hall, 2020).

Hipoksia dapat menyebabkan dampak yang serius pada sistem neurologis. Ketika otak tidak mendapatkan pasokan oksigen yang cukup, sel-sel saraf menjadi rentan terhadap kerusakan dan kematian sel. Gangguan fungsi kognitif seperti penurunan kemampuan berpikir, mengingat, dan berkonsentrasi dapat terjadi akibat hipoksia. Individu yang mengalami hipoksia juga mungkin mengalami kebingungan, kesulitan dalam pengambilan keputusan, dan penurunan daya ingat (Wahyudin, 2023; Guyton & Hall, 2020).

Selain gangguan fungsi kognitif, hipoksia juga dapat memengaruhi fungsi motorik tubuh. Koordinasi gerakan dan kekuatan otot dapat terganggu akibat hipoksia, menyebabkan kesulitan bergerak, kelemahan otot, atau bahkan kejang. Kondisi hipoksia juga dapat memengaruhi perilaku seseorang. Perubahan mood, kecemasan, agresivitas, gejala depresi, kebingungan, atau reaksi emosional yang tidak terduga dapat muncul akibat hipoksia. Hipoksia yang parah atau berkepanjangan dapat menyebabkan kerusakan permanen pada otak, yang dapat mengakibatkan gangguan neurologis serius seperti stroke, kejang, atau koma. Kerusakan

otak yang disebabkan oleh hipoksia dapat memiliki dampak jangka panjang yang signifikan pada fungsi neurologis individu (Wahyudin, 2023; Guyton & Hall, 2020).

Terdapat istilah yang digunakan untuk menggambarkan waktu sebelum terjadinya hipoksia, yaitu *Time of Useful Consciousness* (TUC). TUC adalah waktu yang diperlukan seseorang sebelum mengalami kehilangan kesadaran akibat kekurangan oksigen pada kondisi tertentu, seperti pada ketinggian yang tinggi. Semakin tinggi ketinggian, TUC akan semakin singkat karena penurunan tekanan udara yang menyebabkan penurunan kandungan oksigen (Kim *et al.*, 2023).



**Gambar 2.1** *Time of Useful Consciousness*

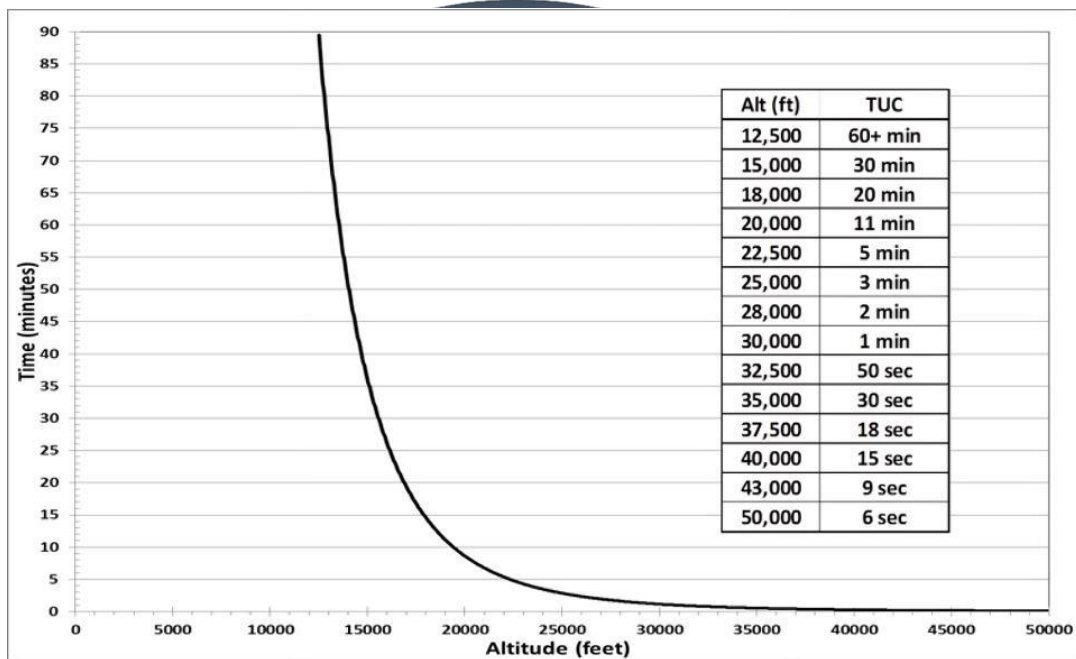
Sumber : Shaw *et al.*, 2021

TUC merupakan periode waktu di mana seseorang dapat mempertahankan kesadaran dan kemampuan kognitifnya dalam lingkungan hipoksia atau kekurangan oksigen. TUC menjadi parameter penting dalam mengevaluasi seberapa lama seseorang dapat tetap sadar dan berfungsi dengan baik dalam lingkungan yang kekurangan oksigen (Kim *et al.*, 2023; Shaw *et al.*, 2021)

#### 2.1.1.2 Rentang TUC

Rentang TUC bervariasi secara signifikan berdasarkan ketinggian, yang berkaitan langsung dengan penurunan tekanan oksigen di atmosfer. Pada ketinggian rendah, seperti 12.500 kaki, rentang TUC dapat mencapai

lebih dari 60 menit, yang berarti individu memiliki lebih dari satu jam untuk tetap sadar dan mempertahankan fungsi kognitif sebelum hipoksia mulai mempengaruhi. Ini disebabkan oleh masih cukup tingginya konsentrasi oksigen meskipun tekanan udara menurun dibandingkan dengan permukaan laut. Namun, seiring dengan meningkatnya ketinggian, tekanan udara dan konsentrasi oksigen menurun drastis, yang menyebabkan penurunan signifikan dalam rentang TUC (Maresh *et al.*, 2016).



**Gambar 2.2** Rentang TUC berdasarkan ketinggian  
Sumber : Maresh *et al.*, 2016

Pada ketinggian menengah, misalnya 22.500 kaki, rentang TUC turun drastis menjadi hanya 5 menit. Pada ketinggian 30.000 kaki, rentangnya lebih pendek lagi, yaitu hanya satu menit. Di ketinggian yang lebih ekstrim seperti 40.000 kaki, rentang TUC berkurang menjadi 15 detik, dan pada 50.000 kaki, individu hanya memiliki sekitar 6 detik untuk mempertahankan kesadaran dan fungsi kognitif yang efektif. Variasi ini menunjukkan bahwa pada ketinggian yang lebih tinggi, waktu untuk bertindak dalam situasi darurat sangat terbatas, sehingga memerlukan kesiapan dan tindakan cepat dari penerbang untuk menghindari efek berbahaya dari hipoksia (Maresh *et al.*, 2016).

Protokol penerbang pesawat pada setiap ketinggian adalah prosedur penting yang harus diikuti untuk memastikan keselamatan dan efisiensi penerbangan. Setiap fase memiliki aturan spesifik yang mencakup komunikasi dengan *Air Traffic Control* (ATC), pemeriksaan sistem pesawat, dan penyesuaian terhadap kondisi cuaca serta rute. Tabel berikut merangkum protokol utama untuk berbagai ketinggian penerbangan, berdasarkan pedoman dari *Federal Aviation Administration* (FAA) dan *International Civil Aviation Organization* (ICAO), yang memberikan panduan menyeluruh mengenai manajemen lalu lintas udara dan operasi pesawat (Federal Aviation Administration, 2013; Efthymiou, 2023).



**Tabel 2.2** Protokol penerbangan pada ketinggian

| No | Ketinggian<br>(feet) | Fase                               | Protokol Utama                                                                                                                                                                                |
|----|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | 0 - 10,000           | <i>Departure and Initial Climb</i> | Periksa dan monitor instrumen penerbangan, setel autopilot jika diperlukan, kontak ATC ( <i>Air Traffic Control</i> ) untuk <i>clearance</i>                                                  |
| 2. | 10,000 - 18,000      | <i>Climb</i>                       | Teruskan pendakian sesuai <i>SID</i> ( <i>Standard Instrument Departure</i> ), sesuaikan <i>throttle</i> untuk efisiensi bahan bakar, kontrol kecepatan dan <i>heading</i>                    |
| 3. | 18,000 - 24,000      | <i>Intermediate Climb</i>          | Kurangi kecepatan mendekati kecepatan jelajah, lakukan cek rutin sistem dan instrumen, periksa ulang cuaca dan kondisi rute                                                                   |
| 4. | 24,000 - 35,000      | <i>Cruise</i>                      | Pertahankan ketinggian dan kecepatan, monitor konsumsi bahan bakar dan kinerja mesin, tetap berkomunikasi dengan ATC dan ikuti instruksi rute                                                 |
| 5. | 35,000 - 42,000      | <i>High Altitude Cruise</i>        | Monitor kemungkinan turbulensi, optimalkan pembakaran bahan bakar dan efisiensi penerbangan, persiapkan penurunan dan pendekatan                                                              |
| 6. | 42,000 - 60,000      | <i>High Altitude Operations</i>    | Monitor tekanan dan tingkat oksigen dengan cermat, pastikan semua sistem berfungsi dalam batas operasional, berkomunikasi dengan ATC untuk manajemen lalu lintas udara pada ketinggian tinggi |
| 7. | 10,000 - 0           | <i>Descent and Approach</i>        | Pengurangan ketinggian dan kecepatan secara bertahap, konfigurasi pesawat untuk pendaratan ( <i>flaps, landing gear, dll.</i> ), ikuti <i>STAR</i> ( <i>Standard Terminal Arrival Route</i> ) |
| 8. | 0                    | <i>Landing</i>                     | Jalankan prosedur pendaratan sesuai <i>SOP</i> ( <i>Standard Operating Procedures</i> ), taxi ke gerbang mengikuti instruksi <i>ground control</i> , matikan dan amankan pesawat              |

Sumber : Federal Aviation Administration, 2013; Efthymiou, 2023

### 2.1.1.3 Pengukuran TUC

Pengukuran *Time of Useful Consciousness* (TUC) atau waktu sadar efektif merupakan aspek krusial dalam evaluasi kesiapan personel penerbangan untuk menghadapi kondisi hipoksia di ketinggian. Di Lembaga Kesehatan Penerbangan dan Ruang Angkasa (Lakespra) dr. Saryanto, pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan teknologi canggih berupa *hypobaric chamber*. Fasilitas ini memungkinkan simulasi kondisi ketinggian yang akurat dan terkontrol, memberikan data yang sangat berharga tentang respons fisiologis individu terhadap penurunan tekanan oksigen (KEP KASAU No.267, 2020).



**Gambar 2.3 Hypobaric chamber**

Sumber : Aritonang, 2019

*Hypobaric chamber* di Lakespra dr. Saryanto beroperasi berdasarkan prinsip pengurangan tekanan udara secara terkontrol. Ruangan kedap udara ini mampu mensimulasikan berbagai ketinggian dengan mengurangi tekanan udara di dalamnya, yang secara langsung mempengaruhi tekanan parsial oksigen yang tersedia untuk pernapasan. Saat tekanan udara berkurang, kadar oksigen yang dapat diserap oleh tubuh juga menurun, menciptakan kondisi hipoksia yang mirip dengan yang dialami pada ketinggian tinggi. Selama pengujian, peserta dimonitor secara ketat oleh tim medis terlatih yang mengamati berbagai parameter fisiologis dan kognitif (TNI-AU, 2020).

Proses pengukuran TUC dimulai dengan *briefing* komprehensif kepada peserta tentang prosedur, risiko, dan tanda-tanda hipoksia yang mungkin mereka alami. Peserta kemudian memasuki chamber dan diinstruksikan untuk melakukan tugas-tugas sederhana seperti menulis, menghitung, atau merespon perintah sederhana. Sementara tekanan di dalam chamber secara bertahap dikurangi untuk mensimulasikan kenaikan ketinggian, tim medis terus memantau kemampuan peserta untuk melaksanakan tugas-tugas tersebut. Titik di mana peserta mulai menunjukkan penurunan kinerja yang signifikan atau ketidakmampuan untuk melanjutkan tugas dicatat sebagai batas TUC mereka (KEP KASAU No.267, 2020).

Indoktrinasi dan Latihan Aerofisiologi (ILA) yang dilakukan di Lakespra dr. Saryanto merupakan program pelatihan komprehensif yang dirancang untuk mempersiapkan personel penerbangan menghadapi berbagai tantangan fisiologis dalam penerbangan. Program ini tidak hanya mencakup pengalaman praktis dalam *hypobaric chamber*, tetapi juga serangkaian modul pendidikan dan pelatihan yang luas. Peserta ILA menerima pendidikan teoritis mendalam tentang prinsip-prinsip aerofisiologi, termasuk efek ketinggian pada tubuh manusia, mekanisme terjadinya hipoksia, dan risiko *decompression sickness* (KEP KASAU No.267, 2020).

Komponen praktis dari ILA melibatkan sesi-sesi di *hypobaric chamber* di mana peserta belajar untuk mengenali gejala hipoksia personal mereka dan melatih prosedur darurat yang harus dilakukan saat mengalami kondisi tersebut di udara. Pengalaman langsung ini sangat berharga dalam membangun kesadaran diri dan kesiapan menghadapi situasi darurat di ketinggian. Selain itu, program ini juga mencakup orientasi disorientasi spasial, di mana peserta diperkenalkan dengan berbagai ilusi penerbangan yang umum terjadi dan strategi untuk mengatasinya (KEP KASAU No. 267, 2020).

Pelatihan evakuasi darurat juga menjadi bagian integral dari ILA di Lakespra dr. Saryanto. Peserta mengikuti simulasi evakuasi pesawat dalam berbagai skenario, termasuk evakuasi di air (*ditching*). Latihan ini dirancang untuk memastikan bahwa personel penerbangan memiliki keterampilan dan pengetahuan yang diperlukan untuk menyelamatkan diri dan membantu penumpang dalam situasi darurat. Selanjutnya, program ini juga mencakup pelatihan survival yang mengajarkan teknik-teknik bertahan hidup dalam berbagai kondisi lingkungan yang mungkin dihadapi setelah keadaan darurat penerbangan (TNI-AU, 2020).

Keseluruhan program ILA di Lakespra dr. Saryanto dirancang untuk memberikan pemahaman menyeluruh tentang tantangan fisiologis dalam penerbangan dan membangun keterampilan praktis yang diperlukan untuk menghadapi situasi darurat. Melalui kombinasi pendidikan teoritis, pengalaman praktis, dan pelatihan survival, program ini bertujuan untuk meningkatkan keselamatan penerbangan dengan mempersiapkan personel penerbangan secara menyeluruh untuk menghadapi berbagai skenario yang mungkin terjadi selama operasi penerbangan (KEP KASAU No.267, 2020).

Pada pemeriksaan *hypobaric chamber*, ketinggian yang menjadi standar dalam pengukuran adalah 25.000 feet, karena pada ketinggian ini efek hipoksia cukup signifikan untuk dikenali oleh penerbang, tetapi masih dalam batas aman sebelum risiko penyakit dekompresi meningkat secara drastis (Feldman & Cooper, 2023). TUC pada ketinggian ini berkisar 3-5 menit, yang memberikan waktu terbatas bagi penerbang untuk mengenali gejala hipoksia dan melakukan tindakan penyelamatan sebelum kehilangan kesadaran (Gunarsih, 2014). Pemilihan ketinggian ini juga mempertimbangkan insiden penyakit dekompresi yang dapat terjadi akibat pelepasan gas nitrogen dalam darah saat tekanan udara menurun secara drastis. Berdasarkan penelitian, insiden penyakit ini tercatat sekitar 0,11% dari 7.193 subjek dalam sesi pelatihan *hypobaric chamber*, sehingga masih

dalam batas risiko yang dapat diterima (Ercan et al., 2020). Selain itu, 37% penerbang militer di Indonesia diketahui memiliki TUC kurang dari 4 menit, sehingga latihan ini menjadi penting dalam meningkatkan kewaspadaan penerbang terhadap kondisi hipoksia (Sucipta et al., 2018). Dengan demikian, latihan pada 25.000 feet memungkinkan penerbang untuk mengalami hipoksia dalam kondisi yang terkendali, sehingga mereka dapat mengenali gejalanya dan meningkatkan kesiapan menghadapi situasi darurat di ketinggian operasional.

Sesuai dengan KEP KASAU No.267 Tahun 2020, hasil pemeriksaan TUC di *hypobaric chamber* yang dilakukan di Lakespra diklasifikasikan ke dalam empat golongan, yaitu :

- a. Baik : rentang TUC > 4 menit
- b. Cukup : rentang TUC antara 3 - 4 menit
- c. Kurang (K1) : nilai TUC berkisar antara 1 - 2 menit
- d. Kurang Sekali (K2) : jika TUC < 1 menit

*Time of Useful Consciousness* (TUC) dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tingkat kebugaran fisik, komposisi tubuh, dan faktor-faktor kardiovaskular. Penelitian menunjukkan bahwa individu dengan tingkat kebugaran kardiovaskular yang lebih tinggi, seperti VO2 max yang tinggi, *volume stroke* yang besar, dan perbedaan oksigen arteri-vena yang tinggi, cenderung memiliki TUC yang lebih lama dalam kondisi hipoksia (Kim et al., 2023). Selain itu, faktor-faktor seperti persentase lemak tubuh juga dapat memengaruhi TUC seseorang (Kim et al., 2023; Widiyanto et al., 2023).

#### **2.1.1.4 Faktor-Faktor yang Memengaruhi TUC pada Penerbang**

*Time of Useful Consciousness* (TUC) pada penerbang dipengaruhi oleh berbagai aspek fisiologis yang menentukan kemampuan tubuh dalam mempertahankan kesadaran dalam kondisi hipoksia. Salah satu aspek

yang berperan adalah kapasitas kardiovaskular, yang menentukan efisiensi transport oksigen ke jaringan. Penerbang dengan kebugaran jantung-paru yang baik memiliki stroke volume lebih besar dan cardiac output yang lebih tinggi, sehingga distribusi oksigen ke otak dan organ vital lebih optimal. Sebaliknya, kebugaran yang lebih rendah dapat menyebabkan perfusi jaringan yang kurang efisien, mempercepat onset hipoksia, serta memperpendek TUC (Widianto *et al.*, 2023).

Selain itu, komposisi tubuh juga memengaruhi efisiensi penggunaan oksigen dalam kondisi hipoksia. Persentase lemak tubuh yang lebih tinggi dapat berhubungan dengan penurunan kapasitas difusi oksigen di paru-paru serta gangguan ventilasi akibat penurunan compliance paru. Selain itu, metabolisme lemak membutuhkan lebih banyak oksigen dibandingkan karbohidrat, sehingga dapat meningkatkan kebutuhan oksigen dalam kondisi hipobarik (Kim *et al.*, 2023; Duda *et al.*, 2018).

Usia turut memengaruhi kemampuan tubuh dalam menghadapi hipoksia. Seiring bertambahnya usia, terjadi perubahan fisiologis dalam sistem pernapasan dan kardiovaskular, termasuk penurunan kapasitas difusi paru, elastisitas pembuluh darah, serta respons ventilasi terhadap hipoksia yang lebih lambat. Kondisi ini dapat membuat individu yang lebih tua lebih rentan terhadap penurunan kesadaran dalam kondisi hipobarik dibandingkan individu yang lebih muda (Stepanek *et al.*, 2019).

Selain itu, genetik dapat berkontribusi terhadap variasi individu dalam toleransi terhadap hipoksia. Perbedaan ekspresi gen yang mengatur produksi eritropoietin (EPO) dan hemoglobin memengaruhi kapasitas transport oksigen. Beberapa individu memiliki adaptasi fisiologis yang lebih baik terhadap hipoksia, seperti peningkatan kadar hemoglobin dan densitas kapiler yang lebih tinggi, yang memungkinkan mereka bertahan lebih lama dalam kondisi kadar oksigen rendah (Davis *et al.*, 2022).

Faktor lain yang berpengaruh adalah tekanan parsial oksigen di kabin pesawat serta durasi paparan terhadap hipoksia. Penurunan tekanan oksigen yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan hipoksia akut, sementara paparan berulang terhadap lingkungan hipobarik dapat meningkatkan toleransi tubuh melalui mekanisme aklimatisasi. Selain itu, kondisi kesehatan penerbang, seperti riwayat penyakit paru atau gangguan sirkulasi, juga dapat memengaruhi variasi individu dalam durasi TUC (Norris, 2019).

## **2.1.2 Persentase Lemak Tubuh**

### **2.1.2.1 Definisi Persentase Lemak Tubuh**

Komposisi tubuh manusia merupakan parameter penting dalam ilmu kedokteran dan fisiologi, terdiri dari empat komponen utama yang meliputi cairan tubuh (*body water*), mineral tulang (*bone mineral*), jaringan lemak tubuh total (*total body fat*), dan jaringan bebas lemak (*fat-free mass*). Jaringan lemak tubuh total mencakup semua lemak yang ada dalam tubuh, yang terbagi menjadi lemak esensial dan lemak penyimpanan. Lemak esensial adalah lemak yang diperlukan untuk fungsi biologis vital, seperti pelindung organ dalam, isolator suhu tubuh, dan bagian dari membran sel. Lemak penyimpanan adalah lemak yang disimpan di jaringan adiposa dan dapat digunakan sebagai cadangan energi ketika tubuh memerlukannya (Marieb & Hoehn, 2023; Sherwood, 2018).

Jaringan bebas lemak (*fat-free mass*) mencakup semua komponen tubuh selain lemak, termasuk otot, organ, tulang, dan cairan tubuh lainnya. Ini mencakup massa otot yang memainkan peran utama dalam gerakan dan kekuatan tubuh, serta jaringan ikat yang mendukung dan melindungi organ-organ dalam. Mineral tulang (*bone mineral*) adalah komponen yang memberikan kekuatan dan struktur pada kerangka tubuh. Tulang mengandung mineral seperti fosfor dan kalsium yang sangat penting untuk

kepadatan dan integritas tulang. Mineral tulang ini tidak hanya penting untuk mendukung berat badan tetapi juga berfungsi sebagai cadangan mineral untuk berbagai proses metabolik (Marieb & Hoehn, 2023; Sherwood, 2018).

Cairan tubuh (*body water*) merupakan komponen terbesar dari tubuh manusia, mencakup sekitar 60% dari total berat badan pada pria dewasa dan sedikit kurang pada wanita dewasa. Cairan tubuh ini penting untuk berbagai fungsi fisiologis, termasuk transportasi nutrisi dan oksigen, pembuangan produk metabolik, serta pengaturan suhu tubuh (Marieb & Hoehn, 2023; Sherwood, 2018).

Berdasarkan lokasinya, jenis lemak dalam tubuh diklasifikasikan menjadi lemak visceral dan lemak subkutan. Lemak subkutan adalah lemak yang terletak tepat di bawah kulit. Ini adalah jenis lemak yang dapat dicubit dengan jari dan biasanya ditemukan di area seperti perut, paha, dan pinggul. Lemak subkutan berfungsi sebagai penyekat untuk menjaga suhu tubuh dan sebagai cadangan energi (Marieb & Hoehn, 2023; Guyton & Hall, 2020).

Sedangkan lemak visceral adalah lemak yang terletak di dalam rongga perut dan mengelilingi organ-organ internal seperti hati, pankreas, dan usus. Lemak visceral lebih metabolik aktif daripada lemak subkutan dan dapat melepaskan asam lemak bebas, hormon, dan zat inflamasi yang dapat meningkatkan risiko penyakit kronis seperti diabetes tipe 2, hipertensi, penyakit jantung, dan sindrom metabolik (Marieb & Hoehn, 2023; Guyton & Hall, 2020).

Lemak memiliki peran yang sangat penting dalam metabolisme tubuh, berfungsi sebagai sumber energi lebih dari dua kali lipat jumlah energi yang diberikan oleh karbohidrat atau protein. Tubuh menggunakan lemak sebagai cadangan energi yang dapat dimobilisasi selama periode kelaparan atau aktivitas fisik yang berkepanjangan, dengan lemak disimpan dalam jaringan adiposa sebagai trigliserida yang dapat dipecah menjadi asam lemak bebas dan gliserol ketika tubuh memerlukan energi tambahan

(Sherwood, 2018; Marieb & Hoehn, 2023).

Selain sebagai sumber energi, lemak subkutan berfungsi sebagai isolator yang membantu mempertahankan suhu tubuh dengan mencegah kehilangan panas, serta melindungi organ-organ internal dengan bertindak sebagai bantalan yang menyerap guncangan fisik. Lemak juga merupakan komponen utama membran sel, terutama fosfolipid, yang membentuk struktur dasar dari membran sel dan penting untuk menjaga integritas sel serta mengatur masuk dan keluarnya zat ke dalam dan keluar dari sel. Selain itu, lemak adalah medium yang diperlukan untuk penyerapan dan penyimpanan vitamin yang larut dalam lemak, seperti vitamin A, D, E, dan K, yang penting untuk berbagai fungsi biologis termasuk penglihatan, kesehatan tulang, fungsi kekebalan, dan aktivitas antioksidan (Sherwood, 2018; Marieb & Hoehn, 2023).

Lemak juga diperlukan untuk sintesis hormon steroid, termasuk hormon seks seperti estrogen dan testosteron, serta kortisol yang berperan dalam respons stres. Kolesterol, yang merupakan jenis lemak, adalah prekursor penting dalam sintesis hormon-hormon ini. Selain itu, asam lemak esensial seperti asam linoleat dan asam alfa-linolenat, berperan dalam fungsi seluler termasuk peradangan dan pembekuan darah. (Sherwood, 2018; Marieb & Hoehn, 2023).

Dalam proses beta-oksidasi, asam lemak dipecah dalam mitokondria untuk menghasilkan asetil-KoA, yang kemudian masuk ke siklus Krebs untuk menghasilkan ATP, molekul energi utama yang digunakan oleh sel. Lemak juga berperan dalam sinyal seluler, dengan asam lemak tertentu berfungsi sebagai molekul sinyal yang mengatur banyak jalur metabolik dan komunikasi antar sel, termasuk mempengaruhi aktivitas hormon insulin dan leptin yang berperan dalam pengaturan nafsu makan dan metabolisme glukosa (Sherwood, 2018; Marieb & Hoehn, 2023).

#### **2.1.2.2 Klasifikasi persentase lemak tubuh**

Menurut *American Council on Exercise (ACE)*, persentase lemak tubuh dapat diklasifikasikan sebagai *essential fat*, *athletes*, *fitness*, *acceptable*, dan *obese*. *Essential fat* adalah lemak yang diperlukan untuk fungsi fisiologis dasar, sekitar 10-13% untuk wanita dan sekitar 2-5% untuk pria. Atlet umumnya memiliki lemak tubuh sekitar 14-20% untuk wanita dan sekitar 6-13% untuk pria. Individu yang bugar memiliki persentase lemak tubuh sekitar 21-24% untuk wanita dan sekitar 14-17% untuk pria. Kisaran lemak tubuh yang dianggap dapat diterima untuk kesehatan umum adalah sekitar 25-31% untuk wanita dan sekitar 18-24% untuk pria. Persentase lemak tubuh yang diklasifikasikan sebagai obesitas yaitu lebih dari 32% untuk wanita dan lebih dari 25% untuk pria.

**Tabel 2.3** Kategori persentase lemak tubuh menurut *American Council of Exercise (ACE)*

| Deskripsi      | Wanita (%) | Pria (%) |
|----------------|------------|----------|
| Lemak Esensial | 10 – 13    | 2 – 5    |
| Atletis        | 14 – 20    | 6 – 13   |
| Bugar          | 21 – 24    | 14 – 17  |
| Dapat Diterima | 25 – 31    | 18 – 24  |
| Obesitas       | ≥ 32       | ≥ 25     |

Sumber : Mohajan & Mohajan, 2023.

Kelebihan lemak tubuh, terutama lemak viseral, dapat menyebabkan berbagai dampak negatif pada kesehatan yang saling berkaitan. Akumulasi lemak berlebih tidak hanya menyebabkan peningkatan berat badan yang signifikan, yang dapat mengganggu mobilitas dan kualitas hidup secara keseluruhan, tetapi juga memicu serangkaian gangguan metabolik (Blüher, 2019). Salah satu dampak utama adalah gangguan pada sensitivitas insulin. Kelebihan lemak, khususnya lemak viseral, dapat mengganggu sinyal insulin, menyebabkan resistensi insulin yang merupakan prekursor diabetes tipe 2. Jika kondisi ini berlanjut, sel-sel beta pankreas mungkin tidak dapat mengkompensasi kebutuhan insulin yang meningkat, akhirnya menyebabkan diabetes tipe 2

(Samuel & Shulman, 2016).

Selain itu, kelebihan lemak juga berkontribusi signifikan terhadap penyakit kardiovaskular. Lemak berlebih berperan dalam perkembangan aterosklerosis, hipertensi, dan dislipidemia, yang secara kolektif meningkatkan risiko penyakit jantung koroner dan stroke (Widianto *et al.*, 2023). Dampak kelebihan lemak juga terlihat pada organ hati, di mana akumulasi lemak dapat menyebabkan perlemakan hati non-alkoholik, yang berpotensi berkembang menjadi peradangan dan kerusakan hati, bahkan sirosis dalam kasus yang parah (Saklayen, 2018).

Kombinasi dari hipertensi, obesitas sentral, resistensi insulin, dan dislipidemia dikenal sebagai sindrom metabolik, yang secara signifikan meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan diabetes (Piché *et al.*, 2018). Selain itu, obesitas dapat menyebabkan gangguan pernapasan seperti apnea tidur obstruktif dan sindrom hipoventilasi obesitas, yang mengganggu kualitas tidur dan oksigenasi (Blüher, 2019). Beban berlebih pada sendi akibat kelebihan berat badan juga dapat mempercepat degradasi kartilago dan menyebabkan osteoarthritis, terutama pada sendi penopang berat badan (Nedunchezhiyan *et al.*, 2022).

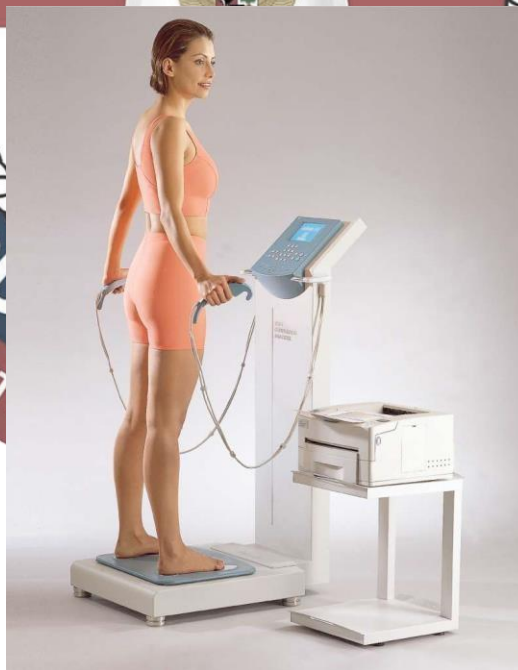
Jaringan adiposa yang berlebihan juga menghasilkan sitokin pro-inflamasi, menyebabkan peradangan sistemik tingkat rendah yang berkontribusi pada berbagai kondisi kronis (Nedunchezhiyan *et al.*, 2022). Akhirnya, dampak obesitas tidak hanya terbatas pada kesehatan fisik, tetapi juga dapat mempengaruhi kesehatan mental. Obesitas dapat berdampak negatif pada citra tubuh dan harga diri, meningkatkan risiko depresi dan kecemasan. Dengan demikian, kelebihan lemak tubuh memiliki dampak multisistem yang kompleks dan saling terkait.

### **2.1.2.3 Pengukuran persentase lemak tubuh**

Pengukuran persentase lemak tubuh merupakan komponen penting dalam penilaian komposisi tubuh dan status kesehatan secara keseluruhan (Borga *et al.*, 2018). Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengukur persentase lemak tubuh, masing-masing

dengan tingkat akurasi dan aksesibilitas yang berbeda. Salah satu metode yang paling umum dan mudah diakses adalah pengukuran antropometri, termasuk pengukuran lipatan kulit menggunakan kaliper dan pengukuran lingkar tubuh, yang meskipun kurang akurat dibandingkan metode lain, tetap berguna untuk penilaian cepat di lapangan atau klinik (Kobel *et al.*, 2022).

Metode yang lebih canggih meliputi *Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA), yang mengukur resistensi aliran listrik melalui jaringan tubuh untuk memperkirakan komposisi tubuh. BIA relatif mudah dilakukan dan non-invasif, menjadikannya pilihan populer untuk penggunaan klinis dan penelitian. Namun, akurasi BIA dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti hidrasi, aktivitas fisik baru-baru ini, dan konsumsi makanan (Aldobali & Pal, 2021).

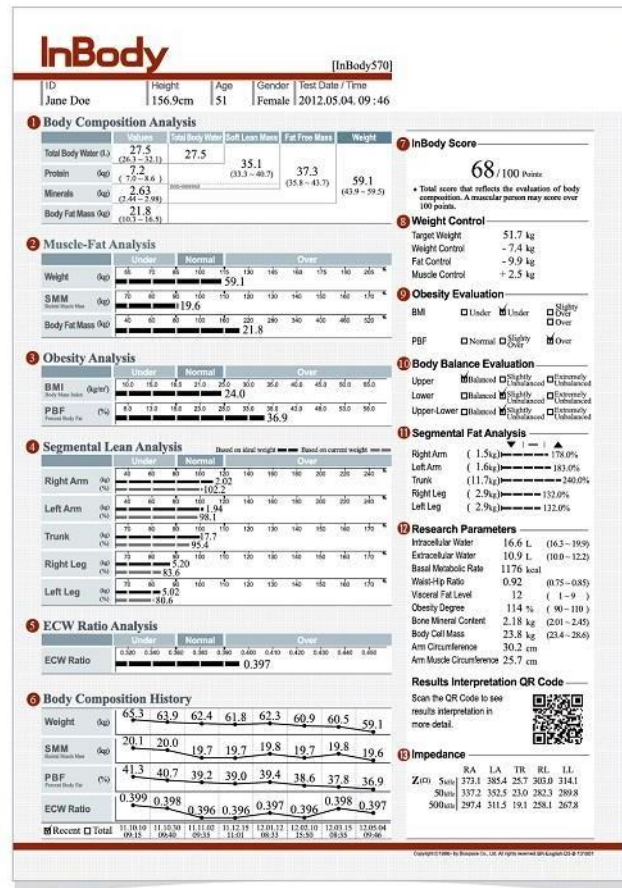


**Gambar 2.4** *Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA)

Sumber : InBody Indonesia. (2024)

Penggunaan alat *Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA) memungkinkan kita untuk memperoleh data komprehensif mengenai komposisi tubuh seseorang. Melalui pengukuran ini, kita dapat memahami

lebih dalam mengenai massa lemak tubuh, massa otot, kadar air, dan indeks massa tubuh (BMI). Berikut ini adalah gambaran hasil pengukuran BIA yang ditampilkan pada kertas hasil (Aldobali & Pal, 2021).

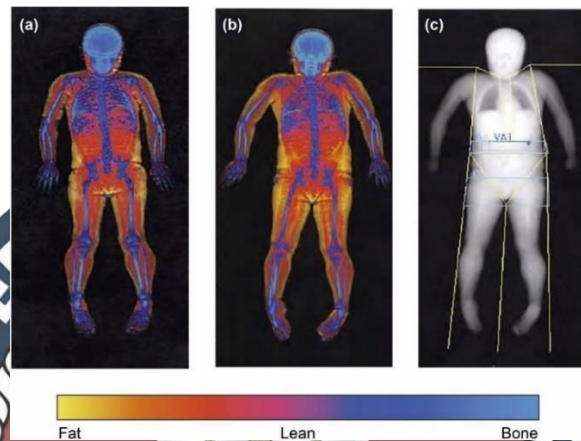


**Gambar 2.5** Gambaran hasil pemeriksaan BIA  
Sumber : InBody Indonesia. (2024)

Gambar hasil pemeriksaan BIA memberikan visualisasi dari data yang dihasilkan, yang biasanya mencakup parameter seperti *total body water* (TBW), *fat-free mass* (FFM), *body fat percentage* (BFP), dan *basal metabolic rate* (BMR). Melalui pengukuran resistansi listrik saat arus listrik frekuensi rendah melewati tubuh, BIA dapat memberikan informasi yang berguna bagi profesional kesehatan untuk menganalisis kondisi fisik individu, memantau perubahan komposisi tubuh, dan merancang program kesehatan atau diet yang lebih tepat (Aldobali & Pal, 2021).

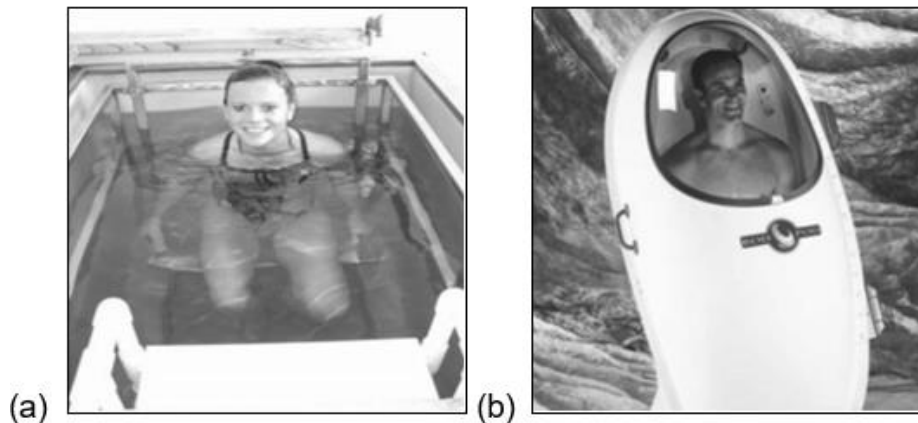
Untuk pengukuran yang lebih akurat, metode seperti *Dual-Energy X-ray Absorptiometry* (DEXA) sering dianggap sebagai standar emas dalam

pengukuran komposisi tubuh. DEXA menggunakan sinar X energi rendah untuk membedakan antara jaringan lunak, tulang, dan lemak, memberikan penilaian yang sangat akurat tentang distribusi lemak di seluruh tubuh. Meskipun DEXA sangat akurat, penggunaannya terbatas karena biaya tinggi dan kebutuhan akan peralatan khusus (Messina *et al.*, 2020).



**Gambar 2.6** *Dual-energy X-ray absorptiometry (DEXA)*  
Sumber: (Sherlock *et al.*, 2022)

Metode lain yang digunakan dalam penelitian dan pengaturan klinis tertentu termasuk *hydrostatic weighing* dan *Air Displacement Plethysmography (ADP)*. *Hydrostatic weighing* mengandalkan prinsip Archimedes untuk mengukur densitas tubuh, sementara ADP menggunakan perubahan tekanan udara untuk mengukur volume tubuh. Kedua metode ini sangat akurat tetapi memerlukan peralatan khusus dan prosedur yang lebih kompleks (Muntean *et al.*, 2023).



**Gambar 2.7** (a) Teknik penimbangan hidrostatik; (b) Pengukuran komposisi tubuh dengan teknik *air displacement*

Sumber : (Nasrulloh *et al.*, 2021)

### 2.1.3 Hubungan Persentase Lemak Tubuh dengan TUC

Hubungan antara persentase lemak tubuh dan rentang TUC atau waktu sadar efektif merupakan topik yang menarik dalam fisiologi penerbangan dan kedokteran penerbangan (Stepanek *et al.*, 2019; R. Davis *et al.*, 2022). Studi-studi terbaru telah melakukan penelitian mengenai berbagai faktor yang berpotensi memengaruhi waktu sadar efektif (*Time of Useful Consciousness/TUC*) dalam kondisi hipoksia hipobarik. Kim *et al.* (2023) menemukan bahwa komposisi tubuh dan kebugaran fisik memainkan peran penting dalam kemampuan individu untuk mempertahankan kesadaran di tekanan rendah oksigen. Mereka menyarankan bahwa individu dengan lemak tubuh yang lebih rendah dan tingkat kebugaran fisik yang lebih tinggi mungkin memiliki TUC yang lebih baik karena mampu mengoptimalkan penggunaan oksigen dan menjaga homeostasis tubuh dalam kondisi stres hipoksik.

Penelitian oleh Widiyanto *et al.* (2023) mengeksplorasi hubungan antara persentase lemak tubuh dan nilai  $VO_2$  maksimum pada penerbang TNI AU. Meskipun tidak langsung mengukur TUC, peningkatan persentase lemak tubuh telah terkait dengan penurunan nilai  $VO_2$  maksimum, yang

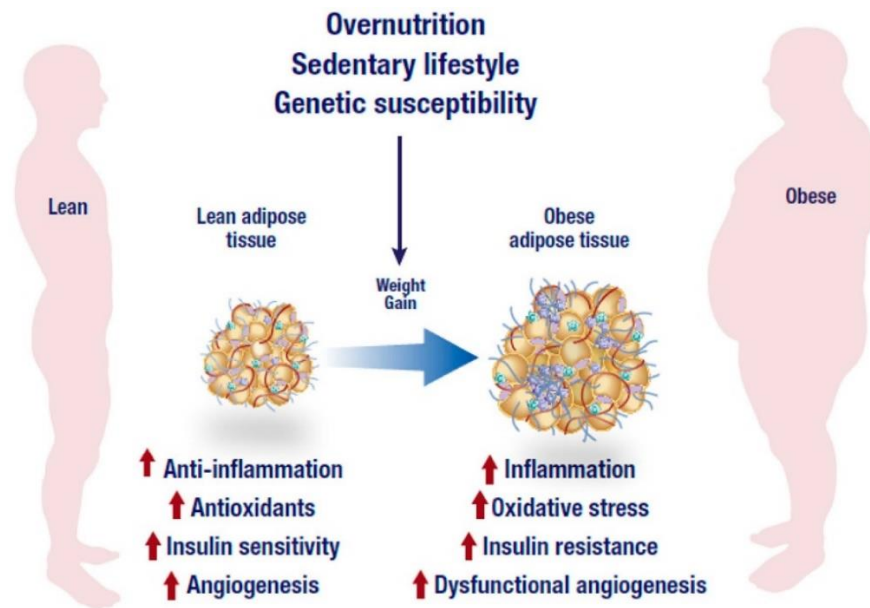
merupakan indikator vital dalam menilai kebugaran kardiorespirasi seseorang.  $VO_2$  maksimum mencerminkan kemampuan tubuh untuk menghasilkan energi aerobik saat berada di bawah tekanan oksigen rendah, seperti dalam simulasi hipoksia. Selain itu, transport oksigen dalam tubuh juga dapat terpengaruh oleh komposisi tubuh. Individu dengan persentase lemak tubuh yang lebih tinggi cenderung memiliki peningkatan distribusi darah ke jaringan adiposa, yang secara metabolik kurang aktif dibandingkan dengan jaringan otot. Hal ini dapat mengurangi suplai oksigen ke jaringan aktif, termasuk otak dan otot, yang berperan penting dalam mempertahankan kesadaran dan respons fisiologis terhadap hipoksia. Oleh karena itu, persentase lemak tubuh yang lebih tinggi dapat mempengaruhi efisiensi penggunaan oksigen dan kemampuan adaptasi tubuh terhadap kondisi hipoksia, yang akhirnya dapat mempengaruhi TUC.

Individu dengan persentase lemak tubuh yang lebih tinggi cenderung memiliki kapasitas difusi oksigen yang lebih rendah di paru-paru. Hal ini disebabkan oleh peningkatan jaringan adiposa di sekitar dinding dada dan rongga perut, yang dapat mengurangi *compliance* paru dan menghalangi ekspansi paru yang optimal selama inspirasi. Akibatnya, efisiensi pertukaran gas menurun, yang dapat mempercepat onset hipoksia pada kondisi tekanan parsial oksigen yang rendah. Selain itu, peningkatan massa lemak tubuh juga berhubungan dengan peningkatan kebutuhan metabolik basal. Individu dengan persentase lemak tubuh yang lebih tinggi memerlukan lebih banyak oksigen untuk mempertahankan fungsi fisiologis dasar, bahkan dalam keadaan istirahat (Guyton&Hall, 2020; Norris, T., 2019). Dalam situasi di mana suplai oksigen terbatas, seperti pada ketinggian tinggi atau selama simulasi hipoksia, kebutuhan oksigen yang meningkat ini dapat mempercepat penurunan saturasi oksigen dalam darah, sehingga potensial memperpendek TUC (Kim *et al.*, 2023).

Dijelaskan dalam buku Harper's Illustrated Biochemistry (Kennelly, 2023), metabolisme lemak menghasilkan lebih banyak energi (ATP) dibandingkan metabolisme karbohidrat, tetapi membutuhkan lebih banyak oksigen dalam prosesnya. Oleh karena itu, individu dengan persentase lemak tubuh yang lebih tinggi mungkin memiliki kebutuhan oksigen yang lebih besar untuk mempertahankan produksi energi. Dalam kondisi hipoksia, kebutuhan oksigen yang meningkat ini dapat menyebabkan individu dengan lemak tubuh yang lebih tinggi mengalami penurunan TUC lebih cepat dibandingkan individu dengan komposisi tubuh yang lebih optimal.

Dari perspektif kardiovaskular, persentase lemak tubuh yang lebih tinggi sering dikaitkan dengan penurunan kebugaran jantung-paru (*cardiorespiratory fitness*). Individu dengan komposisi tubuh yang kurang optimal cenderung memiliki volume sekuncup (*stroke volume*) lebih rendah dan peningkatan denyut jantung istirahat, yang mengurangi efisiensi distribusi oksigen ke jaringan. Sirkulasi kardiopulmoner berperan penting dalam menjaga suplai oksigen ke otak dan organ vital. Peningkatan lemak tubuh dapat menyebabkan gangguan hemodinamik, seperti peningkatan resistensi vaskular dan penurunan elastisitas pembuluh darah akibat inflamasi kronis. Selain itu, restriksi mekanis pada paru menurunkan kapasitas difusi oksigen, memperburuk hipoksemia dalam kondisi hipoksia. Akibatnya, adaptasi fisiologis terganggu, mempercepat onset hipoksia, dan memperpendek TUC (West, 2016; Norris, 2019).

Metabolisme lemak juga memiliki kaitan erat dengan produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang dapat memicu inflamasi sistemik. Peningkatan kadar ROS dapat menyebabkan stres oksidatif yang berdampak pada disfungsi endotel dan sirkulasi darah, sehingga mengurangi efektivitas transportasi oksigen dalam tubuh (Dludla *et al.*, 2018).



**Gambar 2.8** Dampak akumulasi lemak tubuh terhadap inflamasi, stres oksidatif, resistensi insulin, dan disfungsi angiogenesis

Sumber : Dlodla et al., 2018

Studi oleh Dlodla et al. (2018) menunjukkan bahwa ROS yang berlebih dalam kondisi obesitas dapat meningkatkan produksi sitokin proinflamasi seperti TNF- $\alpha$  dan IL-6, yang berperan dalam merusak keseimbangan redoks seluler dan mempercepat perkembangan stres oksidatif. Inflamasi yang dihasilkan dari proses ini dapat menyebabkan gangguan metabolisme yang berujung pada disfungsi mitokondria, menghambat efisiensi produksi energi, serta memperburuk transportasi oksigen di jaringan tubuh. Inflamasi sistemik akibat ROS dalam kondisi obesitas berkontribusi terhadap gangguan metabolisme dan transportasi oksigen yang lebih lanjut memperburuk hipoksia.

Dalam konteks hipoksia, kemampuan tubuh untuk meningkatkan ventilasi menjadi krusial. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa individu dengan persentase lemak tubuh yang lebih tinggi mungkin memiliki respons ventilatori yang kurang efisien terhadap hipoksia. Hal ini dapat disebabkan oleh kombinasi faktor mekanis (seperti yang disebutkan sebelumnya) dan kemungkinan perubahan dalam sensitivitas

kemoreseptor (Wahyudin, 2023; Norris, T., 2019).

Hubungan antara persentase lemak tubuh dan TUC bersifat kompleks dan mungkin dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti genetik, jenis kelamin, usia, dan tingkat kebugaran keseluruhan. Namun, pemahaman tentang aspek fisiologis ini dapat memberikan wawasan berharga dalam mengevaluasi dan meningkatkan ketahanan penerbang terhadap hipoksia. Dengan mempertimbangkan aspek-aspek fisiologis ini, menjadi jelas bahwa persentase lemak tubuh dapat memiliki implikasi signifikan terhadap TUC pada penerbang. Optimalisasi komposisi tubuh, dengan fokus pada manajemen persentase lemak tubuh, dapat menjadi strategi penting dalam meningkatkan ketahanan penerbang terhadap hipoksia dan memperpanjang TUC dalam situasi darurat di ketinggian tinggi (Kim *et al.*, 2023; Widiyanto *et al.*, 2023).



## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

**Tabel 2.4** Hasil penelitian terdahulu

| No. | Penulis<br>(Tahun)                                                                                                         | Judul Penelitian                                                                                              | Persamaan                                                                                         | Perbedaan                                                                                                                | Hasil                                                                                                                                               |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Col Keunsoo Kim, PhD, KAFA; Lt Col Jean Choi, PhD, KAFA; On Lee, PhD; Jungjun Lim, PhD; MAJ Jungwoon Kim, PhD, KAFA (2022) | <i>The Effects of Body Composition, Physical Fitness on Time of Useful Consciousness in Hypobaric Hypoxia</i> | Mengkaji pengaruh komposisi tubuh dan <i>Time of Useful Consciousness</i> dalam kondisi hipoksia. | Fokus pada kebugaran fisik selain persentase lemak tubuh; tidak spesifik pada penerbang TNI AU di Lakespra dr. Saryanto. | Menunjukkan bahwa komposisi tubuh dan kebugaran fisik signifikan mempengaruhi <i>Time of Useful Consciousness</i> dalam kondisi hipoksia hipobarik. |
| 2.  | Eri Widiyanto, et al. (2023)                                                                                               | Hubungan Persentase Lemak Tubuh                                                                               | Penelitian dilakukan terhadap penerbang TNI AU yang melaksanakan pemeriksaan                      | Penelitian ini fokus pada hubungan antara persentase                                                                     | Terdapat korelasi negatif yang bermakna antara                                                                                                      |

|    |                                |                                                                                                                                                                |                                                                                                     |                                                                                                      |                                                                                                   |
|----|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                | dengan Nilai VO2 Maks Penerbang TNI AU                                                                                                                         | kesehatan di Lakespra dr. Saryanto, juga menggunakan alat BIA untuk mengukur persentase lemak tubuh | lemak tubuh dengan nilai VO2 maksimum                                                                | persentase lemak tubuh dengan nilai VO2 maksimum pada penerbang militer TNI AU                    |
| 3. | Veronica Galih Gunarsih (2014) | Hubungan Kadar Hemoglobin Dan Beberapa Faktor Lain Terhadap Waktu Sadar Efektif di Kalangan Calon dan Awak Pesawat Militer Pada Simulasi Ketinggian 25000 Kaki | Penelitian dilakukan di Lakespra Dr. Saryanto dan mengukur waktu sadar efektif (TUC) di ketinggian  | Variabel yang diteliti adalah kadar hemoglobin dan indeks massa tubuh, bukan persentase lemak tubuh. | Indeks massa tubuh dan kadar hemoglobin mempengaruhi waktu sadar efektif pada simulasi ketinggian |

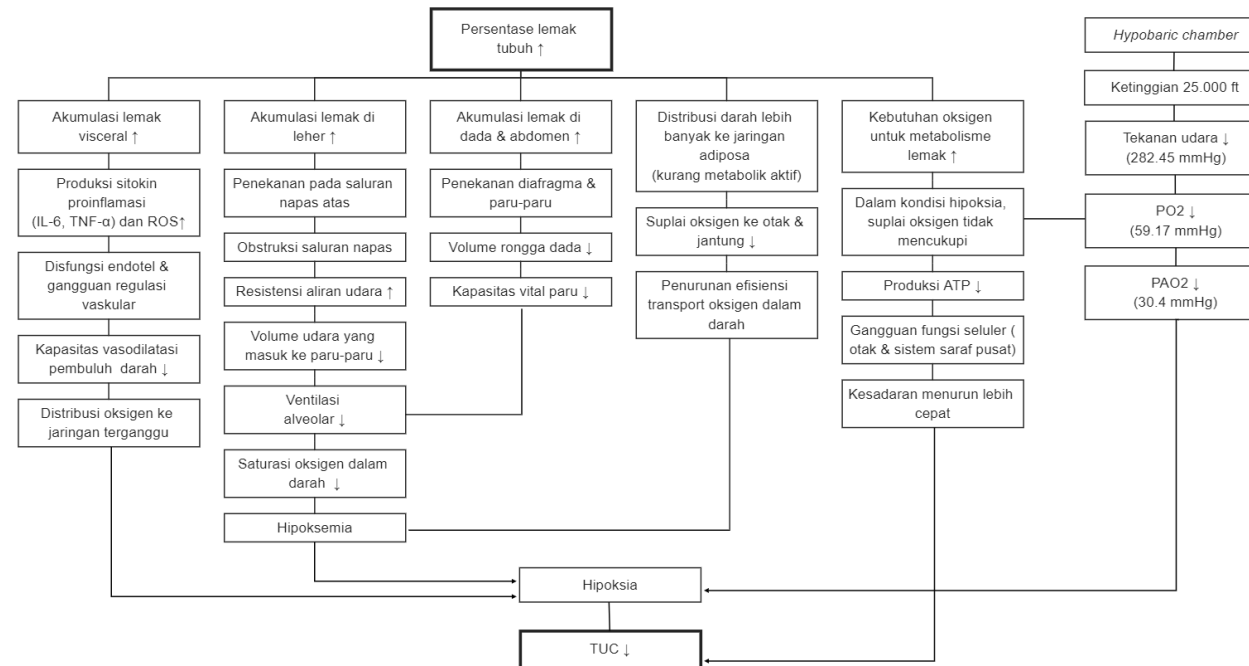
|    |                                       |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                        |                                                                                                               |                                                                                                                      |
|----|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. | Tuncay<br>Alparslan, et al.<br>(2023) | The Relationship<br>Between<br>Anaerobic<br>Performance Test<br>and Time of<br>Useful<br>Consciousness<br>Determined in<br>Low- Altitude<br>Chamber (25,000<br>Feet) with Heart<br>Rate Variability | TUC sebagai variabel<br>dependen, menggunakan<br>lingkungan hipoksia (25,000<br>feet). | Fokus pada<br>performa<br>anaerobik dan<br>variabilitas denyut<br>jantung, bukan<br>persentase lemak<br>tubuh | Menemukan bahwa<br>variabilitas denyut<br>jantung dan performa<br>anaerobik<br>mempengaruhi TUC<br>secara signifikan |
|----|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



## 2.3 Kerangka Berpikir

### 2.3.1 Kerangka Teori

Kerangka teori berikut menggambarkan landasan ilmiah yang menghubungkan persentase lemak tubuh dengan TUC pada penerbang TNI AU. Bagan ini menjelaskan interaksi antara fisiologi penerbangan, komposisi tubuh, dan respon kardiorespirasi terhadap hipoksia sehingga bisa memengaruhi TUC.



**Gambar 2.9** Kerangka teori

Peningkatan persentase lemak tubuh menyebabkan berbagai dampak fisiologis yang berkontribusi terhadap hipoksia. Akumulasi lemak visceral meningkatkan produksi sitokin proinflamasi (IL-6, TNF- $\alpha$ ) dan *Reactive Oxygen Species* (ROS), yang berperan dalam disfungsi endotel dan gangguan regulasi vaskular. Akibatnya, kapasitas vasodilatasi pembuluh darah menurun, menyebabkan gangguan distribusi oksigen ke jaringan (Dludla *et al.*, 2018).

Akumulasi lemak di leher menyebabkan penekanan pada saluran napas atas, meningkatkan resistensi aliran udara, dan dapat menyebabkan obstruksi saluran napas. Dampaknya adalah penurunan volume udara yang masuk ke paru-paru, menurunnya ventilasi alveolar, dan penurunan saturasi oksigen dalam darah, yang berujung pada hipoksemia (Butterworth *et al.*, 2018; Kam & Power, 2020). Sementara itu, akumulasi lemak di dada dan abdomen menekan diafragma serta paru-paru, mengurangi volume rongga dada dan kapasitas vital paru, sehingga semakin memperburuk pertukaran oksigen (Guyton & Hall, 2020; Norris, T., 2019).

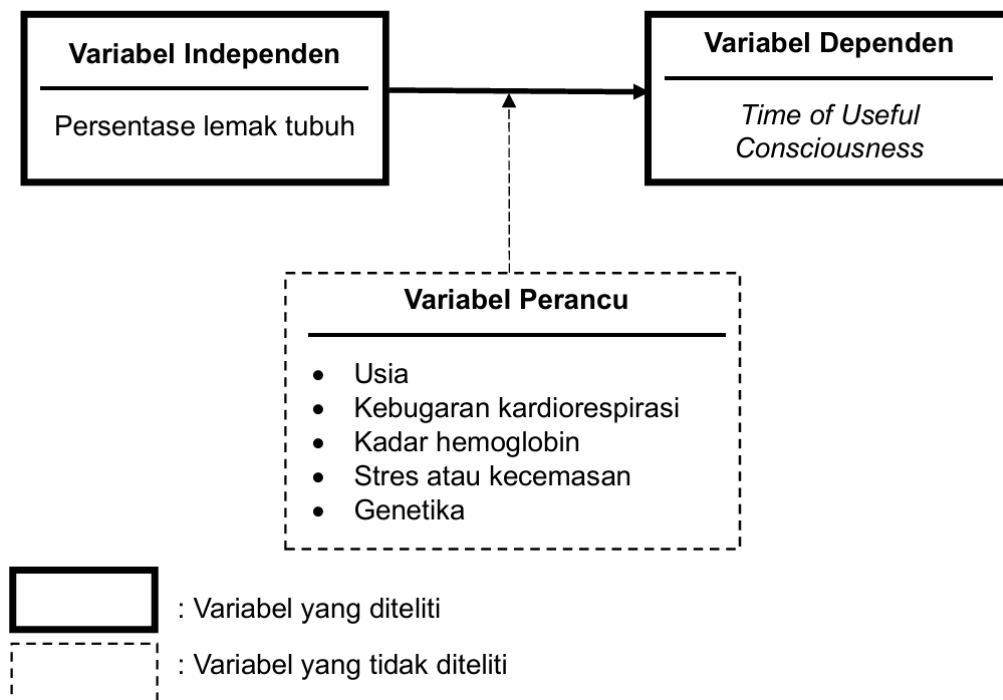
Selain itu, distribusi darah yang lebih banyak ke jaringan adiposa, yang metabolisme kurang aktif, menyebabkan suplai oksigen ke organ vital seperti otak dan jantung menurun. Efisiensi transport oksigen dalam darah juga berkurang, mempercepat terjadinya hipoksia (Widianto *et al.*, 2023).

Pada saat latihan aerofisiologi menggunakan *hypobaric chamber* pada ketinggian 25.000 kaki, tekanan udara menurun hingga 282.45 mmHg, menyebabkan penurunan tekanan oksigen parsial (PO<sub>2</sub>) menjadi 59.17 mmHg dan PAO<sub>2</sub> menjadi 30.4 mmHg (R. Davis *et al.*, 2022). Dalam kondisi ini, kebutuhan oksigen untuk metabolisme lemak meningkat, tetapi suplai oksigen menjadi tidak mencukupi. Hal ini menghambat produksi ATP dan menyebabkan gangguan fungsi seluler, terutama pada otak dan sistem saraf pusat (Kennelly, 2023). Akibatnya, kesadaran menurun lebih

cepat, yang berkontribusi terhadap penurunan TUC, yaitu waktu di mana seseorang masih dapat berfungsi secara efektif sebelum kehilangan kesadaran akibat hipoksia.

### 2.3.2 Kerangka Konsep

Berdasarkan kerangka teori, kerangka konsep berikut menyederhanakan hubungan antara variabel-variabel penelitian. Bagan ini memvisualisasikan korelasi yang dihipotesiskan antara persentase lemak tubuh dan TUC.



**Gambar 2.10** Kerangka konsep

Kerangka konsep penelitian di atas menggambarkan hubungan antara variabel independen dan variabel dependen dengan mempertimbangkan pengaruh variabel perancu. Variabel independen utama dalam penelitian ini adalah persentase lemak tubuh, yang berperan dalam memengaruhi *Time of Useful Consciousness* (TUC) sebagai variabel dependen.

Dalam hubungan ini, terdapat variabel perancu yang dapat memodifikasi atau memengaruhi keterkaitan antara kedua variabel utama. Variabel perancu yang dipertimbangkan meliputi usia, kebugaran kardiorespirasi, kadar hemoglobin, tingkat stres atau kecemasan, serta faktor genetik. Faktor-faktor ini dapat berkontribusi terhadap toleransi individu terhadap hipoksia dan kecepatan penurunan TUC.

## 2.4 Hipotesis Penelitian

H0 (Hipotesis Nol) : Tidak terdapat korelasi yang signifikan antara persentase lemak tubuh dan *Time of Useful Consciousness* (TUC) pada penerbang TNI AU yang melaksanakan Indoktrinasi dan Latihan Aerofisiologi (ILA) di Lakespra Dr. Saryanto pada tahun 2023.

H1 (Hipotesis Alternatif) : Terdapat korelasi yang signifikan antara persentase lemak tubuh dan *Time of Useful Consciousness* (TUC) pada penerbang TNI AU yang melaksanakan Indoktrinasi dan Latihan Aerofisiologi (ILA) di Lakespra Dr. Saryanto pada tahun 2023.

