

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Kajian Pustaka**

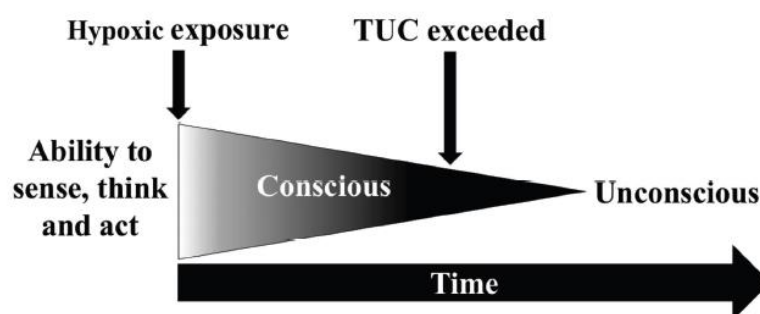
#### **2.1.1 *Time of Useful Consciousness (TUC)***

*Time of Useful Consciousness (TUC)* didefinisikan sebagai rentang waktu untuk seseorang dapat mempertahankan kesadaran dan performa yang memadai saat terpapar dengan kondisi kurang pasokan oksigen, seperti pada ketinggian tertentu yang menyebabkan hipoksia (David et al., 2016). TUC dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi fisik, ketinggian, dan perubahan tekanan udara. Faktor kondisi fisik individu dapat meliputi kebugaran fisik, usia, kondisi kesehatan, dan penggunaan obat-obatan. Semakin baik kondisi fisik seseorang, maka akan memiliki TUC dengan rentang waktu yang lebih panjang (R.Davis et al., 2008). Selain itu, kondisi individu seperti faktor genetik berupa sensitivitas terhadap hipoksia juga berperan dalam menentukan rentang TUC seseorang (Gunarsih, 2014; Shaw et al., 2021).

Dalam praktiknya, TUC adalah periode atau waktu individu yang terkena dampak penurunan performa, tetapi masih memiliki kemampuan untuk bertindak dengan tepat untuk mengoreksi kesulitannya. Perlu diperhatikan bahwa TUC pada dekompresi mendadak akan lebih singkat bila dibandingkan dengan *ascent* yang lambat (Gunarsih, 2014). Kekurangan oksigen dapat menyebabkan penurunan kinerja otak akibat penurunan tekanan oksigen pada saat inspirasi (Rupp et al., 2022).

Fisiologi respirasi dan oksigenasi merupakan proses penting dalam tubuh manusia yang memastikan bahwa semua organ, termasuk otak, mendapatkan suplai oksigen yang cukup untuk menjalankan fungsi agar dapat mencapai homeostatis tubuh (Sherwood, 2019). Oksigen akan disalurkan ke seluruh organ melalui sistem sirkulasi dan menggunakan sel darah merah sebagai media transportasi yang di dalamnya terdapat

protein berupa hemoglobin (Keohane et al., 2019). Ketika darah yang mengandung oksigen mencapai otak melalui arteri karotis, oksigen ini digunakan oleh sel-sel otak untuk mendukung fungsi neurologi termasuk pengolahan informasi dan kendali motorik. Oksigenasi yang memadai ke otak sangat penting dikarenakan otak menjadi organ tubuh manusia yang rentan terhadap keterbatasan oksigen (Aebi et al., 2020).



Gambar 2.1 Pajananan hipoksia dalam mempengaruhi kesadaran.

Dikutip dari *Frontiers in Physiology*.(Shaw et al., 2021)

Ketinggian suatu tempat dapat memengaruhi kemampuan tubuh untuk beradaptasi pada lingkungan tertentu (Storz & Bautista, 2022). Individu yang berada pada daerah yang tinggi cenderung mengalami hipoksia. Hipoksia akan mengakibatkan deoksigenasi pada jaringan. Apabila deoksigenasi pada pembuluh darah dan jaringan tidak stabil, maka kemampuan otak akan menurun secara progresif (Shaw et al., 2021). Kemampuan seseorang untuk berpikir, dan melakukan sesuatu akan semakin menurun jika terpajan tekanan udara yang bertekanan rendah (Williams et al., 2019). Rentang TUC dapat signifikan menurun dan dapat mengganggu kesadaran seseorang (Keunsoo Kim et al., 2022).

#### 2.1.1.1 Rentang TUC

Dalam menentukan rentang TUC, waktu kesadaran dihubungkan dengan ketinggian pada saat berada dalam *altitude chamber* atau berada di dalam pesawat pada ketinggian tertentu. Rentang TUC diurutkan

berdasarkan ketinggian dan lamanya seseorang mampu untuk mempertahankan kesadaran.

Tabel 2.1 Rentang TUC dihubungkan dengan ketinggian

<b><i>Time of Useful Consciousness</i></b>	
Ketinggian (kaki)	Waktu Kesadaran
15.000	30 menit
18.000	20 – 30 menit
22.000	5–10 menit
25.000	3 – 5 menit
28.000	2.5 – 3 menit
30.000	1 – 3 menit
35.000	30 – 60 detik
40.000	15 – 20 detik
45.000	9 – 15 detik
50.000	6 – 9 detik

Dikutip dari Reinhart RO. Basic Flight Physiology. New York: The McGraw Hill. (FAA, 2019; R.Davis et al., 2008; Reinhart RO., 2008)

Rentang TUC berdasarkan hasil pemeriksaan yang dilakukan di Lakespra dr. Saryanto menggunakan kriteria untuk mengukur kemampuan menurut waktu masing–masing awak pesawat pada saat pemeriksaan. Berdasarkan KEP KASAU No.267 Tahun 2020 Hasil pemeriksaan TUC di *hypobaric chamber* digolongkan menjadi empat golongan, yaitu:

1. Baik, apabila rentang TUC lebih dari 4 menit
2. Cukup, apabila rentang TUC 3 s.d 4 menit
3. Kurang (K1), apabila nilai TUC 1 s.d 2 menit
4. Kurang sekali (K2), apabila TUC kurang dari satu menit.

Bagi penerbang, TUC memiliki implikasi yang bermakna dalam mendukung keselamatan penerbangan. Fase awal akan dikategorikan sebagai TUC dan dijadikan sebagai durasi dari pelaksanaan peforma yang efektif tetapi akan diikuti dengan kebingungan mental dan penurunan kesadaran. TUC yang pendek dapat mengakibatkan penurunan performa dan kinerja yang berpotensi membahayakan keselamatan penerbangan (Leinonen et al., 2021). Faktor–faktor yang memengaruhi TUC, seperti

kondisi fisik penerbang, rute penerbangan, dan durasi penerbangan harus diperhitungkan. Pelatihan bagi para penerbang dan pengetahuan terkait gejala yang disebabkan oleh hipoksia diperlukan untuk mengambil langkah-langkah pencegahan yang tepat sehingga dapat terhindar dari hipoksia (Sucipta et al., 2018).

#### **2.1.1.2 Indoktrinasi dan Latihan Aerofisiologi (ILA)**

Materi penyelenggaraan kegiatan indoktrinasi dan latihan aerofisiologi bagi penerbang dilakukan dengan berbagai jenis sesuai dengan tujuan pemeriksaan masing-masing kesehatan penerbangan. Untuk menilai TUC dilakukan latihan menggunakan ruang udara bertekanan rendah (*hypobaric chamber*). Tujuan dari latihan menggunakan *Hypobaric chamber* adalah untuk mengetahui gejala hipoksia yang timbul pada penerbang maupun pada awak pesawat yang sedang melaksanakan dinas terbang (KEP KASAU No.267, 2020).

Rentang TUC dapat dinilai dengan menggunakan pengujian kognitif pada simulasi lingkungan hipoksia yang terkontrol. Pengujian kognitif sering digunakan untuk mengamati kemampuan kognitif individu dalam situasi hipoksia (Beer et al., 2017). Pada uji Indoktrinasi dan Latihan Aerofisiologi (ILA) di Lakespra dr. Saryanto, pengujian kognitif melibatkan tugas-tugas seperti tes memori, tes koordinasi tangan-mata, atau tes konsentrasi (Gunarsih, 2014). Selain itu, simulasi lingkungan yang terkontrol, seperti ruangan udara bertekanan rendah (RUBR) atau *hypobaric chamber* dapat digunakan untuk mengamati respon individu terhadap penurunan pasokan oksigen dan memperkirakan rentang TUC (KEP KASAU No.267, 2020).

Pemeriksaan pada ketinggian 25.000 kaki memberikan simulasi yang cukup akurat terhadap kondisi penerbangan yang sebenarnya. Hal ini memungkinkan individu yang menjalani pelatihan atau pemeriksaan mengalami efek penurunan tekanan udara dan penurunan kadar oksigen yang berhubungan dengan ketinggian. Pemeriksaan pada ketinggian ini memungkinkan individu mengalami gejala hipoksia secara langsung,

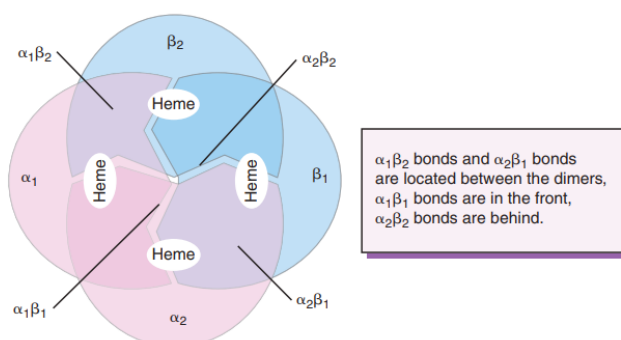
yang dapat mencakup pusing, kesulitan bernapas, dan kebingungan (Purushothaman et al., 2023).

Prosedur dalam latihan RUBR diawali dengan persiapan awak pesawat sebelum melaksanakan pemeriksaan. Para penerbang maupun awak pesawat akan menggunakan pakaian *overall* dan *helmet*. *Preflight briefing, flight profile, emergency procedure* akan disampaikan oleh operator sehingga prosedur dapat dilaksanakan oleh para awak pesawat. Dalam RUBR akan diatur simulasi penerbangan pada ketinggian dan waktu sesuai dengan profil yang telah ditentukan. Selanjutnya akan diberikan tugas atau latihan soal yang dikerjakan dalam rentang ketinggian waktu sesuai dengan prosedur (KEP KASAU No.267, 2020).

## 2.1.2 Faktor yang mempengaruhi TUC

### 2.1.2.1 Kadar Hemoglobin

Hemoglobin (Hb) merupakan elemen utama dari sel darah merah (eritrosit) berupa protein terkonjugasi yang berperan untuk pengangkutan oksigen ( $O_2$ ) dan karbon dioksida ( $CO_2$ ). Molekul hemoglobin mengandung dua pasang rantai polipeptida yang berbeda disertai empat kelompok heme, dengan satu kelompok heme terikat pada tiap rantai polipeptida (Keohane et al., 2019).



Gambar 2.2 Hemoglobin: Tetramer dari empat rantai polipeptida.

Dikutip dari Rodaks Hematology.(Keohane et al., 2019)

Struktur kuartener hemoglobin disebut sebagai tetramer, menggambarkan molekul hemoglobin lengkap. Struktur molekul

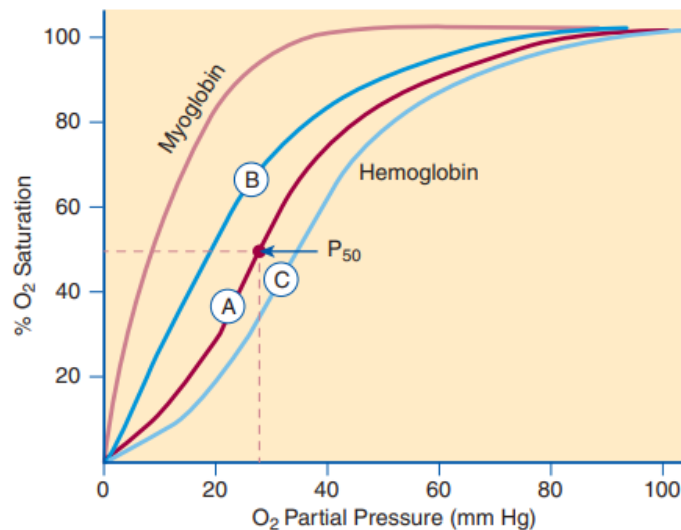
hemoglobin mirip dengan bentuk bola yang terdiri dari empat kelompok heme dan memiliki kemampuan untuk membawa hingga empat rantai molekul oksigen. Hemoglobin yang dominan adalah hemoglobin tipe A, terdiri dari dua rantai  $\alpha$ -globin dan dua rantai  $\beta$ -globin. Kestabilan ikatan antara  $\alpha$ -1 dengan  $\beta$ -1 dan  $\alpha$ -2 dengan  $\beta$ -2 berperan untuk mempertahankan ikatan dimer (Keohane et al., 2019).

Heme tersusun dari rantai atom karbon, hidrogen dan nitrogen yang disebut protoporfirin IX, dengan inti atom besi yang bersifat divalent ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Masing-masing kelompok heme terletak di dalam kantong rantai polipeptida di permukaan molekul hemoglobin. Ferrum ( $\text{Fe}^{2+}$ ) pada setiap molekul berikatan dengan satu molekul oksigen. Pada saat ferrum teroksidasi menjadi  $\text{Fe}^{3+}$ , ferrum tidak dapat mengikat oksigen. Hemoglobin yang teroksidasi dinamakan methemoglobin (Keohane et al., 2019).

Setiap molekul hemoglobin memiliki rangkaian globin yang terbentuk dari dua pasang rantai polipeptida yang serupa, dengan memuat 141 sampai 146 asam amino. Pengurutan variasi asam amino dibentuk menjadi delapan heliks yang dipisahkan oleh tujuh segmen yang tidak berbentuk helix (Keohane et al., 2019). Molekul hemoglobin dapat dibentuk melalui primernya dan mengacu pada urutan asam amino dari rantai polipeptida. Heme akan dikelilingi oleh rantai globin yang membentuk sebuah kantung yang memiliki celah. Asam amino rantai globin pada bagian celah bersifat hidrofobik, sedangkan asam amino yang berada di luar bersifat hidrofilik sehingga dapat menjadikan hemoglobin larut dalam air (Keohane et al., 2019).

Hemoglobin memiliki fungsi untuk mengikat molekul oksigen di paru. Dibutuhkan afinitas oksigen yang tinggi untuk mengangkut oksigen dan untuk melepaskan diperlukan afinitas oksigen yang rendah. Afinitas hemoglobin untuk oksigen sangat berhubungan dengan tekanan parsial oksigen, dan didefinisikan dalam istilah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk memenuhi 50% hemoglobin. Hubungannya dijelaskan melalui kurva

disosiasi oksigen hemoglobin, yang menggambarkan persentasi oksigen dan saturasi terhadap tekanan parsial oksigen (Keohane et al., 2019).



Gambar 2.3 Kurva disosiasi oksigen

Dikutip dari Rodaks Hematology.(Keohane et al., 2019)

Kurva disosiasi berbentuk sigmoid yang menunjukkan afinitas hemoglobin yang rendah oksigen pada keadaan rendah oksigen dan afinitas tinggi untuk oksigen pada lingkungan dengan oksigen tinggi. Kerja sama antar subunit hemoglobin berkontribusi pada bentuk kurva. Hemoglobin yang terdeoksigenasi memiliki sedikit afinitas terhadap oksigen. Namun, dengan setiap molekul oksigen yang terikat, terjadi perubahan tetramer yang semakin meningkatkan afinitas oksigen dari subunit heme lainnya. Pergeseran kurva ke arah kiri atau kanan menunjukkan perubahan saturasi terhadap tekanan oksigen (Akunov et al., 2018; Keohane et al., 2019).

Selain tekanan oksigen, pergeseran kurva diasosiasi juga dapat disebabkan oleh perubahan pH dalam darah. Pada jaringan, pH yang lebih rendah menggeser kurva ke kanan dan mengurangi afinitas hemoglobin untuk oksigen sehingga hemoglobin lebih mudah melepaskan oksigen. Pergeseran kurva akibat perubahan pH dikenal sebagai efek Bohr (Keohane et al., 2019; Mairbäurl et al., 2023).

Efek Bohr dalam sirkulasi manusia dapat diidentifikasi melalui perubahan tekanan udara dan tingkat oksigen selama beraktivitas (Keohane et al., 2019). Prinsip dasar Efek Bohr yang berkaitan dengan pengaruh gas dalam atmosfer pada sirkulasi darah. Hal ini menjelaskan tentang peningkatan atau penurunan konsentrasi gas tertentu, terutama karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan oksigen ( $\text{O}_2$ ) dalam darah. Efek ini dapat memengaruhi pengikatan oksigen oleh hemoglobin dalam sel darah merah sehingga dapat mengatur suplai oksigen ke jaringan tubuh (Lee, 2019).

Hemoglobin berikatan dengan oksigen membentuk oksihemoglobin dan molekul oksigen terikat pada ion besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ) di dalam struktur heme. Fungsi utama hemoglobin adalah memindahkan oksigen dari paru ke jaringan dengan cara mengikat dan melepaskan oksigen secara bersinergi dalam sistem sirkulasi (Gassmann et al., 2019; Winslow, 2007). Dalam kondisi normal, sekitar 97% oksigen dipindahkan dari paru ke jaringan oleh hemoglobin dalam bentuk oksihemoglobin, sementara 3% sisanya larut dalam cairan plasma dan sel darah (Winslow, 2007).

Kekurangan hemoglobin dan eritrosit dalam tubuh dapat mengakibatkan penurunan jumlah oksigen yang dibawa ke dalam jaringan. Pada kondisi normal, konsentrasi hemoglobin dalam darah berada dalam rentang 12–16 g/dL untuk perempuan dan 13–18 g/dL untuk laki-laki. Kadar eritrosit normalnya berada direntang  $3,8\text{--}5,0 \times 10^6$  sel/ $\text{mm}^3$  untuk perempuan dan  $4,4\text{--}5,6 \times 10^6$  sel/ $\text{mm}^3$  untuk laki laki dan (Kemenkes RI, 2020).

Terlepas dari mekanisme seperti itu, tubuh mengalami berbagai perubahan fisiologis di bawah paparan terus menerus pada ketinggian tertentu dengan sedikit oksigen (Martin et al., 2017). Perubahan umum yang dapat terjadi berupa kelelahan, pusing, sakit kepala, dan muntah. Gejala yang penting diidentifikasi dapat berupa sianosis, kebingungan, penarikan sosial, dada nyeri, dan kesulitan berjalan. Edema paru dan serebral bahkan kematian dapat terjadi tergantung pada ketinggian dan

durasi paparan lingkungan hipoksia (Peacock et al., 2017; Varis et al., 2022).

Penurunan tekanan barometrik pada dataran tinggi menghasilkan penurunan tekanan parsial oksigen ( $PiO_2$ ) dan saturasi oksigen ( $SaO_2$ ) dalam darah pada arteri. Hipoksemia menstimulasi ventilasi, meningkatkan curah jantung, mengubah distribusi aliran darah, dan meningkatkan ekstraksi oksigen dari kapiler (Gassmann et al., 2019). Pada ketinggian tertentu, rendahnya tekanan oksigen dibuktikan dengan penurunan berat lahir pada penduduk dataran tinggi dan berkurangnya penyerapan oksigen maksimal pada orang dewasa. Hal tersebut cenderung merangsang eritropoiesis oleh mekanisme molekuler kompleks untuk menghasilkan lebih banyak sel darah merah (Gassmann et al., 2019).

#### **2.1.2.2 Usia**

Penelitian yang dilakukan Sucipta dkk, terkait faktor yang berhubungan dengan respons hipoksia berupa rentang TUC yang kurang dari 4 menit pada ketinggian yang disimulasikan 25.000 kaki (Sucipta et al., 2018). Studi tersebut mempertimbangkan faktor-faktor seperti kelelahan, fisik kebugaran, dan daya tahan kardiovaskular, serta berbagai parameter. Temuan menunjukkan bahwa penerbang berusia diatas 30 tahun, berdinas lebih dari 10 tahun dan pengalaman lebih dari 1000 jam terbang, lebih berisiko mengalami penurunan rentang TUC dengan hasil kurang dari 4 menit. Pada penerbang yang memiliki kebiasaan merokok akan berisiko memiliki rentang waktu TUC yang lebih pendek (Sucipta et al., 2018).

Hubungan antara usia yang lebih tua dan respon hipoksia berkaitan dengan kapasitas vital paru yang mencapai puncaknya pada usia 20 tahun dan mulai menurun seiring bertambahnya usia (Hasan et al., 2017a; Rochat et al., 2013). Selain itu, semakin bertambah usia seseorang maka akan mengalami penurunan  $VO_2$  max. Indeks massa tubuh dan tingkat

kebugaran fisik diharapkan memiliki asosiasi dengan rentang TUC kurang dari 4 menit (Sucipta et al., 2018).

Frekuensi pernapasan pada keadaan hipoksia akan memicu dorongan ventilasi, sehingga dapat menimbulkan hiperventilasi. Hal ini dapat menstimulasi kemoreseptor perifer yang berada pada badan karotis sehingga kemoreseptor sentral dapat tereksitasi. Impuls kemoreseptor perifer berjalan sepanjang saraf sinus dan saraf vagal ke pusat pernapasan yang diatur oleh pusat pernapasan. Mekanisme ini dapat meningkatkan frekuensi pernapasan dan memperkuat ventilasi pada seseorang (Keunsoo Kim et al., 2022).

### **2.1.2.3 Indeks Massa Tubuh (IMT)**

Indeks massa tubuh (IMT) adalah suatu metode perhitungan yang digunakan untuk menilai kondisi gizi dengan membandingkan berat badan dan tinggi badan suatu individu. IMT dapat menjadi penentuan standar proporsi komposisi tubuh bagi anak hingga dewasa (Nyoman et al., 2021). Penggunaan IMT diaplikasikan untuk menilai risiko seseorang terhadap berbagai penyakit. Semakin tinggi IMT seseorang, semakin tinggi pula risikonya untuk mengalami berbagai penyakit (Husada & Andini, 2019).

Kadar lemak dalam tubuh yang berlebihan dapat meningkatkan risiko terjadinya berbagai penyakit termasuk gangguan kardiovaskular, gangguan metabolik dan dapat menyebabkan gangguan fungsi kognitif (Keunsoo Kim et al., 2022). Pada beberapa penyakit yang mengganggu fungsi kognitif terutama pada otak dapat disebabkan oleh kolesterol serebrovaskular. Akumulasi kolesterol pada pembuluh darah di otak menyebabkan insufisiensi dan mengurangi suplai oksigen ke otak (Shaw et al., 2021).

Penerbang dengan klasifikasi IMT *overweight* cenderung memiliki TUC kurang dari 4 menit. Seseorang yang mengalami obesitas memiliki risiko lebih tinggi mengalami penurunan rentang TUC karena menurunnya fungsi paru akibat restriksi paru yang disebabkan oleh penumpukan lemak di area perut atau obesitas sentral (Sucipta et al., 2018). Penelitian

sebelumnya yang dilakukan oleh Gunarsih menemukan bahwa TUC menurun dengan IMT yang lebih tinggi (Gunarsih, 2014). Pada penerbang yang memiliki rentang TUC kurang dari 4 menit diperkirakan memiliki IMT yang tinggi dibandingkan penerbang dengan IMT normal dengan kebugaran fisik yang prima (Sucipta et al., 2018).

Sebelum melaksanakan uji ILA, penerbang akan melaksanakan pemeriksaan fisik sehingga dapat menjadi awal dalam pemeriksaan lanjutan (KEP KASAU No.267, 2020). Variabel IMT dihitung dengan mengukur berat badan (kg) menggunakan timbangan dan tinggi badan (cm) dengan menggunakan peralatan pengukur tinggi badan. Selanjutnya data hasil pengukuran dihitung menggunakan rumus  $IMT = BB(kg) / TB^2 (m^2)$ . Berdasarkan Kemenkes tahun 2018 terkait pengukuran IMT setelah pengukuran berat dan tinggi badan dikategorikan dalam lima kategori sesuai kategori IMT WHO yaitu *underweight*, normal, *overweight*, obesitas I, dan obesitas II (Nyoman et al., 2021).

Tabel 2.2 Klasifikasi IMT

Klasifikasi	IMT
Berat badan kurang ( <i>Underweight</i> )	< 18,5
Berat badan normal	18,5 – 22,9
Kelebihan berat badan ( <i>Overweight</i> ) dengan risiko	23 – 24,9
Obesitas I	25 – 29,9
Obesitas II	≥ 30

Dikutip dari Kemenkes 2018.(Kemenkes 2018)

### 2.1.3 Hipoksia

#### 2.1.3.1 Definisi Hipoksia

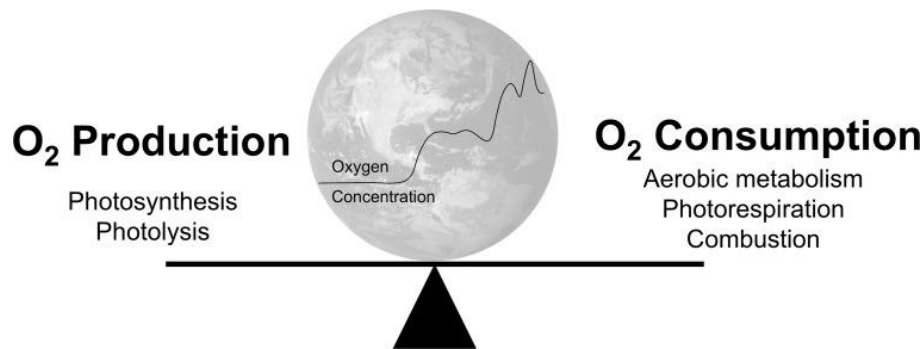
Hipoksia merupakan fenomena kekurangan oksigen pada tingkat jaringan. Pada manusia yang sehat, hipoksia dapat terjadi selama latihan intensitas berat, tetapi biasanya disebabkan oleh kurangnya oksigen di udara yang dihirup. Pada daerah dengan ketinggian yang lebih tinggi,

tekanan barometrik akan lebih rendah sehingga dapat menyebabkan hipoksia hipobarik. Terdapat perbedaan pada tekanan parsial oksigen inspirasi ( $PiO_2$ ) yang ekuivalen antara hipoksia hipobarik (HH) dan hipoksia normobarik (NH). Pada simulasi ketinggian 25.000 kaki paparan singkat hipoksia yang diberikan selama 5 menit, akan menyebabkan  $PiO_2$  yang sangat rendah (Aebi et al., 2020).

Hipoksia menyebabkan penurunan serapan oksigen maksimum ( $VO_2$  max) yang berjumlah sekitar 6,0–7,5%/1000 m ketinggian. Tingkat keparahan hipoksia dapat didasarkan pada tingkat oksigenasi dalam darah dan tanda–tanda yang menunjukkan seseorang mengalami defisiensi oksigen dalam darah berupa peningkatan respon ventilasi (Shaw et al., 2021). Hipoksia dapat diidentifikasi melalui adanya sianosis sentral dan perifer yang disebabkan oleh faktor–faktor tertentu. Sianosis sentral dapat terjadi pada saat kadar oksigen berkurang pada daerah ketinggian, gangguan fungsi paru, permasalahan perfusi oksigen ke jaringan, dan beberapa penyakit jantung bawaan. Pada sianosis perifer dapat disebabkan oleh turunnya curah jantung, pajanan suhu dingin ataupun sumbatan pada pembuluh darah (Keunsoo Kim et al., 2022).

### **2.1.3.2 Gejala Hipoksia**

Keadaan lingkungan membentuk efek independen dari masing–masing hipoksia yang mempengaruhi fisiologis tubuh manusia. Paparan hipoksia baik hipoksia normobarik dan hipoksia hipobarik memiliki respon serupa berupa peningkatan detak jantung serta penurunan saturasi oksigen dalam darah ( $SaO_2$ ) (Akunov et al., 2018). Pada hipoksia hipobarik peningkatan detak jantung akan lebih besar dan penurunan  $SaO_2$  yang lebih besar dibandingkan hipoksia normobarik (Aebi et al., 2020).



Gambar 2.4 Keseimbangan produksi dan konsumsi oksigen.

Dikutip dari Martin D.(Martin et al., 2017)

Hipoksia memicu serangkaian respons hemodinamik yang melibatkan sistem kardiovaskular (Trembl et al., 2020). Pada tingkat awal, penurunan kadar oksigen dalam darah akan memicu vasokonstriksi perifer, yaitu penyempitan pembuluh darah di perifer tubuh, dengan tujuan mengalihkan peredaran darah ke organ penting seperti otak dan jantung. Vasokonstriksi ini terjadi melalui mekanisme pengaturan aktivitas simpatis, yang meningkatkan aktivitas saraf simpatis dan pelepasan hormon epinefrin (Gunarsih, 2014). Respons ini bertujuan untuk menjaga tekanan perfusi dan suplai oksigen ke organ-organ penting (Gunarsih, 2014).

Ketika terjadi hipoksia, sistem saraf memberikan respons adaptif untuk mempertahankan fungsi dan melindungi jaringan otak. Beberapa mekanisme adaptif yang terjadi meliputi peningkatan aliran darah ke otak melalui vasodilatasi pembuluh darah otak, peningkatan aktivitas seluler untuk meningkatkan penggunaan oksigen, dan meningkatnya produksi faktor neurotropik yang melindungi sel saraf (Shaw et al., 2021). Respons ini bertujuan untuk memperbaiki pasokan oksigen dan menjaga fungsi normal sel-sel saraf selama periode hipoksia (Aebi et al., 2020).

Hipoksia kronis dapat menyebabkan kerusakan sel saraf dan mengganggu fungsi neurotransmitter, yang dapat berkontribusi pada penurunan kemampuan kognitif, gangguan pengaturan emosi, dan gangguan motorik (Varis et al., 2022). Selain itu, hipoksia kronis juga dapat meningkatkan risiko penyakit neurodegeneratif seperti penyakit alzheimer dan parkinson. Proses inflamasi dan stres oksidatif yang terjadi

selama hipoksia juga dapat mempengaruhi keseimbangan kimiawi dan struktur jaringan otak. Hipoksia merusak memori kerja, meningkatkan waktu reaksi dan mengurangi fungsi eksekutif pada seseorang (Dart et al., 2017).

### **2.1.3.3 Hipoksia pada Penerbangan**

Serangan hipoksia yang berbahaya dapat terjadi setelah saat menaiki pesawat di atas ketinggian 10.000 kaki (3.048 m) (Shaw et al., 2021). Keadaan hipoksia dapat menunjukkan gejala-gejala yang dapat mengganggu sistem saraf pusat dan memuat gangguan terhadap kognisi, psikomotorik serta keadaan psikologis dari seorang penerbang. Gejala hipoksia dapat bervariasi dan variasi ini dapat memengaruhi kemampuan penerbang untuk mengenali gejalanya. Angka mortalitas pada penerbangan akibat hipoksia jarang terjadi, akan tetapi insiden hipoksia cenderung dapat mengganggu keselamatan penerbangan. Menurut Gradwell dan Rainford, sejak tahun 1940, penerbangan militer memiliki andil terbesar dalam risiko terkait hipoksia (Shaw et al., 2021).

Hubungan hipoksia dengan TUC memiliki implikasi yang sangat penting bagi dunia penerbangan. Penelitian tentang TUC yang dilakukan oleh Veronica terhadap 158 orang calon penerbang dan penerbang aktif TNI (2014) dalam ruang udara bertekanan rendah (RUBR) pada simulasi ketinggian 25.000 kaki mendapatkan bahwa semakin tinggi kadar hemoglobin maka rentang waktu sadar efektif akan semakin panjang (Gunarsih, 2014). Menurut Gradwell, jika deoksigenasi arteri dan jaringan tidak stabil, fungsi otak secara progresif menurun, fase awal disebut *time of useful consciousness* dan merupakan durasi pelaksanaan tugas operasional yang efektif aman (Leinonen et al., 2021; Shaw et al., 2021).

### **2.1.3.4 Terapi Hipoksia**

Tindakan pencegahan merupakan pendekatan terbaik untuk mencegah hipoksia. Penting untuk mengetahui kapan seseorang terbang agar dapat menghindari kemungkinan hipoksia. Langkah-langkah pencegahan dan pengobatan hipoksia dapat melibatkan administrasi

oksigen, disesuaikan dengan tingkat oksigen dalam darah dan diawasi dengan teliti untuk memastikan saturasi oksigen tetap di atas 90%.

Pemberian oksigen harus dilakukan secara berhati-hati pada pasien dengan gangguan pernapasan yang berat seperti gangguan obstruksi pernapasan. Dalam kondisi normal, frekuensi pernapasan dikendalikan oleh tingkat karbondioksida dalam darah. Jika konsentrasi karbondioksida tinggi, otak akan meningkatkan laju pernapasan untuk meningkatkan kadar oksigen dalam darah. (Purushothaman et al., 2023).

Terdapat efek toksik akibat pemberian oksigen karena dapat memicu timbulnya radikal bebas. Ketika diberikan dalam jangka panjang akan menyebabkan iritasi pada saluran napas. Semakin besar tekanan oksigen yang diberikan, maka akan semakin cepat menyebabkan gangguan pada sistem lain pada tubuh seseorang (Lerant et al., 2015; Tremi et al., 2020).

Apabila oksigen diberikan dalam jumlah yang berlebihan, hal ini dapat menyebabkan pernapasan menjadi lambat dan dalam, sehingga dapat menyebabkan penurunan kadar CO<sub>2</sub> dalam darah. Hipokapnia merupakan keadaan ketika kadar CO<sub>2</sub> dalam darah turun akibat kondisi medis berupa hiperventilasi. Keadaan ini dapat menggeser pH darah ke arah yang lebih basa dan dapat menimbulkan gejala alkalosis respiratorik (Keohane et al., 2019). Karakteristik dari alkalosis respiratorik berupa gejala yang mungkin timbul seperti pusing, kesemutan di sekitar mulut, kebingungan, dapat menyebabkan kehilangan kesadaran (Mairbäurl et al., 2023).

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.3 Hasil penelitian terdahulu

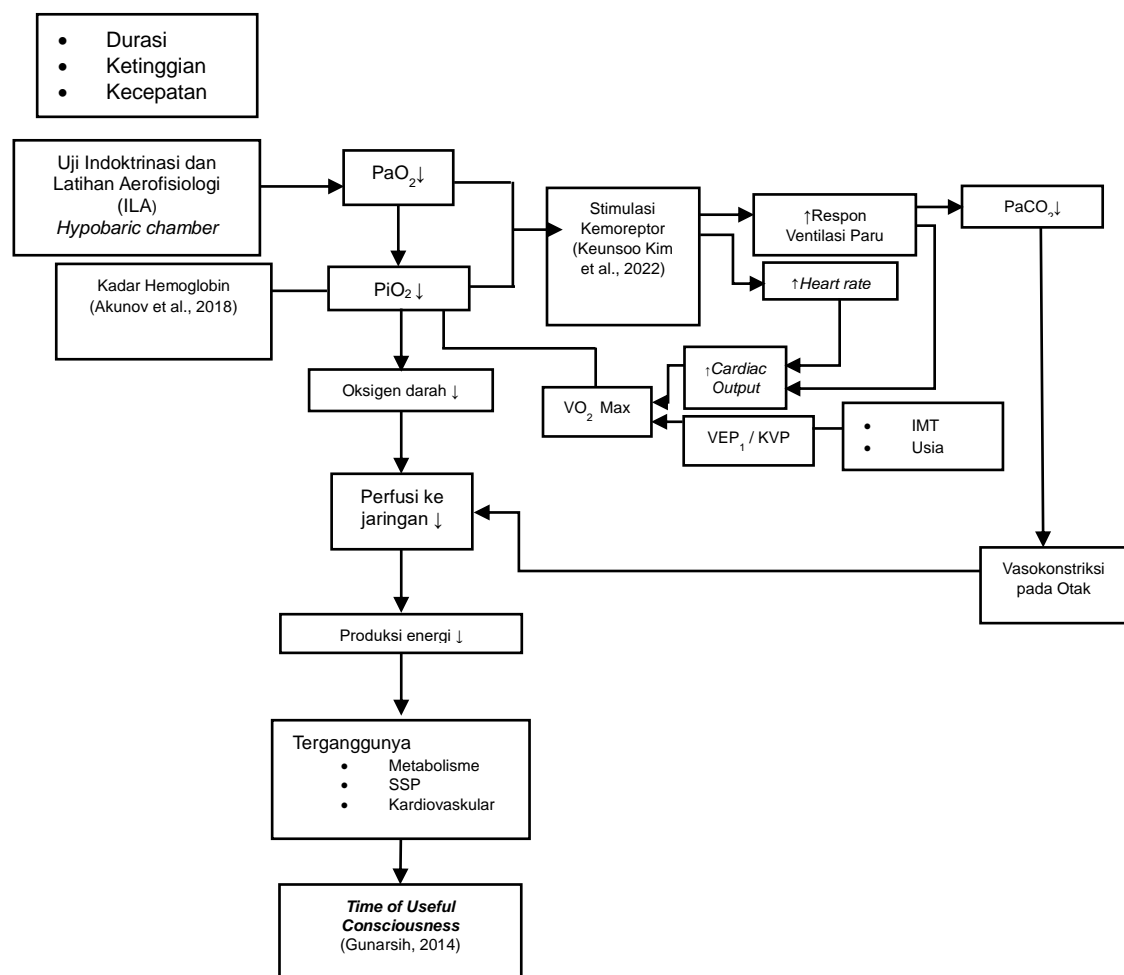
No.	Penulis (Tahun)	Judul Penelitian	Persamaan	Perbedaan	Hasil
1.	Veronica Galih Gunarsih (2014)	Hubungan Kadar Hemoglobin Dan Beberapa Faktor Lain Terhadap Waktu Sadar Efektif di Kalangan Calon dan Awak Pesawat Militer Pada Simulasi Ketinggian 25000 Kaki	Penelitian ini dilaksanakan di Lakespra dr. Saryanto. Penelitian menggunakan variabel independen berupa kadar hemoglobin dan indeks massa tubuh.	Subjek pada penelitian ini adalah calon siswa penerbang tempur TNI. Variabel independen yang digunakan berupa pemeriksaan kesegaran jasmani.	Dalam penelitian yang dilakukan pada calon dan awak penerbang yang menjalani ILA di Lakespra dr. Saryanto pada rentang waktu Januari hingga Mei 2014, ditemukan hasil <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indeks masa tubuh terbukti mempersingkat Waktu sadar efektif</li> <li>• Umur terbukti mempersingkat Waktu sadar efektif</li> <li>• Kadar Hemoglobin memperpanjang waktu sadar efektif (Gunarsih, 2014).</li> </ul>
2.	Col Keunsoo Kim, PhD, KAFA dan Lt Col Jean Choi, PhD, KAFA	<i>The Effects of Body Composition, Physical Fitness on Time of Useful Consciousness in Hypobaric Hypoxia</i>	Penelitian menggunakan subjek penerbang tempur dengan variabel dependen yang diuji adalah <i>Time of Useful Consciousness</i>	Penelitian menggunakan variabel dependen dengan rincian berupa <i>body composition</i> dan	Kebugaran kardiovaskular, lemak tubuh, dan ketahanan otot memiliki korelasi yang tinggi dengan TUC yang dapat menjaga kesadaran dan fungsi kognitif seorang penerbang

	(2022)			<i>Physical fitness</i>	tempur (Keunsoo Kim et al., 2022).
3.	I J Sucipta, N P Adi dan D Kaunang (2018)	<i>Relationship of fatigue, physical fitness and cardiovascular endurance to the hypoxic response of military pilots in Indonesia</i>	Penelitian dilaksanakan di Lakespra dr. Saryanto dan menggunakan variabel dependen berupa <i>time of useful consciousness</i> .	Variabel independen menggunakan body composition dan hasil pemeriksaan physical fitness berupa tingkat kelelahan dan hasil kebugaran jasmani	Faktor utama yang diteliti pada penelitian ini adalah daya tahan kardiovaskular (diukur sebagai VO <sub>2</sub> max), kelelahan dan kebugaran jasmani. Namun, hal ini tidak menunjukkan keterkaitan yang signifikan dengan TUC. Secara teori, faktor-faktor tersebut dapat berkontribusi terhadap rentang waktu TUC (Sucipta et al., 2018).
4.	Noven Zefanya (2020)	Hubungan Antara Kadar Hemoglobin dengan <i>Time of Useful Consciousness</i> pada Calon Pramugari TNI AU yang melaksanakan ILA/MEDEX di Lakespra dr. Saryanto Tahun 2020	Penelitian dilaksanakan di Lakespra dr. Saryanto dengan variabel depende	Subjek penelitian adalah calon pramugari TNI AU.	Berdasarkan penelitian ini, dapat disimpulkan perhitungan secara statistik tidak menunjukkan adanya hubungan signifikan antara kadar hemoglobin dan TUC pada calon pramugari TNI AU (Zefanya, 2020).

## 2.3 Kerangka Berpikir

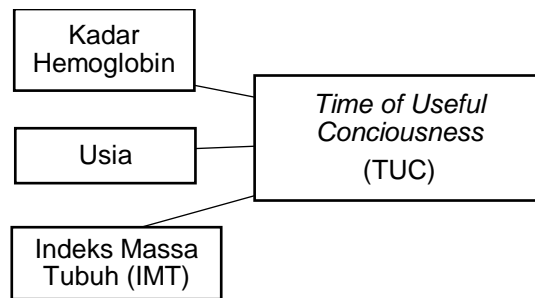
### 2.3.1 Kerangka Teori

Kerangka teori yang digunakan diambil dari berbagai referensi terkait kedokteran penerbangan dan permasalahan yang menjelaskan tentang hipoksia. Penelitian yang dilakukan oleh Kim Keunso dkk mengenai efek komposisi tubuh dan kebugaran jasmani terhadap TUC menjadi sumber dalam penulisan kerangka teori pada penelitian ini. (Keunsoo Kim et al., 2022) Selain itu, penelitian mengenai hipoksia hipobarik yang mengganggu fungsi otak penerbang militer yang dilakukan oleh Shaw dkk menjadi landasan yang memuat fisiologi tubuh terhadap perubahan tekanan oksigen. (Shaw et al., 2021)



Gambar 2.5 Kerangka Teori

### 2.3.2 Kerangka Konsep



Gambar 2.6 Kerangka Konsep

**Variabel dependen:** *Time of Useful Consciousness (TUC)*

**Variabel independen:** Kadar hemoglobin (Hb), usia, dan indeks massa tubuh (IMT)

### 2.4 Hipotesis

1. Terdapat korelasi antara kadar hemoglobin dengan *Time of Useful Consciousness (TUC)*. Semakin tinggi kadar hemoglobin maka akan semakin panjang rentang *Time of Useful Consciousness* pada seorang penerbang.
2. Terdapat korelasi antara usia dengan *Time of Useful Consciousness (TUC)*. Penerbang dengan usia yang lebih tua cenderung memiliki rentang *Time of Useful Consciousness (TUC)* yang lebih rendah.
3. Terdapat korelasi antara indeks massa tubuh dengan TUC. Pada penerbang yang memiliki indeks massa tubuh tinggi cenderung ditemukan rentang *Time of Useful Consciousness (TUC)* yang lebih singkat.