

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Hipoksia

Hipoksia secara konsisten dapat menyebabkan kerusakan sel. Hipoksia merupakan kondisi yang sangat berbahaya karena menurunkan kemampuan fungsi sel (Doe, 2018). Hipoksia menghambat respirasi oksidatif aerob pada sel, mengakibatkan penurunan serapan oksigen di darah dan mengurangi kemampuan tubuh untuk mengeluarkan karbon dioksida. Kondisi ini menghambat fungsi fisiologis normal sel dan jaringan, yang pada akhirnya bisa mengakibatkan kerusakan atau kematian sel.

2.1.1.1 Definisi dan Mekanisme

Hipoksia merupakan kondisi kekurangan oksigen yang menyebabkan kerusakan sel karena penurunan respirasi oksidatif aerob sel. (Bhutta BS, 2022). Dalam keadaan hipoksia, sel bisa beradaptasi, mengalami kerusakan, atau mati. Penyebab hipoksia, berdasarkan mekanismenya, dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori. (Bhutta BS, 2022), yaitu:

- a. **Hipoksemia arteri:** penurunan kadar oksigen dalam darah arteri.
- b. **Penurunan aliran oksigen tanpa hipoksemia arteri:** kegagalan transportasi oksigen tanpa adanya hipoksemia.

- c. **Penggunaan oksigen yang berlebihan di jaringan:** konsumsi oksigen yang melebihi pasokan yang tersedia di jaringan.

2.1.2 Jenis-jenis Hipoksia

Hipoksia dibagi menjadi empat kelompok berdasarkan jenisnya (Bhutta BS, 2022), yaitu:

- a. **Hipoksia Hipoksik:** Kondisi terjadi kekurangan oksigen yang masuk ke paru, sehingga kadar oksigen dalam darah menurun. Penyebabnya bisa berupa sumbatan atau obstruksi pada saluran pernapasan.
- b. **Hipoksia Anemik:** Kondisi hemoglobin dalam darah tidak mampu mengikat atau membawa oksigen yang cukup untuk kebutuhan metabolisme seluler, seperti pada kasus keracunan karbon monoksida.
- c. **Hipoksia Stagnan:** Kondisi dimana hemoglobin dalam darah tidak mampu mengantarkan oksigen ke jaringan karena terganggunya sirkulasi darah, seperti pada kasus gagal jantung atau embolisme.
- d. **Hipoksia Histotoksik:** Hipoksia yang disebabkan oleh ketidakmampuan jaringan untuk menyerap oksigen terjadi misalnya pada keracunan sianida, di mana sianida dalam tubuh merangsang beberapa enzim oksidatif di seluruh jaringan secara radikal, khususnya sitokrom oksidase, yang mengikat grup *heme ferric* dari oksigen yang dibawa oleh darah.

Masing-masing jenis hipoksia ini memiliki mekanisme dan penyebab yang berbeda, namun semuanya berpotensi

menimbulkan dampak serius pada fungsi sel dan jaringan dalam tubuh. Penanganan dan pencegahan hipoksia sangat penting untuk mencegah kerusakan sel yang lebih parah dan mengurangi risiko kematian.

2.1.3 Hipoksia pada Penerbang

Hipoksia pada penerbang terjadi akibat paparan akut terhadap kadar oksigen yang rendah, terutama pada ketinggian tinggi di mana tekanan atmosfer menurun signifikan. Dalam konteks penerbangan militer (Shaw, 2021), penyebab utama hipoksia adalah lingkungan beroksigen rendah yang dialami selama penerbangan tinggi. Hal ini mengurangi ketersediaan oksigen untuk respirasi seluler, yang penting untuk produksi energi dalam tubuh. Hipoksia juga dapat dipicu oleh kegagalan sistem oksigen di pesawat, kondisi kesehatan individu yang tidak terdeteksi, atau kesiapan yang tidak memadai dalam menghadapi perubahan tekanan mendadak.

Mekanisme fisiologis dari hipoksia melibatkan gangguan pada proses oksidatif di dalam sel. Ketika kadar oksigen turun, sel tidak dapat menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) secara efisien melalui respirasi aerobik. Ini menyebabkan sel-sel bergantung pada respirasi anaerobik. Pada respirasi anaerobik, akan dihasilkan produk sampingan yaitu asam laktat. Asam laktat yang menumpuk dan penurunan ATP mengakibatkan kerusakan seluler dan gangguan fungsi organ. Dalam penerbang, efek hipoksia dapat mencakup penurunan kapasitas kognitif, koordinasi motorik yang buruk, dan kelelahan yang bisa berbahaya selama operasi penerbangan. (Shaw, 2021)

Proses pemulihan dari hipoksia, yang disebut sebagai *hypoxia hangover*, juga penting untuk dipahami. Setelah paparan hipoksia akut, penerbang mungkin mengalami dampak residual seperti gangguan

kognitif dan fisiologis yang berkelanjutan. Tinjauan ini menekankan pentingnya manajemen pemulihan yang efektif untuk memastikan bahwa penerbang dapat kembali ke fungsi normal secepat mungkin. Proses ini mencakup pemulihan kadar oksigen normal, pemantauan kesehatan fisik dan mental, serta mungkin pelatihan ulang untuk mengembalikan kemampuan operasional secara penuh. Manajemen yang baik terhadap efek hipoksia sangat penting untuk keselamatan dan efektivitas operasi penerbangan militer.

2.1.4 Faktor Risiko Hipoksia pada Penerbang

2.1.4.1 Faktor Lingkungan

Ketinggian merupakan faktor lingkungan yang paling krusial sebagai penentu tingkat risiko hipoksia pada penerbang. Ketika pesawat terbang di ketinggian tinggi, tekanan udara menurun, dan ini dapat mengganggu pengiriman oksigen ke jaringan tubuh (Gradwell, 2016). Hal ini dapat mempengaruhi kinerja pilot dan meningkatkan risiko kecelakaan. Pada ketinggian yang lebih tinggi, tekanan udara menurun lebih cepat, sehingga pilot harus lebih berhati-hati dalam mengatur tekanan udara di dalam pesawat untuk memastikan kinerja yang optimal. Oleh karena itu, pilot harus memperhatikan ketinggian pesawat dan mengatur tekanan udara secara tepat untuk mengurangi risiko hipoksia.

Tekanan udara juga berperan penting dalam menentukan risiko hipoksia. Tekanan udara rendah di ketinggian dapat menyebabkan hipoksia, yang dapat berakibat fatal jika tidak diatasi. Pada ketinggian yang lebih tinggi, tekanan udara rendah dapat menyebabkan pengurangan oksigen yang signifikan, sehingga pilot harus lebih

berhati-hati dalam mengatur tekanan udara di dalam pesawat. Selain itu, pilot juga harus memperhatikan kondisi cuaca dan mengatur tekanan udara secara tepat untuk mengurangi risiko hipoksia. (Gradwell, 2016)

2.1.4.2 Faktor Individu

Kesehatan fisik juga merupakan faktor individu yang signifikan sebagai penentu risiko hipoksia pada penerbang. Orang yang memiliki masalah kesehatan seperti penyakit paru, masalah jantung, atau anemia lebih rentan mengalami hipoksia (Gradwell, 2016). Hal ini karena kondisi kesehatan tersebut dapat mengganggu fungsi pernapasan dan mengurangi kemampuan tubuh untuk menangani stres. Maka, pilot harus mampu menjadikan kesehatan fisiknya sebagai perhatian dan menghindari aktivitas yang dapat mempengaruhi kesehatan.

Kelelahan adalah faktor individu lain yang dapat meningkatkan risiko hipoksia. Kelelahan fisik dan mental dapat mengurangi kemampuan tubuh untuk menangani stres dan mengganggu fungsi pernapasan. Hal ini dapat berakibat fatal jika pilot tidak mendapatkan istirahat yang cukup dan tidak mengatur kelelahan mereka secara tepat. Oleh karena itu, pilot harus memperhatikan kelelahan mereka dan mengatur istirahat secara tepat untuk mengurangi risiko hipoksia. (Gradwell, 2016)

Stres juga berperan penting dalam menentukan risiko hipoksia. Stres dapat mengganggu kinerja pilot dan meningkatkan risiko kecelakaan, termasuk hipoksia. Hal ini karena stres dapat mengganggu fungsi pernapasan dan mengurangi kemampuan tubuh untuk menangani stres. Oleh karena itu, pilot harus memperhatikan

stres mereka dan mengatur stres secara tepat untuk mengurangi risiko hipoksia.

2.1.4.3 Faktor Pelatihan dan Peralatan Penerbangan

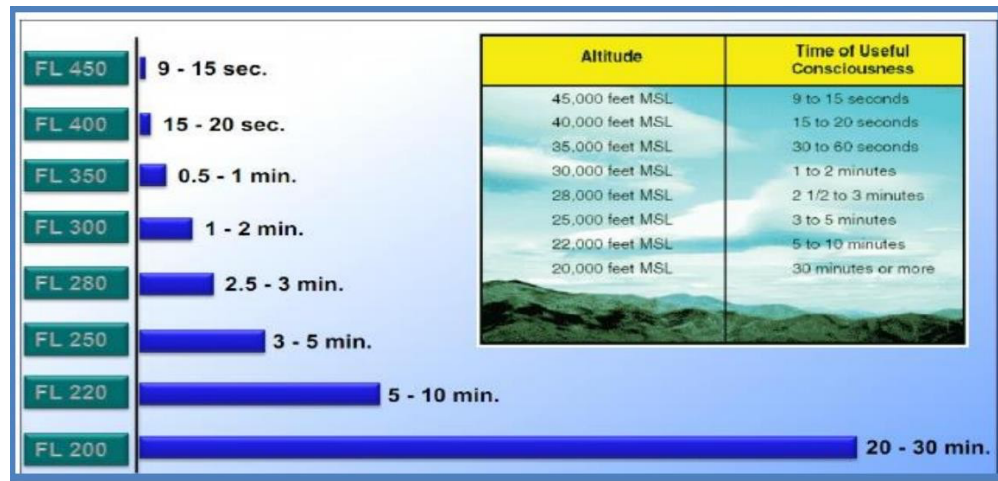
Pilot yang tidak mendapatkan pelatihan yang adekuat untuk menghadapi situasi hipoksia dapat mengalami kesulitan dalam mengatasi kondisi tersebut (Lakespra, 2015). Oleh karena itu, pilot harus mendapatkan pelatihan yang adekuat dan mengikuti prosedur yang tepat untuk mengurangi risiko hipoksia.

Penggunaan peralatan penerbangan yang tidak sesuai atau tidak diperbarui juga dapat meningkatkan risiko hipoksia. Peralatan penerbangan yang tidak sesuai dapat mengganggu fungsi pernapasan dan mengurangi kemampuan tubuh untuk menangani stres. Oleh karena itu, pilot harus memperhatikan peralatan penerbangan yang digunakan dan mengikuti prosedur yang tepat untuk mengurangi risiko hipoksia.

2.1.5 *Time of Useful Consciousness* sebagai Pengukur Ketahanan Hipoksia

Time of Useful Consciousness (TUC) adalah periode saat seseorang masih mampu bertindak setelah mengalami serangan hipoksia pada berbagai ketinggian. Jika melebihi periode tersebut, kesadaran akan hilang. Durasi TUC bervariasi tergantung pada ketinggian; semakin tinggi ketinggian, semakin singkat periode TUC. Selain itu, TUC dipengaruhi juga oleh keadaan fisik serta kerentanan individu terhadap hipoksia (Aritonang, 2019). Penting bagi awak pesawat untuk memperhatikan *Time of Useful Consciousness* (TUC) supaya dapat diketahui durasi waktu yang tersedia jika mengalami hipoksia

diketinggian tertentu. Informasi mengenai nilai TUC untuk setiap ketinggian terdapat dalam tabel yang tersedia.



Gambar 2.1 Nilai TUC pada Ketinggian (Aritonang, 2019)

2.1.6 *Cooper Test* sebagai Indikator Kebugaran Fisik

2.1.6.1 Definisi dan Sejarah *Cooper Test*

Cooper Test, yang diperkenalkan oleh Dr. Kenneth Cooper beserta Angkatan Udara Amerika Serikat, adalah sebuah tes lari yang dilaksanakan selama 12 menit dengan tujuan untuk mengevaluasi ketahanan atlet secara aerobik dan memberikan perkiraan nilai VO₂max. (Negara, 2016)

2.1.6.2 Kontraindikasi *Cooper Test*

Cooper test dilarang untuk dilaksanakan pada kondisi-kondisi yang tidak memungkinkan. Kondisi-kondisi ini meliputi stenosis aorta, gagal jantung, tekanan darah tinggi, *unstable angina*, aritmia yang

tidak dapat dikontrol, *pulmonary embolism*, perikarditis, stenosis koroner, ketidakseimbangan kadar elektrolit, infark paru, kelainan katup jantung, serta gangguan mental yang signifikan. (Negara, 2016)

2.1.6.3 Indikasi Untuk Menghentikan *Cooper Test*

Berikut merupakan beberapa indikasi untuk menghentikan *Cooper Test* guna mencegah risiko yang tidak diinginkan (Negara, 2016):

1. Kram pada kaki
2. Gejala kelelahan yang terlihat secara fisik dan verbal
3. Detak jantung yang tidak teratur
4. Sensasi pusing, mual, atau sakit kepala
5. Sejenis reaksi ortosimpatetik (seperti berkeringat atau kulit pucat)
6. Permintaan peserta untuk menghentikan aktivitas
7. Gagal atau rusaknya komponen atau perangkat uji
8. Kesulitan bernapas (sesak napas)
9. Kelainan jantung (seperti angina)

2.1.6.4 Persiapan Pelaksanaan *Cooper Test*

Untuk melaksanakan *Cooper Test*, diperlukan beberapa alat penting, yaitu (Negara, 2016):

1. Lintasan lari dengan jarak 400 meter: Lintasan lari standar yang memberikan jarak yang terukur dengan jelas untuk setiap putaran.
2. Stopwatch: Digunakan untuk mengukur waktu dengan tepat selama 12 menit pelaksanaan tes.
3. Peluit: Alat untuk memberi sinyal mulai dan berakhirnya tes. Alat tulis: Untuk mencatat jarak yang dicapai oleh peserta selama tes.

4. *Cooper Test* mengharuskan peserta untuk berlari sejauh yang mereka mampu selama 12 menit. Sebelum tes dimulai, peserta diharuskan melaksanakan gerakan pemanasan dengan waktu 10 menit untuk mempersiapkan tubuh dan mengurangi risiko cedera. Setelah pemanasan, tes dimulai dengan peserta berlari pada lintasan sejauh 400 meter. Peserta harus berusaha mencapai jarak sejauh mungkin dalam waktu yang ditentukan.

Selama pelaksanaan tes, jarak yang ditempuh oleh peserta dicatat oleh asisten. Data ini kemudian digunakan untuk menginterpretasikan hasil berdasarkan tabel normatif yang mengukur kemampuan aerobik. Hasil tes ini dapat memberikan gambaran tentang kapasitas aerobik dan daya tahan kardiovaskular peserta, yang penting untuk merancang program latihan dan mengukur perkembangan kebugaran.

Selain alat-alat yang disebutkan, ada beberapa hal tambahan yang dapat memperbaiki pelaksanaan *Cooper Test*:

1. Perlengkapan keselamatan: Seperti kit pertolongan pertama untuk mengatasi cedera atau keadaan darurat medis.
2. Monitor detak jantung: Untuk memantau respons fisiologis peserta selama tes, memastikan mereka tidak melebihi batas aman detak jantung.
3. Pendamping medis: Kehadiran tenaga medis atau pelatih berpengalaman untuk mengawasi dan memberikan pertolongan jika diperlukan.

Dengan persiapan yang baik dan pemantauan yang cermat, *Cooper Test* dapat dilakukan dengan aman dan efektif, memberikan data yang berharga untuk evaluasi kebugaran fisik peserta.

2.1.6.5 Prosedur Pelaksanaan *Cooper Test*

Pada pelaksanaannya, *Cooper Test* memerlukan beberapa peralatan seperti berikut:

1. Lintasan lari sejauh 400 meter
2. Pluit
3. Stopwatch
4. Alat pencatat

Cooper Test akan menuntut subjek untuk melaksanakan lari sejauh kemampuannya masing-masing subjek selama 12 menit. Sebelum pelaksanaan *Cooper Test*, subjek wajib melaksanakan kegiatan pemanasan selama 10 menit untuk menjaga keselamatan dan keamanan dari subjek. Selanjutnya adalah pelaksanaan dari *Cooper Test* yaitu subjek diminta untuk berlari di dalam lintasan 400 meter, subjek diberikan waktu 12 menit untuk berlari sejauh- jauhnya sesuai dengan kemampuan masing masing. Jarak yang ditempuh oleh subyek kemudian dicatat dan diinterpretasikan berdasarkan tabel berikut ini:

Tabel 2.1 Nilai *Cooper Test* Pria (Negara, 2016)

Age	Excellent (meter)	Above Average (meter)	Average (meter)	Below Average (meter)	Poor (meter)
13-14	>2700	2400-2700	2200-2399	2100-2199	<2100
15-16	>2800	2500-2800	2300-2499	2200-2299	<2200
17-19	>3000	2700-3000	2500-2699	2300-2499	<2300
20-29	>2800	2400-2800	2200-2399	1600-2199	<1600
30-39	>2700	2300-2700	1900-2299	1500-1999	<1500
40-49	>2500	2100-2500	1700-2099	1400-1699	<1400
>50	>2400	2000-2400	1600-1999	1300-1599	<1300

Tabel 2.2 Nilai *Cooper Test* Wanita (Negara, 2016)

Age	Excellent (meter)	Above Average (meter)	Average (meter)	Below Average (meter)	Poor (meter)
13-14	>2000	1900-2000	1600-1899	1500-1599	<1500
15-16	>2100	2000-2100	1700-1999	1600-1699	<1600
17-20	>2300	2100-2300	1800-2099	1700-1799	<1700
20-29	>2700	2200-2700	1800-2199	1500-1799	<1500
30-39	>2500	2000-2500	1700-1999	1400-1699	<1400
40-49	>2300	1900-2300	1500-1899	1200-1499	<1200
>50	>2200	1700-2200	1400-1699	1100-1399	<1100

2.1.7 Hubungan Ketahanan Hipoksia dengan Kebugaran Fisik

Hipoksia memiliki dampak signifikan pada performa fisik. Ketika seseorang berada dalam kondisi hipoksia, tubuh akan mengalami hiperventilasi sebagai respon untuk meningkatkan asupan oksigen. Hiperventilasi ini sering kali disertai dengan peningkatan variabilitas detak jantung (*Heart Rate Variability*, HRV) yang menunjukkan respons adaptif tubuh terhadap stres oksigen rendah. Namun, peningkatan HRV juga bisa menjadi indikasi ketidakstabilan otonom, yang dapat mempengaruhi performa fisik secara keseluruhan. (Cowburn AS, 2017)

Selain itu, hipoksia dapat mempengaruhi tekanan arteri (*Arterial Pressure*) dan suhu tubuh (*Body Temperature*). Hipoksia sering menyebabkan peningkatan tekanan darah sistolik (*Systolic Blood Pressure*) sebagai bagian dari respon tubuh untuk mempertahankan suplai oksigen ke organ vital. Kondisi ini juga dapat menyebabkan peningkatan kadar laktat serum (*Serum Lactate*), yang menunjukkan bahwa tubuh mulai mengandalkan metabolisme anaerob untuk menghasilkan energi, akibat dari keterbatasan oksigen untuk respirasi aerobik. (Cowburn AS, 2017)

Pengambilan oksigen (*Oxygen Uptake*) adalah salah satu indikator utama kebugaran kardiovaskular (Cowburn AS, 2017). Dalam kondisi hipoksia, kemampuan tubuh untuk mengambil dan memanfaatkan oksigen secara efisien berkurang, yang dapat menurunkan kapasitas aerobik dan performa fisik secara keseluruhan. Studi menunjukkan bahwa hipoksia dapat menurunkan performa fisik, terutama dalam aktivitas yang membutuhkan daya tahan dan kekuatan kardiovaskular tinggi.

Berbagai penelitian telah menunjukkan adanya korelasi yang signifikan antara hipoksia dan hasil tes kebugaran. Misalnya, studi yang dilakukan pada atlet menunjukkan bahwa paparan hipoksia dapat menurunkan performa dalam tes-tes kebugaran standar, seperti tes lari atau uji *VO2max*. Penurunan ini disebabkan oleh ketidakmampuan tubuh untuk mempertahankan suplai oksigen yang cukup selama aktivitas fisik intensif (Gao, 2021).

Individu yang berlatih di lingkungan hipoksia mengalami penurunan signifikan dalam kemampuan aerobik mereka dibandingkan dengan mereka yang berlatih di kondisi normoksia. Hasil tes *VO2max*, yang mengukur konsumsi oksigen maksimal selama latihan intensif, menunjukkan penurunan pada kelompok yang terpapar hipoksia, mengindikasikan penurunan kapasitas aerobik dan efisiensi kardiovaskular.

Hipoksia juga mempengaruhi variabilitas detak jantung dan tekanan darah, yang semuanya berkontribusi pada penurunan performa fisik (Cowburn AS, 2017). Studi ini menunjukkan bahwa hipoksia mengakibatkan peningkatan kerja jantung dan sistem kardiovaskular,

yang dapat menurunkan daya tahan dan kekuatan otot selama aktivitas fisik.

2.1.8 Total Jam Terbang sebagai Indikator Pengalaman Penerbang

Total jam terbang adalah jumlah keseluruhan waktu yang dihabiskan seorang penerbang di udara selama kariernya. Ini adalah indikator utama dari pengalaman dan keahlian seorang pilot (Yuliana, 2015). Total jam terbang penting karena menunjukkan seberapa sering dan dalam kondisi apa seorang pilot telah menerbangkan pesawat. Semakin tinggi total jam terbang, biasanya semakin berpengalaman dan terampil seorang penerbang dalam menghadapi berbagai situasi penerbangan, mulai dari cuaca buruk hingga masalah teknis.

2.1.8.1 Hubungan antara Total Jam Terbang dengan Kesehatan dan Kebugaran Penerbang

Total jam terbang tidak hanya menunjukkan tingkat pengalaman seorang penerbang tetapi juga dapat mempengaruhi kesehatan dan kebugaran mereka. Penerbang dengan jam terbang yang tinggi mengalami paparan berulang pada lingkungan dengan tekanan rendah (hipobarik) yang dapat menyebabkan penyesuaian adaptif pada sistem kardiovaskular. Aktivitas fisik yang intens selama penerbangan, seperti manuver *G-force* tinggi, meningkatkan beban kerja pada jantung dan pembuluh darah. Respon tubuh terhadap beban ini termasuk peningkatan tekanan darah untuk mempertahankan perfusi organ vital. (Puspitasari, 2015)

2.1.8.2 Studi yang Meneliti Dampak Total Jam Terbang pada Kesehatan Penerbang

Berbagai studi telah meneliti dampak total jam terbang pada kesehatan penerbang. Studi menemukan bahwa penerbang dengan total jam terbang yang tinggi menunjukkan tingkat *distress* lebih tinggi jika dibandingkan dengan pilot yang memiliki jam terbang lebih sedikit (Yuliana, 2015).

Penelitian lain menunjukkan bahwa pilot dengan total jam terbang tinggi sering terpapar kondisi hipoksia berulang akibat lingkungan bertekanan rendah selama penerbangan di ketinggian tinggi. Paparan berulang ini menyebabkan hipoksia berkepanjangan, yang memicu peningkatan ekspresi faktor *inducible hypoxia* (HIF), terutama HIF-1 α dan HIF-2 α . HIF-1 α biasanya terlibat dalam respon adaptif awal, sementara HIF-2 α berperan dalam adaptasi jangka panjang. Peningkatan HIF ini membantu sel epitel paru untuk bertahan dan berfungsi dalam kondisi oksigen rendah yang berkepanjangan, namun juga dapat berdampak pada kesehatan jangka panjang pilot. yang dipublikasikan dalam jurnal yang sama juga menemukan bahwa penerbang dengan jam terbang tinggi lebih sering melaporkan gejala-gejala stres dan kelelahan. Ini menunjukkan bahwa meskipun pengalaman dan keterampilan meningkat dengan bertambahnya jam terbang, ada juga peningkatan risiko kesehatan yang signifikan yang harus dikelola dengan baik melalui program kebugaran dan manajemen stres yang efektif. (Choudhry, 2018)

2.1.9 Protokol Kesehatan dan Pencegahan Hipoksia

2.1.9.1 Protokol Kesehatan Penerbang TNI AU

Pencegahan hipoksia dilakukan melalui beberapa langkah, termasuk penggunaan oksigen sesuai ketinggian, pernapasan bertekanan, dan penggunaan pakaian bertekanan (*pressure suit*) (Aritonang, 2019). Selain itu, penting untuk mengawasi persediaan oksigen dalam penerbangan, memastikan tekanan kabin yang sesuai, serta mematuhi semua ketentuan penerbangan. Pelatihan untuk mengenali dan merasakan gejala hipoksia juga vital, sehingga penerbang dapat siap menghadapi dan mengatasi bahaya hipoksia dengan efektif.

Latihan mengenai hipoksia dilakukan dengan menggunakan Ruang Udara Bertekanan Rendah (RUBR) di Lakespra Saryanto. Alat RUBR, buatan ETC, USA tahun 1980, dapat mencapai ketinggian maksimum FL 650. Tujuan latihan ini adalah untuk memahami, merasakan, dan menganalisis tindakan pencegahan terhadap fenomena ketinggian seperti hipoksia, masalah gas terjebak, masalah gas yang berkembang, dan sistem oksigen. Tujuan dari latihan ini adalah mengetahui, merasakan, dan menganalisis tindakan pencegahan terhadap fenomena seperti *Trapped Gas Problems*, *Evolved Gas Problems*, dan Sistem Oksigen (Aritonang, 2019)

2.1.9.2 Pelatihan untuk Mengurangi Risiko Hipoksia

Pencegahan hipoksia melibatkan pelatihan khusus dalam penggunaan alat bantu pernapasan dan teknik pernapasan yang tepat selama penerbangan (Aritonang, 2019). Penerbang juga dilatih untuk mengenali tanda-tanda awal hipoksia, seperti pusing, penglihatan kabur, dan gangguan kognitif, sehingga mereka dapat

mengambil tindakan korektif segera. Pelatihan ini sering dilakukan dalam lingkungan simulasi yang mensimulasikan kondisi hipoksia untuk meningkatkan kesiapan penerbang.

2.1.9.3 Tindakan Preventif untuk Mengurangi Risiko Hipoksia

Teknologi terbaru seperti sistem oksigen cair dan sistem generasi oksigen di pesawat telah diterapkan untuk memastikan suplai oksigen yang stabil selama penerbangan (Aritonang, 2019). Selain itu, monitor oksigen darah portabel digunakan untuk memantau saturasi oksigen penerbang secara real-time. Sistem alarm otomatis yang mendeteksi penurunan level oksigen juga telah diintegrasikan ke dalam kokpit untuk memberikan peringatan dini kepada penerbang tentang kondisi hipoksia potensial.

Studi kasus dan penelitian sebelumnya menekankan pentingnya mitigasi risiko hipoksia melalui prosedur yang tepat dan pelatihan yang memadai. Misalnya, penelitian menunjukkan bahwa hipoksia dapat mempengaruhi fungsi otak dan kinerja penerbang, sehingga pelatihan dan peralatan yang tepat sangat penting untuk menjaga keselamatan penerbang dan operasional yang optimal. (Aritonang, 2019)

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode	Hasil	Kesimpulan
1	Faulhaber, Martin, 2021, Austria	<i>Effects of Acute Hypoxia on Lactate Thresholds and High-Intensity Endurance Performance-A Pilot Study</i>	<i>Experimental, cross-over</i>	Daya pada ambang laktat menurun secara signifikan dari normoksia ke hipoksia, tetapi penurunan daya rata-rata lebih kecil. Terdapat korelasi kuat antara daya rata-rata dan daya pada ambang laktat, terutama dalam normoksia.	Meskipun penelitian ini dilakukan pada sampel kecil, hasilnya menyarankan penggunaan ambang laktat dengan hati-hati untuk mengatur intensitas latihan dalam hipoksia.
2	Takezawa, T, 2021, Japan	<i>Cardiorespiratory Response and Power Output During Submaximal Exercise in Normobaric Versus Hypobaric Hypoxia: A Pilot Study Using a Specific Chamber that Controls Environmental Factors</i>	<i>Cohort Study</i>	SpO ₂ , PETCO ₂ , dan daya output pada detak jantung tetap (efisiensi mengayuh) di NH dan HH secara signifikan lebih rendah daripada di NN. Latihan intensitas tinggi di HH menyebabkan penurunan	Hasil ini menunjukkan bahwa respon fisiologis dan output daya selama paparan hipoksia mungkin bergantung pada metode yang digunakan untuk menciptakan kondisi hipoksia.

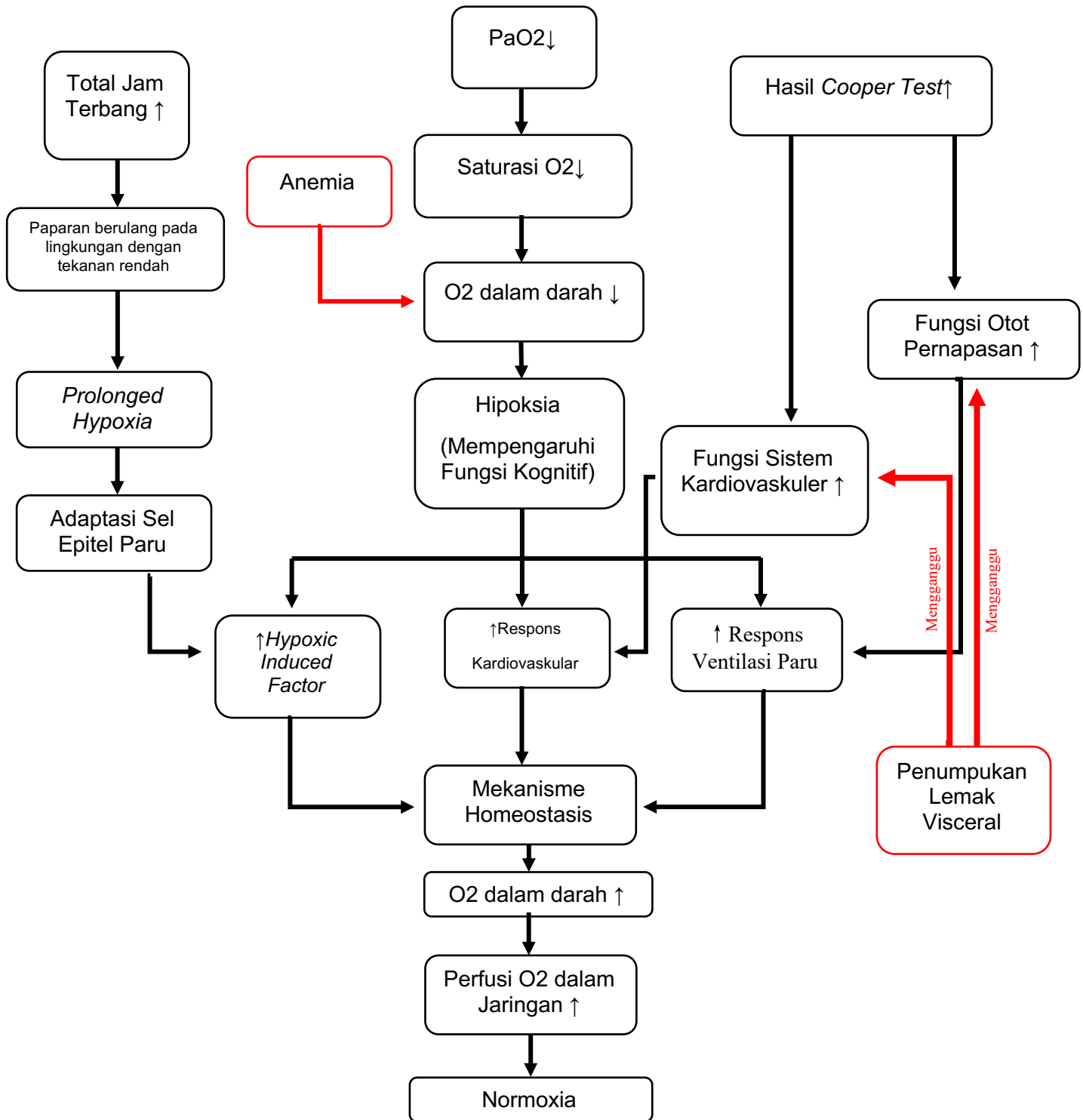
				SpO2 dan daya output yang lebih besar daripada latihan intensitas tinggi di NH. Namun, latihan intensitas tinggi di HH menyebabkan peningkatan PETCO2 yang lebih besar daripada di NH.	
3	Varis, N, 2022, Finland	<i>Hyperventilation and Hypoxia Hangover During Normobaric Hypoxia Training in Hawk Simulator</i>	<i>Experimental</i>	Ventilasi meningkat saat paparan hipoksia, terutama pada kadar oksigen 8% dan 6%. Performa penerbangan ILS menurun setelah paparan hiperventilasi dan hipoksia, dengan korelasi signifikan antara ventilasi pernapasan dan performa ILS.	Hiperventilasi selama paparan hipoksia memiliki efek yang berkelanjutan pada performa penerbangan ILS pilot.
4	Steinman, Y, 2021, Netherlands	<i>Exposure to hypoxia impairs helicopter pilots' awareness of environment</i>	<i>Experimental</i>	Pada ketinggian 4572 m, kru helikopter melewati 28 item kesadaran lingkungan (AoE)	Hipoksia memengaruhi kesadaran lingkungan dan kewaspadaan pilot helikopter,

				dibandingkan dengan 12 di ketinggian 0 m. Namun, keterampilan teknis tidak dipengaruhi secara signifikan oleh hipoksia.	meningkatkan risiko keselamatan penerbangan. Disarankan untuk melakukan pelatihan.
5	Bouak, F, 2018, Filipina	<i>Acute Mild Hypoxic Hypoxia Effects on Cognitive and Simulated Aircraft Pilot Performance</i>	<i>Experimental</i>	Pada ketinggian tertentu di atas 10K, terjadi penurunan dalam kinerja kognitif dan tugas simulasi penerbangan, serta peningkatan gejala hipoksia. Namun, tidak ada pengaruh yang jelas dari hipoksia ringan pada kinerja pada ketinggian yang lebih rendah seperti 8K dan 10K.	Hipoksia ringan memiliki pengaruh yang signifikan pada beberapa aspek kinerja dan kemampuan kognitif pada ketinggian di atas 10K. Temuan ini menyoroti pentingnya pemahaman yang lebih baik tentang dampak hipoksia pada pilot dan penyesuaian kebijakan operasional yang sesuai.
6	Nisha, S, 2020, Malaysia	<i>The objective assessment of the effects on cognition functioning among military personnel exposed to</i>	<i>Case-control</i>	Pada studi fMRI <i>preliminer</i> ini, personel penerbangan yang memiliki paparan kronis intermiten terhadap	Meskipun paparan kronis intermiten terhadap lingkungan hipoksia hipobarik,

		<i>hypobaric-hypoxia: A pilot fMRI study</i>		lingkungan hipoksia hipobarik tidak menunjukkan penurunan signifikan dalam fungsi kognitif seperti perhatian, pengambilan keputusan, dan pemecahan masalah dibandingkan dengan kelompok kontrol selama tugas memori kerja.	tidak terjadi penurunan signifikan dalam fungsi kognitif pada personel penerbangan, seperti yang diamati dalam tugas memori kerja.
7	Heratika, D, 2020, Jakarta	Pengaruh zona ketinggian terhadap fungsi kognitif pada penerbang pria yang mengikuti indoktrinasi dan latihan aerofisiologi tahun 2019	<i>Experimental</i>	Terdapat perubahan skor 6 CIT pada ketinggian 10.000 kaki jika dibandingkan dengan <i>ground level</i> . Perubahan juga ditemukan yaitu skor 6 CIT pada ketinggian 25.000 kaki dibandingkan dengan <i>ground level</i> .	Zona efisiensi fisiologis dan zona defisiensi fisiologis terdapat perbedaan jika dibandingkan dengan pada <i>ground level</i> .
8	Mulijadi, H, 2008, Jakarta	Respon Hipoksia Orang Terlatih di Ruang Udara Bertekanan Rendah	<i>Case-control Study</i>	Ditemukan perbedaan yang bermakna pada <i>resting heart rate</i> , WSE, LVEDD, dan IVSd	Latihan aerobik intensif pada perwira AAU meningkatkan risiko penurunan daya tahan

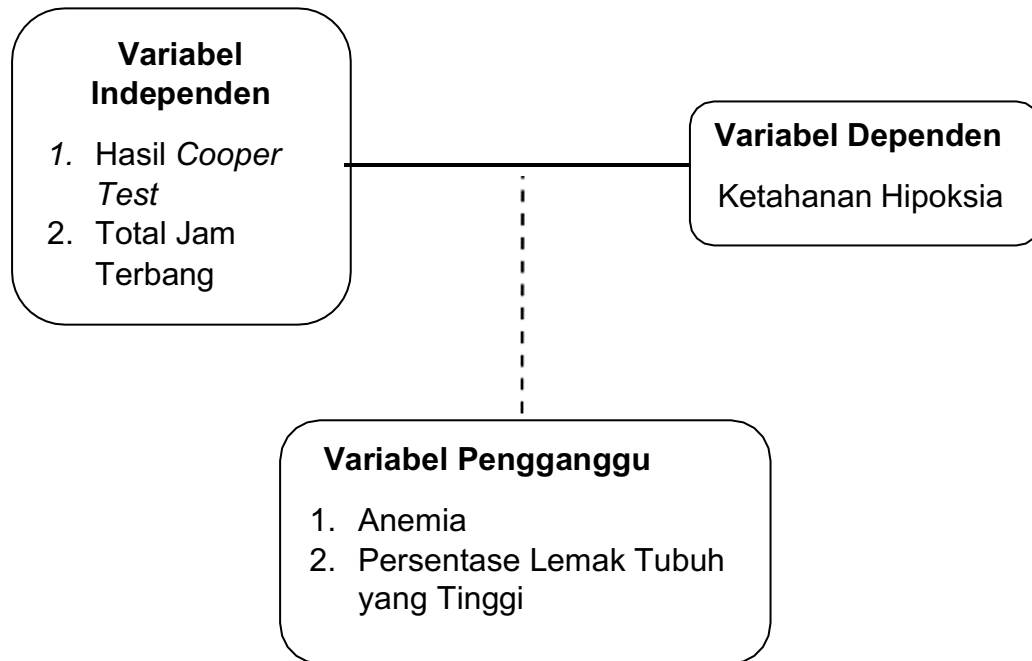
				antara kelompok terlatih dan tidak terlatih. Kelompok terlatih menunjukkan waktu puncak latihan (WSE < 4 menit) yang lebih rendah, menandakan penurunan daya tahan terhadap hipoksia.	terhadap hipoksia.
9	Mancera-Soto a, Erica, 2022, Colombia	<i>Effect of hypobaric hypoxia on hematological parameters related to oxygen transport, blood volume and oxygen consumption in adolescent endurance-training athletes</i>	<i>Cross-sectional</i>	Laki-laki memiliki nilai hematologis dan <i>VO2peak</i> lebih tinggi daripada perempuan. Tinggal di ketinggian sedang meningkatkan Hct, [Hb], Hbt, EV, dan <i>VO2peak</i> , tetapi tidak mempengaruhi BV dan PV. Olahraga tidak memengaruhi variabel hematologis dan sebagian besar parameter kardiorespirasi.	Atlet skating remaja di LA dan MA menunjukkan perbedaan jenis kelamin dalam variabel hematologis. Laki-laki di MA memiliki respons eritropoietik dan <i>VO2peak</i> lebih tinggi dibandingkan dengan mereka di LA. Respons ini serupa di tiga olahraga aerobik, menunjukkan sensitivitas yang sama terhadap hipoksia.

2.3 Kerangka Berpikir
2.3.1 Kerangka Teori



Gambar 2.2 Kerangka teori

2.2.1 Kerangka Konsep



Gambar 2.3 Kerangka konsep

2.3 Hipotesis

H₀: Tidak terdapat hubungan antara hasil *Cooper Test* dengan ketahanan hipoksia pada penerbang.

Tidak terdapat hubungan antara total jam terbang dengan ketahanan hipoksia pada penerbang

H₁: Terdapat hubungan antara hasil *Cooper Test* dengan ketahanan hipoksia pada penerbang

Terdapat hubungan antara total jam terbang dengan ketahanan hipoksia pada penerbang.