
Artikel

Aspek Aerofisiologi dalam Penerbangan

Dr. H. Sukotjo Danusastro, DSKP, MBA
Perkespra Pusat, Jakarta

ABSTRAK

Manusia diciptakan Tuhan untuk hidup di darat dan semua organ tubuh dapat bekerja dan berfungsi dengan baik dalam kondisi lingkungan darat yang mengelilinginya. Akan tetapi manusia sejak zaman dahulu ingin terbang seperti burung dan akhirnya berhasil terbang dengan balon pada abad ke-18.

Sejak abad tersebut dunia penerbangan berkembang sangat pesat baik jarak tempuh, kecepatan, ketinggian dan daya angkat maupun kegiatannya. Keberhasilan ini telah dapat meningkatkan kesejahteraan umat manusia, namun bukannya tanpa risiko karena manusia memang tidak terbiasa tinggal di ketinggian.

Untuk menghadapi hal tersebut maka Ilmu Kesehatan harus mengembangkan diri untuk mempelajari bahaya-bahaya penerbangan bagi tubuh manusia dan cara-cara penanggulangannya. Maka lahirlah Ilmu Kesehatan Penerbangan sebagai salah satu cabang Ilmu Kesehatan, yang dilandasi oleh Fisiologi Penerbangan atau Aerofisiologi.

Faktor-faktor ketinggian yang mempengaruhi faal tubuh manusia adalah menurunnya tekanan udara, tekanan parsial oksigen, suhu udara dan gaya berat dan lain-lain. Di samping itu *manoeuvre* penerbangan dapat mengganggu faal tubuh seperti faal sistem kardio-vaskuler, sistem pernapasan, penglihatan, keseimbangan, pendengaran dan lain-lain.

Karena itu mempelajari aspek aerofisiologi dalam penerbangan adalah penting agar kita dapat mencegah dan mengatasi pengaruh buruk penerbangan. Dengan demikian kita dapat memanfaatkan udara bagi penerbangan dengan selamat, nyaman, aman dan cepat.

PENDAHULUAN

Umum

Manusia diciptakan Tuhan untuk hidup di darat. Sebagai makhluk daratan manusia telah terbiasa dan menyesuaikan diri untuk hidup di lingkungan daratan atau pada atmosfer yang paling rendah. Namun sejak zaman dahulu manusia ingin terbang seperti burung, suatu hal di luar kebiasaannya. Setelah melalui

perjuangan tanpa kenal lelah dan gigih akhirnya pada abad ke-18 manusia dapat terbang dengan balon, diikuti dengan keberhasilan terbang dengan pesawat terbang. Bahkan sekarang manusia telah berhasil mengarungi ruang angkasa luar.

Dewasa ini banyak orang-orang yang memilih profesinya dalam penerbangan, yang berbeda dengan kebiasaan hidupnya di darat. Hal ini tentu saja akan membawa konsekuensi atau risiko-

risiko yang harus dihadapinya. Namun demikian merekapun menginginkan keamanan dalam menjalankan tugasnya ini, sehingga Ilmu Kesehatan harus membuka cabangnya untuk mempelajari bahaya-bahaya penerbangan. Hal ini menyebabkan lahirnya Ilmu Kesehatan Penerbangan, yang dilandasi oleh Fisiologi Penerbangan atau Aerofisiologi.

Ilmu Kesehatan Penerbangan atau *Aviation Medicine* akhir-akhir ini berkembang menjadi Ilmu Kesehatan Penerbangan dan Ruang Angkasa atau *Aerospace Medicine*, karena perkembangan teknologi penerbangan yang memungkinkan menerbangkan orang ke ruang angkasa.

SEJARAH ILMU KESEHATAN PENERBANGAN

Pada abad ke 13 dua saudara Montgolfier berhasil membuat balon yang dapat terbang dengan membawa muatan. Balon yang pertama ini diterbangkan di Versailles, Perancis, tanggal 19 September 1963 dengan muatan ayam, bebek dan kambing dan dapat mencapai ketinggian 1.500 kaki. Sebulan kemudian diadakan penerbangan balon lagi yang membawa penumpang manusia, yaitu Pilatre de Rozier, seorang apoteker, dan Marquis di Arlandes. Percobaan ini berhasil dengan selamat.

Pada tanggal 23 November 1784, seorang dokter Amerika John Jeffries tertarik akan penerbangan dan ingin mengetahui susunan dan sifat atmosfer bagian atas. Ia melakukan penerbangan dengan balon, dengan membawa termometer, hydrometer, barometer dan elektrometer, sampai ketinggian 9.250 kaki. Dalam penerbangan ini ia mencatat adanya perubahan suhu di ketinggian dari + 51°F menjadi 28,5°F,, sedangkan tekanan udara menurun dari 30 inci Hg menjadi 21,25 inci Hg.

Pada tahun 1862, Clasher dan Coxwell terbang dengan balon sampai setinggi 29.000 kaki dengan tujuan yang sama. Di samping itu mereka melakukan observasi pada dirinya sendiri. Untuk mengetahui perubahan-perubahan apa yang akan terjadi pada ketinggian. Selama terbang, Clasher mengalami gejala-gejala aneh pada tubuhnya, yaitu tajam penglihatan dan pendengaran menurun, kedua belah anggota badan menjadi lumpuh dan akhirnya jatuh pingsan. Coxwell juga mengalami kejadian yang serupa, hanya sebelum pingsan berusaha menarik tali pengikat katup balon guna menurunkan balonnya. Usaha ini hampir gagal, karena kedua tangannya tidak dapat digerakkan lagi, sehingga dia menarik tali tadi dengan menggigitnya. Dari pengalaman kedua orang ini dapat diambil kesimpulan bahwa terbang tinggi dapat membahayakan jiwa manusia.

Paul Bert, seorang ahli ilmu faal Perancis, sangat tertarik dengan kejadian tadi dan pada tahun 1874 mengadakan percobaan dengan menggunakan kabin bertekanan rendah untuk melihat perubahan apa yang dapat terjadi pada ketinggian atau tempat yang tekanan udaranya kecil. Dari salah satu basil percobaan-percobaannya didapatkan adanya hipoksia atau kekurangan oksigen pada ketinggian yang dapat diatasi dengan pemberian oksigen pada penerbangan. Hasil penelitian Paul Bert ini dipraktekkan oleh Sivel dan Groce Spinelli, yang terbang sampai 18.000 kaki dengan menggunakan kantong oksigen tanpa mengalami gangguan.

Pada tahun 1875, Sivel dan Groce-Spinelli melakukan pe-

nerbangan lagi bersama Tissander, yang juga menggunakan kantong oksigen dengan kadar 72%. Penerbangan mereka ini mencapai ketinggian 28.000 kaki dan berakhir dengan kematian Sivel dan Groce-Spinelli karena hipoksia sedang Tissander hanya pingsan saja. Tissander membuat catatan yang sangat lengkap tentang perubahan-perubahan yang terjadi dalam penerbangan ini. Dari catatan ini dapat disimpulkan bahwa ada gejala euphoria sebelum hipoksia dan oksigen tidak mencukupi untuk penerbangan tinggi.

Dengan munculnya pesawat terbang, bertambahlah kesukaran dan bahaya penerbangan yang dapat mengancam jiwa penerbang. Pada waktu pesawat udara masih sederhana, yang tinggi terbangnya belum besar dan kecepatannya masih rendah, telah banyak kecelakaan-kecelakaan yang terjadi; sebagian besar ternyata disebabkan oleh kurang mampunya tubuh penerbang menghadapi perubahan-perubahan atau bahaya-bahaya yang timbul pada penerbangan. Hal ini terbukti pada penelitian-penelitian yang dilakukan pada perang dunia pertama; kira-kira 90% kecelakaan udara disebabkan karena penerbang tidak atau kurang tahan uji terhadap bahaya penerbangan.

Sejak Perang Dunia ke I selesai Ilmu Kesehatan Penerbangan mendapat tempat yang layak dalam dunia kesehatan, sehingga perkembangannya makin pesat. Sedang pada akhir-akhir ini dengan kemajuan teknologi penerbangan, Ilmu, Kesehatan Penerbangan berkembang dan bahkan sekarang telah menjadi Ilmu Kesehatan Penerbangan dan Ruang Angkasa.

RUANG LINGKUP DAN SISTEMATIKA

Ruang lingkup naskah ini meliputi fisiologi penerbangan atau Aerofisiologi yang mendasari Ilmu Kesehatan Penerbangan dan kelainan-kelainan yang timbul dalam tubuh manusia akibat penerbangan, dan disusun dengan sistematika sebagai berikut :

1. Pendahuluan
2. Atmosfer
3. Pengaruh ketinggian pada faal tubuh
4. Pengaruh percepatan dan kecepatan terhadap tubuh
5. Pengaruh penerbangan pada alat keseimbangan
6. Pengaruh penerbangan pada alat penglihatan
7. Penutup

ATMOSFER

Pengertian

Atmosfer adalah selubung gas atau campuran gas-gas, yang menyelubungi bumi. Campuran gas-gas ini disebut udara. Di atas atmosfer disebut ruang angkasa. Ruang angkasa adalah ruang dimana tidak ada lagi udara, bila masih ada udara atau gas maka daerah itu masih atmosfer, karena molekul gas yang sangat ringan dapat terlepas dari gaya tarik bumi dan beredar ke ruang angkasa. Oleh karena itu dibuat perjanjian tentang batas antara atmosfer dan ruang angkasa. Batas ini di Rusia, menurut A.A. Lavikov adalah 3.000 km, sedang di Amerika, menurut Armstrong adalah 6.000 mil.

Susunan Atmosfer

Susunan atmosfer pada zaman dahulu berbeda dengan su-

sunan atmosfer pada zaman sekarang. Susunan atmosfer pada zaman dahulu, yaitu pada saat pembentukan atmosfer, terdiri dari gas-gas Hidrogen, Amoniak, Methan, Helium dan uap air dan disebut protoatmosfer. Dengan berbagai perubahan terjadilah atmosfer seperti sekarang ini, yang disebut neoatmosfer dan selanjutnya kita sebut atmosfer. Gas-gas pada neoatmosfer terdiri dari : Nitrogen dengan prosentase 70,09%, Oksigen dengan prosentase 20,95%, Argon 0,93%, Karbon Dioksida 0,03% dan sisanya terdiri dari gas-gas yang sangat kecil jumlahnya, yaitu Helium, Neon, Hidrogen dan Xenon.

Pembagian Atmosfer Berdasar Sifat-sifatnya

Berdasarkan sifat-sifatnya atmosfer dapat dibagi menjadi 4 (empat) lapisan, yaitu :

1) Lapisan Troposfer

Lapisan ini merupakan lapisan yang paling tipis dan terletak dari permukaan bumi sampai ke ketinggian 10–12 km.

Sifat-sifat troposfer pada umumnya adalah: suhu berubah-ubah, makin tinggi suhu makin rendah, arah dan kecepatan angin berubah-ubah, ada uap air dan hujan, serta ada turbulensi. Oleh karena sifat troposfer yang sering berubah-ubah ini, maka sebenarnya tempat ini kurang ideal untuk penerbangan; tetapi pada kenyataannya banyak penerbangan dilakukan di lapisan ini, sehingga kemungkinan bahaya penerbangan menjadi lebih besar.

2) Lapisan Stratosfer

Lapisan stratosfer terbentang di atas lapisan troposfer sampai ke ketinggian 50–80 km. Kedua lapisan ini dipisahkan oleh lapisan tropopause.

Sifat-sifat stratosfer ialah: suhu tetap walaupun ketinggian berubah yaitu -55°C , tidak ada uap air dan turbulensi. Oleh karena sifat-sifat stratosfer lebih stabil dibandingkan dengan troposfer, maka stratosfer ini sebenarnya adalah tempat yang ideal untuk kegiatan penerbangan.

3) Lapisan Ionosfer

Lapisan ionosfer terbentang dari atas stratosfer sampai ke ketinggian antara 600-1.000 km. Pada lapisan ini udara sangat renggang dan terjadi reaksi fotokhemis dan fotoelektris, sehingga atom-atom dan molekul-molekul gas ada yang menerima muatan listrik, menjadi ion-ion. Oleh karena pembentukan ion-ion inilah maka terjadi panas yang tinggi sehingga suhu udara di sini sampai 2.000°C .

4) Lapisan Eksosfer

Lapisan Eksosfer adalah lapisan atmosfer yang paling atas, di sini gas-gas tidak kontinu lagi hubungan molekulnya; atom-atom dan molekul-molekulgas membentuk pulau-pulau udara yang satu sama lain dipisahkan oleh ruang hampa. Oleh karena sifat inilah maka lapisan ini dibedakan dengan ketiga lapisan di atas.

Ketiga lapisan atmosfer yang berada di bawah eksosfer disebut pula atmosfer, sedang eksosfer disebut *outer* atmosfer (Tabel 1).

Pembagian Atmosfer Berdasarkan Ilmu Faal

Atmosfer juga dapat dibagi dalam 3 (tiga) daerah berdasarkan ilmu faal, yaitu :

Tabel 1. Skema Pembagian Atmosfer

Atmospheres	Spheres	Layers	Aproximate Height (mis)
Space			Above 1.200
Outer	Exosphere		600 to 1.200
Inner	Ionosphere	Atomic	250 to 600
		F (F-1 + F-2)	95 to 250
		E	60 to 95
		F	30 to 60
	Stratosphere	Upper Mixing	30 to 50
		Warm	15 to 30
		Isothermal	8 to 15
	Troposphere	Advection	1.2 to 8
		Ground	6 ft to 1.2 miles
		Bottom	0 to 6 ft

1) Physiological Zone

Daerah ini terbentang dari permukaan bumi sampai ke ketinggian 10.000 kaki. Di daerah ini orang praktis tidak mengalami perubahan faal tubuhnya, kecuali daya adaptasi gelapnya saja yang memanjang bila berada pada ketinggian lebih dari 5.000 kaki.

2) Physiological Deficient

Di daerah ini orang akan mengalami kekurangan fisiologi atau mengalami kelainan faal tubuh berupa hipoksia, tetapi masih dapat ditolong dengan pemberian oksigen saja. Daerah ini terbentang dari ketinggian 10.000 kaki sampai 50.000 kaki.

3) Space equivalent zone

Atmosfer di atas 50.000 kaki dinamakan *space equivalent zone*, karena di sini orang akan mengalami hipoksia berat dan canapertolongan atau perlindungan sama seperti di ruang angkasa.

OZONOSFER

Di samping lapisan-lapisan atmosfer di atas, kita mengenal suatu lapisan dalam atmosfer yang disebut ozonosfer karena mengandung banyak gas ozone. Lapisan ini terbentang antara ketinggian 12 km sampai 70 km dan yang terbanyak ozonnya berada pada ketinggian antara 45 km sampai 55 km. Ada pendapat yang mengatakan bahwa ozonosfer adalah payung bumi terhadap sinar ultra violet.

Tekanan Atmosfer

Seperti benda-benda lain, gas juga mempunyai berat. Berat 1 meter kubik udara pada permukaan laut dengan tekanan 760 mmHg dan suhu 0°C adalah 1.293 gram. Oleh karena berat udara inilah maka tiap permukaan atau bidang di dalam atmosfer menerima tekanan, yang besarnya sesuai dengan berat udara yang ada di atasnya. Tekanan inilah yang disebut tekanan atmosfer atau tekanan barometer bila diukur untuk tiap sentimeter persegi. Pada permukaan laut tekanan ini besarnya sama dengan $1,033 \text{ kg/cm}^2$. Telah dilakukan pengukuran tekanan atmosfer ini pada garis lintang 45° pada permukaan laut dan suhu 0°C pada luas permukaan 1 cm^2 . Hasilnya sama dengan tekanan satu kolom air raksa setinggi 760 milimeter dengan penampang dan suhu yang sama. Oleh karena itu 760 mmHg ini disebut 1 atmosfer. Satu atmosfer juga sering dinyatakan dengan 14,7 PSI (*pound per Square Inch*). Tekanan satu atmosfer ini juga sering digunakan

untuk menyatakan tekanan pada permukaan laut. Makin tinggi makin kurang tekanan udaranya, karena jumlah udara yang berada di atasnya makin kurang pula. Jadi tekanan barometer mengecil bila ketinggian bertambah (**Tabel 2**).

Tabel 2. Tekanan Barometer pada Ketinggian

Tinggi (Km)	0	16	32	48	64	80
Tekanan (Atm)	1	0,1	0,01	0,00	0,0001	0,00001

Tekanan Parsiil Gas

Gas-gas yang menyusun udara mempunyai berat sendiri, sehingga mempunyai tekanan masing-masing pula. Tekanan tiap-tiap gas ini disebut tekanan parsiiil gas itu. Jadi tekanan barometer adalah jumlah tekanan parsiiil gas-gas yang berada di udara. Cara menghitung tekanan parsiiil gas :

$$P = \frac{P \times B}{100}$$

- P = Tekanan parsiiil suatu gas
- C = Prosentase gas tersebut
- B = Tekanan barometer

Oksigen adalah unsur terpenting untuk kehidupan manusia. Prosentase oksigen dalam udara sampai ke ketinggian 110 km adalah tetap, yaitu sekitar 21%. Maka mudahlah bagi kita untuk menghitung tekanan parsiiil oksigen dalam udara pada beberapa ketinggian. Misalnya : pada permukaan laut $PO_2 = 159$ mmHg, pada ketinggian 6 km $PO_2 = 74$ mmHg. Tekanan parsiiil oksigen ini penting diketahui untuk menjelaskan masalah hipoksia.

Atmosfer Standar

Karena sifat-sifat atmosfer sering berubah-ubah, terutama bagian bawah, maka perlu diadakan suatu perjanjian mengenai sifat-sifat atmosfer yang tetap pada tiap ketinggian. Ketentuan-ketentuan ini merupakan suatu daftar dan disebut susunan atmosfer standard. **Tabel 3** merupakan susunan atmosfer standard yang digunakan di Amerika.

Tabel 3. USA Standard Atmosphere

Ketinggian (kaki)	Tekanan (mmHg)	Temperatur (°C)
0	760,0	15,0
2.000	706,0	11,0
4.000	656,3	7,1
6.000	609,3	3,1
8.000	564,4	- 0,8
10.000	522,6	4,8
12.000	483,3	- 8,9
14.000	446,4	- 12,7
16.000	411,8	- 16,7
18.000	379,4	- 20,7
20.000	349,1	- 24,6
22.000	370,8	- 28,6
24.000	294,4	- 32,5
26.000	269,8	- 36,5
28.000	246,9	- 40,5
30.000	225,6	- 44,4
32.000	205,8	- 48,4
34.000	187,4	- 52,4
35.000	175,9	- 55,0
36.000	170,4	- 55,0
38.000	154,9	- 55,0
40.000	140,7	- 55,0

42.000	127,9	- 55,0
44.000	116,3	- 55,0
46.000	105,7	- 55,0
48.000	96,05	- 55,0
50.000	87,30	- 55,0
52.000	79,34	- 55,0
54.000	72,12	- 55,0
56.000	65,55	- 55,0
58.000	59,58	- 55,0
60.000	54,15	- 55,0

Suhu Atmosfer

Semakin tinggi kita naik semakin rendah temperaturnya. Pada lapisan atmosfer bagian bawah, berlaku suatu ketentuan, bahwa suhu akan menurun 2°C setiap kita naik 300 m ke atas atmosfer. Pada lapisan stratosfer suhu telah menjadi sekitar -55°C.

Pada lapisan ionosfer terjadi reaksi pembentukan ion, sehingga suhu pada lapisan ini naik menjadi 2.000°C.

Jelas bahwa pada penerbangan tinggi dengan menggunakan pesawat yang ada pada dewasa ini, yang terpenting adalah problem penurunan suhu sehingga perlu dilengkapi dengan alat pemanas.

Radiasi

Radiasi di atas atmosfer berasal dari matahari atau dari planet-planet lain. Radiasi ini berupa gelombang-gelombang elektromagnetik. Bumi kita diselubungi oleh suatu atmosfer yang dapat menahan atau mengabsorbsi sinar-sinar radiasi tersebut, sehingga sampai di permukaan bumi tidak lagi membahayakan. Lapisan ozon mempunyai daya untuk mengabsorbsi sinar ultra violet sehingga jumlah kecil saja dari sinar tersebut yang sampai di permukaan bumi; di samping itu atmosfer juga memantulkan kembali radiasi dari beberapa gelombang elektromagnetik.

Jadi intensitas radiasi akan makin meningkat bila kita naik ke atas atmosfer, sedangkan radiasi yang intensitasnya tinggi membayakan tubuh manusia.

Magnet Bumi dan Sabuk Radiasi

Bumi memiliki magnet yang kutub-kutubnya berada di utara dan selatan. Akibat adanya magnet bumi ini, maka radiasi yang berbentuk partikel bermuatan listrik akan bergerak mengikuti garis medan magnet, sehingga terbentuklah daerah yang intensitas radiasinya sangat tinggi. Dr. James A Van Allen menemukan sabuk radiasi yang intensitasnya sangat tinggi ini yang terkenal dengan nama *Van Allen Belt*. Intensitas radiasi ini demikian besarnya sehingga dapat mematikan manusia yang berada di tempat tersebut. Van Allen Belt ini mengganggu gelombang radio yang dipakai untuk komunikasi ke planet lain.

Sabuk radiasi ini dibagi dalam dua bagian, yaitu *inner belt* dan *outer belt*. Di belahan bumi bagian barat, batas bawahnya antara 500 – 600 km, sedang di belahan bumi sebelah timur batas bawahnya pada ketinggian 1.600 km. Batas luar sabuk ini antara 7.000 km – 10.000 km.

Di atas daerah kutub bumi didapatkan daerah yang bebas dari sabuk radiasi ini. Oleh karenanya penerbangan ruang angkasa akan lebih aman bila keluar dari atmosfer bumi melalui

daerah kutub.

Hukum Gas

Hukum gas berguna untuk menjelaskan gangguan fisiologi pada penerbangan. Hukum gas yang penting adalah :

1) Hukum Difusi Gas

Hukum difusi gas ini penting untuk menjelaskan pernapasan, baik pernapasan luar maupun dalam. Hukum ini mengatakan bahwa gas akan berdifusi dari tempat yang bertekanan parsialnya tinggi menuju ke tempat yang tekanan parsialnya rendah. Sedang kecepatan berdifusi ini ditentukan oleh besarnya selisih tekanan parsial tersebut dan tebalnya dinding pemisah.

2) Hukum Boyle

Hukum ini penting untuk menjelaskan masalah penyakit dekompresi. Hukum Boyle ini mengatakan bahwa apabila volume suatu gas tersebut berbanding terbalik dengan tekanannya.

$$P \cdot V = C$$

P = Pressure atau tekanan
 V = Volume atau isi
 C = Constant atau tetap

3) Hukum Dalton

Hukum ini penting untuk menghitung tekanan parsial gas dalam suatu campuran gas, misalnya menghitung tekanan parsial oksigen dalam udara pernapasan pada beberapa ketinggian guna menjelaskan masalah hipoksia. Hukum ini mengatakan bahwa tekanan total suatu campuran gas sama dengan jumlah tekanan parsial gas-gas penyusun campuran tersebut.

$$P_t = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

P_t = Tekanan total campuran gas
 P_1, P_2 dan seterusnya adalah tekanan parsial masing-masing gas.

4) Hukum Henry

Hukum ini penting untuk menjelaskan penyakit dekompresi, seperti *bends*, *chokes*, dan sebagainya yang dasarnya adalah penguapan gas yang larut.

Hukum ini mengatakan bahwa jumlah gas yang larut dalam suatu cairan tertentu berbanding lurus dengan tekanan parsial gas tersebut pada permukaan cairan itu.

$$A_1 \times P_1 = A_2 \times P_2$$

A = jumlah gas yang larut
 P = Tekanan parsial gas pada permukaan cairan.

5) Hukum Charles

Hukum ini penting untuk menjelaskan tentang turunnya tekanan oksigen atau berkurangnya persediaan oksigen bila isi tetap, maka tekanan gas tersebut berbanding lurus dengan suhu absolutnya. Jadi bila kita membawa oksigen dalam botol pada penerbangan tinggi, suhunya akan lebih rendah, maka tekanan gas tersebut akan menurun pula. Atau dengan kata lain persediaan oksigen akan berkurang.

Bila isi tetap :

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

P_1 = Tekanan semula
 P_2 = Tekanan yang baru
 T_1 = Suhu absolut mula-mula
 T_2 = Suhu absolut kemudian

PENGARUH KETINGGIAN PADA FAAL TUBUH

Umum

Ada empat perubahan sifat atmosfer pada ketinggian yang dapat merugikan faal tubuh khususnya dan kesehatan pada umumnya, yaitu :

- 1) Perubahan atau mengecilnya tekanan parsial oksigen di udara. Hal ini dapat mengganggu faal tubuh dan menyebabkan hipoksia.
- 2) Perubahan atau mengecilnya tekanan atmosfer. Hal ini dapat menyebabkan sindrom *dysbarism*.
- 3) Berubahnya suhu atmosfer.
- 4) Meningkatnya radiasi, baik dari matahari (*solar radiation*) maupun dari kosmos lain (*cosmic radiation*).

Dari keempat perubahan ini yang akan dibahas adalah masalah hipoksia dan *dysbarism*. Masalah pengaruh perubahan suhu hanya dibahas secara umum karena akan lebih banyak dibahas pada masalah *survival* dan masalah *bail out*. Sedangkan masalah radiasi tidak dibahas di sini, karena pengaruhnya pada penerbangan biasa kurang berarti dan hanya penting dibicarakan bila kita membahas masalah penerbangan ruang angkasa.

Hipoksia

Pengertian :

Hipoksia adalah keadaan tubuh kekurangan oksigen untuk menjamin keperluan hidupnya. Dengan menipisnya udara pada ketinggian, maka tekanan parsial oksigen dalam udara menurun atau mengecil. Mengecilnya tekanan parsial oksigen dalam udara pernapasan akan berakibat terjadinya hipoksia.

Sifat-sifat hipoksia :

- 1) Tidak terasa datangnya, sehingga orang awam tidak tahu bahwa bahaya hipoksia ini telah menyerangnya.
- 2) Tidak memberikan rasa sakit pada seseorang, bahkan sering memberikan rasa gembira (*euphoria*) pada permulaan serangannya, kemudian timbul gejala-gejala lain yang lebih berat sampai pingsan dan bila dibiarkan dapat menyebabkan kematian.

Macam hipoksia

Menurut sebabnya hipoksia ini dibagi menjadi 4 macam, yaitu .

- 1) *Hypoxic-Hypoxia*, yaitu hipoksia yang terjadi karena menurunnya tekanan parsial oksigen dalam paru-paru atau karena terlalu tebalnya dinding paru-paru. *Hypoxic-Hypoxia* inilah yang sering dijumpai pada penerbangan, karena seperti makin tinggi terbang makin rendah tekanan barometernya sehingga tekanan parsial oksigennya pun akan makin kecil.
- 2) *Anaemic-Hypoxia*, yaitu hipoksia yang disebabkan karena berkurangnya hemoglobin dalam darah baik karena jumlah darahnya sendiri yang kurang (perdarahan) maupun karena kadar Hb dalam darah menurun (anemia).
- 3) *Stagnant-Hypoxia*, yaitu hipoksia yang terjadi karena adanya bendungan sistem peredaran darah sehingga aliran darah tidak lancar, maka jumlah oksigen yang diangkut dari paru-paru menuju sel persatuan waktu menjadi kurang. *Stagnant* hipoksia ini sering terjadi pada penderita penyakit jantung.
- 4) *Histotoxic-Hypoxia*, yaitu hipoksia yang terjadi karena adanya bahan racun dalam tubuh sehingga mengganggu kelancaran pemapasan dalam.

Gejala-gejala hipoksia

Gejala yang timbul pada hipoksia sangat individual, sedang berat ringannya gejala tergantung pada lamanya berada di daerah itu, cepatnya mencapai ketinggian tersebut, kondisi badan orang yang menderitanya dan lain sebagainya.

Gejala-gejala ini dapat dikelompokkan dalam dua golongan, yaitu :

- 1) Gejala-gejala Obyektif, meliputi :
 - a) *Air hunger*, yaitu rasa ingin menarik napas panjang terus-menerus
 - b) Frekuensi nadi dan pernapasan naik
 - c) Gangguan pada cara berpikir dan berkonsentrasi
 - d) Gangguan dalam melakukan gerakan koordinatif misalnya memasukkan paku ke dalam lubang yang sempit
 - e) Cyanosis, yaitu warna kulit, kuku dan bibir menjadi biru
 - f) Lemas
 - g) Kejang-kejang
 - h) Pingsan dan sebagainya.
- 2) Gejala-gejala Subyektif, meliputi :
 - a) Malas
 - b) Ngantuk
 - c) Euphoria yaitu rasa gembira tanpa sebab dan kadang-kadang timbul rasa sok jagoan. Rasa ini yang harus mendapat perhatian yang besar pada awak pesawat, karena euphoria ini banyak membawa korban akibat tidak adanya keseimbangan lagi antara kemampuan yang mulai mundur dan kemauan yang meningkat.

Pembagian hipoksia berdasarkan ketinggian

Gejala-gejala hipoksia yang timbul ditentukan oleh ketinggian tempat orang tersebut berada. Ketinggian ini dapat dibagi menjadi 4 golongan yaitu :

- 1) *The Indifferent Stage*, yaitu ketinggian dari *sea level* sampai ketinggian 10.000 kaki. Biasanya yang terganggu oleh hipoksia di daerah ini hanya penglihatan malam dengan daya adaptasi gelap terganggu. Pada umumnya gangguan ini sudah mulai nyata pada ketinggian di atas 5.000 kaki; oleh karena itu pada latihan terbang malam para awak pesawat diharuskan memakai oksigen sejak di darat.
- 2) *Compensatory Stage*, yaitu ketinggian dari 10.000 sampai 15.000 kaki.

Pada daerah ini sistem peredaran darah dan pernapasan telah mengadakan perubahan dengan menaikkan frekuensi nadi dan pernapasan, menaikkan tekanan darah sistolik dan *cardiac output* untuk mengatasi hipoksia yang terjadi. Pada daerah ini sistem saraf telah terganggu, oleh karena itu tiap awak pesawat yang terbang di daerah ini harus menggunakan oksigen.

- 3) *Disturbance Stage*, yaitu ketinggian dari 15.000 kaki sampai 20.000 kaki.

Pada daerah ini usaha tubuh untuk mengatasi hipoksia sangat terbatas waktunya, jadi pada daerah ini orang tidak akan dapat lama tanpa bantuan oksigen. Biasanya tanda-tanda serangan hipoksia ini tidak terasa hanya kadang-kadang saja timbul rasa malas, ngantuk, euphoria dan sebagainya, sehingga tahu-tahu orang tersebut menjadi pingsan.

Gejala-gejala obyektif antara lain pandangan menjadi menyempit (*tunnel vision*), kepandaian menurun, **judgement** ter-

ganggu. Oleh karena itu pada daerah ini merupakan keharusan mutlak seluruh awak pesawat maupun penumpang untuk menggunakan oksigen.

- 4) *Critical Stage*, yaitu daerah dari ketinggian 20.000 kaki sampai 23.000 kaki.

Pada daerah ini dalam waktu 3 – 5 menit saja orang sudah tidak dapat menggunakan lagi pikiran dan *judgement* lain tanpa bantuan oksigen.

Time of Useful Consciousness (TUC)

Adalah waktu yang masih dapat digunakan bila kita menderita serangan hipoksia pada tiap ketinggian; di luar waktu itu kita akan kehilangan kesadaran. Waktu itu berbeda-beda pada tiap ketinggian, makin tinggi waktu itu makin pendek. TUC ini juga dipengaruhi oleh kondisi badan dan kerentanan seseorang terhadap hipoksia. TUC ini perlu diperhatikan oleh para awak pesawat agar mereka dapat mengetahui berapa waktu yang tersedia baginya bila mendapat serangan hipoksia pada ketinggian tersebut. Sebagai contoh : TUC pada ketinggian 22.000 kaki = 10 menit, 25.000 kaki = 5 menit, 28.000 kaki = 2,5–3 menit, 30.000 kaki = 1,5 menit, 35.000 kaki = 0,5 – 1 menit, 40.000 kaki = 15 detik dan 65.000 kaki = 9 detik.

Pengobatan hipoksia

Pengobatan hipoksia yang paling baik adalah pemberian oksigen secepat mungkin sebelum terlambat, karena bila terlambat dapat mengakibatkan kelainan (cacat) sampai ke kematian. Pada penerbangan bila terjadi hipoksia harus segera menggunakan masker oksigen atau segera turun pada ketinggian yang aman yaitu di bawah 10,000 kaki.

Pencegahan hipoksia

Pencegahan hipoksia dapat dilakukan dengan beberapa cara mulai dari penggunaan oksigen yang sesuai dengan ketinggian tempat kita berada, pernapasan dengan tekanan dan penggunaan *pressure suit*, pengawasan yang baik terhadap persediaan oksigen pada penerbangan, pengukuran *pressurized cabin*, mengikuti ketentuan-ketentuan dalam penerbangan dan sebagainya. Cara lain untuk pencegahan yaitu latihan mengenal datangnya bahaya hipoksia agar dapat selalu siap menghadapi bahaya tersebut.

Dysbarism

Pengertian

Menurut Adler yang dimaksud dengan *dysbarism* adalah semua kelainan yang terjadi akibat berubahnya tekanan sekitar tubuh, kecuali hipoksia. Banyak istilah yang telah digunakan orang untuk memberi nama sindrom ini seperti penyakit dekompresi, aeroembolisme, aeroemphysema dan sebagainya. Tetapi istilah *dysbarism* lebih tepat karena istilah-istilah tidak mencakup keseluruhan pengertian atau seluruh kejadian.

Di samping hipoksia masalah *dysbarism* juga termasuk masalah yang penting dalam ilmu faal penerbangan. *Dysbarism* ini telah sejak abad ke XVII dibicarakan orang dan sampai sekarangpun masih ramai didiskusikan karena etiologinya atau patofisiologinya belum dapat dijelaskan secara sempurna. Banyak teori yang timbul tetapi selalu saja ada kelemahannya.

Pembagian dysbarism

Dysbarism dibagi menjadi dua golongan, yaitu :

- 1) Sebagai akibat pengembangan gas-gas dalam rongga tubuh. Golongan ini sering juga disebut : pengaruh mekanis pengembangan gas-gas dalam rongga tubuh atau pengaruh mekanis akibat perubahan tekanan sekitar tubuh.
- 2) Sebagai akibat penguapan gas-gas yang terlarut dalam tubuh. Kelompok ini kadang-kadang juga disebut penyakit dekompresi, sehingga kadang-kadang mengaburkan pengertian penyakit dekompresi yang digunakan orang untuk istilah pengganti *dysbarism*.

Pengaruh Mekanis Gas-gas dalam Rongga Tubuh

Berubahnya tekanan udara di luar tubuh akan mengganggu keseimbangan tekanan antara rongga tubuh yang mengandung gas dengan udara di luar. Hal ini akan berakibat timbulnya rasa sakit sampai terjadinya kerusakan organ-organ tertentu.

Rongga tubuh yang mengandung gas adalah :

1. Traktus Gastro Intestinalis

Gas-gas terutama berkumpul dalam lambung dan usus besar. Sumber gas-gas tersebut sebagian besar adalah dari udara yang ikut tertelan pada waktu makan dan sebagian kecil timbul dari proses pencernaan, peragian atau pembusukan (dekomposisi oleh bakteri). Gas-gas tersebut terdiri dari O_2 , CO_2 , metan, H_2S dan N_2 (bagian terbesar).

Apabila ketinggian dicapai dengan perlahan, maka perbedaan antara tekanan udara di luar dan di dalam tidak begitu besar sehingga *pressure equalisation* yaitu mekanisme penyesuaian tekanan berjalan dengan lancar dengan jalan kentut atau melalui mulut. Gejala-gejala yang dirasakan adalah ringan yaitu rasa tidak enak (*discomfort*) pada perut. Sebaliknya apabila ketinggian dicapai dengan cepat atau terdapat halangan dalam saluran pencernaan maka *pressure equalisation* tidak berjalan dengan lancar, sehingga gas-gas sukar keluar dan timbul rasa *discomfort* yang lebih berat. Pada ketinggian di atas 25.000 kaki timbul rasa sakit perut yang hebat; sakit perut ini secara reflektoris dapat menyebabkan turunnya tekanan darah secara drastis, sehingga jatuh pingsan.

Tindakan preventif agar tidak banyak terkumpul gas dalam saluran pencernaan, meliputi :

- a) Dilarang minum bir, air soda dan minuman lain yang mengandung gas CO_2 sebelum terbang.
- b) Makanan yang dilarang sebelum terbang adalah bawang merah, bawang putih, kubis, kacang-kacangan, ketimun, semangka dan *chewing gum*.
- c) Tidak dibenarkan makan dengan tidak teratur, tergesa-gesa dan sambil bekerja.

Tindakan regresif bila gejala sudah timbul, adalah :

- a) Ketinggian segera dikurangi sampai gejala-gejala ini hilang.
- b) Dusahakan untuk mengeluarkan udara dari mulut atau kentut
- c) Banyak mengadakan gerakan.

2. Telinga

Bertambahnya ketinggian akan menyebabkan tekanan dalam telinga tengah menjadi lebih besar dari tekanan di luar tubuh, sehingga akan terjadi aliran udara dari telinga tengah ke luar

tubuh melalui tuba Eustachii. Bila bertambahnya ketinggian terjadi dengan cepat, maka usaha mengadakan keseimbangan tidak cukup waktu; hal ini akan menyebabkan rasa sakit pada telinga tengah karena teregangnya selaput gendang, bahkan dapat merobekkan selaput gendang. Kelainan ini disebut *aerotitis* atau *barotitis*. Kejadian serupa dapat terjadi juga pada waktu ketinggian berkurang, bahkan lebih sering terjadi karena pada waktu turun tekanan di telinga tengah menjadi lebih kecil dari tekanan di luar sehingga udara akan mengalir masuk telinga tengah, sedang muara tuba eustachii di tenggorokan biasanya sering tertutup sehingga menyukarkan aliran udara.

Bila ada radang di tenggorokan lubang tuba Eustachii makin sempit sehingga lebih menyulitkan aliran udara melalui tempat itu; hal ini berarti kemungkinan terjadinya *banotitis* menjadi lebih besar. Di samping itu pada waktu turun udara yang masuk ke telinga tengah akan melalui daerah radang di tenggorokan, sehingga kemungkinan infeksi di telinga tengah sukar dihindarkan.

Tindakan preventif terhadap kelainan ini adalah :

- a) Mengurangi kecepatan naik maupun kecepatan turun, agar tidak terlalu besar selisih tekanan antara udara luar dengan telinga tengah.
- b) Menelan ludah pada waktu pesawat udara naik agar tuba Eustachii terbuka dan mengadakan gerakan Valsava pada waktu pesawat turun. Gerakan Valsava adalah menutup mulut dan hidung kemudian meniup dengan kuat.
- c) Melarang terbang para awak pesawat yang sedang sakit saluran pernapasan bagian atas.
- d) Penggunaan pesawat udara dengan *pressurized cabin*.

Tindakan represif pada kelainan ini adalah :

- a) Bila terjadinya pada waktu naik, dilakukan :
 - 1) Berhenti naik dan datar pada ketinggian tersebut sambil menelan ludah berulang-ulang sampai hilang gejalanya.
 - 2) Bila dengan usaha tadi tidak berhasil, maka pesawat diturunkan kembali dengan cepat sampai hilangnya rasa sakit tadi.
- b) Bila terjadi pada waktu turun, dilakukan :
 - 1) Berhenti turun dan datar sambil melakukan Valsava berulang sampai gejalanya hilang.
 - 2) Bila usaha di atas tidak berhasil, pesawat dinaikkan kembali sampai rasa sakit hilang, kemudian datar lagi untuk sementara. Bila rasa sakit sudah hilang sama sekali, maka pesawat diturunkan perlahan-lahan sekali sambil melakukan gerakan Valsava terus menerus.

Post Flight Ear Block

Ada kejadian seperti *barotitis* tadi pada waktu selesai terbang tinggi saat penerbangnya sedang tidur pada malam harinya. *Banotitis* demikian disebut *post flight ear block* dan terjadi karena penerbang tersebut menggunakan oksigen terus selamapenerbangan sampai ke bumi, sehingga udara yang masuk ke telinga tengah kaya akan oksigen. Oksigen ini akan diserap oleh selaput pelapis telinga tengah dan tuba Eustachii tertutup sehingga tekanan udara luar menimbulkan rasa sakit.

3. Sinus Paranasalia

Muara sinus paranasalis ke rongga hidung pada umumnya sempit. Sehingga bila kecepatan naik atau turun sangat besar, maka untuk penyesuaian tekanan antara rongga sinus dan udara

luar tidak cukup waktu, sehingga akan timbul rasa sakit di sinus yang disebut aerosinusitis. Karena sifat sinus paranasalis yang selalu terbuka, maka aerosinusitis ini dapat terjadi pada waktu naik maupun turun dengan prosentase yang sama. Pada keadaan radang saluran pernapasan bagian atas, kemungkinan terjadinya aerosinusitis makin besar. Aerosinusitis ini lebih jarang bila dibandingkan dengan aerotitis, karena bentuk saluran penghubung dengan udara luar.

4. Gigi

Pada gigi yang sehat dan normal tidak ada rongga dalam gigi, tetapi pada gigi yang rusak kemungkinan terjadi kantong udara dalam gigi besar sekali. Dengan mekanisme seperti pada proses aerotitis dan aerosinusitis di atas, pada kantong udara di gigi yang rusak ini dapat pula timbul rasa sakit. Rasa sakit ini disebut aerodontalgia. Patofisiologi aerodontalgia ini masih belum jelas.

Pengaruh Penguapan Gas yang Larut dalam Tubuh

Dengan berkurangnya tekanan atmosfer bila ketinggian bertambah, gas-gas yang tadinya larut dalam sel dan jaringan tubuh akan keluar sebagian dari larutannya dan timbul sebagai gelembung-gelembung gas sampai tercapainya keseimbangan baru. Mekanismenya adalah sesuai dengan Hukum Henry. Pada kehidupan sehari-hari peristiwa ini dapat dilihat pada waktu kita membuka tutup botol yang bersisi limun, air soda atau bir yaitu timbul gelembung-gelembung gas.

Gelembung-gelembung gas yang timbul dalam tubuh manusia bila tekanan atmosfer berkurang sebagian besar terdiri dari gas N_2 . Gejala-gejala pada penerbang baru timbul pada ketinggian 25.000 kaki. Semakin cepat ketinggian bertambah, semakin cepat pula timbul gejala. Pada ketinggian di bawah 25.000 kaki gas N_2 masih sempat dikeluarkan oleh tubuh melalui paru-paru. Gas tersebut diangkut ke paru-paru oleh darah dari sel-sel maupun jaringan tubuh. Timbulnya gelembung-gelembung ini berhenti bila sudah terdapat keseimbangan antara tekanan udara di dalam dan tekanan udara di luar. Hal ini dapat dimengerti dengan mengingat Hukum Henry dan Hukum Graham. Gelembung-gelembung ini memberikan gejala karena urat-urat saraf di dekatnya tertekan olehnya, di samping itu tertekan pula pembuluh-pembuluh darah kecil di sekitarnya.

Menurut sifat dan lokasinya, gejala-gejala ini terdiri atas :

1) Bends

Bends adalah rasa nyeri yang dalam dan terdapat di sendi serta dirasakan terus-menerus, dan umumnya makin lama makin bertambah berat. Akibatnya penerbang atau awak pesawat tak dapat sama sekali bergerak karena nyerinya. Sendi yang terkena umumnya adalah sendi yang besar seperti sendi bahu, sendi lutut, di samping itu juga sendi yang lebih kecil seperti sendi tangan, pergelangan tangan dan pergelangan kaki, tetapi lebih jarang.

2) Chokes

Chokes adalah rasa sakit di bawah tulang dada yang disertai dengan batuk kering yang terjadi pada penerbangan tinggi, akibat penguapan gas nitrogen yang membentuk gelembung di daerah paru-paru. *Chokes* lebih jarang terjadi bila dibandingkan dengan *bends*, tetapi bahayanya jauh lebih besar, karena dapat

menganqam jiwa penerbang.

3) Gejala-gejala pada kulit

Gejala-gejala pada kulit adalah perasaan seperti ditusuk-tusuk dengan jarum, gatal-gatal, rasa panas dan dingin, timbul bercak kemerah-merahan dan gelembung-gelembung pada kulit. Gejala-gejala ini tidak memberikan gangguan yang berat, tetapi merupakan tanda bahaya atau tanda permulaan akan datangnya bahaya *dysbarism* yang lebih berat.

4) Kelainan pada sistem syaraf

Jarang sekali terjadi dan bila timbul mempunyai gambaran dengan variasi yang besar yang kadang-kadang saja memberikan komplikasi yang berat. Yang sering diketemukan adalah kelainan penglihatan dan sakit kepala yang tidak jelas lokasinya. Dapat pula timbul kelumpuhan sebagian (*parsial*), kelainan penginderaan, dan sebagainya.

PENGARUH PERCEPATAN DAN KECEPATAN PADA PENERBANGAN TERHADAP TUBUH

Umum

Benda di udara apabila dilepaskan akan jatuh bebas karena pengaruh gaya tarik bumi. Demikian pula dengan tiap benda yang berada dalam keadaan diam di permukaan bumi ini, akan jatuh bebas ke arah pusat bumi apabila tidak ada tanah tempat benda tersebut bersandar. Kekuatan yang bekerja pada massa benda kita kenal sebagai berat benda. Berat flap benda dalam keadaan diam dipengaruhi oleh gaya tarik bumi sebesar 1 g. Percepatan atau akselerasi karena gaya tarik ini adalah sebesar 10 m/detik.

Apabila sebuah benda dari keadaan diam lalu bergerak, maka karena adanya percepatan yang bekerja pada benda tersebut, akan terjadi gaya lain pada benda tadi yang arahnya berlawanan dengan arah percepatan penggerakannya. Hal ini disebabkan karena kelembaman benda tersebut seperti hukum inerti dari Newton. Misalnya kita di dalam mobil yang tidak bergerak kemudian sekonyong-konyong mobil tersebut dilarikan dengan cepat, maka akan terasa badan kita terlempar ke sandaran belakang. Sebaliknya bila kita berada pada mobil yang bergerak cepat mendadak berhenti, maka badan kita akan terlempar ke depan.

Macam Akselerasi

Dalam penerbangan dijumpai macam-macam akselerasi yang terbagi atas :

1) Akselerasi Liniar

Akselerasi liniar terjadi apabila ada perubahan kecepatan sedang arah tetap, misalnya terdapat pada *take off*, *catapult take off*, *rocket take off*, mengubah kecepatan dalam *straight and level flying*, *crash landing*, *ditching*, *shock* waktu parasut membuka atau pada saat *landing*.

2) Akselerasi Radial (Sentripetal)

Akselerasi radial terjadi apabila ada perubahan arah pada gerak pesawat sedang kecepatan tetap, misalnya pada waktu turun, *loop* dan *dive*.

3) Akselerasi Angular

Akselerasi angular apabila ada perubahan kecepatan dan

arah pesawat sekaligus, misalnya pada *roll* dan *spin*.

Gaya

Akibat akselerasi timbul gaya yang sama besar akan tetapi berlawanan arahnya (*reactive force*) yang dikenal sebagai gaya G. Gaya G ini dinyatakan dengan satuan G. Besar tiap-tiap gaya G yang bekerja pada awak pesawat diukur dengan gaya tarik bumi.

Pengaruh gaya G pada tubuh dibagi berdasarkan arahnya terhadap tubuh, karena toleransi tubuh terhadap gaya G ini tergantung pada arah tersebut di samping lamanya pengaruh G tersebut bekerja. Ada 3 gaya G, yaitu :

1) Gaya G-transversal

Adalah gaya G yang arahnya memotong tegak lurus sumbu panjang tubuh, jadi dapat dari muka ke belakang atau sebaliknya dan dapat pula dari samping ke samping.

2) Gaya G-Positif

Adalah gaya G yang bekerja dengan arah dari kepala ke kaki.

3) Gaya G-Negatif

Adalah gaya G yang bekerja dengan arah dari kaki ke kepala.

Akibat Gaya G pada Badan

Manusia sejak dalam kandungan telah biasa dengan pengaruh gaya tarik bumi sebesar 1 g. Hal ini berarti bahwa alat-alat rongga badan khususnya jantung dan pembuluh darah telah menyesuaikan diri dengan pengaruh tersebut. Tiap gaya G lebih besar atau lebih kecil dari 1 g akan mengakibatkan gejala-gejala pada tubuh manusia yang masih dapat diatasi apabila masih dalam batas-batas toleransi badan.

Akibat gaya G badan tergantung pada macam gaya G tersebut. Secara rinci akibat gaya G tersebut adalah :

1) Gaya G-Positif

Akibat gaya G-positif pada badan dapat dirasakan apabila kita mengadakan *pull-up* atau *dive*. Pada saat *pull-up* terasa oleh si penerbang badannya tertekan pada tempat duduk karena berat badannya bertambah. Si penerbang kelihatan seperti orang tua karena pipinya tertarik ke bawah.

Makin besar gaya G yang mempengaruhinya makin besar perubahan pada mata. Pada +2 G sampai +3 G lintang pandangan menjadi (*tubular sight*). Pada +3 G sampai +4,5 G penglihatan menjadi tampak remang (*grey out*) dan pada +4 sampai +6 G semuanya tampak gelap (*black out*), akan tetapi si penerbang masih sadar. Apabila keadaan ini diteruskan dan gaya G bertambah selama lebih dari 3 detik, maka ia akan pingsan. Hal ini disebabkan karena untuk memompa darah ke otak, jantung harus mengeluarkan gaya lebih besar daripada gaya yang biasanya dikeluarkan untuk mengalahkan kolom darah (+30 cm). Akibatnya ialah bahwa suplai oksigen ke mata dan otak sudah demikian kurangnya sehingga terjadi hipoksia akut. Bila keadaan ini berlangsung terlalu lama, maka akan sangat membahayakan jiwa si penerbang.

2) Gaya G-Negatif

Pada gaya G-negatif tubuh manusia kurang besar toleransinya, artinya dengan G-negatif yang kecil saja tubuh akan men-

derita bila dibandingkan dengan G-positif. G-negatif ini terjadi pada penerbangan misalnya pada waktu *steep climbing* mendadak *level flight*. Di sini darah akan terlempar ke arah otak, sehingga jumlah darah dalam otak meningkat dan tekanannya pun meningkat. Hal ini akan berakibat timbulnya rasa sakit kepala sampai pecahnya pembuluh darah di otak bila G-negatif tersebut sangat besar dan lama. Pada G-negatif sebesar -2 sampai -2,5 G akan terjadi gejala *red out*, yaitu penglihatan menjadi merah semua. Gerakan-gerakan lain yang menghasilkan G-negatif pada penerbangan adalah pada waktu mengadakan *outside loop*, *outside turn nose over* yang tajam kemudian *dive*, dan bila *eject* dengan *ejection seat* dari bawah pesawat.

3) Gaya G-Transversal

Toleransi tubuh manusia terhadap gaya G transversal sangat besar, oleh karena itu pada peluncuran pesawat ruang angkasa dengan roket, posisi awak pesawat diusahakan agar gaya G yang timbul pada pelontaran roket tadi menjadi gaya G-transversal pada tubuh.

Meningkatkan Ketahanan Tubuh

Cara meningkatkan ketahanan terhadap gaya G-transversal tidak diperlukan karena ketahanan kita sendiri sudah cukup besar, sedang usaha peningkatan ketahanan terhadap gaya G-negatif tidak ada. Oleh karena itu usaha peningkatan terhadap gaya hanya mengenai gaya G-positif saja, yaitu :

- Membungkukkan kepala ke arah dada agar jarak jantung ke mata menjadi lebih pendek, sehingga jantung masih mampu memompa darah ke otak.
- Mengejan atau berteriak agar tekanan dalam perut meningkat, sehingga penumpukan darah (*blood storage*) dalam traktus digestivus berkurang dan menambah darah yang akan diedarkan ke otak.
- Menggunakan *G-suit* atau *anti G-suit*, yang prinsip kerjanya mengadakan penekanan pada bagian bawah tubuh (paha, betis dan perut) pada waktu ada gaya G-positif yang menyerang tubuh. Hal ini juga akan mengurangi penimbunan darah di bagian bawah tubuh sehingga meningkatkan aliran darah ke otak.

PENGARUH PENERBANGAN PADA ALAT KESEIMBANGAN

Umum

Penerbangan dapat pula mempengaruhi alat keseimbangan awak pesawat sehingga dapat membahayakan jiwa. Kelainan yang timbul pada penerbangan ini biasanya berbentuk ilusi atau disorientasi sehingga dikenal sebagai ilusi penerbangan atau juga disebut *spatial disorientation* tetapi kadang-kadang dinamakan pula *pilot's vertigo*.

Spatial disorientation atau *pilot's vertigo* adalah suatu fenomena yang sejak dulu merupakan bahaya dalam penerbangan. Khususnya bagi seorang penerbang militer yang harus melaksanakan tugas penerbangan yang cukup kompleks dalam kondisi cuaca apapun. Fenomena ini merupakan suatu masalah yang tidak boleh dianggap enteng.

Dengan mengetahui mekanisme *pilot's vertigo* maupun macam ilusi yang dapat dialami oleh seorang penerbang di-

harapkan dapat diambil langkah-langkah pencegahan demi keamanan dan keselamatan penerbang, pesawat dan orang lain.

Fungsi alat-alat keseimbangan

Manusia makhluk darat dapat menjaga keseimbangan badannya karena dilengkapi dengan tiga alat/sistem : Sistem Vestibuler, Sistem Visuil dan Sistem Proprioseptif. Selama manusia masih berhubungan dengan bumi seperti berjalan, berlari, melompat dan lain-lain maka ketiga sistem tersebut berfungsi secara adekuat dan alat-alat keseimbangan bekerja secara cermat dan efektif. Akan tetapi apabila ia meninggalkan bumi dan terbang, alat-alat tersebut dapat membuat kesalahan-kesalahan, karena impuls-impuls yang tidak lagi adekuat. Kesalahan tersebut dapat menimbulkan ilusi dan sering mengakibatkan *spatial disorientation*.

1) *Alat Vestibular*, mempunyai 3 bagian :

a) Tip *canalis semicircularis* (saluran berisi endolymph) yang tegak lurus satu sama lain pada bidang-bidang horisontal, vertikal dan transversal. Pada muara tiap-tiap saluran ada suatu pelebaran dengan di dalamnya sel-sel berambut. Rambut-rambut tersebut berhimpun menjadi (cupula) dan merupakan reseptor sensorik. Karena gerakan dan aliran endolymph, cupula ikut bergerak sesuai arah aliran. Tiap gerakan/akselerasi angulair (*roll, pitch, yaw*) menimbulkan impuls mekanis pada otak dan melaporkan bahwa sedang ada gerakan rotasi dari kepala.

b) *Utriculus* dan *Sacculus* berisi reseptor sensorik yang dapat menerima impuls mekanis akibat gerakan/akselerasi linear. Reseptor terdiri dari membran otolith yang berisi butir-butir kalsium karbonat. Membran ini ada di atas lapisan sel-sel berambut dengan rambut-rambutnya dalam masa clan membran. Gravitasi maupun akselerasi linear dapat menggerakkan membran otolith dan dengan demikian rambut-rambut sel berambut. Impuls ini diterima dan diteruskan lewat syaraf vestibular ke otak.

c) Cochlea. Alat ini digunakan untuk proses pendengaran.

Pola akselerasi di udara adalah berbeda daripada di bumi, misalnya akselerasi di udara biasanya tidak segera diikuti dengan deselerasi seperti terjadi di bumi.

2) *Sistem visuil*, adalah alat terpenting dalam menjaga keseimbangan. Dengan menggunakan penglihatan, kita dapat menentukan lokasi dan posisi suatu obyek dalam ruangan. Dengan adanya visual horizon seorang penerbang masih dapat mengadakan orientasi walaupun terjadi ilusi-ilusi akibat persepsi yang salah dari alat vestibular maupun proprioseptif. Di udara sistem visuil adalah *orientation sense* yang paling dapat dipercaya dan dengan melalui sistem tersebut, si penerbang dapat menginterpretasikan instrumen pesawat.

3) *Sistem proprioseptif*, adalah reseptor sensorik yang mengadakan respons terhadap tekanan atau tarikan pada jaringan tubuh. Reseptor ini terdapat dalam jaringan antara lain kulit dan sendi, dan dapat dirasakan di bagian-bagian badan apabila duduk, berdiri atau berbaring. Sistem proprioseptif ini dikenal sebagai *body sense* atau *seat of the pants sense*.

Mekanisme Ilusi

1) *Grave Yard Spin* dan *Grave Yard Spiral*

Pada waktu masuk ke dalam *spin*, maka setelah 15 – 20 detik kecepatan endolymph dalam saluran semisirkuler telah sama dengan kecepatan dinding saluran, sehingga cupula (reseptor) kembali pada keadaan istirahat. Pada waktu pesawat keluar dari *spin*, cupula akan bergerak dengan arah yang berlawanan sehingga seolah-olah terjadi *spin* untuk kedua kalinya dengan arah berlawanan. Dengan mengadakan koreksi maka pesawat masuk *spin* kembali dengan arah semula. Pada *grave yard spiral* tidak ada *spin* tetapi *banked down*.

2) *Coriolis Illusion*

Ini terjadi apabila endolymph dari satu set saluran semi-sirkuler kiri telah mencapai kecepatan yang sama dengan dinding saluran, kemudian ada gerakan dari satu set lainnya dalam dinding bidang yang lain dari set pertama. Akibatnya ialah suatu perasaan seolah-olah badan berputar dalam bidang di luar bidang tersebut misalnya bila ada gerakan *yawing* dengan kecepatan yang konstan, maka dengan gerakan *pitching* dari kepala akan terasa seolah-olah badan mengalami *roll*.

Coriolis illusion paling berbahaya dan biasanya terjadi sewaktu dalam manuver yang relatif rendah.

3) *Oculo Gyral Illusion*

Dalam ilusi ini terlihat suatu obyek di muka mata seolah-olah bergerak. Hal ini akibat rangsangan pada saluran semi-sirkuler dan dapat terjadi waktu *grave yard spin, grave yard spiral* dan *coriolis illusion*.

4) *Oculo Grave Illusion*

Ilusi ini analog dengan *oculo gyral illusion* bukan akibat rangsangan dari saluran semisirkuler tetapi rangsangan pada otolith. Ilusi terjadi pada waktu terbang datar dengan *high performance air craft* dengan kecepatan akselerasi yang tinggi sehingga menimbulkan rasa seolah-olah pesawat dalam *nose-up attitude*. Bila penerbang mengadakan koreksi, maka ia akan *dive* dengan akibat *crash*. Ilusi ini sering terjadi bila terbang malam atau dalam cuaca buruk, dan tidak terjadi bila di luar ada *visual reference* yang adekuat.

5) *Elevator Illusion*

Ilusi ini juga terjadi akibat makin besarnya gaya gravitasi seperti waktu akselerasi ke atas. Hal ini mengakibatkan suatu refleksi bola mata ke bawah sehingga kelihatan seolah-olah panel instrumen dan hidung pesawat naik ke atas.

6) *The Keans*

Ini adalah ilusi vestibuler yang sering terjadi karena saluran semisirkuler tidak dapat mendeteksi akselerasi angular di bawah ambang (2,5/detik). Misalnya pada terbang instrumen mengadakan *roll* ke kiri tanpa dirasakan karena kecepataannya di bawah ambang. Bila ia mengadakan *roll* ke kanan ia merasakan pesawatnya dalam keadaan *roll* ke kanan walaupun sebenarnya datar. Hal ini dapat dilihat dalam sikap badannya.

7) *Autokinesis*

Sebuah titik cahaya dalam ruangan yang cukup gelap setelah dipandang beberapa detik akan kelihatan seolah-olah bergerak. Fenomena ini dikenal sebagai *autokinesis effect* dan dapat menyebabkan kekeliruan bila terbang formasi malam hari.

8) Kacau antara bumi dan langit

Bila terbang malam dan cukup gelap maka lampu-lampu

landasan dilihat sebagai bintang-bintang. Hal ini membahayakan karena horizon yang diterimanya kelihatan lebih rendah dari horizon yang sesungguhnya. Akibatnya pesawat akan diarahkan ke bawah.

9) Permukaan bumi atau awan

Terbang di atas daerah yang tidak rata (di atas kaki gunung) atau awan yang miring permukaannya mengakibatkan terbang tidak lurus dan tidak datar.

10) *Seat of the pants sense*

Bila pesawat membelok maka arah gaya sentrifugal dan gravitasi selalu menuju ke arah lantai pesawat. Dengan demikian si penerbang dengan *pressure sensors* tersebut sukar mengetahui mana bawah. Di samping itu perasaan ini dapat menguatkan *oculogravic illusion* yang terjadi akibat akselerasi linear pada *high performance aircraft*.

Tindakan Pencegahan

- 1) Indoktrinasi kepada para penerbang berupa ceramah, demonstrasi dan film mengenai fenomena tersebut untuk mengurangi kecelakaan pesawat karena *spatial disorientation*.
- 2) Mengubah kedudukan alat peralatan dalam panel instrumen sedemikian rupa sehingga memerlukan gerakan-gerakan kepala yang ekstrim.
- 3) Beberapa latihan terbang seperti instrumen *take off and night formation rejoin* dipandang cukup membahayakan dan tidak diadakan lagi.

Mabuk Udara

Mabuk udara adalah sebagian dari *motion sickness* yang disebabkan oleh penerbangan. Mabuk udara ini terjadi karena pengaruh Gaya G yang kecil tetapi terjadi secara berulang-ulang yang menyerang alat keseimbangan. Jadi sebenarnya mabuk udara termasuk kelainan akibat pengaruh penerbangan pada alat keseimbangan. Sekitar 16% penerbang selama belajar terbang pernah mengalami mabuk udara ini dan sekitar 5% siswa penerbang mengalami secara berulang-ulang. Mabuk udara ini akan menurun dengan pengalaman dan peningkatan kepercayaan pada diri sendiri. Mabuk udara juga dialami oleh awak pesawat yang lain dan para penumpang pesawat angkut.

Gejala mabuk udara adalah pusing, sakit kepala, perasaan tidak enak pada lambung, mual, muntah-muntah, pucat dan sebagainya. Berat ringannya gejala ini tergantung pada kepekaan seseorang terhadap rangsangan pada alat keseimbangan. Gejala ini akan memberat bila orang tersebut telah lelah, kurang sehat, gangguan pencernaan, mencium bau-bauan yang tidak enak, alkoholism atau takut terbang. Sebaliknya gejala ini dapat melihat benda-benda di luar pesawat sebagai titik pengenal.

PENGARUH PENERBANGAN PADA ALAT PENGLIHATAN

Pengaruh Hipoksia

Pengaruh hipoksia pada alat penglihatan di siang hari baru terlihat pada penerbangan setinggi 10.000 kaki, dan akan bertambah sampai batas 16.000 kaki; setelah itu tidak dapat diimbangi lagi oleh tubuh dan akan menyebabkan terjadinya

gangguan-gangguan. Pengaruh tersebut meliputi :

1) Gangguan terhadap koordinasi otot-otot mata

Koordinasi otot mata tidak sempurna lagi terutama waktu melihat jauh, kedua sumbu bola mata tidak sejajar lagi sehingga terjadi keadaan yang disebut heterophoria. Kalau sumbu membentuk sudut di depan mata disebut esophoria, dan sebaliknya disebut exophoria.

Menurut percobaan Powell dalam *Decompression Chamber*, pada ketinggian 5.000 – 6.000 meter dalam waktu 2 – 3 menit untuk penglihatan jauh akan terjadi esophoria, dan pada penglihatan dekat exophoria. Kelainan ini progresif sehingga dapat menyebabkan mata juling (heterotropia). Dalam keadaan ini benda-benda dilihat ganda (*double*). Pada esophoria yang ringan maka penafsiran jarak tidak tepat lagi, yaitu terlalu dekat (jarak 10 m ditafsirkan 8 m). Bahayanya ialah pada waktu akan *landing* penerbang mengalami kesukaran dalam menafsirkan jarak antara pesawat dan landasan. Pesawat yang diperkirakan akan *touch* (menyentuh bumi) sebenarnya masih harus menempuh jarak yang tertentu untuk betul-betul sampai di landasan hingga terjadi keadaan *overshoot*.

2) Gangguan terhadap daya konvergensi dan akomodasi

Daya konvergensi akan berkurang dengan terjadinya gangguan pada koordinasi otot-otot mata seperti disebut di atas. Daya akomodasi orang berumur 20 – 23 tahun pada ketinggian 5.500 meter adalah : hipoksia derajat sedang tidak memberikan pengaruh pada daya akomodasi bila daya akomodasinya tidak melebihi 3 dioptri dan makin besar kemampuan akomodasi makin sensitif orang itu terhadap kekurangan oksigen. Karena itu penerbang yang menderita hypermetropia atau presbyopia sedapat mungkin menghindarkan penerbangan yang memerlukan oksigen.

3) Gangguan terhadap pengenalan warna (*color vision*)

Daya mengenal warna sudah berkurang pada ketinggian 3.000 meter. Keadaan ini disebut : hypoxia asthenopia chromatica, yang akan menghilang setelah menghirup oksigen atau kembali ke tanah.

Pengaruh Percepatan

Seperti diketahui pada penerbangan aerobatik ataupun *combat*, penerbang dapat mengalami pengaruh gaya baik G-positif ataupun G-negatif. Pengaruh kedua macam percepatan tersebut adalah :

1) Pengaruh G-positif terhadap alat penglihatan

Kalau penerbang mengadakan *pull up* maka penerbang akan mengalami suatu G-positif. Otak dan mata kekurangan darah. Dengan talc adanya supply darah dapat terjadi gangguan yaitu penglihatan abu-abu yang disebut *grey-out* atau kalau G lebih besar dan terjadi kebutaan total disebut *black out*. G positif sebesar 3,5 – 4 G menyebabkan kehilangan pandangan perifer yang kemudian disusul dengan *grey-out*. Pada G-positif sebesar +4 – +6, 5 G terjadi *black out*.

2) Pengaruh G-negatif terhadap alat penglihatan

Kalau seorang penerbang membuat *dive* maka penerbang ini akan mengalami G-negatif; tekanan (gaya) tambahan akan bekerja dengan arah dari perut menuju ke kepala. Akibatnya pembuluh darah di mata penuh dengan darah yang mengakibatkan

penglihatan menjadi merah atau disebut *red-out*. Biasanya G-negatif sebesar 2,0 – 2,5 telah menyebabkan *red-out*.

Pengaruh sinar matahari

1) Sinar ultra violet

Sinar ini terdapat banyak di pinggir pantai dan di lereng pegunungan. Sinar ini tidak menembus ke bagian dalam mata (oculus interior). Di dalam alat ini, sinar itu sebagian besar diserap dan sebagian kecil direfleksikan (dipantulkan). Sinar yang diserap ini kemudian menimbulkan reaksi pada alat tersebut di atas dengan gejala : Beberapa jam setelah penyinaran akan timbul gejala peradangan : pengeluaran air mata yang abnormal, mata menjadi merah dan sakit dengan akibat sukar dibuka kelopaknya, banyak keluar kotoran dan dari luar mata nampak membengkak.

Pengobatan keadaan ini adalah :

- Jauhkan diri dari sinar matahari yaitu dengan tinggal di dalam kamar cukup gelap untuk beberapa hari.
- Memakai kaca mata hitam untuk beberapa hari atau sampai gejala-gejala hilang sama sekali.
- Kalau perlu diberi salep antibiotika. Biasanya penyembuhan sangat cepat dan tidak akan menimbulkan kelainan-kelainan pada mata (reversibel).

2) Sinar infra merah

Sinar ini tersebar di angkasa, dan intensitasnya makin dekat dengan matahari makin tinggi. Sinar ini dapat menembus masuk ke dalam mata bagian dalam (oculus interior), sehingga kerusakan yang diakibatkan terutama pada alat mata bagian dalam yaitu : lensa dan retina. Adanya reaksi panas dari sinar infra merah menyebabkan protein dalam lensa dan retina menggumpal dan terjadi katarak (kekeruhan lensa) kalau kerusakan pada lensa, dan retinitis kalau kerusakan pada retina. Penyinaran yang lama (berhari-hari atau berminggu-minggu bergantung kepada intensitas sinar) baru akan menimbulkan reaksi seperti tersebut di atas. Dan kalau reaksi tadi sudah timbul biasanya akan dapat disembuhkan lagi (irreversibel).

Karena hal-hal tersebut di atas maka awak pesawat perlu dilengkapi dengan alat yang dapat meniadakan atau mengurangi sinar yang dapat masuk ke dalam mata tadi (alat proteksi). Mata sendiri sebetulnya sudah mempunyai alat itu yaitu: diafragma; proteksi dari luar yang dapat diadakan adalah kaca-mata atau dalam penerbangan *sunvisor* pada helmet penerbang. Karena keduanya menyaring sinar maka kita sebut filter. Ada beberapa macam filter, tetapi yang banyak digunakan adalah *colored* dan *neutral filter*.

Colored filter hanya meneruskan sinar yang warnanya sesuai dengan filter itu dan meneruskan sebagian kecil sinar yang lain. Sebagai contoh : RAYBAN 3 meneruskan : 25% *visible rays*, 5% sinar ultra violet, 10% sinar infra merah. Untuk ini di belakang kaca tadi diberi lapisan chromium atau nikel untuk merefleksikan pengaruh panas tadi, sehingga terdapat perasaan sejuk pada mata.

Sifat *neutral filter* terhadap sinar ultra violet dan inframerah seperti pada *colored filter*, keuntungannya adalah tak menyebabkan perubahan warna, contoh : RAYBAN G-15; filter ini

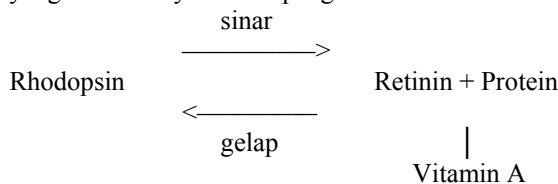
banyak dipakai di USAF.

Night Vision

Dalam retina terdapat dua macam sel penerima (reseptor) yaitu : *Rod* dan *cone* atau batang dan kerucut. Tugas *rod* adalah : penglihatan malam dan penglihatan global (bukan detail) atau penglihatan dengan kontras. Tugas *cone* : penglihatan siang hari, penglihatan detail dan membedakan warna. Sel batang terutama terdapat pada bagian pinggir retina sedang kerucut pada bagian tengah retina, sehingga pada malam hari bagian tengah retina merupakan bintik buta dan bagian pinggir merupakan bagian yang penting untuk penglihatan.

Dalam *rod* terdapat rhodopsin dan dalam *cone* terdapat jodopsin. Jumlah zat yang terdapat pada masing-masing sel ini mempengaruhi sensitivitas sel-sel tersebut, dan dipengaruhi oleh intensitas sinar yang masuk ke dalam mata. Kalau dari kamar yang terang masuk ke dalam kamar yang gelap maka untuk beberapa waktu (detik) kita akan buta atau sama sekali tidak melihat. Baru setelah beberapa menit kita dapat mengadakan orientasi apa yang ada dalam kamar itu. Waktu antara masuk ke dalam kamar dan melihat dengan jelas bentuk apa yang ada dalam kamar itu disebut waktu adaptasi. Waktu adaptasi ini akan lengkap setelah kira-kira 2 jam. Selama adaptasi berlangsung terbentuk rhodopsin dengan perlahan-lahan di dalam *rod*, yang jumlahnya mencapai maksimal setelah kita berada dalam ruangan gelap tadi selama 2 jam.

Rhodopsin yang terbentuk di atas akan luntur atau terurai apabila ada sinar yang masuk ke dalam mata, kecuali sinar merah yang tidak menyebabkan penguraian ini.



Vitamin A sangat penting dalam pembentukan rhodopsin, sehingga tidak adanya vitamin A dalam makanan atau dalam darah akan mengganggu pembentukan rhodopsin.

Pada keadaan hipoksia, reaksi di atas juga akan dipengaruhi yaitu menjadi lebih lambat. Akibatnya daya penglihatan malam akan menurun. Pada ketinggian 1000 meter daya penglihatan malam menurun 5% dan pada 5.000 m menurun 40%. Juga merokok 3 batang berturut-turut dapat menurunkan daya penglihatan malam sampai 25%.

Karena itu para penerbang harus mematuhi peraturan untuk terbang malam, yaitu :

- Makanan penerbang harus cukup mengandung vitamin A, bila perlu diberi tambahan pil vitamin.
- Sebelum terbang dalam harus dites daya adaptasinya dalam gelap dengan adaptometer.
- Pada hari akan terbang malam, tidak boleh merokok atau minum minuman keras.
- Sebelum terbang malam harus mengadakan adaptasi selama 30 menit dalam tempat gelap atau ruangan dengan penyinaran

lampu merah.

e) Lampu-lampu dalam *cockpit* dan instrumen harus merah agar tidak mengganggu adaptasi yang telah ada.

PENUTUP

Telah dibahas berbagai aspek Ilmu Faal dalam penerbangan atau Aerofisiologi yang mendasari Ilmu Kesehatan Penerbangan dan Ruang Angkasa (*Aerospace Medicine*). Dalam makalah ini hanyadibahas pokok-pokoknya sajadan belum mencakup seluruh permasalahan Aerofisiologi.

Dengan mengetahui berbagai aspek Aerofisiologi dalam kegiatan penerbangan maka diharapkan dapat dengan mudah memahami problema yang dihadapi para penerbang, awak pesawat lain maupun para penumpang khususnya di bidang kesehatan. Untuk selanjutnya kita mampu melakukan upaya-upaya pencegahan dan-pertolongan atas pengaruh buruk penerbangan pada tubuh manusia.

Dengan demikian kitadapat memanfaatkan udara (atmosfer)

untuk berbagai kegiatan penerbangan dengan aman, nyaman dan cepat, yang pada gilirannya akan membantu meningkatkan kesejahteraan.

KEPUSTAKAAN

1. AFM 160-5. Physiological technician's Training Manual. Department of the Air Force, Washington D.C., 1968.
2. AFP 161-16. Physiology of Flight. Department of the Air Force, Washington D.C., 1968.
3. AFP 161-18. Flight Surgeon Guide. Department of The Air Force, Washington D.C. , 1968.
4. Armstrong HG. Aerospace Medicine. The Williams and Wilkins Baltimore; 1961.
5. Davidovic, Vaazduhoplovna Fiziologija. Osnovi Vazduhoplovne Medicine, Beograd. 1965.
6. Dhenin. Aviation Medicine, Physiology and Human Factors. The Tri-Med Bokks Limited, London, 1978.
7. Direktorat Kesehatan TNI-AU. Buku Pedoman Dokter Penerbangan TNI-AU. Jakarta, 1990.
8. Harding M. Aviation Medicine. The British Medical Association, London, 1968.

