



UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Jl. PGRI I Sonosewu No. 117 Yogyakarta - 55182 Telp (0274) 376808, 373198, 373038 Fax. (0274) 376808

E-mail : info@upy.ac.id

<http://www.upy.ac.id>

PETIKAN

KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Nomor : 1111.1 /SK/REKTOR-UPY/IX/2025

Tentang

PENGANGKATAN DOSEN PENGAMPU MATA KULIAH SEMESTER GASAL
TAHUN AKADEMIK 2025/2026 DI LINGKUNGAN UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA
REKTOR UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Menimbang : dst.
Mengingat : dst.
Memperhatikan: dst.

MEMUTUSKAN

- Menetapkan : PENGANGKATAN DOSEN PENGAMPU MATA KULIAH SEMESTER GASAL TAHUN AKADEMIK 2025/2026 DI LINGKUNGAN UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA
- Pertama : Mengangkat Saudara yang namanya tersebut pada lajur 2 Lampiran keputusan ini sebagai Dosen Pengampu Mata Kuliah pada Semester Gasal Tahun Akademik 2025/2026.
- Kedua : Menugaskan kepada para Dosen Pengampu Mata Kuliah dimaksud untuk melaksanakan pembelajaran matakuliah sebagaimana tercantum pada lajur 3 lampiran keputusan ini dengan sebaik-baiknya dan kepada yang bersangkutan diberikan honorarium sesuai dengan ketentuan yang berlaku di UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA
- Ketiga : Keputusan ini berlaku sejak tanggal ditetapkan, dengan ketentuan bahwa segala sesuatunya akan ditinjau kembali apabila terdapat kekeliruan dalam penetapan ini.

PETIKAN Keputusan ini disampaikan kepada yang bersangkutan untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Ditetapkan di : Yogyakarta
Pada tanggal : 08 September 2025
Rektor,

ttd

Prof. Dr. Ir. Paiman, M.P
NIS. 19650916 199503 1 003



Untuk Petikan yang sah
Wakil Rektor Bidang Akademik dan Kelembagaan

Ahmad Riyadi, S.Si, M.Kom
NIS. 19690214 199812 1 006

Tembusan disampaikan kepada :

1. Para Wakil Rektor
2. Para Dekan
3. Para Ketua Program Sarjana
4. Para Ketua Program Magister

Lampiran Keputusan Rektor Universitas PGRI Yogyakarta
 Nomor : 1111.1 /SK/REKTOR-UPY/IX/2025265
 Tanggal : 08 September 2025265

NO.	NAMA PENGAJAR & NIDN	MATA KULIAH	KODE MK	SKS	SEMESTER/ KELAS	PROGRAM
1. s.d 265						
266	<i>Rickadesti Ramadhana, M.Pd</i> 3543778679230033	<i>Senam</i> <i>Sosiologi Keolahragaan</i> <i>Wanita dan Olahraga</i> <i>Olahraga Anak Usia Dini</i> <i>Manajemen Keolahragaan</i>	<i>OR16106</i> <i>OR16114</i> <i>T16319</i> <i>T16758</i> <i>T16756</i>	<i>3</i> <i>2</i> <i>2</i> <i>2</i> <i>2</i>	<i>I / 25.A1, 25.A2, 25.A3</i> <i>I / 25.A1, 25.A2, 25.A3</i> <i>III / 24.A1, 24.A2, 24.A3</i> <i>VII / 22.A1</i> <i>VII / 22.A1</i>	<i>Program Sarjana Ilmu Keolahragaan</i> <i>Program Sarjana Ilmu Keolahragaan</i> <i>Program Sarjana Ilmu Keolahragaan</i> <i>Program Sarjana Ilmu Keolahragaan</i> <i>Program Sarjana Ilmu Keolahragaan</i>
267 Dst.						

Untuk Petikan yang sah:

Wakil Rektor Bidang Akademik dan Kelembagaan



Ahmad Riyadi, S.Si., M.Kom
 NIS. 19690214 199812 1 006

Rektor

ttd

Prof. Dr. Ir. Paiman, M.P
 NIS. 19650916 199503 1 003

	UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI PROGRAM STUDI ILMU KEOLAHRAGAAN					OR16103
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER						
MATAKULIAH	KODE	RUANG	RUMPUN MK	BOBOT (SKS)	SEMESTER	TGL PENYUSUNAN
BIOKIMIA OLAHRAHA	OR16103	Unit.4 Lantai.5 Ruang.503	ILMU KEDOKTERAN DASAR	T/P=3	1	14-Jul-24
OTORISASI	DOSEN PENGEMBANG RPS		KOORDINATOR RMK		KAPRODI	
Dr. Andri Arif Kustiawan,	Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or		Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or		Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or	
CAPAIAN PEMBELAJARAN LULUSAN (CPL)	CPL - PRODI					
	CPL-1	Mampu memahami kajian teoritis bidang ilmu keolahragaan serta memformulasikan pada masalah-masalah keolahragaan secara logis, kritis, sistematis dan inovatif				
	CPL-2	Mampu melakukan kajian-kajian ilmiah terhadap permasalahan keolahragaan secara mendalam yang didukung dengan keterampilan menulis ilmiah, analisis, serta				
	CPMK - PRODI					
	CPMK-1	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan karbohidrat, protein, dan lemak				
	CPMK-2	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan mengenai vitamin, mineral, dan air				
	CPMK-3	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan mengenai kontraksi otot, dan glicemic index				
	CPMK-4	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan mengenai antioksidan, darah, hormon, dan DNA				
	CPMK-5	Mahasiswa dapat menjelaskan dan menganalisis mengenai ATP dan siklus kreb				
PETA CPL-CPMK	KETERANGAN CPL DAN CPMK					
		CPL-1	CPL-2	Bobot (%)		
		20.0%		20.0%		
	CPMK-1	20.0%		20.0%		
	CPMK-2		20.0%	20.0%		
	CPMK-3		20.0%	20.0%		
	CPMK-4		20.0%	20.0%		
	CPMK-5		20.0%	20.0%		
	TOTAL BOBOT (%)	40.0%	60.0%	100.0%		
DESKRIPSI SINGKAT MK	Mata kuliah ini membahas substansi serta biokimia dalam tubuh manusia dan meghubungkannya dengan aktivitas olahraga					
BAHAN KAJIAN: MATERI PEMBELAJARAN PUSTAKA	1. Pengenalan bagian-bagian tubuh manusia					
	UTAMA					
	Buku Ajar Pembelajaran Biokimia Olahraga					
	PENDUKUNG					
	Buku Ajar Pembelajaran Biokimia Gizi					
DOSEN PENGAMPU	Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or					
MATAKULIAH SYARAT						
Minggu ke-	CPMK	Indikator Penilaian	Kriteria & Bentuk Penilaian	metode dan bentuk Penilaian	Waktu dan Durasi	materi Pembelajaran Bobot
1 - 2	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan karbohidrat, protein dan lemak	Menjelaskan Karbohidrat, Protein dan Lemak	Tes tertulis pengetahuan karbohidrat, protein dan lemak	Ceramah, Tugas	6 x 170	Definisi peran karbohidrat, protein dan Lemak dalam tubuh 20
3 - 4	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan	Menjelaskan Vitamin, Mineral, Air	Membuat presentasi sesuai dengan topik	Diskusi kelompok, Tugas	6 x 170	Definisi peran Vitamin, Mineral, Air bagi tubuh 20
5 - 9	Mahasiswa dapat	Memahami konsep kontraksi	Membuat Essay berdasarkan literatur	Ceramah, Tugas, Diskusi Kelompok	15 x 170	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index 20
10 - 13	Mahasiswa dapat memahami dan menjelaskan	Memahami antioksidan, darah, hormon dan DNA	Membuat Makalah sesuai dengan topik	Tugas	12 x 170	Definisi, peran antioksidan, darah, hormon dan DNA 20
14 - 16	Mahasiswa dapat menjelaskan dan menganalisis mengenai ATP	Menganalisis ATP dan sisten kreb	Tes tulis mengerjakan soal	Ceramah, Espositori	9 x 170	Konsep dasar kerja ATP dan sistem kreb 20
TOTAL BOBOT MK						100
RENCANA ASESMEN DAN EVALUASI (RAE)						
Minggu ke-	CPMK	Bentuk Asessmen	Bobot (%)			
1 - 2	Mahasiswa dapat		7.5			
3 - 4	Mahasiswa dapat		7.5			
5 - 9	Mahasiswa dapat	Membuat essay	10			
10 - 13	memahami dan menjelaskan	Membuat presentasi sesuai tes tulis	10			
14 - 16	menjelaskan dan	Membuat presentasi sesuai UAS	20			
			45			
TOTAL BOBOT			100			
INDIKATOR PENCAPAIAN C						
CPL	CPMK	Minggu ke-	Bentuk Asessmen	Bobot (%)		
CPL-1	CPMK-1	1 - 2	Tugas 1	10		
			UAS	10		
	CPMK-2	3 - 4	Tugas 2	10		
			UAS	10		
CPL-2	CPMK-3	5 - 9	Tugas 3	10		
			UAS	10		
	CPMK-4	10 - 13	Tugas 4	10		
			UAS	10		
TOTAL BOBOT		14 - 16	Tugas 5	10		
			UAS	10		
TOTAL BOBOT						100



UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Jl. PGRI I Sonosewu No. 117 Yogyakarta - 55182 Telp. (0274) 376808, 373198 Fax. (0274) 376808

E-mail : info@upy.ac.id

PERNYATAAN KEABSAHAN DOKUMEN BERITA ACARA PERKULIAHAN DAN PENILAIAN

Dokumen ini disusun sebagai bukti keterlaksanaan proses pembelajaran di Universitas PGRI Yogyakarta.

Nama : Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or
NIS : 198907292022061002
Jabatan : Ketua Program Studi Ilmu Keolahragaan
Fakultas : Fakultas Sains Teknologi

Dengan ini menyatakan bahwa dokumen Berita Acara Perkuliahan dan Berita Acara Pengisian Nilai untuk:

Dosen : Rickadesti Ramadhana, M.Pd
Mata Kuliah : OR16103 - BIOKIMIA OLAHRAGA
Kelas : 25-A2
Tahun Akademik : Ganjil 2025/2026

yang dilampirkan merupakan dokumen resmi akademik yang disusun berdasarkan pelaksanaan kegiatan pembelajaran yang sesungguhnya, terencana, dan terdokumentasi.

Dengan demikian, dokumen ini dinyatakan sah, autentik, valid, dan akuntabel, serta dapat digunakan sebagai bukti dukung audit mutu internal, akreditasi, evaluasi pembelajaran, dan pelaporan akademik.

Ditetapkan di : Yogyakarta

Pada tanggal : 04 Februari 2026

Ketua Program Studi,



Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or

NIS: 198907292022061002



UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Jl. PGRI I Sonosewu No. 117 Yogyakarta - 55182 Telp. (0274) 376808, 373198 Fax. (0274) 376808

E-mail : info@upy.ac.id

BERITA ACARA PELAKSANAAN PERKULIAHAN

Dari :

Rickadesti Ramadhana, M.Pd

Dosen Matakuliah :

OR16103 / BIOKIMIA OLAHRAGA

Kelas :

25-A2

Menyatakan bahwa proses input BERITA ACARA PELAKSANAAN PERKULIAHAN untuk matakuliah tersebut telah berhasil dilakukan. Penginputan BAP tersebut dilakukan dengan cermat. Adapun bila terjadi kesalahan data, saya bersedia bertanggung jawab penuh.

Berkas daftar nilai mahasiswa saya lampirkan bersama dengan berita acara ini.

Terima kasih.

Hormat saya,



Rickadesti Ramadhana, M.Pd

Ringkasan Nilai

Nilai Rata-Rata Kelas : 84.43

Nilai Tertinggi Kelas : 91.2

Nilai Terendah Kelas : 76



UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Jl. PGRI I Sonosewu No. 117 Yogyakarta - 55182 Telp. (0274) 376808, 373198 Fax. (0274) 376808

E-mail : info@upy.ac.id

PRESENSI DOSEN MENGAJAR TA. 20251 Ganjil

Dosen : Rickadesti Ramadhana, M.Pd
Mata Kuliah : OR16103 / BIOKIMIA OLAHRAGA
SKS : Teori = 1 SKS ; Praktikum = 1 SKS ;
Periode : 20251 Ganjil

Program Studi : [S1] - Ilmu Keolahragaan
Kurikulum : IKOR-2025-OBE - OBE IKOR 2025
Nama Kelas : 25-A2
Peserta : 35

Pertemuan	Waktu & Tempat	Materi	Indikator Capai	Peserta	Status
1	Kamis, 11 Sep 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi peran karbohidrat, protein dan Lemak dalam tubuh	Menjelaskan Karbohidrat, Protein dan Lemak	22	Terlaksana
2	Kamis, 18 Sep 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi peran karbohidrat, protein dan Lemak dalam tubuh	Menjelaskan Karbohidrat, Protein dan Lemak	26	Terlaksana
3	Kamis, 25 Sep 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi peran Vitamin, Mineral,Air bagi tubuh	Menjelaskan Vitamin, Mineral, Air	29	Terlaksana
4	Kamis, 02 Oct 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi peran Vitamin, Mineral,Air bagi tubuh	Menjelaskan Vitamin, Mineral, Air	24	Terlaksana

Pertemuan	Waktu & Tempat	Materi	Indikator Capai	Peserta	Status
5	Kamis, 09 Oct 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index	Memahami konsep kontraksi otot dan glicemic index	27	Terlaksana
6	Kamis, 16 Oct 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index	Memahami konsep kontraksi otot dan glicemic index	31	Terlaksana
7	Kamis, 23 Oct 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index	Memahami konsep kontraksi otot dan glicemic index	32	Terlaksana
8	Kamis, 30 Oct 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index	Memahami konsep kontraksi otot dan glicemic index	32	Terlaksana
9	Kamis, 06 Nov 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep gerak kontraksi otot dan glicemic index	Memahami konsep kontraksi otot dan glicemic index	30	Terlaksana
10	Kamis, 13 Nov 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi, peran antioksidan, darah, hormon dan DNA	Memahami antioksidan, darah,hormon dan DNA	29	Terlaksana
11	Kamis, 20 Nov 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi, peran antioksidan, darah, hormon dan DNA	Memahami antioksidan, darah,hormon dan DNA	34	Terlaksana
12	Kamis, 27 Nov 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi, peran antioksidan, darah, hormon dan DNA	Memahami antioksidan, darah,hormon dan DNA	32	Terlaksana
13	Kamis, 04 Dec 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Definisi, peran antioksidan, darah, hormon dan DNA	Memahami antioksidan, darah,hormon dan DNA	30	Terlaksana

Pertemuan	Waktu & Tempat	Materi	Indikator Capai	Peserta	Status
14	Kamis, 11 Dec 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep dasar kerja ATP dan sistem kreb	Menganalisis ATP dan sisten kreb	24	Terlaksana
15	Kamis, 18 Dec 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Konsep dasar kerja ATP dan sistem kreb	Menganalisis ATP dan sisten kreb	30	Terlaksana
16	Kamis, 25 Dec 2025 12:50 s.d 14:30 Ruang Kelas 306	Ujian Akhir Semester (UAS)	Ujian Akhir Semester (UAS)	34	Terlaksana

Dosen



(Rickadesti Ramadhana, M.Pd)

Dicetak pada 02-02-2026

[illegible]

#	NPM	Nama Mahasiswa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	jml	% Hadir
9	25111600039	Feldin Azelfi Erbita Putra	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15	93.75%
10	25111600040	Arba Ramadhani	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	√	-	√	√	14	87.50%
11	25111600041	Muhammad Husein Rendy Wasesa	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	16	100.00%
12	25111600043	Pratama Hanggara Saputra	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15	93.75%
13	25111600044	Adnan Syah Putra	√	√	√	-	√	√	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	14	87.50%
14	25111600045	Rovi Charis Ardiansyah	-	-	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	13	81.25%
15	25111600046	Dwi Kurniawan	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	15	93.75%
16	25111600047	Habib Khoiron Sahilna	√	√	√	-	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	14	87.50%
17	25111600050	Fadhil Zikri Robbani	√	√	-	√	-	√	√	-	√	√	√	√	-	-	√	√	11	68.75%
18	25111600053	Adellya Andriya Putri Haryono	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15	93.75%
19	25111600054	Ariel Morris Agustian	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	15	93.75%
20	25111600055	Yohanis Pageru	√	√	-	-	√	√	√	√	√	-	√	√	√	-	√	√	12	75.00%
21	25111600056	Fajar Mulia	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	16	100.00%
22	25111600057	Christian Marcha Setiawan	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	16	100.00%
23	25111600058	Bagas Reno Vernanda	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	15	93.75%
24	25111600059	Muhammad Gibran Atthoriq	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	√	15	93.75%
25	25111600060	Firdaus Dafa Sabban	√	√	√	√	√	√	-	√	-	-	√	√	√	√	√	√	13	81.25%
26	25111600061	Ilyas Fajariansyah	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	√	15	93.75%

#	NPM	Nama Mahasiswa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	jml	% Hadir
27	25111600062	Juan Einstein Riquelme	√	-	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	√	√	13	81.25%
28	25111600064	Azka Taslimi Anwar	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15	93.75%
29	25111600070	Carmelia Melan Muid	-	√	√	-	-	-	-	-	√	-	-	√	√	-	-	√	6	37.50%
30	25111600093	Hadi Prasetyo	-	√	√	-	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	13	81.25%
31	25111600094	Risnanda Fausta Rafa	-	-	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	13	81.25%
32	25111600096	Eno Farida Putri	√	√	√	√	-	√	√	√	√	-	√	√	√	√	√	√	14	87.50%
33	25111600099	Tito Raska Alfarro	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	16	100.00%
34	25111600104	Ajril Azharil Abubakar	-	-	-	-	√	-	√	-	√	√	√	-	-	-	-	√	6	37.50%
35	25111600107	Arnesto Adham Frenaldin	-	-	-	-	-	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	10	62.50%

Dosen



(Rickadesti Ramadhana, M.Pd)

Dicetak pada 02-02-2026



UNIVERSITAS PGRI YOGYAKARTA

Jl. PGRI I Sonosewu No. 117 Yogyakarta - 55182 Telp. (0274) 376808, 373198 Fax. (0274) 376808

E-mail : info@upy.ac.id

Daftar Nilai Mahasiswa

Dosen : Rickadesti Ramadhana, M.Pd

Mata Kuliah : OR16103 / BIODINAMIA OLAHRAGA

SKS : Teori = 1 SKS ; Praktikum = 1 SKS ;

Periode : 20251 Ganjil

Program Studi : [S1] - Ilmu Keolahragaan

Kurikulum : IKOR-2025-OBE - OBE IKOR 2025

Nama Kelas : 25-A2

Peserta : 35

#	NPM	Nama Mahasiswa	Ujian Esai/Tertulis (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Presentasi (20 %)	Ujian Akhir Semester (UAS) (20 %)	Nilai Akhir	Nilai Huruf	Angka Mutu
1	25111600001	Muhammad Wildan Alfiansyah	80	75	85	80	75	79	B+	3.25
2	25111600014	Zaky Wandinov	84	98	83	70	75	82	A-	3.75
3	25111600017	Fadel Muhammad Husain	78	82	80	75	80	79	B+	3.25
4	25111600022	Muhamad Gilang Atgo Stavia	87	86	87	86	89	87	A-	3.75
5	25111600032	Az Zazilah	88	95	83	85	83	86.8	A-	3.75
6	25111600035	Nur Mutiara Sari	85	90	85	88	93	88.2	A-	3.75

#	NPM	Nama Mahasiswa	Ujian Esai/Tertulis (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Presentasi (20 %)	Ujian Akhir Semester (UAS) (20 %)	Nilai Akhir	Nilai Huruf	Angka Mutu
7	25111600036	Muhammad Jumna Romadhon Pratama	81	98	85	83	70	83.4	A-	3.75
8	25111600037	Eries Widya Azahra	94	95	86	86	90	90.2	A	4
9	25111600039	Feldin Azelfi Erbita Putra	90	95	94	85	88	90.4	A	4
10	25111600040	Arba Ramadhani	88	92	85	85	85	87	A-	3.75
11	25111600041	Muhammad Husein Rendy Wasesa	90	98	86	88	86	89.6	A-	3.75
12	25111600043	Pratama Hanggara Saputra	88	86	87	86	89	87.2	A-	3.75
13	25111600044	Adnan Syah Putra	70	92	84	70	75	78.2	B+	3.25
14	25111600045	Rovi Charis Ardiansyah	87	83	85	86	88	85.8	A-	3.75
15	25111600046	Dwi Kurniawan	86	95	85	78	83	85.4	A-	3.75
16	25111600047	Habib Khoiron Sahilna	81	92	95	88	85	88.2	A-	3.75

#	NPM	Nama Mahasiswa	Ujian Esai/Tertulis (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Presentasi (20 %)	Ujian Akhir Semester (UAS) (20 %)	Nilai Akhir	Nilai Huruf	Angka Mutu
17	25111600050	Fadhil Zikri Robbani	75	88	76	80	76	79	B+	3.25
18	25111600053	Adellya Andriya Putri Haryono	90	95	90	93	88	91.2	A	4
19	25111600054	Ariel Morris Agustian	72	95	85	85	85	84.4	A-	3.75
20	25111600055	Yohanis Pageru	85	80	85	73	80	80.6	A-	3.75
21	25111600056	Fajar Mulia	86	98	85	85	83	87.4	A-	3.75
22	25111600057	Christian Marcha Setiawan	88	98	85	88	92	90.2	A	4
23	25111600058	Bagas Reno Vernanda	88	95	87	90	85	89	A-	3.75
24	25111600059	Muhammad Gibran Atthoriq	76	95	85	78	50	76.8	B+	3.25
25	25111600060	Firdaus Dafa Sabban	75	90	70	75	80	78	B+	3.25
26	25111600061	Ilyas Fajariansyah	85	95	85	90	90	89	A-	3.75
27	25111600062	Juan Einstein Riquelme	78	90	85	75	75	80.6	A-	3.75

#	NPM	Nama Mahasiswa	Ujian Esai/Tertulis (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Kelompok (20 %)	Tugas Presentasi (20 %)	Ujian Akhir Semester (UAS) (20 %)	Nilai Akhir	Nilai Huruf	Angka Mutu
28	25111600064	Azka Taslimi Anwar	86	95	85	85	70	84.2	A-	3.75
29	25111600070	Carmelia Melan Muid	84	79	81	70	70	76.8	B+	3.25
30	25111600093	Hadi Prasetyo	88	90	95	70	80	84.6	A-	3.75
31	25111600094	Risnanda Fausta Rafa	86	87	86	88	87	86.8	A-	3.75
32	25111600096	Eno Farida Putri	90	92	98	86	90	91.2	A	4
33	25111600099	Tito Raska Alfarro	90	98	85	86	70	85.8	A-	3.75
34	25111600104	Ajril Azharil Abubakar	81	78	84	70	67	76	B+	3.25
35	25111600107	Arnesto Adham Frenaldin	80	78	85	70	68	76.2	B+	3.25

Dosen



(Rickadesti Ramadhana, M.Pd)

Dicetak pada 02-02-2026

BIOKIMIA OLAHRAGA



Disusun oleh:
Dr. Andri Arif Kustiawqan, S.Pd., M.Or.
Rickadesti Ramadhana, M.Pd.

KATA PENGANTAR

Salam Olahraga!

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga kami dapat menyusun modul perkuliahan ini dengan baik. Modul ini disusun untuk mata kuliah Biokimia Olahraga dalam Program Studi Ilmu Keolahragaan di Universitas PGRI Yogyakarta, di bawah bimbingan Dr. Andri Arif Kustiawan, S.Pd., M.Or. dan Rickadesti Ramadhana, M.Pd.

Modul ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam mengenai Biokimia konteks olahraga. Tujuannya untuk memberikan landasan yang kuat mahasiswa dalam mengkaji berbagai disiplin ilmu keolahragaan agar nantinya para mahasiswa dapat memiliki pengetahuan dan mengimplementasikannya di masyarakat..

. Kami berharap modul ini dapat menjadi sumber belajar yang bermanfaat bagi mahasiswa. Dalam penyusunan modul ini, kami telah berusaha menyajikan materi secara sistematis dan mudah dipahami. Kami juga mengajak pembaca untuk aktif berdiskusi dan bertanya guna memperdalam pemahaman tentang materi yang disampaikan. Kami menyadari bahwa modul ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan modul ini.

Semoga modul ini dapat memberikan kontribusi positif dalam pendidikan dan pengembangan ilmu keolahragaan di Indonesia.

Yogyakarta,

2025

Penyusun

DAFAR ISI

COVER	1
KATA PENGANTAR.....	2
DAFAR ISI	4
BAB I <u>Alur dan Mekanisme Sel Tubuh dalam Mengkonversi Makanan Menjadi Energi</u>	5
BAB II <u>Alur dan Mekanisme Kerja Otot dalam Mengekstrak Energi dari Zat Gizi Makanan</u>	11
BAB III <u>Sistem Phosphagen (Sistem ATP–Phosphocreatine)</u>	18
BAB IV <u>Sistem Glikogen Asam Laktat (Sistem Glikolisis Anaerobik)</u>	25
BAB V <u>Sistem Aerobik (Sistem Oksidatif)</u>	32
BAB VI <u>Adenosin Trifosfat (ATP), Fungsi ATP dan Perannya sebagai Sumber Energi Aktivitas Muskular serta Molekul Pembawa Energi Sel Lainnya</u>	40
BAB VII <u>Struktur Atp Dan Proses Pembentukannya</u>	48
BAB VIII <u>Adenosin Difosfat (Adp) Dan Fosfat Anorganik (Pi)</u>	54
BAB IX <u>Hasil Penggabungan Adp Dan Pi: Ikatan Kimia Berenergi Tinggi Dalam Pembentukan Atp</u>	60
BAB X <u>Hidrolisis Atp Oleh Enzim Atpase: Hasil Reaksi Dan Pemanfaatan Energi</u>	66
DAFTAR PUSTAKA.....	72

BAB I

Alur dan Mekanisme Sel Tubuh dalam Mengkonversi Makanan Menjadi Energi

1.1 Pendahuluan

Energi merupakan komponen esensial yang diperlukan oleh setiap sel tubuh untuk mempertahankan kehidupan, menjalankan fungsi fisiologis, serta mendukung aktivitas biologis yang kompleks. Sel memperoleh energi dari zat gizi makronutrien yang dikonsumsi melalui makanan, yaitu karbohidrat, lemak, dan protein. Namun demikian, molekul-molekul nutrien tersebut tidak dapat langsung digunakan sebagai energi oleh sel, melainkan harus melalui serangkaian proses metabolisme biokimia yang melibatkan jalur enzimatik terorganisasi, sistem transport molekuler, serta regulasi hormonal yang dinamis. Proses konversi zat gizi menjadi energi ini dikenal sebagai metabolisme energi seluler, yang menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) sebagai bentuk energi kimia yang dapat digunakan secara langsung oleh sel.

Metabolisme energi terdiri atas dua kategori utama, yaitu katabolisme dan anabolisme. Katabolisme merupakan proses degradasi molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana dengan pelepasan energi,

sedangkan anabolisme merupakan proses sintesis molekul kompleks yang memerlukan energi. Dalam konteks produksi energi, jalur katabolisme berperan dominan karena melibatkan pemecahan karbohidrat, lipid, dan protein menjadi senyawa intermediat metabolik yang kemudian masuk ke dalam jalur respirasi seluler untuk menghasilkan ATP.

1.2 Proses Pencernaan dan Absorpsi Nutrien

Konversi makanan menjadi energi dimulai dari proses pencernaan di sistem gastrointestinal. Karbohidrat kompleks mengalami hidrolisis menjadi monosakarida, terutama glukosa, melalui aktivitas enzim amilase dan enzim disakaridase. Lemak mengalami emulsifikasi oleh garam empedu dan dipecah oleh lipase menjadi asam lemak bebas dan monogliserida. Protein dihidrolisis menjadi asam amino melalui kerja enzim proteolitik seperti pepsin, tripsin, dan peptidase.

Produk akhir pencernaan kemudian diserap melalui epitel usus halus. Glukosa dan asam amino masuk ke sirkulasi darah portal menuju hati, sedangkan lipid diangkut dalam bentuk kilomikron melalui sistem limfatik sebelum memasuki sirkulasi sistemik. Tahap absorpsi ini menentukan ketersediaan substrat metabolik bagi sel dalam menghasilkan energi.

1.3 Metabolisme Karbohidrat sebagai Sumber Energi Utama

Karbohidrat merupakan sumber energi utama tubuh karena dapat dimetabolisme dengan cepat untuk menghasilkan ATP. Setelah glukosa memasuki sel melalui transporter membran (GLUT), molekul ini mengalami fosforilasi menjadi glukosa-6-fosfat dan memasuki jalur glikolisis di sitoplasma. Glikolisis menghasilkan piruvat, ATP, dan NADH sebagai molekul pembawa elektron.

Piruvat kemudian memasuki mitokondria dan mengalami dekarboksilasi oksidatif menjadi asetil-KoA. Senyawa ini selanjutnya masuk ke dalam siklus asam sitrat (siklus Krebs), menghasilkan NADH dan FADH₂ yang berfungsi sebagai donor elektron dalam rantai transpor elektron. Pada tahap fosforilasi oksidatif di membran dalam mitokondria, gradien proton yang terbentuk digunakan oleh ATP sintase untuk menghasilkan ATP dalam jumlah besar.

Dalam kondisi anaerob atau kekurangan oksigen, piruvat dapat dikonversi menjadi laktat melalui fermentasi asam laktat untuk mempertahankan regenerasi NAD⁺ sehingga glikolisis tetap dapat berlangsung meskipun produksi ATP menjadi terbatas.

1.4 Metabolisme Lemak sebagai Cadangan Energi

Lipid merupakan sumber energi dengan kepadatan energi tertinggi dibandingkan makronutrien lainnya. Trigliserida yang tersimpan dalam jaringan adiposa dapat dimobilisasi melalui proses lipolisis menjadi asam lemak bebas dan gliserol. Asam lemak kemudian diangkut ke dalam mitokondria melalui sistem karnitin dan mengalami β -oksidasi menghasilkan asetil-KoA, NADH, dan FADH₂.

Asetil-KoA yang dihasilkan akan memasuki siklus Krebs untuk menghasilkan ATP dalam jumlah besar. Oleh karena itu, metabolisme lemak berperan penting dalam penyediaan energi jangka panjang, terutama pada kondisi puasa, aktivitas fisik berkepanjangan, atau defisit karbohidrat. Dalam kondisi kekurangan glukosa ekstrem, hati dapat menghasilkan badan keton melalui proses ketogenesis yang kemudian digunakan sebagai sumber energi alternatif oleh jaringan tubuh termasuk otak.

1.5 Metabolisme Protein sebagai Sumber Energi Alternatif

Protein pada dasarnya berfungsi sebagai komponen struktural dan fungsional tubuh, namun dapat digunakan sebagai sumber energi dalam kondisi tertentu seperti kelaparan, stres metabolik, atau aktivitas fisik berat berkepanjangan. Asam amino mengalami proses deaminasi untuk

melepaskan gugus amino yang kemudian dikonversi menjadi urea melalui siklus urea di hati.

Kerangka karbon hasil deaminasi dapat memasuki jalur metabolisme energi dalam bentuk piruvat, asetil-KoA, atau intermediat siklus Krebs. Dengan demikian, protein dapat berkontribusi terhadap produksi energi meskipun penggunaannya sebagai substrat energi bukan merupakan mekanisme utama dalam kondisi fisiologis normal.

1.6 Integrasi Metabolisme dan Regulasi Hormonal

Metabolisme energi merupakan sistem yang terintegrasi antara karbohidrat, lemak, dan protein. Regulasi metabolisme ini dikendalikan oleh hormon seperti insulin, glukagon, epinefrin, dan kortisol. Insulin berperan dalam meningkatkan penyimpanan energi melalui sintesis glikogen dan lipid, sedangkan glukagon dan epinefrin meningkatkan mobilisasi energi melalui glikogenolisis dan lipolisis.

Selain regulasi hormonal, keseimbangan energi seluler juga dikendalikan oleh rasio ATP, ADP, dan AMP yang mempengaruhi aktivitas enzim metabolik. Mekanisme ini memastikan produksi energi sesuai dengan kebutuhan fisiologis tubuh dalam berbagai kondisi aktivitas.

1.7 Produksi ATP sebagai Hasil Akhir Metabolisme Energi

ATP merupakan mata uang energi utama dalam sistem biologis. Molekul ini digunakan dalam berbagai proses seluler seperti kontraksi otot, transpor aktif membran, sintesis biomolekul, dan transmisi impuls saraf. ATP dihasilkan melalui fosforilasi tingkat substrat, fosforilasi oksidatif, serta sistem fosfokreatin dalam jaringan otot.

Jenis substrat energi yang digunakan akan mempengaruhi efisiensi produksi ATP. Karbohidrat menghasilkan energi dengan cepat, lemak menghasilkan energi dalam jumlah besar tetapi lebih lambat, sedangkan protein berfungsi sebagai sumber energi tambahan dalam kondisi tertentu.

1.8 Kesimpulan

Konversi makanan menjadi energi merupakan proses metabolisme kompleks yang melibatkan integrasi jalur biokimia karbohidrat, lemak, dan protein dalam sistem seluler. ATP sebagai produk akhir metabolisme berperan vital dalam mempertahankan kehidupan dan fungsi fisiologis tubuh. Pemahaman mengenai mekanisme ini sangat penting dalam bidang kesehatan, nutrisi, dan ilmu keolahragaan karena berkaitan langsung dengan performa tubuh dan keseimbangan metabolik.

BAB II

Alur dan Mekanisme Kerja Otot dalam Mengekstrak Energi dari Zat Gizi Makanan

2.1 Pendahuluan

Otot rangka merupakan jaringan biologis yang memiliki kebutuhan energi tinggi karena berperan dalam menghasilkan gerakan, mempertahankan postur tubuh, serta mendukung berbagai aktivitas fisiologis manusia. Untuk menjalankan fungsi kontraktalnya, otot memerlukan energi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP) yang dihasilkan melalui metabolisme zat gizi yang berasal dari makanan, yaitu karbohidrat, lemak, dan protein. Proses ekstraksi energi oleh otot tidak hanya melibatkan pemecahan substrat metabolik, tetapi juga melibatkan sistem transport molekul, regulasi enzimatik, serta koordinasi antar organ seperti hati dan jaringan adiposa. Oleh karena itu, mekanisme produksi energi dalam otot merupakan suatu sistem kompleks yang terintegrasi secara fisiologis dan biokimia.

Energi yang digunakan otot untuk kontraksi berasal dari hidrolisis ATP menjadi adenosin difosfat (ADP) dan fosfat anorganik (Pi). Namun, jumlah ATP yang tersedia di dalam sel otot sangat terbatas dan hanya mampu mendukung kontraksi selama beberapa detik. Oleh karena itu, tubuh

memiliki berbagai sistem produksi energi untuk mempertahankan ketersediaan ATP secara berkelanjutan sesuai dengan intensitas dan durasi aktivitas fisik yang dilakukan. Sistem tersebut meliputi sistem fosfagen, sistem glikolisis anaerobik, dan sistem oksidatif aerobik yang memanfaatkan karbohidrat, lemak, serta dalam kondisi tertentu protein sebagai substrat energi.

2.2 Struktur Sel Otot dan Kebutuhan Energi

Sel otot rangka (serabut otot) memiliki struktur khusus yang memungkinkan terjadinya kontraksi. Di dalam sel otot terdapat miofibril yang tersusun atas filamen aktin dan miosin, yang berinteraksi melalui mekanisme sliding filament untuk menghasilkan kontraksi. Proses ini memerlukan energi ATP dalam jumlah besar, terutama untuk:

1. Aktivitas kepala miosin selama siklus jembatan silang
2. Transport ion kalsium kembali ke retikulum sarkoplasma
3. Pemeliharaan gradien ion melalui pompa natrium-kalium

Selain itu, sel otot memiliki jumlah mitokondria yang tinggi, terutama pada serabut otot tipe I (slow twitch), yang berperan penting dalam produksi energi melalui respirasi aerobik. Kandungan mioglobin yang tinggi pada serabut ini juga mendukung penyimpanan oksigen untuk metabolisme

oksidatif. Sebaliknya, serabut otot tipe II (fast twitch) lebih banyak mengandalkan metabolisme anaerobik untuk menghasilkan energi secara cepat.

2.3 Sistem Energi Fosfagen (ATP-PCr System)

Sistem energi tercepat yang digunakan otot adalah sistem fosfagen, yang melibatkan fosfokreatin (phosphocreatine/PCr) sebagai sumber fosfat berenergi tinggi. Ketika ATP dipecah selama kontraksi otot, fosfokreatin segera mendonorkan gugus fosfatnya kepada ADP untuk membentuk kembali ATP melalui reaksi yang dikatalisis oleh enzim kreatin kinase.

Sistem ini mampu menyediakan energi secara cepat tanpa memerlukan oksigen, tetapi kapasitasnya sangat terbatas karena cadangan fosfokreatin dalam otot relatif kecil. Oleh karena itu, sistem fosfagen dominan digunakan pada aktivitas berintensitas tinggi dan durasi sangat singkat, seperti sprint atau angkat beban.

2.4 Sistem Glikolisis Anaerobik dalam Otot

Ketika aktivitas fisik berlangsung lebih lama dari beberapa detik, otot mulai memanfaatkan glukosa atau glikogen otot melalui jalur glikolisis untuk menghasilkan ATP. Proses ini berlangsung di sitoplasma dan tidak

memerlukan oksigen, sehingga disebut metabolisme anaerobik. Glikolisis menghasilkan ATP dalam jumlah sedang serta menghasilkan piruvat sebagai produk akhir.

Dalam kondisi ketersediaan oksigen yang terbatas, piruvat akan dikonversi menjadi laktat melalui enzim laktat dehidrogenase. Produksi laktat memungkinkan regenerasi NAD^+ sehingga glikolisis dapat terus berlangsung. Namun, akumulasi laktat dan ion hidrogen dapat menyebabkan penurunan pH otot yang berkontribusi terhadap kelelahan otot.

Sistem energi anaerobik sangat penting pada aktivitas intensitas tinggi dengan durasi sedang, seperti lari 400 meter atau olahraga permainan dengan aktivitas intermiten.

2.5 Sistem Oksidatif Aerobik dalam Otot

Sistem energi aerobik merupakan sistem utama dalam aktivitas fisik berdurasi panjang dengan intensitas sedang hingga rendah. Sistem ini menggunakan oksigen untuk mengoksidasi karbohidrat dan lemak dalam mitokondria guna menghasilkan ATP dalam jumlah besar melalui siklus Krebs dan rantai transpor elektron.

Karbohidrat dalam bentuk glukosa darah atau glikogen otot dipecah menjadi piruvat melalui glikolisis, kemudian diubah menjadi asetil-KoA

yang memasuki siklus Krebs. Lemak dipecah melalui proses lipolisis menjadi asam lemak bebas, yang kemudian mengalami β -oksidasi menghasilkan asetil-KoA dalam jumlah besar. Proses oksidasi lemak menghasilkan ATP lebih banyak dibandingkan karbohidrat, namun kecepatannya lebih lambat.

Pada aktivitas fisik berkepanjangan, terjadi pergeseran penggunaan substrat energi dari karbohidrat menuju lemak, yang dikenal sebagai konsep fuel utilization shift. Adaptasi latihan aerobik meningkatkan kapasitas mitokondria, aktivitas enzim oksidatif, serta kemampuan otot menggunakan lemak sebagai sumber energi.

2.6 Peran Protein dalam Metabolisme Energi Otot

Protein bukan merupakan sumber energi utama bagi otot selama aktivitas normal. Namun, dalam kondisi tertentu seperti latihan berkepanjangan, defisit energi, atau kekurangan karbohidrat, asam amino dapat digunakan sebagai substrat energi melalui proses oksidasi asam amino rantai cabang (branched-chain amino acids/BCAA) di dalam otot.

Asam amino mengalami deaminasi dan kerangka karbonnya memasuki siklus Krebs sebagai intermediat metabolik. Meskipun

kontribusinya relatif kecil dibandingkan karbohidrat dan lemak, metabolisme protein dapat meningkat pada kondisi stres metabolik atau kelelahan energi.

2.7 Integrasi Sistem Energi Selama Aktivitas Fisik

Ketiga sistem energi dalam otot tidak bekerja secara terpisah, melainkan berlangsung secara simultan dengan kontribusi yang berbeda tergantung pada intensitas, durasi, dan jenis aktivitas fisik. Pada awal aktivitas, sistem fosfagen dominan, kemudian diikuti oleh glikolisis anaerobik, dan akhirnya sistem oksidatif aerobik menjadi sumber utama energi pada aktivitas jangka panjang.

Regulasi penggunaan substrat energi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain:

- a) Intensitas latihan
- b) Durasi aktivitas
- c) Status nutrisi
- d) Tingkat kebugaran individu
- e) Regulasi hormonal (epinefrin, insulin, glukagon)

Adaptasi latihan fisik jangka panjang dapat meningkatkan efisiensi metabolisme energi melalui peningkatan jumlah mitokondria, kapilarisasi otot, serta aktivitas enzim metabolik.

2.8 Kelelahan Otot dan Hubungannya dengan Metabolisme Energi

Kelelahan otot terjadi ketika kemampuan otot menghasilkan energi tidak lagi mampu memenuhi kebutuhan kontraksi. Faktor penyebab kelelahan meliputi penurunan cadangan glikogen, akumulasi metabolit seperti ion hidrogen dan fosfat anorganik, gangguan keseimbangan ion, serta gangguan fungsi sistem saraf.

Ketersediaan energi yang optimal sangat penting untuk mempertahankan performa otot. Oleh karena itu, strategi nutrisi dan latihan memiliki peran penting dalam meningkatkan kapasitas metabolisme energi otot.

2.9 Kesimpulan

Otot mengekstrak energi dari zat gizi makanan melalui sistem metabolisme yang kompleks dan terintegrasi, melibatkan sistem fosfagen, glikolisis anaerobik, dan metabolisme oksidatif aerobik. Karbohidrat, lemak, dan protein berkontribusi dalam produksi ATP sesuai dengan kondisi fisiologis dan kebutuhan aktivitas. Pemahaman mengenai mekanisme ini sangat penting dalam bidang ilmu keolahragaan, fisiologi olahraga, dan kesehatan karena berkaitan langsung dengan performa fisik, adaptasi latihan, dan pencegahan kelelahan.

BAB III

Sistem Phosphagen (Sistem ATP–Phosphocreatine)

3.1 Pendahuluan

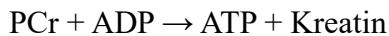
Sistem phosphagen atau sistem ATP–phosphocreatine merupakan sistem penyedia energi tercepat dalam tubuh manusia yang berperan utama dalam aktivitas fisik berintensitas tinggi dan berdurasi sangat singkat. Sistem ini menyediakan energi secara langsung tanpa memerlukan oksigen (anaerobik alaktat) melalui pemecahan adenosin trifosfat (ATP) yang tersimpan di dalam sel otot serta regenerasi ATP menggunakan cadangan phosphocreatine (PCr). Kecepatan sistem phosphagen dalam menghasilkan energi menjadikannya sebagai sumber energi dominan pada aktivitas eksplosif seperti sprint, lompat, lempar, dan angkat beban.

ATP merupakan satu-satunya molekul energi yang dapat digunakan secara langsung untuk kontraksi otot. Namun, jumlah ATP yang tersimpan di dalam sel otot sangat terbatas, hanya cukup untuk menopang aktivitas maksimal selama sekitar 1–2 detik. Oleh karena itu, tubuh memiliki mekanisme cepat untuk meregenerasi ATP melalui pemanfaatan phosphocreatine yang tersimpan dalam jaringan otot. Sistem inilah yang dikenal sebagai sistem phosphagen.

3.2 Konsep Dasar Sistem ATP–Phosphocreatine

Sistem ATP–phosphocreatine bekerja berdasarkan reaksi pemindahan gugus fosfat berenergi tinggi dari phosphocreatine ke adenosin difosfat (ADP) untuk membentuk ATP kembali. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim kreatin kinase (creatine kinase), yang terdapat dalam konsentrasi tinggi di dalam sel otot rangka.

Reaksi utama dalam sistem ini adalah:



Melalui mekanisme ini, ATP dapat diregenerasi dengan sangat cepat tanpa memerlukan oksigen maupun proses metabolisme kompleks seperti glikolisis atau respirasi mitokondria. Oleh karena itu, sistem phosphagen menjadi sistem energi yang paling cepat dibandingkan sistem energi lainnya.

3.3 Sumber dan Penyimpanan Phosphocreatine dalam Otot

Phosphocreatine merupakan senyawa berenergi tinggi yang tersimpan di dalam sitoplasma sel otot. Senyawa ini terbentuk dari kreatin yang disintesis di hati, ginjal, dan pankreas, kemudian diangkut melalui aliran darah menuju jaringan otot. Di dalam mitokondria, kreatin mengalami fosforilasi menggunakan energi dari ATP untuk membentuk phosphocreatine.

Cadangan phosphocreatine dalam otot sekitar tiga hingga lima kali lebih besar dibandingkan cadangan ATP. Meskipun demikian, jumlah total cadangan phosphagen tetap terbatas sehingga hanya mampu menyediakan energi maksimal selama sekitar 5–10 detik aktivitas intensitas tinggi.

3.4 Karakteristik Sistem Phosphagen

Sistem phosphagen memiliki beberapa karakteristik fisiologis utama, yaitu:

- a) Kecepatan produksi energi sangat tinggi
- b) Tidak memerlukan oksigen (anaerobik)
- c) Tidak menghasilkan asam laktat (alaktat)
- d) Kapasitas energi sangat terbatas
- e) Dominan digunakan pada aktivitas eksplosif berdurasi singkat

Karena tidak menghasilkan produk sampingan metabolik seperti asam laktat, sistem ini tidak secara langsung menyebabkan kelelahan metabolik. Kelelahan yang terjadi lebih disebabkan oleh penurunan cadangan phosphocreatine dalam otot.

3.5 Peran Sistem Phosphagen dalam Aktivitas Fisik dan Olahraga

Sistem ATP–phosphocreatine berperan dominan dalam aktivitas fisik yang memerlukan kekuatan dan kecepatan maksimal dalam waktu singkat.

Contoh aktivitas yang mengandalkan sistem ini antara lain:

- a) Sprint 100 meter
- b) Lompat jauh dan lompat tinggi
- c) Angkat beban
- d) Lempar lembing atau tolak peluru
- e) Gerakan eksplosif dalam olahraga permainan (seperti sprint pendek dalam sepak bola atau basket)

Pada fase awal aktivitas fisik, sistem phosphagen selalu menjadi sumber energi utama sebelum sistem energi lainnya berkontribusi secara signifikan. Oleh karena itu, sistem ini sangat penting dalam menentukan performa kekuatan dan daya ledak otot.

3.6 Pemulihan Phosphocreatine

Setelah aktivitas intensitas tinggi, cadangan phosphocreatine dalam otot perlu dipulihkan. Proses resintesis phosphocreatine terjadi terutama melalui metabolisme aerobik di mitokondria menggunakan energi dari oksidasi karbohidrat dan lemak. Proses pemulihan ini memerlukan oksigen

dan berlangsung relatif cepat, dengan sekitar 50–70% cadangan phosphocreatine dapat pulih dalam waktu 30 detik, dan pemulihan penuh terjadi dalam waktu 3–5 menit.

Faktor yang mempengaruhi kecepatan pemulihan phosphocreatine meliputi:

- a) Tingkat kebugaran individu
- b) Ketersediaan oksigen
- c) Aliran darah ke otot
- d) Kondisi nutrisi
- e) Intensitas aktivitas sebelumnya

Pemulihan phosphocreatine yang optimal sangat penting dalam olahraga yang melibatkan aktivitas berulang berintensitas tinggi, seperti olahraga permainan atau latihan interval.

3.7 Adaptasi Latihan terhadap Sistem Phosphagen

Latihan fisik, terutama latihan kekuatan dan latihan sprint berintensitas tinggi, dapat meningkatkan kapasitas sistem phosphagen.

Adaptasi fisiologis yang terjadi meliputi:

- a) Peningkatan cadangan phosphocreatine dalam otot
- b) Peningkatan aktivitas enzim kreatin kinase
- c) Peningkatan kemampuan regenerasi ATP

d) Peningkatan kekuatan dan daya ledak otot

Selain latihan, suplementasi kreatin juga diketahui dapat meningkatkan cadangan phosphocreatine dalam otot, sehingga meningkatkan performa aktivitas berintensitas tinggi. Namun, penggunaan suplementasi harus mempertimbangkan aspek keamanan dan kebutuhan individu.

3.8 Kelelahan dalam Sistem Phosphagen

Kelelahan dalam aktivitas yang mengandalkan sistem phosphagen terutama disebabkan oleh penurunan cadangan phosphocreatine dan akumulasi ADP dalam sel otot. Ketika cadangan phosphocreatine menurun secara signifikan, kemampuan regenerasi ATP menjadi terbatas sehingga kontraksi otot tidak dapat dipertahankan pada intensitas maksimal.

Selain itu, faktor neuromuskular seperti gangguan transmisi impuls saraf dan perubahan keseimbangan ion juga dapat berkontribusi terhadap kelelahan dalam aktivitas eksplosif.

3.9 Kesimpulan

Sistem phosphagen atau sistem ATP–phosphocreatine merupakan sistem energi tercepat yang menyediakan ATP secara langsung untuk

kontraksi otot dalam aktivitas berintensitas tinggi dan berdurasi singkat. Sistem ini bekerja melalui pemindahan gugus fosfat dari phosphocreatine ke ADP yang dikatalisis oleh enzim kreatin kinase. Meskipun memiliki kapasitas terbatas, sistem phosphagen memiliki peran sangat penting dalam aktivitas eksplosif dan performa olahraga. Pemahaman mengenai sistem ini sangat penting dalam bidang fisiologi olahraga dan ilmu keolahragaan untuk optimalisasi latihan dan performa atlet.

BAB IV

Sistem Glikogen Asam Laktat (Sistem Glikolisis Anaerobik)

4.1 Pendahuluan

Sistem glikogen asam laktat atau sistem glikolisis anaerobik merupakan salah satu sistem penyedia energi utama dalam tubuh yang berperan penting pada aktivitas fisik berintensitas tinggi dengan durasi pendek hingga sedang. Sistem ini menghasilkan energi melalui pemecahan karbohidrat dalam bentuk glukosa atau glikogen tanpa memerlukan oksigen secara langsung, sehingga sering disebut sebagai sistem anaerobik laktat. Energi yang dihasilkan digunakan untuk meregenerasi adenosin trifosfat (ATP) guna mempertahankan kontraksi otot selama aktivitas berlangsung.

Sistem glikolisis memiliki kapasitas produksi energi yang lebih besar dibandingkan sistem phosphagen, namun kecepatannya lebih rendah. Sistem ini menjadi dominan pada aktivitas yang berlangsung sekitar 10 detik hingga 2 menit, seperti lari 400 meter, renang jarak pendek, atau aktivitas olahraga permainan dengan intensitas tinggi berulang. Produk akhir utama dari metabolisme anaerobik ini adalah asam laktat, yang terbentuk dari konversi piruvat ketika ketersediaan oksigen terbatas.

4.2 Konsep Dasar Sistem Glikolisis

Glikolisis merupakan jalur metabolisme yang terjadi di sitoplasma sel otot yang melibatkan pemecahan satu molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat melalui serangkaian reaksi enzimatik. Proses ini menghasilkan energi dalam bentuk ATP melalui fosforilasi tingkat substrat serta menghasilkan molekul pembawa elektron berupa NADH.

Dalam kondisi anaerob atau ketika kebutuhan energi melebihi kapasitas sistem aerobik, piruvat akan dikonversi menjadi laktat oleh enzim laktat dehidrogenase. Proses ini memungkinkan regenerasi NAD^+ sehingga glikolisis dapat terus berlangsung untuk menghasilkan ATP meskipun oksigen terbatas.

Sumber utama substrat dalam sistem ini adalah:

- Glukosa darah
- Glikogen otot

Pemecahan glikogen otot melalui proses glikogenolisis memberikan keuntungan karena menghasilkan ATP lebih banyak dibandingkan pemecahan glukosa bebas.

4.3 Tahapan Reaksi Glikolisis

Secara umum, proses glikolisis terdiri atas dua fase utama, yaitu fase investasi energi dan fase produksi energi.

1. Fase Investasi Energi

Pada tahap awal, sel menggunakan ATP untuk mengaktifkan molekul glukosa melalui proses fosforilasi sehingga terbentuk fruktosa-1,6-bifosfat. Tahap ini bertujuan untuk menyiapkan molekul agar dapat mengalami pemecahan lebih lanjut.

2. Fase Produksi Energi

Molekul fruktosa-1,6-bifosfat dipecah menjadi dua molekul triose fosfat yang kemudian mengalami serangkaian reaksi menghasilkan ATP dan NADH. Produk akhir dari proses ini adalah piruvat.

Dalam kondisi anaerob, piruvat dikonversi menjadi laktat sehingga memungkinkan regenerasi NAD^+ . Secara keseluruhan, glikolisis menghasilkan:

- a) 2 ATP dari glukosa
- b) 3 ATP dari glikogen otot
- c) 2 NADH
- d) 2 piruvat (atau laktat pada kondisi anaerob)

4.4 Pembentukan dan Peran Asam Laktat

Asam laktat merupakan produk metabolisme yang terbentuk ketika piruvat direduksi oleh NADH melalui enzim laktat dehidrogenase. Pembentukan laktat sebenarnya merupakan mekanisme adaptif yang penting karena memungkinkan proses glikolisis tetap berlangsung dalam kondisi kekurangan oksigen.

Laktat yang terbentuk tidak sepenuhnya bersifat merugikan. Molekul ini dapat:

- a) Digunakan kembali sebagai sumber energi oleh otot lain
- b) Dikonversi menjadi glukosa di hati melalui siklus Cori
- c) Digunakan sebagai substrat energi oleh jantung dan otak

Namun, akumulasi ion hidrogen yang menyertai pembentukan laktat dapat menurunkan pH otot sehingga menyebabkan sensasi nyeri dan kelelahan otot selama aktivitas intensitas tinggi.

4.5 Karakteristik Sistem Glikolisis Anaerobik

Sistem glikogen asam laktat memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a) Tidak memerlukan oksigen secara langsung
- b) Kecepatan produksi ATP sedang
- c) Kapasitas energi lebih besar dibanding sistem phosphagen

- d) Menghasilkan asam laktat sebagai produk metabolik
- e) Dominan pada aktivitas intensitas tinggi durasi pendek hingga sedang

Sistem ini menjadi jembatan antara sistem phosphagen yang sangat cepat namun terbatas dan sistem aerobik yang lambat namun berkapasitas besar.

4.6 Peran Sistem Glikolisis dalam Aktivitas Fisik dan Olahraga

Sistem glikolisis anaerobik sangat penting dalam berbagai aktivitas olahraga yang memerlukan kekuatan dan kecepatan tinggi dengan durasi sedang. Contoh aktivitas yang mengandalkan sistem ini meliputi:

- a) Lari 200–400 meter
- b) Renang jarak pendek hingga menengah
- c) Cabang olahraga permainan (sepak bola, basket, futsal, hoki)
- d) Bela diri
- e) Latihan interval intensitas tinggi

Dalam olahraga permainan, sistem ini berperan dalam aktivitas sprint berulang, perubahan arah cepat, serta gerakan eksplosif yang berlangsung lebih dari beberapa detik.

4.7 Kelelahan Otot dalam Sistem Glikolisis

Kelelahan otot pada aktivitas yang mengandalkan sistem glikolisis terutama disebabkan oleh:

- a) Akumulasi ion hidrogen (penurunan pH otot)
- b) Gangguan keseimbangan ion kalsium
- c) Penumpukan fosfat anorganik
- d) Penurunan cadangan glikogen otot

Penurunan pH otot dapat menghambat aktivitas enzim metabolik dan mengganggu proses kontraksi otot sehingga performa menurun.

4.8 Adaptasi Latihan terhadap Sistem Glikolisis

Latihan fisik yang melibatkan intensitas tinggi dapat meningkatkan kapasitas sistem glikolisis melalui beberapa adaptasi fisiologis, antara lain:

- a) Peningkatan aktivitas enzim glikolitik
- b) Peningkatan toleransi terhadap asam laktat
- c) Peningkatan kapasitas buffer otot
- d) Peningkatan cadangan glikogen otot

Adaptasi ini memungkinkan atlet mempertahankan performa pada intensitas tinggi lebih lama sebelum mengalami kelelahan.

4.9 Integrasi dengan Sistem Energi Lain

Sistem glikolisis tidak bekerja secara terpisah, melainkan berinteraksi dengan sistem phosphagen dan sistem aerobik. Pada awal aktivitas intensitas tinggi, sistem phosphagen menyediakan energi, kemudian sistem glikolisis mengambil alih ketika cadangan phosphagen menurun. Selanjutnya, sistem aerobik akan berperan lebih dominan jika aktivitas berlangsung lebih lama dengan intensitas yang lebih rendah.

4.10 Kesimpulan

Sistem glikogen asam laktat atau sistem glikolisis anaerobik merupakan sistem energi penting dalam aktivitas fisik berintensitas tinggi dengan durasi pendek hingga sedang. Sistem ini menghasilkan ATP melalui pemecahan karbohidrat tanpa memerlukan oksigen secara langsung, dengan asam laktat sebagai produk akhir metabolisme. Pemahaman mengenai sistem ini sangat penting dalam ilmu keolahragaan karena berkaitan erat dengan performa, kelelahan, serta adaptasi latihan fisik.

BAB V

Sistem Aerobik (Sistem Oksidatif)

5.1 Pendahuluan

Sistem aerobik atau sistem oksidatif merupakan sistem penyedia energi utama yang digunakan tubuh dalam aktivitas fisik berdurasi panjang dengan intensitas rendah hingga sedang. Sistem ini menghasilkan energi melalui proses oksidasi zat gizi makanan, terutama karbohidrat dan lemak, dengan menggunakan oksigen sebagai komponen utama dalam reaksi metabolisme. Energi yang dihasilkan berupa adenosin trifosfat (ATP) dalam jumlah besar, sehingga sistem aerobik memiliki kapasitas energi paling tinggi dibandingkan sistem phosphagen dan sistem glikolisis anaerobik.

Sistem oksidatif berlangsung di dalam mitokondria sel otot melalui serangkaian jalur metabolisme yang kompleks, yaitu glikolisis aerobik, pembentukan asetil-KoA, siklus asam sitrat (siklus Krebs), serta rantai transpor elektron (fosforilasi oksidatif). Keberadaan oksigen memungkinkan oksidasi substrat berlangsung secara sempurna sehingga menghasilkan ATP lebih banyak dengan produk sampingan berupa karbon dioksida dan air.

5.2 Konsep Dasar Sistem Oksidatif

Sistem oksidatif bekerja dengan memanfaatkan oksigen untuk mengoksidasi molekul nutrien menjadi energi. Proses ini melibatkan transfer elektron dari molekul substrat menuju rantai transpor elektron di mitokondria. Energi yang dilepaskan selama proses transfer elektron digunakan untuk membentuk gradien proton yang kemudian dimanfaatkan oleh enzim ATP sintase untuk menghasilkan ATP.

Sistem aerobik memiliki karakteristik utama sebagai berikut:

- a) Memerlukan oksigen
- b) Kecepatan produksi ATP relatif lambat
- c) Kapasitas energi sangat besar
- d) Tidak menghasilkan asam laktat dalam jumlah signifikan
- e) Dominan pada aktivitas jangka panjang

Sistem ini sangat penting dalam mempertahankan aktivitas fisik seperti lari jarak jauh, bersepeda, berenang jarak jauh, dan aktivitas sehari-hari.

5.3 Substrat Energi dalam Sistem Aerobik

Sistem oksidatif dapat menggunakan berbagai substrat energi, yaitu:

1. Karbohidrat

Karbohidrat dalam bentuk glukosa atau glikogen dipecah melalui glikolisis menjadi piruvat, kemudian dikonversi menjadi asetil-KoA yang memasuki siklus Krebs. Oksidasi karbohidrat menghasilkan ATP dengan efisiensi tinggi dan dapat berlangsung pada berbagai intensitas aktivitas.

2. Lemak

Lemak merupakan sumber energi terbesar dalam tubuh. Trigliserida dipecah menjadi asam lemak bebas melalui proses lipolisis, kemudian mengalami β -oksidasi di mitokondria menghasilkan asetil-KoA. Oksidasi lemak menghasilkan ATP lebih banyak dibandingkan karbohidrat, tetapi prosesnya lebih lambat sehingga dominan pada aktivitas intensitas rendah hingga sedang.

3. Protein

Protein dapat digunakan sebagai sumber energi dalam kondisi tertentu seperti puasa berkepanjangan atau aktivitas ekstrem. Asam amino mengalami deaminasi dan kerangka karbonnya memasuki siklus Krebs. Namun kontribusi protein relatif kecil dibandingkan karbohidrat dan lemak.

5.4 Tahapan Sistem Aerobik

Produksi energi dalam sistem oksidatif melibatkan beberapa tahapan utama:

1. Glikolisis Aerobik

Glukosa dipecah menjadi piruvat di sitoplasma. Dalam kondisi oksigen cukup, piruvat masuk ke mitokondria untuk proses selanjutnya.

2. Pembentukan Asetil-KoA

Piruvat mengalami dekarboksilasi oksidatif oleh kompleks piruvat dehidrogenase menghasilkan asetil-KoA, NADH, dan karbon dioksida.

3. Siklus Krebs (Siklus Asam Sitrat)

Asetil-KoA memasuki siklus Krebs menghasilkan NADH, FADH₂, dan GTP (yang dapat dikonversi menjadi ATP). Siklus ini merupakan pusat metabolisme energi karena menerima substrat dari karbohidrat, lemak, dan protein.

4. Rantai Transpor Elektron dan Fosforilasi Oksidatif

NADH dan FADH₂ membawa elektron menuju rantai transpor elektron di membran dalam mitokondria. Energi dari transfer elektron digunakan untuk membentuk gradien proton yang

mendorong sintesis ATP melalui ATP sintase. Tahap ini menghasilkan ATP dalam jumlah terbesar dalam metabolisme aerobik.

Secara keseluruhan, oksidasi satu molekul glukosa secara aerobik dapat menghasilkan sekitar 30–32 ATP, sedangkan oksidasi asam lemak menghasilkan ATP jauh lebih besar tergantung panjang rantai karbonnya.

5.5 Peran Sistem Aerobik dalam Aktivitas Fisik dan Olahraga

Sistem oksidatif menjadi dominan pada aktivitas fisik berdurasi panjang, seperti:

- a) Lari jarak jauh
- b) Bersepeda
- c) Renang jarak jauh
- d) Jalan cepat
- e) Aktivitas olahraga permainan dengan intensitas sedang

Pada aktivitas olahraga permainan, sistem aerobik berperan dalam pemulihan energi selama periode istirahat aktif di antara aktivitas intensitas tinggi. Oleh karena itu, kapasitas aerobik yang baik sangat penting untuk performa atlet secara keseluruhan.

5.6 Konsumsi Oksigen dan Kapasitas Aerobik

Kemampuan tubuh menggunakan oksigen untuk menghasilkan energi disebut kapasitas aerobik atau VO_2 max. Nilai VO_2 max mencerminkan kemampuan sistem kardiovaskular dan respirasi dalam mengantarkan oksigen ke otot serta kemampuan otot menggunakan oksigen tersebut untuk produksi energi.

Faktor yang mempengaruhi kapasitas aerobik meliputi:

- a) Genetik
- b) Tingkat kebugaran
- c) Usia
- d) Jenis kelamin
- e) Status latihan
- f) Komposisi tubuh

Latihan aerobik secara teratur dapat meningkatkan VO_2 max melalui adaptasi fisiologis seperti peningkatan jumlah mitokondria, kapilarisasi otot, volume darah, serta efisiensi jantung.

5.7 Adaptasi Latihan terhadap Sistem Aerobik

Latihan aerobik jangka panjang menyebabkan berbagai adaptasi fisiologis, antara lain:

- a) Peningkatan jumlah dan ukuran mitokondria
- b) Peningkatan aktivitas enzim oksidatif
- c) Peningkatan kapasitas oksidasi lemak
- d) Peningkatan kapilarisasi otot
- e) Peningkatan efisiensi sistem kardiovaskular
- f) Penurunan produksi laktat pada intensitas tertentu

Adaptasi ini memungkinkan tubuh menggunakan energi secara lebih efisien dan menunda terjadinya kelelahan selama aktivitas fisik.

5.8 Kelelahan dalam Sistem Aerobik

Kelelahan pada aktivitas aerobik umumnya disebabkan oleh:

- a) Penurunan cadangan glikogen otot dan hati
- b) Dehidrasi
- c) Ketidakseimbangan elektrolit
- d) Peningkatan suhu tubuh
- e) Faktor psikologis

Fenomena kelelahan akibat penurunan glikogen dikenal sebagai “hitting the wall” pada olahraga ketahanan seperti maraton.

5.9 Integrasi Sistem Energi

Sistem aerobik bekerja secara terintegrasi dengan sistem phosphagen dan sistem glikolisis anaerobik. Ketiga sistem energi selalu aktif secara bersamaan, namun kontribusinya berbeda tergantung intensitas dan durasi aktivitas. Sistem oksidatif menjadi dominan ketika aktivitas berlangsung lebih dari beberapa menit dengan intensitas moderat.

5.10 Kesimpulan

Sistem aerobik atau sistem oksidatif merupakan sistem energi dengan kapasitas terbesar yang menghasilkan ATP melalui oksidasi karbohidrat, lemak, dan protein dengan bantuan oksigen. Sistem ini berperan penting dalam aktivitas fisik jangka panjang, pemulihan energi, serta kesehatan metabolik secara keseluruhan. Pemahaman mengenai sistem aerobik sangat penting dalam ilmu keolahragaan untuk meningkatkan performa, daya tahan, serta efisiensi metabolisme tubuh.

BAB VI

Adenosin Trifosfat (ATP), Fungsi ATP dan Perannya sebagai Sumber Energi Aktivitas Muskular serta Molekul Pembawa Energi Sel Lainnya

6.1 Pendahuluan

Adenosin trifosfat (ATP) merupakan molekul energi utama dalam sistem biologis yang berperan sebagai “mata uang energi” sel. Seluruh aktivitas fisiologis, termasuk kontraksi otot, transport aktif membran, sintesis biomolekul, dan regulasi metabolisme, bergantung pada ketersediaan ATP. Dalam konteks aktivitas muskular, ATP memiliki peran yang sangat vital karena setiap proses kontraksi dan relaksasi otot secara langsung memerlukan energi yang berasal dari hidrolisis ATP. Tanpa ketersediaan ATP yang memadai, otot tidak mampu menghasilkan gaya maupun mempertahankan fungsi kontraktilnya.

Meskipun ATP merupakan sumber energi langsung bagi sel, konsentrasi ATP dalam tubuh relatif terbatas dan harus terus diregenerasi melalui berbagai jalur metabolisme energi seperti sistem phosphagen, glikolisis, dan sistem oksidatif. Oleh karena itu, pemahaman mengenai ATP

tidak hanya mencakup struktur dan fungsinya, tetapi juga mekanisme regenerasi serta interaksi dengan molekul pembawa energi lainnya dalam sel.

6.2 Struktur dan Karakteristik Adenosin Trifosfat (ATP)

ATP tersusun atas tiga komponen utama, yaitu:

- a) Basa nitrogen adenin
- b) Gula ribosa
- c) Tiga gugus fosfat berenergi tinggi

Ikatan antara gugus fosfat kedua dan ketiga merupakan ikatan fosfoanhidrida berenergi tinggi yang menyimpan energi kimia dalam jumlah besar. Ketika ATP mengalami hidrolisis menjadi adenosin difosfat (ADP) dan fosfat anorganik (Pi), energi dilepaskan dan dapat digunakan untuk berbagai proses biologis.

Reaksi hidrolisis ATP dapat dituliskan sebagai berikut:



Energi yang dilepaskan dari hidrolisis ATP berkisar sekitar 7,3 kkal/mol dalam kondisi standar biokimia, namun dalam kondisi fisiologis sel dapat lebih besar karena dipengaruhi oleh konsentrasi substrat dan produk.

6.3 Fungsi ATP dalam Aktivitas Muskular

ATP memiliki peran sentral dalam seluruh tahapan kontraksi dan relaksasi otot. Fungsi utama ATP dalam aktivitas muskular meliputi:

1. Siklus Jembatan Silang Aktin-Miosin

ATP diperlukan untuk melepaskan kepala miosin dari filamen aktin setelah terjadi kontraksi. Selanjutnya, hidrolisis ATP menyediakan energi untuk mengubah posisi kepala miosin sehingga siap melakukan kontraksi berikutnya.

2. Pompa Kalsium (Ca^{2+} -ATPase)

ATP digunakan untuk memompa ion kalsium kembali ke dalam retikulum sarkoplasma setelah kontraksi terjadi. Proses ini memungkinkan otot mengalami relaksasi dan siap untuk kontraksi selanjutnya.

3. Pompa Natrium-Kalium (Na^+/K^+ -ATPase)

ATP diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan ion melalui membran sel otot, yang penting dalam transmisi impuls saraf dan eksitabilitas otot.

4. Metabolisme Energi Otot

ATP juga digunakan dalam berbagai reaksi metabolisme yang mendukung produksi energi lanjutan selama aktivitas fisik.

Tanpa ketersediaan ATP, otot akan mengalami kekakuan permanen yang dikenal sebagai rigor, seperti yang terjadi pada kondisi rigor mortis setelah kematian.

6.4 Pentingnya ATP sebagai Sumber Energi Aktivitas Otot

ATP merupakan satu-satunya molekul yang dapat digunakan secara langsung untuk menyediakan energi bagi kontraksi otot. Tidak ada molekul lain yang dapat menggantikan peran ATP secara langsung dalam proses mekanokimia kontraksi otot. Oleh karena itu, keberlangsungan aktivitas muskular sepenuhnya bergantung pada kemampuan tubuh dalam mempertahankan regenerasi ATP secara kontinu.

Dalam aktivitas fisik, kebutuhan ATP dapat meningkat hingga ratusan kali lipat dibandingkan kondisi istirahat. Tubuh mampu memenuhi kebutuhan tersebut melalui integrasi tiga sistem energi utama, yaitu sistem phosphagen, glikolisis anaerobik, dan sistem oksidatif aerobik.

Kapasitas regenerasi ATP yang efisien sangat menentukan performa fisik seseorang. Atlet dengan kapasitas metabolisme energi yang baik mampu mempertahankan produksi ATP lebih lama sehingga memiliki daya tahan dan kekuatan yang lebih tinggi.

6.5 Molekul Pembawa Energi Selain ATP

Selain ATP, terdapat beberapa molekul lain yang berperan sebagai pembawa energi dalam sel. Molekul-molekul ini tidak digunakan secara langsung untuk kontraksi otot, tetapi berfungsi dalam transfer dan penyimpanan energi dalam proses metabolisme.

1. Adenosin Difosfat (ADP)

ADP merupakan produk hidrolisis ATP yang dapat diregenerasi kembali menjadi ATP melalui berbagai jalur metabolisme. Konsentrasi ADP dalam sel berperan sebagai sinyal penting dalam regulasi produksi energi.

2. Adenosin Monofosfat (AMP)

AMP terbentuk ketika dua molekul ADP bereaksi melalui enzim adenilat kinase. Peningkatan AMP menandakan kondisi kekurangan energi dalam sel dan mengaktifkan jalur metabolisme untuk meningkatkan produksi ATP.

3. Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD^+/NADH)

NAD^+ berperan sebagai koenzim pembawa elektron dalam reaksi oksidasi metabolik. NADH yang terbentuk membawa elektron menuju rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP dalam jumlah besar melalui fosforilasi oksidatif.

4. Flavin Adenine Dinucleotide (FAD/FADH₂)

FAD berfungsi mirip dengan NAD⁺ sebagai pembawa elektron dalam metabolisme energi, terutama dalam siklus Krebs dan β -oksidasi asam lemak.

5. Phosphocreatine (PCr)

Phosphocreatine merupakan cadangan energi berenergi tinggi dalam sel otot yang berfungsi untuk meregenerasi ATP secara cepat melalui reaksi kreatin kinase. Molekul ini sangat penting dalam aktivitas eksplosif.

6. Koenzim A (CoA)

Koenzim A berperan dalam transfer gugus asetil dalam metabolisme energi, terutama dalam pembentukan asetil-KoA yang memasuki siklus Krebs.

6.6 Regulasi Energi Seluler dan Rasio ATP

Status energi sel sering dinilai melalui rasio ATP, ADP, dan AMP yang dikenal sebagai energy charge. Rasio ini mengatur aktivitas enzim metabolik melalui mekanisme regulasi alosterik. Ketika ATP menurun dan ADP/AMP meningkat, jalur katabolisme akan diaktifkan untuk meningkatkan produksi energi.

Salah satu regulator penting adalah enzim AMP-activated protein kinase (AMPK) yang berfungsi sebagai sensor energi sel. Aktivasi AMPK merangsang peningkatan oksidasi glukosa dan lemak serta menghambat proses anabolik yang membutuhkan energi besar.

6.7 ATP dan Kelelahan Otot

Kelelahan otot berkaitan erat dengan ketidakseimbangan antara penggunaan dan regenerasi ATP. Penurunan ketersediaan ATP menyebabkan gangguan kontraksi otot, akumulasi metabolit, serta gangguan keseimbangan ion. Namun dalam kondisi fisiologis normal, ATP jarang benar-benar habis karena mekanisme kompensasi metabolik bekerja secara efisien.

Faktor utama kelelahan lebih sering disebabkan oleh:

- a) Penurunan phosphocreatine
- b) Akumulasi ion hidrogen
- c) Penurunan glikogen
- d) Gangguan regulasi ion kalsium

6.8 Kesimpulan

Adenosin trifosfat (ATP) merupakan molekul energi utama yang sangat penting dalam aktivitas muskular karena menjadi satu-satunya sumber

energi langsung untuk kontraksi otot. ATP berperan dalam siklus aktin-miosin, transport ion, serta regulasi metabolisme sel. Ketersediaan ATP bergantung pada sistem regenerasi energi melalui metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein. Selain ATP, terdapat berbagai molekul pembawa energi lain seperti ADP, AMP, NADH, FADH₂, dan phosphocreatine yang berperan dalam transfer energi di dalam sel. Pemahaman mengenai ATP dan molekul energi seluler sangat penting dalam ilmu biokimia dan fisiologi olahraga karena berkaitan langsung dengan performa fisik, adaptasi latihan, dan kesehatan metabolik.

BAB VII

STRUKTUR ATP DAN PROSES PEMBENTUKANNYA

7.1 Struktur Adenosin Trifosfat (ATP)

Adenosin trifosfat (ATP) merupakan molekul nukleotida berenergi tinggi yang berperan sebagai “mata uang energi” utama dalam sistem biologis. Struktur ATP tersusun atas tiga komponen utama, yaitu:

1. Adenine

Adenine adalah basa nitrogen golongan purin yang mengandung cincin heterosiklik dengan atom nitrogen. Komponen ini berfungsi sebagai bagian pengenalan molekul dalam berbagai reaksi biokimia serta berperan dalam pembentukan nukleotida lain seperti NAD⁺, FAD, dan koenzim A.

2. Ribosa

Ribosa merupakan gula pentosa (karbohidrat dengan lima atom karbon) yang menghubungkan basa nitrogen adenine dengan gugus fosfat. Kombinasi adenine dan ribosa membentuk struktur yang disebut adenosin.

3. Tiga Gugus Fosfat

ATP memiliki tiga gugus fosfat yang terikat secara berurutan melalui ikatan fosfoanhidrida berenergi tinggi. Ikatan antara fosfat kedua dan ketiga merupakan ikatan dengan energi bebas paling besar. Hidrolisis ATP menjadi ADP (adenosin difosfat) dan fosfat anorganik (Pi) menghasilkan energi sekitar 7,3 kkal/mol dalam kondisi fisiologis standar, yang digunakan untuk berbagai aktivitas seluler termasuk kontraksi otot, transport aktif membran, dan sintesis biomolekul.

Struktur kimia ATP memungkinkan molekul ini bersifat sangat reaktif namun stabil dalam kondisi fisiologis, sehingga efisien sebagai penyimpan dan penyalur energi biologis.

7.2 Prinsip Dasar Pembentukan ATP

Pembentukan ATP dalam sel terjadi melalui proses fosforilasi, yaitu penambahan gugus fosfat pada ADP. Secara umum terdapat tiga mekanisme utama pembentukan ATP dalam sistem biologis:

1. Fosforilasi Tingkat Substrat (Substrate-Level Phosphorylation)

Fosforilasi tingkat substrat merupakan proses pembentukan ATP secara langsung melalui pemindahan gugus fosfat dari molekul

substrat berenergi tinggi ke ADP. Mekanisme ini tidak memerlukan oksigen dan terjadi pada:

- Glikolisis di sitoplasma
- Siklus Krebs di matriks mitokondria

Contoh reaksi penting:

$\text{ADP} + \text{Fosfat berenergi tinggi} \rightarrow \text{ATP} + \text{Produk metabolik}$

Proses ini relatif cepat tetapi menghasilkan ATP dalam jumlah terbatas dibandingkan sistem oksidatif.

2. Fosforilasi Oksidatif (Oxidative Phosphorylation)

Fosforilasi oksidatif merupakan mekanisme utama pembentukan ATP dalam sel aerobik dan menghasilkan ATP dalam jumlah terbesar. Proses ini berlangsung di membran dalam mitokondria melalui beberapa tahap utama:

a. Rantai Transpor Elektron

Elektron dari NADH dan FADH_2 hasil metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein ditransfer melalui kompleks protein pada membran dalam mitokondria. Transfer elektron ini menghasilkan energi yang digunakan untuk memompa ion hidrogen (H^+) ke ruang antarmembran.

b. Gradien Proton dan Kemiosmosis

Akumulasi ion hidrogen menciptakan gradien elektrokimia yang kuat. Ion hidrogen kemudian mengalir kembali ke matriks mitokondria melalui enzim ATP synthase.

c. Sintesis ATP

Energi dari aliran proton digunakan oleh ATP synthase untuk menggabungkan ADP dengan fosfat anorganik menjadi ATP.

Secara keseluruhan, fosforilasi oksidatif menghasilkan sekitar 28–34 molekul ATP dari satu molekul glukosa, menjadikannya sistem produksi energi paling efisien dalam tubuh manusia.

3. Sistem Fosfagen (ATP–Phosphocreatine)

Selain dua mekanisme utama di atas, sel otot memiliki sistem regenerasi ATP yang sangat cepat melalui fosfokreatin. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim kreatin kinase:



Sistem ini sangat penting pada aktivitas intensitas tinggi berdurasi pendek seperti sprint dan angkat beban.

7.3 Integrasi Pembentukan ATP dari Zat Gizi

ATP dalam tubuh manusia berasal dari metabolisme tiga makronutrien utama:

- a) Karbohidrat → Glikolisis → Siklus Krebs → Rantai transpor elektron
- b) Lemak → Beta oksidasi → Asetil-KoA → Siklus Krebs
- c) Protein → Deaminasi → Intermediat metabolik → Siklus Krebs

Ketiga jalur tersebut bermuara pada produksi reduktan (NADH dan FADH₂) yang digunakan dalam fosforilasi oksidatif untuk menghasilkan ATP.

7.4 Signifikansi Biologis Pembentukan ATP

Pembentukan ATP merupakan proses fundamental bagi keberlangsungan kehidupan karena hampir seluruh aktivitas biologis bergantung pada energi dari hidrolisis ATP, antara lain:

- a) Kontraksi otot
- b) Transpor aktif ion melalui membran sel
- c) Sintesis protein dan asam nukleat
- d) Regulasi metabolisme
- e) Aktivitas sistem saraf

Dalam konteks fisiologi olahraga, kapasitas tubuh untuk menghasilkan ATP secara cepat dan efisien menentukan performa fisik, daya tahan, serta kemampuan pemulihan setelah aktivitas.

7.5 Kesimpulan

ATP merupakan molekul nukleotida berenergi tinggi yang tersusun atas adenine, ribosa, dan tiga gugus fosfat. Pembentukan ATP dalam sel terjadi melalui mekanisme fosforilasi tingkat substrat, fosforilasi oksidatif, serta sistem fosfagen. Integrasi metabolisme karbohidrat, lemak, dan protein memastikan ketersediaan ATP yang berkelanjutan untuk mendukung fungsi fisiologis dan aktivitas muskular. Oleh karena itu, ATP memiliki peran sentral sebagai penghubung antara nutrisi, metabolisme sel, dan performa biologis manusia.

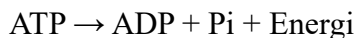
BAB VIII

ADENOSIN DIFOSFAT (ADP) DAN FOSFAT ANORGANIK (Pi)

8.1 Pengertian Adenosin Difosfat (ADP)

Adenosin difosfat (ADP) merupakan molekul nukleotida yang berperan sebagai bentuk antara dalam siklus energi seluler antara adenosin trifosfat (ATP) dan adenosin monofosfat (AMP). Secara struktural, ADP tersusun atas tiga komponen utama, yaitu basa nitrogen adenine, gula ribosa, dan dua gugus fosfat. ADP terbentuk melalui proses hidrolisis ATP ketika satu gugus fosfat terminal dilepaskan untuk menyediakan energi bagi aktivitas biologis sel.

Reaksi hidrolisis ATP yang menghasilkan ADP dapat dituliskan sebagai berikut:



Energi yang dilepaskan dari reaksi ini digunakan untuk berbagai proses fisiologis, termasuk kontraksi otot, transport aktif melalui membran sel, sintesis biomolekul, dan transmisi impuls saraf. Dengan demikian, ADP berfungsi sebagai molekul penerima energi yang akan diregenerasi kembali menjadi ATP melalui berbagai jalur metabolisme.

8.2 Pengertian Fosfat Anorganik (Pi)

Fosfat anorganik (Pi) merupakan gugus fosfat bebas yang dilepaskan selama hidrolisis ATP. Dalam sistem biologis, Pi biasanya berada dalam bentuk ion fosfat seperti H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-} tergantung pada kondisi pH fisiologis. Fosfat anorganik memiliki peran penting dalam metabolisme energi karena menjadi komponen utama dalam proses fosforilasi yang menghasilkan ATP.

Selain dalam pembentukan ATP, Pi juga berperan dalam berbagai proses metabolik lain, antara lain:

- a) Regulasi aktivitas enzim
- b) Sistem buffer dalam menjaga keseimbangan asam–basa
- c) Komponen struktur tulang dan gigi
- d) Metabolisme karbohidrat dan lipid
- e) Proses sinyal seluler melalui fosforilasi protein

8.3 Peran ADP dan Pi dalam Siklus Energi Seluler

ADP dan Pi merupakan komponen kunci dalam siklus energi seluler karena keduanya menjadi substrat utama dalam pembentukan kembali ATP. Proses regenerasi ATP dari ADP dan Pi dapat terjadi melalui beberapa mekanisme, yaitu:

1. Fosforilasi Tingkat Substrat

Terjadi pada jalur glikolisis dan siklus Krebs, di mana gugus fosfat dari molekul berenergi tinggi dipindahkan langsung ke ADP untuk membentuk ATP.

2. Fosforilasi Oksidatif

Terjadi di mitokondria melalui rantai transpor elektron dan kemiosmosis. Gradien proton yang terbentuk dimanfaatkan oleh enzim ATP synthase untuk menggabungkan ADP dan Pi menjadi ATP.

3. Sistem Fosfagen

Dalam sel otot, fosfokreatin dapat mentransfer gugus fosfatnya ke ADP untuk menghasilkan ATP secara cepat melalui bantuan enzim kreatin kinase.

Reaksi umum pembentukan ATP:



Ketersediaan ADP dan Pi dalam sel merupakan faktor penting yang menentukan kecepatan produksi ATP. Dalam kondisi aktivitas fisik intensitas tinggi, konsentrasi ADP dan Pi meningkat akibat pemecahan ATP, yang selanjutnya merangsang jalur metabolisme energi untuk mempercepat resintesis ATP.

8.4 ADP, Pi, dan Kontraksi Otot

Dalam fisiologi otot, siklus kontraksi dan relaksasi sangat bergantung pada interaksi antara ATP, ADP, dan Pi. Pada mekanisme kontraksi otot rangka, ATP dihidrolisis oleh enzim ATPase pada kepala miosin, menghasilkan ADP dan Pi yang tetap terikat sementara pada kompleks aktomiosin. Pelepasan Pi memicu perubahan konformasi kepala miosin yang menghasilkan gaya tarik (power stroke), sedangkan pelepasan ADP menandai akhir siklus kontraksi sebelum ATP baru berikatan kembali untuk memulai siklus berikutnya.

Namun demikian, akumulasi Pi yang berlebihan selama aktivitas intensitas tinggi dapat berkontribusi terhadap kelelahan otot karena dapat mengganggu pembentukan jembatan silang aktin–miosin serta menghambat pelepasan kalsium dari retikulum sarkoplasma.

8.5 Regulasi Metabolisme oleh ADP dan Pi

ADP dan Pi tidak hanya berperan sebagai substrat dalam pembentukan ATP, tetapi juga berfungsi sebagai molekul regulator metabolisme. Peningkatan konsentrasi ADP dalam sel menandakan meningkatnya kebutuhan energi sehingga merangsang jalur katabolisme

seperti glikolisis, siklus Krebs, dan fosforilasi oksidatif. Mekanisme ini dikenal sebagai kontrol respirasi atau respiratory control dalam mitokondria. Selain itu, rasio ATP/ADP merupakan indikator status energi sel. Rasio ATP yang tinggi menunjukkan kondisi energi cukup, sedangkan rasio ADP yang tinggi menunjukkan kebutuhan energi meningkat. Sistem regulasi ini memungkinkan sel menyesuaikan produksi energi dengan kebutuhan fisiologis secara efisien.

8.6 Signifikansi ADP dan Pi dalam Fisiologi Olahraga

Dalam konteks aktivitas fisik dan olahraga, dinamika ADP dan Pi memiliki implikasi penting terhadap performa dan kelelahan otot. Selama latihan intensitas tinggi:

- a) ATP dipecah dengan cepat menjadi ADP dan Pi
- b) Konsentrasi ADP meningkat, merangsang produksi ATP
- c) Akumulasi Pi berkontribusi terhadap penurunan kekuatan kontraksi
- d) Regenerasi ATP menentukan kapasitas kerja otot

Adaptasi latihan fisik, khususnya latihan daya tahan, dapat meningkatkan efisiensi mitokondria sehingga penggunaan ADP dan Pi dalam pembentukan ATP menjadi lebih optimal.

8.7 Kesimpulan

Adenosin difosfat (ADP) dan fosfat anorganik (Pi) merupakan komponen esensial dalam sistem energi biologis yang berperan dalam siklus hidrolisis dan resintesis ATP. ADP berfungsi sebagai molekul penerima energi, sedangkan Pi menjadi sumber gugus fosfat dalam proses fosforilasi. Interaksi dinamis antara ATP, ADP, dan Pi memungkinkan sel mempertahankan ketersediaan energi untuk mendukung aktivitas fisiologis, khususnya kontraksi otot dan performa fisik. Oleh karena itu, keberadaan ADP dan Pi tidak hanya penting sebagai produk pemecahan ATP, tetapi juga sebagai regulator utama metabolisme energi seluler.

BAB IX

HASIL PENGGABUNGAN ADP DAN Pi: IKATAN KIMIA BERENERGI TINGGI DALAM PEMBENTUKAN ATP

9.1 Konsep Dasar Penggabungan ADP dan Fosfat Anorganik (Pi)

Penggabungan adenosin difosfat (ADP) dengan fosfat anorganik (Pi) merupakan proses fundamental dalam bioenergetika sel yang menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) sebagai molekul penyimpan energi utama. Proses ini melibatkan pembentukan ikatan kimia berenergi tinggi yang dikenal sebagai ikatan fosfoanhidrida. Ikatan tersebut terbentuk antara gugus fosfat terminal dengan gugus fosfat yang telah ada pada molekul ADP, sehingga menghasilkan ATP sebagai produk akhir.

Reaksi umum yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat endergonik, yaitu membutuhkan input energi dari proses metabolisme seperti oksidasi zat gizi atau pemindahan gugus fosfat dari senyawa berenergi tinggi lainnya. Energi yang tersimpan dalam ikatan fosfoanhidrida ATP kemudian dapat dilepaskan kembali melalui proses hidrolisis untuk memenuhi kebutuhan energi seluler.

9.2 Hakikat Ikatan Kimia dalam ATP

Ikatan kimia yang terbentuk dalam ATP bukan sekadar ikatan kovalen biasa, melainkan ikatan dengan kandungan energi bebas tinggi. Secara kimiawi, terdapat dua jenis ikatan utama dalam molekul ATP:

1. Ikatan Fosfoester

Ikatan antara gugus fosfat pertama dengan ribosa termasuk dalam kategori fosfoester. Ikatan ini relatif stabil dan tidak berkontribusi besar terhadap pelepasan energi.

2. Ikatan Fosfoanhidrida

Ikatan antara gugus fosfat kedua dan ketiga merupakan ikatan fosfoanhidrida yang memiliki energi bebas tinggi. Ikatan inilah yang sering disebut sebagai “ikatan energi tinggi” karena ketika mengalami hidrolisis akan melepaskan energi dalam jumlah besar yang dapat digunakan oleh sel.

Tingginya energi bebas pada ikatan fosfoanhidrida disebabkan oleh beberapa faktor molekuler, antara lain:

- a) Tolakan elektrostatik antar gugus fosfat bermuatan negatif
- b) Stabilitas produk hidrolisis yang lebih tinggi dibandingkan reaktan
- c) Resonansi struktur pada fosfat anorganik yang terbentuk
- d) Peningkatan entropi sistem setelah hidrolisis

Dengan demikian, energi yang dilepaskan bukan berasal dari pemutusan ikatan itu sendiri, tetapi dari perubahan keadaan energi sistem secara keseluruhan menuju kondisi yang lebih stabil.

9.3 Mekanisme Pembentukan Ikatan ATP dalam Sel

Pembentukan ikatan berenergi tinggi pada ATP terjadi melalui aktivitas enzimatik, terutama oleh enzim ATP synthase di mitokondria. Mekanisme ini melibatkan beberapa tahapan:

1. Penyediaan Energi

Energi diperoleh dari oksidasi zat gizi seperti karbohidrat, lemak, dan protein melalui jalur metabolisme seluler.

2. Pembentukan Gradien Proton

Energi dari rantai transpor elektron digunakan untuk memompa ion hidrogen ke ruang antarmembran mitokondria, membentuk gradien elektrokimia.

3. Sintesis ATP

Aliran kembali proton melalui ATP synthase menyediakan energi mekanik untuk menggabungkan ADP dan P_i , membentuk ATP dengan ikatan fosfoanhidrida berenergi tinggi.

Selain mekanisme fosforilasi oksidatif, pembentukan ATP juga dapat terjadi melalui fosforilasi tingkat substrat di sitoplasma dan matriks mitokondria.

9.4 Energi Kimia sebagai Penggerak Aktivitas Biologis

Ikatan kimia berenergi tinggi dalam ATP berfungsi sebagai penyimpan energi sementara yang dapat dengan cepat digunakan oleh sel. Energi tersebut diperlukan untuk berbagai aktivitas biologis, antara lain:

- a) Kontraksi otot melalui interaksi aktin dan miosin
- b) Transport aktif ion melalui membran sel
- c) Sintesis protein dan asam nukleat
- d) Aktivitas enzimatik
- e) Regulasi metabolisme seluler
- f) Transmisi impuls saraf

Dalam sistem otot, hidrolisis ATP menghasilkan ADP dan P_i yang tetap berikatan sementara dengan kepala miosin sebelum dilepaskan selama proses kontraksi. Oleh karena itu, pembentukan dan pemutusan ikatan kimia ATP berlangsung secara siklik dan berkelanjutan selama aktivitas fisik.

9.5 Signifikansi Fisiologis Ikatan Energi Tinggi

Kemampuan tubuh untuk membentuk kembali ikatan berenergi tinggi antara ADP dan Pi menentukan kapasitas kerja sel, terutama sel otot yang memiliki kebutuhan energi sangat tinggi. Dalam kondisi istirahat, produksi ATP berlangsung seimbang dengan penggunaannya. Namun, selama aktivitas fisik intensitas tinggi, laju pemecahan ATP meningkat secara drastis sehingga sistem metabolisme harus bekerja cepat untuk meregenerasi ATP. Efisiensi pembentukan ikatan fosfoanhidrida ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a) Ketersediaan oksigen
- b) Cadangan substrat energi
- c) Kapasitas mitokondria
- d) Aktivitas enzim metabolik
- e) Tingkat kebugaran individu

Latihan fisik jangka panjang dapat meningkatkan jumlah mitokondria dan efisiensi sistem fosforilasi oksidatif, sehingga kemampuan pembentukan ATP meningkat.

9.6 Kesimpulan

Penggabungan ADP dan fosfat anorganik (P_i) menghasilkan ATP melalui pembentukan ikatan kimia berenergi tinggi berupa ikatan fosfoanhidrida. Ikatan ini merupakan mekanisme utama penyimpanan energi dalam sel yang dapat dilepaskan kembali untuk mendukung berbagai aktivitas biologis. Proses pembentukan dan pemutusan ikatan ATP berlangsung secara dinamis dan berkelanjutan, menjadikan ATP sebagai pusat penghubung antara metabolisme zat gizi dan fungsi fisiologis tubuh, khususnya dalam aktivitas muskular.

BAB X

HIDROLISIS ATP OLEH ENZIM ATPase: HASIL REAKSI DAN PEMANFAATAN ENERGI

10.1 Peran Enzim ATPase dalam Metabolisme Energi

Enzim ATPase merupakan kelompok enzim yang berfungsi mengkatalisis reaksi hidrolisis adenosin trifosfat (ATP) menjadi adenosin difosfat (ADP) dan fosfat anorganik (Pi) disertai pelepasan energi bebas. ATPase terdapat pada berbagai lokasi seluler, termasuk membran plasma, mitokondria, retikulum sarkoplasma, serta struktur kontraktile otot (miosin ATPase). Aktivitas enzim ini sangat penting karena memungkinkan energi kimia yang tersimpan dalam ikatan fosfoanhidrida ATP dapat digunakan secara langsung untuk menjalankan fungsi fisiologis.

Reaksi hidrolisis ATP yang dikatalisis ATPase dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi ini bersifat eksergonik, yaitu melepaskan energi yang dapat dimanfaatkan sel untuk berbagai aktivitas biologis yang memerlukan kerja mekanik, transport, maupun sintesis molekul.

10.2 Hasil Pemecahan ATP oleh ATPase

Apabila enzim ATPase memecah ATP, maka dihasilkan tiga komponen utama:

1. Adenosin Difosfat (ADP)

ADP merupakan molekul nukleotida berenergi lebih rendah dibandingkan ATP dan akan diregenerasi kembali menjadi ATP melalui proses metabolisme seluler seperti fosforilasi oksidatif, fosforilasi tingkat substrat, atau sistem fosfagen.

2. Fosfat Anorganik (P_i)

Fosfat anorganik yang dilepaskan berperan dalam berbagai reaksi metabolik serta dapat mempengaruhi regulasi kontraksi otot dan keseimbangan asam–basa dalam sel.

3. Energi Bebas

Energi yang dilepaskan dari hidrolisis ATP berkisar sekitar 7,3 kkal/mol dalam kondisi fisiologis standar, meskipun dalam sel hidup nilainya dapat lebih besar tergantung kondisi konsentrasi ATP, ADP, dan P_i . Energi inilah yang menjadi sumber tenaga langsung bagi aktivitas sel.

10.3 Pemanfaatan Energi Hasil Hidrolisis ATP

Energi yang dilepaskan dari pemecahan ATP oleh ATPase digunakan untuk berbagai proses biologis penting, antara lain:

1. Kontraksi Otot (Kerja Mekanik)

Dalam sel otot, enzim miosin ATPase memecah ATP yang terikat pada kepala miosin. Energi yang dihasilkan menyebabkan perubahan konformasi kepala miosin sehingga terjadi gerakan menarik filamen aktin (power stroke). Proses ini menghasilkan kontraksi otot. Tanpa ATP, jembatan silang aktin–miosin tidak dapat dilepaskan, yang menjelaskan fenomena kekakuan otot setelah kematian (rigor mortis).

2. Transport Aktif Melalui Membran Sel

Energi ATP digunakan oleh pompa ion seperti Na^+/K^+ -ATPase dan Ca^{2+} -ATPase untuk memindahkan ion melawan gradien konsentrasi. Mekanisme ini penting dalam:

- a) Mempertahankan potensial membran sel saraf dan otot
- b) Regulasi volume sel
- c) Pengaturan konsentrasi kalsium selama kontraksi dan relaksasi otot

3. Sintesis Biomolekul (Kerja Kimia)

Banyak reaksi biosintesis memerlukan energi dari ATP, seperti:

- a) Sintesis protein
- b) Sintesis DNA dan RNA
- c) Sintesis glikogen
- d) Sintesis lipid

ATP berfungsi sebagai donor energi sekaligus donor gugus fosfat dalam reaksi tersebut.

4. Produksi Panas (Termogenesis)

Sebagian energi hasil hidrolisis ATP tidak seluruhnya diubah menjadi kerja mekanik atau kimia, tetapi dilepaskan dalam bentuk panas. Panas ini berperan dalam menjaga suhu tubuh, terutama selama aktivitas fisik.

5. Aktivitas Sistem Saraf

Energi ATP diperlukan untuk:

- a) Transmisi impuls saraf
- b) Pelepasan neurotransmitter
- c) Pemulihan gradien ion setelah potensial aksi

Dengan demikian, fungsi sistem saraf sangat bergantung pada ketersediaan ATP.

10.4 Hubungan ATPase dengan Kinerja Fisik

Dalam fisiologi olahraga, aktivitas ATPase meningkat secara signifikan selama latihan intensitas tinggi karena kebutuhan energi meningkat. Kecepatan pemecahan ATP menentukan kemampuan otot menghasilkan gaya dan kecepatan kontraksi. Atlet dengan kapasitas enzim ATPase yang lebih tinggi umumnya memiliki kemampuan performa yang lebih baik pada aktivitas eksplosif.

Namun, apabila pemecahan ATP berlangsung lebih cepat dibandingkan resintesisnya, maka akan terjadi kelelahan otot akibat:

- a) Penurunan cadangan ATP
- b) Akumulasi ADP dan Pi
- c) Gangguan keseimbangan ion
- d) Penurunan efisiensi kontraksi

10.5 Kesimpulan

Pemecahan ATP oleh enzim ATPase menghasilkan ADP, fosfat anorganik (Pi), dan energi bebas yang digunakan untuk menjalankan berbagai aktivitas biologis. Energi tersebut dimanfaatkan untuk kontraksi otot, transport aktif membran, sintesis biomolekul, produksi panas, serta aktivitas sistem saraf. Oleh karena itu, ATP dan enzim ATPase memiliki

peran sentral dalam mempertahankan fungsi fisiologis dan performa fisik manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- ACSM's Advanced Exercise Physiology. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2019). *Biochemistry* (9th ed.). New York: W.H. Freeman.
- Brooks, G. A., Fahey, T. D., & Baldwin, K. M. (2005). *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. Philadelphia: Elsevier.
- Hall, J. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (14th ed.). Philadelphia: Elsevier.
- Harper's Illustrated Biochemistry. New York: McGraw-Hill Education.
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2020). *Physiology of Sport and Exercise* (7th ed.). Human Kinetics.
- Lehninger Principles of Biochemistry. New York: W.H. Freeman.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance* (8th ed.). Wolters Kluwer.
- Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2018). *Harper's Illustrated Biochemistry* (31st ed.). New York: McGraw-Hill Education.

- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger Principles of Biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman.
- Powers, S. K., & Howley, E. T. (2018). *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Rodwell, V. W., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., & Weil, P. A. (2021). *Harper's Illustrated Biochemistry* (32nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2021). *Principles of Anatomy and Physiology* (16th ed.). Hoboken: Wiley.