

1. O MERSKIH SISTEMIH IN ENOTAH

1.1 SISTEMI MER

1.1.1 Giorgijev sistem mer

V tej knjigi uporabljamo za mere Giorgijev¹ sistem ali sistem MKSA (meter, kilogram, sekunda, amper). V tem sistemu so osnovne enote:

za dolžino	meter	m
za čas	sekunda	s
za maso	kilogram	kg
za električni tok	amper	A

kg je masa normnega kilograma, ki se hrani pri "Bureau International des Poids et Mesures" v Sevresu pri Parizu.

Za potrebe termodinamike je tem enotam dodana še osnovna enota:

za temperaturo	Kelvin	K
----------------	--------	---

To enoto bomo na kratko imenovali kar **kelvin**.

Iz teh osnovnih enot se dajo izvesti enote za vse ostale fizikalne veličine. N.pr. za silo po enačbi:

$$F = m a \quad (1.1)$$

Enota sile je tista sila, ki daje enoti mase 1 kg enoto pospeška 1 m s^{-2} .

Ta enota sile se imenuje **newton**² N:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg ms}^{-2}$$

¹ Giovanni Giorgi, (1871-1950), iz italijanskega mesta Lucca, profesor Cagliari, Palermo, Rim. Predložil je v začetku stoletja nov sistem mer, ki ga je dokončno sprejela 9. generalna konferenca za mere in uteži v Parizu l. 1948.

² Sir Isaac Newton, (1643-1727), angleški fizik

Enoto dela izvajamo iz enačbe:

$$W = F s \quad (1.2)$$

Enota dela je delo, ki ga opravi enota sile 1 N na enoti poti 1 m; ta enota dela se imenuje **joule J**:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$$

Na podoben način izvajamo še ostale enote.

Vse enote Giorgijevega sistema se dajo izvesti iz definicijskih enačb brez posebnih številčnih faktorjev – ali bolje rečeno s številčnim faktorjem 1. Vse enote Giorgijevega sistema so torej **koherentne** enote. To je največja prednost tega sistema mer.

Giorgijev sistem mer je mednarodno priporočen in pri nas uzakonjen.

1.1.2 Veličinske enačbe

Enačbe v tej knjigi so načelno pisane kot veličinske enačbe. Veličinske enačbe so take matematične povezave med fizikalnimi veličinami, katerih oblika je neodvisna od sistema mer; pogoj je le, da so enote v samem sistemu mer koherentne. Na redka odstopanja od veličinske pisave enačb bomo posebno opozarjali.

1.1.3 Tehniški sistem mer

Prej se je v strojniški praksi izključno uporabljal tehniški sistem mer; ta se tudi danes še pogosto rabi. Osnovne enote mer v tehniškem sistemu so:

za dolžino	meter	m
za čas	sekunda	s
za silo	kilopond	kp

Namesto imena **kilopond kp** za enoto sile, je bilo prej v rabi ime **kilogram kg**. Kilopond je sila teže normnega kiloponda, ki se hrani v Sévresu pri Parizu; kilopond je torej **sila**, s katero **normni kilopond** pritiska na podlago.

Prototip kiloponda je identičen s prototipom kilograma.

1.1.4 Fizikalni sistem mer

Poleg Giorgijevega sistema mer in tehniškega sistema mer obstoji še fizikalni sistem mer, ki se ga poslužujejo predvsem v teoretični fiziki. Osnovne enote tega sistema so:

za dolžino	centimeter	cm
za čas	sekunda	s
za maso	gram	g

Tudi fizikalni sistem ima posebno enoto:

za temperaturo	kelvin	K
----------------	--------	---

1.2 RAZLIKE MED SISTEMI MER

Prva razlika med sistemi je v tretji osnovni enoti. Medtem ko je tretja osnovna veličina, ki daje osnovno enoto, v Giorgijevem in v fizikalnem sistemu **masa**, je v tehniškem sistemu mer tretja osnovna veličina **sila**.

Bistveno pa se tehniški sistem mer razlikuje od Giorgijevega in od fizikalnega po tem, kako se v njem meri količina snovi. Velikokrat se količina snovi enostavno poistoveti z vztrajnostno maso, ki pripada tej snovi. Upor proti spremembam hitrosti – to je namreč masa – pa je samo **lastnost** snovi, nikakor pa ne njena **količina**. Taka lastnost snovi je tudi teža. Izenačevanje mase in količine snovi, ki je verjetno le posledica splošne predstave, vezane na besedo masa, je povzročilo veliko zmedo v uporabi in v presoji sistemov mer. V resnici zaenkrat sploh nimamo posebne mere, niti posebne merske enote za količino snovi. Za meritev količine snovi lahko služi vsaka druga, njej proporcionalna fizikalna veličina. Tako uporablja tehniški sistem mer za izražanje in meritev količine snovi **silo**, s katero v polju zemeljske težnosti snov pritiska na svojo podlago, in tej sili pravimo teža. Teža torej ni količina snovi, temveč samo izraža ali zastopa to količino. Enota te sile se danes imenuje kilopond, prej pa se je imenovala kilogram.

Fizikalni in po njegovem zgledu Giorgijev sistem mer pa gresta drugo pot in izražata količine snovi s pripadnimi vztrajnimi masami. Enota za te mase je gram oziroma kilogram!

Kilopond – sila in kilogram – masa sta definirani kot lastnosti iste količine snovi, namreč prototipa v Sévresu. Metoda meritve količine snovi v tehniškem sistemu je v načelu prav tako pravilna ali pa napačna kakor metoda iste meritve v fizikalnem sistemu. Oba sistema sta v sebi pravilno sklenjena in brez notranjih nasprotij. Nerodnost, ki je nastala zaradi različnega pomena besed gram oziroma kilogram (v fizikalnem in Giorgijevem sistemu za maso, v tehniškem za silo), je bila odpravljena z novo besedo kilopond za enoto sile.

Tehniški sistem mer pa ima eno nesrečo in eno nerodnost, ki sta zanj usodni. Enota mase, ki je seveda zelo pomembna fizikalna lastnost, nima v tehniškem sistemu posebnega imena. To je nesreča.

Snovi, ki ima težo G , pripada masa m po enačbi:

$$m = G/g$$

kjer je g zemeljski pospešek. Enota mase v tehniškem sistemu je tedaj:

$$1 \text{ kp/g}$$

Ko je, predvsem pod vplivom fizike, prevladalo mnenje, da je bolj pravilno izražati količino snovi z njeno maso, ni mogel tehniški sistem ponuditi za to ustrezne enote z že uvedenim in udomačenim imenom.

Nerodnost tehniškega sistema je zemeljski pospešek g , ki veže težo z maso. Ta pospešek je spremenljiv že na sami zemeljski površini. Ta spremenljivost sicer ni velika, ali vendar obstaja. g se spreminja z nadmorsko višino in z zemeljsko širino; celo nekateri čisto lokalni vplivi, n.pr. večja ležišča težjih rudnin, vplivajo na velikost zemeljskega pospeška. Izven zemeljske površine je seveda spremenljivost g večja: g pada z razdaljo od Zemlje. Vpliv te spremenljivosti se da odstraniti z določitvijo neke **normne** vrednosti zemeljskega pospeška g_n . S to normno vrednostjo pospeška g lahko enoznačno povežemo **normno** težo z maso pripadne količine snovi. V smislu Einsteinove¹ teorije relativnosti tudi vztrajna masa ni absolutna konstanta, temveč odvisna od hitrosti. Moramo pa priznati, da je konstantnost mase nekako "višjega reda" kot konstantnost teže. Nerodno pa je predvsem to, da v tehniškem sistemu mer masa in sila nista povezani z enoto pospeška, ki je:

¹ Albert Einstein, (1879-1955), teoretski fizik, Nobelov nagrajenec 1921

$$1 \text{ ms}^{-2}$$

temveč z normnim zemeljskim pospeškom:

$$g_n = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$$

Od tod prihaja pogostna navzočnost veličine g v enačbah, ki so pisane za tehniški sistem mer. To prav gotovo kazi ta sistem in deloma ustvarja težave pri delu s tem sistemom. Vendar so te težave malenkostne, kakor to dokazuje dolgoletna praksa.

V splošnem se lahko trdi, da je tehniški sistem mer kar dober. Odkar je bila odstranjena označba sile z besedo kilogram in nadomeščena z besedo kilopond, je izginil tudi ta kamen spotike. Če bi bilo ostalo samo pri tej spremembi, bi se dal tehniški sistem mer, ki je vendar tradicionalno močno zasidran, verjetno še kar uspešno braniti.

Zgodilo pa se je nekaj s psihološkega stališča zelo zanimivega. Z uvedbo besede kilopond je v tehniškem sistemu postala razpoložljiva beseda kilogram in s to besedo je vdrla v tehniški sistem njemu tuja kilogramska masa kot enota za vztrajno maso. Sledeč moderne nazore, se je, deloma tudi z zakonodajo, dekretiralo, da se mora količina snovi tudi v tehniškem sistemu izražati z njeno vztrajno maso. Ta operacija je potekala tako, da je bila prevzeta iz Giorgijevega sistema mer kilogramska masa kot enota za količino snovi. Ta prevzem je bil videti posebno posrečen in praktičen, ker so številčne vrednosti vseh specifičnih lastnosti snovi ostale nespremenjene in iste kakor prej, ko se je količina snovi izražala s kilogramsko oziroma kilopondsko težo. S tem pa sta se v tehniškem sistemu naenkrat pojavili dve enoti za maso. In sicer stara enota za vztrajno maso m_i , definirana z enačbo:

$$m_i = G/g_n \quad (1.3)$$

To je koherentna masa sistema, kateri daje sila 1 kp pospešek 1 ms^{-2} . Ta enota mase se mora uporabljati pri vseh dinamičnih problemih.

Kot drugo enoto mase pa smo dobili v tehniški sistem kilogram. Ta enota mase m_m služi za merjenje snovi in tako predvsem za definicijo specifičnih lastnosti. Z maso m_i pa je povezana takole:

$$m_i = 9,81 m_m$$

Masa m_m ni koherentna v tehniškem sistemu mer, kateremu je meritev količine snovi z njeno maso tuja. Z uvedbo kilografske mase v tehniški sistem mer je nastala nepopisna zmešnjava, v kateri se celo specialist komaj znajde. Predvsem so enačbe, v katerih nastopajo obenem sile in lastnosti snovi v stari udomačeni pisavi, večinoma izgubile dimenzijsko pravilnost in bi se morale uvesti nove pisave. Tu so zlasti prizadete brezdimenzijske značajke in podobno. Stanje v tehniškem sistemu mer je postalo tako zmedeno, da je edini izhod čimprejšen popoln prehod na Giorgijev sistem MKSA.

Giorgijev sistem mer pa ima še to veliko odliko, da izenačuje na polju mer in meritev jezik strojnega inženirja z jezikom fizika in tudi elektroinženirja. Spričo naglega razvoja teoretične fizike, zlasti v novjšem času, in spričo hitrosti, s katero se novi izsledki fizike prenašajo tudi v strojno tehniko, utegne taka enotnost zelo koristiti.

Vse to je razlog, da se je avtor te knjige odločil izključno uporabljati Giorgijev sistem mer.

Staremu tehniškemu sistemu mer pa ohranimo dolžno spoštovanje, saj je tako dolgo koristno in uspešno služil inženirjem in je omogočil velika tehniška dela. Vkljub "izključni" uporabi novega sistema mer pa bomo imeli še dolgo opravka s starim sistemom. Veliko število osnovnih del naše stroke je pisano v tehniškem sistemu mer; predvsem velja to za ogromen številčni material o lastnostih snovi in gradiv in mnogo podobnega.

Računali bomo na udoben način z veličinskimi enačbami in s koherentnimi enotami Giorgijevega sistema mer.

Številčne vrednosti za različne veličine pa bomo še prav pogosto morali jemati iz podatkov v tehniškem sistemu mer ali pa tudi iz nemeterskih sistemov, n.pr. iz anglosaksonskega. Take vrednosti bomo vedno preračunali v koherentne enote sistema – MKSA in jih šele tako preračunane vstavili v enačbe.

V tabeli 1.1 so sestavljene osnovne enote fizikalnega, tehniškega in Giorgijevega sistema mer – MKSA.

V tabelah 1.2, 1.3, 1.4 in 1.5 pa so podani faktorji za preračunavanje enot enega sistema v druge sisteme. Količine, izražene v enotah iz prve kolone, pomnožimo s faktorji, ki se nahajajo v vrsti te enote. Tako dobimo veličino, izraženo v enotah, napisanih na vrhu kolone uporabljenega faktorja.

Tabela 1.1: Nekatere enote sistemov mer
(Osnovne enote so podčrtane)

	fizikalni sistem	tehniški sistem	sistem – MKSA
dolžina	<u>cm</u>	<u>m</u>	<u>m</u>
čas	<u>s</u>	<u>s</u>	<u>s</u>
masa	<u>g</u>	$\text{kpm}^{-1}\text{s}^2$	<u>kg</u>
sila	$\text{g cm s}^{-2} = \text{dyn}$	<u>kp</u>	N
količina snovi	<u>g</u>	<u>kp</u>	<u>kg</u>
energija	$\text{g cm}^2 \text{s}^{-2} = \text{erg}$	kp m	N m = J

Tabele za preračunavanje enot različnih merskih sistemov:

Tabela 1.2: Sila

Enota	N	kp	lb
N	1	0,10197	0,2247
kp	9,80665	1	2,2046
lb	4,45	0,4536	1

Tabela 1.3: Tlak

Enota	bar	kp/cm ² = at	Torr	atm = 760 Torr	lb/sq.in
1 bar = 10 ⁵ N/m ²	1	1,0197	750,06	0,98692	14,5038
1 kp/cm ²	0,9807	1	735,56	0,96784	14,223
1 Torr = 1 mm Hg (0°C)	1,333·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	1	1,3158·10 ⁻³	0,01934
1 atm	1,01325	1,03323	760	1	14,696
1 lb/sq.in	0,06895	0,07031	51,715	0,06806	1

Tabela 1.4: Energija

Enota	J	kp m	kcal	kW h	Btu
1 J = 10 ⁷ erg = 1 Nm = = 1 Ws = 1 kg m ² /s ²	1	0,101972	2,38844·10 ⁻⁴	2,77778·10 ⁻⁷	9,47817·10 ⁻⁴
1 kpm	9,80665	1	2,34228·10 ⁻³	2,72407·10 ⁻⁶	9,29491·10 ⁻³
1 kcal	4186,8	426,935	1	1,16300·10 ⁻³	3,96832
1 kWh	3,6·10 ⁶	3,670978·10 ⁵	859,845	1	3,41214·10 ³
1 Btu	1,055056·10 ³	1,075857·10 ²	0,251996	2,93071·10 ⁻⁴	1

Tabela 1.5: Specifična toplota

Enota	J/kg K	kcal/kg K	Btu/lb.deg
1 J/kg K	1	2,38844·10 ⁻⁴	2,38844·10 ⁻⁴
1 kcal/kg K	4186,8	1	1
1 Btu/lb.deg	4186,8	1	1

OZNAČEVANJE VELIČIN

Simbol	Ime	Koherentna enota v sistemu MKSA
A	– površina	m^2
	– pepel	–
	– atomska masa, masno število	–
a	– pospešek	m/s^2
	– specifični prerez	$\text{m}^2\text{s/kg}$
aq	– vlaga, količina H_2O	–
b	– kovolumen	–
C	– toplotna kapaciteta	J/K
c	– specifična toplota	J/kg K
D	– količina dimnih plinov	–
d	– premer	–
	– eksergija	J
e	– specifična eksergija	J/kg
F	– sila	N
f	– faktor	–
G	– teža	N
	– termodinamična verjetnost	–
	– količina goriva	–
g	– zemeljski pospešek	m/s^2
H	– entalpija	J
	– kurilnost	$\text{J/kg}, \text{J/nm}^3$
h	– specifična entalpija	J/kg
	– višina	m
I	– jakost električnega toka	A

J	–	vztrajnostni moment	$\text{N m s}^2, \text{ kg m}^2$
j	–	eksponent splošne politrope	–
K	–	kohezijska sila	–
	–	količina kurilnega sredstva	–
k	–	Boltzmanova konstanta	–
M	–	masa, molska masa	kmol
$\bar{M}$	–	molno razmerje	–
m	–	masa	kg
	–	eksponent	–
$\bar{m}$	–	razmerje mas	–
$\dot{m}$	–	masni pretok	kg/s
N	–	število molekul	–
N_L	–	Loschmidtovo število	1/kmol
n	–	količina dušika	–
	–	eksponent	–
	–	količina neizgorelega	–
o	–	količina kisika	–
P	–	količina pare	–
	–	moč	$\text{N m/s}, \text{ W}$
	–	količina pepela	–
p	–	tlak	N/m^2
Q	–	toplota	J
R	–	plinska konstanta	J/kg K
R_μ	–	splošna plinska konstanta	J/kmol K
r	–	uparjalna toplota; up. energija	J/kg
r_a	–	energija agregatnih preobrazb	J/kg
S	–	entropija	J/K
s	–	specifična entropija	J/kg K
	–	pot	m
T	–	termodinamična temperatura	K

t	–	čas	s
U	–	napetost električnega toka	V
	–	notranja energija	J
$\bar{U}$	–	stanje notranje energije	–
u	–	specifična notranja energija	J/kg
$\bar{u}$	–	specifično stanje notranje energije	–
V	–	volumen	m ³
	–	voda	–
v	–	specifični volumen	m ³ /kg
$\bar{v}$	–	volumensko razmerje	–
W	–	delo, energija	J
w	–	hitrost	m/s
x	–	vlažnost zraka	kg/kg
	–	spremenljivka	–
	–	vsebina pare, suhost	kg/kg
y	–	spremenljivka	–
Z	–	količina zraka	kg, nm ³
z	–	količina kapljevitega zraka	kg/kg
	–	spremenljivka	–
Z_m	–	število mikrostanj	–
	–	tlačno razmerje	–
	–	kompresijsko razmerje	–
	–	hladilno število	–
	–	razmernik škodljivega prostora	–
η	–	dinamična viskoznost	N s/m ² , kg/m s
	–	energetski izkoristek	–
ζ	–	eksergetski izkoristek	–
ϑ	–	temperatura	°C
κ	–	faktor realnosti	–
$\kappa = c_p/c_v$	–	razmerje specifičnih toplot	–

λ	—	razmernik zraka	—
μ	—	polnilno razmerje	—
	—	molekularna masa	—
ν	—	kinematična viskoznost	m^2/s
ξ	—	kurilno število	—
	—	potisno razmerje	—
π	—	reducirani tlak	—
ρ	—	gostota	kg/m^3
	—	notranja uparjalna toplota	J/kg
σ	—	karakteristika goriva	—
τ	—	reducirana temperatura	—
ϕ	—	vrednost notranje energije	—
φ	—	obremenitveno razmerje	—
	—	hitrostni koeficient	—
	—	relativna vlažnost	kg/kg
	—	specifična vrednost notranje energije	—
ψ	—	zunanja uparjalna toplota	J/kg
	—	relativna nasičenost	—
ω	—	reducirani volumen	—