

Zemljina energetska ravnoteža

Glavni izvor energije na Zemlji je energija Sunca. Temperatura Sunca iznosi otprilike 5 500 °C. Intenzitet kojim Sunce obasjava Zemlju je uprosječno 340 W/m². (Intenzitet je veličina kojom izražavamo količinu energija koja svake sekunde upada na jediničnu površinu.) Mjerenjima se pokazuje da je prosječna temperatura na Zemlji (relativno) stalna te iznosi oko 15 °C. Za svako tijelo na stalnoj temperaturi vrijedi jednostavan zakon – koliko energije primi, toliko energije mora i predati okolini. Budući da Zemlja prima energiju od Sunca u obliku elektromagnetskog zračenja, na primjeru Zemlje bi to značilo da ulazno zračenje (od Sunca) na vrhu atmosfere mora biti u ravnoteži s izlaznim zračenjem (od Zemlje i atmosfere). Dakle, Zemlja i atmosfera su jedan sustav koji odgovorom na vanjsko zračenje održava stalnu temperaturu pa ćemo dalje govoreći o prosječnoj temperaturi Zemlje zapravo govoriti o prosječnoj temperaturi Zemlje u prizemnom sloju atmosfere.

Temperatura i toplota

Prije nego krenemo na detaljniji opis održavanja stalne prosječne temperature na Zemlji, valja razjasniti razliku između temperature i topline, pojmova koje ćemo često upotrebljavati (već do sada jesmo). Temperatura i toplota često se poistovjećuju. Iako su vrlo povezani, to su pojmovi koji se bitno razlikuju.

Krenimo najprije od unutarnje energije tijela. Svako tijelo ima neku unutarnju energiju. **Unutarnja energija** potječe od gibanja molekula i njihovih interakcija (električnih i gravitacijskih) pa se tako može razmatrati kinetička i potencijalna energija molekula. Ne možemo izmjeriti unutarnju energiju tijela, već kao značajnu veličinu smatramo promjenu unutarnje energije tijela. Promjena unutarnje energije tijela uočava se promjenom **temperature** tijela. **Toplina** je dio unutarnje energije tijela koji **prelazi** s tijela na tijelo ili s tijela u okolinu. Toplina zato nije svojstvo tijela, već samo dio unutarnje energije koju tijelo prima ili otpušta ovisno o svojoj masi, tvari od koje je građeno te razlici vlastite i okolinske temperature. Ako tijelo prima toplinu (porast unutarnje energije), čestice tijela dobiju energiju za brže gibanje (porast prosječne kinetičke energije čestica) pa mu se temperatura povećava. Ako tijelo gubi, odnosno predaje toplinu (smanjenje unutarnje energije), čestice tijela gibaju se sporije (smanjenje prosječne kinetičke energije) i temperatura tijela se smanjuje. Toplina dakle postoji samo pri prijelazu s jednog na drugo tijelo pri čemu se događa promjena unutarnje energije tijela, dok nam temperatura govori o stanju tijela i direktno je proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji čestica tijela. Veću temperaturu ima tijelo čije čestice imaju veću kinetičku energiju.

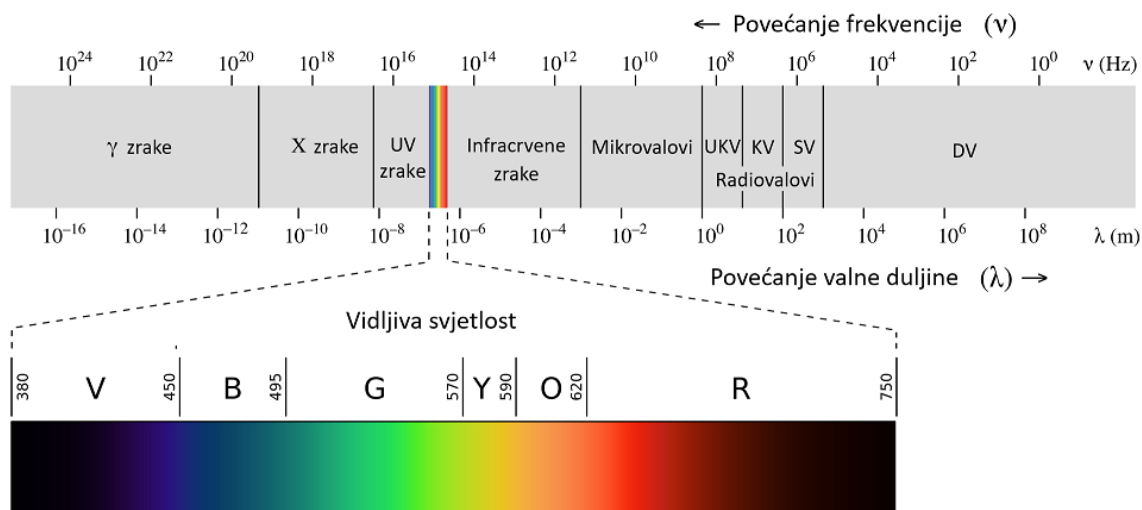
Razliku između temperature i topline pokušat ćemo opisati i primjerom. Zamislimo da na raspolaganju imamo tri posude s vodom različitih temperatura. U jednoj posudi nalazi se vruća voda, u drugoj posudi nalazi se voda sobne temperature, a u trećoj posudi nalazi se hladna voda. Ako smo lijevu ruku držali u hladnoj, a desnu u vrućoj vodi, a zatim ih izvadili te istovremeno uronili u posudu s vodom sobne temperature, lijevoj ruci sada će biti vruće, a desnoj hladno. Ono što osjetimo je prijelaz topline – toplina prelazi s vode na lijevu, hladnu ruku, ali s desne tople ruke odlazi u vodu niže sobne temperature. Opisanim primjerom teško smo mogli objektivno utvrditi koliko je voda u srednjoj posudi zagrijana jer se u slučaju lijeve ruke činila vruća, a u slučaju desne hladna. Budući da ipak postoji neka konačna vrijednost srednje kinetičke energije molekula vode u posudi, temperatura se za vodu u svakoj posudi može jednoznačno odrediti. U tu svrhu koristimo mjerni instrument termometar. Dakle, za temperaturu možemo reći da je objektivna mjera zagrijanosti tijela, a toplina je energija u prijelazu između dva tijela koju možemo osjetiti kao vruće, hladno i slično.

Mehanizmi prijenosa topline

Prijelazi topline s tijela na tijelo (ili s tijela na okolinu) mogu se odvijati elektromagnetskim **zračenjem** (radijacijom), **kondukcijom** (vođenjem) ili **konvekcijom** (strujanjem slojeva fluida koje se javlja zbog promjene gustoće). Za tijelo koje ima stalnu temperaturu, odnosno tijelo koje predaje jednaku količinu topline koliku prima, kažemo da se nalazi u termodinamičkoj ravnoteži.

Sva tijela građena su od atoma koji su u neprestanom gibanju pri čemu zrače **elektromagnetsko zračenje**. Stoga, sva tijela sama po sebi neprestano emitiraju elektromagnetsko zračenje. Za prijenos elektromagnetskog zračenja nije potrebno sredstvo, što znači da se zračenje prenosi i **vakuumom** (zrakopraznim prostorom), i to brzinom svjetlosti (svjetlost je elektromagnetski val). Svaki val, pa tako i elektromagnetski, karakteriziran je brzinom (koja je kod elektromagnetskog vala jednaka brzini svjetlosti, tj. u vakuumu 300 000 km/s i jednaka za sve valne duljine), valnom duljinom i frekvencijom. Frekvencija i valna duljina obrnuto su proporcionalne veličine (koliko puta se poveća valna duljina, toliko puta će se smanjiti frekvencija i obratno). Veća frekvencija (manja valna duljina) odgovara većoj energiji zračenja. Elektromagnetsko zračenje sastoji se od spektra valnih duljina. Onaj dio zračenja koji će kod nekog tijela biti najizraženiji (maksimum zračenja) ovisi o temperaturi tog tijela. Zračenje najmanjih valnih duljina zovemo gamma zračenje. Povećanjem valne duljine pojavljuju se redom X-zrake, ultraljubičasto zračenje, vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje, mikrovalno zračenje te radio zračenje te dugovalno radio zračenje. Odgovarajuće valne duljine i frekvencije navedenih vrsta zračenja dane su na slici 4.2.1 koja prikazuje cijeli spektar elektromagnetskog zračenja. Različite valne duljine EM zračenja imaju različit učinak na materijale na koje zračenje upada. Za naše potrebe najbitnije je istaknuti da dugovalno infracrveno zračenje osjetimo kao toplinu pa ga još zovemo i toplinsko zračenje.

Što se tijelo nalazi na višoj temperaturi to se maksimum zračenja pomiče prema manjoj valnoj duljini. Ta pravilnost opisana je tzv. Wienovim zakonom. Na slici 4.3.3 prikazani su elektromagnetski spektri Sunca i Zemlje (u logaritamskoj skali). Wienov zakon objašnjava zašto je maksimum zračenja Zemlje na manjoj valnoj duljini od maksimuma zračenja Sunca.



Slika 4.2.1 Spektar elektromagnetskog zračenja

Za prijelaz topline **vođenjem** potrebno je da su dva tijela različitih temperatura u **kontaktu**. Čestice tijela veće temperature titraju većom brzinom, tj. imaju veću kinetičku energiju koju predaju hladnijem tijelu. Česticama hladnijeg tijela povećava se kinetička energija te samim time i unutarnja energija. To uočavamo u porastu temperature hladnijeg tijela. Prijelaz topline događa se sve dok se temperature tijela ne izjednače. Postoje tijela koja bolje i lošije provode toplinu. Tijela koja dobro provode toplinu zovemo **toplinskim vodičima** (npr. metali), a tijela koja loše provode toplinu **toplinskim izolatorima** (npr. drvo, zrak, vuna).

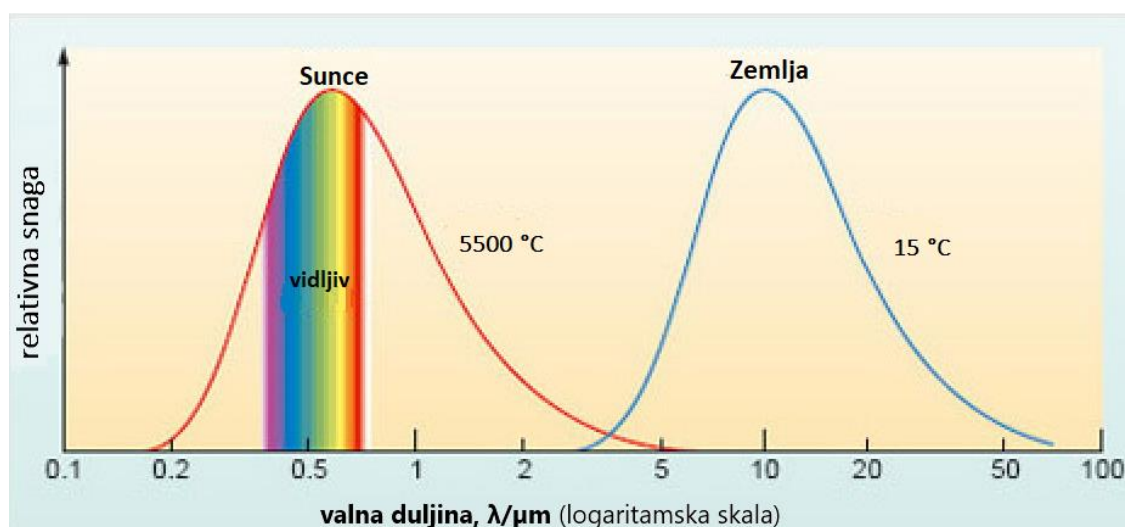
Toplina se u fluidima (plinovima i tekućinama) prenosi **konvekcijom**. Konvekcija je zapravo oblik kondukcije u fluidima. Kada jedan sloj fluida primi toplinu, temperatura mu se povećava što znači da se i čestice gibaju većim brzinama te se taj sloj fluida širi. Zbog širenja, tj. povećanja volumena, dolazi do smanjenja gustoće sloja fluida koji se zbog toga izdiže uvis. Pri podizanju zagrijani sloj fluida prenosi toplinu ostalim slojevima pri čemu se hladi.

Jedan od mehanizama prijenosa topline, primjerice, kod hlađenja juhe u posudi, je **isparavanje** ili evaporacija. Isparavanje je proces promjene agregatnog stanja iz tekućeg u plinovito. Opće je poznato da voda isparava na 100 °C. Međutim, iz iskustva (npr. sušenje rublja) je jasno da je isparavanje moguće i na temperaturama značajno manjim od 100 °C. U tekućinama su molekule vezane jačim vezama (međumolekularnim kohezijskim silama). Da bi molekula isparila prvo treba nadvladati te međumolekularne sile. Vrelište tekućine je temperatura na kojoj cijeli obujam tekućine prelazi u

plinovito agregatno stanje jer je prosječna kinetička energija molekula tekućine dovoljna da se nadvladaju međumolekularne sile (ključanje). Kada je temperatura niža od vrelišta, prosječna kinetička energija molekula tekućine nije dovoljna za nadvladavanje kohezijskih sila, ali neke (najbrže) molekule ipak imaju dovoljnu energiju za to pa uspiju ispariti (hlapljenje). Ako je zbog različitih uvjeta stopa isparavanja tekućine veća od primanja topline, prosječna kinetička energija tekućine smanji, a zbog proporcionalnog odnosa prosječne kinetičke energije i temperature, smanjuje se i temperatura, tj. tijelo se hladi. Stopa isparavanja tekućine ovisi o temperaturi tekućine (više molekula ima dovoljnu kinetičku energiju za napuštanje tekućine) te o tlaku pare nad tekućinom (veći tlak pare pritišće tekućinu i tako sprječava molekule da ispare, npr. rublje se sporije suši u vlažnim uvjetima). Kada se uslijed zagrijavanja tvari događa promjena agregatnog stanja (isparavanje molekula vode), primljena toplota ne mijenja temperaturu tekućine jer je iskorištena za povećanje kinetičke energije molekula koje su napustile tekućinu. Stoga, takvu toplinu zovemo latentna toplota. Latentna toplota se može osloboditi kao osjetna toplota kada isparena molekula kondenzira u tekuće stanje.

Mehanizmi održavanja stalne prosječne svjetske temperature

Sunce neprestano obasjava Zemlju, odnosno, Zemlja neprestano prima energiju sa Sunca koja do nje dolazi zračenjem. Zato se Zemlja na neki način treba rješavati primljene energije jer bi se temperatura Zemlje u suprotnom neprestano povećavala. Između upadne energije koja dolazi sa Sunca i izlazne energije koja se vraća u Svemir uspostavljena je ravnoteža pa je prosječna svjetska temperatura stalna i iznosi oko 15 °C. Promjene u količini primljene i predane energije uzrokuju promjene u temperaturi – ako Zemlja više energije prima nego predaje, temperatura se povećava, i obratno.



Slika 4.3.1 Elektromagnetski spektar Sunčevog i Zemljinog zračenja s valnim duljinama u logaritamskoj skali. (izvor: <https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/climate-change/content-section-1.2.1>)

Postoji više mehanizama koji održavaju ravnotežu energije koja dolazi na Zemlju i odlazi s nje. Ta ravnoteža zračenja mora biti uspostavljena na vrhu atmosfere globalno i za cijelu godinu da bi prosječna temperatura Zemlje bila stalna. Na slici 4.2.1 prikazan je dijagram održavanja energetske ravnoteže Zemlje i Zemljine atmosfere.

Sunce zbog svoje temperature od oko 5500 °C zrači elektromagnetski spektar s maksimumom u području vidljive svjetlosti. Približno 30% dolaznog Sunčevog zračenja reflektira se na oblacima, na česticama u atmosferi (aerosol) i na površini Zemlje u međuplanetarni prostor, dok preostalo zračenje apsorbiraju Zemljina površina i atmosfera.

Apsorpcijom elektromagnetskog zračenja uzrokuje povećanje unutarnje energije, odnosno temperature tijela koje apsorbira. Međutim, da bi temperatura tijela ostala stalna, tijelo mora emitirati jednaku količinu energije. Odnos energije koju tijelo zrači po jedinici površine (snaga zračenja) i temperature tijela opisan je poznatim Stefan-Boltzmannovim zakonom koji kaže da je izračena energija po jedinici površine proporcionalna četvrtoj potenciji temperature. To znači da relativno mali porast temperature uzrokuje velike promjene u izračenoj energiji.

Zemlja je mnogo hladnije tijelo od Sunca pa se maksimum Zemljina zračenja nalazi u dugovalnom infracrvenom dijelu spektra. Dakle, prvi od spomenutih mehanizama održavanja energetske ravnoteže jest **infracrvenim zračenjem**.

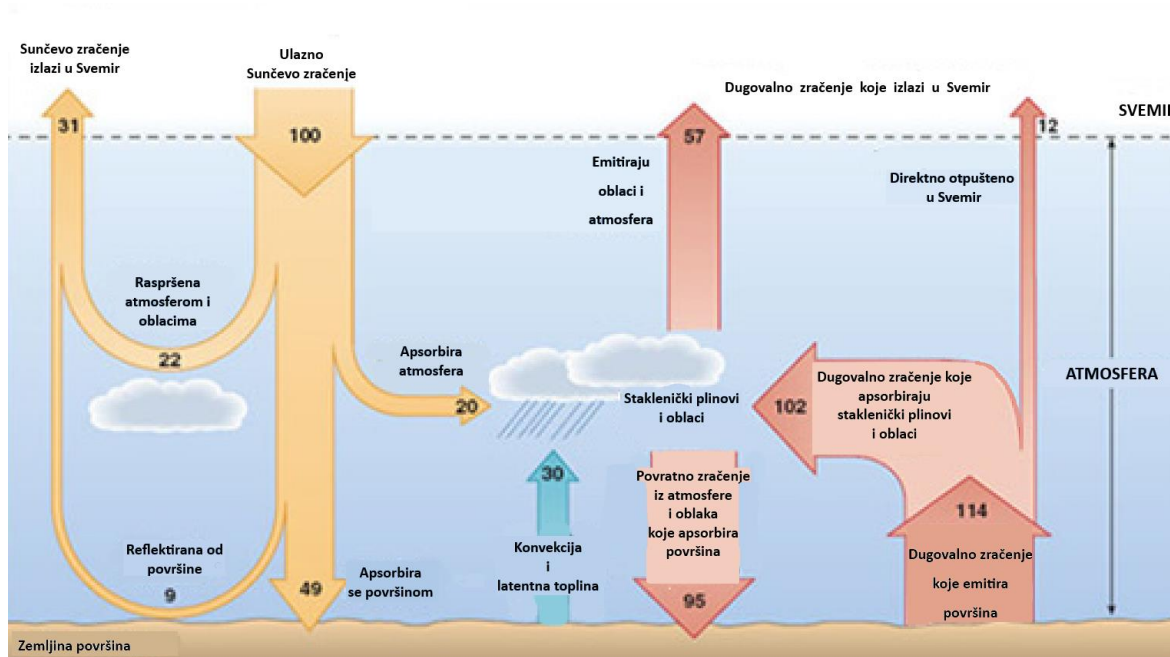
Još jedan mehanizam kojim se Zemlja rješava primljene energije je **evaporacija**. Zemlja sadrži ogromne količine tekuće vode. Sunce svojim zračenjem predaje energiju molekulama vode koje potom isparavaju. Isparavaju čestice s površine vode koje imaju dovoljnu kinetičku energiju. Kada čestice veće kinetičke energije ispare, za sobom ostave čestice manje kinetičke energije što smanji srednju kinetičku energiju vode pa samim time i temperaturu. Kada molekule vodene pare kondenziraju u kapljice vode formirajući oblake otpušta se latentna toplina, okolni zrak se zagrijava i podiže što može biti uzrok nastajanja oluja različitih karaktera i inženiteta.

Treći mehanizam kojim se Zemlja rješava energije je **konvekcija**. Prijelaz topline konvekcijom događa se pomicanjem slojeva fluida iz područja više prema području niže temperature. Niži slojevi atmosfere (bliže površini) imaju veću temperaturu jer se prizemni sloj zraka zagrijava u kontaktu sa Zemljinom površinom (**kondukcija**). Topliji zrak manje je gustoće od hladnijeg pa se podiže uvis pri čemu se miješa s hladnijim slojevima zraka i predaje im toplinu. Topliji zrak sa sobom nosi molekule vodene pare koje hlađenjem gube energiju i kondenziraju kao što je opisano u prethodnom odjeljku.

Prethodna četiri mehanizma opisala su kako se **Zemljina površina** rješava apsorbirane energije, ali spomenuli smo da se dio Sunčeve energije apsorbira direktno u atmosferu. Osim toga, evaporacijom vode i konvekcijom toplina je također oslobođena u atmosferu. Znamo da na kraju ipak na vrhu

atmosfere mora postojati balans što znači da se i atmosfera mora riješiti primljene energije. Budući da atmosfera prelazi u vakuum (Svemir), prijenos topline u Svemir mora se odvijati preko elektromagnetskog zračenja.

Ako se izjednači ukupno zračenje koje Zemlja i atmosfera izrače u Svemir sa zračenjem koje upiju od Sunca te iz Stefan-Boltzmannovog zakona, može se izračunati temperatura Zemlje. Međutim, rezultat (oko $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) ne odgovara stvarnoj opaženoj prosječnoj temperaturi Zemlje ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Energija zračenja koja odgovara opaženoj temperaturi je veća od energije koju Zemlja i atmosfera upiju od Sunca. To ne znači da zračenja na vrhu atmosfere nisu u balansu, već da se dio zračenja zadržava na Zemlji kroz prirodni proces koji zovemo **učinak staklenika**.



Slika 4.2.1 Shematski prikaz energetske bilance Zemlje i atmosfere. Od ukupnih 100 jedinica zračenja koje dolazi do atmosfere, zbog ukupnog albeda Zemlje i atmosfere od 31%, 69 jedinica apsorbira atmosfera (20) i površinom Zemlje (49). Zemlja kroz mehanizme konvekcije i evaporacije otpušta 30 jedinica u atmosferu. Budući da se dio topline reciklira, odnosno apsorbira u atmosferi i reemitira (95), Zemljina površina se zagrijava pa zrači dugovalno toplinsko zračenje ekvivalentno 114 jedinica upadne Sunčeve energije. Dio tog zračenja otpušta se direktno u Svemir (12), a dio se apsorbira atmosferom.

Primljena i otpuštena energija na vrhu atmosfere su u ravnoteži. (izvor: <https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/climate-change/content-section-1.4>)

Učinak staklenika i staklenički plinovi

Prirodni učinak staklenika

Atmosfera je smjesa plinova od kojih je najviše dušika (78%) i kisika (20.9%). Od ostalih plinova najviše je argona (0,93%), a potom ugljikovog dioksida (0,04%). To je sastav suhog zraka, a u zraku se nalazi i vodena para u promjenjivim udjelima. Kao što je spomenuto, maksimum Sunčeva zračenja je u vidljivom dijelu spektra, ali Sunce zrači sve valne duljine.

Većina plinova u atmosferi transparentna je za vidljivu svjetlost pa kroz atmosferu prolazi najviše vidljive svjetlosti, a značajno manje UV (naročito zbog ozonskog omotača) i infracrvene. Neki plinovi u atmosferi poput CO₂, vodene pare i metana jako dobro apsorbiraju infracrveno zračenje. Međutim, infracrveno zračenje ne dolazi samo sa Sunca. Zemlja sa svojih u prosjeku 14 °C emitira elektromagnetski spektar s maksimumom u infracrvenom dijelu pa zapravo najviše infracrvenog zračenja apsorbiranog molekulama u atmosferi potječe sa Zemlje. Molekule koje apsorbiraju infracrveno zračenje uzrokuju da dio topline ostaje zarobljen na Zemlji (u atmosferi).

Taj prirodni efekt koji sprječava dijelu topline da napusti Zemljinu atmosferu prema analogiji sa staklenikom (koji sprječava toplinu da napusti staklenik) zove se učinak ili efekt staklenika, a plinovi koji apsorbiraju zračenje zovu se staklenički plinovi. Analogija sa staklenikom je ograničena, ali sasvim dovoljna za edukacijske svrhe. Naime, kod staklenika staklo predstavlja fizičku barijeru slojevima toplog zraka koji se izdižu (konvekcija) da napuste staklenik, dok u atmosferi nema fizičke barijere, a prijenos topline koji je zaslužan za efekt je radijacija (iako radijacija ima svoju ulogu i kod staklenika, a ovisi o vrsti stakla, odnosno o (ne)propusnosti stakla IR zračenju).

Staklenički plinovi

Plinove koji dobro apsorbiraju infracrveno zračenje zovemo stakleničkim plinovima. Iz kemijskih formula stakleničkih plinova (koje će biti navedene u daljnjem tekstu), lako se primijeti da se molekule stakleničkih plinova sastoje od 3 ili više atoma. Molekule plinova u atmosferi su u neprestanom gibanju. Postoje tri načina na koje se molekule mogu gibati, a to su translacija, rotacija i vibracija. Dakle, određena molekula može imati translacijsku kinetičku energiju, rotacijsku kinetičku energiju te vibracijsku kinetičku energiju. Pri gibanju plinova događa se bezbroj sudara pa molekule prelaze iz jednog u drugi način gibanja ili kombinacije gibanja. Kod jednoatomnih molekula načini gibanja su vrlo ograničeni – takve molekule mogu se samo translacijski gibati. Molekule plinova koje se sastoje od 2

atoma mogu se gibati translacijski, rotacijski, ali i vibracijski. Vibracije, odnosno titranja dvoatomnih molekula moguće su samo na dva načina: atomi titraju jedan prema drugome ili jedan od drugoga. Kao kod dvoatomnih molekula, i složene (3 ili više atoma) molekule mogu se gibati translacijski, rotacijski i vibracijski. Međutim, složene molekule imaju puno više načina na koje mogu vibrirati/titrati (tzv. modovi titranja) ili više vibracijskih stanja. Svako stanje karakterizirano je nekom frekvencijom titranja. Kod složenih molekula frekvencije nekih modova titranja odgovaraju frekvencijama infracrvenog dijela spektra. Što je više različitih načina na koje molekula može titrati, to je više frekvencija s kojima može intezivirati.

Kada molekula apsorbira energiju odgovarajuće frekvencije prelazi u pobuđeno stanje, odnosno stanje više energije (možemo zamisliti da molekula tada jače titra). Takvo stanje je kratkoročno i molekula se vrlo brzo vraća na "staro" osnovno stanje. Međutim, pri povratku emitira jednako zračenje koje je prethodno apsorbirala, ali u svim smjerovima. Molekule stakleničkih plinova prelaze u pobuđeno stanje interakcijom s infracrvenim zračenjem. To znači da pri relaksaciji iz pobuđenog stanja emitiraju infracrveno zračenje u svim smjerovima. Ukupni rezultat toga je da dio zračenja ostaje zarobljen na Zemlji. Koliki dio zračenja neka molekula apsorbira u određenom području valnih duljina zračenja prikazuje se apsorpcijskim spektrom. Apsorpcijski spektar nekih stakleničkih plinova u atmosferi prikazan je na slici 5.2.1.

Vodena para ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$) je najjači staklenički plin čiji udio u zraku ovisi o temperaturi zraka. Zrak veće temperature može sadržati više vodene pare (relativna vlažnost zraka). Iako je najjači staklenički plin, činjenica da ciklus vode u atmosferi traje 10-ak dana, zbog čega se voda ne može neograničeno zadržavati u atmosferi, razlog je zašto kada govorimo o stakleničkim plinovima najčešće ne spominjemo vodenu paru.

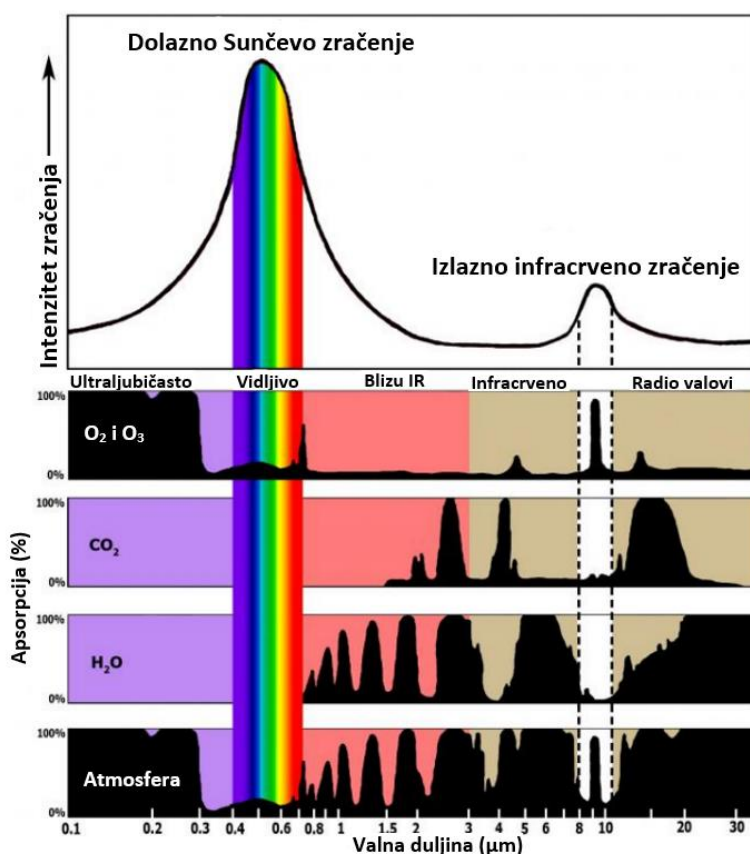
Ugljikov dioksid (CO_2) je uz vodenu paru najzastupljeniji staklenički plin. Ugljik u atmosferi prirodno kruži, no ljudi korištenjem fosilnih goriva u atmosferu izbacuju velike količine ugljikovog dioksida koje nisu sudjelovale u prirodnom ciklusu ugljika milijunima godina. S druge strane, šireći urbana područja sijeku šume koje uzimaju ugljikov dioksid iz atmosfere zbog čega se koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi od predindustrijskog doba značajno povećala. Osim toga, ugljikov dioksid se u atmosferi može zadržati i do 10 000 godina što predstavlja dodatni problem.

Od ostalih stakleničkih plinova često se spominje i metan (CH_4), no zbog manje koncentracije u atmosferi te značajno kraćeg zadržavanja (oko 8 godina) ne predstavlja problem kao ugljikov dioksid iako je mnogo jači apsorber infracrvenog zračenja. Javlja se zabrinutost zbog oslobađanja dodatnih količina metana otapanjem permafrosta.

Dušikov dioksid (NO_2) je staklenički plin kojemu se također povećava koncentracija u atmosferi ljudskim djelovanjem, odnosno korištenjem umjetnih gnojiva.

Freoni (klorofluorouglijci – CFC ili HCFC) također su staklenički plinovi. Jedna molekula freona ima učinak kao 10 000 molekula ugljikovog dioksida. Korišteni su u rashladnim uređajima, međutim, korištenje freona značajno je smanjeno otkad je otkriveno da uzrokuju oštećenja ozonskog omotača (ozonske rupe) u stratosferi.

Ozon (O_3) je također staklenički plin, ali njegova koncentracija u troposferi, gdje se učinak staklenika javlja, je zanemariv. Međutim, povećanje koncentracije ozona u troposferi (koje je posljedica ljudskih aktivnosti) ima važan utjecaj u pojačanju učinka staklenika budući da ozon apsorbira baš dio dugovalnog infracrvenog zračenja koje vodena para i ugljikov dioksid propuštaju. Radi se o rasponu valnih duljina otprilike između 8 i 14 mikrometara koji zovemo atmosferski prozor jer, u normalnim okolnostima, atmosfera propušta taj dio toplinskog zračenja u svemir.



Slika 5.2.1 Apsorpcijski spektar stakleničkih plinova (izvor: [Climate Science Investigations South Florida - Energy: The Driver of Climate \(fau.edu\)](http://climate-science-investigations.southflorida.edu/energy-the-driver-of-climate))

Kao što se iz prethodno navedenog dalo zaključiti, nemaju svi staklenički plinovi jednak doprinos učinku staklenika. Možemo reći da doprinos ovisi o životnom vijeku stakleničkog plina u atmosferi te udjelu stakleničkog plina u atmosferi, odnosno o njegovom apsorpcijskom spektru. Veličina kojom možemo izraziti jačinu učinka određenog stakleničkog plina je *globalni staklenički potencijal* (GWP indeks). On predstavlja kumulativno toplinsko zračenje nekog plina iskazano relativno u odnosu na isto zračenje ugljikovog dioksida (CO_2 ima GWP indeks 1), a najčešće se koristi vremenski period od 100

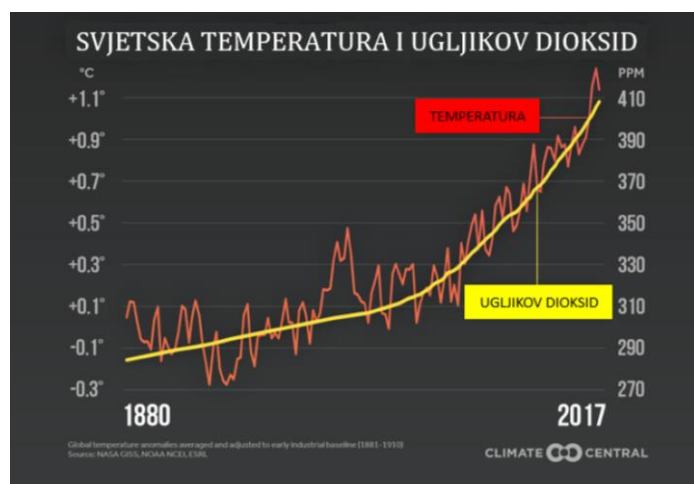
godina. U tablici 1 prikazani su globalni staklenički potencijal nekih stakleničkih plinova prema 6. izvješću Međunarodnog stručnog tijela za klimatske promjene (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

Tablica 1 Globalni staklenički potencijal za vremenski period od 20, 100 i 500 godina. GTP predstavlja globalni temperaturni potencijal koji govori o temperaturnoj promjeni na kraju određenog vremenskog perioda zbog pojedinog stakleničkog plina. Kombinirani GTP (CGTP) prikazan je za plinove s životnim vijekom duljim od 20 godina, a izražen je u godinama i povezuje stopu emisije stakleničkog plina s ekvivalentnom kumulativnom emisijom CO₂. (izvor: IPCC Sixth Assessment Report, 2022.)

Vrsta	Životni vijek (godina)	Učinkovitost zračenja (W m ⁻² ppb ⁻¹)	GWP-20	GWP-100	GWP-500	GTP-50	GTP-100	CGTP-50	CGTP-100
CO ₂	Višestruki	1.33 ± 0.16 × 10 ⁻⁵	1.	1.000	1.000	1.000	1.000		
CH ₄ - fosilni	11.8 ± 1.8	5.7 ± 1.4 × 10 ⁻⁴	82.5 ± 25.8	29.8 ± 11	10.0 ± 3.8	13.2 ± 6.1	7.5 ± 2.9	2823 ± 1060	3531 ± 1385
CH ₄ - nefosilni	11.8 ± 1.8	5.7 ± 1.4 × 10 ⁻⁴	79.7 ± 25.8	27.0 ± 11	7.2 ± 3.8	10.4 ± 6.1	4.7 ± 2.9	2675 ± 1057	3228 ± 1364
N ₂ O	109 ± 10	2.8 ± 1.1 × 10 ⁻³	273 ± 118	273 ± 130	130 ± 64	290 ± 140	233 ± 110		
HFC-32	5.4 ± 1.1	1.1 ± 0.2 × 10 ⁻¹	2693 ± 842	771 ± 292	220 ± 87	181 ± 83	142 ± 51	78,175 ± 29,402	92,888 ± 36,534
HFC-134a	14.0 ± 2.8	1.67 ± 0.32 × 10 ⁻¹	4144 ± 1160	1526 ± 577	436 ± 173	733 ± 410	306 ± 119	146,670 ± 53,318	181,408 ± 71,365
CFC-11	52.0 ± 10.4	2.91 ± 0.65 × 10 ⁻¹	8321 ± 2419	6226 ± 2297	2093 ± 865	6351 ± 2342	3536 ± 1511		
PFC-14	50,000	9.89 ± 0.19 × 10 ⁻²	5301 ± 1395	7380 ± 2430	10,587 ± 3692	7660 ± 2464	9055 ± 3128		

1.1. Pojačani učinak staklenika

Ljudske aktivnosti koje uključuju izgaranje fosilnih goriva povećavaju koncentraciju stakleničkih plinova u atmosferi, napose ugljikovog dioksida. Najveći izvori stakleničkih plinova su proizvodnja električne i toplinske energije iz neobnovljivih izvora, promet te industrija. Promjena svjetske temperature u odnosu na referentno razdoblje 1951.- 1980. te koncentracija ugljikovog dioksida od 1880. do 2017. prikazane su na slici 5.3.1.



Slika 5.3.1 Promjena svjetske temperature i koncentracija ugljikovog dioksida od 1880. do 2017.

Povećanjem koncentracije stakleničkih plinova više se topline zadržava na Zemlji. To uzrokuje povećanje površinske temperature. Čak i malo povećanje površinske temperature uzrokuje značajno povećanje izračene energije (Stefan-Boltzmannov zakon). Veća koncentracija stakleničkih plinova

znači manji prolaz te izračene energije u Svemir, što znači da se izlazna energija na vrhu atmosfere smanjuje. Energetska ravnoteža će se s vremenom ponovo uspostaviti jer će se Zemljino zračenje zbog povećanja temperature pojačati. Međutim, nova ravnotežna temperatura bit će viša od stare.

Prijelaz sa stare niže na novu višu temperaturu je razdoblje klimatskih promjena, popraćeno raznim procesima u klimatskom sustavu koji mijenjaju uobičajene klimatske obrasce različitih područja na Zemlji. Neki od tih procesa i posljedica pojačanog učinka staklenika su ubrzano otapanje ledenih površina, podizanje razine mora, povećana učestalost ekstremnih vremenskih događaja i prirodnih katastrofa (suše, poplave, požari), itd. Sve navedeno ima širok spektar daljnjih posljedica na živi i neživi svijet.