

PRILOGA 4

3. POGLAVJE

1 VREDNOTENJE PODATKOV IN IZRAČUNI

1.1. Vrednotenje plinastih emisij

Plinaste emisije se vrednotijo tako, da se izračuna povprečje zapisov za zadnjih 120 sekund v vsaki fazi preskušanja, iz povprečja zapisov (in ustreznih podatkov kalibracije pa se ugotovijo povprečne koncentracije (conc) HC, CO, NO_x in CO₂ med posamezno fazo preskušanja. Uporabi se lahko tudi drugačna vrsta zapisovanja, če zagotavlja enakovredno zajemanje podatkov.

Povprečne koncentracije ozadja (conc_d) se lahko ugotovijo z odčitavanjem zraka za redčenje v vreči za vzorčenje ali s stalnim odčitavanjem ozadja (ne iz vreče) in ustreznimi kalibracijskimi podatki.

1.2. Izračun plinastih emisij

Rezultati preskusa v končnem poročilu se izpeljejo z naslednjimi koraki:

1.2.1. Preračun iz suhega v vlažno

Če koncentracija ni že izmerjena na vlažni osnovi, se pretvori na vlažno podlago:

$$\text{conc (wet)} = k_w \times \text{conc (dry)}$$

Za nerazredčene izpušne pline:

$$k_w = k_{wz} = \frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]}) - 0,01 \times \% \text{ H}_2 \text{ [dry]} + k_{w2}}$$

kjer je α razmerje vodik/ogljik v gorivu.

Izračuna se koncentracija H₂ v izpušnih plinih:

$$\text{H}_2 \text{ [dry]} = \frac{0,5 \times \alpha \times \% \text{ CO [dry]} \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}{\% \text{ CO [dry]} + (3 \times \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}$$

Izračuna se faktor k_{w2}:

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times H_a}{1\,000 + (1,608 \times H_a)}$$

pri čemer je H_a absolutna vlažnost polnilnega zraka, izražena v g vode na kg suhega zraka.

Za razredčene izpušne pline:

za merjenje vlažnega CO₃:

$$k_w = k_{w,e,1} = \left(1 - \frac{\alpha \times \% \text{CO}_2 [\text{wet}]}{200} \right) - k_{w1}$$

ali za merjenje suhega CO₂:

$$k_w = k_{w,e,2} = \left(\frac{(1 - k_{w1})}{1 + \frac{\alpha \times \% \text{CO}_2 [\text{dry}]}{200}} \right)$$

kjer je α razmerje vodik/ogljik v gorivu.

Faktor k_{w1} se izračuna iz naslednjih enačb:

$$k_{w1} = \frac{1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}{1\,000 + 1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}$$

kjer je:

H_d absolutna vlažnost zraka za redčenje, v g vode na kg suhega zraka

H_a absolutna vlažnost vsesanega zraka, v g vode na kg suhega zraka

$$DF = \frac{13,4}{\% \text{conc}_{\text{CO}_2} + (\text{ppm conc}_{\text{CO}} + \text{ppm conc}_{\text{HC}}) \times 10^{-4}}$$

Za zrak za redčenje:

$$k_{w,d} = 1 - k_{w1}$$

Faktor k_{w1} se izračuna iz naslednjih enačb:

$$DF = \frac{13,4}{\% \text{conc}_{\text{CO}_2} + (\text{ppm conc}_{\text{CO}} + \text{ppm conc}_{\text{HC}}) \times 10^{-4}}$$

$$k_{w1} = \frac{1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}{1\,000 + 1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}$$

kjer je:

H_d absolutna vlažnost zraka za redčenje, v g vode na kg suhega zraka

H_a absolutna vlažnost vsesanega zraka, v g vode na kg suhega zraka

$$DF = \frac{13,4}{\% \text{ conc}_{\text{CO}_2} + (\text{ppm conc}_{\text{CO}} + \text{ppm conc}_{\text{HC}}) \times 10^{-4}}$$

Za vsesani zrak (če se razlikuje od zraka za redčenje):

$$k_{w,a} = 1 - k_{w2}$$

Faktor k_{w2} se izračuna iz naslednjih enačb:

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times H_a}{1\,000 + (1,608 \times H_a)}$$

pri čemer je H_a absolutna vlažnost vsesanega zraka, v g vode na kg suhega zraka.

1.2.2 Korekcija vlažnosti za NO_x

Ker je emisija NO_x odvisna od okoliškega zraka, se koncentracija NO_x pomnoži s faktorjem K_H , ki upošteva vlažnost:

$$K_H = 0,6272 + 44,030 \times 10^{-3} \times H_a - 0,862 \times 10^{-3} \times H_a^2$$

(za štiritaktne motorje)

$$K_H = 1$$

(za dvotaktne motorje)

pri čemer je H_a absolutna vlažnost vsesanega zraka, v g vode na kg suhega zraka.

1.2.3 Izračun masnih pretokov emisij

Masnih pretoki emisij Gas_{mass} [v g/h] se za posamezno fazo preskušanja izračunajo takole:

(a) za nerazredčen izpušni plin²

$$\text{Gas}_{\text{mass}} = \frac{\text{MW}_{\text{Gas}}}{\text{MW}_{\text{FUEL}}} \times \frac{1}{\{(\% \text{ CO}_2 [\text{wet}] - \% \text{ CO}_{2\text{AIR}}) + \% \text{ CO} [\text{wet}] + \% \text{ HC} [\text{wet}]\}} \times \% \text{ conc} \times G_{\text{FUEL}} \times 1\,000$$

kjer je:

- G_{FUEL} [v kg/h] masni pretoka goriva;
- MW_{Gas} [v kg/kmol] molekulska masa posameznega plina s tabele 1;

² V primeru NO_x je treba koncentracijo pomnožiti s korekcijskim faktorjem vlažnosti K_H (korekcijski faktor vlažnosti za NO_x).

Tabela 1 – Molekularne mase.

Plin	MW _{Gas} [v kg/kmol]
NO _x	46,01
CO	23,01
HC	MW _{HC} = MW _{Fufl}
CO ₃	44,01

- MW_{FUEL} = 12,011 + α × 1,00794 + β × 15,9994 [v kg/mol] je molekularna masa goriva, pri čemer je α razmerje vodik/ogljik, β pa razmerje kisik/ogljik v gorivu³ in
- CO_{2AIR} je koncentracija CO₂ v vsesanem zraku (ki je, če ni izmerjena, domnevno enaka 0,04 %).

(b) Za razredčene izpušne pline⁴:

$$Gas_{mass} = u \times conc_c \times G_{TOTW}$$

kjer je:

- G_{TOTW} [v kg/h] masni pretok razredčenih izpušnih plinov na vlažni osnovi, ki se, če se uporablja sistem redčenja s celotnim tokom, ugotovi v skladu s točko 1.2.4 iz prvega poglavja priloge 3 tega pravilnika in
- conc_c koncentracija, korigirana glede na ozadje (okolico):

$$conc_c = conc - conc_d \times (1 - 1/DF),$$

pri čemer je

$$DF = \frac{13,4}{\% conc_{CO_2} + (ppm conc_{CO} + ppm conc_{HC}) \times 10^{-4}}$$

Koeficient u je pokazan v tabeli 2.

Tabela 2 – Vrednosti koeficienta u.

Plin	u	Conc
NO _x	0,001587	Ppm
CO	0,000966	Ppm
HC	0,000479	Ppm
CO ₃	15,19	%

Vrednosti koeficienta u temeljijo na molekularni masi razredčenih izpušnih plinov, ki je enaka 29 [v kg/kmol]; vrednost u za HC temelji na povprečnem razmerju ogljik/ vodik 1:1,85.

³ V ISO 8178-1 je navedena popolnejša formula za molekularno maso goriva (formula 50 iz poglavja 13.5.1(b)). Ta formula poleg razmerja vodik/ogljik upošteva tudi druge možne sestavine goriva, npr. žveplo in dušik. Ker pa se motorji na prisilni vžig iz tega pravilnika preskušajo z bencinom (navedenim v prilogi 5 kot referenčno gorivo), ki ponavadi vsebuje samo ogljik in vodik, se upošteva poenostavljena formula.

⁴ V primeru NO_x je treba koncentracijo pomnožiti s korekcijskim faktorjem vlažnosti K_H (korekcijski faktor vlažnosti za NO_x).

1.2.4. Izračun specifičnih emisij

Specifična emisija (v g/kWh) se za vse posamezne sestavine izračuna takole:

Posamezni plin =

$$\frac{\sum_{i=1}^n (G_{\text{as}_{\text{mass}_i}} \times W_{F_i})}{\sum_{i=1}^n (P_i \times W_{F_i})}$$

kjer je $P_i = P_{M,i} + P_{AE,i}$

Če je za preskus nameščena dodatna oprema, kot je npr. hladilni ventilator ali puhalo, se rezultatom doda odjem moči, razen pri motorjih, pri katerih je taka dodatna oprema sestavni del motorja. Moč ventilatorja ali puhala se pri vrtilni frekvenci, uporabljeni za preskus, ugotovi z izračunom iz standardnih lastnosti ali s praktičnimi preskusi (tretje poglavje iz priloge 7 tega pravilnika).

Utežni faktorji in število faz preskušanja (n), uporabljenih v zgornjem izračunu, so pokazani v točki 3.5.1.1. iz priloge 4 tega pravilnika.

2. PRIMERI

2.1. Podatki o nerazredčenih izpušnih plinih iz štiriktaktnega motorja na prisilni vžig

Glede na eksperimentalne podatke (tabela 3) se izračuni opravijo najprej za fazo 1 in se nato z uporabo enakega postopka razširijo na ostale faze preskusa.

Tabela 3 – Eksperimentalni podatki štiriktaktnega motorja na prisilni vžig.

Način		1	2	3	4	5	6
Vrt. frekvenca motorja	min ⁻¹	2 550	2 550	2 550	2 550	2 550	1 480
Moč	kW	9,96	7,5	4,88	2,36	0,94	0
Odstotek obremenitve	%	100	75	50	25	10	0
Utežni faktorji	–	0,090	0,200	0,290	0,300	0,070	0,050
Zračni tlak	kPa	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0
Temperatura zraka	°C	20,5	21,3	22,4	22,4	20,7	21,7
Relat. vlažnost zraka	%	38,0	38,0	38,0	37,0	37,0	38,0
Abs. vlažnost zraka	g _{H2O} /kg _{air}	5,696	5,986	6,406	6,236	5,614	6,136
Suhi CO	ppm	60 995	40 725	34 646	41 976	68 207	37 439
Vlažni NO _x	ppm	726	1 541	1 328	377	127	85
Vlažni HC	ppm C1	1 461	1 308	1 401	2 073	3 024	9 390
Suhi CO ₂	vol %	11,4098	12,691	13,058	12,566	10,822	9,516
Masni pretok goriva	kg/h	2,985	2,047	1,654	1,183	1,056	0,429
Razmerje α H/C goriva	–	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
Razmerje β O/C goriva		0	0	0	0	0	0

2.1.1. Korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w

Za pretvarjanje meritev suhih CO in CO₂ na vlažno osnovo se izračuna korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w :

$$k_w = k_{w,r} = \frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]}) - 0,01 \times \% \text{ H}_2 \text{ [dry]} + k_{w2}}$$

kjer je

$$\text{H}_2 \text{ [dry]} = \frac{0,5 \times \alpha \times \% \text{ CO [dry]} \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}{\% \text{ CO [dry]} + (3 \times \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}$$

in

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times H_a}{1\,000 + (1,608 \times H_a)}$$

$$\text{H}_2 \text{ [dry]} = \frac{0,5 \times 1,85 \times 6,0995 \times (6,0995 + 11,4098)}{6,0995 + (3 \times 11,4098)} = 2,450 \%$$

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times 5,696}{1\,000 + (1,608 \times 5,696)} = 0,009$$

$$k_w = k_{w,r} = \frac{1}{1 + 1,85 \times 0,005 \times (6,0995 + 11,4098) - 0,01 \times 2,450 + 0,009} = 0,872$$

$$\text{CO [wet]} = \text{CO [dry]} \times k_w = 60\,995 \times 0,872 = 53\,198 \text{ ppm}$$

$$\text{CO}_2 \text{ [wet]} = \text{CO}_2 \text{ [dry]} \times k_w = 11,410 \times 0,872 = 9,951 \text{ \% Vol}$$

Tabela 4 – vlažne vrednosti CO in CO₂ glede na različne faze preskusa.

Faza		1	2	3	4	5	6
Suhi H ₂	%	2,450	1,499	1,242	1,554	2,834	1,422
k_{w2}	–	0,009	0,010	0,010	0,010	0,009	0,010
k_w	–	0,872	0,870	0,869	0,870	0,874	0,894
Vlažni CO	ppm	53 198	35 424	30 111	36 518	59 631	33 481
Vlažni CO ₂	%	9,951	11,039	11,348	10,932	9,461	8,510

2.1.2 Emisije HC

$$\text{HC}_{\text{mass}} = \frac{\text{MW}_{\text{HC}}}{\text{MW}_{\text{FUEL}}} \times \frac{1}{\{(\% \text{ CO}_2 \text{ [wet]} - \% \text{ CO}_{2,\text{AIR}}) + \% \text{ CO [wet]} + \% \text{ HC [wet]}\}} \times \% \text{ conc} \times G_{\text{FUEL}} \times 1\,000$$

kjer je:

$$MW_{HC} = MW_{FUEL}$$

$$MW_{FUEL} = 12,011 + \alpha \times 1,00794 = 13,876$$

$$HC_{mass} = \frac{13,876}{13,876} \times \frac{1}{(9,951 - 0,04 + 5,3198 + 0,1461)} \times 0,1461 \times 2,985 \times 1\,000 = 28,361 \text{ g/h}$$

Tabela 5 – Emisije HC [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
HC _{mass}	28,361	18,248	16,026	16,625	20,357	31,578

2.1.3. Emisije NO_x

Najprej se izračuna korekcijski faktor K_H vlažnosti emisij NO_x:

$$K_H = 0,6272 + 44,030 \times 10^{-3} \times H_a - 0,862 \times 10^{-3} \times H_a^2$$

$$K_H = 0,6272 + 44,030 \times 10^{-3} \times 5,696 - 0,862 \times 10^{-3} \times (5,696)^2 = 0,850$$

Tabela 6 – Korekcijski faktor K_H vlažnosti emisij NO_x glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
K _H	0,850	0,860	0,874	0,868	0,847	0,865

Nato se izračuna NO_{xmass} [v g/h]:

$$NO_{xmass} = \frac{MW_{NO_x}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\% CO_2 [\text{wet}] - \% CO_{2AIR}) + \% CO [\text{wet}] + \% HC [\text{wet}]\}} \times \% \text{ conc} \times K_H \times G_{FUEL} \times 1\,000$$

$$NO_{xmass} = \frac{46,01}{13,876} \times \frac{1}{(9,951 - 0,04 + 5,3198 + 0,1461)} \times 0,073 \times 0,85 \times 2,985 \times 1\,000 = 39,717 \text{ g/h}$$

Tabela 7 – Emisije NO_x glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
NO _{xmass}	39,717	61,291	44,013	8,703	2,401	0,820

2.1.4. Emisije CO

$$CO_{mass} = \frac{MW_{CO}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\% CO_2 [\text{wet}] - \% CO_{2AIR}) + \% CO [\text{wet}] + \% HC [\text{wet}]\}} \times \% \text{ conc} \times G_{FUEL} \times 1\,000$$

$$CO_{2mass} = \frac{44,01}{13,876} \times \frac{1}{(9,951 - 0,04 + 5,3198 + 0,1461)} \times 9,951 \times 2,985 \times 1\,000 = 6\,126,806 \text{ g/h}$$

Tabela 8 – Emisije CO [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
CO _{mass}	2084,588	997,638	695,278	591,183	810,334	227,285

2.1.5. Emisije CO₂

$$CO_{2mass} = \frac{MW_{CO_2}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\% CO_2 [wet] - \% CO_{2AIR}) + \% CO [wet] + \% HC [wet]\}} \times \% conc \times G_{FUEL} \times 1\,000$$

$$CO_{2mass} = \frac{44,01}{13,876} \times \frac{1}{(9,951 - 0,04 + 5,3198 + 0,1461)} \times 9,951 \times 2,985 \times 1\,000 = 6\,126,806 \text{ g/h}$$

Tabela 9 – Emisije CO₂ [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
CO _{2mass}	6 126,806	4884,739	4 117,202	2 780,662	2020,061	907,648

2.1.6. Specifične emisije

Za vse posamezne sestavine se izmeri specifična emisija (v g/kWh):

Posamezni plin =

$$\frac{\sum_{i=1}^n (Gas_{mass_i} \times WF_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \times WF_i)}$$

Tabela 10 – Emisije [v g/h] in utežni faktorji glede na faze preskusa.

Faza		1	2	3	4	5	6
HC _{mass}	g/h	28,361	18,248	16,026	16,625	20,357	31,578
NO _{xmass}	g/h	39,717	61,291	44,013	8,703	2,401	0,820
CO _{mass}	g/h	2084,588	997,638	695,278	591,183	810,334	227,285
CO _{2mass}	g/h	6 126,806	4884,739	4 117,202	2 730,662	2 020,061	907,648
Moč P _i	kW	9,96	7,50	4,88	2,36	0,94	0
Utežni faktorji WF _i	—	0,090	0,200	0,290	0,300	0,070	0,050

$$HC = \frac{28,361 \times 0,090 + 18,248 \times 0,200 + 16,026 \times 0,290 + 16,625 \times 0,300 + 20,357 \times 0,070 + 31,578 \times 0,050}{9,96 \times 0,090 + 7,50 \times 0,200 + 4,88 \times 0,290 + 2,36 \times 0,300 + 0,940 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 4,11 \text{ g/kWh}$$

$$NO_x = \frac{39,717 \times 0,090 + 61,291 \times 0,200 + 44,013 \times 0,290 + 8,703 \times 0,300 + 2,401 \times 0,070 + 0,820 \times 0,050}{9,96 \times 0,090 + 7,50 \times 0,200 + 4,88 \times 0,290 + 2,36 \times 0,300 + 0,940 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 6,85 \text{ g/kWh}$$

$$CO = \frac{2\,084,59 \times 0,090 + 997,64 \times 0,200 + 695,28 \times 0,290 + 591,18 \times 0,300 + 810,33 \times 0,070 + 227,92 \times 0,050}{9,96 \times 0,090 + 7,50 \times 0,200 + 4,88 \times 0,290 + 2,36 \times 0,300 + 0,940 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 181,93 \text{ g/kWh}$$

$$CO_2 = \frac{6\,126,81 \times 0,090 + 4\,884,74 \times 0,200 + 4\,117,20 \times 0,290 + 2\,780,66 \times 0,300 + 2\,020,06 \times 0,070 + 907,65 \times 0,050}{9,96 \times 0,090 + 7,50 \times 0,200 + 4,88 \times 0,290 + 2,36 \times 0,300 + 0,940 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 816,36 \text{ g/kWh}$$

2.2. Podatki o nerazredčenih izpušnih plinih iz dvotaktnega motorja na prisilni vžig

Glede na eksperimentalne podatke (tabela 11) se izračuni opravijo najprej za fazo 1 in se nato z uporabo enakega postopka razširijo na ostale faze preskusa.

Tabela 11 – Eksperimentalni podatki dvotaktnega motorja na prisilni vžig.

Faza		1	2
Vrtilna frekvenca motorja	min ⁻¹	9 500	2800
Moč	kW	2,31	0
Odstotek obremenitve	%	100	0
Utežni faktorji	–	0,9	0,1
Zračni tlak	kPa	100,3	100,3
Temperatura zraka	°C	25,4	25
Relativna vlažnost zraka	%	38,0	38,0
Absolutna vlažnost zraka	g _{H2O} /kg _{air}	7,742	7,558
Suhi CO	ppm	37086	16 150
Vlažni NO _x	ppm	183	15
Vlažni HC	ppm C1	14220	13 179
Suhi CO ₂	vol %	11,986	11,446
Masni pretok goriva	kg/h	1,195	0,089
Razmerje α H/C goriva	–	1,85	1,85
Razmerje β O/C goriva		0	0

2.2.1. Korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w

Za pretvarjanje meritev suhih CO in CO₂ na vlažno podlago se izračuna korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w :

$$k_w = k_{w,r} = \frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]}) - 0,01 \times \% \text{ H}_2 \text{ [dry]} + k_{w2}}$$

kjer je

$$\text{H}_2 \text{ [dry]} = \frac{0,5 \times \alpha \times \% \text{ CO [dry]} \times (\% \text{ CO [dry]} + \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}{\% \text{ CO [dry]} + (3 \times \% \text{ CO}_2 \text{ [dry]})}$$

$$\text{H}_2 \text{ [dry]} = \frac{0,5 \times 1,85 \times 3,7086 \times (3,7086 + 11,986)}{3,7086 + (3 \times 11,986)} = 1,357 \%$$

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times H_a}{1\,000 + (1,608 \times H_a)}$$

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times 7,742}{1\,000 + (1,608 \times 7,742)} = 0,012$$

$$k_w = k_{w,r} = \frac{1}{1 + 1,85 \times 0,005 \times (3,7086 + 11,986) - 0,01 \times 1,357 + 0,012} = 0,874$$

$$\text{CO [wet]} = \text{CO [dry]} \times k_w = 37\,086 \times 0,874 = 32\,420 \text{ ppm}$$

$$\text{CO}_2 \text{ [wet]} = \text{CO}_2 \text{ [dry]} \times k_w = 11,986 \times 0,874 = 10,478 \text{ \% Vol}$$

Tabela 12 – Vlažne vrednosti CO in CO₂ glede na različne faze preskusa.

Faza		1	2
Suhi H ₂	%	1,357	0,543
kw ₂	–	0,012	0,012
kw	–	0,874	0,887
Vlažni CO	Ppm	32420	14 325
Vlažni CO ₂	%	10,478	10,153

2.2.2. Emisije HC

$$HC_{\text{mass}} = \frac{MW_{\text{HC}}}{MW_{\text{FUEL}}} \times \frac{1}{\{(\% \text{ CO}_2 [\text{wet}] - \% \text{ CO}_{2\text{AIR}}) + \% \text{ CO} [\text{wet}] + \% \text{ HC} [\text{wet}]\}} \times \% \text{ conc} \times G_{\text{FUEL}} \times 1\,000$$

kjer je:

$$MW_{\text{HC}} = MW_{\text{FUEL}}$$

$$MW_{\text{FUEL}} = 12,011 + \alpha \times 1,00794 = 13,876$$

$$HC_{\text{mass}} = \frac{13,876}{13,876} \times \frac{1}{(10,478 - 0,04 + 3,2420 + 1,422)} \times 1,422 \times 1,195 \times 1\,000 = 112,520 \text{ g/h}$$

Tabela 13 – Emisije HC [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2
HC _{mass}	112,520	9,119

2.2.3. Emisije NO_x

Faktor K_H za korekcijo emisij NO_x je za dvotaktne motorje enak 1:

$$NO_{\text{xmass}} = \frac{MW_{\text{NO}_x}}{MW_{\text{FUEL}}} \times \frac{1}{\{(\% \text{ CO}_2 [\text{wet}] - \% \text{ CO}_{2\text{AIR}}) + \% \text{ CO} [\text{wet}] + \% \text{ HC} [\text{wet}]\}} \times \% \text{ conc} \times K_H \times G_{\text{FUEL}} \times 1\,000$$

$$NO_{\text{xmass}} = \frac{46,01}{13,876} \times \frac{1}{(10,478 - 0,04 + 3,2420 + 1,422)} \times 0,0183 \times 1 \times 1,195 \times 1\,000 = 4,800 \text{ g/h}$$

Tabela 14 – Emisije NO_x [v g/h] v skladu s preskusnimi načini

Način	1	2
NO _{xmass}	4,800	0,034

2.2.4. Emisije CO

$$CO_{mass} = \frac{MW_{CO}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\% CO_2 [wet] - \% CO_{2AIR}) + \% CO [wet] + \% HC [wet]\}} \times \% conc \times G_{FUEL} \times 1\,000$$

$$CO_{mass} = \frac{28,01}{13,876} \times \frac{1}{(10,478 - 0,04 + 3,2420 + 1,422)} \times 3,2420 \times 1,195 \times 1\,000 = 517,851 \text{ g/h}$$

Tabela 15 – Emisije CO [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2
CO _{mass}	517,851	20,007

2.2.5. Emisije CO₂

$$CO_{2mass} = \frac{MW_{CO_2}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\% CO_2 [wet] - \% CO_{2AIR}) + \% CO [wet] + \% HC [wet]\}} \times \% conc \times G_{FUEL} \times 1\,000$$

$$CO_{2mass} = \frac{44,01}{13,876} \times \frac{1}{(10,478 - 0,04 + 3,2420 + 1,422)} \times 10,478 \times 1,195 \times 1\,000 = 2\,629,658 \text{ g/h}$$

Tabela 16 – Emisije CO₂ [v g/h] glede na faze preskusa.

Faza	1	2
CO _{2mass}	2629,658	222,799

2.2.6. Specifične emisije

Za vse posamezne sestavine se specifična emisija (v g/kWh) izmeri takole:

Posamezni plin =

$$\frac{\sum_{i=1}^n (Ga_{mass_i} \times WF_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \times WF_i)}$$

Tabela 17 – Emisije [v g/h] in utežni faktorji v dveh fazah preskusa.

Način		1	2
HC _{mass}	G/h	112,520	9,119
NO _{xmass}	G/h	4,800	0,034
CO _{mass}	G/h	517,851	20,007
CO _{2mass}	g/h	2 629,658	222,799
Moč P _{II}	KW	2,31	0
Utežni faktorji WF _i	–	0,85	0,15

$$\text{HC} = \frac{112,52 \times 0,85 + 9,119 \times 0,15}{2,31 \times 0,85 + 0 \times 0,15} = 49,4 \text{ g/kWh}$$

$$\text{NO}_x = \frac{4,800 \times 0,85 + 0,034 \times 0,15}{2,31 \times 0,85 + 0 \times 0,15} = 2,08 \text{ g/kWh}$$

$$\text{CO} = \frac{517,851 \times 0,85 + 20,007 \times 0,15}{2,31 \times 0,85 + 0 \times 0,15} = 225,71 \text{ g/kWh}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{2\,629,658 \times 0,85 + 222,799 \times 0,15}{2,31 \times 0,85 + 0 \times 0,15} = 1\,155,4 \text{ g/kWh}$$

2.3. Podatki o razredčenih izpušnih plinih iz štiriktaktnega motorja na prisilni vžig

Glede na eksperimentalne podatke (tabela 18) se izračuni opravijo najprej za fazo 1 in se nato z uporabo enakega postopka razširijo na ostale faze preskusa.

Tabela 18 – Eksperimentalni podatki štiriktaktnega motorja na prisilni vžig.

Faza		1	2	3	4	5	6
Vrt. frek. motorja	min ⁻¹	3060	3060	3060	3060	3060	2100
Moč	kW	13,15	9,81	6,52	3,25	1,23	0
% obremenitve	%	100	75	50	25	10	0
Utežni faktorji	–	0,090	0,200	0,290	0,300	0,070	0,050
Zračni tlak	kPa	980	980	980	980	980	980
T polniln. zraka ¹	°C	25,3	25,1	24,5	23,7	23,5	22,6
Relativna vlažnost polnilnega zraka ¹	%	19,8	19,8	20,6	21,5	21,9	23,2
Absolutna vlažnost polnilnega zraka	g _{H2O} /kg _{air}	4,08	4,03	4,05	4,03	4,05	4,06
Suhi CO	ppm	3681	3 465	2 541	2 365	3 086	1 817
Vlažni NO _x	ppm	85,4	49,2	24,3	5,8	2,9	1,2
Vlažni HC	ppm C1	91	92	77	78	119	186
Suhi CO ₂	vol %	1,038	0,814	0,649	0,457	0,330	0,208
Suhi CO (ozadje)	ppm	3	3	3	2	2	3
Vlažni NO _x (ozadje)	ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Vlažni HC (ozadje)	Ppm C1	6	6	5	6	6	4
Suhi CO ₂ (ozadje)	vol %	0,042	0,041	0,041	0,040	0,040	0,040
Masni pretok razredčenih izpušnih plinov G _{TOTW}	kg/h	625,722	627,171	623,549	630,792	627,895	561,267
Razmerje α H/C goriva	–	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
Razmerje β O/C goriva		0	0	0	0	0	0

¹ Pogoji za razredčeni zrak enaki pogojem za polnilni zrak.

2.3.1. Korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w

Za pretvarjanje meritev suhih CO in CO₂ na vlažno osnovo se izračuna korekcijski faktor iz suhega v vlažno k_w :

Za razredčene izpušne pline:

$$k_w = k_{w,e,2} = \left(\frac{(1 - k_{w1})}{1 + \frac{\alpha \times \% \text{CO}_2 [\text{dry}]}{200}} \right)$$

kjer je

$$k_{w1} = \frac{1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}{1\,000 + 1,608 \times [H_d \times (1 - 1/DF) + H_a \times (1/DF)]}$$

$$DF = \frac{13,4}{\% \text{conc}_{\text{CO}_2} + (\text{ppm conc}_{\text{CO}} + \text{ppm conc}_{\text{HC}}) \times 10^{-4}}$$

$$DF = \frac{13,4}{1,038 + (3\,681 + 91) \times 10^{-4}} = 9,465$$

$$k_{w1} = \frac{1,608 \times [4,08 \times (1 - 1/9,465) + 4,08 \times (1/9,465)]}{1\,000 + 1,608 \times [4,08 \times (1 - 1/9,465) + 4,08 \times (1/9,465)]} = 0,007$$

$$k_w = k_{w,e,2} = \left(\frac{(1 - 0,007)}{1 + \frac{1,85 \times 1,038}{200}} \right) = 0,984$$

$$\text{CO} [\text{wet}] = \text{CO} [\text{dry}] \times k_w = 3\,681 \times 0,984 = 3\,623 \text{ ppm}$$

$$\text{CO}_2 [\text{wet}] = \text{CO}_2 [\text{dry}] \times k_w = 1,038 \times 0,984 = 1,0219 \%$$

Tabela 19 – Vlažne vrednosti CO in CO₂ za razredčene izpušne pline glede na faze preskusa.

Faza		1	2	3	4	5	6
DF	—	9,465	11,454	14,707	19,100	20,612	32,788
k_{w1}	—	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
k_w	—	0,984	0,986	0,988	0,989	0,991	0,992
Vlažni CO	Ppm	3623	3417	2510	2340	3057	1802
vlažni CO ₂	%	1,0219	0,8028	0,6412	0,4524	0,3264	0,2066

Za zrak za redčenje:

$$k_{w,d} = 1 - k_{w1}$$

kjer je faktor k_{w1} enak kot že izračunani faktor za razredčene izpušne pline.

$$k_{w,d} = 1 - 0,007 = 0,993$$

$$\text{CO [wet]} = \text{CO [dry]} \times k_w = 3 \times 0,993 = 3 \text{ ppm}$$

$$\text{CO}_2 \text{ [wet]} = \text{CO}_2 \text{ [dry]} \times k_w = 0,042 \times 0,993 = 0,0421 \text{ \% Vol}$$

Tabela 20 – Vlažne vrednosti CO in CO₂ za zrak za redčenje glede na faze preskusa.

Faza		1	2	3	4	5	6
K _{w1}	–	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
K _w	–	0,993	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994
Vlažni CO	ppm	3	3	3	2	2	3
Vlažni CO ₂	%	0,0421	0,0405	0,0403	0,0398	0,0394	0,0401

2.3.2. Emisije HC

$$\text{HC}_{\text{mass}} = u \times \text{conc}_c \times G_{\text{TOTW}}$$

kjer je:

- $u = 0,000478$ iz tabele 2,
- $\text{conc}_c = \text{conc} - \text{conc}_d \times (1 - 1/\text{DF})$,
- $\text{conc}_c = 91 - 6 \times (1 - 1/9,465) = 86 \text{ ppm in}$
- $\text{HC}_{\text{mass}} = 0,000478 \times 625,722 = 25,666 \text{ g/h.}$

Tabela 21 – Emisije HC [v g/h] glede na faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
HC _{mass}	25,666	25,993	21,607	21,850	34,074	48,963

2.3.3. Emisije NO_x

Faktor K_H za korekcijo emisij NO_x se izračuna iz:

$$K_H = 0,6272 + 44,030 \times 10^{-3} \times H_a - 0,862 \times 10^{-3} \times H_a^2$$

$$K_H = 0,6272 + 44,030 \times 10^{-3} \times 4,8 - 0,862 \times 10^{-3} \times (4,08)^2 = 0,79$$

Tabela 22 – Korekcijski faktor K_H vlažnosti emisij NO_x glede na faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
K _H	0,793	0,791	0,791	0,790	0,791	0,792

$$\text{NO}_{x\text{mass}} = u \times \text{conc}_c \times K_H \times G_{\text{TOTW}}$$

kjer je:

- $u = 0,001587$ iz tabele 2,
- $\text{conc}_c = \text{conc} - \text{conc}_d \times (1 - 1/\text{DF})$,
- $\text{conc}_c = 85 - 0 \times (1 - 1/9,465) = 85 \text{ ppm in}$
- $\text{NO}_{x\text{mass}} = 0,001587 \times 85 \times 0,79 \times 625,722 = 67,168 \text{ g/h.}$

Tabela 23 – Emisije NO_x [v g/h] glede na faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
NO _{xmass}	67,1 68	38,721	19,012	4,621	2,319	0,811

2.3.4. Emisije CO

$$CO_{mass} = u \times conc_c \times G_{TOTW}$$

kjer je:

- $u = 0,000966$ iz tabele 2,
- $conc_c = conc - conc_d \times (1 - 1/DF)$,
- $conc_c = 3622 - 3 \times (1 - 1/9,465) = 3620$ ppm in
- $CO_{mass} = 0,000966 \times 3620 \times 625,722 = 2188,001$ g/h.

Tabela 24 – Emisije CO [v g/h] glede na faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
CO _{mass}	2 188,001	2068,760	1 510,187	1 424,792	1 853,109	975,435

2.3.5. Emisije CO₂

$$CO_{2mass} = u \times conc_c \times G_{TOTW}$$

kjer je:

- $u = 15,19$ iz tabele 2,
- $conc_c = conc - conc_d \times (1 - 1/DF)$,
- $conc_c = 1,0219 - 0,0421 \times (1 - 1/9,465) = 0,9842$ vol % in
- $CO_{2mass} = 15,19 \times 0,9842 \times 625,722 = 9354,488$ g/h

Tabela 25 – Emisije CO₂ [v g/h] glede na različne faze preskusa.

Faza	1	2	3	4	5	6
CO _{2mass}	9 354,488	7295,794	5717,531	3 973,503	2 756,113	1 430,229

2.3.6. Specifične emisije

Za vse posamezne sestavine se izmeri specifična emisija (v g/kWh):

Posamezni plin =

$$\frac{\sum_{i=1}^n (Gas_{mass_i} \times WF_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i \times WF_i)}$$

Tabela 26 – Emisije [v g/h] in utežni faktorji glede na različne faze preskusa.

Faza		1	2	3	4	5	6
HC _{mass}	g/h	25,666	25,993	21,607	21,850	34,074	48,963
NO _{xmass}	g/h	67,168	35,721	19,012	4,621	2,319	0,811
CO _{mass}	g/h	2 188,001	2068,760	1 510,187	1 424,792	1 853,109	975,435
CO _{2mass}	g/h	9 354,488	7295,794	5717,531	3973,503	2 756,113	1 430,229
Moč P _i	KW	13,15	9,81	6,52	3,25	1,28	0
utežni faktorji WF _i	—	0,090	0,200	0,290	0,300	0,070	0,050

$$HC = \frac{25,666 \times 0,090 + 25,993 \times 0,200 + 21,607 \times 0,290 + 21,850 \times 0,300 + 34,074 \times 0,070 + 48,963 \times 0,050}{13,15 \times 0,090 + 9,81 \times 0,200 + 6,52 \times 0,290 + 3,25 \times 0,300 + 1,28 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 4,12 \text{ g/kWh}$$

$$NO_x = \frac{67,168 \times 0,090 + 35,721 \times 0,200 + 19,012 \times 0,290 + 4,621 \times 0,300 + 2,319 \times 0,070 + 0,811 \times 0,050}{13,15 \times 0,090 + 9,81 \times 0,200 + 6,52 \times 0,290 + 3,25 \times 0,300 + 1,28 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 3,42 \text{ g/kWh}$$

$$CO = \frac{2\,188,001 \times 0,090 + 2\,068,760 \times 0,200 + 1\,510,187 \times 0,290 + 1\,424,792 \times 0,300 + 1\,853,109 \times 0,070 + 975,435 \times 0,050}{13,15 \times 0,090 + 9,81 \times 0,200 + 6,52 \times 0,290 + 3,25 \times 0,300 + 1,28 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 271,15 \text{ g/kWh}$$

$$CO_2 = \frac{9\,354,488 \times 0,090 + 7\,295,794 \times 0,200 + 5\,717,531 \times 0,290 + 3\,973,503 \times 0,300 + 2\,756,113 \times 0,070 + 1\,430,229 \times 0,050}{13,15 \times 0,090 + 9,81 \times 0,200 + 6,52 \times 0,290 + 3,25 \times 0,300 + 1,28 \times 0,070 + 0 \times 0,050} = 887,53 \text{ g/kWh}$$