

14. Peucheret S, Wyszynski M L, Lehrle R S, Golunski S, Xu H. *Use of catalytic reforming to aid natural gas HCCI combustion in engines: Experimental and modelling results of open-loop fuel reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2005; 30: 1583–1594.
15. Sobieszcański M. *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*. Wydanie 1. Warszawa, WKŁ 2000.
16. Sok R, Kusaka J. *Fuel-reforming effects on a gasoline direct injection engine under a low-temperature combustion mode: Experimental and kinetics analyses*. Energy Conversion and Management 2022; 255: 115304.
17. Sok R, Kusaka J, Daisho Y, Yoshimura K, Nakama K. *Effect of fuel injection timing during negative valve overlap period on a GDI-HCCI engine*. Proceedings of the ASME 2018 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference 2018; 1: V001T03A020.
18. Steeper R R, Davisson M L. *Analysis of gasoline negative-valve-overlap fueling via dump sampling*. SAE International Journal of Engines 2014; 7(2): 762–771.
19. Tartakovsky L, Sheintuch M. *Fuel reforming in internal combustion engines*. Progress in Energy and Combustion Science 2018; 67: 88–114.
20. Urushihara T, Hiraya K, Kakuhou A, Itoh T. *Expansion of HCCI operating region by the combination of direct fuel injection, negative valve overlap and internal fuel reformation*. SAE Technical Paper Series 2003-01-0749, 2003.
21. Wang Z, Shuai S J, Wang J X, Tian G H. *A computational study of direct injection gasoline HCCI engine with secondary injection*. Fuel 2006; 85(12–13): 1831–1841.
22. Wendeker M. *Sterowanie wtryskiem w silniku o zapłonie iskrowym*. Lublin, Lubelskie Towarzystwo Naukowe 1999.
23. Willand J, Nieberding R G, Vent G, Enderle C. *The knocking syndrome-its cure and its potential*. SAE Technical Paper 982483, 1998.
24. Wolk B, Ekoto I, Northrop W F, Moshammer K, Hansen N. *Detailed speciation and reactivity characterization of fuel-specific in-cylinder reforming products and the associated impact on engine performance*. Fuel 2016; 185: 341–361.
25. Xie H, Lu J, Chen T i in. *Chemical effects of the incomplete-oxidation products in residual gas on the gasoline HCCI auto-ignition*. Combustion Science and Technology 2014; 186(3): 273–296.
26. Xu L, Treacy M, Zhang Y i in. *Comparison of efficiency and emission characteristics in a direct-injection compression ignition engine fuelled with iso-octane and methanol under low temperature combustion conditions*. Applied Energy 2022; 312: 118714.
27. Yamamoto S, Tanaka D, Takemura J, Nakayama O, Ando H. *Mixing control and combustion in gasoline direct injection engines for reducing cold-start emissions*. SAE Technical Paper 2001-01-0550, 2001.
28. Yu W, Xie H, Chen T i in. *Effects of active species in residual gas on auto-ignition in a HCCI gasoline engine*. SAE Technical Paper 2012-01-1115, 2012.



## Procesy spalania niskotemperaturowego

### 7.1. Uproszczony opis spalania paliw węglowodorowych

Spalanie różnych paliw węglowodorowych odbywa się na drodze podobnych mechanizmów reakcji łańcuchowych, w wyniku których cząsteczki paliwa zostają przekształcone w produkty końcowe, głównie wodę i dwutlenek węgla, a energia zostaje uwolniona w postaci ciepła. Utlenianie paliwa można opisać za pomocą sieci elementarnych reakcji chemicznych zachodzących jednocześnie i w różnych kierunkach w strefie spalania. Reakcje przebiegają według teorii łańcuchowej Siemionowa [36]. Nośnikami łańcuchów są wolne rodniki, takie jak OH, HO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, CH, CH<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub> oraz atomy wodoru i tlenu. W przypadku paliw silnikowych może istnieć wiele setek, a nawet tysiące pośrednich substancji chemicznych i wiele tysięcy elementarnych reakcji [45]. Niemniej jednak wyodrębniono kilka podstawowych reakcji, które odgrywają główną rolę w rozgałęzianiu się łańcuchów i decydują o kinetyce spalania. W wysokiej temperaturze (powyżej 1100 K), typowej dla spalania we wszelkiego rodzaju silnikach, powstawanie nowych centrów reaktywności jest spowodowane głównie sekwencją reakcji:



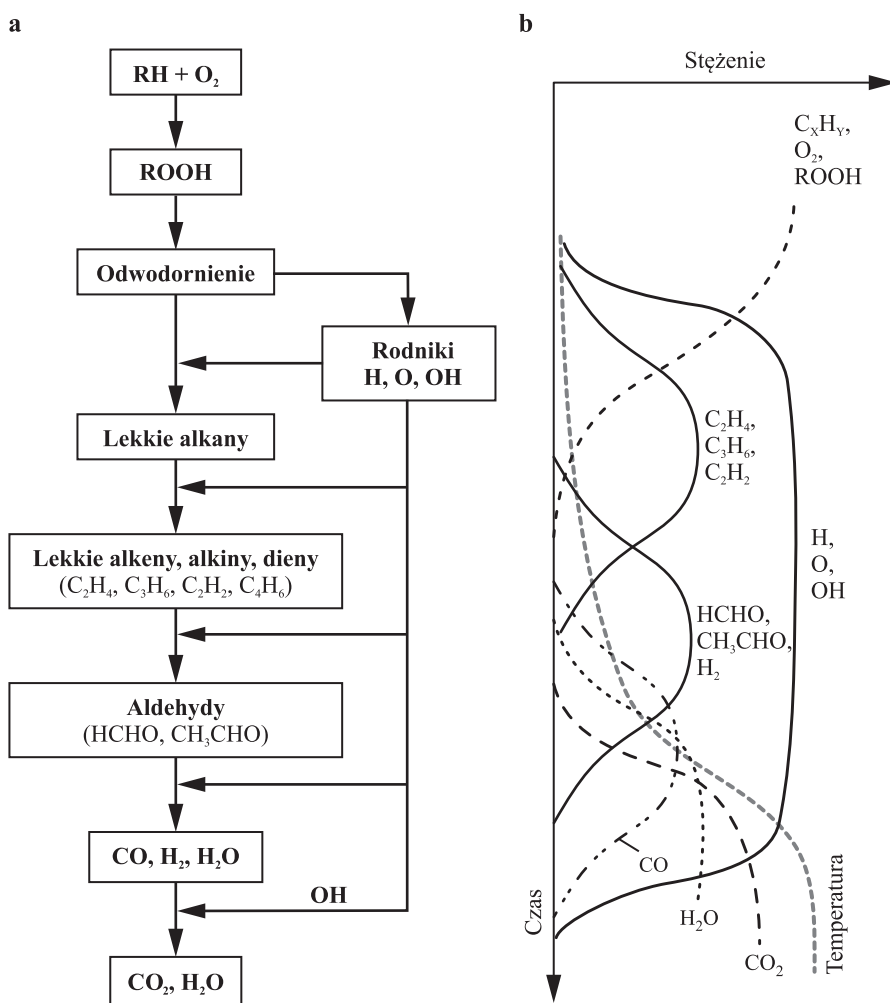
Reakcje 7.1 i 7.2 rozgałęziają łańcuchy – zużywają po jednym rodniku i wytwarzają po dwa nowe. W wyniku reakcji 7.3 odtwarzany jest atom wodoru zużyty w reakcji 7.1. Powtarzanie się przedstawionej powyżej sekwencji powoduje namnażanie rodników, zwiększając w ten sposób ogólną szybkość reakcji spalania.

Kolejną ważną reakcją decydującą o przebiegu spalania jest reakcja tlenu węgla z rodnikiem hydroksylowym (OH):



Reakcja ta pozwala na propagację łańcucha poprzez odłączenie atomu wodoru, a także produkuje duże ilości ciepła poprzez wytworzenie cząsteczki dwutlenku węgla.

Uproszczony schemat utleniania węglowodorów przedstawiono na rys. 7.1a. W pierwszej fazie spalania powstają nadtlenki organiczne, które następnie ulegają odwodornieniu i rozpadają się na lżejsze alkanany. W wyniku kolejnych reakcji z udziałem rodników powstają alkeny, alkiny, dieny, a w końcu aldehydy. Ta sekwencja obejmuje fazę tzw. zimnych płomieni, w której wydzielona została około 10% ciepła spalania. W wyniku kolejnych reakcji, przebiegających w wyższej temperaturze, powstaje woda i tlenek węgla oraz uwalnia się kolejne 30% energii. Najwięcej, bo aż 60% energii spalania uwalnia się w końcowej fazie, kiedy to przy udziale rodników hydroksylowych tlenek węgla



Rys. 7.1. Uproszczony schemat spalania węglowodorów (a) oraz stężenia poszczególnych grup związków chemicznych i temperatury jako funkcje czasu (b) [29]

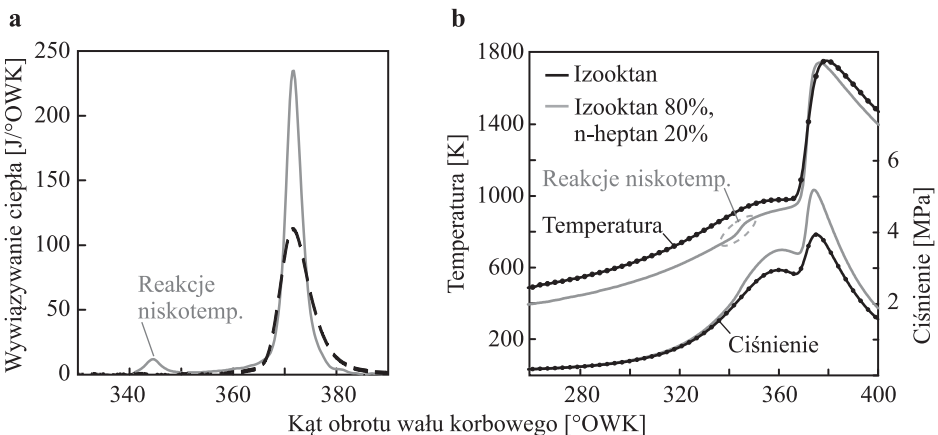
dopala się do dwutlenku węgla (reakcja 7.4). Na rys. 7.1.b przedstawiono poglądowo przebiegi stężeń poszczególnych grup składników oraz temperatury podczas spalania jako funkcje czasu.

Różne rodzaje węglowodorów, a w konsekwencji różne paliwa reagują z różną szybkością ze względu na różne szybkości odłączania atomów wodoru, a następnie różne szybkości rozgałęziania łańcuchów. Przebieg tych zjawisk decyduje o szybkości spalania laminarnego oraz właściwościach samozapłonowych paliw. Szybkość reakcji spalania w silniku zależy również od warunków, takich jak temperatura, ciśnienie i skład mieszaniny.

## 7.2. Fenomenologiczny opis spalania w silniku HCCI

Tym, co zasadniczo odróżnia silnik HCCI od silników ZI lub ZS, jest przebieg spalania w sensie fizycznym. Spalanie HCCI inicjowane jest przez energię termiczną dostarczoną do ładunku na skutek sprężania, a nie pochodzącą od dodatkowego źródła, jak w silniku ZI. Ponadto postęp spalania w silnikach ZI i ZS kontrolowany jest przez wymianę ciepła i dyfuzję [34]. W silniku HCCI teoretycznie utlenianie paliwa zachodzi jednocześnie w całej objętości, więc jego szybkość wynika głównie z kinetyki reakcji chemicznych. W rzeczywistości jednak spalanie rozpoczyna się w licznych aktywnych centrach rozmieszczonych w komorze spalania, lecz szybko tworzy niemal jednorodną mieszaninę reakcyjną.

W warunkach silnikowych występują dwa rodzaje samozapłonu: niskotemperaturowy (w temperaturze poniżej 650 K) oraz średnotemperaturowy (w temperaturze 650–1000 K). Podczas spalania niektórych paliw o małych liczbach oktanowych



Rys. 7.2. Szybkości wywiązywania ciepła, temperatury oraz ciśnienia w cylindrze podczas spalania izooktanu oraz mieszaniny izooktanu i n-heptanu o LOB wynoszącej 80 [39]