

## EVOLUSI SISTEM BAHAN BAKAR LPG: TINJAUAN LITERATUR

*This article presents an analysis of the development of fuel system technology in Liquefied Petroleum Gas (LPG) vehicles compared to the development of a fuel system in a gasoline engine. We found that over the past 100 years of using LPG as an alternative fuel, there have been changes in LPG kits for six generations. The first and second-generation LPG kits are similar to the concept of a carburetor, LPG and air mix in front of the throttle valve through a mixer. The third-generation of LPG kits is equivalent to K-Jetronik on a gasoline engine. The fourth and fifth-generation follows the development of a multi-point multi-point injection system and the sixth generation follow the workings of gasoline direct injection (GDI). The sixth-generation of LPG kits, where LPG is injected into the combustion chamber, has an advantage in volumetric efficiency but due to high combustion chamber temperatures, it is necessary to develop injectors that are resistant to high temperatures.*

**Keywords:** *LPG Fueled Vehicles, Generation LPG Kits, Vacuum Systems, Direct Injection Systems.*

### Muji Setiyo

Universitas Muhammadiyah Magelang  
Program Studi Mesin Otomotif  
Email:  
setiyo.muji@ummgl.ac.id

### Budi Waluyo

Universitas Muhammadiyah Magelang  
Program Studi Mesin Otomotif  
Email:  
otobudy@ummgl.ac.id

## 1. PENDAHULUAN

Untuk mengurangi ketergantungan terhadap minyak dan mengembangkan transportasi yang berkelanjutan, banyak negara berencana untuk mengganti bahan bakar konvensional dengan bahan bakar alternatif di masa depan [1]. Biofuel seperti ethanol dan biodiesel sangat menjanjikan terkait keberlanjutan karena mereka dapat diproduksi dari tanaman. Namun, pemerintah harus menyiapkan kebijakan yang andal karena produksi dan implementasi biofuel tidak hanya mempengaruhi ketersediaan energi tetapi juga keseimbangan sosial-ekonomi dan lingkungan. Jika tidak dijaga dengan baik, ada potensi deforestasi dan kerusakan sumber daya alam hayati [2]–[5]. Selain ethanol dan biodiesel, *Compressed Natural Gas* (CNG), kendaraan listrik, dan kendaraan *fuel cell* juga menjadi trend propulsi alternatif untuk menggantikan bensin dan diesel [6], [7]. Namun demikian, baik CNG, kendaraan listrik, maupun *fuel cell* memerlukan investasi yang relatif besar untuk membangun infrastruktur penunjang. Terlebih untuk kendaraan berbasis listrik, harga kepemilikan yang masih tinggi membuat penetrasinya di pasar masih rendah [8].

Untuk saat ini, bensin dan minyak diesel masih menjadi sumber energi utama untuk sector transportasi. Pada tahun 2018, penggunaan bensin dan minyak diesel mencapai lebih dari 80 kuadriliun Btu dari total konsumsi energi sekitar 115 kuadriliun Btu [9]. Selain masalah ketersediaan dan distribusi yang tidak merata, bensin dan minyak diesel menghasilkan emisi yang tinggi karena propertinya, terutama jika diaplikasikan pada kendaraan lama. Sementara itu, mempersiapkan kendaraan lama dan menggantinya dengan kendaraan baru dengan teknologi tinggi yang rendah emisi juga tidak mudah dilakukan oleh pemerintah [10]. Keadaan ini menjadi perhatian para pemangku kepentingan karena tuntutan standar emisi dan persyaratan ekonomi bahan bakar menjadi semakin ketat. Oleh karena itu, *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) sebagai sumber energi yang lebih bersih, relatif murah dan tersedia secara domestik menjadi salah satu bahan bakar alternatif yang masuk akal untuk saat ini dan beberapa tahun mendatang sebagai transisi ke CNG maupun ke kendaraan berbasis listrik [11][12].

## 2. TREND KENDARAAN LPG

Selama periode tahun 2000 sampai 2017, konsumsi global LPG telah meningkat secara stabil, mencapai puncaknya 27,1 juta ton pada tahun 2016. Selanjutnya pada tahun 2017 konsumsinya turun sebesar 1,2%

menjadi 26,8 Mt dan merupakan pertama kalinya turun sejak tahun 1990-an. Namun demikian, jumlah kendaraan berbahan bakar LPG terus meningkat. Pada tahun 2017, ada lebih dari 27,1 juta kendaraan LPG di seluruh dunia. Korea, Turki, Rusia, Polandia, dan Italia adalah konsumen LPG terbesar pada tahun 2017 [13].

Pangsa pasar LPG dalam total konsumsi bahan bakar otomotif sangat bervariasi di antara negara-negara yang mempromosikan LPG sebagai bahan bakar kendaraan, mulai dari hanya 0,1% di Amerika Serikat hingga sekitar 20% di Ukraina [13]. Kesenjangan dalam keberhasilan promosi LPG untuk menggantikan bahan bakar otomotif konvensional seperti bensin dan diesel terutama dipengaruhi oleh perbedaan dalam kebijakan insentif yang diberikan pemerintah [14].

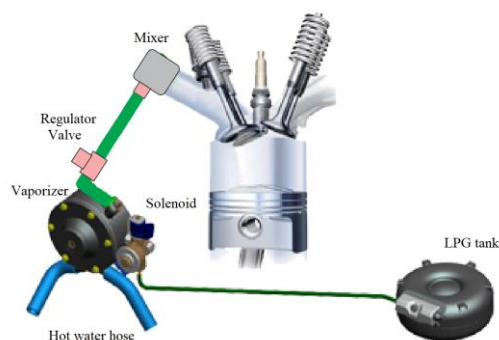
LPG untuk kendaraan yang digerakkan oleh *spark ignition* (SI) engine dapat diterapkan dengan sistem *full-dedicated* (bahan bakar tunggal) atau *bi-fuel* (bahan bakar ganda), dimana LPG dan bensin dapat dioperasikan secara bergantian. Pengemudi dapat dengan mudah memilih mode bahan bakar dengan sakelar pemindahan bahan bakar ditempatkan di dasbor. Di musim dingin, di mana ada masalah selama *start* dingin dengan LPG, pengemudi dapat *start* dengan bensin, setelah mesin stabil kemudian dipindahkan ke mode LPG. Sistem *bi-fuel* juga membuat kendaraan lebih fleksibel beroperasi daripada sistem *full-dedicated* ketika bepergian di daerah di mana dispenser LPG tidak tersedia. Namun, sistem *bi-fuel* memiliki kelemahan, termasuk berat total kendaraan yang meningkat dengan kehadiran tangki LPG dan membutuhkan beberapa perawatan [15]. Namun demikian, saat ini kemajuan penelitian telah membantu memecahkan masalah dan emisi yang tinggi selama musim dingin [16]–[18]. Berat tangki LPG juga memungkinkan untuk dikurangi dengan menggunakan tangki komposit yang lebih ringan tetapi lebih kuat [19].

### 3. STATUS PERKEMBANGAN TEKNOLOGI LPG KITS

Uji coba LPG untuk kendaraan dimulai sekitar tahun 1910 hingga tahun 1920. Percobaan pertama diterapkan pada kendaraan di California, Amerika Serikat. Pada tahun 1950, 1.000 bus dari Chicago Transit Authority menggunakan LPG dan Milwaukee mengkonversi 270 taksi untuk beralih dari bahan bakar minyak ke LPG [15]. Pada tahun 1973, Embargo minyak di Arab meningkatkan ketertarikan publik terhadap bahan LPG. Pada saat itu, tiba-tiba bensin menjadi sangat mahal dan rantai pasokannya tidak menentu. Hal itu mendorong pertumbuhan *retrofit* LPG pada kendaraan yang tinggi pada rentang sampai awal 1980-an. Pada tahun 1978 sekitar 35.000 kendaraan per tahun dikonversi ke LPG di Amerika Serikat. Pada 1981 jumlah tersebut hampir 250.000. Pada tahun 1989 hampir 4 juta kendaraan di seluruh dunia didukung dengan bahan bakar LPG. Sejak saat itu aplikasinya menjadi meluas [20]. Setelah sekitar 100 tahun perkembangannya, teknologi bahan bakar LPG juga berkembang mulai dari sistem pemasukan konvensional hingga kini menyamai teknologi *gasoline direct injection* (GDI) karena tuntutan batas emisi yang semakin ketat [21]. Oleh karena itu, berikut akan dijelaskan evolusi LPG kits dari waktu ke waktu.

#### 3.1. Generasi 1: Sistem Vakum yang Diatur Secara Manual

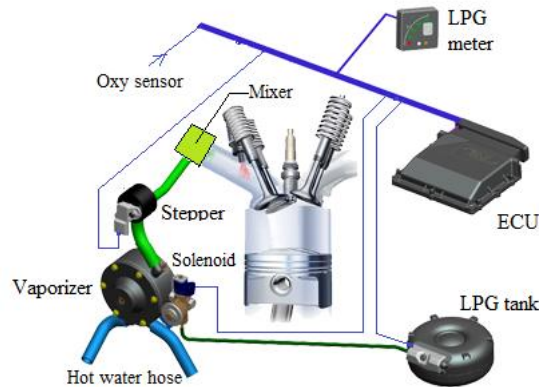
Ini adalah LPG kits paling sederhana yang tersedia dan dirancang untuk mesin S.I. tipe karburator, injeksi tunggal dan injeksi *multi-point*. LPG kit generasi pertama bekerja tanpa sensor lambda. Bahan bakar gas dimasukkan ke dalam mesin melalui *mixer* yang dipasang sebelum throttle, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Komposisi campuran diatur oleh *reducer-vaporizer*. Sistem ini sepenuhnya dioperasikan secara mekanis, dengan sinyal kevakuman *intake manifold*. Ketika LPG kit ini dipasang pada mesin dengan injeksi bahan bakar, perlu menambahkan modul elektronik yang secara otomatis mengatur peralihan dari bensin ke LPG dan sebaliknya. Performa mesin dengan LPG kits generasi pertama ini dilaporkan baik untuk mesin *multi-piston* maupun *single-piston* dan umumnya menghasilkan daya yang lebih rendah daripada saat beroperasi dengan bensin, meskipun dengan penyesuaian *ignition timing* [22]–[25].



Gambar 1: LPG kits generasi pertama

### 3.2. Generasi 2: Sistem Vakum yang Diatur Secara Elektronik

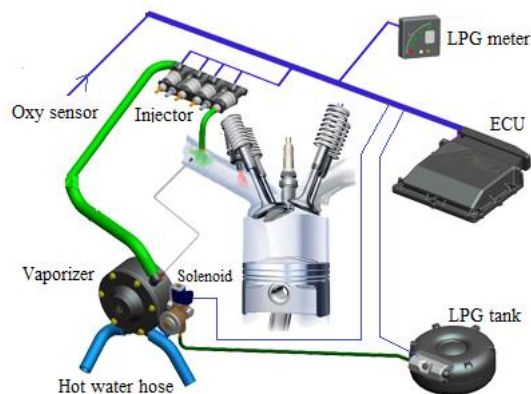
Generasi kedua LPG kit adalah evolusi dari generasi pertama dan dirancang untuk mesin injeksi (*single* atau *multi-point*) yang dilengkapi dengan sensor lambda dan katalisator, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Bahan bakar gas masih diumpungkan di awal sistem intake secara terpusat sebelum *throttle*. Namun demikian, pada generasi kedua sistem regulasi telah dimodifikasi dengan modul elektronik untuk mengatur campuran bahan bakar dan udara. Modul ini bekerja dengan data dari sensor putaran mesin, sensor lambda dan sensor posisi *throttle* untuk mengatur aliran gas melalui motor stepper, sehingga memastikan komposisi campuran yang optimal. Kehilangan daya yang besar pada beban parsial juga dapat dikurangi dengan LPG kits generasi kedua ini [26].



Gambar 2: LPG kits generasi kedua

### 3.3. Generasi 3: Sistem Injeksi Fasa Gas Konstan

Sistem ini digunakan pada mesin SI dengan injeksi bahan bakar (*single* atau *multi-point*) yang dilengkapi dengan sensor lambda dan katalisator. Tidak seperti pada sistem generasi sebelumnya, bahan bakar gas dimasukkan ke intake manifold melalui saluran khusus. Meskipun bahan bakar dimasukkan ke dalam mesin secara konstan, campuran udara-bahan bakar jauh lebih baik didistribusikan di antara semua silinder daripada pada generasi sebelumnya. Berkat penghapusan *mixer* (dibandingkan dengan generasi sebelumnya) kinerja mesin dapat ditingkatkan, dan konsumsi gas berkurang. Bahan bakar dapat diatur lebih tepat dan fenomena *backfire* hampir dapat dihilangkan. LPG kits generasi ketiga disajikan dalam Gambar 3 sebagai berikut.

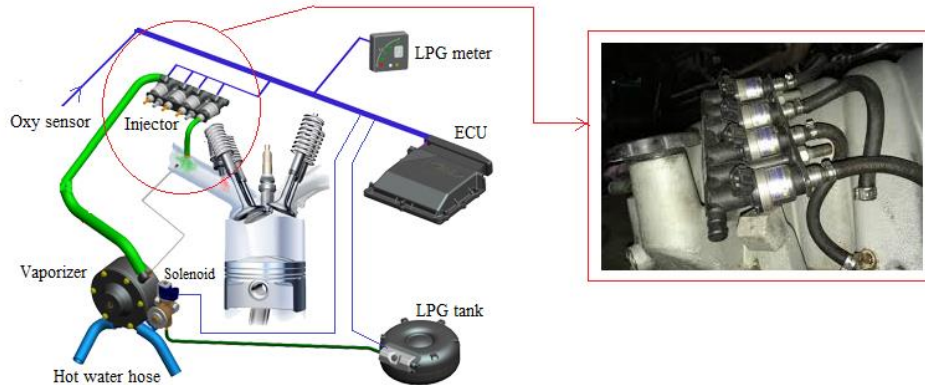


Gambar 3: LPG kits generasi ketiga, dimana injektor menginjeksikan LPG secara simultan

### 3.4. Generasi 4: Sistem Injeksi Fasa Gas Sekuensial

Saat ini, sistem generasi ke-4 adalah yang paling populer. Bahan bakar disuntikkan ke setiap saluran intake manifold secara individual dekat katup, melalui injektor yang dioperasikan secara elektromagnetik, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. LPG kit generasi keempat dikontrol oleh *Electronic Control Unit* (ECU) menggunakan sinyal kontrol injektor bensin dan sinyal kecepatan putaran mesin untuk menghitung durasi injeksi sistem LPG. Sistem generasi keempat tidak memerlukan sinyal lain dari sensor mesin, karena bukan

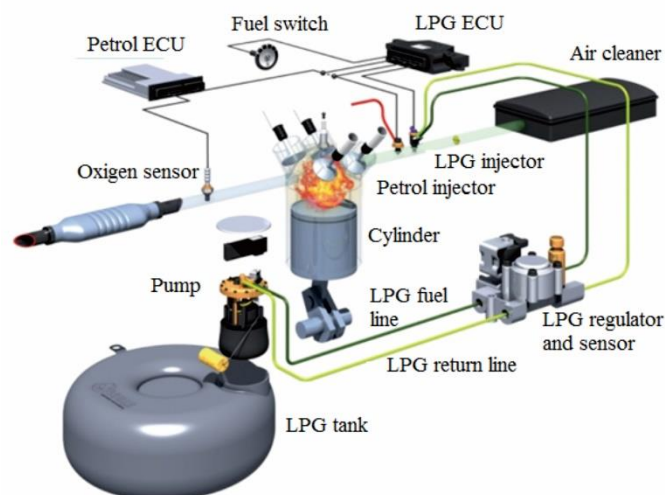
sistem paralel. ECU LPG hanya menghitung ulang sinyal injektor bensin agar sesuai untuk injektor LPG. Keseluruhan fungsi mesin dijalankan oleh ECU bensin, semua sistem diagnostik berjalan secara normal dan tidak perlu menggunakan emulator eksternal karena emulator injektor terintegrasi ke dalam ECU LPG. Banyak penelitian telah ditemukan mengenai jenis kit LPG ini, dari membandingkan kinerja hingga rekayasa untuk meningkatkan kinerja dan emisi [27]–[29].



**Gambar 4:** LPG kits generasi keempat, dimana injektor menginjeksikan LPG secara sekuensial

### 3.5. Generasi 5: Sistem Injeksi Fasa Cair

Seperti sistem generasi keempat, generasi kelima ini didedikasikan untuk mesin SI dengan injeksi bahan bakar *multi-point*, sensor lambda, katalis, dan sistem *On Board Diagnostic* (OBD). Tidak seperti semua generasi sebelumnya, LPG dimasukkan ke dalam mesin dalam bentuk cair, tanpa penguapan. Seperti pada generasi keempat, LPG memasuki sistem intake di bagian paling akhir, dekat katup intake, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. LPG menguap dalam aliran udara yang mengalir menuju ruang pembakaran, sehingga mendinginkan udara dan meningkatkan efisiensi volumetrik untuk memperbaiki kinerja dalam rentang kecepatan putaran tertentu. Sistem generasi kelima dioperasikan dan dikendalikan seperti generasi ke-4 dan menggunakan sinyal kontrol injektor bensin. Hingga saat ini, kit sistem injeksi fasa cair masih dikembangkan oleh produsen berdasarkan informasi penelitian terbaru untuk mencapai ekonomi bahan bakar, daya, dan emisi yang lebih baik [30]–[32].

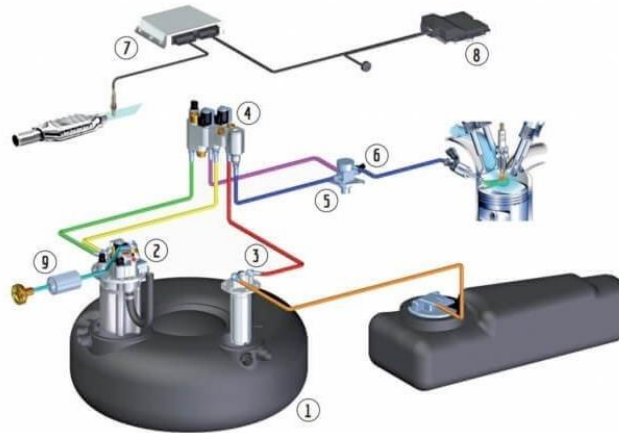


**Gambar 5:** LPG kits generasi kelima, dimana LPG diinjeksikan ke *intake manifold* dalam fasa cair [33]

### 3.6. Generasi 6: Sistem Injeksi Langsung

Generasi kelima berkembang menjadi sistem injeksi langsung yang merupakan generasi paling canggih. Pada LPG kits ini, pompa bahan bakar tekanan tinggi memasok LPG dari tangki langsung ke injektor yang dipasang di ruang bakar, seperti sistem *Gasoline Direct Injection* (GDI) dalam mesin bensin (Gambar 6). Banyak laporan penelitian yang terkait dengan sistem injeksi langsung ini karena tantangan untuk mengembangkan dan

mengimplementasikan yang lebih kompleks [16][34]–[37]. Karena manajemen kontrol bahan bakar adalah unik untuk setiap engine, sistem injeksi langsung tidak dikembangkan secara universal seperti generasi sebelumnya. Untuk alasan ini, kendaraan LPG dengan system injeksi langsung biasanya tersedia sebagai produk *Original Equipment Manufacturer* (OEM), bukan produk konversi.



**Gambar 6:** LPG kits generasi keenam: (1) *LPG tank*, (2) *LPG pump*, (3) *Extra fuel pump*, (4) *Fuel Selection Unit* (FSU), (5) *High pressure pump*, (6) *Fuel temperature sensor*, (7) *Electronic Control Unit* (ECU), (8) *Fuel selector switch*, dan (9) *Fuel filling filter* [38]

## 4. PEMBAHASAN

### 4.1. Komparasi Teknologi

Kenyataannya, meskipun LPG kits telah berkembang sampai pada sistem injeksi langsung yang setara dengan GDI pada mesin bensin, generasi pertama dari LPG kits juga masih digunakan sampai saat ini, terutama di negara-negara yang sedang belajar dan mulai menggunakan LPG untuk sector transportasi, sebagaimana dilaporkan oleh *World Liquid Petroleum Association* (WLPGA) [39]. Setiap generasi memiliki tipikal dengan keunggulan dan kelemahan yang menyertainya. Oleh karena itu, Tabel 1 berikut menyajikan komparasi dari generasi ke generasi LPG kits yang tersedia secara komersial saat ini.

**Tabel 1:** Komparasi LPG kits

No	Jenis LPG kits	Tempat pemasangan LPG	Fasa	Pengaturan	Aplikasi	Keunggulan	Kelemahan
1.	Sistem vakum yang diatur secara manual	Secara terpusat, di awal sistem intake, sebelum throttle (seperti mesin karburator atau injeksi <i>single-point</i> ).	Gas	Penurun tekanan dan pengatur aliran gas manual, yang presetnya universal untuk seluruh putaran dan beban mesin.	Mesin S.I. dengan karburator atau injeksi bahan bakar ( <i>single</i> atau <i>multi-point</i> ), tanpa sensor dan katalisator lambda.	Sederhana, konversi mudah, harga murah.	Saat ini aplikasi terbatas, praktis hanya berlaku untuk mobil tua.
2.	Sistem vakum yang diatur secara elektronik	Secara terpusat, di awal sistem intake, sebelum throttle (seperti mesin karburator	Gas	Penurun tekanan dan pengatur aliran secara gas elektronik (motor stepper), menggunakan sinyal dari sensor mesin (lambda, kecepatan putaran,	Mesin S.I. dengan injeksi bahan bakar ( <i>single</i> atau <i>multi-point</i> ), dengan sensor dan katalisator lambda.	Sederhana, konversi mudah, harga murah.	Aplikasi terbatas saat ini, praktis hanya berlaku untuk mobil yang lebih tua, meskipun dilengkapi dengan sensor lambda dan

No	Jenis LPG kits	Tempat pemasukan LPG	Fasa	Pengaturan	Aplikasi	Keunggulan	Kelemahan
		atau injeksi single-point).		dan posisi throttle).	Dalam kasus tertentu dimungkinkan juga untuk diterapkan pada mesin dengan sistem OBD.		katalis (karena peraturan komposisi campuran yang kurang baik, sistem ini tidak berlaku untuk mesin terbaru).
3.	Sistem Injeksi Fasa Gas Konstan	Injeksi gas konstan ke saluran intake masing-masing silinder di dekat katup intake.	Gas	Regulator aliran yang dikontrol secara elektronik menggunakan data dari sensor mesin (lambda, kecepatan putaran, dan posisi <i>throttle</i> ).	Mesin S.I. dengan injeksi bahan bakar tunggal atau <i>multi-point</i> , dengan sensor dan katalis lambda, juga dengan sistem EOBD (diperlukan emulator).	Sangat mudah untuk mengkonversi, campuran bisa dibuat lebih tepat.	ECU LPG mengumpulkan data yang diperlukan dan mengatur komposisi campuran udara-bahan bakar sendiri. Untuk alasan ini, emulator eksternal diperlukan.
4.	Sistem Injeksi Fasa Gas Squensial	Injeksi LPG squensial ke dalam saluran intake silinder individual, dekat katup intake.	Gas	Elektronik - Waktu injeksi LPG dihitung berdasarkan waktu injeksi bensin.	Mesin S.I. dengan injeksi bahan bakar <i>multi-point</i> , sensor lambda, katalis dan sistem EOBD.	Dosis bahan bakar yang sangat presisi, kemudahan konversi.	Harga relatif tinggi.
5.	Sistem Injeksi Fasa Cair	Injeksi LPG fasa cair secara squensial ke dalam saluran intake silinder individual, dekat katup intake.	Cair	Elektronik - Waktu injeksi LPG dihitung berdasarkan waktu injeksi bensin.	Mesin S.I. dengan injeksi bahan bakar <i>multi-point</i> , sensor lambda, katalis dan sistem EOBD.	Dosis bahan bakar yang sangat presisi, kemudahan konversi.	Harga tinggi dan penerapan terbatas - Sistem generasi ke-5 biasanya didedikasikan untuk model mobil tertentu.
6.	Sistem Injeksi Langsung	Injeksi LPG cair langsung ke ruang bakar.	Cair	Elektronik - Waktu injeksi LPG dihitung dengan lebih teliti, mengakomodasi sinyal turbo/supercharger.	Mesin S.I. dengan injeksi bahan bakar <i>multi-point</i> , atau GDI.	Sistem injeksi ke ruang bakar mampu memperbaiki efisiensi volumetric.	Harga tinggi dan penerapan terbatas - Kendaraan LPG dengan sistem injeksi langsung biasanya tersedia sebagai produk OEM, bukan produk konversi.

Dari enam model LPG kits yang sekarang tersedia, secara umum dapat dibagi dalam kedua kelompok utama, yaitu sistem pemasukan dengan LPG fasa gas dan fasa cair. Pada LPG kit dengan sistem pemasukan fasa gas (generasi pertama sampai keempat), umumnya terjadi penurunan daya mesin akibat efisiensi volumetrik yang menurun. LPG fasa gas mengambil ruangan udara yang memasuki mesin [40]–[43]. Selain itu, gas LPG yang diumpangkan ke mesin memiliki temperatur yang tinggi akibat pertukaran kalor pada *vaporizer*, LPG menyerap kalor dari aliran *engie coolant* yang melintasi rongga-rongga *vaporizer* [44]. Resiko ini bisa dikurangi atau bahkan dihilangkan dengan sistem injeksi fasa cair, meskipun biaya konversinya menjadi lebih mahal, terutama untuk sistem injeksi langsung yang merupakan *emerging technology*.

## 4.2. Tantangan Riset dan Implementasi

Saat ini dan kedepan, tantangan pengembangan sistem propulsi otomotif adalah pada pemenuhan bahan bakar yang rendah emisi. Oleh karena itu, meskipun LPG kits generasi pertama (sistem vakum yang diatur secara manual) adalah LPG kit yang paling mudah diaplikasikan, namun dengan standar emisi yang ketat, sistem ini tidak prospektif untuk dikembangkan. Bahkan, di negara-negara maju seperti Jepang dan Australia, LPG kits generasi pertama ini sudah lama ditinggalkan. LPG kits generasi kedua juga hampir sama, aplikasi secara besar juga akan bertentangan dengan standar baku mutu emisi gas buang. LPG kit generasi ketiga sampai generasi keempat adalah teknologi yang realistis untuk diaplikasikan saat ini dan mungkin sampai beberap tahun kedepan. Riset dalam bidang pengaturan *Air to Fuel Ratio* (AFR) dan manajemen pembakaran rendah emisi masih terbuka untuk peningkatan efisiensi bahan bakar dan juga masalah emisi [35], [45]–[47].

Sementara itu, untuk LPG kits generasi keenam (*Liquid Phase Direct Injection*, LPDI), dimana LPG cair diinjeksikan langsung ke ruang bakar adalah teknologi yang paling baik untuk mengatasi masalah efisiensi volumetrik pada generasi-generasi sebelumnya. Namun demikian, dengan tekanan tinggi, durasi injeksi umumnya lebih pendek dan lebih kompleks, membutuhkan sistem elektronik yang andal dan mampu mengendalikan mesin pada kecepatan tinggi. Beberapa laporan penelitian yang berkaitan dengan LPGDI LPG kits ini ditemukan dalam rangka pengembangan dan implementasi yang lebih kompleks [16][34]–[37]. Namun, karena tantangan pada manajemen kontrol bahan bakar untuk setiap mesin, LPG kits jenis LPDI tidak dikembangkan secara universal seperti generasi sebelumnya, melainkan tersedia sebagai produk OEM, bukan produk konversi. Selain tantangan riset dalam hal pengaturan injeksi, LPDI juga membuka peluang riset dalam hal pengembangan injektor yang tahan terhadap temperatur tinggi.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil analisis, kami menemukan bahwa perkembangan LPG kits mengikuti perkembangan teknologi mesin S.I. dengan bahan bakar bensin. LPG kits sistem vakum kontrol manual setara dengan sistem karburator pada mesin bensin, sedangkan sistem vakum yang diatur secara elektronik setara dengan sistem K-Jetronik. Selanjutnya, untuk sistem injeksi fasa gas konstan setara dengan sistem injeksi sistem simultan. Pada LPG kits generasi keempat dan kelima, yaitu sistem injeksi fasa gas squensial dan sistem injeksi cair squensial setara dengan sistem injeksi MPI squensial pada mesin bensin, dimana bahan bakar diumpungkan pada setiap saluran masuk secara independent, tergantung jumlah silinder. Terakhir, sistem injeksi langsung pada mesin LPG setara dengan sistem *gasoline direct injection* (GDI) pada mesin bensin, dimana LPG diinjeksikan secara langsung ke ruang bakar yang memungkinkan untuk menghasilkan daya yang lebih baik. Tren perkembangan ini selain untuk meningkatkan efisiensi juga untuk mengikuti aturan standar emisi gas buang yang semakin ketat. Sebagai kesimpulan, dalam rangka pemenuhan standar kendaraan rendah emisi, LPG kit generasi pertama dan kedua adalah teknologi yang tidak kompetitif untuk diimplementasikan. LPG kits generasi ketiga, keempat dan kelima, dimana sistem pemasukan bahan bakar telah diatur secara lebih teliti oleh ECU dengan memperhatikan *feedback* dari oksigen sensor, masih memberikan peluang implementasi secara besar dan membuka peluang riset baru terutama dalam hal kontrol emisi. Sementara itu, tantangan riset dan implementasi yang nyata adalah pada LPG kits generasi keenam (LPDI) dimana LPG diinjeksikan langsung ke ruang bakar. Sistem pengaturan yang kompleks dan desain injektor yang tahan temperatur tinggi merupakan isu utama riset dalam pengembangan LPDI.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Achtnicht, G. Bühler, and C. Hermeling, "The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, no. 3, pp. 262–269, 2012.
- [2] G. Joshi, J. K. Pandey, S. Rana, and D. S. Rawat, "Challenges and opportunities for the application of biofuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, no. March, pp. 850–866, 2017.
- [3] M. V. Rodionova *et al.*, "Biofuel production: Challenges and opportunities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 12, pp. 8450–8461, 2017.
- [4] S. H. Gheewala, B. Damen, and X. Shi, "Biofuels: Economic, environmental and social benefits and costs for developing countries in Asia," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 4, no. 6, pp. 497–511, 2013.
- [5] A. Demirbas, "Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 8, pp. 2106–2116, 2008.
- [6] Roni Muhammad Susanto and M. Setiyo, "Natural Gas Vehicle (NGV) : Status Teknologi dan Peluang Status Teknologi dan Peluang Pengembangannya," *Automotive Experiences*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6,

- 2018.
- [7] I. C. Setiawan, "Policy Simulation of Electricity-Based Vehicle Utilization in Indonesia (Electrified Vehicle - HEV, PHEV, BEV and FCEV)," *Automotive Experiences*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.
  - [8] M. Messagie, K. Lebeau, T. Coosemans, C. Macharis, and J. Van Mierlo, "Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 5, no. 12, pp. 5020–5033, 2013.
  - [9] EIA, "Global Transportation Energy Consumption: Examination of Scenarios to 2040 using ITEDD," Washington DC, 2017.
  - [10] Deendarlianto *et al.*, "Scenarios analysis of energy mix for road transportation sector in Indonesia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, no. November, pp. 13–23, 2017.
  - [11] L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršiene, and M. Starevičius, "Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 513–525, 2014.
  - [12] L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršiene, and M. Starevičius, "Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, 2014.
  - [13] WLPGA, "Autogas Incentive Policies," Neuilly-sur-Seine, 2018.
  - [14] European LPG Association, *Autogas in Europe , The Sustainable Alternative: An LPG Industry Roadmap*. Brussels: AEGPL, 2013.
  - [15] M. R. Werpy, A. Burnham, and K. Bertram, "Propane Vehicles : Status, Challenges, and Opportunities," Argonne, 2010.
  - [16] J. Kim, K. Choi, C. L. Myung, and S. Park, "Experimental evaluation of engine control strategy on the time resolved THC and nano-particle emission characteristics of liquid phase LPG direct injection (LPG-DI) engine during the cold start," *Fuel Processing Technology*, vol. 106, pp. 166–173, 2013.
  - [17] G. Li, L. Li, Z. Liu, Z. Li, and D. Qiu, "Real time NO emissions measurement during cold start in LPG SI engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 9, pp. 2508–2516, 2007.
  - [18] A. Ugurlu and M. Gumus, "Exergetic analysis of an LPG evaporator/regulator with thermal storage," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17984–17992, 2017.
  - [19] Propane Education and Research Council, *Converting Vehicles to Propane Autogas Part 1 : Installing Fuel Tanks and Fuel Lines*. Washington, D.C.: Propane Education & Research Council, 2011.
  - [20] Propane Education and Research Council, *Converting Vehicles to Propane Autogas Part 1 : Installing Fuel Tanks and Fuel Lines*. Washington, D.C, 2011.
  - [21] Piotr Zloty, "Autogas system generations," *Global LPG & CNG Portal*, 2012. [Online]. Available: <http://gazeo.com/automotive/technology/Autogas-system-generations,article,6486.html>. [Accessed: 20-May-2019].
  - [22] B. C. Purnomo and N. Widodo, "Torque and Power Characteristics of Single Piston LPG-Fueled Engines on Variations of Ignition Timing," *Automotive Experiences*, vol. 2, no. 1, pp. 22–27, 2019.
  - [23] M. Setiyo, B. Waluyo, M. Husni, and D. W. Karmiadji, "Characteristics of 1500 CC LPG fueled engine at various of mixer venturi area applied on Tesla A-100 LPG vaporizer," *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 10, 2016.
  - [24] Md. Ehsan, "Effect of Spark Advance on A Gas Run Automotive Spark Ignition Engine," *Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 42–49, 2006.
  - [25] B. Erkus, A. Surmen, M. I. Karamangil, R. Arslan, and C. Kaplan, "The effect of ignition timing on performance of LPG injected SI engine," *Energy Education Science and Technology Part a-Energy Science and Research*, vol. 28, no. 2, pp. 1199–1206, 2012.
  - [26] CRD Performance, "Explaining the Different Type of Conversions," *LPG Technical Information*. [Online]. Available: <https://www.crdperformance.com/lpg/lpg-conversions/lpg-technical-information/>. [Accessed: 12-Dec-2018].
  - [27] M. A. Ceviz and A. Kaleli, "Pressure Regulator Optimization in LPG Fuel Injection Systems," in *International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering*, 2015, no. See, pp. 62–64.
  - [28] P. R. Chitragar, K. V. Shivaprasad, V. Nayak, P. Bedar, and G. N. Kumar, "An Experimental Study on Combustion and Emission Analysis of Four Cylinder 4-Stroke Gasoline Engine Using Pure Hydrogen and LPG at Idle Condition," *Energy Procedia*, vol. 90, no. December 2015, pp. 525–534, 2015.



- [29] B. Erkus, A. Sürmen, and M. I. Karamangil, “A comparative study of carburation and injection fuel supply methods in an LPG-fuelled SI engine,” *Fuel*, vol. 107, pp. 511–517, 2013.
- [30] C. L. Myung, J. Kim, K. Choi, I. G. Hwang, and S. Park, “Comparative study of engine control strategies for particulate emissions from direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase liquefied petroleum gas (LPG),” *Fuel*, vol. 94, pp. 348–355, 2012.
- [31] T. Y. Kim, Y. Lee, C. Kim, and M. Shin, “Effects of shape and surface roughness on icing and condensation characteristics of an injector in a liquid phase LPG injection system,” *Fuel*, vol. 132, pp. 82–92, Sep. 2014.
- [32] X. Q. Li, L. K. Yang, M. Pang, and X. J. Liang, “Effect of LPG Injection Methods on Engine Performance,” *Advanced Materials Research*, vol. 97–101, no. May, pp. 2279–2282, 2010.
- [33] Gazeo, “Autogas system generations,” *Global LPG & CNG Portal*, 2012. [Online]. Available: <http://gazeo.com/automotive/technology/Autogas-system-generations,article,6486.html>. [Accessed: 23-May-2017].
- [34] K. Kim, J. Kim, S. Oh, C. Kim, and Y. Lee, “Lower particulate matter emissions with a stoichiometric LPG direct injection engine,” *Fuel*, vol. 187, pp. 197–210, 2017.
- [35] C. L. Myung *et al.*, “Mobile source air toxic emissions from direct injection spark ignition gasoline and LPG passenger car under various in-use vehicle driving modes in Korea,” *Fuel Processing Technology*, vol. 119, pp. 19–31, 2014.
- [36] T. Y. Kim, C. Park, S. Oh, and G. Cho, “The effects of stratified lean combustion and exhaust gas recirculation on combustion and emission characteristics of an LPG direct injection engine,” *Energy*, vol. 115, no. x, pp. 386–396, 2016.
- [37] K. Kim, J. Kim, S. Oh, C. Kim, and Y. Lee, “Evaluation of injection and ignition schemes for the ultra-lean combustion direct-injection LPG engine to control particulate emissions,” *Applied Energy*, vol. 194, pp. 123–135, 2017.
- [38] “LDI (LPG Direct Injection System),” [www.2a.com.tr](http://www.2a.com.tr). [Online]. Available: <https://www.2a.com.tr/en/product/ldi-lpg-direct-injection-system>. [Accessed: 20-May-2019].
- [39] World LPG Association, “Autogas Incentive Policies, 2017 Edition,” Neuilly-sur-Seine, 2017.
- [40] M. Gumus, “Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark ignition engine,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 10, pp. 1862–1867, 2011.
- [41] M. Masi and P. Gobato, “Measure of the volumetric efficiency and evaporator device performance for a liquefied petroleum gas spark ignition engine,” *Energy Conversion and Management*, vol. 60, pp. 18–27, 2012.
- [42] M. Campbell, L. P. Wyszynski, and R. Stone, “Combustion of LPG in a Spark-Ignition Engine,” *SAE Technical Paper*, vol. 2004-01–09, 2004.
- [43] H. C. Watson and P. X. Phuong, “Why Liquid Phase LPG Port Injection has Superior Power and Efficiency to Gas Phase Port Injection,” *SAE Technical Paper*, vol. 2007-01–35, 2007.
- [44] P. Price, S. Guo, and M. Hirschmann, “Performance of an evaporator for a LPG powered vehicle,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 8–9, pp. 1179–1194, 2004.
- [45] M. A. Ceviz, A. Kaleli, and E. Güner, “Controlling LPG temperature for SI engine applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, pp. 298–305, 2015.
- [46] M. Setiyo and S. Munahar, “AFR and fuel cut-off modeling of LPG-fueled engine based on engine, transmission, and brake system using fuzzy logic controller (FLC),” *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 8, pp. 50–59, 2017.
- [47] K. Kim, K. Y., and K. Lee, “Spray Characteristics of LPG Injection in Liquid Phase,” in *Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System*, 2009, no. July.