

ANALISIS PEMBANGKIT DAYA MIKRO MENGGUNAKAN TURBIN DISK PADA VHTR

Sri Sudadiyo

BPR, Pusat Teknologi dan Keselamatan Nuklir-BATAN

Email: sudadiyo@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PEMBANGKIT DAYA MIKRO MENGGUNAKAN TURBIN DISK PADA VHTR. Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, konsep untuk reaktor temperatur sangat tinggi (*Very High Temperature Reactor/VHTR*) adalah salah satu dari reaktor-reaktor nuklir generasi IV yang mempunyai kemampuan baik untuk alat pembangkit panas dalam produksi hidrogen. Dalam VHTR, gas helium sebagai pendingin mengalir melalui kanal-kanal dengan inti grafit, untuk memproduksi neutron termal. Panas yang diperoleh dari bahan bakar nuklir dipindahkan ke sebuah alat penukar panas yang akan digunakan untuk produksi hidrogen. Selanjutnya, gas hidrogen yang dihasilkan dibakar melalui ruang bakar mikro dan kemudian diekspansikan ke dalam sebuah turbin mikro disk untuk memperoleh kerja poros yang akan dimanfaatkan dalam menggerakkan kompresor dan generator. Turbine gas dan kompresor diletakkan pada satu poros, dimana sekitar 55 % dari daya keluaran untuk memutar kompresor mikro. Metode yang digunakan mengaplikasikan persamaan-persamaan kesetimbangan energi, massa, dan momentum. Efisiensi termal yang diperoleh dari siklus tertutup untuk turbin gas mikro disk ini adalah kira-kira 18 % (ekivalen dengan perbandingan efisiensi Carnot sekitar 65 %), sehingga dapat layak diaplikasikan untuk aplikasi energi nuklir dalam mendukung permintaan energi listrik dan akan sangat menjanjikan untuk fasilitas mendatang.

Kata kunci : Turbin gas *micro-disk*, pembangkit listrik, reaktor temperatur tinggi

ABSTRACT

ANALYSIS OF MICRO POWER GENERATION USING DISK TURBINE AT VHTR. From the viewpoint of energy system and environment, the concept for very high temperature reactor (VHTR) is one of the generation IV nuclear reactors which have good potential for heat generation device in producing hydrogen. Within VHTR, helium as coolant flows through graphite core channels, to produce thermal neutron. The heat was obtained from the nuclear fuel is transferred to a heat exchanger which will be applied for hydrogen production. Furthermore, the resulted hydrogen gas was burnt through micro combustor and then be expanded to a micro-disk turbine for getting shaft work that will be used in driving compressor and generator. Gas turbine and compressor were placed in the single shaft, in which it was about 55 % of power output for running the micro compressor. The method applies the balance equations of energy, mass, and momentum. The obtained thermal efficiency of the closed cycle for micro-disk gas turbine was approximate 18 % (equal to the Carnot efficiency ratio of about 65 %), so that it is properly employed for the nuclear energy application in supporting the electricity energy demand and will be very promising for the future facility.

Key words: micro-disk turbine, electrical power, high temperature reactor

PENDAHULUAN

Salah satu problem yang sangat penting yang kita hadapi saat ini adalah pemanasan global (*global warming*) akibat emisi karbon dioksida (CO₂). Dan salah satu hasil dari *Kyoto Protocol* adalah agar melakukan perubahan iklim dengan tujuan untuk menurunkan emisi CO₂ dunia. Jika kita menggunakan energi baru dan terbarukan untuk pembangkit listrik, penyediaan air panas, dan kendaraan, maka kita kurang bergantung pada bahan bakar fosil (*fossil fuel*) sehingga dapat mengurangi emisi CO₂. Dengan alasan tersebut diatas, sangat

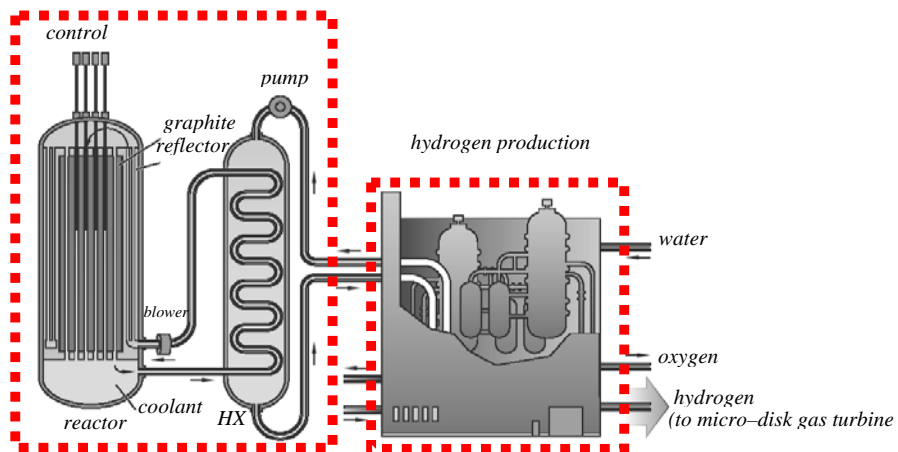
penting bagi kita untuk meningkatkan pendayagunaan sistem energi dari penggerak mula termasuk diantaranya motor bensin, motor diesel dan turbin gas.

Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan seperti uraian di atas, diusulkan sebuah model sistem turbin gas *micro-disk* untuk aplikasi alat pembangkit listrik dengan daya keluaran 3 kW dan efisiensi termal siklus yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan turbin gas konvensional untuk daya keluaran yang sama. Lebih lanjut dalam siklus turbin gas *micro-disk* ini, gas buang hasil pembakaran tidak menghasilkan CO₂ sama sekali, karena tidak memakai bahan bakar fosil dan karena juga menerapkan teknologi pembakaran udara dengan temperatur tinggi^[1] sehingga hanya akan menghasilkan uap air sebagai produk pembakaran yang bersih dan ramah lingkungan.

Tujuan utama dalam makalah ini adalah pengembangan alat pembangkit listrik berdaya mikro menggunakan turbin *disk* yang diharapkan mampu untuk mengatasi keterbatasan persediaan energi listrik dengan harga per kWh yang jauh lebih murah dibandingkan dengan harga yang dihasilkan oleh pembangkit berdaya besar, terutama untuk daerah-daerah terpencil yang tersebar di ribuan pulau di seluruh Indonesia. Secara umum, motivasi dari penelitian ini adalah mampu meningkatkan peranan perangkat nuklir sebagai salah satu cara untuk meningkatkan produksi industri nasional dengan mewujudkan instalasi teknologi pembangkit daya listrik yang handal, aman, dan tidak merusak lingkungan karena memanfaatkan energi baru dan terbarukan.

DESKRIPSI VHTR

Konsep reaktor temperatur sangat tinggi (*Very High Temperature Reactor/VHTR*) adalah salah satu jenis dari enam teknologi reaktor nuklir yang dikembangkan oleh forum internasional generasi IV sebagai pilihan untuk alat pembangkit panas untuk produksi hidrogen, dimana gas helium sebagai media pendingin disirkulasikan melalui kanal-kanal dengan inti grafit untuk memproduksi neutron panas (*thermal neutron*).



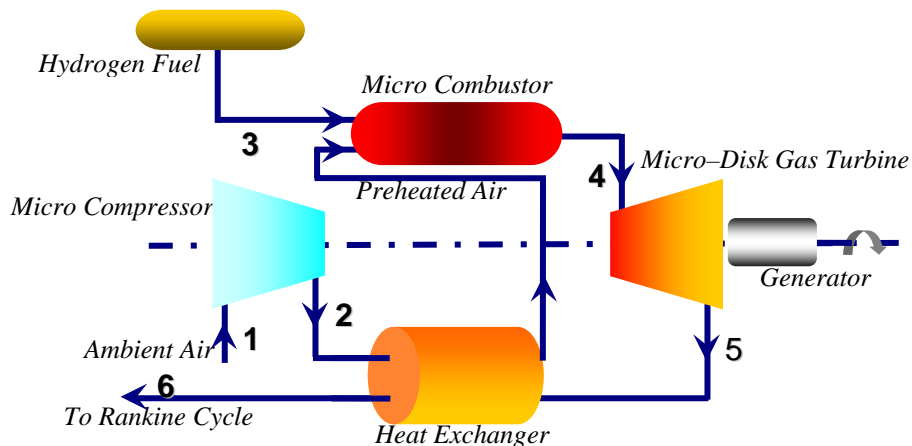
Gambar 1. Sistem reaktor nuklir temperatur sangat tinggi untuk produksi hidrogen^[2]

Panas yang dihasilkan dari bahan bakar nuklir tersebut dipindahkan melalui sebuah alat penukar panas (*heat exchanger device*) yang dapat diaplikasikan untuk proses panas dalam siklus tak langsung (*indirect cycle*) seperti produksi hidrogen, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1^[2]. Gas hidrogen yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai

bahan bakar untuk pembangkit listrik berdaya mikro yang beroperasi dengan prinsip siklus Brayton dimana udara termampatkan dicampur dengan bahan bakar hidrogen pada kondisi tekanan tetap.

DASAR TEORI

Model dari pembangkit listrik berdaya mikro dengan menggunakan turbin gas *micro-disk* ini dikembangkan untuk menguji pengaruh dari berbagai macam parameter dengan memakai persamaan-persamaan energi, massa, dan momentum terhadap unjuk kerja sistem dengan teknologi pembakaran temperatur tinggi dimana proses dalam kombustor mikro mampu memberikan nyala stabil (*stable flame*) walaupun bahan bakar yang diberikan mempunyai nilai kalor rendah. Parameter yang diuji tersebut adalah perbandingan tekanan kompresor, temperatur, dan perbandingan panas spesifik. Diskusi yang akan dibahas pada bagian berikutnya dapat memberikan informasi bahwa sistem dari model turbin *disk* yang diusulkan ini mempunyai kemampuan baik untuk peningkatan efisiensi thermal siklus hingga beberapa persen dalam beberapa skenario. Gambar 2 menampilkan siklus turbin gas *micro-disk* dengan temperatur tinggi berikut berbagai komponen utamanya yang terdiri dari turbin, kompresor, ruang bakar, dan alat penukar panas. Siklus dari model turbin *disk* ini menggunakan media gas hasil pembakaran antara udara dan hidrogen sebagai fluida kerja diantara kompresor dan turbin dengan harga perbandingan panas jenis sebesar 1,3. Gas hasil pembakaran tersebut merupakan media kerja yang sangat bagus untuk model yang dikembangkan ini karena tidak menghasilkan CO₂ dan juga mempunyai sifat panas yang bagus. Dalam siklus ini, hidrogen dibakar dalam ruang bakar mikro hingga mencapai tekanan 0,1 MPa dan temperatur maksimum yang terjadi adalah 1178 K, dan kemudian akan diekspansikan melalui turbin *disk* untuk menghasilkan kerja poros yang sangat bermanfaat untuk memutar kompresor dan generator listrik.

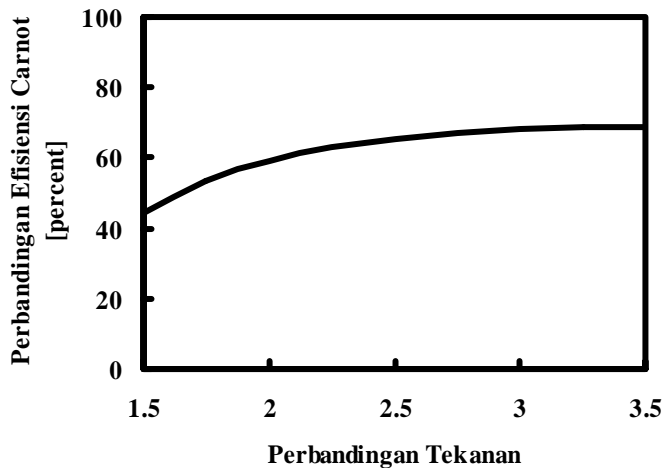


Gambar 2. Siklus turbin gas *micro-disk* untuk alat pembangkit listrik ^[3]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Siklus turbin gas *micro-disk* dengan temperatur tinggi ini dapat memberikan keuntungan dalam perbaikan efisiensi thermal secara keseluruhan dari sistem dengan

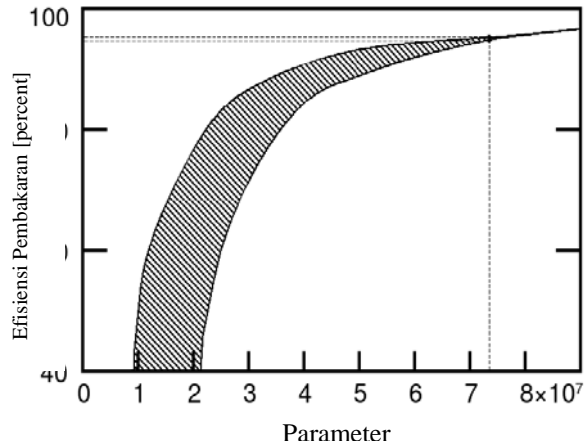
mengambil asumsi bahwa tidak ada kerugian tekanan dalam ruang bakar dan alat penukar panas. Gambar 3 merupakan hasil simulasi yang menunjukkan efisiensi thermal dari siklus turbin gas *micro-disk* untuk perbandingan tekanan kompresor 2,5 adalah sekitar 18 % atau setara dengan harga perbandingan efisiensi Carnot (*Carnot Efficiency Ratio/CER*) sebesar 65 % yang terjadi pada kondisi temperatur masuk turbin 1150 K. Nilai ini adalah lebih besar daripada yang diperoleh dari siklus Brayton dengan menggunakan turbin gas konvensional (dengan efisiensi termal sekitar 6%) pada kondisi operasi yang sama. Gambar 4 menunjukkan pengaruh dari dimensi ruang bakar terhadap efisiensi pembakaran antara hidrogen sebagai bahan bakar dan udara, dimana setiap titik pada kurva tersebut ditentukan pada perbandingan tekanan optimum untuk kondisi kerja tertentu. Dari hasil analisa numerik yang dilakukan, sangat menarik untuk dicatat bahwa pada perbandingan tekanan optimum dapat diketahui bahwa efisiensi thermal yang diperoleh tidak begitu berpengaruh terhadap penurunan tekanan pada alat penukar kalor.



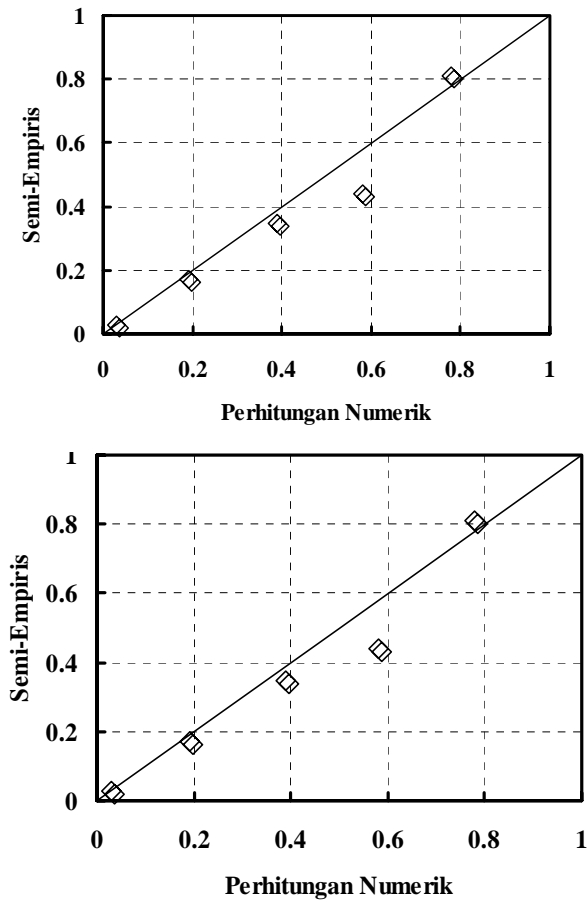
Gambar 3. Kurva antara perbandingan tekanan kompresor dan CER pada kondisi temperatur masuk turbin 1150 K

Dan juga dapat diketahui dengan baik bahwa dalam siklus turbin *disk* ini, temperatur maksimum mempunyai pengaruh besar terhadap efisiensi termal. Rotor turbin yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari kumpulan *disk* dengan bentuk dan dimensi yang sama, sedangkan material yang dipakai adalah keramik agar turbin mampu beroperasi pada temperatur tinggi.

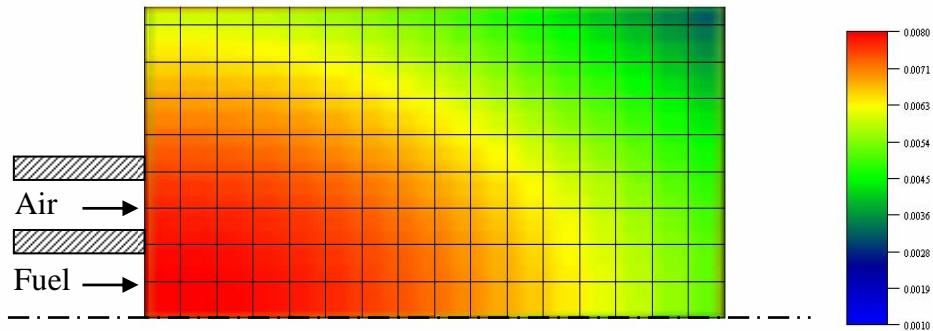
Distribusi temperatur melalui ruang bakar mikro dapat dievaluasi dengan faktor bentuk yaitu korelasi diantara panjang dan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang melalui kombustor. Penyelesaian menggunakan formula semi empiris diperlukan untuk memvalidasi hasil dari *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Gambar 5 menampilkan perbandingan antara hasil-hasil yang diperoleh dari simulasi numerik dan dari formula semi empiris, dan terlihat bahwa hasil-hasil tersebut mempunyai hubungan yang sesuai dengan selisih kira-kira 0,006. Sedangkan Gambar 6 memberikan informasi tentang simulasi numerik dari fraksi campuran antara hidrogen dan udara pada setiap titik dalam kombustor mikro yang terbakar dengan sangat cepat. Jadi waktu yang diperlukan untuk reaksi pembakaran adalah lebih pendek daripada waktu untuk pencampuran antara bahan bakar dan udara.



Gambar 4. Pengaruh dimensi ruang bakar mikro terhadap efisiensi pembakaran^[3,4]



Gambar 5. Perbandingan hasil antara komputasi numerik dan penyelesaian semi-empiris untuk faktor bentuk

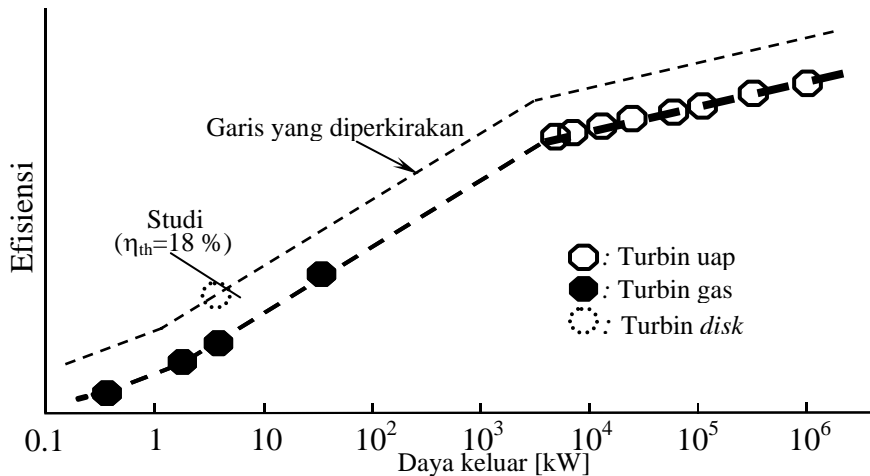


Gambar 6. Distribusi fraksi campuran dalam ruang bakar mikro

Perbaikan efisiensi termal dalam siklus turbin gas dapat dilakukan dengan mengaplikasikan alat pengguna ulang panas (*heat recovery*) yaitu suatu alat penukar panas dengan aliran berlawanan arah, dimana panas dipindahkan dari gas buang turbin ke gas buang kompresor, seperti yang digunakan dalam model sekarang. Selain itu, peningkatan dalam perbandingan tekanan kompresor dapat juga memperbaiki efisiensi termal siklus turbin gas *micro-disk* karena terjadi peningkatan suhu buang kompresor. Jika temperatur masuk turbin tetap karena dibatasi oleh kondisi material, maka kenaikan perbandingan tekanan kompresor dapat menurunkan kerja spesifik per satuan waktu dari siklus sehingga membutuhkan aliran gas hasil pembakaran yang lebih banyak untuk dapat memproduksi kerja keluaran per satuan waktu dengan harga yang sama. Apabila kompresor beroperasi pada beda tekanan yang lebih besar akan dapat menurunkan efisiensi adiabatik proses sehingga dapat membuat siklus aktual menjadi kurang efisien. Efisiensi termal siklus turbin gas ini juga dapat ditingkatkan dengan menggunakan kompresor bertingkat banyak karena efisiensi adiabatik kompresor diperbaiki dengan bekerja pada beda tekanan yang lebih kecil sehingga dapat mengurangi kerja kompresor yang dibutuhkan dan dapat menaikkan kerja spesifik siklus tersebut. Penggunaan kompresor bertingkat banyak dapat menurunkan suhu buangan kompresor jika dibandingkan dengan menggunakan kompresor satu tingkat saja, akibatnya lebih banyak panas yang diperlukan untuk memanaskan udara pembakaran agar dapat mencapai temperatur masuk turbin.

Seperti telah dijelaskan di depan bahwa dalam penelitian sekarang, perbaikan efisiensi thermal siklus turbin gas dilakukan dengan cara menaikkan efisiensi adiabatik dari turbin yaitu dengan menggantikan turbin konvensional dengan turbin *disk*. Definisi dari turbin *disk* adalah turbin gas dengan rotor yang terbuat dari sekumpulan *disk* tipis yang mempunyai bentuk dan ukuran yang sama^[3,5]. *Disk-disk* tersebut terbuat dari bahan keramik agar dapat mempertahankan kondisi kerja pada suhu tinggi (diatas 1000 K). Ketebalan dari *disk* ini dapat dibuat sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan, dan dimensi rotor turbin juga dapat dirancang sesuai dengan daya poros yang dipersyaratkan. Selanjutnya gas hasil pembakaran dengan temperatur tinggi dialirkan melalui *converging-diverging nozzle* yang keluar dengan kecepatan supersonik mengenai sudu-sudu di sekeliling *disk* untuk memproduksi gaya impuls dan untuk memberikan tenaga. Dari hasil perhitungan yang dilakukan dengan mengaplikasikan persamaan-persamaan kesetimbangan energi, massa, dan momentum telah diperoleh CER thermal dari siklus dengan mengaplikasikan turbin *disk*

adalah diatas 65 %, seperti terlihat pada Gambar 7 yang menampilkan perbandingan unjuk kerja antara turbin uap dan turbin gas. Seperti terlihat dalam Gambar 7 tersebut bahwa garis prediksi (*predicted line*) untuk perbandingan ini sangat penting dalam pengertian untuk analisa awal dan dalam penentuan kondisi operasi dari perancangan turbin *disk* dengan daya yang dipersyaratkan dan bahan rotor yang digunakan adalah keramik.



Gambar 7. Diagram unjuk kerja untuk pembangkit listrik dengan menggunakan turbin uap, turbin gas, dan turbin *disk*

KESIMPULAN

Kajian dari siklus turbin gas *micro-disk* dengan daya keluaran 3 kW untuk sistem pembangkit listrik masa depan telah didiskusikan. Untuk temperatur masuk turbin 1150 K dan perbandingan tekanan kompresor sebesar 2,5 akan diperoleh efisiensi termal siklus sekitar 18 persen (CER = 65 %). Apabila digunakan poros tunggal untuk meletakkan turbin gas *micro-disk*, kompresor, dan generator, maka kira-kira 55 % daya keluaran turbin dipakai untuk memutar kompresor dan selebihnya digunakan untuk menggerakkan generator listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung kegiatan penelitian ini, sehingga dapat terselesaikan. Terima kasih juga kami sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ABRAMS, B., *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf), 2002.

-
2. SUDADIYO, S., *Doctoral Thesis*, Tohoku Univesity, Jepang, 2006.
 3. SAITOH, T.S., *Shinla Turbine System, the Innovative Next Generation Thermal Electric System Superior to Photovoltaic Cell / Fuel Cell*, Press Information, Tohoku University Group, 2004.
 4. TSUJI, H., GUPTA, A.K., HASEGAWA, T., KATSUKI, M., KISHIMOTO, K., MORITA, M., *High Temperature Air Combustion – From Energy Conservation to Pollution Reduction*, CRC Press, 2003.
 5. LEFEBVRE, A.H., *Gas Turbine Combustion*, 2nd Edition, Taylor and Francis, London, 1999.