



Kontrol Traksi Mobil Elektrik Berbasis Model Kendaraan Tanpa Slip

Pratikto^{*,**}, Yul Yunazwin Nazaruddin^{**}, Edi Leksono^{**}, Zainal Abidin^{***}

*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung Indonesia

**Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung Indonesia

***Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung Indonesia

Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds Ciwaruga, Bandung, Telp dan Fax (022) 2013789 dan 2013788

e-mail: : pratikto@hotmail.co.jp

Abstrak

Pada makalah ini dibahas pengembangan kontrol traksi untuk sebuah mobil elektrik dengan metoda yang dikembangkan berdasarkan keadaan kecepatan sebuah model kendaraan yang tidak mengalami slip. Pada prinsipnya sebuah kendaraan dapat bergerak maju dengan adanya gaya traksi yang disebabkan adanya gaya gesekan antara roda dan jalan. Namun apa bila jalan sangat licin, gaya traksi tersebut akan menjadi mengecil bahkan dapat menuju nol bila slip terlalu besar. Prinsip dasar metode yang dikembangkan adalah membandingkan kondisi nyata kendaraan dan model untuk memperoleh nilai torsi yang dapat menekan terjadinya slip suatu roda agar traksi yang terjadi dapat dipertahankan pada nilai yang mendekati nilai maksimum. Pengontrolan dilakukan pada kecepatan roda agar mengikuti nilai referensi yang dihasilkan oleh model kendaraan yang digunakan sebagai referensi. Nilai kecepatan roda referensi dipilih sedemikian sehingga sesuai dengan nilai kecepatan roda kendaraan jika tidak mengalami slip. Nilai torsi yang diberikan pada roda dapat melebihi nilai yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan sedemikian sehingga percepatan tidak dapat bertambah secara berarti lagi dengan menambahkan torsi tersebut. Kelebihan torsi hanya mengakibatkan roda berputar dengan pergeseran yang lebih cepat dari pergeseran badan kendaraan. Apabila nilai keadaan kecepatan roda kendaraan nyata dan kendaraan model dibandingkan maka diperoleh selisih nilai kecepatan yang dapat digunakan untuk menentukan nilai torsi yang tepat untuk roda. Nilai torsi masukan pada roda dapat dikontrol dengan menggunakan umpan balik yang diperoleh dari perbedaan kecepatan roda yang dikontrol dan yang dihitung dari model. Penerapan metode ini dapat mengurangi kecepatan roda ketika melintasi jalan yang licin dengan kondisi slip pada

kecepatan 11 m/s menjadi 7 m/s sementara kecepatan normalnya adalah sekitar 2 m/s. Eksperimen menunjukkan bahwa besarnya pengurangan kecepatan roda ketika slip dapat ditingkatkan dengan melakukan penentuan harga penguatan umpan balik yang tepat.

Kata kunci: slip roda, kontrol traksi, model roda

1. PENDAHULUAN

Kendaraan atau mobil merupakan kebutuhan masyarakat modern, dan keamanan dalam berkendara adalah konsekuensi yang sangat penting dalam kehidupan. Dalam beberapa dekade yang lampau sistem kontrol dinamika dari kendaraan telah dikembangkan untuk meningkatkan kemudahan dan keamanan dalam berkendara. Pengontrolan dinamika kendaraan ditujukan untuk menghindari perilaku kendaraan yang tak diinginkan dengan cara menerapkan kontrol yang aktif dan membantu pengemudi dalam menjalankan kendaraan. Di antaranya adalah *Antilock Breaking Systems (ABS)* yang diterapkan untuk menghindari terjadinya roda terkunci akibat pengereman. Ini telah menjadi peralatan yang biasa dalam produksi kendaraan. Kontrol traksi juga menjadi populer untuk menghindari penggerak roda mengalami kehilangan cengkraman ketika dalam kondisi percepatan.

Bertambahnya jumlah mobil mengakibatkan meningkatnya polusi udara terutama di kota-kota besar. Hal ini disebabkan mobil yang ada hampir semua menggunakan bahan bakar fosil yang diubah menjadi tenaga mekanik dengan cara proses pembakaran. Pesatnya jumlah kendaraan



menunjukkan tingkat kebutuhan akan kendaraan tersebut tidak dapat dibendung. Sementara di pihak lain kebutuhan untuk memelihara lingkungan hidup tidak pula dapat ditunda lagi. Sementara itu persediaan sumber energi yang diperoleh dari bahan bakar fosil semakin lama jumlahnya semakin menyusut (Jonasen, 2005), sehingga diperlukan sumber energi pengganti dalam mendukung transportasi.

Sisi lain dalam permasalahan transportasi adalah kebutuhan peningkatan kenyamanan, jaminan keselamatan, dan ketertiban, dimana hal ini menjadi penting dan harus segera dicapai pada kondisi arus mobilitas yang sangat tinggi seperti sekarang ini. Sehubungan dengan faktor keselamatan ini sebuah sistem ABS (Lennon dkk., 1999) dapat dimanfaatkan agar kendaraan dapat secepat mungkin berhenti dengan aman.

Sebuah sistem kendaraan yang dikenal dengan sebutan mobil elektrik dapat menjadi alternatif yang cocok untuk dipilih dengan dipenuhinya kriteria mobil transportasi masa depan yang ramah lingkungan, efisien, tenang (kebisingan rendah), nyaman, terpercaya dari segi keselamatan penumpang dalam mobil maupun dalam mobil lain yang bersama sama dalam satu komunitas kendaraan. Integrasi dengan perangkat elektronik yang menunjang peningkatan keselamatan dapat pula dilakukan dengan kompatibilitas yang baik pada mobil elektrik. Perangkat tambahan dapat juga dipasang pada sebuah mobil elektrik misalnya sebuah perangkat komunikasi yang disebut dengan *Car to Car Communication*, yang telah dikembangkan oleh perusahaan kendaraan Eropa dapat digunakan untuk menghindari kemungkinan terjadi kecelakaan di jalan raya (Mokaddem, 2005).

Sekarang ini mobil elektrik dengan *fuel cell*, dan kendaraan hibrida telah berkembang sangat cepat sebagai solusi terhadap permasalahan energi dan lingkungan. Sebuah mobil elektrik bergerak dengan memanfaatkan pola kerja motor elektrik yang mempunyai karakteristik merespon dengan cepat melebihi kendaraan bermesin bakar internal (ICE) (Fujimoto dkk., 2004). Sehingga kecepatan sebuah mobil elektrik sangat responsif terhadap pijakan gas yang secara elektrik mengatur arus atau tegangan yang menentukan kecepatan motor roda mobil elektrik tersebut.

Pada kondisi jalan yang licin gerak kecepatan putar roda tidak dapat diikuti oleh kecepatan gerak mobil secara keseluruhan, akibatnya slip atau perbedaan kondisi kecepatan roda dan kendaraan dapat terjadi yang akan menyebabkan kendaraan tersebut tidak terkendali dengan baik sehingga jaminan keselamatan penumpang bisa terancam. Selain itu,

bila slip terjadi pemakaian energi untuk menghasilkan gerak tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan secara baik sehingga menimbulkan pemborosan.

Terkait dengan respon yang cepat tersebut, mobil elektrik juga mempunyai potensi yang menarik dari sudut pandang teknik kontrol, yang berarti bahwapenerapan motor elektrik sebagai penggerak pada mobil elektrik juga memberi peluang suatu penerapan sistem kontrol yang canggih terkait dengan gerak perputaran roda sehingga dapat dengan cepat dan responsif menanggulangi adanya gangguan pada efektifitas gerak roda. Sistem kontrol yang canggih dapat diciptakan baik secara menyeluruh ataupun secara individual pada setiap rodanya.

Sistem kontrol anti slip penting untuk diterapkan demi mempertahankan efektifitas gerak roda, kestabilan gerak kendaraan dan penghematan energi elektrik yang digunakan pada mobil elektrik, mengingat pemakaian energi yang tersimpan pada baterai merupakan hal yang harus mendapatkan perhatian khusus mengingat waktu pengisian baterai belum dapat dilakukan dalam waktu yang singkat.

Peneliti asal China, Dejun Yin (Yin dan Hori, 2009) melakukan penelitian di Hori *Laboratory The University of Tokyo* mendapatkan suatu metode pengontrolan yang didasarkan pada torsi maksimum yang diizinkan agar tidak terjadi slip. Torsi maksimum ditentukan dengan mengabaikan adanya beberapa resistansi gerak antara lain resistansi gerak roda dan hembusan udara yang dialami kendaraan.

Pada makalah ini pokok masalah yang akan dipecahkan adalah bagaimana membangun kontrol traksi sekaligus dapat mengurangi slip yang mungkin terjadi pada sebuah roda. Metode yang diungkapkan ditujukan untuk memperoleh torsi maksimum dengan cara membandingkannya dengan model kendaraan tanpa slip.

Metode yang diusulkan ini dikembangkan dengan menerapkan prinsip *state feedback* untuk membangun sistem kontrol sehingga dinamika mobil dikontrol dengan mengamati perbedaan gerak antara mobil sebenarnya dan mobil model.

2. PEMODELAN SISTEM

Penelitian dilakukan dengan melakukan kajian teoritis mengenai pengembangan metode kontrol yang digunakan, kemudian hasil kajian ini akan di verifikasi melalui suatu eksperimen. Metode yang dikembangkan adalah merupakan metode kontrol traksi berbasis kendaraan tanpa slip untuk



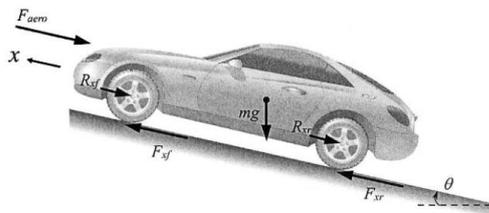
sebuah mobil elektrik. Sistem kontrol yang diperoleh diharapkan mempunyai kemampuan untuk mengurangi slip yang terjadi pada roda.

Dalam pengembangan, sebuah prinsip yang dikenal dengan prinsip *state feedback* yang diterapkan pada kesalahan penjejakan keadaan. Metode yang dihasilkan divalidasi dengan melakukan eksperimen.

2.1. Model Kendaraan Dinamika Roda

Persamaan gerak kendaraan roda empat dapat diturunkan dari hukum Newton. Gambar 1 menunjukkan besaran-besaran yang terlibat pada gerak kendaraan dalam arah longitudinal.

Kesetimbangan gaya sepanjang sumbu longitudinal x kendaraan dinyatakan dengan persamaan (Rajamani, 2006).



Gambar 1. Arah Gerak longitudinal (Rajamani, 2006)

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - m g \sin \theta \quad (1)$$

Dengan F_{xf} , F_{xr} , F_{aero} , R_{xf} , R_{xr} , m , dan θ masing-masing adalah gaya longitudinal roda depan, gaya longitudinal roda belakang, gaya gesek longitudinal ekuivalen udara, gaya resistansi akibat putaran roda depan, gaya resistansi akibat putaran roda belakang, massa kendaraan, percepatan grafitasi, dan sudut kemiringan jalan. Persamaan di atas dapat disederhanakan penulisannya dengan

$$m\ddot{x} = F - R \quad (2)$$

dengan

$$F = F_{xf} + F_{xr} \quad (3)$$

dan

$$R = F_{aero} + R_{xf} + R_{xr} + m g \sin \theta \quad (4)$$

Sementara itu gerak putar sebuah roda dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$J\dot{\omega} = T - rF \quad (5)$$

dengan J , ω , T , r , dan F masing-masing adalah momen inersia roda, kecepatan sudut roda, Torsi pemutar roda, jari-jari efektif roda dan gaya yang bekerja pada roda. Besarnya gaya yang terjadi pada roda dapat dihitung berdasarkan magic formula Pacejka atau dengan model Dugoff (Rajamani, 2006).

Besar gaya F bergantung pada nilai koefisien gesekan antara roda dan jalan μ . Koefisien ini sangat menentukan terjadinya slip pada roda (Fujimoto, 2004).

Dinamika roda dapat dinyatakan secara terpisah terhadap dinamika kendaraan dan dapat dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan. Ruang keadaan sebuah roda dapat ditulis sebagai

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_T(t)T(t) + \mathbf{B}_F(t)F(t) \quad (6)$$

dengan

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ J \end{bmatrix}$$

dan

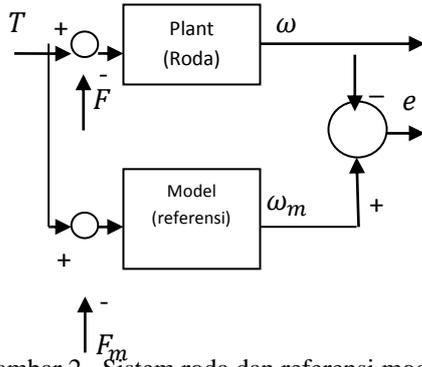
$$\mathbf{B}_F = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ -r \\ J \end{bmatrix}$$

θ , ω , J , dan r masing-masing adalah posisi sudut, kecepatan sudut, momen inersia dan jari-jari roda.

2.2. Pengembangan Metode Kontrol

Dalam sub-pasal ini akan dibahas pengembangan metode kontrol traksi berbasis model kendaraan tanpa slip. Pengembangan sistem kontrol didasarkan pada sebuah prinsip yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

Sebuah roda kendaraan nyata bila dibandingkan dengan modelnya secara diagram blok dapat digambarkan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem roda dan referensi model

Pada kondisi tidak terjadi slip pada roda nilai $F = F_m$, $e = 0$, dan $T = T_M$ dengan T_M adalah torsi maksimum ketika tidak terjadi slip. Dengan kata lain bila $T > T_M$ ataupun $F < F_m$, maka sebuah pengontrol harus dipasang agar torsi input pada roda kembali pada kondisi maksimum sehingga slip tidak terjadi.

Dalam bentuk pernyataan ruang keadaan sistem referensi dapat ditulis dengan persamaan

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m(t)\mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_{Tm}(t)T(t) \quad (7)$$

Sementara untuk roda yang dikontrol dengan

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_T(t)T(t) + \mathbf{B}_F(t)F(t) \quad (8)$$

Dalam hal parameter ruang keadaan $\mathbf{A}_m = \mathbf{A}$, dan $\mathbf{B}_{Tm}(t) \neq \mathbf{B}_T(t)$ maka nilai error dari keadaan memenuhi persamaan

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{e}(t) + [\mathbf{B}_{Tm}(t) - \mathbf{B}_T(t)]T - \mathbf{B}_F(t)F \quad (9)$$

Setelah *statefeedback* (Hendricks dkk., 2008) diterapkan maka menghasilkan

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A}(t) - [\mathbf{B}_{Tm}(t) - \mathbf{B}_T(t)]\mathbf{K}_f)\mathbf{e}(t) + [\mathbf{B}_{Tm}(t) - \mathbf{B}_T(t)]T - \mathbf{B}_F(t)F \quad (10)$$

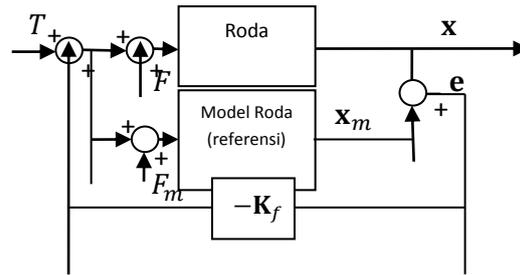
dengan \mathbf{K}_f penguatan umpan balik yang ditentukan dengan metode penempatan kutub, dimana

$$\det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - [\mathbf{B}_{Tm} - \mathbf{B}_T]\mathbf{K}_f)) = 0 \quad (11)$$

Persamaan (11) tidak lain bahwa T berubah menjadi

$$T - \mathbf{K}_f\mathbf{e}$$

sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur sistem dengan *errorfeedback*

Sehingga persamaan (10) dapat ditulis menjadi

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_F(t)(F_m - F) \quad (12)$$

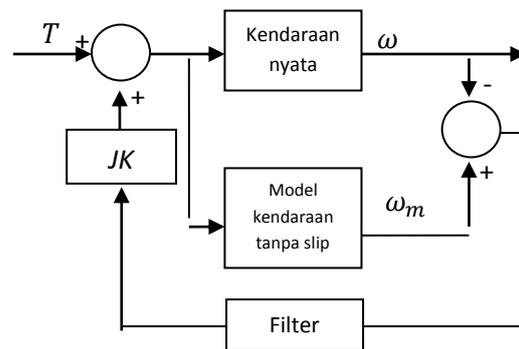
dengan

$$\mathbf{B}_F F_m = [\mathbf{B}_{Tm}(t) - \mathbf{B}_T(t)](T - \mathbf{K}_f\mathbf{e}(t))$$

F_m adalah gaya gesek maksimum roda terhadap jalan pada torsi sebesar $T - \mathbf{K}_f\mathbf{e}(t)$ dari kendaraan model. Untuk suatu kondisi jalan dengan gaya gesekan yang dialami oleh mobil elektrik yang dikontrol sebesar F , dapat diperoleh kesalahan keadaan sebesar $\mathbf{e}_2(t)$ pada $\dot{\mathbf{e}}_2 = 0$, sehingga diperoleh $F_m = F$. Dengan demikian pengontrol selalu mengkondisikan agar torsi yang diberikan pada roda menghasilkan gaya gesekan F sebesar F_m .

Dengan hanya memperhatikan variabel keadaan kecepatan sudut ω sistem kontrol diperlihatkan oleh diagram blok pada Gambar 4. Nilai K ditentukan dari \mathbf{K}_f yakni

$$K = \frac{\mathbf{K}_{f12}}{J} \quad (13)$$



Gambar 4. Struktur Sistem kontrol traksi berbasis model kendaraan tanpa slip.

Nilai torsi maksimum yang dapat diberikan pada roda agar tidak terjadi slip dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut. Substitusi persamaan (2) ke (5) yang memberikan



$$T(s) = (J + J_V(1 + \varepsilon))\dot{\omega} + rR \quad (14)$$

dengan

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\ddot{x}}{r} - \dot{\omega}\right)}{\dot{\omega}} \quad (15)$$

Torsi maksimum tanpa slip T_{Max} dengan mengabaikan adanya resistansi roda dan hembusan angin adalah

$$T_{Max} = T(0) \quad (16)$$

atau

$$T_{Max} = (J + J_V)\dot{\omega}_A \quad (17)$$

dengan

$$J_V = mr^2 \quad (18)$$

Yin dan Hori (2009) mendefinisikan T_{Max} dengan

$$T_{Max} = \left(\frac{J}{\alpha mr^2} + 1\right)rF \quad (19)$$

α adalah factor relaxasi yang merupakan parameter design pengontrol yang diperkenalkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Algoritma yang diusulkan diterapkan pada eksperimen yang dilaksanakan di lingkungan *Hori Laboratory* di *The university of Tokyo*, Japan, untuk mengontrol satu roda penggerak mobil elektrik sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.

Eksperimen dilakukan dengan melewati satu roda penggerak pada lintasan yang di buat lebih licin. Lintasan licin ini terbuat dari fiber yang berpermukaan halus yang dialiri atau dibasahi dengan air. Gambar 6 berikut menunjukkan lintasan licin yang di gunakan untuk menguji performansi strategi kontrol.

Eksperimen kontrol anti slip dilakukan untuk beberapa nilai K antara lain $K = 0$ yakni berarti tanpa pengontrol, $K = 20$ dan $K = 50$.

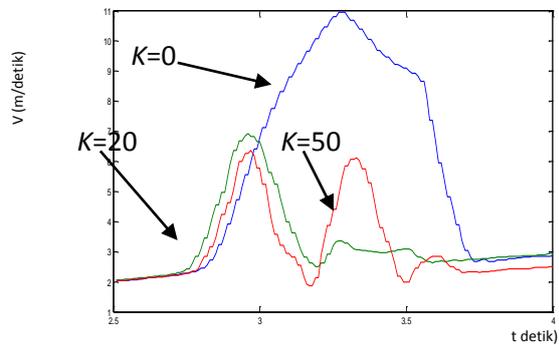


Gambar 5. Mobil elektrik milik *The University of Tokyo*



Gambar 6. Lintasan Licin

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan hasil yang diperoleh dari data kondisi kecepatan roda belakang sebelah kiri ketika slip terjadi pada lintasan licin yang di buat.



Gambar 7. Kurva hasil Eksperimen

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa dengan nilai K yang terlampau tinggi akan terjadi osilasi dan membuat kondisi kecepatan akhir ketika slip sudah tidak terjadi yang lebih kecil dibandingkan dengan kecepatannya bila pengontrol tidak dipasang.

Parameter dari mobil elektrik yang digunakan untuk melakukan eksperimen ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Mobil Elektrik

Berat Total	340 kg
Daya Maksimum	2000 W x 2
Torsi maksimum	100 Nm x 2
Inersia Roda	0,5 kgm ² x 2
Radius Roda	0,22 m
Pengontrol	Pentium M1.8G, 1 G Ram
OS	ART-Linux
Smapling Time	0,01 detik



4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari pembahasan dan kegiatan eksperimen adalah:

- Bahwa slip yang terjadi pada kendaraan dapat di kurangi dengan mengurangi torsi masukan pada rodanya
- Agar slip yang terjadi adalah minimum maka torsi masukan pada roda tidak lebih dari besarnya nilai torsi maksimum tertentu.
- Nilai K yang terlampau tinggi akan menimbulkan osilasi dan membuat kondisi kecepatan akhir rendah.

Dengan nilai K sekitar 20 kontrol anti slip menghasilkan efektifitas yang cukup baik menekan slip roda dari kecepatan 11 m/s menjadi 7 m/s sementara kecepatan normalnya adalah sekitar 2 m/s.

Daftar Pustaka

- [1] Fujimoto, H., Saito T. dan Noguchi T. (2004): Motion Stabilization Control of Electric Vehicle under Snowy Conditions Based on Yaw-Moment Observer, *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2004)*, pp. 35-40
- [2] Jonasson, K. (2005): Control of Hybrid Electric Vehicles with Diesel Engines, *Media-Tryck*, Lund University, ISBN 91-88934-38-1, 2005 (5)
- [3] Lennon, William K. dan Kevin M. Passino, *Intelligent Control for Brake Systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 2, March 1999
- [4] Mokaddem, A. K. (2005): Car to Car Communications at 5,9 GHz, *Workshop on Spectrum Requirement For Road Safety*, Brussels, 28 February 2005.
- [5] Rajamani, R.(2006): *Vehicle Dynamics and Control*, Springer.
- [6] Yin, D. dan Hori, Y.(2009): A Novel Traction Control without Chassis Velocity for Electric Vehicles, *EVS24 Stavanger*, Norway, May 13-16.